

Российская конференция и школа молодых ученых
по актуальным проблемам спектроскопии
комбинационного рассеяния света

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ -
95 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ

5-9 июня 2023 г., Новосибирск

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

НОВОСИБИРСК
2023

УДК 535.375.5
ББК 22.344я43
К63

К63 Комбинационное рассеяние - 95 лет исследований: Тезисы докладов Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам спектроскопии комбинационного рассеяния света, Новосибирск, 5-9 июня 2023 г. / ИФП СО РАН. – М. : Издательство "Перо", 2023. – 156 с.

ISBN 978-5-00218-299-2

В сборник вошли тезисы докладов юбилейной Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам спектроскопии комбинационного рассеяния света (с участием иностранных ученых) «Комбинационное рассеяние – 95 лет исследований», проходившей 5-9 июня 2023 г. в г. Новосибирске.

Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов спектроскопии комбинационного рассеяния света, включая вынужденное, резонансное, гигантское рассеяния, в кристаллах, неупорядоченных средах, органических и неорганических микро- и наноструктурах, в кристаллических, разупорядоченных и биологических объектах.

Материалы отражают новейшие направления развития спектроскопии комбинационного рассеяния света, связанные с установлением физических свойств новых материалов и структур, определением фазового состава различных объектов, перспективных для создания элементов микро-, опто- и наноэлектроники и сенсорики на новых физических принципах, с проведением молекулярного анализа, с распознаванием «живое-неживое» биологических объектов, с развитием принципиально новых по своим возможностям оптических наноскопов и методов исследования неорганических и органических объектов с нанометровым пространственным разрешением.

Сборник может быть полезен специалистам в области физики твердого тела и оптической спектроскопии, а также будет интересен преподавателям технических вузов, аспирантам и студентам.

ISBN 978-5-00218-299-2

УДК 535.375.5
ББК 22.344я43

© ИФП СО РАН, 2023

ОРГАНИЗАТОРЫ



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Веб-сайт: <https://www.isp.nsc.ru/>

КОНФЕРЕНЦИЯ ПРОВОДИТСЯ ПРИ СОДЕЙСТВИИ



Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР



ООО «НТ-МДТ» – группа компаний NT-MDT Spectrum Instruments

Веб-сайт: <http://www.ntmdt-si.ru/>

СПОНСОРЫ



ООО «НОВА СПБ»

(Группа компаний ООО «НТ-МДТ»)

Веб-сайт: <https://spb-novaspb.ru/>



ООО «ИНМИКРО» (Группа «ЭМТИОН»)

Веб-сайт: <https://www.mteon.ru/>



Группа компаний "Научное оборудование"

Веб-сайт: <https://spegroup.ru/>

ПРИ СОДЕЙСТВИИ



Точка кипения - Новосибирск

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Сопредседатели конференции

Латышев А.В.	ИФП СО РАН, г. Новосибирск
Милёхин А.Г.	ИФП СО РАН, г. Новосибирск
Шабанов В.Ф.	ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск

Зам. председателя

Втюрин А.Н.	ИФ СО РАН, г. Красноярск
Суровцев Н.В.	ИАиЭ СО РАН, г. Новосибирск

Ученый секретарь

Аржанникова С.А.	ИФП СО РАН, г. Новосибирск
------------------	----------------------------

Члены программного комитета

Гапоненко С.В.	Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск
Денисов В.Н.	ТИСНУМ, г. Москва, г. Троицк
Красильник З.Ф.	ИФМ РАН, г. Нижний Новгород
Колесов Б.А.	ИНХ СО РАН, г. Новосибирск
Корсаков А.В.	ИГМ СО РАН, г. Новосибирск
Кукушкин И.В.	ИФТТ РАН, г. Черногловка
Кулаковский В.Д.	ИФТТ РАН, г. Черногловка
Кулик Л.В.	ИФТТ РАН, г. Черногловка
Мельник Н.Н.	ФИАН, г. Москва
Наумов А.В.	ИСАН, г. Москва, г. Троицк
Образцова Е.Д.	ИОФ РАН, г. Москва
Поносов Ю.С.	ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург
Шубина Т. В.	ФТИ имени А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург
Щапова Ю.В.	ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель

Каламейцев А.В. ИФП СО РАН, Новосибирск

Члены оргкомитета

Бетеров И.И. ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Володин В.А. ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Есин М.Ю. ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Крылов А.С. ИФ СО РАН, г. Красноярск

Крылова С.Н. ИФ СО РАН, г. Красноярск

Курусъ Н.Н. ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Милахин Д.С. ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Милёхин И.А. НГУ, г. Новосибирск

Окотруб К.А. ИАиЭ СО РАН, г. Новосибирск

Шамирзаев Т.С. ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Адрес и контакты Программного и Организационного комитетов

ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
пр. Ак. Лаврентьева 13, 630090, Новосибирск, Россия

Ученый секретарь конференции - Аржанникова София Андреевна

Тел.: +7(383) 333-24-88; Факс: +7(383) 333-27-71; E-mail: scattering95@isp.nsc.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Нанодиагностика и сенсорика: достижения и перспективы в области флуоресцентной наноскопии и поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния света <i>А.В. Наумов</i>	13
Скандирующая зондовая микроскопия и спектроскопия наноструктур. НТ-МДТ – приборы и возможности <i>В.А. Быков, Ан.В. Быков, А.А. Быков, В.В.Котов, С.И. Леесмент, В.В. Поляков</i>	14
Спектроскопия Манделштама-Бриллюэна биологических материалов <i>Н.В. Суrowцев</i>	15
Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция полупроводниковых наноструктур с нанометровым пространственным разрешением <i>А.Г. Милёхин, I.A. Milekhin, Н.Н. Курусь, Л.С. Басалаева, Р.Б. Васильев, К.В. Аникин, В.Г. Мансуров, К.С. Журавлев, Е.А. Емельянов, М.А. Путьто, В.В. Преображенский, А.В. Латышев, D.R.T. Zahn</i>	16
Комбинационное рассеяние света и низкотемпературные фазовые переходы в керамиках ниобатов серебра и литий-тантал-серебра <i>А.Н. Втюрин, А.С. Крылов, С.Н. Крылова, Е.М. Рогинский, L. Jin, Y. Tian, X. Wei, В.В. Воног</i>	17
Спектроскопия комбинационного рассеяния нового класса наноалмазов, синтезированных из адамантана <i>О.С. Кудрявцев, Р.Х. Баграмов, Д.Г. Пастернак, А.М. Сатанин, О.И. Лебедев, В.П. Филоненко, И.И. Власов</i>	18
КРС и ОДМР спектроскопия NV ⁻ центров в нанослоях и наностолбах (111) алмаза после травления сфокусированным пучком ионов Ga ⁺ <i>С.Н. Подлесный, В.А. Антонов, И.А. Карташев, В.П. Попов</i>	19
Комбинационное рассеяние света в системе V – O (ванадий – кислород) <i>П.В. Швец, К.Ю. Максимова, А.Ю. Гойхман</i>	20
КР-картирование включений и содержащих их минералов <i>А.В. Корсаков, С.П. Демин</i>	21
Деформационный и электрооптический механизм комбинационного рассеяния света в модели «заряд на связи»: моделирование и сравнение с экспериментом для короткопериодных сверхрешёток GaAs/AlAs <i>В.А. Володин, В.А. Сачков</i>	22
Мульти-модальный конфокальный микроспектрометр нового поколения для много-фотонных оптических экспериментов на нано-масштабе <i>Д.А. Козодаев, Е.В. Кузнецов, М.А. Трусов</i>	23
Исследование мультиферроика TbFe _{2.46} Ga _{0.54} (VO ₃) ₄ методом КРС: угловые зависимости, фазовая диаграмма давление-температура <i>С.Н. Крылова, А.С. Крылов, И.А. Гудим, А.Н.Втюрин</i>	24
КР исследование разложения карбонатов в водном флюиде при высоких <i>P-T</i> параметрах <i>С.В. Горайнов, А.С. Крылов, У.О. Бородина, С.Н. Крылова, А.Ю. Лихачева, С.Н. Гришина</i>	25
Терморамановская <i>in situ</i> спектроскопия природного кубанита CuFe ₂ S ₃ и <i>ab initio</i> расчеты его фононного спектра <i>Е.А. Панкрушина, С.Л. Вотяков, Е.В. Комлева</i>	26
Полиморфные превращения в пленках CaSi ₂ , формируемых при радиационно-стимулированном росте <i>А.В. Кацюба, А.В. Двуреченский, Г.Н. Камаев, В.А. Володин, П.А. Кучинская</i>	27
Теоретическое моделирование спектральных характеристик и нелинейных эффектов в кристаллах металлоорганических каркасов <i>И.Д. Юшина, А.С. Крылов</i>	28
Определение кристаллографической ориентировки кристаллов алмаза методом спектроскопии комбинационного рассеяния света <i>Л.И. Богданова, Ю.В. Щапова</i>	29

Спектроскопические характеристики графеновых квантовых точек – нового 0-мерного материала для экологии и биологии <i>Е.Д. Образцова, П.В. Федотов, И.А. Елисеев, В.Ю. Давыдов, Darwin Kurniawan, Wei-Hung Chiang</i>	30
Структура и спектры КРС массивов вертикально ориентированных углеродных нанотрубок <i>Д.В. Щеглов, О.И. Семенова, С.В. Родякин, Н.Н. Курусь, Д.И. Роголо, Д.А. Насимов, А.К. Гутаковский, Л.И. Федина, А.А. Дудин, А.А. Павлов, А.В. Латышев</i>	31
Спектроскопия комбинационного рассеяния света плазмы крови человека для диагностики глиомы <i>О.П. Черкасова, А. Самаринова, Д.А. Вражнов, Ю.В. Кистенев</i>	32
Необычные свойства спектра КРС “угольного графита” с месторождения Сэрэген (Таймыр). Новая аллотропная форма углерода? <i>Н.Н. Мельник, С.К. Симаков, Д.С. Косцов</i>	33
ГКРС на оптических колебательных модах графена <i>В.А. Калинин, Н.Н. Курусь, Н.А. Небогатикова, И.В. Антонова, Е.Е. Родякина, А.Г. Милехин, А.В. Латышев</i>	34
Молекулярный подход к комбинационному рассеянию разупорядоченного sp^2 углерода <i>Е.А. Голубев, Е.Ф. Шека</i>	35
Влияние упругого рассеяния света в суспензиях субмикронных частиц на характер распространения света и эффективность комбинационного рассеяния света <i>О.И. Соколовская, Л.А. Головань</i>	36
Оптические и электронные явления в нитевидных нанокристаллах при механической деформации <i>П.А. Алексеев, В.А. Шаров, В.В. Фёдоров, А.М. Можаров, И.С. Мухин, Г.Э. Цырлин, Д.А. Кириленко, А.Н. Смирнов, В.Ю. Давыдов</i>	37
Комбинационное рассеяние света с переворотом спина в непрямозонных КТ (In,Al)As/AlAs <i>Т.С. Шамирзаев, D. Kudlaciak, Д. Р. Яковлев, M. Bayer</i>	38
Плазмон-усиленная нано-фотолюминесценция планарных нитевидных нанокристаллов GaAs <i>Л.С. Басалаева, Е.А. Емельянов, М.А. Путьято, В.В. Преображенский, А.Г. Милёхин</i>	39
Комбинационное рассеяние света в структурах Si_xGe_{1-x} -на -изоляторе, созданных диффузией имплантированного Ge из захороненного слоя SiO_2 <i>И.Е. Тыщенко, В.А. Володин, В.П. Попов</i>	40
Комбинационное рассеяние света и люминесценция тонких пленок $MgAl_2O_4$ <i>Ю.В. Щапова, Л.Я. Сушанек, А.Н. Киряков, А. Ф.Зацепин, С.Х. Сулейманов</i>	41
Локальное гиперспектральное картирование нанокластера AlN с нанометровым пространственным разрешением <i>И.А. Милёхин, К.В. Аникин, Н.Н. Курусь, В.Г. Мансуров, Т. Малин, К.С. Журавлев, А.Г. Милёхин, А.В. Латышев, D.R.T. Zahn</i>	42
Детектирование спиновых и спин-текстурных возбуждений методом резонансного неупругого рассеяния света в режиме квантового эффекта Холла в $MgZnO/ZnO$ гетероструктурах <i>А.С. Кореев, А.Б. Ваньков, П.С. Бережной, И.В. Кукушкин</i>	43
Зависимость спектров КР кобальтата лития от температуры и мощности лазерного излучения <i>А.А. Рябин, А.С. Крылов, С.Н. Крылова, Д.В. Пелегов</i>	44
Исследование кристаллизации висмут-замещенного железомиттриевого граната методом спектроскопии комбинационного рассеяния <i>А.В. Шелаев, Е.М. Сгибнев, П.Н. Тананаев, А.В. Барышев</i>	45
Влияние толщины имплантированных слоев Ge на лазерный нагрев при исследовании методом КРС <i>А.В. Павликов, А.М. Шарафутдинова, А.М. Рогов, С.Н. Бокова-Сирош, Е.Д. Образцова, А.Л. Степанов</i>	46
Проявление эффекта локализации фононов в спектрах комбинационного рассеяния света аморфных нанокластеров германия в матрице GeO_x <i>Ф. Чжан, В.А. Володин</i>	47

КР исследование лазерно-индуцированных эффектов окисления и нагрева пигментов на основе оксидов и гидроксидов железа <i>Д.В. Киселева, Е.А. Панкрушина, Е.С. Шагалов</i>	48
Исследование кинетики золото-индуцированной кристаллизации тонких пленок аморфного субоксида кремния <i>Н.А. Лунев, А.О. Замчий, Ю.В. Воробьев, В.О. Константинов, Е.А. Баранов</i>	49
Спектроскопия комбинационного рассеяния для материалов литиевых аккумуляторов: текущее состояние и перспективы <i>Д.В. Пелегов</i>	50
Комбинационное рассеяние света в исследованиях композитных электролитных систем <i>М.М. Гафуров, К.Ш. Рабаданов, З.Ю. Кубатаев</i>	51
Влияние наноразмерных оксидов на структурно-динамические свойства композитов на основе LiClO ₄ <i>З.Ю. Кубатаев, М.М. Гафуров, К.Ш. Рабаданов</i>	52
Возможности измерения концентрации гелия в природном газе с помощью спектроскопии КР <i>А.С. Таничев, Д.В. Петров</i>	53
Определение величины нанометровых флуктуаций сдвигового модуля в стеклах и переохлажденных жидкостях методом неупругого рассеяния света <i>В.Н. Новиков, Е.А. Добрынина, И.В. Зайцева</i>	54
Комбинационное рассеяние света с переворотом спина в перовскитах и плателетах <i>А.В. Родина, Е.Л. Ивченко</i>	55
Низкочастотная спектроскопия КР металлоорганических каркасных соединений <i>А.С. Крылов, И.Д. Юшина, С.Н. Крылова, I. Senkovska, А. Н. Втюрин</i>	56
Strain and Defect Engineering of Two-Dimensional Materials for Enhanced Chemical Activity Probed with Raman Spectroscopy <i>Raul D. Rodriguez, Tuan-Hoang Tran, Dmitry Cheshev, Nelson E. Villa, Muhammad Awais Aslam, Jelena Pesic, Aleksandar Matković, Evgeniya Sheremet</i>	57
DFT моделирование спектров КРС монослойных дихалькогенидов молибдена со структурой типа «Янус» <i>А.С. Орешонков, Е.В. Суханова, З.И. Попов</i>	58
Низкочастотное вынужденное рассеяние лазерного излучения в водных суспензиях вирусов в частотном диапазоне 1-60 ГГц <i>А.Ф. Бункин, М.А. Давыдов, С.М. Першин, А.Н. Федоров, М.В. Архипенко, О.В. Карпова</i>	59
Изучение температурной зависимости упругих свойств гидратированных планарных слоев фосфолипидов методом рассеяния Мандельштама-Бриллюэна <i>Е.А. Добрынина, В.А. Зыкова, Н.В. Суровцев</i>	60
Спектры комбинационного рассеяния сверхрешеток Si/SiO ₂ как способ мониторинга строения интерфейсов в кремний-оксидных гетероструктурах <i>Е.М. Рогинский, М.Б. Смирнов, А.В. Савин, Д.В. Панькин</i>	61
Низкочастотная спектроскопия комбинационного рассеяния органических полупроводников и биомолекул <i>О.Д. Паращук, А.Ю. Сосорев, О.Г. Харланов, М.В. Венер, А.А. Трубицын, Д.Ю. Паращук</i>	62
Определение пространственного распределения коллагена и эластина в бычьей вене с помощью рассеяния Мандельштама-Бриллюэна <i>С.В. Адищев, В.А. Зыкова, Е.А. Добрынина, А.М. Пугачёв, Н.В. Суровцев</i>	63
Применение комбинационного рассеяния света для анализа нанокластеров аморфного кремния в плёнках нестехиометрического нитрида кремния, применяющихся в элементах флэш-памяти и в матрицах резистивной памяти <i>В.А. Володин, В.А. Гриценко, Г.Н. Камаев, С.Г. Черкова, И.А. Азаров, Ю.Н. Новиков, А.А. Гисматулин, И.П. Просвирин</i>	64
Деградация свойств КНС псевдо-МОП сегнетотранзисторов (SOS FeFETs) после облучения электронами и быстрыми ионами Хе и Вi <i>В.А. Антонов, В.А. Володин, В.П. Попов, А.В. Мьяконьких, К.В. Руденко, В.А. Скуратов</i>	65

Применение метода комбинационного рассеяния света к детектированию дейтерированных метаболитов в дрожжевых клетках <i>А.Н. Омельченко, К.А. Окотруб</i>	66
Спектроскопия оптического поглощения и комбинационного рассеяния металлизированных трековых мембран <i>Н.П. Ковалец, Е.П. Кожина, И.В. Разумовская, С.А. Бедин, А.В. Наумов</i>	67
Исследования экситонного спектра и оптических мод в 2D монослоях и наноструктурах дихалькогенидов переходных металлов с использованием микро-спектроскопии фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света <i>Т.В. Шубина</i>	68
КР-активный оптический фонon как <i>in situ</i> маркер сверхбыстрой динамики лазерно-генерированных электрон-дырочной плазмы, механических напряжений и высоких температур, а также онтогенетической неоднородности в алмазах <i>С.И. Кудряшов, П.А. Данилов, С.А. Остриков</i>	69
Нано-КРС графеном <i>Н.Н. Курусь, В.А. Калинин, Н.А. Небогатикова, И.В. Антонова, Е.Е. Родякина, А.Г. Милёхин, А.В. Латышев</i>	70
Наноструктуры кремниевых нанонитей, декорированных наночастицами благородных металлов, для диагностики антибиотикорезистентности бактерий методом гигантского комбинационного рассеяния <i>Д.А. Назаровская, О.Д. Гюппенен, П.А. Домнин, И.И. Циняйкин, С.А. Ермолаева, К.А. Гончар, Л.А. Осминкина</i>	71
Усиление сигнала комбинационного рассеяния света при возбуждении резонансов в решётке из дисков германия субволнового размера <i>А.А. Шкляев, Д.Е. Уткин, В.А. Володин, А.В. Царёв</i>	72
Иерархические поверхностные периодические структуры и фазовые трансформации в пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников, индуцированные фемтосекундными лазерными импульсами <i>Д.В. Шулейко, С.В. Заботнов, П.А. Данилов, Е.В. Кузьмин, Т.С. Кункель, П.К. Кашкаров</i>	73
КР-спектральное исследование сильных водородных связей <i>Б.А. Колесов</i>	74
Спектроскопия комбинационного рассеяния света и фотолюминесцентная микроскопия для изучения взаимодействия наноконтейнеров на основе пористого кремния с живыми клетками <i>Л.А. Осминкина</i>	75
Частоты ОН-колебаний в кристалле KN_2PO_4 и их зависимость от давления из первопринципных расчётов <i>В.А. Абалмасов</i>	76
Нелинейно-оптическая спектроскопия КР: вращение орто-пара спиновых изомеров H_2O в воде и их конверсия <i>С.М. Першин, А.Ф. Бункин</i>	77
Комбинационное рассеяние света на межмолекулярных колебаниях воды в воде и в слабых водных растворах и свойства спектральных параметров этих полос в частотных координатах <i>А.В. Крайский</i>	78
Индикаторы упорядоченности липидного бислоя в области валентных CH_2 колебаний спектров КРС <i>Ю.В. Зайцева, Н.В. Суровцев</i>	79
Исследование криоконсервации преимплантационных эмбрионов млекопитающих методом спектроскопии комбинационного рассеяния света с использованием дейтерированных меток <i>К.А. Окотруб, А.Н. Омельченко, Т.Н. Иголина, Е.Ю. Брусенцев, С.Я. Амстиславский, Н.В. Суровцев</i>	80
Light scattering for physical characterization of samples cryopreserved by quench cooling <i>K. Rolle</i>	81

Исследование упругих свойств гидрогелей на основе желатина методом спектроскопии рассеяния Мандельштама-Бриллюэна <i>А.В. Лактионова, В.А. Зыкова, Е.А. Добрынина</i>	82
Спектроскопия комбинационного рассеяния нанореакторов в обратных микроэмульсиях <i>И.В. Пластилин, Т.А. Доленко</i>	83
Применение поляризационной спектроскопии КР для газоанализа <i>Д.В. Петров, И.И. Матросов</i>	84
Оценка эффективной усиливающей площади поверхности ГКР-подложек <i>Е.П. Кожина, С.А. Бедин, А.В. Наумов</i>	85
ГКР-подложки с оптимизированными дендритными структурами на основе трековых мембран <i>С.А. Бедин, Е.П. Кожина, А.В. Наумов</i>	86
Формирование nanoостровковых плёнок серебра методом диффузии из стекла для сенсоров на основе явления гигантского комбинационного рассеяния <i>Е.М. Сгибнев, А.В. Шелаев, А.В. Барышев</i>	87
Бимодальные ГКР-флуоресцентные метки для биовизуализации и лечебной гипертермии: оптимизация состава и структуры <i>Е.В. Соловьева, А. И. Деменьшин, В.О. Свинко, А.Н. Смирнов</i>	88
Электродинамические свойства ГКР-активных частиц серебра, бимодально распределенных по размерам <i>А.В. Бондаренко, С.А. Завацкий, А.А. Бурко, Д.Д. Лапутько, Д.В.Новиков, С.В. Дубков</i>	89
Роль фототермического нагрева в плазмонном фотокатализе <i>Д.Л. Чешев, Р.Д. Родригес, А.А. Аверкиев, Е.С. Шеремет</i>	90
Эволюция приборов для комбинационного рассеяния света <i>Н.Н. Мельник</i>	91
Разделение колебательных линий, фона и шума в КР спектрах методом модифицированной регуляризации Тихонова <i>И.А. Ларкин, А.В. Вагов, В.И. Корепанов</i>	92
Оптические свойства экстремально тонких нанопроволок теллура, сформированных в каналах субнанометрового диаметра <i>В.В. Поборчий, А.В. Фокин, А.А. Шкляев</i>	93
Комбинационное рассеяние света в структурах кремний-на-изоляторе, имплантированных ионами In^+ и Sb^+ вблизи границы сращивания Si/SiO_2 <i>Ж. Чжан, И.Е. Тыщенко, В.А. Володин, В.П. Попов</i>	94
Комбинационное рассеяние света и фотoluminesценция в пленках SiO_2 , имплантированных ионами In^+ и As^+ <i>Ч. Сы, И.Е. Тыщенко, С.Г. Черкова, В.А. Володин, В.П. Попов</i>	95
Оптические фононы атомно-тонких нанопластинок $ZnSe$ <i>Л.С. Басалаева, В.П. Графова, Т.А. Дуда, Р.Б. Васильев, А.Г. Милёхин</i>	96
Проявление резонанса Фано в спектрах КРС пористых структур с р-п-переходом, полученных металл-стимулированным травлением <i>Д.С. Косцов, Н.Н. Мельник, В.В. Трегулов, Г.Н. Скопцова</i>	97
Исследование изменения структуры $Li_4Ti_5O_{12}$ под действием лазерного излучения при измерении спектров КРС <i>А.А. Никифоров, Д. В. Пелегов</i>	98
Зависимости параметров спектров КРС отдельных частиц LTO от температуры и мощности лазерного воздействия <i>А.А. Никифоров, А. С. Крылов, Д. В. Пелегов</i>	99
Комбинационное рассеяние света в квазидвумерных и нанокристаллических пленках моносилицидов Fe, Cr и Ca на кремнии и сапфире <i>К.Н. Галкин, А.М. Маслов, И.М. Чернев, О.В. Кропачев, Е.Ю. Субботин, Д.Л. Горошко, Н.Г. Галкин</i>	100

Исследование теплопереноса в пленках сплава кремний-германий на кремнии с использованием рассеяния Стокса и анти-Стокса <i>Д.Л. Горошко, И.М. Гаврилин, А.А. Дронов, О.А. Горошко</i>	101
Спектроскопия комбинационного рассеяния света и фотолюминесценция нанопроволок GaAs <i>И.В. Калачев, И.А. Милёхин, Е.А. Емельянов, В.В. Преображенский, В.С. Тумашев, А.Г. Милёхин, А.В. Латышев</i>	102
Использование микро-КР спектроскопии и подхода отдельных частиц для исследования локальной оптической неоднородности LiCoO ₂ <i>А.А. Рябин, Н.В. Годяев, Д.В. Пелегов</i>	103
Комбинационное рассеяние света на пористом кремнии, полученном электрохимическим травлением с облучением в разных областях спектра <i>А.А. Корец, О.В. Семенова, Д.А. Балахнин, И.Э. Олин, А.С. Крылов</i>	104
Исследование рассеяния света от частиц железофосфата лития <i>А.А. Рябин, С.А. Мельников, В.Р. Сейсембаева, М.Г. Кособоков, Д.В. Пелегов</i>	105
Изучение поверхностных электронных состояний в тонких пленках InSb, сформированных на монокристаллическом кремнии методом твердофазной эпитаксии <i>Д.Л. Горошко, С.В. Чусовитина, О.А. Горошко</i>	106
Тонкие пленки феррит-гранатов для нанофотоники: структурный анализ <i>Ю.Е. Высоких, Т.В. Михайлова, С.Ю. Краснобородько, В.Н. Бережанский, А.Н. Шапошников, М.Ф. Булатов, Д.В. Чуриков</i>	107
Эффект агломератов и воздействия ультразвука на поглощающие способности коллоидного раствора нанопроволок кобальта <i>Е.П. Кожина, С.А.Бедин, С.С. Косолобов, В.П. Драчев</i>	108
ГКР исследование ацетиленовых соединений: выбор репортера для биометок на основе анизотропных наночастиц золота <i>А.И. Деменьшин, В.О. Свинко, А.Н. Смирнов, Е.В. Соловьева</i>	109
Формирование и исследование свойств ГКР-подложек на основе массивов наночастиц, полученных путем низкотемпературного отжига тонких пленок серебра <i>Т.С. Гришин, Л.С. Волкова, И.А. Михайлов, Е.В. Латипов, П. А. Едельбекова</i>	110
Исследование влияния изменения поверхности пленок Ag под воздействием окружающей среды на спектры комбинационного рассеяния света <i>И.А. Михайлов, Т.С. Гришин, Е.В. Латипов, П. А. Едельбекова, Л.С. Волкова</i>	111
Создание и исследование свойств подложек для спектроскопии ГКР на основе наностолбиков TiO _x , декорированных наночастицами металлов <i>Л.С. Волкова, Т.С. Гришин, И.А. Михайлов, Д.В. Новиков, Е.В. Латипов</i>	112
Разработка планарных ГКР-структур на основе массива серебряных наночастиц для детектирования биомаркеров сердечно-сосудистых болезней <i>С.В. Дубков, С.А. Завацкий, А.В. Бондаренко, А.А. Бурко, Д.В.Новиков, П.А. Едельбекова, А.А. Беставашвили</i>	113
Факторы, влияющие на коэффициент усиления серебряных SERS-подложек <i>П.А. Едельбекова, Е.В. Латипов, Т.С. Гришин</i>	114
Исследование методом КРС спектроскопии феррита La _{0,5} Sr _{0,5} FeO _{3-γ} <i>К.А. Гавриличева, О.И. Баркалов</i>	115
Системы вайрацит-вода и филлипсит-вода в условиях зоны холодной субдукции <i>У.О. Бородина, С.В. Горяйнов, С.Н. Крылова, А.С. Крылов, А.Н. Втюрин</i>	116
Ангармонизм колебаний решетки магний-алюминиевой шпинели с неупорядоченным распределением катионов по позициям <i>Л.Я. Сушанек, Ю.В. Щапова</i>	117
ВКР в жидкостях со случайной распределенной обратной связью <i>М.В. Тареева, М.А. Карпов, М.А. Шевченко, С.Ф. Уманская, А.Д. Кудрявцева, Т.В. Миронова, Н.В. Чернега, А.Н. Маресев</i>	118

Терморамановская <i>in situ</i> спектроскопия природного фенакита Be_2SiO_4 и <i>ab initio</i> расчеты его фононного спектра <i>М.С. Печурин, Е.А. Панкрушина, С.Л. Вотяков, Е.В. Комлева</i>	119
Оптические свойства двумерных островков дисульфида вольфрама (WS_2) <i>А.Ю. Кривоногова, Н.Н. Курусь, И.А. Милёхин, А.А. Колосветов, А.Г. Милёхин</i>	120
Исследование методом КРС структуры пленок CaSi_2 формируемых в условиях радиационного воздействия на структуру $\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ <i>А.В. Кацюба, А.В. Двуреченский, Г.Н. Камаев, В.А. Володин, П.А. Кучинская</i>	121
Особенности комбинационного рассеяния света метастабильной кристаллической фазы фосфида галлия $\text{GaP } R\bar{6}_3mc$ <i>М.А. Аникина, О.Ю. Коваль</i>	122
Особенности в спектрах комбинационного рассеяния при структурном фазовом переходе в пентаоксиде ванадия интеркалированного литием <i>А.В. Савин, Е.М. Рогинский</i>	123
Спектральные исследования кристаллов $\text{ABF}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ <i>Ю.В. Герасимова, А.С. Крылов, А.Н. Втюрин, М.А. Герасимов, Н.М. Лапташ, А.С. Александровский, А.А. Дубровский</i>	124
Колебательные спектры систем «электролитный раствор-наполнитель» <i>К.Ш. Рабаданов, М.М. Гафуров, М.А. Ахмедов, Д.И. Рабаданова</i>	125
Миллифлюидный чип для измерения КРС от биологических клеток в условиях меняющегося состава окружающей среды <i>К.А. Окотруб, С.Г. Кондюрина, Ю.В. Зайцева, С.В. Адищев, Т.А. Рахманова, С.Я. Амстиславский</i> . 126	126
Применение спектроскопии комбинационного рассеяния света для анализа и мониторинга состояния биологических систем <i>Е.В. Переведенцева, А.В. Карменян, Ч.Л. Ченг, Н.Н.Мельник</i>	127
Рамановская спектроскопия металлоорганических каркасов <i>Е.В. Головкина, А.С. Крылов, С.Н. Крылова, А.Н. Втюрин</i>	128
Новый пикосекундный ВКР-лазер на воде/жидком азоте с кратным снижением порога генерации <i>М.Я. Гришин, С.М. Першин, Е.В. Шашков, В.А. Орлович, А.И. Водчиц, И.А. Ходасевич</i>	129
Спектры прямого и обратного ВКР пикосекундных импульсов в воде вблизи поверхности <i>В.А. Орлович, С.М. Першин, А.И. Водчиц, М.Я. Гришин, И.А. Ходасевич</i>	130
Термический отжиг тонкопленочной структуры $\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-Ge}$ <i>Н.А. Лунев, А.О. Замчий, В.О. Константинов, И.Е. Меркулова, М.А. Морозова, В.А. Володин, Е.А. Баранов</i>	131
Анализ Li-содержащих соединений на основе $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ методом КР спектроскопии <i>Е.В. Латипов, Л.С. Волкова</i>	132
Применение методов машинного обучения для определения ионного состава водных сред по спектрам комбинационного рассеяния света <i>К.А. Лаптинский, С.А. Буриков, А.М. Вервальд, А.Д. Кудряшов, И.В. Пластинин, О.Э. Сарманова, Л.С. Утегенова, Т.А. Доленко</i>	133
Изменение спектров комбинационного рассеяния LiNbO_3 при приложении внешнего электрического поля <i>А. Irzhak, D. Irzhak, K. Pundikov, A. Sergeev</i>	134
ГКР метки визуализации с ковалентно конъюгированным красителем: получение, тестирование и выявленные особенности <i>В.О. Свинко, Е.В. Соловьева</i>	135
Авторский указатель	144
Список участников	149

Нанодиагностика и сенсорика: достижения и перспективы в области флуоресцентной наноскопии и поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния света

А.В. Наумов¹⁻³

¹ Троицкое обособленное подразделение, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

² Московский Педагогический Государственный Университет (МПГУ)

³ Институт спектроскопии РАН

108840 Москва, Троицк, ул. Физическая 11

тел.: +7 (495) 851-00-98, эл. почта: a_v_naumov@mail.ru web: www.single-molecule.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-13

Спектроскопия одиночных молекул и флуоресцентная наноскопия предлагают широкий спектр возможностей для исследования фотофизических характеристик различных люминесцирующих нанообъектов и композитов на их основе. Кроме того, высокая чувствительность спектральных характеристик к параметрам локального окружения позволяет использовать квантовые излучатели в качестве эффективных спектральных нано зондов. Особенно перспективным представляется анализ пространственно-спектральных корреляций, совмещенный с измерением кинетики фотолюминесценции, временной динамики спектров, а также зависимости спектров от температуры, параметров лазерного излучения, внешних полей. Такой анализ может быть положен в основу техники многопараметрической оптико-спектральной наноскопии одиночных квантовых излучателей. Особенно продуктивной с точки зрения аналитических возможностей представляется техника спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) позволяющая реализовать однозначную идентификацию молекулярного соединения по спектру КРС. Эффективность процесса может быть существенно увеличена в присутствии металлических плазмонных наночастиц на случайно или специально структурированной поверхности (Surface Enhanced Raman Scattering, SERS), что особенно перспективно для практической биосенсорики.

В настоящем докладе обсуждается экспериментальная техника криогенной спектроскопии одиночных квантовых излучателей [1], а также ее применения для исследования фотофизических свойств органических молекул (ОМ) [1], коллоидных полупроводниковых квантовых точек (КТ) [2,3], центров окраски в алмазах [4], микро(нано)кристаллов перовскитов [5]. Обсуждаются микроскопическая природа эффекта мерцающей фотолюминесценции одиночных КТ, результаты исследований эффектов локального поля [6], а также процессов спектральной диффузии и электрон-фононного взаимодействия в примесных полимерных средах с квантовыми точками и органическими молекулами. Приводятся результаты сравнительного анализа с данными, полученными другими методами (фотонное эхо, КРС, электронная микроскопия). [7] Продемонстрированы возможности техники трехмерной (3D-) флуоресцентной наноскопии, реализованной по схеме биспиральной аппаратной функции точечного источника света (DHPSF) с использованием инструментов адаптивной оптики [8]. Обсуждается возможность детектирования спектров КРС от ультрамалых объемов аналита при использовании специально разработанных SERS-металповерхностей [9,10].

Работы проводились в сотрудничестве с Bayreuth Uni. (Germany), Queensland Uni. (Australia), Lund Uni. (Sweden), Институт физики (Минск, РБ), ФНИЦ «Кристаллография и фотоника», МГУ, МФТИ, ВШЭ, Сколтех, ИФВД, ИОФ РАН, ИАиЭ СО РАН, ИХКИГ СО РАН, ИОНХ, ИФХЭ.

Результаты получены при поддержке Гранта Президента для ведущих научных школ РФ (НШ-776.2022.1.2), Министерства Просвещения РФ (тема ГЗ МПГУ АААА-20-120061890084-9).

Литература

1. И.Ю. Еремчев и др. // *УФН* 189, 312 (2019); А.В. Наумов // *УФН* 183, 633 (2013).
2. Е.А. Podshivaylov et al. // *J. Chem. Phys.* 151, 174710 (2019).
3. А.И. Arzhanov et al. // *Photonics Russia* 15, 622 (2021); 16, 96 (2022).
4. А.У. Neliubov et al. // *Phys. Rev. B* 107, L081406 (2023); *J. Phys. Chem. C* 125, 17774 (2021).
5. I.Y. Eremchev et al. // *Adv. Opt. Mater.* 9, 2001596 (2021); *Nano. Lett.* 23, 2087 (2023)
6. A.V. Naumov et al. // *Nano Lett.* 18, 6129 (2018); *ЖЭТФ* 128, 771 (2019)
7. K.R. Karimullin, A.I. Arzhanov, I.Y. Eremchev et al. // *Laser Phys.* 29, 124009 (2019).
8. И.Ю. Ерёмчев, Д.В. Прокопова, Н.Н. Лосевский и др. // *УФН*, 9, (2021).
9. Е.Р. Kozhina, S.A. Bedin et al. // *Appl. Sci.* 11, 1375 (2021); *Biosensors* 13, 46 (2023).
10. Е.Р. Kozhina et al. // *Bulletin RAS: Physics* 84, 1465 (2020).

Сканирующая зондовая микроскопия и спектроскопия наноструктур. НТ-МДТ – приборы и возможности

В.А. Быков, Ан.В. Быков, А.А. Быков, В.В.Котов, С.И. Леесмент, В.В. Поляков

ООО «НТ-МДТ Спектрум Инструментс», г. Москва

DOI 10.34077/SCATTERING95-14

К настоящему времени сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) вошла в состав классических методов исследования наноструктур и широко используется для качественной оценки физико-химических, геометрических, электрических, магнитных параметров поверхностей, биологических объектов, в том числе, живых клеток и их реакцию на состав и параметры окружающей среды.

Кроме топографии высокого пространственного разрешения, сканирующие зондовые микроскопы позволяют измерять целый ряд физических свойств поверхностных структур. Развиваются и комбинированные методы, позволяющие одновременно работать в режимах атомно силовой микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния (Рамановской), люминесцентной спектроскопии, безапертурной ближнепольной микроскопии с возможностью визуализации распределения рассеянного излучения в широком диапазоне длин волн с разрешением до 10 нм.

В конце 90-х годов возникла необходимость разработки методов сканирующей спектроскопии комбинационного рассеяния и родилась идея совмещения методов сканирующей спектроскопии и сканирующей атомно-силовой микроскопии, что открывало возможности наряду с топографией получать информацию о качественном составе поверхностных наноструктур.

Разработка зондов со специальными покрытиями, способными концентрировать оптические плазмоны, позволило создать приборы на основе эффекта гигантского усиления Рамановского рассеяния – создать методы Tip Enhanced Raman Scatterings (TERS) – эта идея была рождена в группе швейцарского ученого, профессора Ренато Зиноби, который использовал в своих исследованиях сканирующие зондовые микроскопы НТ-МДТ.

Методика информативна для изучения, в том числе, сегнетоэлектриков, предельно тонких углеродных материалов – графена, углеродных нанотрубок, слоистых полупроводников, а также квантовых точек, нанопроволок и других материалов, активных в комбинационном рассеянии.

Развитие сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) привело к созданию системы, обеспечивающей в режиме СБОМ разрешение, близкое к разрешению атомно-силовой микроскопии. В этом режиме в процессе сканирования регистрируется модулированное острием колеблющегося кантилевера рассеянное излучение, фокус которого совмещен с зондом кантилевера. Особенный интерес представляет использование перестраиваемых широкодиапазонных инфракрасных лазеров. При этом можно с высоким разрешением регистрировать характеристическое взаимодействие излучение с конкретными функциональными группами и изучать пространственное распределение.

Таким образом, можно уверенно констатировать, что к настоящему времени в России выполнены разработки и организовано производство практически полного, за исключением сверхвысоковакуумной СЗМ, комплекса приборов и методов для исследования микро и наноструктур с использованием сканирующих зондовых микроскопов. Для лабораторий созданы приборы линии ИНТЕГРА, НЕКСТ, ИНТЕГРА-МЕРЛИН, для системы образования в школах и колледжах – бюджетные, но достаточно мощные НАНОЭДЬЮКАТОРЫ и СОЛВЕР- НАНО, для применений в нанoeлектронике создан прибор, позволяющий с разрешением вплоть до атомарного исследовать пластины диаметром до 200 мм – СЗМ ВЕГА. Следует отметить, что развитие нанoeлектроники, создание новой элементной базы дают возможность дальнейшего совершенствования приборов, все более и более внедрять системы искусственного интеллекта в программное обеспечение с раскрытием возможностей развивающейся элементной базы.

Спектроскопия Мандельштама-Бриллюэна биологических материалов

Н.В. Суровцев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

тел: +7 (913) 330-9048, эл. почта: snv@iae.nsk.su

DOI 10.34077/SCATTERING95-15

Спектроскопия Мандельштама-Бриллюэна позволяет характеризовать упругие свойства (скорость звука) среды в гигагерцовом частотном диапазоне. Возможность бесконтактного измерения и получения отклика от локальных (до 1 мкм) областей делает эту методику привлекательной не только для описания фундаментальных свойств среды, но и для решения ряда прикладных задач. В последние годы в научном сообществе резко возрос интерес к исследованию и применению потенциала спектроскопии Мандельштама-Бриллюэна для характеристики биологических материалов, включая задачи медицинской физики. В докладе делается попытка оценить текущее состояние вопроса и сделать прогноз о применении спектроскопии рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в ближайшем будущем.

Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция полупроводниковых наноструктур с нанометровым пространственным разрешением

А.Г. Милёхин^{1*}, I.A. Milekhin^{1,2}, Н.Н. Курусь¹, Л.С. Басалаева¹, Р.Б. Васильев³, К.В. Аникин¹, В.Г. Мансуров¹, К.С. Журавлев¹, Е.А. Емельянов¹, М.А. Пулято¹, В.В. Преображенский¹, А.В. Латышев^{1,2}, D.R.T. Zahn⁴

¹Институт физики полупроводников им.А.В.Ржанова СО РАН,
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр.Лаврентьева, д. 13

²Новосибирский Государственный университет,
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул.Пирогова 1

³Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

⁴Semiconductor Physics, Chemnitz University of Technology, D-09107, Germany, Chemnitz
тел: +7 (383) 330-8204, факс: +7 (383) 333-2766, эл. почта: milekhin@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-16

Методы нано-КРС и нано-ФЛ представляют собой комбинацию атомно-силовой микроскопии (АСМ) и КРС, либо ФЛ и основаны на усилении оптического сигнала наноструктуры полем локализованного поверхностного плазмона металлического зонда АСМ микроскопа. Эти методы успешно применены для изучения фононного и электронного спектров двумерных (2D), одномерных (1D) и нульмерных (0D) отдельных полупроводниковых наноструктур с пространственным разрешением много меньше дифракционного предела.

Представлены результаты исследования нано-КРС на оптических фонах нанокристаллов CdSe и AlN, наноколонн AlN и пленок мультиграфена, помещенных на плазмонные подложки [1,2] и нано-ФЛ нанокристаллов GaAs и двумерных островков дихалькогенидов металлов (MoS₂ и WS₂).

В диапазоне частот оптических фононов выполнено нано-КРС картирование одиночных 2D наноструктур, включая мультиграфен, коллоидные нанопластинки CdSe/CdS, сформированные по типу ядро/оболочка [3], монослой MoS₂, помещенные в зазоре между металлизированным (Au, Ag) острием АСМ микроскопа и плазмонной подложкой, определены размеры и форма наноструктур, структурные дефекты и возникающие в них механические напряжения.

Нано-КРС на частотах поверхностных оптических (SO) фононов наблюдалось от отдельных нанокластеров AlN, выращенных с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии на Si, и наноколонн AlN, помещенных на поверхность Au. Нано-КРС изображение отдельного нанокристалла AlN размером около 250 нм с кристаллической структурой вюрцита демонстрирует его гексагональную форму. Обсуждаются различия в нано-КРС изображениях наноколонн AlN, записанных при различной поляризации света.

Нано-ФЛ от монослойных островков MoS₂ и WS₂, выращенных кремниевой подложке, демонстрируют локальное изменение энергии и интенсивности экситонной ФЛ в зависимости от числа монослоев и наличия структурных дефектов. Обнаружено усиление непрямозонной нано-ФЛ в нанокристаллах GaAs, что позволило выполнить нано-ФЛ картирование отдельного нанокристалла.

Исследование поддержано Российским Научным Фондом (грант №22-12-00302).

Литература

1. I.A. Milekhin, et.al. // Nanoscale Advances, vol.2, pp.5441 – 5449, 2020.
2. I.A. Milekhin, et.al. // Nanomaterials, vol.12 (13), pp. 2197-1-16, 2022.
3. N.N. Kurus, et.al. // Journal of Phys. Chem. C.

Комбинационное рассеяние света и низкотемпературные фазовые переходы в керамиках ниобатов серебра и литий-тантал-серебра

А.Н. Втюрин^{1,2}, А.С. Крылов¹, С.Н. Крылова¹, Е.М. Рогинский³,

L. Jin⁴, Y. Tian⁴, X. Wei⁴, В. В. Воног²

¹Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок, 50/38

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, ул. Киренского, 28

³Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

⁴Intl. Center for Dielectric Research, Xi'an Jiaotong University, China, 710049, Xi'an

тел: +7 (908) 200-4440, факс: +7 (391) 243-8923, эл. почта: vtyurin@iph.krasn.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-17

Ниобат серебра и танталат лития – функциональные материалы, принадлежащие к семейству перовскитов. В частности, ранее [1-2] была продемонстрирована перспективность AgNbO_3 в качестве активной среды в системах хранения энергии, однако недостатком этого материала является его нестабильность в сильных полях. В [3-4] было показано, что добавки тантала и лития стабилизируют этот материал и повышают его энергоёмкость.

Различные авторы в монокристаллах, поликристаллах и керамиках ниобата серебра наблюдали до шести фазовых переходов, однако большинство из них были обнаружены при высоких температурах; более интересная для практических приложений область в районе и ниже комнатных температур мало исследована.

В смешанных составах при комнатной температуре наиболее перспективная для практических приложений широкая петля гистерезиса с полным насыщением была обнаружена в керамике $0.955 \text{AgNbO}_3-0.045 \text{LiTaO}_3$ [5], и поэтому в данной работе исследован именно этот состав.

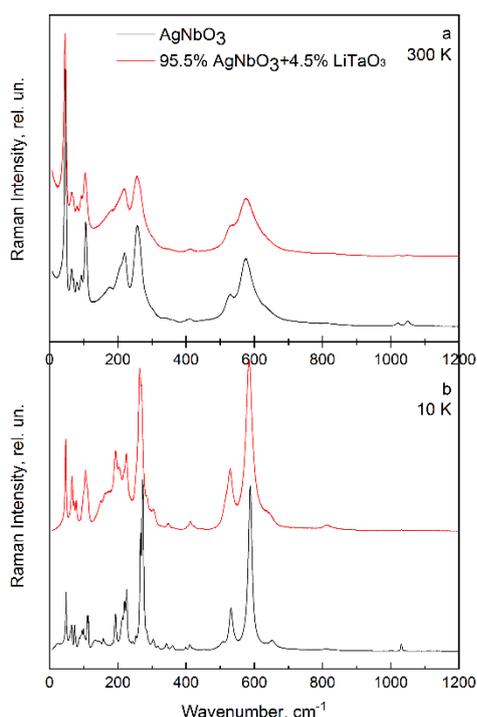


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния керамик AgNbO_3 (черный) и $0.955 \text{AgNbO}_3-0.045 \text{LiTaO}_3$ (красный): а – 300 К, б – 10 К.

Литература

1. Y. Tian et al. // J. Mater. Chem. A, 2016, V. 4, P. 17279–17287.
2. Y. Tian et al. // J. Mater. Chem. A, 2022, V. 10, P. 14747–14787.
3. A. Niewiadomski et al. // Mater. Res. Bull., 2015, V. 65, P. 123–131.
4. S. Li et al. // J. Mater. Chem. C, 2019, V. 7, P. 4403–4414.
5. T. Lu et al. // IUCrJ, 2019, V. 6, P. 740–750.

Спектроскопия комбинационного рассеяния нового класса нанодиамазмов, синтезированных из адамантана

О.С. Кудрявцев¹, Р.Х. Баграмов², Д.Г. Пастернак¹, А.М. Сатанин^{3,4}, О.И. Лебедев⁵,
В.П. Филоненко², И.И. Власов¹

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
Москва, 119991, Вавилова, 38*

²*Институт Физики Высоких Давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук,
Москва, Троицк, 108840, Калужское шоссе, 14*

³*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова,
Москва, 127030, Суцевская, 22*

⁴*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, 109028, Покровский бульвар, 11*

⁵*Laboratoire CRISMAT, Caen, France, 14050, UMR 6508 CNRS-ENSICAEN
тел: +7 (929) 520-5574, эл. почта: leolegk@mail.ru*

DOI 10.34077/SCATTERING95-18

Нанодиамазмы, синтезированные из органических соединений при высоком давлении и высокой температуре, представляют новый класс алмазных наноматериалов. Первые шаги в исследовании оптических свойств таких нанодиамазмов позволяют предположить, что в ближайшие годы будет продемонстрировано еще немало уникальных свойств и связанных с ними перспективных нанотехнологических применений этого материала.

В настоящей работе сообщается об открытии с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) двух уникальных оптических свойств нанодиамазмов, синтезированных из адамантана. При исследовании ультрамалых (2-5 нм) нанодиамазмов был обнаружен набор необычных линий КР с ярко выраженными максимумами на частотах 1147, 1245, 1344 и 1456 см⁻¹ которые не характерны для нанодиамазмов других типов. Эти линии мы надежно отождествили с деформационными модами колебаний СН_x-групп, замыкающих поверхность алмазных наночастиц [1]. Связь новых спектральных характеристик с деформационными СН_x модами свидетельствует о чрезвычайно высокой концентрации водорода на поверхности ультрамалых нанодиамазмов, что может быть использовано для экспресс-идентификации сверхмалых нанодиамазмов, полученных из адамантана и других углеводородов. При исследовании нанодиамазмов размером 20-40 нм методами КР и ИК спектроскопии обнаружена деструктивная интерференция Фано-типа между оптическими фононами алмазной решетки и свободными носителями заряда, возникающими в приповерхностном слое нанодиамаза, поверхность которого терминируется водородом [2]. В результате в ИК поглощении наблюдается резкий провал вблизи частоты оптического фонона, что приводит к аномальной дисперсии света в этой области. Материалы с таким свойством способны снижать групповую скорость проходящего света. Таким образом, гидрогенизированный нанодиамаз, полученный из адамантана, представляет собой новую оптически активную среду, которую можно использовать для управления скоростью импульсов ИК-света.

Литература

1. O.S. Kudryavtsev, R.H. Bagramov, D.G. Pasternak, A.M. Satanin, O.I. Lebedev, V.P. Filonenko, I.I. Vlasov // *Diam. and Relat. Mater.* 2023. V.133, P.109770.
2. O.S. Kudryavtsev, R.H. Bagramov, A.M. Satanin, A.A. Shiryaev, O.I. Lebedev, A.M. Romshin, D.G. Pasternak, A.V. Nikolaev, V.P. Filonenko, I.I. Vlasov // *Nano Lett.* 2022. V.22, I.7, P. 2589–2594.

КРС и ОДМР спектроскопия NV⁻ центров в нанослоях и наностолбах (111) алмаза после травления сфокусированным пучком ионов Ga⁺

С.Н. Подлесный¹, В.А. Антонов¹, **И.А. Карташев¹**, В.П. Попов^{1*}

¹ИФП СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск,

630090, пр.ак. Лаврентьева, 13

тел: +7 (383) 333-2493, факс: +7 (383) 333-2772, эл. почта: popov@ispr.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-19

Для формирования ансамблей, содержащих от 25 до 2500 NV центров (Рис. 1), на (111) пластинах алмаза с NV центрами изготавливались матрицы из круглых меза-структур (наностолбов) диаметром 50-300 нм и высотой от 300 до 500 нм с периодом 1.5 – 3 мкм безмасочным ионным травлением сфокусированным ионным пучком (FIB) Ga⁺ (Рис. 1а).

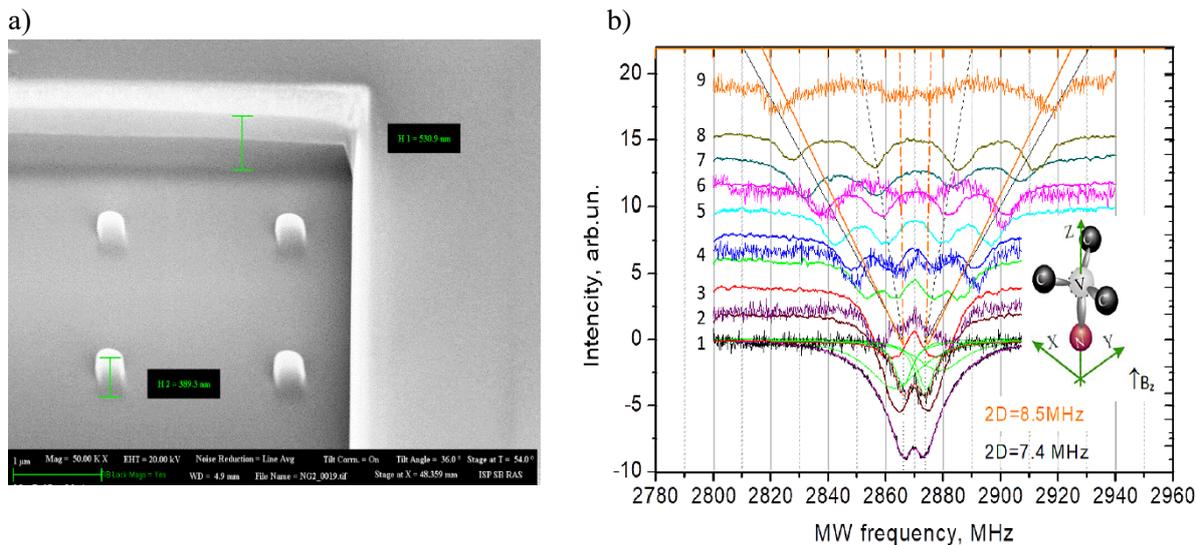


Рис. 1 (а) СЭМ микроизображение массива 3×3 наностолбов алмаза диаметром 300 нм и высотой 400 нм, содержащих 2500 NV- центров; (б) спектры ОДМР NV центров, индуцированных протонами с энергией 36 кэВ (H₂⁺, 72 кэВ, 3×10¹⁶ см⁻²), при непрерывной накачке сфокусированным лазерным пучком диаметром 2 мкм на длине волны λ=532 нм в образце типа Ib в нормальном к поверхности магнитном поле напряженностью: Спектры сдвинуты по вертикали на величину, равную магнитной индукции в Гс.

Для формирования литографической маски пластины алмаза покрывались слоем вольфрама толщиной 100-130 нм с помощью магнетронного напыления. После FIB травления интенсивность ФЛ в наностолбе при λ = 637.5 нм в 15 раз меньше, чем в сплошном слое, что соответствует 2500 NV-центров в нем. Между наностолбами ФЛ слабее ещё на порядок. В отличие от сплошного слоя, в спектрах ОДМР от наностолбов не видны резонансы от NV центров с осью под углом 70.5° к оси наностолба при полях свыше 5 Гс (Рис. 1б),

Полученные результаты объяснены в рамках двух эффектов. Во-первых, уменьшение люминесценции NV⁻ центров с непараллельными поверхности дипольными моментами, обусловлено снижением эффективности поглощения лазерного поля в наностолбах, что соответствует теоретическим модельным расчетам [1]. Во-вторых, данные комбинационного рассеяния света (КРС) свидетельствуют о присутствии на поверхности наностолбов 20 нм графитовой пленки после FIB травления, что увеличивает поглощение их поляризованного излучения [2].

Литература

1. K.Volkova et al. // *Nanomaterials*. 2022, V. 12, no. 9, 1516.
2. D. Braukmann, et al. // *Phys. Rev. B*, 2018, V. 97, 125426.

Комбинационное рассеяние света в системе V – O (ванадий – кислород)

П.В. Швец¹, К.Ю. Максимова¹, А.Ю. Гойхман¹

¹ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград,

236041, Александра Невского, 14

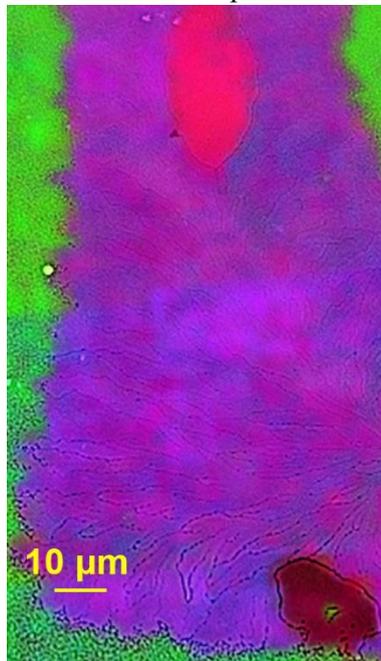
тел: +7 (952) 799-6164, эл. почта: pshvets@kantiana.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-20

Ванадий – это поливалентный материал, который может образовывать огромное количество (более 50) различных кристаллических соединений с кислородом. Каждое такое соединение будет иметь набор собственных характеристических пиков в спектре комбинационного рассеяния света (КРС), поэтому методику КРС можно использовать для исследования фазового состава неизвестных образцов. Теоретическое моделирование спектрального отклика для заданной кристаллической структуры является нетривиальной задачей, поэтому для интерпретации полученных спектров используют данные, полученные с эталонных образцов. Однако для ряда фаз такие данные либо отсутствуют, либо являются предметом споров в литературе. Многие опубликованные спектры оказываются неверными из-за наличия примесей или перегрева и деградации образца под действием лазерного пучка во время измерения. Поэтому получение эталонных образцов и аккуратных померенных спектров для них являлось одной из задач наших исследований. В ходе решения этой задачи нами были получены и исследованы такие материалы как V_3O_5 , V_4O_7 , V_6O_{13} , V_4O_9 и V_3O_7 [1, 2].

КРС – это прекрасный инструмент для наблюдения и исследования фазовых переходов, которые свойственны многим оксидам ванадия. Нами было исследовано поведение тонких плёнок V_3O_5 в районе $150\text{ }^\circ\text{C}$ и V_4O_7 в районе $-55\text{ }^\circ\text{C}$. В обоих случаях мы наблюдали существенное изменение спектров при прохождении точки фазового перехода, хотя в V_4O_7 этот переход проходит без изменения симметрии кристалла и с очень малым изменением постоянных решётки ($\sim 0.1\%$) [2]. Кроме этого, мы измерили спектры КРС в VO_2 (B) при температурах до $-75\text{ }^\circ\text{C}$ и обнаружили сложную картину сосуществования трёх различных фаз.

С помощью КРС возможно также исследование некоторых аморфных материалов. Например, мы показали, что для аморфного оксида ванадия спектр КР характеризуется интенсивным пиком, расположенным в районе $880\text{--}940\text{ см}^{-1}$. Этот пик связан с рассеянием на ванадиловых связях ($V=O$), и его положение определяется содержанием кислорода в образце [3].



Положение пиков КРС зависит от массы атомов, поэтому если заменить весь кислород ^{16}O на изотоп ^{18}O при сохранении кристаллической структуры образца, то можно определить степень влияния кислорода на ту или иную моду КР. Это может являться прямой экспериментальной проверкой теоретических расчётов и описаний колебательных мод. Данные, полученные нами для плёнки $V_2^{18}\text{O}_3$, показывают, что имеющиеся в литературе расчёты для этой фазы требуют корректировки.

Относительные интенсивности линий КР могут зависеть от ориентации кристалла и поляризации возбуждающего излучения. Мы получили плёнки триклинного VO_2 (T) с отдельными монокристаллическими доменами размерами в несколько десятков мкм. С помощью поляризационных измерений КР мы определили величины элементов тензора КРС для 17 (из 18 возможных) фононных мод. Эти данные использовались для построения ориентационных карт полученных плёнок [4]. Пример такой карты показан на рисунке слева.

Работа была выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZWM-2020-0008).

Литература

1. P.V. Shvets et al. // J. Raman Spectrosc. 2019. V. 50. P. 1226-1244.
2. P.V. Shvets, K.Yu. Maksimova, A.Yu. Goikhman // Coatings. 2022. V. 12. P. 291.
3. P.V. Shvets, K.Yu. Maksimova, A.Yu. Goikhman // Physica B. 2021. V. 613. P. 412995.
4. P.V. Shvets et al. // Vib. Spectrosc. 2022. V. 118. P. 103328.

КР-картирование включений и содержащих их минералов

А.В. Корсаков, С.П. Демин

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,

Новосибирск, 630090, Коптюга 3

тел.: +7 (383) 373-05-26, эл. почта: korsakov@igm.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-21

Спектроскопия комбинационного рассеяния света уже давно стала одним из «рутинных» методов исследования вещества в Науках о Земле. Реконструкция условий образования минералов (включая температуру, давления и состав минералообразующей среды), а также связанных с ними различных месторождений полезных ископаемых, являются одной из наиболее сложных задач, стоящей перед исследователями. Как правило, данный метод наиболее успешно применяется при идентификации полиморфных модификаций SiO₂ (кварц, коэсит, стишовит, кристобалит, тридимит), С (графит, алмаз, лонсдейлит), СаСО₃ (кальцит, арагонит) и многих других [2–4]. КР-картирование является мощным и универсальным методом, позволяющим выявлять неоднородности в химическом составе как включений минералообразующих сред в различных минералах, так и в самих минералах, содержащих эти включения. Остаточные напряжения, часто фиксируемые во включениях в минералах, захваченных при высоких температурах и давлениях также влияют на положение пиков в КР-спектрах, и могут быть использованы для реконструкции РТ параметров захвата этих включений. Одной из наиболее бурно развивающихся методик, направленных на выявление условий пика метаморфизма, является КР-геобарометрия включений кварца в гранате [1]. Гранат является минералом кубической сингонии, и в первом приближении может рассматриваться как изотропный минерал. Кварц же является тригональным минералом с различными коэффициентами сжимаемости по осям «а» и «с». Данное обстоятельство позволяет использовать эту пару минералов, встречающихся практически во метаморфических породах, для реконструкции температуры и давления пика метаморфизма.

Флюиды и расплавы являются главными минералообразующими средами в геологических системах. Как правило, их следы фиксируются в минералах в виде флюидных или расплавных включений, размер которых редко превосходит 50 микрон. Раскристаллизация этих исходно гомогенных включений может приводить к появлению многофазных включений, состоящих из твердых фаз, флюида и газового пузырька. Выполнение химического анализа подобных включений требует вскрытия этих включений и (или) полировку дочерних фаз. Следует отметить, что это весьма трудоемкий процесс, который к тому же не гарантирует получение хорошего результата, поскольку в ходе процесса полировки часть дочерних фаз уничтожается, как непосредственно механически, так и в последствии, в результате их взаимодействия с атмосферой, так как некоторые из этих дочерних-минералов являются весьма гигроскопичными. КР-картирование таких включений позволяет не только диагностировать эти фазы, но и проводить оценку степени изменения состава минерала-хозяина вокруг включения. В данном докладе будут представлены ряд примеров применения методов КР-картирования включений различного генезиса и содержащих их минералов.

Литература

1. Alvaro M. [и др.]. Fossil subduction recorded by quartz from the coesite stability field // *Geology*. 2020. (48). С. G46617.1.
2. Chopin C., Sobolev N. V. Principal mineralogic indicators of UHP in crustal rocks Cambridge Topics in Petrology / под ред. R. G. Coleman, X. Wang, Cambridge: Cambridge University Press, 1995. С. 96–131.
3. Enami M., Nishiyama T., Mouri T. Laser Raman microspectrometry of metamorphic quartz: A simple method for comparison of metamorphic pressures // *American Mineralogist*. 2007. № 8–9 (92). С. 1303–1315.
4. Mikhno A. O., Schmidt U., Korsakov A. V. Origin of K-cymrite and kokchetavite in the polyphase mineral inclusions from Kokchetav UHP calc-silicate rocks: evidence from confocal Raman imaging // *European Journal of Mineralogy*. 2013. № 5 (25). С. 807–816.

Деформационный и электрооптический механизм комбинационного рассеяния света в модели «заряд на связи»: моделирование и сравнение с экспериментом для короткопериодных сверхрешёток GaAs/AlAs

В.А. Володин^{1,2}, В.А. Сачков³

¹ Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, проспект академика Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2
тел: +7 (383) 333-2470, факс: +7 (383) 333-2771, эл. почта: volodin@isp.nsc.ru

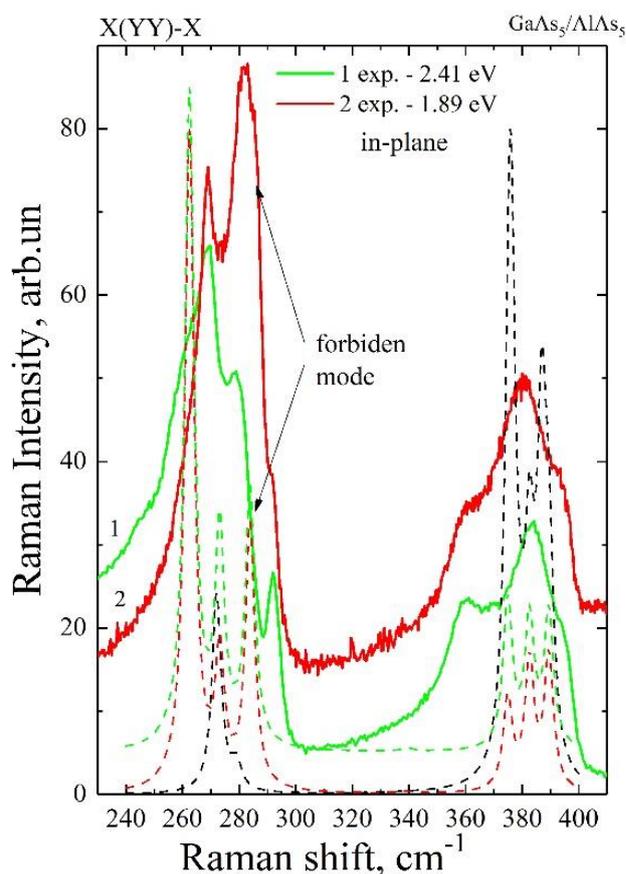
³ - Омский научный центр СО РАН

DOI 10.34077/SCATTERING95-22

Предложен подход, объединяющий деформационный и электрооптический механизмы комбинационного рассеяния света (КРС). Собственные частоты и собственные векторы фононных мод с заданным волновым вектором рассчитаны в модели «заряд на связи». Спектры КРС рассчитаны с использованием аддитивной поляризуемости связи Волькенштейна. Предложенный подход позволяет объяснить появление мод, запрещённых в обычном деформационном механизме, которые экспериментально наблюдаются в короткопериодных сверхрешётках (СР) GaAs/AlAs с использованием микроскопа в геометрии рассеяния «in-plane», когда волновой вектор фотонов лежит в плоскости слоёв СР. Предложенный подход может использоваться и для моделирования спектров КРС других нанобъектов.

Рассчитаны и экспериментально исследованы спектры КРС короткопериодных СР GaAs/AlAs (001) для различных направлений волнового вектора. Эксперименты проводились с применением конфокального оптического микроскопа совмещённого со спектрометром (micro-Raman) в различных геометриях рассеяния, как для фононов с волновым вектором, направленным по нормали к СР, так и вдоль её слоёв (в англоязычной литературе «in-plane» геометрия). Использовался спектрометр T64000 (Horiba Jobin Yvon), для возбуждения КРС использовались лазеры с длинами волн 660, 633 и 514.5 нм.

Частоты и собственные векторы фононов были рассчитаны в модели «заряд на связи». Спектры КРС были рассчитаны в рамках расширенного механизма деформационного потенциала (аддитивная поляризуемость связи Волькенштейна [1,2]). Оказалось, что в экспериментальных спектрах проявляются дополнительные пики, не описываемые в рамках обычного деформационного механизма (чёрная штрихованная кривая) [3]. Сделана попытка объяснить появление данных пиков в экспериментальных спектрах в рамках неупругого рассеяния фотонов на поляризации зарядов на связи. В этом случае эксперимент описывается более адекватно (зеленая и красная штрихованные кривые, возбуждение зелёным и красным лазерами, соответственно). Большое влияние на появление пиков КРС в запрещённой геометрии оказывает структура гетерограниц в СР (плоская, либо разупорядоченная) а также значение волнового числа фононных мод. Предложенный подход можно использовать для анализа качества гетерограниц.



Литература

1. М.В. Волькенштейн // Доклады АН СССР. 1941. XXXII. С.185-189.
2. P. Castrillo, L. Colombo, and G. Armelles // Phys. Rev., B. 1994. 49. С.10362-10369.
3. В.А. Володин, В.А. Сачков, М.П. Синюков // ФТП. 2018. Т.52, вып.6. С. 569-574.

Мульти-модальный конфокальный микроспектрометр нового поколения для много-фотонных оптических экспериментов на нано-масштабе

Д.А. Козодаев, Е.В. Кузнецов, М.А. Трусов

*ООО «НОВА СПб», Россия 197374, г. Санкт-Петербург, ул. Савушкина,
д. 83, корп. 3, лит. А, пом. 2-Н(№131),
офис №236*

DOI 10.34077/SCATTERING95-23

Наша компания представляет на конференции КР-95 научное оборудование компании ООО «НТ-МДТ», одного из ведущих разработчиков оптико-зондового оборудования для нано-спектральных исследований.

Компания ООО «НТ-МДТ» имеет давнюю историю, и хорошо известна во всём научном мире. Её команда была первой, кто выпустил на мировой рынок комбинированную АСМ+КР установку для измерений спектральных свойств материалов с нанометровым латеральным разрешением, еще в 2004 г. С тех пор прошло уже почти 20 лет, и производитель все эти годы не стоял на месте! На сегодняшний день уже разработана высоко-профессиональная зондово-спектральная измерительная система нового поколения, в которой конструктивно предусмотрена максимально гибкая архитектура и заложено множество возможностей для реализации самых сложных научных экспериментов, как в оптической спектроскопии так и в зондовой наноскопии.

В нашем докладе мы предполагаем представить базисные принципы, на основе которых строится дизайн мульти-модального конфокального микроспектрометра нового поколения с изначально заложённой возможностью стыковки с атомно-силовым микроскопом, показать первые результаты, полученные на пилотной версии прибора, и обсудить с коллегами возможные варианты расширения оптической функциональности микроспектрометра в части интеграции с методиками много-фотонных оптических экспериментов и построения гиперспектрального картирования нелинейных зондово-оптических взаимодействий.

Исследование мультиферроика TbFe_{2.46}Ga_{0.54}(VO₃)₄ методом КРС: угловые зависимости, фазовая диаграмма давление-температура

С.Н. Крылова¹, А.С. Крылов¹, И.А. Гудим¹, А.Н.Втюрин^{1,2}

¹ИФ СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок, 50/38

эл. почта: slanky@iph.krasn.ru

²СФУ, Красноярск, 660074, Куренского 28

DOI 10.34077/SCATTERING95-24

Кристаллы ферроборатов с редкоземельными элементами в структуре и близкие к природному хантиту представляют интерес в качестве перспективных материалов для оптоэлектронных устройств и приложений [1]. Некоторые из них демонстрируют достаточно высокие магнитоэлектрические эффекты [2, 3]. Свойства кристаллов могут быть изменены за счет полной или частичной замены в структуре ионов редкоземельных элементов или атомов железа. Например, предшествующие исследования показали, что температура структурного фазового перехода в кристалле HoFe₃(VO₃)₄ может существенно смещаться при замещении Fe ионами Ga [4]. При замещении ионов железа на ионы галлия необходима такая концентрация галлия, чтобы не нарушать симметрию кристалла-хозяина. TbFe_{2.46}Ga_{0.54}(VO₃)₄ — один из образцов в ряду от чистого железа до предполагаемого чистого галлия, близкого к границе существования R32 фазы.

Нами было выполнено экспериментальное исследование угловых зависимостей интенсивности мод спектров комбинационного рассеяния света кристалла TbFe_{2.46}Ga_{0.54}(VO₃)₄. Мы получили теоретические угловые зависимости интенсивностей линий различной симметрии. Отнесение экспериментальных линий спектра КРС по типам колебаний сделано на основе анализа этих теоретических зависимостей.

Исследования спектров КРС были выполнены при нормальном давлении и температурах от 8 до 400 К. Изменения в спектрах наблюдаются в области малых волновых чисел (до 300 см⁻¹) и средней части спектров (до 1100 см⁻¹): возникают моды, связанные со структурным упорядочением. В результате исследования мы определили, что в кристалле TbFe_{2.46}Ga_{0.54}(VO₃)₄ происходит структурный фазовый переход из фазы R32 в фазу R312₁ при T = 33 К, который сопровождается восстановлением и конденсацией мягких мод. Температура структурного фазового перехода близка к температуре магнитного упорядочения 50 К. Мы обнаружили особенности спектров комбинационного рассеяния света, проявляющиеся в аномальных смещениях положения линий в спектрах, свидетельствующие о магнитном упорядочении в кристалле. Внутреннее магнитное поле приводит к магнитному упорядочению подрешеток образца, что соответственно влияет на поведение фононных мод кристалла в области низких температур.

Дальнейшее исследование спектров КРС кристалла TbFe_{2.46}Ga_{0.54}(VO₃)₄ было выполнено в среде, состоящей из смеси метанола и этанола при одновременно высоких давлении и температуре (до 6.7 ГПа и 390 К). Фазовая диаграмма давление–температура получена нами вплоть до условий, вызывающих разрушение образца. Мы получили уравнение границы раздела фаз, которое остается линейным во всех исследованных диапазонах давлений и температур. Увеличение давления приводит к увеличению температуры структурного перехода.

Авторы благодарят РФФИ за финансовую поддержку в рамках научного проекта № 21-52-12018 ННИО_а. При проведении исследований использовалось оборудование Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Литература

1. M.M. Vopson // Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. 2015. V. 40, P. 223–250.
2. M. Fiebig // J. Phys. D Appl. Phys. 2005, V. 38, P. R123–R152.
3. Eerenstein, W.; Mathur, N.D.; Scott // Nature. 2006, V. 442, P. 759–765.
4. Moshkina, E. et al // Cryst. Growth Des. 2020, V. 20, P. 1058–1069.

КР исследование разложения карбонатов в водном флюиде при высоких *P-T* параметрах

С.В. Горяйнов¹, А.С. Крылов², У.О. Бородина¹, С.Н. Крылова², А.Ю. Лихачева¹, С.Н. Гришина¹

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева

СО РАН, Новосибирск

² Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск

тел: +7 (923) 189-6253, эл. почта: svg@igm.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-25

Целью работы было экспериментальное изучение системы карбонат-вода при высоких *P-T* параметрах (до 6 ГПа, 450 °С), соответствующих холодной геотерме коры и верхней мантии Земли. Для этого были выбраны карбонат-содержащие минералы: шортит, гидроканкринит и нахколит.

Шортит $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3$ – распространенный карбонат, который образуется при различных условиях, в том числе в кимберлитовой породе при *P-T*-параметрах коры и верхней мантии. Считается, что шортит возникает как постмагматический минерал в карбонатной породе, сопутствующей кимберлиту. Недавно его стабильность была изучена при высоких *P-T* параметрах в «сухой» среде [1] и в водном флюиде [2]. Оказалось, что его поведение в водном флюиде значительно отличается от поведения в сухой среде [1,2]. В работе была поставлена задача: определить *P-T*-область стабильности шортита в водном флюиде и проследить за состоянием флюида. Аналогичные задачи были поставлены при изучении карбонат-алюмосиликата гидроканкринита $\text{Na}_6\text{Ca}_2[(\text{OH},\text{CO}_3)_2\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и гидрокарбоната натрия - нахколита NaHCO_3 .

Экспериментальное моделирование проведено с использованием *in situ* КР спектроскопии в аппарате с алмазными наковальнями DAC [2].

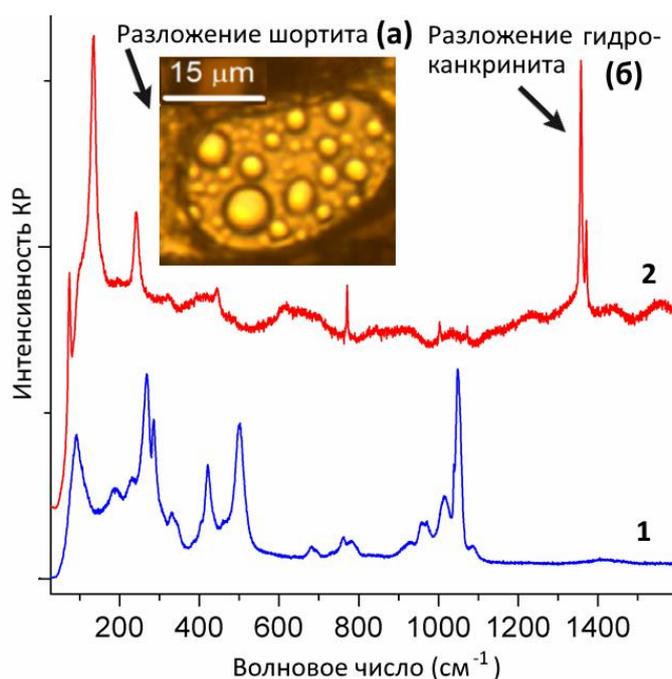


Рис. 1. Разложение карбонатов в водном флюиде: (а) шортита (фото шортита вверху и пузырей во флюиде), (б) гидроканкринита: КР спектры исходного образца (1) и основного продукта разложения - формиата (2).

Карбонаты (шортит, нахколит, гидроканкринит) распадаются с образованием простых карбонатов и формиатов при умеренных *P-T* параметрах (выше 1.5 ГПа, 250 °С). Гидроканкринит распадается на гидросодалит, шеелито-подобную фазу и формиаты (КР спектр 2, рис. 1б). Нахколит распадается на натрит, стеклообразную фазу, арагонит и Na-формиаты.

Флюид в системе шортит-вода расслаивается при некоторых соотношениях карбонат/вода (>0.3) при высоких *P-T*, причем наблюдается образование подвижных «пузырей» (рис. 1а). Расслоение возникает за счет несмесимости по карбонатному и органическому флюидам. Активное расслоение карбонатного флюида способствует большему выходу органических молекул (формиатов).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (номер гос. учета: 122041400176-0) и ИФ КНЦ СО РАН и частично поддержана РФФИ-21-55-14001 АНФ_а.

Литература

1. C. Vennari et al. // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2018. V.123. P.1-18.
2. S.V. Goryainov et al. // J. Phys. Chem. C. 2021. V.125, Art.33. P.18501–18509.

Терморамановская *in situ* спектроскопия природного кубанита CuFe_2S_3 и *ab initio* расчеты его фононного спектра

Е.А. Панкрушина^{1,2}, С.Л. Вотяков¹, Е.В. Комлева³

¹Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, 620110, Ак. Вонсовского 15

²ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, 184209, Ферсмана 14

³Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, 620108, С.Ковалевской 18

тел: +7 (919) 389-6694, эл. почта: lizaveta.94@list.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-26

Понимание структуры и термодинамических свойств сульфидных минералов важно для изучения парагенезиса образования сульфидов на Земле. Электрические и магнитные свойства минерала кубанита CuFe_2S_3 (*Pctm*) существенно зависят от температуры, что отражает изменения его электронной структуры [1]. На основе структурных данных для минерала набор фононных мод в центре зоны Бриллюэна имеет вид $\Gamma = 10A_g + 8A_u + 8B_{1g} + 9B_{1u} + 10B_{2g} + 7B_{2u} + 8B_{3g} + 9B_{3u}$; однако их расшифровка и интерпретация соответствующих рамановских данных остается под вопросом и сегодня; качественные (с высоким отношением *S/N*) рамановские спектры в литературе не представлены. Цель настоящей работы – исследование природного кубанита по данным терморамановской *in situ* спектроскопии и *ab initio* расчеты его фононного спектра в рамках DFT. Анализ динамики решетки кубанита и его фазового перехода выполнен в диапазоне температур 83–873 К (спектрометр Labram HR Evolution с термоприставкой Linkam TSM 600). Поляризованные рамановские спектры получены в трех геометриях эксперимента *y(xx)y*, *z(xy)z*, *y(xz)y* (рис.а); при температуре 443 К фиксируется фазовый переход в изокубанит (*F43m*) (рис.б). Отмечено различие полученных авторских данных с «эталонным» спектром рамановского рассеяния кубанита R061068 при 300 К в базе RRUFF.info.

Согласно *ab initio* расчетам выделены следующие типы колебаний: для симметрии A_g и B_{2g} в трехатомных фрагментах $\text{S}_2\text{-Cu-S}_2$ и $\text{Fe-S}_1\text{-Fe}$; для симметрии B_{1g} и B_{3g} в трехатомном фрагменте $\text{S}_1\text{-Cu-S}_1$ и в четырехатомном с центральным атомом Fe и тремя S_2 . С учетом стабильности димеров Fe-Fe, имеющих общие ребра, а также данных работы [1], высказано предположение о связи фазового перехода при повышении температуры кубанит→изокубанит с пространственной переориентацией фрагментов Cu-S. Расчетный фононный спектр согласуется с авторскими экспериментальными данными.

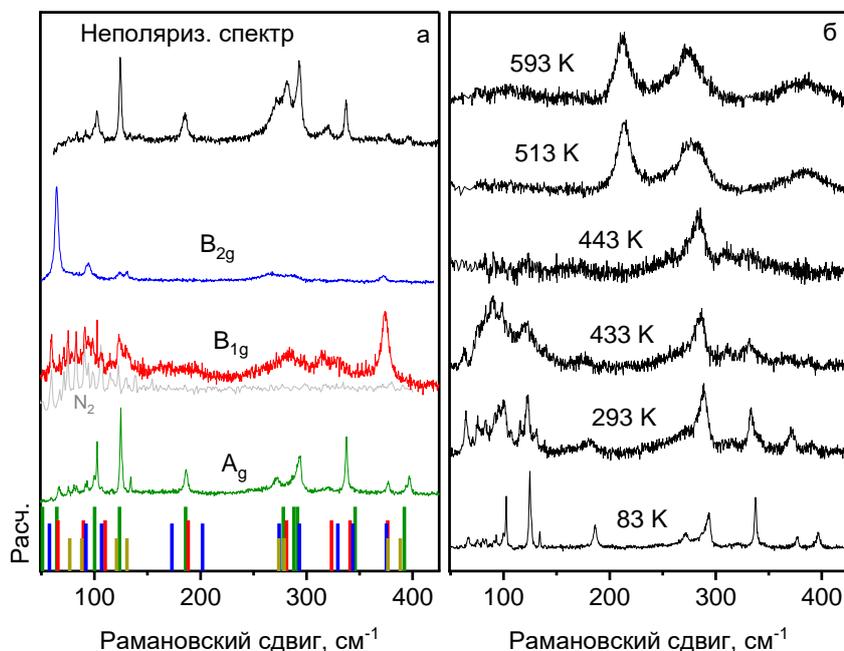


Рис. 1. Поляризованные рамановские спектры природного кубанита при $T=83$ К (A_g) и 293 К (B_{1g} , B_{2g}) и их сопоставление с расчетным фононным спектром (а); неполяризованные спектры кубанита (83, 293, 433 К), изокубанита (433 К), Fe_2O_3 (513, 593 К) (б).

Работа выполнена в рамках г/б темы №123011800012-9 и 122011300125-2. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2021-680.

Литература

1. Pankrushina et al., Phys. Rev. B. 2022. V. 105, No.2. P. 024406.

Полиморфные превращения в пленках CaSi_2 , формируемых при радиационно-стимулированном росте

А.В. Кацюба¹, А.В. Двуреченский^{1,2}, Г.Н. Камаев¹, В.А. Володин^{1,2}, П.А. Кучинская¹

¹ ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова,
Новосибирск, 630090, пр. к. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2
тел: +7 (383)333-27-71, факс: +7 (383)333-27-71, эл. почта: kacuba@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-27

Двумерные кристаллы типа графена на протяжении длительного времени привлекают к себе большое внимание из-за проявляемых в них необычных физических свойств. Также активно изучаются различные графеноподобные материалы, совместимые с существующими полупроводниковыми технологиями. Однако из-за их нестабильности на воздухе требуется инкапсуляция для предотвращения окисления в условиях окружающей среды. Чтобы преодолеть эти недостатки, многие исследователи сосредоточились на исследовании электронных свойств синтезированных двумерных соединений кремния, которые обладают более высокой стойкостью к окислению и можно выращивать на различных подложках.

В настоящей работе представлены результаты исследований по формированию пленки CaSi_2 в условиях воздействия электронного пучка на слой CaF_2 при заданной температуре как непосредственно в процессе эпитаксиального роста CaF_2 , так и после формирования пленки CaF_2 различной толщины. При этом, формирование эпитаксиального слоя CaSi_2 осуществляется при использовании в качестве осаждаемого на поверхности подложки кремния не чистого кальция, а дифторида кальция CaF_2 , который подвергается радиационному воздействию. Проведение облучения в сочетании с высокотемпературной обработкой обеспечивает эффективное образование силицида.

В обоих вариантах радиационно-стимулированного образования CaSi_2 обнаружен схожий результат. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) установлено, что на границе подложки кремния и эпитаксиально растущей пленки CaF_2 под воздействием электронного пучка происходит формирование пленки CaSi_2 одного полиморфа. На начальном этапе эпитаксиального роста при малых толщинах пленки CaF_2 (менее 20 нм) формирующаяся при облучении электронами пленка CaSi_2 характеризуется пространственной группой $R\bar{3}m$ с 3-х слойным трансляционным периодом кремниевых подструктур в элементарной ячейке (3R). С увеличением толщины пленки CaF_2 образующаяся в радиационно-стимулированном процессе пленка CaSi_2 характеризуется пространственной группы $R\bar{3}m$ с 6-х слойным трансляционным периодом кремниевых подструктур в элементарной ячейке (6R).

На Рис.1 представлены спектры КРС, зарегистрированные в месте облучения. Наблюдаются характерные пики в области 418 cm^{-1} , 388 cm^{-1} и 346 cm^{-1} , свойственные для CaSi_2 полиморфа 3R. При увеличении толщины пленки CaSi_2 20 нм и более появляется дополнительный пик в области 203 cm^{-1} , что свидетельствует о переходе к полиморфу 6R.

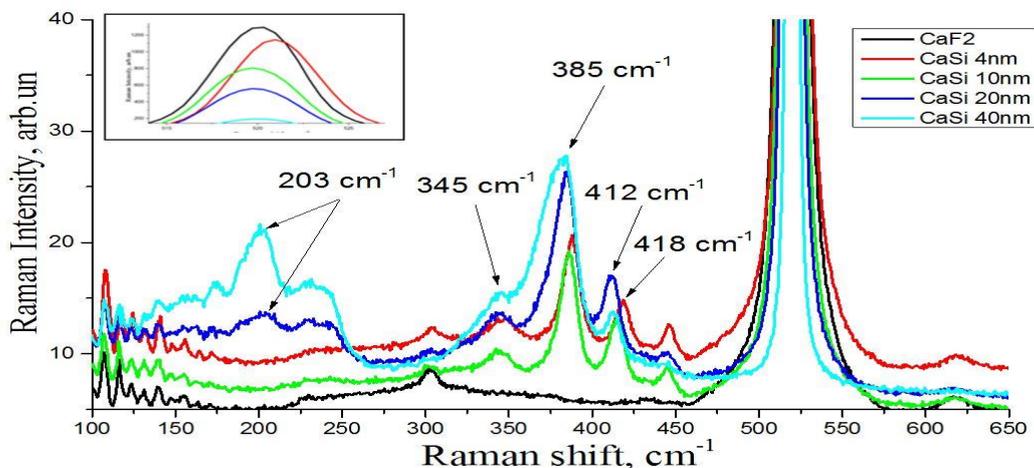


Рис.1. Спектры КРС пленки CaSi_2 с разной толщиной

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-12-00070)

Теоретическое моделирование спектральных характеристик и нелинейных эффектов в кристаллах металлоорганических каркасов

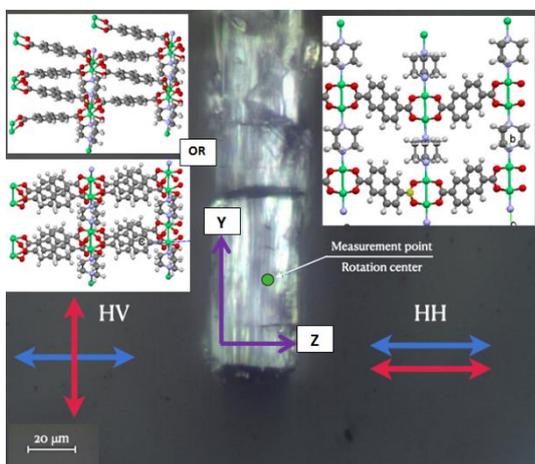
И.Д. Юшина¹, А.С. Крылов²

¹ Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, 454080, пр. Ленина 76

² Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН,
Красноярск, 660036, Академгородок, 50, строение № 38
тел: +7 (351) 267-9564, эл. почта: iushinaid@susu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-28

В работе рассмотрены теоретические подходы к получению расчетных спектральных характеристик, которые могут быть напрямую сопоставлены с экспериментальными поляризованными Раман-спектрами ориентированных монокристаллов и данными по рассеянию Мандельштама-Бриллюэна. Квантово-химические *ab initio* расчеты для металлоорганических каркасов с ароматическими линкерами были проведены в программе Crystal17 с использованием полноэлектронных базисных наборов. Был произведен анализ полученных данных с точки зрения сопоставления с экспериментальными структурными и спектральными данными, наблюдаемыми фазовыми переходами и особенностями межмолекулярных взаимодействий. Проанализированы расчетные подходы к получению интенсивностей спектров в определенных направлениях в кристалле и их возможности для идентификации характеристических мотивов в кристалле. Получены и проанализированы распределения групповых скоростей распространения акустических волн в различных направлениях кристалла. Найденные особенности спектральных, механических и акустических свойств находят отражение в наблюдаемых в таких системах тенденциях к фазовым переходам вследствие открытия и закрытия пор. Обсуждаются возможности визуализации расчетных колебаний для идентификации полос в низкочастотной области экспериментальных спектров.



Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Немецкого научно-исследовательского сообщества в рамках проекта 21-52-12018.

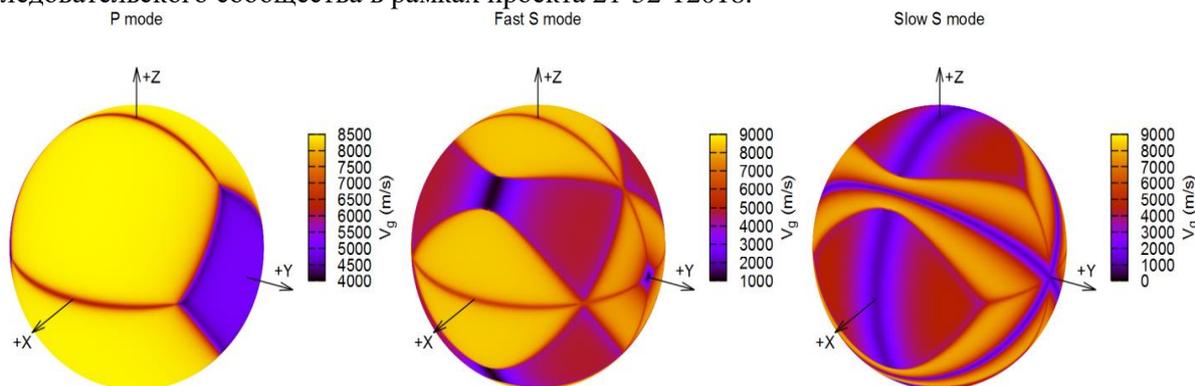


Рис. 1. Схематический вид анализируемого кристалла и распределение структурных фрагментов внутри него (вверху); расчетное пространственное распределение групповых скоростей различных акустических мод с различных направлений кристалла DUT-8 (Ni).

Литература

1. R. Dovesi *et al.* WIREs Comput Mol Sci. 2018. Vol. 8, e1360
2. A.S. Krylov *et al.* Physical Chemistry Chemical Physics. 2022. Т. 24(6), С. 3788–3798.

Определение кристаллографической ориентировки кристаллов алмаза методом спектроскопии комбинационного рассеяния света

Л.И. Богданова¹, Ю.В. Шапова^{1,2}

¹Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН,
Екатеринбург, 620110, Академика Вонсовского 15

²Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, 620062, ул. Мира 21

тел: +7 (996) 181-8273, эл. почта: bogdanovalouisa@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-29

Определение кристаллографической ориентировки поверхности минералов с микрометровым пространственным разрешением, установление кристаллографических соотношений между кристаллом-хозяином и включением, оценка разориентировок фрагментов кристалла после внешних ударных нагрузок – актуальные вопросы при решении задач минералогии, петрологии, термобарометрии. Цель настоящей работы – отработка алгоритма и создание программного обеспечения для определения кристаллографической ориентировки (микро)кристаллов методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) на примере монокристаллов алмаза.

Спектры КР получены в геометрии обратного рассеяния на конфокальном КР спектрометре *Horiba LabRam HR800 Evolution* (объективы *Olympus 50×* и *100×*, дифракционная решетка 1800 штр/мм, возбуждение 633 нм). С пространственным латеральным разрешением 1-2 мкм, спектральным разрешением в области спектра алмаза первого порядка (мода T_{2g} при $\sim 1332 \text{ см}^{-1}$) – 0.6 см^{-1} . Измерены поляризованные спектры произвольно ориентированной поверхности кристалла при пошаговом вращении направления поляризации рассеянного излучения на 360° ; при двух ориентировках образца относительно направления поляризации падающего света, различающихся на 90° . Получены круговые диаграммы КР интенсивности, вид которых определяется ориентировкой кристалла (Рис).

Угловая зависимость интенсивности колебательной моды T_{2g} алмаза может быть записана в виде $I_s = C_1(\alpha, \beta, \gamma, \psi_i) + C_2(\alpha, \beta, \gamma, \psi_i)\sin(2\psi_s) + C_3(\alpha, \beta, \gamma, \psi_i)\cos(2\psi_s)$, где I_s – интенсивность рассеянного света, C_i – коэффициенты, зависящие от углов Эйлера α, β, γ между направлениями осей лабораторной системы координат и кристаллографических осей кристалла, ψ_i, ψ_s – угол падающего и рассеянного света, соответственно. Анализ результатов состоит в подгонке значений углов Эйлера, обеспечивающих наилучшее соответствие интенсивности сигнала I_s экспериментальным круговым диаграммам. Создана компьютерная программа в среде *MATLAB*, основанная на определении множества оптимальных параметров с использованием нелинейной минимизации *fmincon*. Алгоритм и программа апробированы на синтетических и природных монокристаллах алмаза известной ориентировки (см. Рис). В частности, для образцов с ориентировкой поверхности $[100]$ и $[111]$ рассчитанные углы Эйлера составили $(40, 0, 0)$ и $(46, 46, 44)$, соответственно. Таким образом, рассчитанные значения углов Эйлера согласуются с известными данными. В дальнейшем планируется адаптация действующей программы для исследования других минералов на основе соответствующих тензоров рассеяния.

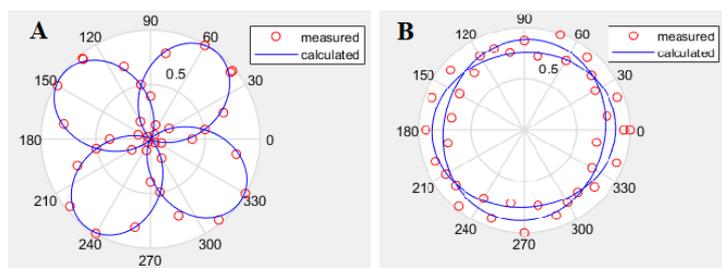


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) круговые диаграммы интенсивности КР с поверхности алмаза $[100]$ (А) и $[111]$ (В)

Работа выполнена в рамках Госзадания ИГГ УрО РАН (№ 123011800012-9) с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, дооснащение и развитие которого поддержано грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075 -15-2021-680.

Спектроскопические характеристики графеновых квантовых точек – нового 0-мерного материала для экологии и биологии

Е.Д. Образцова^{1,2}, П.В. Федотов^{1,2}, И.А. Елисеев³, В.Ю. Давыдов³, Darwin Kurniawan⁴,
Wei-Hung Chiang⁴

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, ул. Вавилова, 38

² Московский физико-технический институт, Долгопрудный,
141701, Институтский пер., 9

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург,
194021, Политехническая, 26

⁴ Department of Chemical Engineering, National Taiwan University of Science and Technology,
Taipei, 10607, Taiwan

тел: +7 (906) 097-3331, факс: +7 (499) 503-8723, эл. почта: elobr@kapella.gpi.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-30

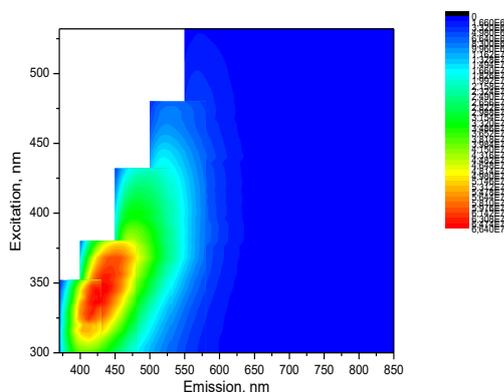


Рис.1. Карта фотолюминесценции («возбуждение-эмиссия») графеновой квантовой точки.

Разработан микроплазменный метод преобразования при атмосферном давлении натурального биосовместимого материала – хитозана в графеновые квантовые точки (ГКТ) с регулируемыми размерами, контролируруемыми оптическими методами – фотолюминесцентной (ФЛ) спектроскопией и спектроскопией комбинационного рассеяния (КР) света. Такой быстрый синтез не нуждается в сильных кислотах и основаниях, ядовитых растворителях и химикатах, а также в высокотемпературных и вакуумных условиях [1]. Разговор об углеродных квантовых точках идет давно, но ГКТ с кристаллическим графеновым ядром получены недавно. В данной работе существование точек с диаметром 4-6 нм подтверждено методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Для точек различного

диаметра получены карты фотолюминесценции («возбуждение-эмиссия») с размерно-зависимым положением максимума резонансной ФЛ. Размерно-зависимые сигналы КР селективно регистрировались при возбуждении квантами He-Cd лазера (325 нм), энергия которых была выше максимума пика ФЛ. Возможность такой схемы возбуждения обусловлена 0-мерной природой материала. Яркая ФЛ ГКТ использовалась как индикатор присутствия и количества тяжелых металлов в водных растворах. ГКТ использовались также в качестве фильтров для очистки таких суспензий от тяжелых металлов [2]. ГКТ с добавлением азота использовались для выявления белков в водных суспензиях. При различных уровнях pH в растворе регистрировались различные биомолекулы (глюкоза, фруктоза, тирозин, глицин и т.д.)

Работа выполнена при поддержке РФФ проект-21-72-20050.

Литература

1. D. Kurniawan, W.-H. Chiang, Carbon 167 (2020) 675-684.
2. D. Kurniawan, et al., Chem. Eng. Journ. 451(2023) 139083(1-12).
3. Yan-Yi Chen, Darwin Kurniawan, Seyyed Mojtaba Mousavi, Pavel V. Fedotov, Elena D. Obratsova, Wei-Hung Chiang, Journ. of Materials Chemistry 10 (2022) 9654-9666.

Структура и спектры КРС массивов вертикально ориентированных углеродных нанотрубок

Д.В. Щеглов¹, О.И. Семенова¹, С.В. Родякин¹, Н.Н. Курусь¹, Д.И. Роголо¹, Д.А. Насимов¹,
А.К. Гутаковский¹, Л.И. Федина¹, А.А. Дудин², А.А. Павлов², А.В. Латышев¹

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева, 13

² Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Ленинский проспект, 32а
тел./факс: +7 (383) 3309082, эл. почта: sheglov@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-31

Массивы вертикально ориентированных углеродных нанотрубок (ВОУНТ) благодаря своей механической прочности, высокой электро- и теплопроводности являются перспективным материалом для использования в различных приложениях, начиная от полевых излучателей, дисплеев, биологических датчиков и микроэлектронных устройств до хранения водорода и фотодетекции в широком спектральном диапазоне.

В докладе представлены результаты по синтезу малостенных (1, 2-15 слоев) ВОУНТ методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) на установке Advanced Deposition System VM Pro 6 inch (Германия). В качестве буферного слоя использован оксид алюминия (Al_2O_3), полученный методом атомно-слоевого осаждения на поверхность монокристаллического Si(100). Катализаторами роста нанотрубок являлись нанокластеры железа (Fe). В качестве реакционных газов для синтеза ВОУНТ использовались ацетилен C_2H_2 , водород H_2 и азот N_2 . Структура массивов ВОУНТ исследована с помощью сканирующей и высокоразрешающей электронной микроскопии (СЭМ, ВРЭМ) и комбинационного рассеяния света (КРС). Спектры КРС снимались при комнатной температуре на спектрометре Horiba XploRa Plus в конфигурации обратного рассеяния. В качестве источников возбуждающего излучения использовались твердотельные лазеры с длинами волн 532 нм и 785 нм и мощностями 1.18 мВт и 0.46 мВт, соответственно.

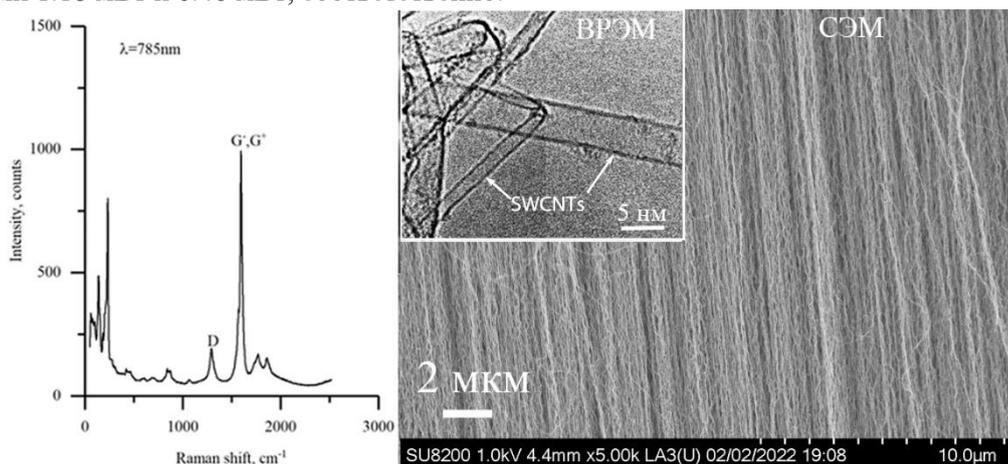


Рис.1. Спектр КРС массива ВОУНТ высотой 90 мкм и его СЭМ изображение. На вставке ВРЭМ изображение одностенных углеродных нанотрубок.

Спектр КРС на рис.1 имеет три особенности: наличие радиальной дышащей моды (RBM) при частотах менее 230cm^{-1} , соответствующей синхронным радиальным колебаниям атомов углерода в одностенных УНТ, высокочастотной G-полосы между 1500 и 1600cm^{-1} , связанной с колебаниями С-С связи графенового слоя и D-линии около 1300cm^{-1} , относящейся к структурным дефектам трубок и остаточному аморфному углероду на их внешних стенках. Количественно оценить вклад дефектов в обеспечение интенсивности D полосы невозможно, однако отношение интенсивностей полос G и D (I_G/I_D) может быть использовано для оценки степени структурного совершенства массива ВОУНТ. Для нашего массива ВОУНТ это соотношение составляет около 7, что свидетельствует о его достаточно хорошем структурном качестве. При этом анализ RBM мод по высоте массива демонстрирует неизменность спектра КРС, что указывает на его структурную однородность.

Работа выполнена в рамках Госконтракта 20411.1950192501.11.003 of 29.12.20 (Шифр: 17705596339200009540) при использовании оборудования ЦКП «Наноструктуры».

Спектроскопия комбинационного рассеяния света плазмы крови человека для диагностики глиомы

О.П. Черкасова¹, А. Самаринова², Д.А. Вражнов², Ю.В. Кистенев²

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск,
630090, пр. акад. Коптюга, 1

² ТГУ, Томск, 634050, пр. Ленина, 36

тел: +7 (965) 283-11-92, эл. почта: o.p.cherkasova@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-32

Глиомы являются распространенными опухолями головного мозга. Среди них, мультиформная глиобластома, наиболее агрессивный и инвазивный тип глиом, имеющий неблагоприятный прогноз выживаемости [1]. Основная причина этого – поздняя диагностика [2]. Ранняя и неинвазивная диагностика онкологических заболеваний может быть достигнута с помощью измерения спектральной картины жидкостей организма [3]. Было показано применение спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) сыворотки крови в сочетании с методами машинного обучения для диагностики рака молочной железы [4], печени [5, 6], яичников и ряда других видов онкологии [7]. Ранее нами была изучена сыворотка крови мышей в динамике развития экспериментальной глиобластомы U87, определены наиболее оптимальные методы машинного обучения для анализа КРС спектральных данных [8].

Цель данной работы состояла в изучении плазмы крови пациентов с глиомой методом КРС, определение наиболее информативных частот для дифференции групп. Были исследованы группы пациентов с глиомой (n=14), с травмами (n=13) и доноры (n=11). В работе использовали КР спектрометр inVia Reflex (Renishaw, Великобритания), длина волны возбуждения 785 нм. Для анализа спектров КРС образцов плазмы крови и был применен конвейер машинного обучения, который включал следующие основные этапы: 1) вычитание фона, нормализация данных путем деления на максимальное значение, 2) анализ главных компонент использовался для извлечения информативных признаков, 3) для построения прогнозных моделей использовались машина опорных векторов, случайный лес и градиентный бустинг; применили десятикратную перекрестную проверку для верификации моделей; 4) извлечение информативных спектральных особенностей [8].

Было показано, что выбранные нами прогностические модели позволяют по КР спектру плазмы крови отделить пациентов с глиомой от здоровых доноров и от пациентов с травмами: площадь под кривой графика зависимости чувствительности от специфичности более, чем 0.9. Наибольший вклад в разделение групп дают информативные частоты в диапазоне 1156-1200 и 1524-1584 см⁻¹, которые соответствуют растяжению C-C, C-N связей в молекулах белков, каротиноидов, аминокислотам триптофану, тирозину и фенилаланину.

Таким образом, проведенное исследование показало, что КР спектроскопия плазмы крови человека может быть использована для диагностики глиомы и позволяет отслеживать изменение состояния тканей головного мозга при развитии глиобластомы.

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ИАиЭ СО РАН, часть работ поддержана проектом РФФИ-Китай (№ 19-52-55004), соглашением № 075-15-2021-615 от 04.06.2021 г.

Литература

1. Q.T. Ostrom, et al. // Neuro-oncology. 2021. V. 23, S3. P. iii1–iii105.
2. O. Cherkasova, et al. // Photonics. 2021. V. 8, N. 1. P. 22.
3. Y. Peng, et al, Indirect Imaging // Advances in Brain Imaging Techniques / Eds. N. Mazumder, G. Gangadharan, Yu.V. Kistenev. - Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2022. - Ch.10. - P. 163-182.
4. J.L. Pichardo-Molina, et al. // Lasers Med. Sci. 2007. V. 22. P. 229–236.
5. I. Taleb, et al. // Analyst. 2013. V.138. P. 4006–4014.
6. A.A. Mankova, et al. // Opt. Spectrosc. 2020. V.128. P. 964–971.
7. G.W. Auner, et al. // Cancer Metastasis Rev. 2018. V. 37. P. 691–717.
8. D. Vrazhnov, D., et al. // Pharmaceutics. 2023. V. 15. P. 203.

Необычные свойства спектра КРС “угольного графита” с месторождения Сэрэген (Таймыр). Новая аллотропная форма углерода?

Н.Н. Мельник¹, С.К. Симаков², Д.С. Косцов¹

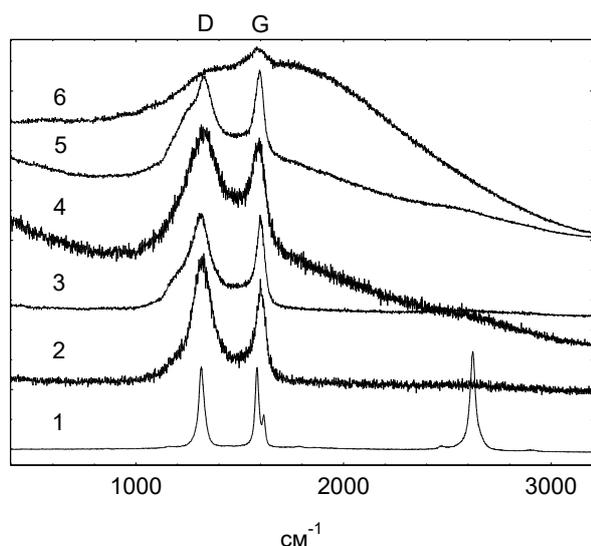
¹ ФИАН, Москва, 119991, Ленинский проспект, д.53

² ООО АДАМАНТ, Санкт-Петербург, 194064, Тихорецкий 10/1-61

тел: +7 (903) 768-4742, эл. почта: melnik@lebedev.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-33

Методом КРС исследовались образцы ископаемых углей из различных месторождений (Рис. 1- угольный графит, месторождение Сэрэген, Таймыр; 2 - антрацит, месторождения Сэрэген, Таймыр; 3 - антрацит, Кузбасс; 4 - бурый уголь; 5 - антрацит, Донбасс; 6 - древесный уголь, Кемерово. Спектры 2÷6 являются стандартными спектрами КРС ископаемых углей - уширенные D и G полосы, характеризующие разупорядоченный углерод и слабо выраженный спектр второго порядка.



Необычным оказался вид спектра КРС угольного графита (1). Спектр состоит из трех узких полос, характерных, как правило, для монокристаллов. Третья полоса ($\sim 2622\text{см}^{-1}$), находящаяся в частотной области полос второго порядка, имеет интенсивность равную интенсивности полос первого порядка. Образец 1 по внешнему виду ничем не отличается от остальных образцов ископаемых углей и элементный анализ показал, что в образце 1 присутствуют только атомы углерода и незначительные следы кислорода.

Подобные спектры наблюдались в других, искусственно созданных углеродных образцах. В работе [1] аналогичный спектр приписывается нанографиту. Авторы [2] считают, что подобный спектр связан с различными дефектами графена.

Было сообщение, где такой спектр приписывался многостенным нанотрубкам.

Для выяснения вопроса были проведены тщательные сравнения спектров КРС первого и второго порядков образца 1 и спектров КРС различных аллотропных форм углерода: алмаз, графит, графен, одностенные и многостенные нанотрубки. Оказалось, что нет прямых аналогов между спектрами образца 1 и спектрами КРС других аллотропных форм углерода.

Сравнение частот и полуширин полос КРС, зарегистрированных в разных точках образца 1, позволило сделать вывод о взаимозависимости этих полос. Следовательно, можно предположить, что образцы 1 имеют индивидуальную структуру, отличающуюся от известных аллотропных структур.

На основании проведенных экспериментов можно предположить, что есть вероятность существования новой аллотропной формы углерода. Конечно, для достоверного вывода и определения структуры, необходимы дополнительные исследования.

Литература

1. M. A. Pimenta et al., Studying disorder in graphite-based systems by Raman spectroscopy, Phys. Chem. Chem. Phys., 2007, 9, 1276–1291.
2. A. Eckmann et al., Nano Lett. 2012, 12, 3925–3930.

ГКРС на оптических колебательных модах графена

В.А. Калинин^{1,2}, Н.Н. Курусь¹, Н.А. Небогатикова¹, И.В. Антонова^{1,2},
Е.Е. Родякина^{1,2}, А.Г. Милехин¹, А.В. Латышев^{1,2}

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2
тел: + 7 (383) 316-60-54, эл. почта: v.kalinin@g.nsu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-34

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КРС) зарекомендовала себя как точный инструмент для оптической характеристики широкого класса веществ. Мировые тенденции в области оптической спектроскопии связаны с переходом к исследованию малых количеств аналита. В этой связи, актуальным направлением спектроскопии КРС является развитие подходов к усилению оптического отклика исследуемым веществом. Одним из подходов является гигантское комбинационное рассеяния света (ГКРС). Суть данного метода заключается в многократном усилении сигнала КРС (до 10^6) полем локализованных плазмонов, возбуждаемых на поверхности металлических структур

Несмотря на широкое применение графена в качестве выравнивающего и пассивирующего покрытия при создании плазмонных подложек для ГКРС, колебательные свойства самого графена, являющегося элементом подобных гибридных металл-полупроводник структур, остаются слабо изученными.

Данная работа посвящена изучению гигантского комбинационного рассеяния света графеном, расположенным на подложке в виде периодического массива золотых нанодисков различного диаметра от 50 до 250 нм (Рис.1).

Продемонстрирован резонансный характер плазмонного усиления оптического отклика графеном. Показано, что при увеличении длины волны возбуждающего излучения с 532 до 785 нм происходит увеличение диаметра дисков, для которых коэффициент усиления оптического отклика максимален.

При возбуждении лазером с длиной волны 638 нм наибольшее усиление ($KU=130$) наблюдается в спектре ГКРС для D моды, обусловленной рассеянием на колебаниях симметрии A_{1g} и указывающей, как правило, на присутствие дефектов в кристаллической решетке графена. Тем не менее, в данном случае подобное поведение D-моды связано, по-видимому, с формированием большого числа микро- и наноскладок при помещении плёнки графена на плазмонную подложку [1]. КУ интенсивности КРС для G- и 2D мод равны 14 и 3, соответственно. Меньшее усиление данных колебательных мод, по-видимому, обусловлено разными правилами отбора для ГКРС на модах разной симметрии и их частотным положением относительно энергии пика локализованного поверхностного плазмонного резонанса нанокластеров Au.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проект № 20-52-04009).

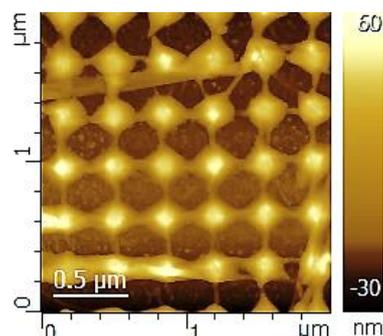


Рис. 1. АСМ изображение плёнки графена, расположенной на периодическом массиве Au нанодисков.

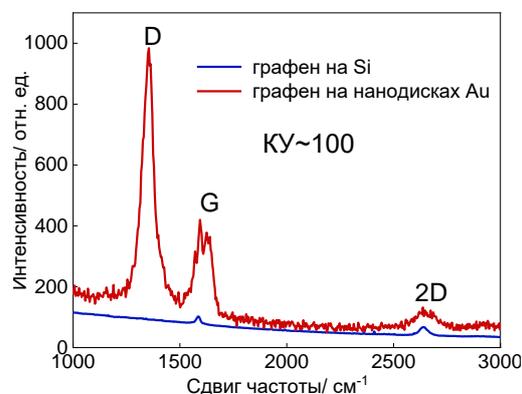


Рис. 2. Спектр ГКРС графеном, расположенным на массиве золотых нанодисков диаметром 100 нм (красный) в сравнении со спектром КРС графеном на кремниевой подложке (синий). Спектры записаны при длине волны возбуждения $\lambda=638$ нм.

Литература

1. Kravtsev, A. (2018, September). Nanoimaging and Nanospectroscopy VI (Vol. 10726, p. 1072609). SPIE

Молекулярный подход к комбинационному рассеянию разупорядоченного sp^2 углерода

Е.А. Голубев¹, Е.Ф. Шека²

¹ *Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар,
167982, Первомайская, 54*

² *РУДН, Москва, 117198, Миклухо-Маклая, 6
тел.: +7 (821) 224-5167, эл. почта: yevgenyGolubev74@mail.ru*

DOI 10.34077/SCATTERING95-35

В XXI веке комбинационное рассеяние (КР) быстро стало доминирующим методом тестирования углеродных веществ на основе графена. Для понимания КР в таких структурах сформировались два основных подхода: твердотельный подход на основе рассеяния фононов как совершенных, так и дефектных кристаллов, и молекулярный подход – на анализе колебаний свободных молекул (обзор приведен в работе [1]). Сходство спектров для дефектных и сильно неупорядоченных кристаллов графита, представленных ключевыми полосами D, G и 2D, позволило использовать и совершенствовать твердотельный подход для характеристики структуры sp^2 углерода, в том числе наноразмерной, включая оценку размеров структурных элементов, используя положение, ширину и интенсивность этих полос. Твердотельный подход по аналогии широко применялся и для разупорядоченного sp^2 углерода. При этом, общая разупорядоченность строения и очень малый размер пачек графеновых слоев делают слабой корректность такого применения [2,3]. В работе [3] к спектрам КР природного разупорядоченного углерода был успешно применен молекулярный подход. Описанные особенности спектров КР представлены в докладе на примере природных образцов разупорядоченного sp^2 углерода (шунгитов, антраксолитов, антрацита). Для сопоставления спектров КР со структурными особенностями по изученным в работе образцам имеется детальная структурная информация, полученная методами высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и рентгеновской дифракции. Анализ спектров КР наших образцов в приближении свободных молекул в рамках классического и полуклассического механизмов [3] позволил связать особенности спектров с особенностями наноразмерной структуры.

Рассматривая как структурную основу пачки графеновых слоев были проанализированы спектры шунгитов, антраксолитов и антрацита с точки зрения теории спектров молекул полициклических ароматических углеводородов, дополнив их концепцией дисперсии длин связей $C = C$. Соответствующая дисперсия растяжения длин связей $C=C$ валентных колебаний составляет $\sim 400 \text{ см}^{-1}$ в интервале от 1300 см^{-1} до 1700 см^{-1} , покрывая основную спектральную область разупорядоченных углеродных веществ. В целом, несмотря на разность теоретических основ, ключевым результатом интерпретации спектров КР является оценка структуры природного разупорядоченного sp^2 углерода как совокупности разориентированных пачек графеновых слоев размерами первые нанометры. Следует отметить, что достоверность оценки размеров этих пачек из спектров КР с использованием традиционных эмпирических выражений (Tuinstra and Koenig, Knight and White, Ferrari, Cancado, Lagouche and Stansfield), основанных преимущественно на сопоставлении данных КР и рентгеновской дифракции, очень неоднозначна для объектов нашего исследования [2,3], что будет показано и в докладе. Тем не менее, размер и упаковка пачек (т.е. количество слоев) влияет на вид спектра [4], предоставляя тем самым возможность анализа таких структурных параметров как размер графеновой пачки, число слоев в пачках и степень их разупорядочения.

Исследование частично поддержано грантом РФФ 21-47-00019.

Литература

1. A. Merlen, J.G. Buijnsters, C. Pardanaud. // *Coatings*. 2017. V. 7. P. 153.
2. D.B. Schuepfer et al. // *Carbon*. 2020. V. 161. P. 359–372.
3. E.F. Sheka, Ye.A. Golubev, N.A. Popova. // *Nanomaterials*. 2020. V. 10. P. 2021.
4. E.F. Sheka, N.A. Popova. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. V. 23. P. 6978.

Влияние упругого рассеяния света в суспензиях субмикронных частиц на характер распространения света и эффективность комбинационного рассеяния света

О.И. Соколовская¹, Л.А. Головань¹

¹ *Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва,*

119991, Ленинские горы, д.1, стр. 2

тел: +7 (495) 939-4657, факс +7(495)939-1566, эл. почта: oi.sokolovskaja@physics.msu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-36

Упругое рассеяние света в неупорядоченной среде может иметь своим следствием рост объема взаимодействия излучения с веществом по сравнению с однородной средой. [1]. В свою очередь, этот рост может привести к увеличению эффективности различных оптических процессов, например комбинационного рассеяния света (КРС). Однако в настоящий момент роль некогерентных эффектов в усилении оптического сигнала в случайно-неоднородной среде исследована не до конца. В частности, следует понять, при каких параметрах рассеивателей становится возможным такое усиление и насколько большим может быть рост эффективности оптических процессов в веществе за счет упругого рассеяния света.

В данной работе нами были проведены как численное моделирование, так и экспериментальное исследование распространения света и эффективности процесса КРС в рассеивающих средах. В качестве рассеивающей среды было рассмотрено суспензия частиц рутила и фосфида галлия с диаметрами 0.5 и 3 мкм соответственно в диметилсульфоксиде (ДМСО) – жидкости, активной в комбинационном рассеянии; объемная доля частиц варьировалась в диапазоне 0.02% - 10%. Для регистрации динамики рассеянного суспензиями излучения был использован метод оптического гетеродинамирования [2] с использованием лазерных импульсов длительностью 80 фс (длина волны 1250 нм). Спектры КРС были получены при возбуждении излучением с длинами волн 1064 и 532 нм.

Численное моделирование распространения света в суспензиях методом Монте-Карло [3] показало, что средняя длина пути фотона в суспензии порошка рутила в ДМСО может возрасти до 2 раз по сравнению с чистым ДМСО, а возможный при этом рост эффективности КРС в геометрии «на отражение» - в 6 раз, при этом зависимость сигнала КРС от объемной доли рассеивателей оказывается немонотонной. При добавлении порошка GaP в ДМСО средняя длина пути фотона и сигнал КРС сильно уменьшаются с ростом объемной доли рассеивателей из-за поглощения света в них.

Результаты численного моделирования временной динамики распространения лазерных импульсов в суспензиях хорошо согласуются с экспериментальными данными для объемной доли частиц не выше 1%. Для более плотных суспензий экспериментальные данные показывают большее время жизни фотона, чем предсказано диффузионной моделью распространения света. Эксперименты по КРС в суспензии частиц рутила демонстрируют немонотонную зависимость сигнала КРС от объемной доли рассеивателей, для которой максимальный 4-х кратный рост сигнала КРС достигается при объемной доле рассеивателей 0.6%, а дальнейшее ее увеличение приводит к спаду и последующему росту сигнала КРС. Последнее согласуется с обнаруженным в эксперименте ростом времени жизни фотонов при сравнительно высоких концентрациях рассеивателей и, возможно, обусловлено появлением когерентных эффектов при рассеянии света.

Таким образом, в настоящей работе показана возможность роста эффективности оптических процессов в неупорядоченной среде (по сравнению с таковой в однородной среде) за счет упругого рассеяния света, а также некогерентный и когерентный характер такого роста в зависимости от объемной доли оптических неоднородностей.

Литература

1. В. Н. Hokr et al. // Nat. Comm. 2014. Vol.5, №.1. С. 4356.
2. К.П. Бестемьянов и др. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 7. С. 666–668.
3. L. H. Wang, S.L. Jacques, L. Zheng // Comp. Methods Progr. Biomed., 1995. Vol. 47, №2. P. 131-146.

Оптические и электронные явления в нитевидных нанокристаллах при механической деформации

П.А. Алексеев¹, В.А. Шаров¹, В.В. Фёдоров², А.М. Можаров², И.С. Мухин², Г.Э. Цырлин²,
Д.А. Кириленко¹, А.Н. Смирнов¹, В.Ю. Давыдов¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург,
194021, Политехническая, 26

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И.
Алфёрова РАН, 194021, Хлопина 8

тел: +7 (812) 292-7317, эл. почта: prokhor@mail.ioffe.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-37

Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы (ННК) АЗВ5 являются перспективными объектами для применения в приборах фотоники, электроники и оптоэлектроники нового поколения. Вследствие их малого диаметра (~100нм) возможен их бездислокационный рост на сильно рассогласованных подложках, а также стабилизация вюрцитной кристаллической структуры в арсенидах, антимонидах и фосфидах. С другой стороны, геометрия ННК и большое соотношение поверхность/объём облегчает исследование поверхностных электронных явлений, а также оптических и электронных явлений при высоких упругих деформациях (~10%) недостижимых для объёмных полупроводников.

Поверхностные электронные явления в АЗВ5 ННК определяются положением закрепления (пиннинга) уровня Ферми на поверхности. Для выявления положения и причины закрепления уровня Ферми были проведены комплексные исследования методами Кельвин-зонд микроскопии (определение работы выхода), спектроскопии микрофотолюминесценции, спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и просвечивающей электронной микроскопии (определение состава и структуры ННК). Для широкого класса составов тройных растворов арсенидов и антимонидов были выявлены общие закономерности, заключающиеся в более интенсивном окислении элементов третьей группы по сравнению с элементами пятой группы в соединениях. Менее интенсивное окисление приводит к формированию приповерхностного слоя из элементов пятой группы (As или Sb). Формирование данного слоя и приводит к закреплению уровня Ферми, при этом положение закрепления постоянно относительно уровня вакуума и определяется элементом пятой группы [1]. Так например, в InAs уровень Ферми закреплён в зоне проводимости, что приводит к формированию поверхностного канала проводимости. В GaAs уровень Ферми закреплён в запрещённой зоне, что приводит к обеднению ННК. Поскольку растяжение InGaAs ННК должно приводить к снижению дна зоны проводимости относительно положения закрепления уровня Ферми, то при определённых составах тройного раствора должно происходить резкое увеличение проводимости с растяжением. Экспериментально это было продемонстрировано на одиночных InGaAs ННК, что позволило получить тензорезистор с рекордными характеристиками [2].

Для исследования оптических свойств ННК в видимом диапазоне наиболее интересным является GaP обладающим не прямой зонной структурой и высоким показателем преломления $n \sim 3.5$. Данные ННК были перенесены на подложку с последующим их изгибанием и контролируемым созданием деформаций до 5%. Картирование спектров КРС таких образцов в различных поляризациях выявило зависимость спектров КРС не только от степени деформации, но также и от диаметра ННК и взаимного расположения пучка накачки и ННК. Моделирование показало, что изменение диаметра и сдвиг положения пучка относительно ННК позволяет управлять характером локализации электромагнитного поля внутри ННК. Поскольку интенсивность КРС определяется локализацией поля, то известная зависимость сдвига ТО линий от деформации позволила экспериментально определить локализацию поля внутри ННК в каждом конкретном измерении по спектрам КРС от деформированных ННК.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00121, <https://rscf.ru/project/22-22-00121/>.

Литература

1. Alekseev P. A. et al.// Nanotechnology. 2018. Т. 29. №. 31. С. 314003.
2. Alekseev P. A. et al. // Nano letters. 2019. Т. 19. №. 7. С. 4463-4469.
3. Sharov V. A. et al. // Nano Letters. 2022. Т. 22. №. 23. С. 9523-9528.

Комбинационное рассеяние света с переворотом спина в непрямозонных КТ (In,Al)As/AlAs

Т.С. Шамирзаев^{1,2}, D. Kudlacik², Д. Р. Яковлев^{2,3}, М. Bayer²

¹ ИФП им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева, 13

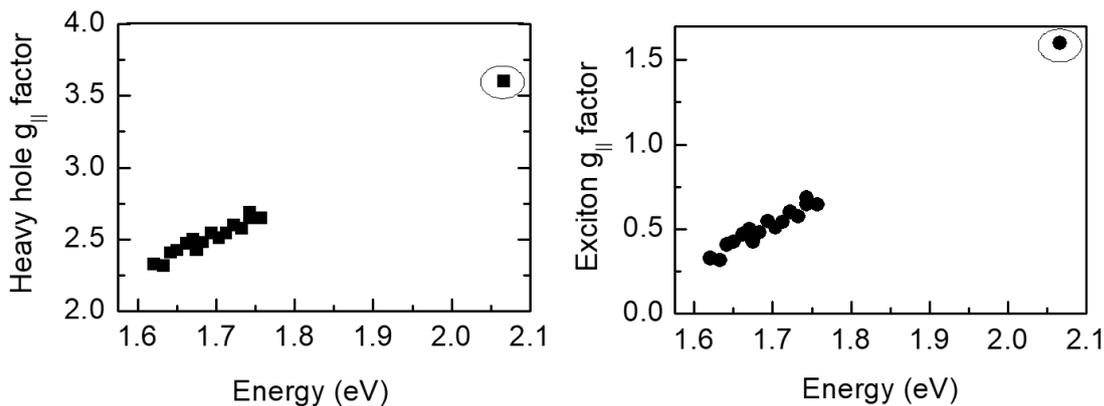
² Experimental Physics 2, TU Dortmund University, Dortmund, 44221, Germany

³ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

тел: +7 (383) 330-4475, факс: +7 (383) 330-6945, эл. почта: tim@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-38

Приложение к структурам с непрямозонными (In,Al)As/AlAs КТ первого рода продольного магнитного поля приводит к появлению циркулярной поляризации ФЛ. Поляризации экситонного излучения, индуцированная магнитным полем, имеет разные знаки в квантовых точках большого и малого размеров. При рекомбинации оптически активных экситонов знак наведенной магнитным полем поляризации определяется соотношением g факторов электрона (g_e) и дырки (g_{hh}) в составе экситона $g_{ex} = g_{hh} - g_e$. Для $g_{ex} > 0$ поляризация отрицательна, а для $g_{ex} < 0$ положительна. Поскольку в непрямозонных (In,Al)As/AlAs КТ $g_e = 2$ [1] знак g_{ex} однозначно определяется величиной g_{hh} . В данной работе зависимости g факторов тяжелой дырки и экситона от размера непрямозонной (In,Al)As/AlAs КТ определялись резонансным оптическим методом – комбинационным рассеянием света (КРС) с переворотом спина в магнитном поле 7 Тл при температуре 1.7 К. Резонансное оптическое возбуждение дырки стало возможным, благодаря квазирезонансному поглощению света через состояния электронов в Γ долине зоны проводимости КТ определенного размера.



Зависимости продольных g факторов тяжелой дырки и экситона от энергии оптического возбуждения (соответствующего возбуждению экситонов в непрямозонных КТ различного размера, рост энергии соответствует уменьшению размера), приведены на рисунке. Видно, что величины g факторов монотонно увеличиваются с уменьшением размера КТ. Уменьшение сигнала КРС с ростом энергии возбуждения из-за уменьшения времени жизни промежуточного состояния, не позволяло нам измерить g -факторы в КТ изучающих фотоны с энергиями больше, чем 1.78 эВ. Однако g факторы, определенные в работе [2] для монослойной КЯ (In,Al)As/AlAs, являющейся переделом для уменьшения размера КТ (выделены на рисунке кругами) хорошо ложатся на полученную нами зависимость. Таким образом, изменение знака наведенной продольным магнитным полем циркулярной поляризации экситонного излучения в ансамбле (In,Al)As/AlAs КТ при уменьшении размера КТ нельзя объяснить уменьшением продольного g фактора тяжелой дырки. Возможным объяснением этого несоответствия является предположение о том, что экситон, локализованный в КТ с латеральными размерами меньшими, чем его боровский радиус, в основном состоянии приобретает угловой момент, приводящий к поправке в g_{ex} .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект №22-12-00022).

Литература

1. J. Debus *et al.* // Phys.Rev B. 2014. V.90, n.12. a.125431-10.
2. T.S. Shamirzaev *et al.* // Phys.Rev B. 2021. V.104, n.4. a.045305-11.

Плазмон-усиленная нано-фотолюминесценция планарных нитевидных нанокристаллов GaAs

Л.С. Басалаева, Е.А. Емельянов, М.А. Путято, В.В. Преображенский, А.Г. Милёхин

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13

тел: +7 (383) 316-6054, факс: +7 (383) 333-2771, эл. почта: basalaeva@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-39

Эпитаксиальные нитевидные нанокристаллы GaAs являются перспективными элементами для создания полупроводниковых и фотонных приборов нового поколения, т.к. обладают уникальными оптическими и электрофизическими свойствами, которые обусловлены квантово-размерными эффектами [1]. Планарные нитевидные нанокристаллы особенно интересны т.к. совместимы с существующей планарной технологией, используемой в полупроводниковой промышленности [2].

В данной работе исследовались планарные нитевидные нанокристаллы GaAs, выращенные на подложке GaAs (001) методом самокаталитического роста по механизму пар-жидкость-кристалл из потоков атомов Ga и молекул As₄ с использованием маски из окисленного эпитаксиального слоя кремния. Нанокристаллы имели вытянутую форму, а средний геометрический размер структур составлял: длина ~700 нм, ширина у основания ~200 нм, высота ~150 нм (Рис.1а). Была исследована усиленная зондом нано-фотолюминесценция (англ. Tip-Enhanced Photoluminescence, TEPL) одиночного нанокристалла GaAs. Метод усиленной зондом фотолюминесценции основан на эффекте локального плазмонного усиления оптического электромагнитного поля вблизи поверхности острия металлического зонда и позволяет выполнять оптическую характеризацию низкоразмерных объектов с высоким пространственным разрешением (~10 нм).

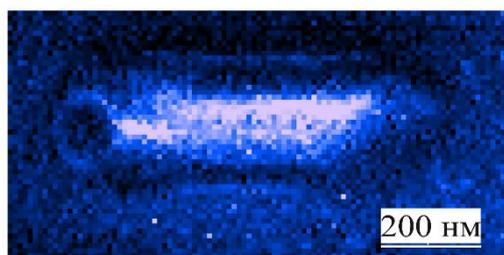
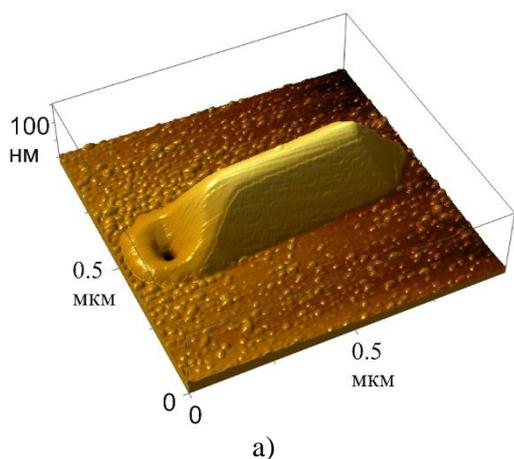


Рис. 1. 3D-АСМ изображение (a) и TEPL карта (b) нанокристалла GaAs в диапазоне 600-700 нм.

Эксперименты проводились на установке, включающей в себя модуль АСМ AIST-NT, связанный со спектрометром комбинационного рассеяния света (Xplora, Horiba). Измерения проводились в геометрии обратного рассеяния с использованием полупроводникового лазера с длиной волны 638 нм. Использовались стандартные кремниевые зонды (фирмы TipsNano) с золотым покрытием, нанесенным по технологии, описанной в [3]. Помимо интенсивной экситонной ФЛ от подложки, маскирующей сигнал от нанокристаллов, наблюдалась непрямозонная ФЛ от нанокристаллов GaAs в диапазоне 600-700 нм. По интенсивности сигнала непрямозонной ФЛ была выполнена спектроскопическая визуализация одиночного нанокристалла GaAs, которая позволила выявить локальные корреляции его оптических и структурных свойств (Рис.1б). Обнаружена зависимость энергии непрямозонной фотолюминесценции от положения зонда на поверхности нанокристалла GaAs. Сдвиг максимума ФЛ в область более высоких энергий при движении зонда от края к центру НК с эффектом Бурштейна-Мосса, который связан с генерацией большого числа фотовозбужденных носителей под воздействием интенсивного лазерного излучения в области под зондом АСМ микроскопа.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-12-00302).

Литература

1. V.G. Dubrovskii et al. // Semiconductors. 2009. Vol.43, No 12, pp.1539-1584.
2. C.Zhang et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V.50, 393001.
3. L.S. Basalaeva et al., // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol.2015, 012013.

Комбинационное рассеяние света в структурах $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ -на -изоляторе, созданных диффузией имплантированного Ge из захороненного слоя SiO_2

И.Е. Тыщенко¹, В.А. Володин^{1,2}, В.П. Попов¹

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск,
630090, проспект Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Пирогова, 2
тел: +7 (383) 333-2493, факс: +7 (383) 333-2771, эл. почта: tys@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-40

Пленки SiGe обладают целым рядом преимуществ по сравнению с пленками кремния. Они имеют большие значения подвижности носителей зарядов, а также более высокие значения коэффициента поглощения в инфракрасной области спектра. Электрические и оптические свойства пленок $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ могут изменяться в достаточно широком диапазоне в зависимости от их стехиометрического состава, уровня легирования, а также от степени кристалличности материала. Это позволяет расширить область практического применения пленок $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$. Большинство методов создания пленок $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ являются низкотемпературными, что обеспечивает нестабильность структурных свойств пленок при последующих высокотемпературных воздействиях. Это ограничивает использование пленок $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ в существующей кремниевой технологии. Поэтому поиск новых методов создания пленок $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ остается весьма перспективной задачей.

Ранее нами было показано, что атомы германия, имплантированные в пленку SiO_2 , при температуре отжига выше 900°C диффундируют к границе раздела Si/SiO_2 и встраиваются в положения, когерентные с положениями атомов кремния. Увеличение температуры отжига приводит к частичной диффузии атомов Ge в слой кремния. В данной работе мы исследовали комбинационное рассеяние света в структурах кремния-на-изоляторе (КНИ) с толщиной отсеченного слоя кремния 35 - 180 нм и захороненным слоем SiO_2 , имплантированным ионами Ge^+ , после высокотемпературного отжига.

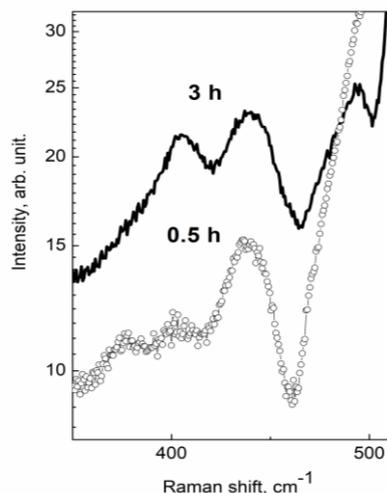


Рис. 1. Спектры КРС КНИ структур со слоем захороненного SiO_2 , имплантированного ионами Ge^+ , и слоем кремния толщиной 35 нм после отжига при температуре 1100°C в течение 0.5 часа и 3 часов.

На первой пластине кремния был выращен слой SiO_2 толщиной ~ 330 нм, который подвергался имплантации ионов Ge^+ с энергией 40 кэВ дозой $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Используемым параметрам ионов соответствовали средний проективный пробег ~ 50 нм и концентрация в максимуме распределения на уровне 5 ат.%. Затем с помощью водородного переноса на имплантированный слой SiO_2 был перенесен слой Si толщиной ~ 640 нм. После этого КНИ пластина была разрезана на образцы прямоугольной формы, которые подвергались многоступенчатому анодному окислению. В результате были сформированы структуры с толщиной отсеченного КНИ слоя 180 нм, 70 нм, 50 нм и 35 нм. Последующий отжиг образцов проводился при температуре $900\text{-}1100^\circ\text{C}$ в течение 30 и 180 минут в потоке паров жидкого азота.

В спектрах КРС обнаружены пики на частоте 410 и 435 см^{-1} , соотношение интенсивности которых изменяется в зависимости от толщины пленки и увеличения длительности отжига при температуре 1100°C (Рис. 1). Наблюдение рассеяния на указанных частотах свидетельствует о формировании фазы $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$. Изменение длительности отжига позволяет управлять стехиометрическим составом фазы $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (№ 0242-2021-0003).

Комбинационное рассеяние света и люминесценция тонких пленок $MgAl_2O_4$

Ю.В. Щапова^{1,2}, Л.Я. Сушанек¹, А.Н. Киряков², А. Ф.Зацепин², С.Х. Сулейманов³

¹Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, 620016, ул. Академика Вонсовского 15

² Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, 620062, ул. Мира 21

³Институт материаловедения Научно-производственного объединения «Физика – Солнце» Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент

эл. почта: shchapova@igg.uran.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-41

Материалы на основе магний-алюминиевой шпинели характеризуются высокой радиационной, термической и химической стойкостью, механической прочностью, широкой областью прозрачности от ИК до УФ диапазона; пленки $MgAl_2O_4$ субмикронной толщины перспективны для использования в устройствах нано- и оптоэлектроники. Варьирование химического состава, распределения катионов по позициям структуры, типа подложки и условий синтеза позволяет регулировать функциональные свойства пленок шпинели.

Цель настоящей работы - изучение структуры, динамики решетки и люминесцентных свойств тонких (55 и 200 нм) пленок $MgAl_2O_4$ на монокристаллических (Al_2O_3) и стеклообразных (SiO_2) подложках методами комбинационного рассеяния света (КР) и лазерно-индуцированной фотолюминесценции (ФЛ). Пленки (рис.) получены методом высокотемпературного испарения концентрированным солнечным излучением спрессованного из нанопорошка $MgAl_2O_4$ компакта в Большой Солнечной печи НПО «Физика-Солнце» АН РУз. Спектры КР и ФЛ тонких пленок получали на спектрометре LabRam HR 800 Evolution (Horiba), оснащенный конфокальным микроскопом Olympus, Ar (488 и 514 нм), He-Ne (633 нм) лазерами и термоприставкой Linkam THMS 600, в режиме послойных измерений с шагом сканирования по глубине 0.2-0.3 мкм при конфокальной диафрагме 20-30 мкм. Пространственное разрешение по глубине составляло 1.6 мкм (при $\lambda=514$ нм и объективе 100x NA=0.9). Разделение поверхностного (пленка) и объемного (подложка) вкладов проводили путем математической обработки массивов спектров. Рентгеновские дифракционные (XRD 7000 Shimadzu) измерения показали широкое гало и отсутствие брегговских рефлексов в пленках, что указывает на их существенно разупорядоченную (или полностью аморфную) структуру. В спектрах КР доминируют широкие максимумы в области ~ 140 и ~ 220 cm^{-1} ; они предположительно отнесены к поперечным и продольным акустическим фононам. В ФЛ наблюдаются широкие полосы в желто-красной области, соответствующие собственным дефектным центрам. Обсуждаются зависимости параметров КР, ФЛ, структуры и дефектности пленки от типа подложки, толщины покрытия и величины структурных напряжений на поверхности раздела.

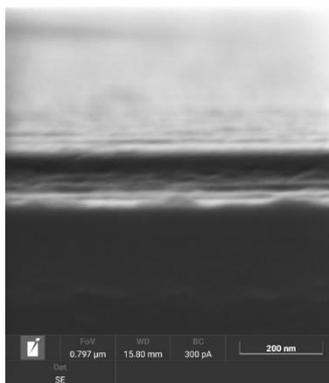


Рис. 1. Изображение поперечного сечения пленки $MgAl_2O_4$ толщиной 198 нм на монокристаллическом Al_2O_3 во вторичных электронах (сканирующий электронный микроскоп MIRA LMS Tescan)

Получение тонкопленочных покрытий выполнено в рамках гранта РФФИ № 21-12-0039. Исследования КР и ФЛ выполнены в рамках Госзадания ИГГ УрО РАН (№ 123011800012-9) с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, дооснащение которого поддержано грантом Минобрнауки РФ (Согл. №075-15-2021-680).

Локальное гиперспектральное картирование нанокластера AlN с нанометровым пространственным разрешением

И.А. Милёхин^{1,2,3,4}, К.В. Аникин², Н.Н. Курусь², В.Г. Мансуров², Т. Малин², К.С. Журавлев²,
А.Г. Милёхин^{1,2}, А.В. Латышев^{1,2}, D.R.T. Zahn^{3,4}

¹Новосибирский Государственный университет,

630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул.Пирогова 1

²Институт физики полупроводников им.А.В.Ржанова СО РАН

630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр.Лаврентьева, д. 13

³Физика полупроводников, Хемницкий технологический университет, Хемниц, Германия

⁴Центр материалов, архитектуры и интеграции наномембран (MAIN), Хемницкий технологический университет, Хемниц, Германия

DOI 10.34077/SCATTERING95-42

Локальный спектральный анализ наноструктур привлекает огромное внимание в связи с тенденцией к минимизации размеров активных элементов современной электроники, химии, медицины и биологии. Среди различных аналитических методов нано-ИК-спектроскопия играет особую роль для неразрушающего и высокочувствительного анализа свойств материалов с нанометровым пространственным разрешением.

В данной работе мы исследуем нанокластеры AlN, сформированные на пленке AlN, выращенной на поверхности Si(111) методом молекулярно-лучевой эпитаксии. На Рис. 1а показано АСМ изображение одиночного гексагонального нанокластера AlN с характерной высотой ~30 нм и средним латеральным размером ~220 нм. Нано-ИК-спектроскопия позволяет выполнить гиперспектральное картирование (Рис. 1б) и визуализировать пространственную локализацию поверхностных оптических (SO) мод, происходящих от фоновых различной симметрии как из слоя AlN, так и из нанокластера.

Для нанокластеров AlN нано-ИК спектры обнаруживают две интенсивные моды с максимумами при 768 и 825 см^{-1} , относящиеся к SO-модам симметрии E_1 и A_1 . Интересно, что при сканировании от центра к краю нанокластера наблюдается постепенное изменение частоты моды $A_1(\text{SO})$ от 768 до 725 см^{-1} .

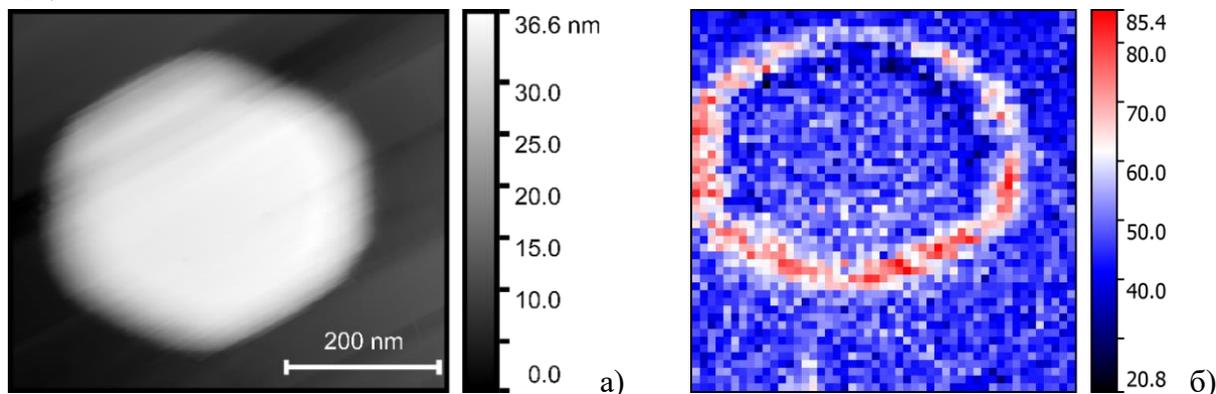


Рис. 1. а) АСМ-изображение одиночного гексагонального нанокластера AlN. б)-Гиперспектральная амплитудная карта нанокластера AlN, измеренная в спектральном диапазоне 650-750 см^{-1} (соответствует изменениям моды $A_1(\text{SO})$) с размером шага отображения 10 нм для второй демодуляционной моды.

Наблюдаемый сдвиг частоты объясняется угловой дисперсией моды $A_1(\text{SO})$ в нанокластере AlN.

Исследование поддержано Российским Научным Фондом (грант №22-12-00302).

Детектирование спиновых и спин-текстурных возбуждений методом резонансного неупругого рассеяния света в режиме квантового эффекта Холла в MgZnO/ZnO гетероструктурах

А.С. Кореев¹, А.Б. Ваньков^{1,2}, П.С. Бережной^{1,2}, И.В. Кукушкин^{1,2}

¹ Институт физики твёрдого тела, РАН, Черноголовка, 142432

² Лаборатория физики конденсированного состояния, ВШЭ, Москва, 101000

тел: +7 (910) 707-0929, эл. почта: koreyev.alexis@yandex.ru

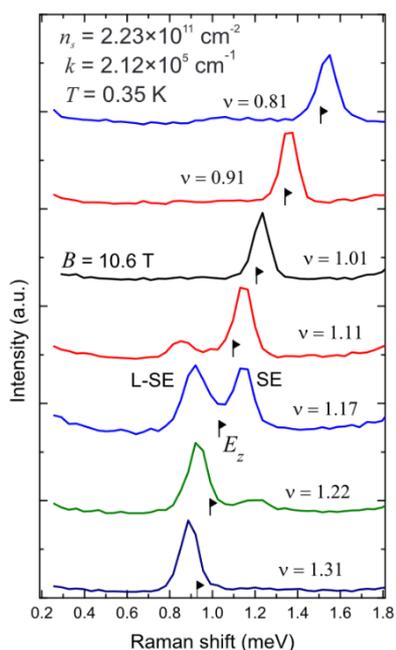
DOI 10.34077/SCATTERING95-43

Комбинационное рассеяние света уже 95 лет является одним из мощнейших средств аналитических методов в физике твёрдого тела. Помимо использования в аналитической химии обширное использование он приобрёл при исследовании квазичастиц в твёрдом теле. В частности, четыре десятилетия он уже используется для исследования внутренних возбуждений в экзотических низкоразмерных системах.

В последние годы список двумерных систем пополнился гетероструктурами на основе ZnO, особенностью которых являются сильные кулоновские корреляции, приводящие к новым когерентным квантовым явлениям. Для таких систем отсутствуют чёткие теоретические модели, поэтому эффекты в них довольно плохо предсказываются. Тем не менее, они поддаются экспериментальному изучению, в частности благодаря комбинационному рассеянию света. Этот метод позволяет зондировать не только энергию коллективных возбуждений, но и зависимость от двумерного импульса.

Многие загадочные явления связаны со спиновой степенью свободы, в частности до сих пор не расшифрованы спиновые конфигурации квантового эффекта Холла (КЭХ) при нецелочисленных факторах заполнения. Нам удалось обнаружить их с помощью комбинационного рассеяния света.

Измерения проводились на высококачественных высокоподвижных гетероструктурах MgZnO/ZnO с



концентрациями электронов в двумерном канале порядка 10^{11} cm^{-2} . Эксперимент проходил в криостате с откачкой паров He^3 со встроенным соленоидом в режиме КЭХ. Оптические измерения проводились при помощи перестраиваемого по длине волны Ti-Sr лазера, удваиваемого по частоте с длиной волны 366-367 нм.

В результате в спектрах неупругого рассеяния света при факторе заполнения уровней Ландау $\nu > 1$ вместо одной были обнаружены две ветви спиновых экситонов, которые имеют антипересечение при $\nu \sim 1.2$. Сложившаяся картина позволяет сделать вывод о неколлинеарном магнитном порядке и формировании спиновых текстур в двумерной плоскости. Было также обнаружено тепловое разрушение этих текстур, резкое исчезновение при наклоне магнитного поля. Благодаря исследованиям спектров коллективных возбуждений было показано, что у отталкивания кулоновская природа. Кроме эксперимента был произведён расчёт методом точной диагонализации энергетического спектра [1], благодаря чему удалось объяснить формирование текстур в терминах ферми-жидкостных уровней Ландау [2].

Литература

1. А.Б. Ваньков, А.С. Кореев, П.С. Бережной, И.В. Кукушкин // Physical Review B. – 2022. – Vol. 106, Iss. 24. – P. 245308.
2. А.Б. Ваньков, И.В. Кукушкин // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2021. – Т. 113, Вып. 2. – С. 112–125.

Зависимость спектров КР кобальтата лития от температуры и мощности лазерного излучения

А.А. Рябин¹, А.С. Крылов², С.Н. Крылова², Д.В. Пелегов^{1,3}

¹ *Институт естественных наук и математики УрФУ, Екатеринбург,
620002, пр. Мира, 19*

² *Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок 50*

³ *ЦК НТИ «Мобильные накопители энергии», Институт Электродвижения МФТИ
Московская область, г. Долгопрудный, 141701, Институтский пер., 9
тел.: +7 (902) 1519741, эл. почта: a.a.riabin@urfu.ru*

DOI 10.34077/SCATTERING95-44

Кобальтат лития LiCoO_2 (LCO) – это популярный катодный материал для литий-ионных аккумуляторов (ЛИА), с появления которого в 1992 году началась история индустрии ЛИА. В дальнейшем он был вытеснен родственными материалами, в которых часть кобальта в LiCoO_2 замещается на никель и марганец, но при этом он до сих пор имеет потенциал коммерческого использования, а для фундаментальных исследований LCO служит хорошим модельным материалом.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КР) активно применяется для изучения фазовых и структурных изменений электродных материалов ЛИА, поскольку малый вес лития затрудняет количественный анализ материалов такими методами как рентгеноструктурный анализ, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия. В частности, в процессе деинтеркаляции ионов лития из LCO в его КР спектре наблюдается смещение полос в сторону меньших значений волновых чисел с уменьшением их амплитуды и уширением. Похожее поведение колебательных мод в спектре наблюдается и в процессе нагрева материала. Таким образом, интерпретация спектра дегитированного образца может иметь неточности, особенно из-за возможного лазерного нагрева LCO в процессе измерений.

В данной работе мы исследовали особенности взаимодействия лазерного излучения с отдельными частицами LCO. Для этого, сначала мы изучили температурную зависимость параметров КР спектра LCO и обнаружили, что сдвиг полос преимущественно описывается термическим расширением и ангармонизмом. Далее нами были проведены измерения зависимости параметров КР спектра в зависимости от мощности лазерного излучения в диапазоне от 0.02 до 7.45 мВт. Результаты показали, что смещение более выражено, чем при нагреве и может достигать до 22 см^{-1} для E_g и до 20 см^{-1} для A_{1g} моды. При этом сдвиг и уширение полос оказались неоднородны для разных частиц. При использовании полученного соотношения смещения полос от температуры для мощностной зависимости нами получено, что такое максимальное смещение эквивалентно сдвигу при нагреве примерно до $900 \text{ }^\circ\text{C}$. Поскольку LCO начинает деградировать с образованием оксида кобальта Co_3O_4 при меньших температурах, это позволяет нам предположить, что такой сдвиг нельзя объяснить одним только нагревом, индуцированным лазерным облучением.

Неоднородность сдвига при разной мощности лазерного излучения для отдельных частиц может быть объяснена размерным эффектом. Частицы с диаметром более 5 мкм характеризуются слабым смещением (до 5.2 см^{-1} для A_{1g} моды), а менее 5 мкм характеризуются сдвигом от 4 см^{-1} до 20 см^{-1} для A_{1g} моды, а также в некоторых случаях частичной или полной деградации. Так, ранее было обнаружено, что с уменьшением размера частиц LCO уменьшается температура необходимая для деградации материала [1], что объясняет неоднородность случаев декомпозиции. Однако термодинамический расчёт лазерного нагрева ещё необходимо провести отдельно.

Полученные результаты свидетельствуют, что при КР-измерениях LCO необходимо использовать низкую мощность возбуждающего излучения во избежание деградации материала и учитывать лазерный нагрев при количественном анализе полученных экспериментальных данных.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (No 22-22-00350, <https://rscf.ru/project/22-22-00350>).

Литература

1. J. Geder et al. // Journal of Power Sources. 2014. V.257, P.286-292.

Исследование кристаллизации висмут-замещенного железоиттриевого граната методом спектроскопии комбинационного рассеяния

А.В. Шелаев¹, Е.М. Сгибнев¹, П.Н. Тананаев¹, А.В. Барышев¹

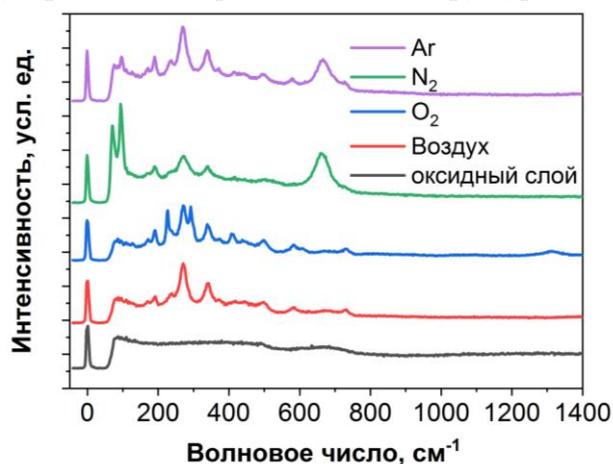
¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, 127030, Москва, Сущевская ул., 22, Россия*

тел: +7 (926) 618-9727, эл. почта: shelaev.artiom@phystech.edu

DOI 10.34077/SCATTERING95-45

В оптоэлектронных устройствах (изоляторах, циркуляторах и др.) требуется использовать невзаимные элементы на основе висмут-замещенного железоиттриевого граната (ЖИГ) на поверхности кремниевых структур. Ограничивающим фактором применения ЖИГ является высокая температура кристаллизации граната из оксидного слоя. В работе данная проблема решается локальным воздействием на требуемую область оксидного слоя лазерным лучом, сфокусированным в пятно менее 1 мкм. Для определения оптимальных условий локальная лазерная кристаллизация граната была проведена в различных атмосферах: синтетического воздуха, кислорода, азота и аргона. При каждой газовой атмосфере варьировался уровень мощности лазерного воздействия. В результате был получен массив микроструктур, кристаллизованных при различных условиях.

С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) исследован локальный химический и структурный состав. Исходная оксидная плёнка имела только одну очень слабую и широкую полосу между 600 и 800 см⁻¹. Форма этого пика свидетельствует об аморфности исходной оксидной плёнки. Для каждой атмосферы спектры КР полос, подвергнутых лазерному излучению с мощностью $P < 8,3$ мВт, были подобны спектрам исходной оксидной плёнки. КР полосы, наблюдавшиеся на 127, 169, 188, 236, 272, 340, 374, 416, 441, 498, 582, 668 и 730 см⁻¹, свидетельствовали о наличии кристаллической фазы висмут-замещенного ЖИГ. Более широкие КР пики, наблюдаемые при увеличении мощности лазерного излучения, например, при $P = 23,6$ мВт в бескислородных атмосферах, соответствуют менее упорядоченной кристаллической структуре, возникающей вследствие перегрева.



В КР спектрах микроструктур, отожжённых при значениях мощности, начинающихся с $P = 14,1$ мВт в атмосфере O₂ и $P = 15,0$ мВт в сухом воздухе, отчетливо наблюдались пики, соответствующие фазе висмут-замещенного ЖИГ. Для бескислородных атмосфер пики, связанные с фазой граната, наблюдались для полос, отожжённых при мощностях, начинающихся с $P = 12,1$ мВт в атмосфере N₂ и $P = 13,1$ мВт в атмосфере Ag. В бескислородной атмосфере помимо пиков граната присутствовали два интенсивных пика на 70 и 97 см⁻¹ - фоновые моды E_g и A_{1g} первого порядка ромбоэдрического металлического висмута. КР спектры микроструктур, подвергнутых отжигу в

атмосфере O₂ при мощности лазера $P > 22,6$ мВт, содержали линии гематита (α -Fe₂O₃): 225, 292, 408, 608 и 1311 см⁻¹. В случае лазерного отжига в бескислородной атмосфере не наблюдалось пиков, соответствующих фазе гематита. Интересно, что пик на 660 см⁻¹, связанный с наличием вюстита (FeO), наблюдался при лазерном отжиге в атмосфере N₂ и Ag при мощности $P > 16,9$ мВт и $P > 18,8$ мВт, соответственно. На рисунке приведены КР спектры висмут-замещенного ЖИГ, показывающие, что при кристаллизации в результате перегрева в дополнение к фазе граната образуются побочные продукты распада, включая металлический висмут, оксиды железа: FeO и α -Fe₂O₃.

Литература

1. Shelaev A., Sgibnev Y., Efremova S. и др. Micron-scale crystallization of Bi:YIG by laser rapid thermal annealing at controlled atmosphere. – Optics & Laser Technology. – 2022. – Т. 155. – С. 108411.
2. Sgibnev Y., Shelaev A., Kulikova D. и др. Crystallization of Bismuth-Substituted Yttrium Iron Garnet under Low-Energy High-Repetition Rate Femtosecond Laser Pulses. – Crystal Growth & Design. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 1196–1201.

Влияние толщины имплантированных слоев Ge на лазерный нагрев при исследовании методом КРС

А.В. Павликов¹, А.М. Шарафутдинова¹, А.М. Рогов^{2,3}, С.Н. Бокова-Сирош^{4,5}, Е.Д. Образцова^{4,5}, А.Л. Степанов²

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Ленинские горы, д.1, с.2

²Казанский физико-технический институт имени Е.К.Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, 420029, Сибирский тракт, д. 10/7

³Казанский федеральный университет, Казань, 420008, ул. Кремлевская, д.18

⁴Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, ул. Вавилова, д. 38

⁵Московский физико-технический институт, Московская область, 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

тел.: +7 (495) 939-1875, факс: +7 (495) 939-1875, эл. почта: pavlikovav@my.msu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-46

Метод ионной имплантации позволяет получить пористые слои Ge толщиной в десятки нанометров [1]. Спектроскопия КРС является чувствительным структурным методом, который позволяет получить сигнал от тонкого пористого слоя, полученного имплантацией кристаллической пластины с-Ge [2]. Излучение видимого диапазона эффективно поглощается слоями пористого Ge, поэтому глубина проникновения лазерного излучения сопоставима с толщиной пористого слоя.

В данной работе были исследованы слои пористого Ge, полученные имплантацией ионов Cu^+ и Ag^+ пластины с-Ge. Энергия пучка ионов Cu^+ составляла $E_{\text{Cu}} = 40$ кэВ, а пучка ионов Ag^+ $E_{\text{Ag}} = 30$ кэВ. Дозы изменялись в пределах от $9.3 \cdot 10^{16}$ до $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см². Имплантация при данных условиях позволяла получить пористые слои Ge с толщинами $d_1 = 40$ и 30 нм, соответственно. Для исследования зависимости сигнала КРС от толщины d были получены пористые слои с энергией пучка ионов Cu^+ , изменявшейся от 10 до 40 кэВ и фиксированной дозой $1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см². Исследование морфологии слоев проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа Merlin. Спектры КРС были получены с помощью спектрометров Horiba LabRAM HR-800 и LabRAM HR Evolution UV-VIS-NIR-Open. Возбуждение осуществлялось гелий-неоновым (He-Ne) (длина волны $\lambda_1 = 632.8$ нм, мощность $P_1 = 10$ мВт), твердотельным Nd:YAG ($\lambda_2 = 532.0$ нм, $P_2 = 25$ мВт) и аргоновым (Ar^+) ($\lambda_3 = 488.0$ нм, $P_3 = 10$ мВт) лазерами.

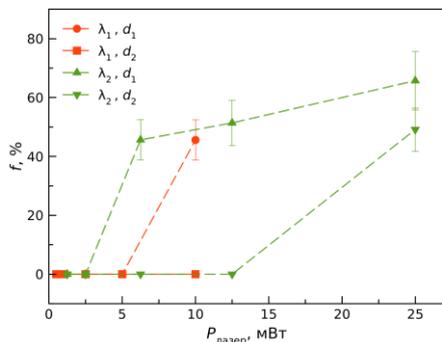


Рис. 1. Зависимость f от P . $\lambda_1 = 633$ нм, $\lambda_2 = 532$ нм, $d_1 = 40$ нм, $d_2 = 30$ нм.-

В рамках данной работы было установлено, что имплантированные пористые слои Ge являются аморфными. Зондирование образцов возбуждающими лазерами с интенсивностью, превышающей некоторое пороговое значение, приводит к нагреву и последующей локальной кристаллизации облучаемых областей. Обнаружена зависимость пороговых значений интенсивности, при которых происходит локальная кристаллизация, от условий ионной имплантации и длины волны зондирующего лазера. По соотношению стоксовой к антистоксовой компоненты была оценена локальная температура нагрева и доля нанокристаллов f в пористых слоях. Исследование слоев Ge различной толщины позволили установить влияние подложки с-Ge

на пороговые значения интенсивности в слоях, при которых происходит локальная кристаллизация. Полученные результаты помогут оценить теплопроводность пористых слоев. Такие структуры Ge могут иметь потенциальное применение в термоэлектрических элементах. Работа поддержана грантом РФФ № 19-79-10216.

Литература

1. A.L. Stepanov, V.I. Nuzhdin, V.F. Valeev, A.M. Rogov, V.V. Vorobev, Y.N. Osin // Vacuum, 2018 V. 152, p. 200-204.
2. A. M. Sharafutdinova, A. V. Pavlikov, A. M. Rogov, S. N. Bokova-Sirosh, E. D. Obratsova, A. L. Stepanov // J Raman Spectrosc 2022, V.53, N 6, p.1055-1061.

Проявление эффекта локализации фононов в спектрах комбинационного рассеяния света аморфных нанокластеров германия в матрице GeO_x

Ф. Чжан^{1,2}, В.А. Володин¹

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева 13,

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2
тел: +7 (913) 202-1749, эл. почта: 840003068@qq.com

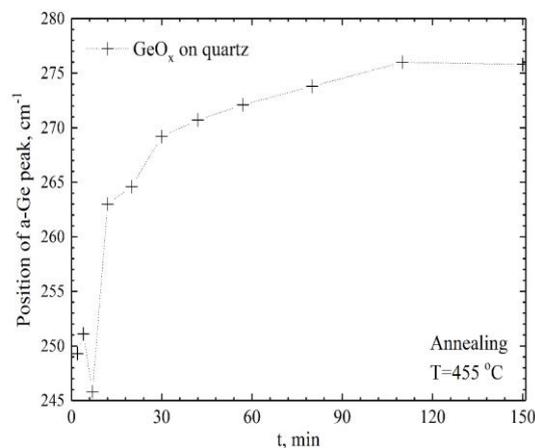
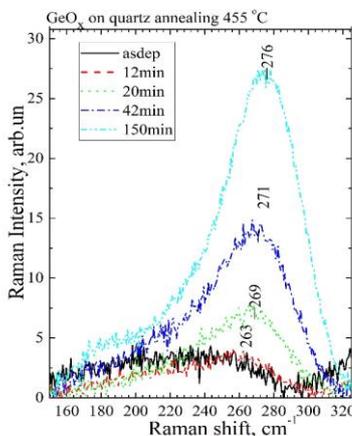
DOI 10.34077/SCATTERING95-47

Известно, что согласно хорошо известной модели локализации фононов [1], из анализа спектров комбинационного рассеяния света (КРС) можно определять размеры нанокристаллов (НК). Однако, до сих пор не было обнаружено влияния размеров аморфных нанокластеров на их спектр КРС. Связано это с тем, что длина корреляции фононов в аморфных материалах мала, и по оценкам составляет 1-1.5 нм [2], а размеры нанокластеров обычно больше.

Аморфные нанокластеры кремния и германия в диэлектрических плёнках представляют собой квантовые точки, и интересны с фундаментальной точки зрения, а также перспективны для нано- и оптоэлектроники. Их свойствами можно управлять, используя квантово-размерные эффекты, в НК правила отбора по импульсу смягчаются, и вероятность оптических переходов в них увеличивается.

В работе проведены исследования формирования аморфных нанокластеров германия в процессе печных отжигов плёнки GeO_x , полученной высоковакуумным испарением порошков GeO_2 , стехиометрический параметр x составляет ~ 1.1 . По литературным данным положение пика КРС от аморфного германия составляет ~ 275 - 280 cm^{-1} [3]. Из анализа спектров КРС (рисунок слева) получено, что исходная плёнка GeO_x не содержит пиков от кластеров германия. Видно, что после отжига 12 минут при температуре 455 $^\circ\text{C}$, появились кластеры аморфного германия. Однако, положение пика от аморфного германия составляло не 275 а 263 cm^{-1} . По-видимому, в этом случае размер нанокластеров аморфного германия очень мал, меньше длины корреляции фононов. На обоих рисунках видно, что при увеличении времени отжига положение пика от аморфного германия смещается в сторону больших частот - до 276 cm^{-1} , по-видимому, это связано с увеличением их размеров.

Для исследования кинетики формирования аморфных нанокластеров германия, были проведены отжиги при температурах от 400 до 500 $^\circ\text{C}$, из анализа зависимости времени формирования кластеров аморфного германия от температуры, была получена энергия активации процесса их формирования.



Итак, впервые обнаружено, что спектры КРС аморфного германия зависят от их размеров, то есть, модель локализации фононов может быть применима не только для НК германия [4] но и для аморфных кластеров германия, в случае их сверхмалых размеров.

Литература

1. Z. Iqbal и др. // Solid State Communications. 1981. v.37, p. 993–996.
2. R. Shuker, R.W. Gamon // Proc. 2nd Intern. Conf. Light Scattering in Solids (Paris, 1971). Flammarion Science: Paris, 1971. p. 334.
3. M. Wihl, M. Cardona J. Таус. // Journal of Non-Crystalline Solids 1972. Т. 8-10, С. 172-178.
4. В.А. Володин и др. // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2014. Т.145, С.77–83.

КР исследование лазерно-индуцированных эффектов окисления и нагрева пигментов на основе оксидов и гидроксидов железа

Д.В. Киселева¹, Е.А. Панкрушина¹, Е.С. Шагалов²

¹ Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, 620110, Ак. Вонсовского 15

² Уральский государственный горный университет, 620114, Куйбышева 30

тел: +7 (919) 389-6694, эл. почта: lizaveta.94@list.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-48

Наскальная живопись является одним из наиболее распространенных и информативных археологических артефактов. Исследование природы красящих пигментов древних рисунков помогает понять их происхождение, технологии производства и нанесения, а также процессы деградации пигмента с течением времени, и, следовательно, проблемы их консервации и реставрации. Цветные минералы (красная и желтая охры – оксиды и гидроксиды железа, черные – оксид марганца, древесный уголь, костная сажа) издавна использовались для изготовления красителей.

Спектроскопия КРС широко используется в исследованиях объектов культурного наследия, позволяя проводить неразрушающую идентификацию минеральных фаз микропрепаратов пигментов (обычно площадью менее 1 мм²).

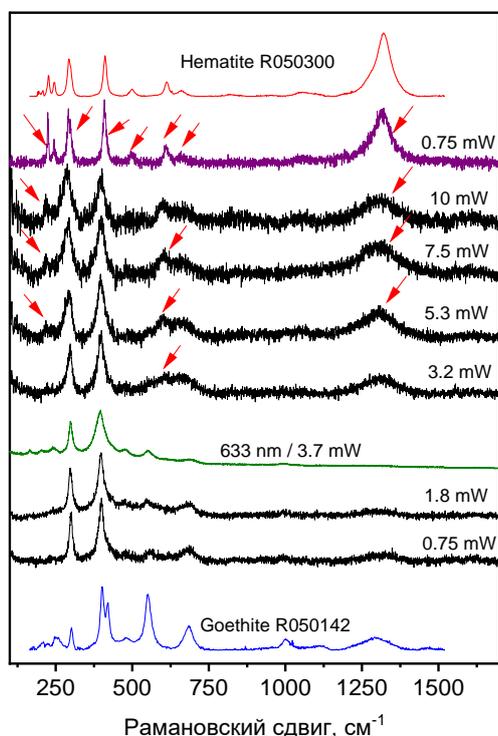


Рис. 1. Пример эволюции КР спектра натечного (сталактит) гетита при повышении мощности лазера (514 нм) от 0.75 до 10 мВт за объективом. Фиолетовым выделен спектр в той же точке, полученный при мощности 0.75 мВт после эксперимента. Hematite R050300 и goethite R050142 – референтные спектры гематита и гетита, соответственно, из базы данных RRUFF.INFO.

Работа поддержана грантом РФФИ № 22-18-00593.

Литература

1. Hanesch M. Geophys. J. Int. 2009. V.177. P. 941–948.
2. Froment F., Tournié A., Colombari P. J. Raman Spectrosc. 2008. V.39. P. 560–568.
3. de Faria D.L.A.; Lopes F.N. Vib. Spectrosc. 2007. V.45. P. 117–121.
4. El Mendili Y. et al. J. Raman Spectrosc. 2011. V.42. P. 239–242.
5. Shebanova O.N., Lazor P. J. Raman Spectrosc. 2003. V. 34. P. 845–852.

Ряд авторов сообщает о быстрых преобразованиях оксидов и гидроксидов железа при КРС анализе из-за локальных эффектов воздействия лазерного облучения (нагрев и окисление); при этом данные о приемлемой мощности лазера, используемой для предотвращения таких эффектов, весьма противоречивы. В то время как некоторые авторы рекомендуют проводить измерения при минимально возможной мощности лазера 0.01–0.5 мВт [1–3], другие показывают, что полосы гематита (α -Fe₂O₃) в спектрах маггемита (γ -Fe₂O₃) и магнетита (FeFe₂O₄) начинают появляться лишь при увеличении мощности лазера выше 15–20 мВт [4–5].

Нами исследованы девять оксидов и гидроксидов железа из ряда месторождений Уральского региона (Шабровское, Ахтенское, Алапаевское и др.). КР спектроскопия выполнена в ЦКП Геоаналитик ИГТ УрО РАН (спектрометр Labram HR Evolution, $\lambda=514$ и 633 нм, решетка 1800 шт/мм) при варьировании мощности лазера от 0.75 до ~15 мВт.

Показано, что окисление гетита происходит при ~4–5 мВт ($\lambda=514$ нм). Однако при возбуждении линией $\lambda=633$ нм (3.7 мВт) окисления не наблюдается (рис.). Повторные измерения на малой мощности лазера свидетельствуют о необратимом процессе преобразования гетита в гематит после использования высоких мощностей лазерного излучения.

Таким образом, использование лазеров с $\lambda=514$ и 633 нм при мощности, не превышающей 3–4 мВт, позволяет избежать нежелательных эффектов нагрева и окисления оксидов и гидроксидов железа, входящих в состав древних пигментов.

Исследование кинетики золото-индуцированной кристаллизации тонких пленок аморфного субоксида кремния

Н.А. Лунев^{1,2}, А.О. Замчий¹, Ю.В. Воробьев³, В.О. Константинов¹,
Е.А. Баранов¹

¹ Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск,

630090, пр. Академика Лаврентьева, 1

² НГУ, Новосибирск, 630090, Пирогова, 2

³ РГРТУ, 390005, Рязань, Гагарина, 59/1

тел: +7 (983) 129-8751, эл. почта: nanochirik9@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-49

Изготовление высококачественных пленок поликристаллического кремния (poly-Si) на дешевых несобственных подложках, в том числе на стекле, может быть реализовано методом металлоиндуцированной кристаллизации (МИК) аморфного кремнийсодержащего материала, в том числе, аморфного субоксида кремния ($a\text{-SiO}_x$, $0 < x < 2$) [1]. МИК обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами (например, твердотельной кристаллизации) поскольку не требует высоких температур отжига, и при этом легко масштабируется, что делает его весьма привлекательным для получения пленок poly-Si для нужд современной фотовольтаики. Управление кинетикой нуклеации и роста кристаллов в ходе процесса МИК позволяет контролировать структурные характеристики конечного материала [2]. В данной работе изучалась кинетика процесса золото-индуцированной кристаллизации пленок $a\text{-SiO}_{0.2}$.

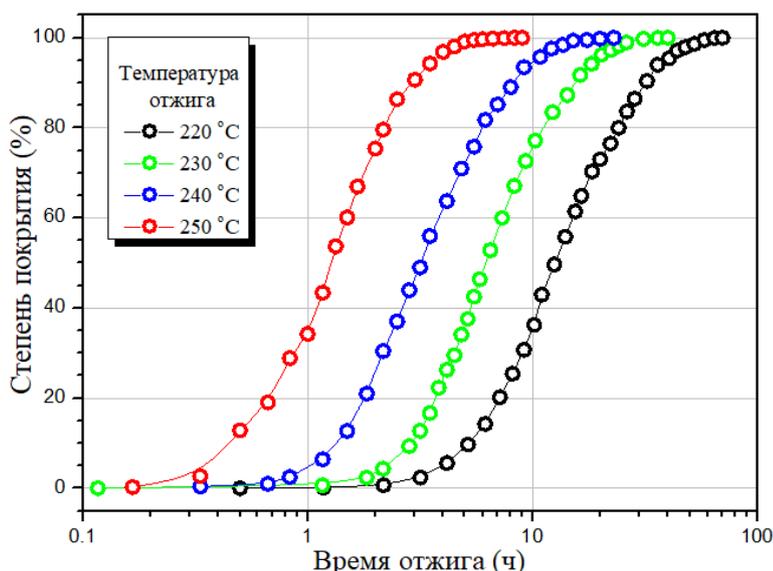


Рис. 1. Зависимость степени покрытия образцов от длительности их отжига при 220 °C – 250 °C.

(рис. 1), плотности и скорости нуклеации. В результате анализа полученных кривых, проведенного в рамках теории Колмогорова-Джонсона-Мела-Аврами, [3] были определены энергии активации нуклеации, роста кристаллитов, и энергии активации ЗИК $a\text{-SiO}_{0.2}$ в целом, составившие 2.51 ± 0.80 , 0.31 ± 0.10 и 1.62 ± 0.15 эВ, соответственно.

Структурные и кристаллические свойства полученного poly-Si были исследованы методом комбинационного рассеяния света и рентгенофазового анализа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10079, <https://rscf.ru/project/22-79-10079/>.

Литература

1. Zamchiiy A. O. et al. //Vacuum. – 2021. – Т. 192. – С. 110462.
2. Toko K., Suemasu T. //J. of Phys. D: Appl. Phys. – 2020. – Т. 53. – №. 37. – С. 373002.
3. Cohin Y. et al. //Crystal Growth & Design. – 2015. – Т. 15. – №. 5. – С. 2102-2109.

Спектроскопия комбинационного рассеяния для материалов литиевых аккумуляторов: текущее состояние и перспективы

Д.В. Пелегов^{1,2}

¹ *Институт естественных наук и математики УрФУ, Екатеринбург,
620002, пр. Мира, 19*

² *ЦК НТИ «Мобильные накопители энергии», Институт Электродвижения МФТИ
Московская область, г. Долгопрудный, 141701, Институтский пер., 9
тел.: +7 (902) 2655233, эл. почта: dmitry.pelegov@urfu.ru*

DOI 10.34077/SCATTERING95-50

Бурный рост рынка электромобилей, начавшийся в 2011 году, вызвал не менее бурный рост индустрии литиевых аккумуляторов. Сегодня в большинстве развитых стран мира эти относительно молодые отрасли промышленности попали в списки наиболее приоритетных и поддерживаемых государством. Стоимость тяговых аккумуляторов сегодня составляет более 10% от стоимости электромобиля, а стандартный гарантийный срок – от 5 до 8 лет. В этой связи вопрос контроля качества материалов литиевых аккумуляторов становится крайне актуальным, особенно для стран, где их промышленное производство находится в начальной стадии развития.

Катодные и анодные материалы являются главными элементами литиевых аккумуляторов, определяющими их потребительские свойства. Данный доклад носит обзорный характер и знакомит с историей использования спектроскопии комбинационного рассеяния света для исследования структуры катодных и анодных материалов, текущим состоянием этого направления исследования, и его основными проблемами. Также в докладе производится оценка перспективы применения КР для промышленного и лабораторного контроля материалов литиевых аккумуляторов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (No 22-22-00350, <https://rscf.ru/project/22-22-00350>).

Комбинационное рассеяние света в исследованиях композитных электролитных систем

М.М. Гафуров, **К.Ш. Рабаданов**, З.Ю. Кубатаев
Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН
Аналитический центр коллективного пользования ДФИЦ РАН,
Махачкала, 367000, ул. М. Гаджиева, 45
тел: +7(988) 780-1972, эл.почта: rksh83@mail.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-51

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света стала одним из рутинных методов исследования структурно-динамических свойств и процессов релаксации колебательных возбуждений молекулярных ионов в композитных электролитных системах (КЭС) интерес к которым связан с большими перспективами их использования в различных устройствах электрохимической энергетики. В состав КЭС входят ионные соли, инертные наполнители, в виде наноразмерных частиц оксидов различных металлов. В случае их помещения в полимерную матрицу мы имеем дело с полимерными КЭС, а жидкофазные растворы электролитов допированные инертными частицами оксидов называют КЭС типа “мокрый песок”. Спектр КР КЭС формируется наложением спектров отдельных компонент и имеет довольно сложное строение. В этой связи, при исследованиях КЭС методом КР возникает ряд вопросов связанных как с выбором колебательных полос для анализа и обработки их формы с целью извлечения количественной информации о структуре, динамических и релаксационных процессах протекающих в КЭС, так и тем на основе каких теоретических концепций формирования контуров колебательных полос проводить обработку полученных экспериментальных данных.

В настоящем докладе сделана попытка найти ответы на эти вопросы на основе анализа спектров КР некоторых КЭС состоящих из индивидуальных и бинарных солей щелочных металлов нитратов и перхлоратов наполненных наноразмерными инертными частицами Al_2O_3 и SiO_2 , а также полимерные КЭС с этим же составом солей и наполнителей. Показано, что при исследованиях КЭС методом спектроскопии КР наиболее информативными в плане получения сведений о микроструктуре системы и динамических взаимодействиях частиц в них представляются контуры колебательных полос отвечающих полносимметричным внутренним колебаниям молекулярных анионов NO_3^- и ClO_4^- . Связано это с тем, что эти линии являются невырожденными и резкополяризованными, причем степень деполяризации остается близкой к нулю при вариации состава и температуры КЭС, что свидетельствует об отсутствии анизотропии тензора поляризуемости и относительной стабильности сечения КР для данного колебания. Поэтому соответствующая колебательная линия может быть использована в качестве информационного зонда для извлечения информации о структурно-динамических свойствах КЭС и динамических взаимодействиях частиц в них, в том числе для проведения количественных расчетов на основе анализа интегральных интенсивностей полосы при различных составах КЭС и температурных режимах. Кроме того выбор изотропных полос КР имеет еще одно преимущество, поскольку сами переориентации молекулярных ионов в КЭС не отражаются на форме контура и она всецело формируется процессами релаксации соответствующего колебательного возбуждения аниона.

Из наиболее часто используемых теоретических концепций ширин спектральных линий основанных на флуктуационном, распадном и поворотно-релаксационном механизме уширения колебательных линий в случае КЭС наиболее приемлемым представляется последний из перечисленных механизмов. Дело в том, что реализация распадного механизма уширения предполагает наличие в системе сильного виброн-фононного взаимодействия и строгого соблюдения законов сохранения энергии и импульса для рассматриваемого колебания, а флуктуационный механизм априори предполагает гауссову форму контуров колебательных линий и не дают возможность получить какую либо информацию на основе анализа формы контура колебательной полосы в спектрах КР сильно неоднородных по составу и структуре систем, к коим и относятся КЭС. Эти обстоятельства допускают предпочтительность анализа и обработки контуров линий спектра КР исследованных КЭС в рамках поворотно-релаксационного механизма уширения, что и было проведено в ходе обработки результатов спектроскопических измерений.

Влияние наноразмерных оксидов на структурно-динамические свойства композитов на основе LiClO₄

З.Ю. Кубатаев, М.М. Гафуров, К.Ш. Рабаданов

Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, АЦКП ИФ, г. Махачкала, Россия, 367015
ул. М.Ярагского, 94

тел: +7 (963) 371-7635, эл. почта: kzu-05@ya.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-52

В последнее время гетерогенные системы становятся важными объектами научных исследований. Твердые композиционные электролиты – особый класс твердофазных гетерогенных материалов, обладающих повышенной ионной проводимостью. Благодаря сочетанию высокой ионной проводимости с возможностью варьирования в широких пределах путем изменения типа и концентрации гетерогенной добавки эти материалы представляют перспективными для использования в различных электрохимических устройствах. Методы колебательной спектроскопии являются наиболее информативными в плане получения сведений о структурно-динамических свойствах подобных композитов.

Целью настоящей работы является спектроскопическое исследование твердых композиционных электролитов на основе LiClO₄ допированных наноразмерными порошками (Al₂O₃ и SiO₂) для получения данных о структурных особенностях при различных фазовых состояниях.

В качестве наполнителя был выбран порошок γ -Al₂O₃ (99%, «ABCR») с величиной удельной поверхности 120 м²/г и средним размером частиц 15-20 нм и SiO₂ удельной поверхностью 400 м²/г и средним размером частиц 15 нм, которые также предварительно прокаливались при температуре 500 °С для дегидратации поверхности.

Для измерения спектров комбинационного рассеяния света (КРС) индивидуальной соли и композиционных систем использовали конфокальный КР микроскоп Senterra при лазерном возбуждении на $\lambda = 532$ нм и мощностью лазера 20 мВт. Спектральный диапазон 75–1530 см⁻¹, используемый объектив микроскопа – 10x; число сканов – 20.

При сравнении спектров КРС снятых при комнатной температуре чистого перхлората лития и

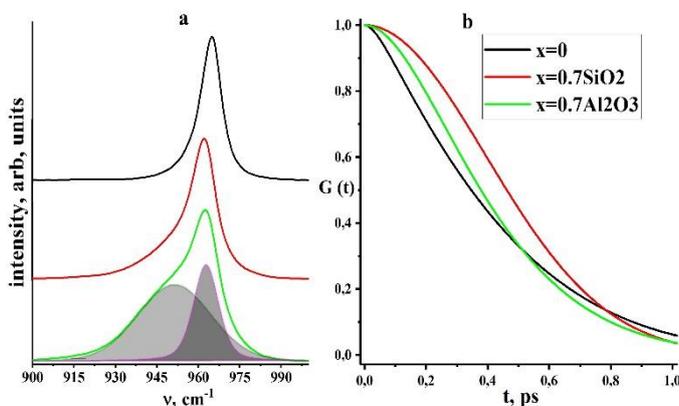


Рис. 1. Спектры КРС 0.3LiClO₄+0.7R (где R=Al₂O₃; SiO₂) (а) при T = 25°C и автокорреляционная функция (б) полностью симметричного валентного колебания $\nu_1 \sim 963$ см⁻¹ перхлорат иона при T = 300°C.

композиатов 0.3LiClO₄+0.7R (где R=Al₂O₃; SiO₂) мы видим, что полоса ν_1 (LiClO₄) принимает сложную форму. То есть обнаруживается дополнительная компонента с максимумом при $\nu_1^c \sim 954$ см⁻¹, которая может быть отнесена к колебаниям ClO₄⁻, локализованным в приповерхностной области наночастиц [1].

Анализ спектральных и релаксационных характеристик перхлорат - иона в системе (1-x)LiClO₄-xR показал заметное различие динамических параметров в зависимости от типа наполнителя. Данное обстоятельство вызвано с активацией динамики аниона с частицами оксидов кремния и алюминия в приповерхностной или в межфазной области расплав - оксид.

Работа выполнена на оборудовании Аналитического центра коллективного пользования Дагестанского федерального исследовательского центр РАН.

Литература

1. М.М. Gafurov // Spectrochimica Acta. 2021. vol. 257. p. 119765.

Возможности измерения концентрации гелия в природном газе с помощью спектроскопии КР

А.С. Таничев¹, Д.В. Петров^{1,2}

¹ ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, 634055, Академический пр. 10/3

² Томский государственный университет, Томск, 634050, пр. Ленина 36
тел: 8 (3822) 493-185, эл. почта: tanichev_aleksandr@mail.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-53

В настоящее время стремительно развивается оптический метод газоанализа, основанный на явлении комбинационного рассеяния света (КР). Одно из наиболее перспективных направлений для применения спектроскопии КР – анализ природного газа. Использование современных мощных малогабаритных лазеров и высокочувствительных детекторов позволяет разработать КР-газоанализатор с пределом детектирования менее 100 ppm [1–3]. Гелий является одним из компонентов природного газа, где его концентрация может достигать 7% [4]. Область применения гелия достаточно широка: медицина, металлургия, химическая промышленность, геологоразведка и т.д. Атомарные газы не имеют колебательных спектров, а значит концентрация гелия не может быть измерена напрямую методом КР. Однако, согласно представленным исследованиям [5,6] среда гелия оказывает влияние на спектр КР метана, который является доминирующим компонентом в природном газе. В этой связи, концентрация гелия может быть измерена по косвенным признакам.

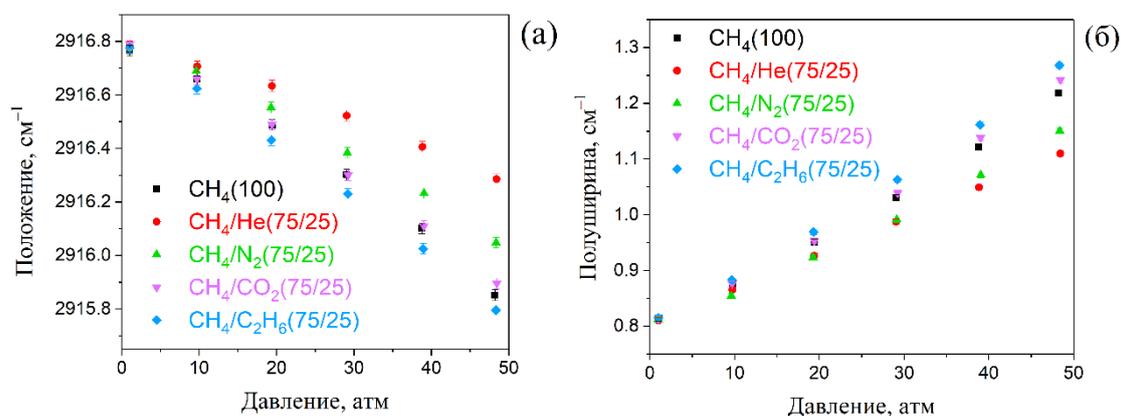


Рис. 1. Зависимость (а) положения и (б) полуширины полосы ν_1 метана от давления в бинарных газовых смесях 75/25

В данной работе исследовано влияние сред основных компонентов природного газа (N_2 , CO_2 и C_2H_6) и гелия на наиболее интенсивную полосу ν_1 метана с помощью КР-спектрометра высокого разрешения. Спектрометр построен на базе монохроматора МДР-23, оснащенного дифракционной решеткой 2400 линий/мм и ПЗС матрицей Hamamatsu S10141 2048×512 с термоэлектрическим охлаждением до $-10^\circ C$. Рассеяние возбуждалось в газовой кювете с помощью непрерывного излучения твердотельного Nd:YAG лазера (532 нм) с выходной мощностью 5 Вт. Ширина одновременно регистрируемого спектрального диапазона составила 320 см^{-1} при разрешении 0.5 см^{-1} . На основе полученных экспериментальных зависимостей положения и полуширины полосы ν_1 были оценены возможности измерения содержания гелия в природном газе методом КР-спектроскопии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-77-10046-П).

Литература

1. Petrov D. V. et al. // Sensors. 2022. Vol. 22, № 9. P. 3492.
2. Guo J. et al. // Sensors. 2021. Vol. 21, № 10. P. 3539.
3. Knebl A. et al. // Anal. Chem. 2021. Vol. 93, № 30. P. 10546–10552.
4. Grynia E., Griffin P.J. // J. Nat. Gas Eng. 2017. Vol. 1, № 2. P. 163–215.
5. Tanichev A.S. et al. // Atmos. Ocean. Opt. 2021. Vol. 34, № 5. P. 395–399.
6. Pieroni D. et al. // J. Chem. Phys. 2000. Vol. 112, № 3. P. 1335–1343.

Определение величины нанометровых флуктуаций сдвигового модуля в стеклах и переохлажденных жидкостях методом неупругого рассеяния света

В.Н. Новиков, Е.А. Добрынина, И.В. Зайцева

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск,
просп. Академика Коптюга, 1

тел: +7 (383) 330-9048, факс: +7 (383) 330-8878, эл. почта: novikov@iae.nsk.su

DOI 10.34077/SCATTERING95-54

Наличие среднего порядка в стеклообразных материалах, т.е. структурных корреляций на масштабах нанометра, приводит к флуктуациям упругих констант с таким же характерным радиусом корреляции. Вопрос о том, какова характерная амплитуда этих флуктуаций, представляет большой интерес как с прикладной точки зрения, так и с точки зрения фундаментального понимания структуры и динамики стеклообразных материалов. В данной работе мы находим величину среднеквадратичных флуктуаций сдвигового модуля G на нанометровом масштабе в стеклах и переохлажденных жидкостях. Для этого мы рассчитываем длину пробега поперечных фононов в среде с пространственными флуктуациями упругих констант по теории возмущений с малым параметром,

равным относительной среднеквадратичной флуктуации модуля сдвига $\gamma_b^2 = \langle(\Delta G/G)^2\rangle$ [1]. Кроме того, мы учитываем релаксационные вклады в затухание фононов. С помощью критерия Иоффе-Регеля для поперечных фононов, мы находим связь между $\langle(\Delta G/G)^2\rangle$ и положением бозонного пика в спектре акустических колебательных возбуждений стекол. Соответствующее уравнение позволяет выразить γ_b^2 через частоту максимума бозонного пика, поперечную и продольные скорости звука, а также корреляционный радиус структуры на масштабе среднего порядка, который мы извлекаем из данных о статическом структурном факторе материала. Частоту максимума бозонного пика мы определяем в основном по данным низкочастотного (~ 1 ТГц) комбинационного рассеяния света, а также по литературным данным по неупругому рассеянию нейтронов. Найденные значения γ_b^2 для разных материалов лежат в диапазоне $\sim 0.1-0.35$. Как оказалось, γ_b^2 мала в так называемых хрупких стеклах (как правило, молекулярных или полимерных), и наиболее велика в сильных, т.е. с малой хрупкостью, стеклах (ковалентные материалы). На Рис 1. показана соответствующая корреляция между γ_b^2 и хрупкостью m для

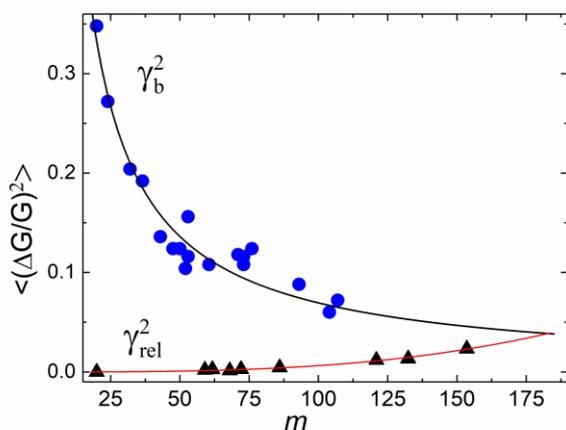


Рис.1. Корреляция нормированной среднеквадратичной флуктуации модуля сдвига $\gamma^2 = \langle(\Delta G/G)^2\rangle$ в различных стеклообразных материалах с хрупкостью m : γ_b^2 – найдено по бозонному пику, γ_{rel}^2 – найдено по декаплингу вязкости и диффузии в переохлажденных жидкостях. Материалы имеют самый разный химический состав: с ковалентными и водородными связями, молекулярные материалы, металлическое стекло, полимеры.

ряда материалов. Мы также определили γ^2 внутри областей со средним порядком в ряде переохлажденных жидкостей вблизи температуры стеклования, используя упругую теорию стеклования и данные о декаплинге вязкости и диффузии (γ_{rel}^2 , Рис.1). Пересечение экстраполированных γ_b^2 и γ_{rel}^2 дает так называемое предельное значение хрупкости $m_{max} \sim 190-200$. Используя такой же метод и соответствующие спектры рассеяния света, мы определили также температурную зависимость γ_b^2 в ряде переохлажденных жидкостей и сравнили ее с таковой для отношения Ландау-Плачека.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-22-00320.

Литература

1. V.N. Novikov // Phys. Rev. E. 2022. V.106, iss. 2. P.024611(8).

Комбинационное рассеяние света с переворотом спина в перовскитах и плателетах

А.В. Родина¹, Е.Л. Ивченко¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,

Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

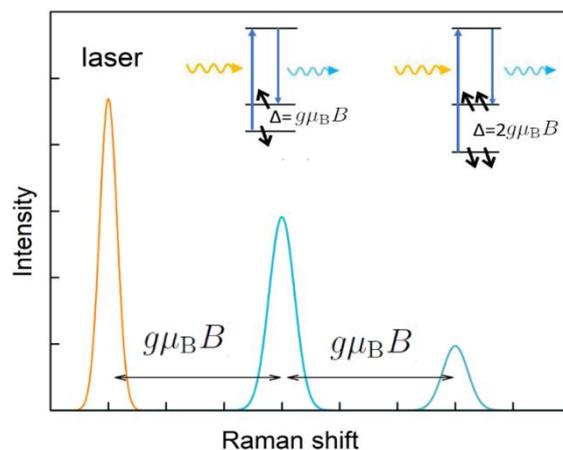
тел: +7 (812) 247-2245, факс: +7 (812) 247-1017, anna.rodina@mail.ioffe.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-55

Комбинационное рассеяние света при резонансном возбуждении экситонов, взаимодействующих с резидентными носителями заряда во внешнем магнитном поле, является эффективным методом исследования спиновой физики в объёмных и низкоразмерных полупроводниках. При этом неупругое рассеяние сопровождается переворотом спина носителя заряда, и энергетический сдвиг линии прямо определяется его g -фактором, а также, в общем случае, обменной энергией взаимодействия носителя с окружением. Обычно в спектре рассеяния видны линии однократного переворота спина, при этом двукратные или многократные перевороты спинов носителей заряда наблюдаются редко. В наноструктурах перевороты спина двух резидентных электронов (схематическое изображение спектра и рассматриваемых процессов показано на рисунке) впервые наблюдались в коллоидных наноплателетах CdSe [1]. Совсем недавно резонансное рассеяние света с одновременным переворотом спина локализованного электрона и дырки обнаружено в объёмных [2] и двумерных кристаллах перовскитов, а также в нанокристаллах на их основе.

Мы представляем теорию резонансного комбинационного рассеяния света во внешнем магнитном поле, вызванного процессами с одновременным переворотом спина двух резидентных носителей заряда обоих знаков: двух электронов, или двух дырок, или электрона и дырки. Рассмотрены механизмы такого рассеяния, обусловленные взаимодействием электрона и дырки в фотовозбужденном экситоне с локализованными носителями, а также переворотом спина экситона как целого с участием акустического фонона. Рассчитаны интенсивности и правила отбора для таких процессов, найдена их зависимость от вида многочастичного резонансного промежуточного состояния, от параметров обменного взаимодействия между входящими в него частицами, а также от симметрии кристалла и формы наноструктуры. В докладе будет проанализирована роль локализованных экситонов и их тонкой структуры в двукратном рассеянии в двумерных наноплателетах на основе CdSe [3], кристаллах кубических [4], тетрагональных и двумерных перовскитов, проведено сравнение с экспериментальными наблюдениями. Предложен новый механизм комбинационного рассеяния света с переворотом спина локализованных резидентных носителей при прямом возбуждении экситонных поляритонов в объёмных кристаллах перовскитов.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ (№ 19-52-12064 ННИО_a).



Литература

1. D. Kudlacik, V.F. Sapiega, D.R. Yakovlev et al. // Nano Lett. 2020. V. 20, No.1. P. 517-525.
2. E. Kirstein, D. R. Yakovlev, M. M. Glazov et al. // Nature Commun. 2022. V. 13, No.1. P. 3062.
3. A.V. Rodina, E.L. Ivchenko // Phys. Rev. B 2020. V. 102, No. 23. P. 235432.
4. A.V. Rodina, E.L. Ivchenko // Phys. Rev. B 2022. V. 106, No. 24. P. 245202.

Низкочастотная спектроскопия КР металлоорганических каркасных соединений

А.С. Крылов¹, И.Д. Юшина², С.Н. Крылова¹, I. Senkovska³, А. Н. Втюрин^{1,4}

¹ Институт физики им. Л.В.Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок, 50/38

² Южно-уральский государственный университет, Челябинск, 454080, пр. Ленина, 76

³ Technische Universität Dresden, Dresden, Germany, 01062

⁴ Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, пр. Свободный, 79.

тел: +7 (391) 249-4510, эл. почта: shusy@iph.krasn.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-56

Переключаемые металлоорганические каркасные структуры (MOF) или мягкие пористые кристаллы являются уникальными материалами, которые могут преобразовывать свою кристаллическую структуру из плотного непористого в высокопористое открытое состояние и обратно в ответ на различные внешние воздействия. Это бистабильные или мультистабильные кристаллические материалы с дальним структурным упорядочением, обратимой транспортируемостью между кристаллическими фазами и постоянной пористостью [1]. В текущем контексте, пористость означает, что по крайней мере одна кристаллическая фаза обладает пространством, которое может быть занято гостевыми молекулами, и каркас демонстрирует воспроизводимую адсорбцию гостевых молекул. MOF имеют высокий потенциал для практических приложений. Возможно их применение как перспективных адсорбентов для хранения газа, материалов для разделения газов и сенсорных технологий. Однако механизм переключения и размерные факторы, влияющие на переключаемость и адсорбционные свойства, еще не до конца понятны и продолжают изучаться.

Представлены результаты исследований металлоорганических каркасных соединений. Переключаемые DUT-8, относящиеся к классу MOF со столбчатым слоем [2]. Эти кристаллы обладают свойством изменять размеры пор под влиянием внешних факторов среды, что означает существование метастабильных фаз с открытыми или закрытыми порами [3, 4]. Изоретикулярные MOF семейства UiO-66, представляющий собой архетипический металлоорганический каркас с очень большой площадью поверхности, а также высокой стабильностью. Показано, что изучение низкочастотного колебательного спектра террагерцового диапазона могут стать основой для экспресс-методики, основанной на спектроскопии комбинационного рассеяния света, для определения различных переключаемых фаз MOF, а также для *in situ* анализа по спектральному профилю.

На основании спектрального профиля выполнены исследования в условиях высоких гидростатических давлений с использованием различных сред, передающих давление (метилловый и изопропиловый спирты, силиконовое масло). Показана возможность одновременного сосуществования в одном кристалле структур, относящихся к фазам с открытыми и закрытыми порами. Показана возможность переключения из одной фазы в другую при увеличении давления в зависимости от размеров молекул среды, передающей давление [5].

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Немецкого научно-исследовательского сообщества в рамках научного проекта 21-52-12018.

Литература

1. Schneemann A. et al. // Chem. Soc. Rev. 2014.V. 43, 6062.
2. Kavooosi N. et al. // Dalton Trans. 2017. V. 46, 4685.
3. Krylov A. et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2017. V. 19, 32099.
4. Ehrling S. et al. Mater. Chem. A. 2019. V. 7, 21459.
5. Krylov A. et al. // Phys. Chem. Chem. Phys., 2022. V. 24, 3778.

Strain and Defect Engineering of Two-Dimensional Materials for Enhanced Chemical Activity Probed with Raman Spectroscopy

Raul D. Rodriguez¹, Tuan-Hoang Tran¹, Dmitry Cheshev¹, Nelson E. Villa¹, Muhammad Awais Aslam², Jelena Pesic³, Aleksandar Matković², Evgeniya Sheremet¹

¹ Tomsk Polytechnic University, Lenina ave. 30, Tomsk, Russia

² Institute of Physics, Montanuniversität Leoben, Franz Josef Strasse 18, 8700 Leoben, Austria

³ Institute of Physics Belgrade, University of Belgrade, Pregrevica 118, 11080 Belgrade, Serbia

tel: +7 9234322327, email. raul@tpu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-57

In this contribution we present our findings on the strain engineering of two-dimensional materials and the activation of their chemical activity using substrate-induced strains and tightly focused laser beams probed with Raman spectroscopy. Two-dimensional semiconductors such as transition metal dichalcogenides (TMDs), and GaSe have garnered considerable attention due to their unique electronic and mechanical properties. First, we will discuss an easy, straightforward strain engineering method based on the strong interaction between two-dimensional materials and highly-ordered pyrolytic graphite [1]. Furthermore, we show how this strong interaction is a powerful tool for modifying 2D material properties and creating novel functionalities.

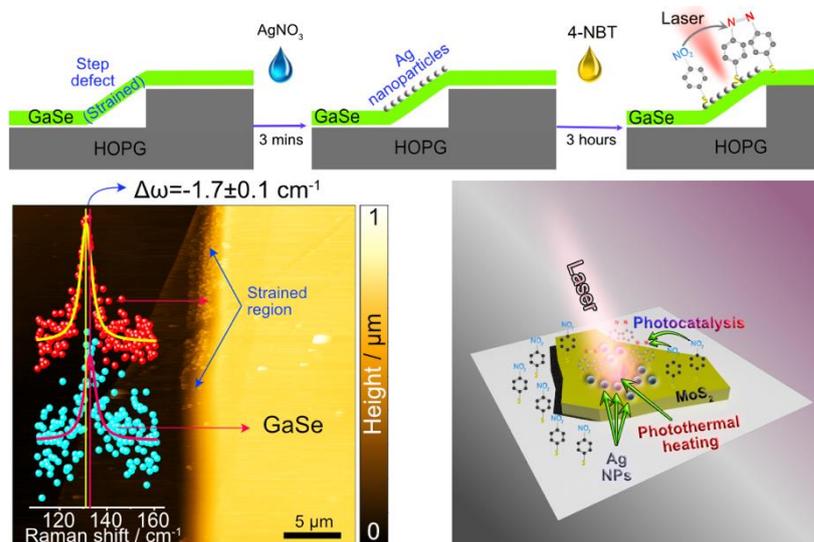
We specifically focus on GaSe as an example. Our findings reveal that strain engineering can cause changes in the Raman spectra, indicating alterations in their lattice vibrations and electronic band structure. Furthermore, we demonstrate that substrate-induced strain can also activate the chemical activity of these materials. This is evident from the enhanced signals we observe using molecular Raman probes and the significant improvement in photocatalytic activity, with yields close to 100%. Next, we show the use of laser processing to add chemical activity to multilayer MoS₂. Finally, we will discuss how we pinned the origin of laser activation as photothermal using nanolocalized Raman thermometry. Our results provide a new way to spatially control the chemical activation of MoS₂ through laser irradiation, leading to the formation of Ag-Ag₂S-MoS₂ nanostructures with high photocatalytic activity.

In conclusion, our report offers valuable insights into the role of substrate-induced strain engineering and the light-induced modification of two-dimensional materials. Furthermore, our findings contribute to a better understanding of these materials' properties and potential applications, particularly in electronics, optoelectronics, and catalysis.

This work was funded by TPU Priority 2030-NIP/IZ-007-0000-2023.

Literature

1. A universal substrate for the nanoscale investigation of two-dimensional materials. TH Tran, RD Rodriguez, D Cheshev, NE Villa. - Applied Surface Science, 2022.



DFT моделирование спектров КРС монослойных дихалькогенидов молибдена со структурой типа «Янус»

А.С. Орешонков^{1,2}, Е.В. Суханова¹, З.И. Попов¹

¹ Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, Москва, 119334, Косыгина, 4

² Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КИЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок, 50/38

тел.: +7 (391) 249-4510, эл. почта: oreshonkov@iph.krasn.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-58

Согласно актуальным статистическим данным [1], в 2021 году на ископаемые виды топлива приходилось 82% от всего количества потребления первичных энергоресурсов, в 2019 году – 83%, а пять лет назад – 85%. В тоже время, по мере восстановления экономической активности после карантина и других мер, связанных с COVID-19, потребление энергии резко возросло. Одновременно с этим выросли (приблизительно на 5.7 – 5.9 %) выбросы углекислого газа. В качестве низкоуглеродных источников энергии и технологий, используемых для снижения углеродного следа, сейчас можно выделить: ветровую и солнечную энергию; биотопливо; водородное топливо; CCUS (Carbon capture, utilisation and storage) – улавливание, использование и хранение углерода. В начале 1970-х, Fujishima и Honda [2] сообщили о фотоэлектрохимическом разложении воды на фотоанод из оксида титана. Эффект Хонды-Фудзисимы продемонстрировал потенциал полупроводниковых материалов для преобразования энергии света в химическую энергию для последующего разложения молекул воды.

В настоящее время наблюдается стремительный рост числа исследований наноразмерных полупроводниковых материалов с «Янус» структурой [3] являющихся перспективными для фотокаталитического расщепления воды. Главная особенность таких монослойных структур – наличие двух неэквивалентных поверхностей. В данной работе представлены результаты DFT моделирования спектров комбинационного рассеяния света как графеноподобных (1H, 1T) монослойных дихалькогенидов молибдена со структурой типа «Янус», так и результаты моделирования спектров его 1H', 1T', 1A' и Шеврелеподобных модификаций, см. рисунок 1.

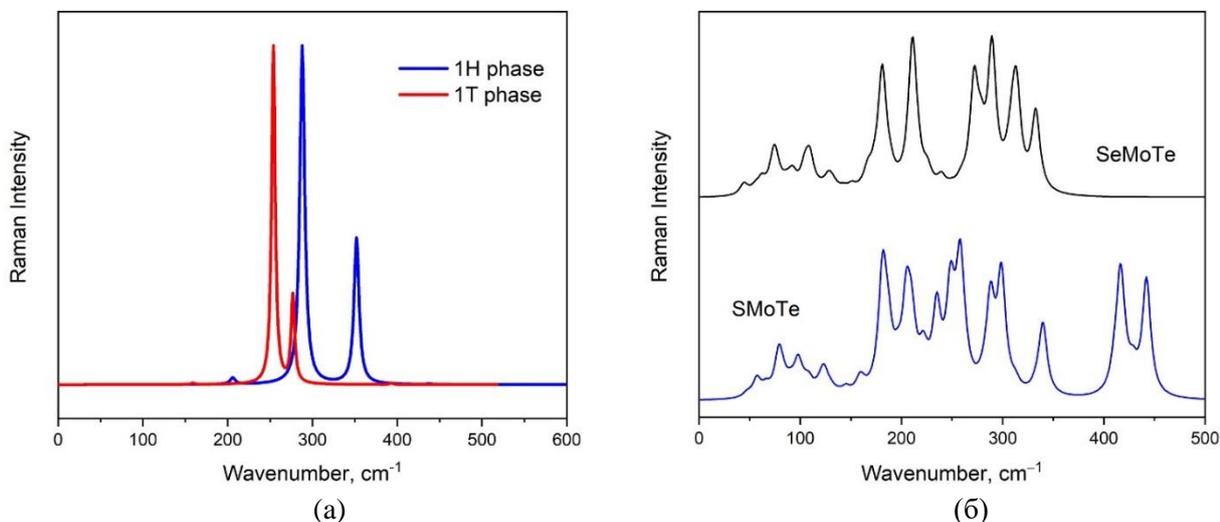


Рис. 1. Расчётные спектры КРС для 1H и 1T фаз SMoSe (а), для 1A' фазы SeMoTe и SMoTe (б).

Исследование выполнено в рамках поддержанного проекта РНФ №21-73-20183. Ссылка на информацию о проекте: <https://rscf.ru/project/21-73-20183>. Авторы благодарят межведомственный суперкомпьютерный центр РАН за предоставленные вычислительные ресурсы.

Литература

1. S. Dale. BP Statistical Review of World Energy 2022. London: BP p.l.c., 2022. 60 p.
2. A. Fujishima & K. Honda // Nature. 1972. Vol.238. P.37-38.
3. J. Zhang et.al. // ACS Nano. 2017. Vol.11, Is.8. P.8192-8198.

Низкочастотное вынужденное рассеяние лазерного излучения в водных суспензиях вирусов в частотном диапазоне 1-60 ГГц

А.Ф. Бункин¹, М.А. Давыдов¹, С.М. Першин¹, А.Н. Федоров¹, М.В. Архипенко², О.В. Карпова²

¹ *Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук*

119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

² *Биологический факультет, МГУ им. М.В.Ломоносова, 119991 Москва, Россия*

тел.: +7 (916)312-6636, эл. почта: abunkin@kapella.gpi.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-59

Впервые рассчитаны и последовательно измерены в одинаковых условиях и геометрии эксперимента спектры низкочастотного вынужденного рассеяния (НВР) в суспензии двух морфологически близких вирусов: мозаики альтернария (ВМАльт) и х-вируса картофеля (ХВК) в частотном диапазоне 1-60 ГГц. В спектрах НВР зафиксированы значимые (сотни МГц) различия, частот низкочастотных резонансов исследованных вирусов, позволяющие их идентифицировать, а также воздействовать на них на резонансных частотах с целью подавления их активности. Различие низкочастотных спектров вынужденного рассеяния лазерного излучения, несмотря на сходную морфологию вирусных наночастиц обусловлено, по нашему мнению, различием механических свойств вирусов, в частности модуля Юнга.

В отдельной серии экспериментов были исследованы суспензии вируса табачной мозаики (ВТМ), при концентрациях частиц суспензии $\sim 1 \times 10^{12}$ и $\sim 2.0 \times 10^{12}$ см⁻³, был зарегистрирован сигнал низкочастотного вынужденного рассеяния с частотами ~ 31.17 и ~ 43.5 ГГц, который обусловлен наличием собственных колебательных частот исследуемых частиц ВТМ. Изменение температуры суспензии при заданной концентрации частиц вируса приводит к существенному изменению наблюдаемого спектра НВР. Обнаруженный когерентный сигнал первой стоксовой компоненты с частотным сдвигом (~ 43.5 ГГц) хорошо совпадает с проведёнными нами оценками значений собственных частот колебаний цилиндрических наночастиц в жидкой среде.

Работа была поддержана грантом РФФИ № 22-22-00153.

Изучение температурной зависимости упругих свойств гидратированных планарных слоев фосфолипидов методом рассеяния Манделъштама-Бриллюэна

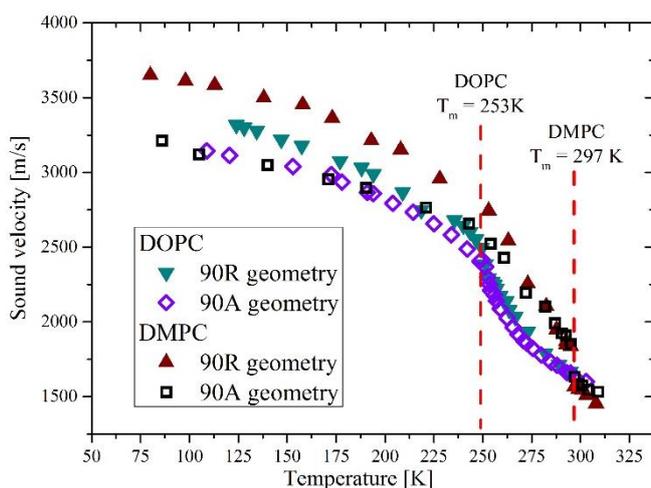
Е.А. Добрынина, В.А. Зыкова, Н.В. Суровцев
Институт автоматизации и электротехники СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Коптюга, 1
эл. почта: liza.dobrynina.99@mail.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-60

Биологические клетки потребляют питательные вещества и кислород через липидные мембраны. Преимущественно мембраны сформированы из фосфолипидных молекул, которые состоят из полярной головки и гидрофобных углеводородных хвостов, и в присутствии воды липиды формируют двойной слой. В настоящее время для изучения клеточных процессов используются синтетические мембраны фосфолипидов в качестве модельных систем реальных биологических мембран. Молекулы фосфолипида чувствительны к изменениям температуры. В зависимости от температуры бислоя может находиться в состоянии геля (углеводородные хвосты упорядочены), либо разупорядоченном состоянии флюида. Температура перехода (T_m) из гелевого состояния во флюидное зависит от вида фосфолипидной молекулы и является важной характеристикой бислоя.

Характеристики и свойства липидных систем активно исследуются с использованием различных методик, в частности методами неупругого рассеяния света. Спектроскопия рассеяния Манделъштама-Бриллюэна (РМБ) – это бесконтактная оптическая методика, которая дает информацию о вязкоупругих характеристиках материала (скорости звука и гигагерцовом упругом модуле) в гигагерцовом диапазоне. Упругие свойства липидных систем чувствительны к составу, неоднородностям, фазовому и конформационному состояниям и могут быть успешно применены в ряде исследовательских задач. Как правило, объект исследования представляет собой водную суспензию многослойных везикул. Однако, с целью уменьшения водяного вклада, а также для детального моделирования клеточной мембраны применяются упорядоченные планарные системы, позволяющие изучать эффекты поперек и вдоль бислоев липидов.

В настоящей работе методом РМБ были исследованы упругие свойства упорядоченных слоев насыщенного фосфолипида DMPC и ненасыщенного DOPC в широком диапазоне температур от 90 до 320 К в латеральном (геометрия рассеяния 90A) и ортогональном (геометрия рассеяния 90R) направлениях. Результаты исследования показали сложное температурное поведение скорости звука ниже T_m , указывающее на то, что даже внутри гелевой фазы наблюдается дополнительное упорядочение углеводородных хвостов [1]. Поскольку свойства слоев фосфолипидов в ортогональном



и латеральном направлениях могут различаться, было проведено исследование планарных образцов, используя различные геометрии рассеяния (представлено на рисунке). Характер температурных зависимостей скоростей звука для различных направлений схож, что опровергает гипотезу о слабой зависимости упругих свойств в латеральном направлении для липида DMPC, выдвинутую в работе [2] в сравнении с данными для везикул. Упругие свойства вдоль слоев для DMPC и DOPC совпадают внутри гелевой фазы (ниже T_m) и во флюидной фазе обоих фосфолипидов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-22-00221.

Литература

1. Zaytseva Y. V., Adichtchev S. V., Surovtsev N. V. //Chemistry and Physics of Lipids. – 2020. – Т. 230. – С. 104926.
2. Zyкова V. A., Adichtchev S. V., Surovtsev N. V. //The Journal of Physical Chemistry B. – 2020. – Т. 124. – №. 41. – С. 9079-9085.

Спектры комбинационного рассеяния сверхрешеток Si/SiO₂ как способ мониторинга строения интерфейсов в кремний-оксидных гетероструктурах

Е.М. Рогинский¹, М.Б. Смирнов², А.В. Савин¹, Д.В. Панькин²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург,
194021, Политехническая, 26

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб. 7/9

тел: +7 (812) 247-2245, факс: +7 (812) 247-1017, эл. почта: e.roginskii@mail.ioffe.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-61

Ключевым элементом МОП-транзисторов, наиболее широко используемых элементов современной электроники, является интерфейс оксид-полупроводник. В кремниевой электронике в качестве оксида преимущественно используют SiO₂. Требование миниатюризации ставит перед технологами задачу получения ультратонких оксидных слоев, что делает актуальной проблему понимания законов, управляющих формированием интерфейсов на атомном уровне. Известно, что изучение структурных параметров с помощью динамических свойств успешно выполняется с спектроскопическими методами. Рамановская спектроскопия доказала свою эффективность как весьма информативный и чувствительный метод неразрушающего анализа структуры полупроводниковых гетероструктур [1]. Однако, детального, основанного на строгих квантово-механических расчетах, теоретического анализа колебательных спектров до сих пор никто не проводил. Понимание связи структура-свойства невозможно без проведения теоретических исследований, основанных на высокоточных расчётах электронной структуры. Сегодня наиболее надёжные методы моделирования электронной структуры конденсированных сред основаны на расчётах в рамках теории функционала плотности.

В работе были рассмотрены различные модификации сверхрешёток (СР) Si/SiO₂. При выборе пространственной модели СР чаще всего используют интерфейсы, образованные поверхностями (001) кристаллов кремния и β-кristобалита. Такой подход хорошо себя зарекомендовал, подтверждением чему является целый ряд публикаций. Нами было выполнено моделирование гетероструктур на основе кубического кремния "сращённого" с β-фазой кристобалита оксида кремния. Методом компьютерного моделирования с применением неэмпирических квантово-механических расчётов, выполнена оптимизация структурных параметров, в след за которой произведён расчёт фононного спектра. В фононном спектре выявлены мнимые моды, указывающие на нестабильность начальной структуры. Однако, небольшие искажения структуры вдоль собственных векторов мнимых мод позволили найти устойчивую фазу. Аналогичные исследования были выполнены для СР, в которых один из слоев повернут на 45 градусов вокруг оси 4-го порядка, а половина интерфейсных атомов Si с двумя оборванными связями заменена на атомы О.

Основной результат настоящей работы состоит в том, что впервые с применением неэмпирических расчетных методов компьютерного моделирования найдены устойчивые структуры СР Si/SiO₂ с резким интерфейсом. Изучены их фононные состояния, ИК и КР-спектры, в которых обнаружены характеристические линии, по которым можно установить наличие в исследуемых образцах интерфейсов данного типа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-22-20021) и Санкт-Петербургского научного фонда (проект № 32/2022).

Литература

1. M. Benyoucef, M. Kuball, J. M. Sun, G. Z. Zhong, X. W. Fan. J. Appl. Phys. (2001). Т. 89, С. 7903-7909.

Низкочастотная спектроскопия комбинационного рассеяния органических полупроводников и биомолекул

О.Д. Паращук¹, А.Ю. Сосорев², О.Г. Харланов¹, М.В. Венер³, А.А. Трубицын¹,
Д.Ю. Паращук¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия

²Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, Москва, Россия

³Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

тел: +7 (495) 939-2228, факс: + 7 (495) 939-1225, эл. почта: olga_par@physics.msu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-62

Низкочастотная спектроскопия комбинационного рассеяния (НЧ КР) ($10\text{--}200\text{ см}^{-1}$) дает информацию о молекулярных движениях с большой амплитудой, движениях частей молекул и коллективных движениях, вовлекающих несколько молекул. В последнее время было показано, что относительная интенсивность НЧ КР может быть использована как индикатор динамического беспорядка и компактности для двух классов молекул, соответственно: органических π -сопряженных полупроводников (ОП) – перспективных материалов для использования в органических электронных устройствах, и нуклеиновых кислот ДНК и РНК, отвечающих за важнейшие функции по хранению, передаче и реализации генетической информации.

Для использования органических полупроводников в высокоэффективных органических электронных устройствах необходима высокая подвижность носителей заряда. Межмолекулярные колебания высокой амплитуды обуславливают динамический беспорядок – флуктуацию интегралов переноса заряда между молекулами - что нарушает делокализацию заряда между молекулами и уменьшает подвижность носителей заряда. Установлено, что КР-интенсивность низкочастотных колебательных мод связана с вкладом этих мод в динамический беспорядок. Относительная интенсивность НЧ КР демонстрирует меньшие значения в ОП с меньшим динамическим беспорядком. Данный подход продемонстрирован на различных представителях ОП: четырех рядах олигомерных ОП [1] – полиенах, олигофуранах, олигоаценах и гетероаценах; производных нафталиндиимидов (NDI) [2]; кристаллических ОП, состоящих из π -изоэлектронных малых молекул (т.е. имеющих одинаковое количество π -электронов) [3]; со-олигомерах тиофен-фенилена CF3-PTTP-CF3 и его замещенном производном [4]. В результате нами сформулирован спектроскопический метод для быстрой и бесконтактной оценки подвижности в кристаллических ОП [5]. Мы ожидаем, что предлагаемый подход обеспечит простой и практичный способ быстрого скрининга ОП с высокой подвижностью зарядов до их изучения в электронных устройствах.

Одним из параметров биомолекул, который важен для целостности наследственной информации и её передачи в ходе клеточных процессов, является компактизация биомолекулы [6]. Ожидается, что относительная интенсивность НЧ КР биомолекул ДНК и РНК может быть индикатором их компактности, поскольку в более компактизованных молекулах амплитуда молекулярных движений с большой амплитудой движений, соответствующих НЧ области КР, ниже. Образцами ДНК разной компактизации выступают «резаная» и сверхспирализованная ДНК, а РНК – рибосомная и «расслабленная» РНК.

Показано, что низкочастотная спектроскопия КР является мощным инструментом для предсказания и оценки важнейших параметров для органических π -сопряженных полупроводников (подвижность носителей заряда) и для органических биомолекул ДНК и РНК (компактизация молекул).

Литература

1. M.K. Nuraliev et al. // J. Chem. Phys. 2002. Т.153. С.174303.
2. M.V. Vener et al. // Adv. Electron. Mater. 2021. Т.7. С.2001281.
3. A.Yu. Sosorev, O.G. Kharlanov // Phys. Chem. Chem. Phys. 2021. Т.23. С.15485–15491.
4. V.A. Trukhanov et al. // RSC Adv. 2020. Т.10. С.28128.
5. O.G. Kharlanov et al. // Adv. Electron. Mater. 2021. Т.7. С.2100579.
6. A.Yu. Sosorev et al. // JETP Lett. 2022. Т.116, вып.5. С.335–341.

Определение пространственного распределения коллагена и эластина в бычьей вене с помощью рассеяния Мандельштама-Бриллюэна

С.В. Адищев¹, В.А. Зыкова¹, Е.А. Добрынина¹, А.М. Пугачёв¹, Н.В. Суровцев¹

¹ *Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск,*

630090, пр. академика Коптюга, 1

тел.: +7 3307978, эл. почта: adish@ngs.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-63

Коллагенсодержащие материалы, такие как свиная и бычья вена широко применяются в современной медицине как исходный материал для изготовления протезов сердечных клапанов. В связи с этим, коллагенсодержащие материалы являются объектами интенсивных исследований с помощью различных экспериментальных методик, таких как оптическая микроскопия, спектроскопия инфракрасного излучения, квазистатических механических тестов и т.д. Спектроскопия рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (РМБ) позволяет бесконтактно определять вязкоупругие характеристик образца в гигагерцовом диапазоне частот. Бесконтактность и неинвазивность делает данную методику очень привлекательной для изучения упругих характеристик различных биологических и биологически значимых объектов, в том числе тканей организмов [1, 2]. В работе [3] было продемонстрировано, что спектроскопия РМБ позволяет различать вклады на мезоскопическом уровне от эластина и коллагена, входящих в состав вены. Для характеристики вены важной задачей является определение распределения коллагена и эластина с разрешением в несколько микрон.

В работе, представленной в докладе, предложена экспериментальная методика на базе шести-проходного тандема интерферометров Фабри-Перо с микроскопной приставкой, позволяющая определить пространственное распределение коллагена и эластина содержащихся в вене с разрешением порядка 2.5 мкм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-74-00122).

Литература

1. Palombo F. et al. // *J. R. Soc. Interface* 11: 20140739 (2014).
2. Zhang J., Scarcelli G. // *Nat Protoc* 16, 1251–1275 (2021).
3. Zykova V., Surovtsev N., Zhuravleva I. // *Proc. SPIE* 11962, Optical Elastography and Tissue Biomechanics VIV, 1196206 (2 March 2022).

Применение комбинационного рассеяния света для анализа нанокластеров аморфного кремния в плёнках нестехиометрического нитрида кремния, применяющихся в элементах флэш-памяти и в матрицах резистивной памяти

В.А. Володин^{1,2}, В.А. Гриценко^{1,3}, Г.Н. Камаев¹, С.Г. Черкова¹, И.А. Азаров^{1,2}, Ю.Н. Новиков¹,
А.А. Гисматулин¹, И.П. Просвирин⁴

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, проспект академика Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2
тел: +7 (383) 333-2470, факс: +7 (383) 333-2771, эл. почта: volodin@isp.nsc.ru

3 - Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, 630073, пр. Маркса, 20

4 - Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, 630090,

пр. академика Лаврентьева, 5.

DOI 10.34077/SCATTERING95-64

Плётки аморфного нестехиометрического нитрида кремния (SiN_x) используются в микроэлектронике уже более 50 лет, а в последнее время на их основе пытаются сделать мемристоры [1], которые являются перспективными кандидатами для использования в матрицах энергонезависимой резистивной памяти (ReRAM). Так как атомарная структура материала определяет его электронные свойства, для оптимизации характеристик ячейки памяти, в которой главным элементом является SiN_x , необходимо анализировать его структуру – прежде всего стехиометрический состав, а также распределение избыточного кремния. Известны две крайних модели структуры нестехиометрических диэлектриков: модель случайной фазы (Random Mixture - RM) и модель неупорядоченной случайной сетки (Random Bonding - RB). В первом случае плётка SiN_x состоит из включений (нанокластеров) аморфного кремния в окружении матрицы стехиометрического нитрида кремния – Si_3N_4 , а объёмная доля нанокластеров определяется стехиометрическим параметром x . Во втором случае избыточный кремний абсолютно случайно распределён по атомарной сетке, материал состоит из пяти типов тетраэдров $\text{SiN}_v\text{Si}_{4-v}$, где $v=0,1,2,3,4$, вероятность обнаружить кластер каждого типа определяется стехиометрическим параметром x . Обычно, реальная структура SiN_x является смесью данных моделей, так называемая промежуточная модель (Intermediate Model - IM) [2]. Стоит отметить, что для анализа, какой моделью описывается реальная плётка SiN_x , наиболее информативная методика - рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Но это сложная методика, к тому же она позволяет анализировать лишь приповерхностный слой в несколько нм. Поэтому, весьма актуальным является развитие метода спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) для анализа как аморфных нанокластеров кремния, так и локальных связей Si-Si в плётках SiN_x .

С использованием спектроскопии КРС, поглощения в ИК видимом диапазоне, эллипсометрии и РФЭС были исследованы как плётки SiN_x , полученные при высокой температуре синтеза методом CVD, так и гидрогенизированные плётки $\text{SiN}_x\text{:H}$, полученные при низких температурах с использованием плазмохимического осаждения. В обоих случаях стехиометрический параметр x варьировался в широких пределах, от 0.5 до 1.33. Обнаружено, что наличие кластеров аморфного кремния проявляется в спектрах КРС в плётках со стехиометрическим параметром x меньшим примерно 1-1.1. Обсуждены вопросы, как оценить размеры аморфных нанокластеров кремния. На основе плёнок SiN_x и $\text{SiN}_x\text{:H}$ изготовлены МДП-структуры и получен мемристорный эффект.

В спектрах комбинационного рассеяния света плёнок почти стехиометрического аморфного нитрида кремния ($x \sim 1.33$) обнаружен вклад от локальных колебаний связей кремний-кремний (Si-Si) [3]. Это является прямым подтверждением того, что в почти стехиометрическом аморфном Si_3N_4 имеются Si-Si связи, которые согласно теоретическим предсказаниям, являются ловушками для электронов и дырок, то есть ответственны за эффект памяти в Si_3N_4 .

Спектроскопия КРС является экспрессной и информативной для анализа нанокластеров аморфного кремния в плётках нитрида кремния. Работа поддержана РФФ, проект 22-19-00369.

Литература

1. Andrei A. Gismatulin, Gennadiy N. Kamaev, Vladimir A. Volodin, and Vladimir A. Gritsenko // Electronics, 2023, 12, С.598(1-15).
2. В.А. Гриценко, В.Н. Кручинин, И.П. Просвирин, Ю.Н. Новиков, А. Чин, В.А. Володин // ЖЭТФ, 2019, 156, вып.5, С.1003-1015.
3. В.А. Володин, В.А. Гриценко, А. Chin // Письма в ЖТФ, 2018, 44, вып.10, С.37-45.

Деграляция свойств КНС псевдо-МОП сегнетотранзисторов (SOS FeFETs) после облучения электронами и быстрыми ионами Хе и Вi

В.А. Антонов¹, В.А. Володин^{1,2}, В.П. Попов^{1*}, А.В. Мяконьких², К.В. Руденко², В.А. Скуратов⁴

¹ ИФП СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова,

³ ФТИАН РАН им. К.А. Валиева, Москва, Россия

⁴ ОИЯИ, Дубна, Россия

тел: +7 (383) 333-2493, факс: +7 (383) 333-2772, эл. почта: popov@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-65

Показано, что свойства псевдо-МОП транзисторов на КНС структурах со стеклом Si(500нм)/HfO₂:Al(20нм)/сапфир(500 мкм) после облучения 3 нм пучком электронов (30 кэВ, 30 Мрад/SiO₂) почти не менялись. Электронные структуры, их отдельные компоненты/слои обладают разной чувствительностью к более жесткому облучению быстрыми тяжелыми ионами (БТИ), формирующих разупорядоченные области вокруг ионных траекторий - латентных треков [1]. Они существенно меняют свойства материалов, а также радиационную стойкость к другим видам облучения. В работе КНС псевдо-МОП транзисторы облучались быстрыми ионами Хе⁺²⁶ (150 МэВ) и Вi⁺⁵¹ (670 МэВ) до флюенса 2·10¹¹ см⁻². Воздействие моноатомных частиц, таких как Хе или Вi, не формировало в кремнии видимых в ВРЭМ треков [1], но снижало ток стока I_{ds}, более чем в 10 (Рис. 1) и 1000 раз для этих БТИ, соответственно. Рост температуры измерений Т до 250 °С снижает степень компенсации до 2, что свидетельствует о вполне эффективной рекомбинации возбужденных БТИ электрон-дырочных пар на гетерогранице HfO₂:Al/c-Al₂O₃ при облучении Хе. В отличие от БТИ Хе, проводимость слоя Si после БТИ Вi растет на 3 порядка при измерениях I_{ds}(V_g) с ростом Т до 250 °С и почти достигает значений I_{ds}(V_g) после БТИ Хе при Т = 250 °С.

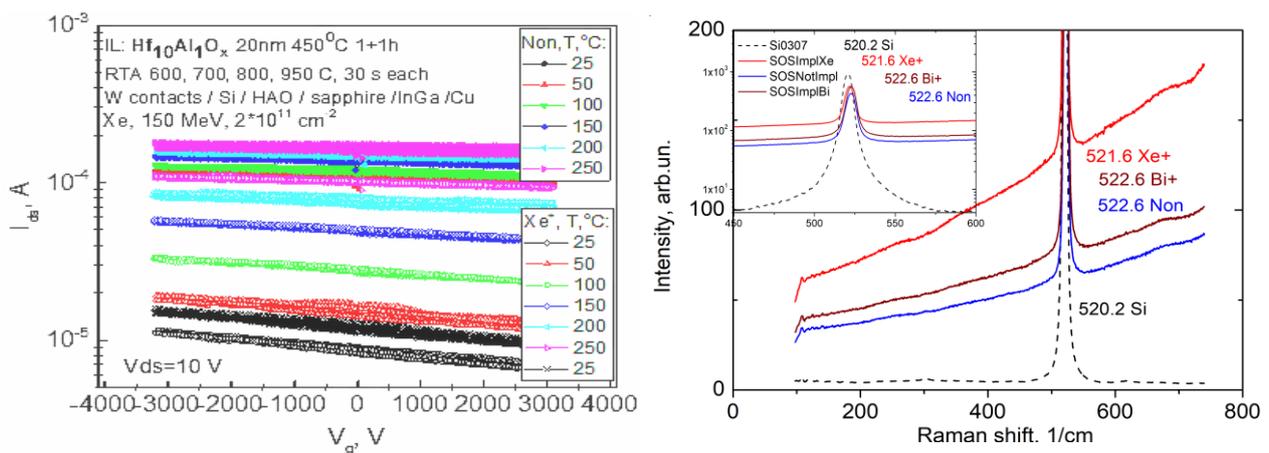


Рис. 1. (слева) сток-затворные характеристики КНС псевдо-МОП транзисторов после облучения БТИ Хе⁺ при Т=25-250°С; (справа) спектры комбинационного рассеяния (КРС) на LO фонах в кремнии и КНС меза структурах до и после облучения БТИ Хе⁺ и Вi⁺.

В отличие от кремния в кристаллических HfO₂ и Al₂O₃ образуются латентные треки. Так, диаметр треков в Al₂O₃ составляет по данным ВРЭМ для Хе⁺²⁶ и Вi⁺⁵¹ 1.7 и 3.4 нм, соответственно [2]. В трековых областях ионов ксенона в HfO₂ наблюдался переход из орторомбической в тетрагональную фазу [3]. При превращении моноклинной фазы в тетрагональную объем ячейки уменьшается, т.е. напряжения должны расти, тогда как при переходе тетрагональная-кубическая фазы изменения объема нет [4]. Остаточные напряжения сжатия в Si из-за разницы в коэффициентах термического расширения с сапфиром не меняются для БТИ Вi, но снижаются после БТИ Хе от 6 до 3 кбар. Данные КРС не подтверждают доминирующие вклады электронных или упругих потерь, которые выше для ионов висмута примерно в 5 раз.

Литература

1. Комаров Ф.Ф. // УФН, 2017, Т. 187, В. 5, 465.
2. R.A. Rymzhanov et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017, V. 50, 475301.
3. E. I. Suvorova, et al. // J. Appl. Phys. 2020, V. 128, 164103.
4. T. Tobase et al. // Phys. Status Solidi B, 2018, V. 255, Is. 11, 1800090.

Применение метода комбинационного рассеяния света к детектированию дейтерированных метаболитов в дрожжевых клетках

А.Н. Омельченко^{1,2}, К.А. Окотруб¹

¹ *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, 630090, пр-кт Академика Коптюга, 1*

² *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2
тел: +7 (383) 3307978, эл. почта: a.omelchenko@g.nsu.ru*

DOI 10.34077/SCATTERING95-66

Метаболизм является одним из основных проявлений жизни во всех организмах. Изучать его возможно с помощью включения в клетку меченых молекул, например, дейтерированных соединений, которые вовлекаются в специфичные для них метаболические пути и образуют различные замещения водорода на дейтерий (H/D) в химических группах метаболитов. Однако, требуется отработка метода определения положения замещений H/D и активности клеточного метаболизма. Получить такую информацию позволяет метод комбинационного рассеяния света (КРС), который является неразрушающим, неинвазивным, а также применимым к исследованию одиночных клеток. Преимуществом использования этой методики является тот факт, что спектры КРС дейтерированных молекул не перекрываются другими пиками в спектрах органических соединений, что позволяет получить спектр КРС новосинтезируемых дейтерированных молекул.

Данная работа посвящена демонстрации возможностей спектроскопии КРС при детектировании меченных дейтерием метаболитов в одиночных клетках. Для этого мы использовали достаточно простой, но важный модельный объект - клетки дрожжей - они способны быстро развиваться, синтезируя при этом многие присущие эукариотической клетке метаболиты. Культивирование клеток происходило в среде с содержанием разных концентраций тяжелой воды при наличии и в отсутствие кислорода, что соответствует двум разным путям катаболизма (распада) глюкозы. Также производились эксперименты с культивированием клеток дрожжей в растворе дейтерированной глюкозы (D8) в обычной воде. Для подтверждения результатов мы рассчитали теоретические спектры КРС для предполагаемых метаболитов с замещениями H/D в химических группах.

По результатам исследований обнаружены синтезируемые в клетках дейтерированные молекулы липидов и белков с одиночными замещениями H/D при аэробном культивировании [1]. Для анаэробного культивирования удалось выделить спектр КРС тяжелого этанола с одиночными замещениями H/D. Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими спектрами КРС. Обнаружено, что интегральная интенсивность CD-колебаний при аэробном культивировании примерно в 15 раз выше, чем при анаэробном. Этот результат согласуется с эффектом большего производства биомассы клетками дрожжей при аэробном культивировании по сравнению с анаэробным [2]. Эксперименты с различной концентрацией тяжелой воды в среде показали, что при увеличении концентрации D₂O растет интенсивность пиков, отвечающих дейтерированным соединениям. Культивирование клеток даже в 10%-м растворе D₂O в аэробной среде приводит к уменьшению липидного вклада в спектрах КРС, что может быть связано с нарушениями в процессах дыхательной цепи переноса электронов. Также замечено, что в 75%-м растворе D₂O появляются новые пики в спектрах КРС, по-видимому соответствующие замещениям H/D в целых метильных и метиленовых группах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 21-74-10108).

Литература

1. Shi, L., Zheng, C., Shen, Y., Chen, Z., Silveira, E. S., Zhang, L., Min, W. (2018). Optical imaging of metabolic dynamics in animals. *Nature Communications*, 9(1).
2. Хайнрик Р., Дынник В. В., Сельков Е. Е. Математическая модель углеводного энергетического обмена. Механизм эффекта Пастера // *Биохимия*. – 1980. – Т.45. – №. 6. – С. 963-973.

Спектроскопия оптического поглощения и комбинационного рассеяния металлизированных трековых мембран

Н.П. Ковалец^{1,2}, Е.П. Кожина^{1,2}, И.В. Разумовская¹, С.А. Бедин^{1,2,3}, А.В. Наумов^{1,2,4}

¹ Московский педагогический государственный университет, Москва,
119435, Малая Пироговская 29/7

² Физический институт им.П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Ленинский проспект 53

³ ФНИЦ «Кристаллографии и фотоники» РАН, Москва, 119333, Ленинский проспект 59

⁴ Институт спектроскопии РАН, Троицк, 108840, Физическая 5

тел.: +7 (926) 785-3756, эл. почта: zabalueva_1991@mail.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-67

Высокая чувствительность и хорошее спектральное разрешение сделали поверхностно-усиленное комбинационное рассеяние (КР) света перспективным аналитическим инструментом для обнаружения веществ даже при чрезвычайно низких концентрациях на молекулярном уровне. Увеличение сигнала КР от анализируемого вещества достигается за счет выбора соответствующей подложки и длины волны возбуждения. Одно из перспективных направлений – модификация пористых мембран плазмонным металлом с последующей механической деформацией для дальнейшего использования в качестве усиливающих подложек [1]. Так как поры выступают в качестве локальных дефектов, при механической деформации будет образовываться большее количество нано- и микротрещин, чем на сплошных полимерных пленках.

Серебро наносилось на установке вакуумного напыления Saha на трековые мембраны (ТМ) с диаметром пор 30 нм и поверхностной плотностью пор $1,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Образцы с рабочей частью 5×40 мм вырубались на ручном вырубном прессе фирмы REY RAN. Одноосное растяжение образцов осуществлялось с помощью специальной минитестовой разрывной машины, позволяющей деформировать образцы с параллельным наблюдением их поверхности в поле зрения микроскопа Nikon LV100 (Japan) или с параллельным получением спектров ГКР. Толщина напыления изменялась в зависимости от времени напыления: 1, 2, 3, 4, 15 секунд. Спектры поглощения в видимом диапазоне измерялись на спектрофотометре Cary 5000 UV - Vis - NIR с длиной оптического пути 1 см.

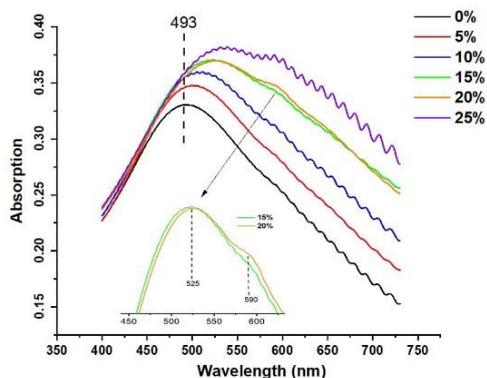


Рис. 1. Спектры поглощения металлизированных ТМ.

Образование нанотрещин на металлических поверхностях может значительно изменить их график поглощения света, т.к. нанотрещины могут выступать в качестве локальных усилителей электромагнитного поля, что может приводить к усилению поглощения света на металлической поверхности. Основная причина этого эффекта заключается в том, что наличие нанотрещин приводит к увеличению площади поверхности, доступной для взаимодействия со светом. Эти изменения могут быть отображены на графике поглощения света посеребренных ТМ с разной процентом деформации (рис. 1). В присутствии нанотрещин на металлической поверхности график поглощения света имеет дополнительный пик, которые соответствуют продольному плазмонному резонансу, который возникает при деформации от 15% и связан с появлениями вытянутых трещин.

Кроме того, при наличии достаточно больших трещин на поверхности, поверхность становится неоднородной, и различные участки поверхности начинают резонировать на разных длинах волн света, вызывая рассеяние и интерференцию света, что видно на графике. Исследовано влияние толщины напыления и степени растрескивания покрытия металлизированных серебром трековых мембран на их спектры комбинационного рассеяния и поглощения в видимой области.

Работа выполнена в рамках темы ГЗ МПГУ № АААА-А20-120061890084-9. Авторы являются членами ведущей научной школы РФ «Опико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Kovalets N. P., Kozhina E. P., et.al. // J Chem Phys. 2022. V. 156, № 3. P. 034902.

Исследования экситонного спектра и оптических мод в 2D монослоях и наноструктурах дихалькогенидов переходных металлов с использованием микро-спектроскопии фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света

Т.В. Шубина

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт Петербург, ул. Политехническая 26

DOI 10.34077/SCATTERING95-68

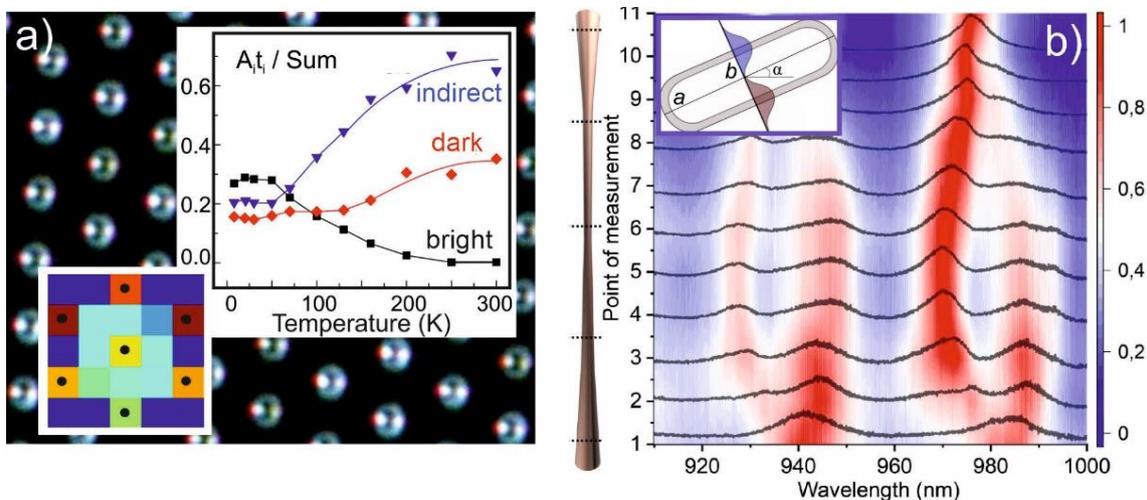
Двумерные (2D) дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), такие как MoS_2 и WSe_2 , обладают оптической шириной запрещенной зоны в видимом диапазоне и чрезвычайно высокой энергией связи экситонов (~ 0.5 эВ). Для создания новых типов приборов на их основе, в частности 2D излучателей одиночных фотонов, активно развивается инженерия деформаций и дефектов для локализации экситонов, как в квантовых точках. В докладе обсуждается влияние деформаций на спектр экситонных состояний в 2D слоях и на оптические моды в нанотрубках ДПМ.

Тонкая структура спектра экситонных состояний – последовательность и величина энергии расщепления между светлыми (разрешенными) и темными (запрещенными) экситонами – определяет эффективность излучения 2D наноструктур. Поскольку опубликованные данные отличаются большим разбросом, нами было высказано предположение, что они зависят не только от типа материала и количества монослоев, но и от деформации наноструктур [1]. Картирование спектров комбинационного рассеяния света с пространственным разрешением (μ -КР) позволило определить величину и характер деформации (сжатие, растяжение) в монослоях и бислоях MoS_2 при их нанесении на плоские и профилированные подложки. Для определения последовательности экситонных состояний использовались температурные зависимости характерных времен затухания компонент микро-фотолюминесценции (μ -ФЛ), которые увеличиваются с ростом температуры, если темный экситон находится наверху (Рис. а). Установлено, что в ненапряженном монослое светлый экситон является самым низким в серии А экситонов (1.9 эВ), причем энергия расщепления ~ 2 мэВ может возрастать в несколько раз при деформации сжатия. Напротив, для непрямых по импульсу экситонов в бислое (1.5 эВ) спин-запрещенное состояние является самым нижним.

Микро- и нанотрубки ДПМ сочетают в себе способность излучать сильную экситонную люминесценцию и функционировать как микрорезонаторы с модами шепчущей галереи, которые могут участвовать в формировании экситон-поляритонов [2,3]. Исследование методом μ -КР выявило, что слои в нанотрубках испытывают деформацию растяжения, которая может приводить к смене знака расщепления между темным и светлым экситонами. Сильная деформация приводит к уплощению поперечного сечения и его вращению вдоль оси нанотрубок. В спектрах μ -ФЛ, измеренных вдоль одиночных «дышащих» трубок MoS_2 с изменяемой формой сечения, обнаружено расщепление мод вследствие взаимодействия полей на противоположных сторонах сплюснутого сечения (Рис. б). Величина расщепления экспоненциально зависит от аспектного отношения a/b , тогда как относительная интенсивность мод в дублете определяется углом поворота сечения [4].

В заключение, сильное влияние деформации на спектр экситонных состояний и вид оптических мод необходимо принимать во внимание при реализации 2D и трубчатых приборов нанопотоники.

Исследование выполнено при частичной поддержке проектом РНФ № 23-12-00300.



1. Eliseyev et al. // PSS RRL, 2021, 2100263.
2. Shubina et al. // Annalen der Physik, 2019, 1800415.
3. Kazanov et al. // Nanomaterials, 2020, 10, 373.
4. Eliseyev et al., Advanced Optical Materials, DOI: 10.1002/adom.202202782 (2023).

КР-активный оптический фонon как *in situ* маркер сверхбыстрой динамики лазерно-генерированных электрон-дырочной плазмы, механических напряжений и высоких температур, а также онтогенетической неоднородности в алмазах

С.И. Кудряшов, П.А. Данилов, С.А. Остриков

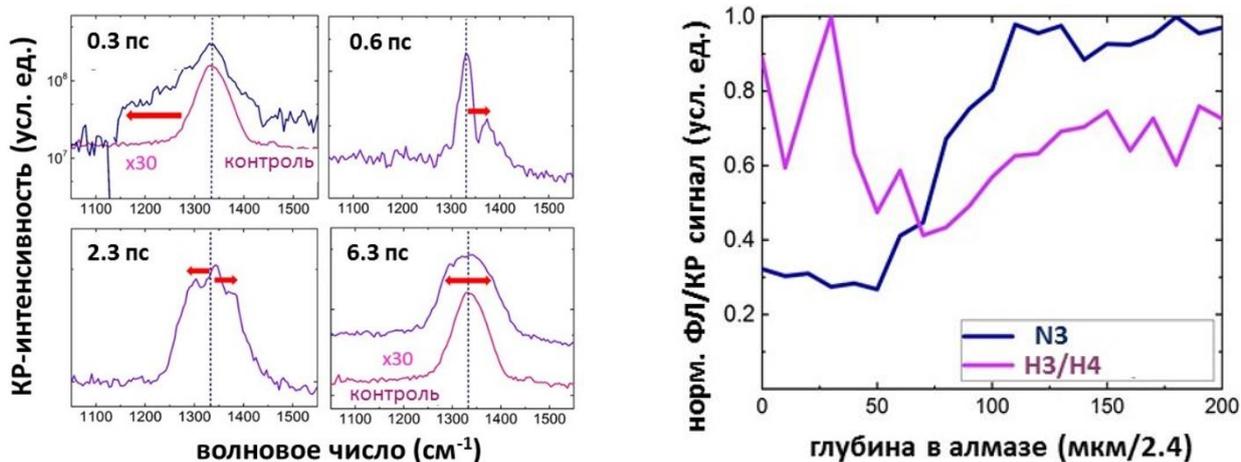
Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва,

119991, Ленинский проспект, 53

тел: +7 (499) 132-6083, факс: +7 (499) 132-6083, эл. почта: kudryashovsi@lebedev.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-69

При дофиламентационном возбуждении природного алмаза ультракороткими лазерными импульсами с длиной волны 515 нм, фиксированной интенсивностью и варьируемой длительностью 0.3-12 пс в спектре фотолуминесценции наблюдался сигнал спонтанного комбинационного рассеяния света (КРС) на частоте трехкратно вырожденного центрального оптического фона алмаза (левый рисунок). При длительностях импульса в диапазоне 0.6-1.3 пс наблюдалось неоднородное синее уширение линии, почти симметричное расщепление линии на три компоненты (2.3-6.3 пс) и, наконец, очень сильное однородное уширение всей линии (6.3-12 пс). Наблюдаемые впервые трансформации формы линии оптического фона связываются с субпикосекундной динамикой электрон-дырочной плазмы и (суб)пикосекундной динамикой локальных механических напряжений, индуцированных плазмой и неравновесными фонами [1,2].



Исследования сигналов КРС по глубине алмазов иллюстрирует их возможные структурные и механические повреждения. В отсутствие таких повреждений, сигнал КРС может использоваться для нормировки сигнала фотолуминесценции (ФЛ) в исследованиях пространственной неоднородности алмазов с учетом их онтогенеза методом 3Д-сканирующей конфокальной ФЛ/КРС спектроскопии [3]. Такая нормировка позволяет учесть конфокальный размер пробного объема, достигающего нескольких десятков микрометров в длину, и исследовать структурные особенности алмазов гораздо меньших масштабов (правый рисунок). В частности, на рисунке показаны пространственные распределения по глубине алмаза для выхода ФЛ примесных азотных оптических центров N3 и N3/N4, с их синей и зеленой фотолуминесценцией отвечающей различным онтогенетическим слоям формирования алмаза [3].

Исследования поддержаны Российским научным фондом (проект №21-79-30063).

Литература

1. С.И. Кудряшов и др. // Письма в ЖЭТФ, 2022. Т. 115. №. 5-6. С. 287-292.
2. S. Kudryashov et al. // Nanomaterials, 2023. V. 13. №. 1. P. 192-219.
3. Kudryashov S. et al. // Chemosensors, 2023. V. 11. №. 1. P. 24-34.

Нано-КРС графеном

Н.Н. Курусь¹, В.А. Калинин², Н.А. Небогатикова¹, И.В. Антонова^{1,2}, Е.Е. Родякина^{1,2},
А.Г. Милёхин¹, А.В. Латышев^{1,2}

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск,
630090, Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Пирогова, 1
тел.: +7 (383)316-60-54, эл. почта: kurus@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-70

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС), благодаря высокой чувствительности к особенностям структуры и химическому составу материалов, широко применяется для оценки кристаллического совершенства графена и графеноподобных материалов и качества устройств на их основе. При этом область, из которой собирается рассеянное излучение и, соответственно, получается информация о физических свойствах материала, ограничена дифракционным пределом на уровне сотен нанометров. Переход к исследованию оптических свойств отдельных нано-объектов становится возможен с применением метода комбинационного рассеяния света, усиленного металлизированным зондом атомно-силового микроскопа (нано-КРС, англ. tip-enhanced Raman scattering, TERS). Нано-КРС позволяет записывать пространственные карты распределения интенсивности колебательных спектров образца с шагом ~ 10 нм, усиливая оптический отклик в каждой точке до 10^{13} раз. При этом, число работ, посвященных исследованию плазмон-усиленного КРС графеном с нанометровым пространственным разрешением, весьма ограничено [1].

Данная работа посвящена исследованию нано-КРС в режиме щелевого плазмона (от. англ. «gap-mode plasmon») оптическими колебаниями пленки графена, расположенного на подложке в виде периодического массива золотых нанодисков. Спектр нано-КРС графена на золотом нанодиске несколько меняется по отношению к типичным спектрам КРС, проявляющим характерные колебательные моды D, G и 2D. Так, мода G, соответствующая колебаниям в плоскости слоя sp^2 -гибридизованных атомов углерода (E_{2g} симметрия) расщепляется на две моды G^+ и G^- , как показано на Рис.1. Характерное расщепление G моды составляет величину приблизительно 45 см^{-1} и указывает на возникновение механических напряжений растяжения графена, расположенного на золотом нанодиске, оцениваемых примерно в 0,8% [2]. Из спектров КРС графеном, представленных на Рис.1, видно, что наибольшее усиление наблюдается для G моды ($KU=100$). Меньшее усиление интенсивности мод D ($KU=13$) и G ($KU=16$) связано, по-видимому, с разными правилами отбора для мод разной симметрии в эксперименте по нано-КРС в режиме щелевого плазмона.

Таким образом, нано-КРС позволяет установить картину распределения локальных структурных дефектов и механических напряжений в графене.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проект № 20-52-04009).

Литература

1. N. N. Kurus et al. // The Journal of Physical Chemistry C, 2023, DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c07972
2. N. Ferralis // Journal of materials science, 2010, vol. 45, pp. 5135-5149.

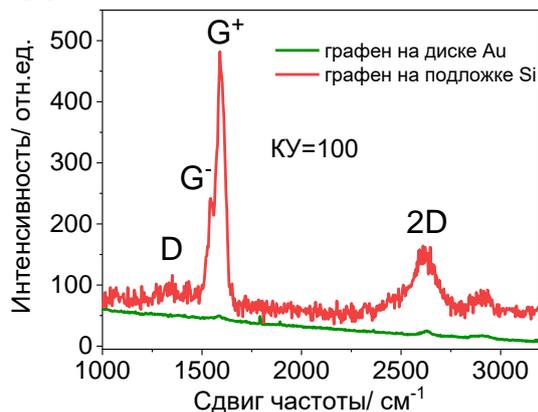


Рис.1 Характерные спектры нано-КРС графена, расположенного на нанодиске (красный) и на подложке Si (зеленый).

Наноструктуры кремниевых нанонитей, декорированных наночастицами благородных металлов, для диагностики антибиотикорезистентности бактерий методом гигантского комбинационного рассеяния

Д.А. Назаровская¹, О.Д. Гюппенен¹, П.А. Домнин^{2,3}, И.И. Циняйкин¹, С.А. Ермолаева³,
К.А. Гончар¹, Л.А. Осминкина¹

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва,
119991, Ленинские горы, 1-2

² МГУ им. М.В. Ломоносова, биологический факультет

³ Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии им. Н. Ф. Гамалеи,
Москва, 123098, ул. Гамалеи, 18

тел: +7 (996) 763-4975, эл. почта: nazarovskaia.da22@physics.msu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-71

Метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) основан на явлении неупругого рассеяния на молекулах вещества, тем самым предоставляя уникальную информацию об исследуемом (био)объекте. Усовершенствованным вариантом (вследствие эффекта локализованного поверхностного плазмонного резонанса) является спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР), широко применяемая как в фундаментальных, так и прикладных областях, в том числе в разработке биосенсоров [1].

Для создания ГКР-активных подложек для будущих биосенсоров интересно углубиться в исследовании уже зарекомендовавшего себя нанокompозита – кремниевые нанонити, декорированные наночастицами серебро-золото (AgAuКНН) [2]. За счет наночастиц благородных металлов такие наноструктуры обладают высоким коэффициентом усиления сигнала КР от адсорбируемых на их поверхности химических и биомолекул.

Listeria monocytogenes (*L. monocytogenes*) является патогенной бактерией и внутриклеточным паразитом [3]. Трудности выявления этих бактерий обусловлены широким распространением листерий в окружающей среде и их толерантностью к низким температурам (0°C). С помощью спектроскопии ГКР были предприняты попытки для обнаружения *L. monocytogenes*, но возникла проблема предела концентрации для адекватного детектирования [4], стабильности подложек [5].

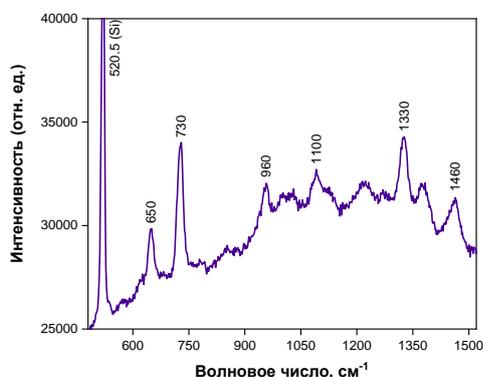


Рис. 1. Спектр КР бактерий *Listeria innocua*.

Данная работа посвящена разработке способа получения композитных наноструктур AgAuКНН для детектирования *L. monocytogenes* методом ГКР. Показано, что бактерии можно обнаружить вплоть до концентраций 10⁶ кое/мл. Разработанные сенсорные системы применялись для оценки антибиотикочувствительности бактерий (гентамицин). Наблюдалось исчезновение ГКР-сигнала от бактерий в течение 1-24 часов их инкубации с антибиотиком. Полученные результаты открывают практический потенциал полученных композитных наноструктур AgAuКНН для диагностики патогенных микроорганизмов методом спектроскопии ГКР.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10062.

Литература.

1. J. Law, et al. // *Front Microbiol*, 2013, V. 5, P. 770.
2. O. Žukovskaja, et al. // *Talanta*, 2019, V. 202, P. 171-177.
3. N. A. Mungroo, et al. // *Microchim. Acta*, 2015, V. 183, P. 697–707.
4. S. Uusitalo, et al. // *RSC Adv.*, 2016, V. 6, P. 62981-62989.
5. T.-T. Liu, et al. // *PLoS ONE*, 2009, V. 4 (5), P. e5470

Усиление сигнала комбинационного рассеяния света при возбуждении резонансов в решётке из дисков германия субволнового размера

А.А. Шкляев^{1,2}, Д.Е. Уткин^{1,2}, В.А. Володин^{1,2}, А.В. Царёв^{1,2}

¹ Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск 630090, пр. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск 630090, ул. Пирогова, 2
тел: +7 (913) 001-0085, эл. почта: shklyaev@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-72

Принципиальным преимуществом покрытий из массивов диэлектрических частиц субволнового размера является их способность изменять направление распространений падающего электромагнитного (ЭМ) излучения, а также усиливать ЭМ поле в локальных областях. Это происходит в результате возбуждения в частицах магнитных и электрических резонансов, интерференция полей которых с падающим ЭМ излучением может приводить к подавлению как отражённого излучения, так и излучения проходящего сквозь подложку. Посредством картирования поверхности кремния, покрытой частицами SiGe, ранее было показано, что значительное усиление сигнала комбинационного рассеяния (КР) света кремния происходит от участков кремния, расположенных под частицами SiGe, несмотря на экранирование этих участков самими частицами [1,2]. Это свидетельствует о локальном усилении ЭМ поля. В данной работе нами измеряются спектры отражения и КР от покрытий, состоящих из частиц Ge в форме дисков, расположенных в виде квадратной решётки на подложке из кремния (Рис. 1).

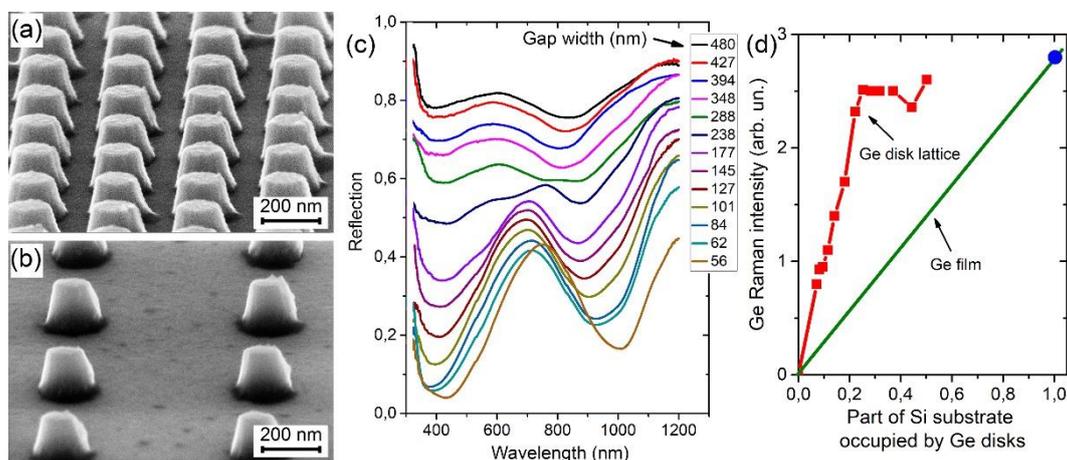


Рис. 1. (a,b) СЭМ-изображения дисков Ge диаметром ~ 200 нм и высотой ~ 136 нм с разными расстояниями между центрами дисков (a) 300 и (b) 700 нм. (c) Спектры отражения покрытий из дисков Ge высотой 120 нм для разных величин зазора между дисками приведены на рисунке для каждого спектра. (d) Зависимость интенсивности пика КР Ge от доли поверхности, покрытой дисками германия. Прямая линия соответствует покрытию части поверхности сплошной плёнкой Ge такой же толщины, как высота дисков.

При уменьшении величины зазора между диэлектрическими частицами в спектрах отражения (кроме минимума в области 900-1000 нм, обусловленного возбуждением магнитных и электрических дипольных резонансов) появляется минимум в коротковолновой области спектра (~ 400 нм), который связан с возрастанием влияния магнитного квадрупольного резонанса [3,4]. Спектры КР были измерены при использовании Ag^+ лазера с длиной волны 514,5 нм, которая не совпадала с положением минимума отражения в коротковолновой области спектра. Тем не менее, наблюдалось увеличение интенсивности пика КР по сравнению с его величиной от покрытия такой же части поверхности подложки, но сплошной плёнкой Ge. Модельные расчёты показали, что это обусловлено тем, что резонансное электрическое поле преимущественно располагается снаружи диэлектрических частиц.

Литература

1. V. Poborchii *et al.* // Appl. Phys. Expr. 2017. V.10. 125501
2. V. Poborchii, *et al.* // J. Appl. Phys. 2019. V.126. 123102
3. A.A. Shklyaev, *et al.* // Sci. Rep. 2022. Iss.12. 8123
4. A.A. Shklyaev, *et al.* // Thin Solid Films. 2023. V.768. 139720

Иерархические поверхностные периодические структуры и фазовые трансформации в пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников, индуцированные фемтосекундными лазерными импульсами

Д.В. Шулейко¹, С.В. Заботнов¹, П.А. Данилов^{1,2}, Е.В. Кузьмин^{1,2}, Т.С. Кункель^{1,3}, П.К. Кашкаров¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы, д.1, стр. 2, Москва, 119991

² Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект, д.53, Москва, 119991

³ Московский физико-технический институт, Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, 141701
тел.: +7 (495) 939-1875, эл. почта: shuleyko.dmitriy@physics.msu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-73

Индукцированные фемтосекундным лазерным воздействием поверхностные периодические структуры (ППС) на пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) представляют интерес для исследований, в связи с наличием в них оптической и электрофизической анизотропии, обусловленной как модуляцией поверхностного рельефа, так и фазовыми трансформациями [1,2]. При этом обратимость подобных изменений позволяет осуществлять, например, запись и перезапись информации, либо управление оптическими свойствами в структурах на основе ХСП с помощью импульсного лазерного воздействия. К настоящему времени лазерно-индуцированные фазовые трансформации и рельеф хорошо изучены для пленок GST225 (Ge₂Sb₂Te₅) [3], однако с точки зрения оптики ближнего и среднего инфракрасного диапазона более перспективными материалами представляются сульфид мышьяка (As₂S₃) и селенид мышьяка (As₂Se₃, As₅₀Se₅₀) [2].

В данной работе тонкие пленки из указанных выше ХСП (As₂S₃, 576±5 нм; As₂Se₃, 842±5 нм; As₅₀Se₅₀, 534±5 нм) на подложках из монокристаллического кремния с подслоем хрома (100 нм) или на кварцевых стеклах были облучены фемтосекундными лазерными импульсами на частоте второй оптической гармоники с помощью лазерной системы Satsuma, Amplitude Systems (515 нм, 300 фс, энергия и число импульсов $E = 0.1\text{--}0.4$ мкДж, $N = 10\text{--}1200$) при нормальном падении.

В результате облучения, на поверхности пленок были сформированы ППС в виде одномерных решеток с волновыми (~515 нм) и субволновыми (150–185 нм) периодами, ориентированные, соответственно, ортогонально или вдоль вектора поляризации. Тип формируемых ППС меняется в зависимости от числа и энергии импульсов, а модуляция глубины рельефа достигает 115 нм. Значения периодов и ориентация ППС согласуются с результатами численного моделирования в рамках плазмон-поляритонного механизма формирования данных структур. С увеличением числа лазерных импульсов или их энергии наблюдается эволюция от субволновых ППС к решеткам с волновым периодом, при этом структуры обоих типов могут наблюдаться одновременно в пределах одного кратера, сформированного фемтосекундным лазерным воздействием, в виде иерархической структуры из двух ортогональных решеток различного периода (рис. 1).

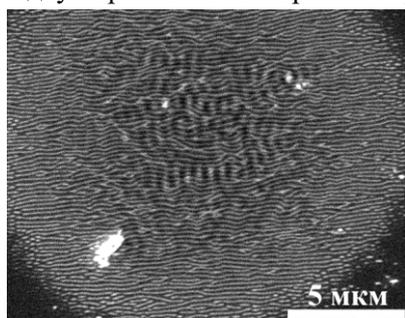


Рис. 1. Иерархическая структура на поверхности пленки As₂Se₃. $E = 0,1$ мкДж, $N = 1200$, поляризация излучения горизонтальна.

Анализ спектров комбинационного рассеяния света (КРС, Horiba HR800) при возбуждении излучением с длиной волны 488 нм в пленках As₂Se₃ показал сдвиг максимума полосы КРС, расположенной в диапазоне 200–300 см⁻¹, от 220 к 265 см⁻¹, что может быть связано с фазовыми переходами в данном материале, индуцированными фемтосекундным лазерным излучением. В то же время, в пленках As₂S₃ по данным КРС фотоиндуцированных фазовых трансформаций не зарегистрировано.

Полученные лазерно-индуцированные структуры на поверхности пленок ХСП, обладающие анизотропией формы за счет поверхностного рельефа, могут быть использованы для создания поляризационно-чувствительных элементов оптики инфракрасного диапазона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00035).

Литература

1. A. Kolchin, et al. // Materials. 2022. V.15, art.3499.
2. W. Ma, et al. // Optics Express. 2019. V.27, P.30090–30101.
3. Zaboltnov, et al. // Micro. 2022. V.2, P.88–99.

КР-спектральное исследование сильных водородных связей

Б.А. Колесов

Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, 630090,

пр. Лаверентьева, 3

тел: +7 (343) 330-8957, факс: +7 (343) 330-9489, эл. почта: kolesov@niic.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-74

В работе рассматриваются необходимые условия возникновения и регистрации в колебательных спектрах сильных О-Н...О водородных связей. Излагаются химические и физические аспекты их образования. Подробно обсуждаются КР-спектры соединений с пограничной, сильной и предельно сильной водородной связью. Рассматриваются вопросы динамики протона, зависимость его потенциальной энергии от смещения вдоль Н-связи, зависимость частоты, полуширины и интенсивности полосы колебания от длины Н-связи. Приводятся экспериментальные примеры проявления в КР-спектрах колебаний пограничной (бензойная кислота), сильной (глицин фосфат) и предельно сильной (диметилформамид) Н-связи. Приводится краткая характеристика колебаний N-Н...О и С-Н...У водородных связей, а также таутомерных О-Н...О связей.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света и фотолюминесцентная микроскопия для изучения взаимодействия наноконтейнеров на основе пористого кремния с живыми клетками

Л.А. Осминкина^{1,2}

¹ Физический факультет Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия

² Институт биологического приборостроения РАН, Московская область, 142290 Пущино, Россия
тел: +7 (495) 939-48-37, эл. почта: osminkina@physics.msu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-75

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) в настоящее время стала мощным и хорошо подходящим неинвазивным и неразрушающим инструментом в биоаналитике. Метод КР основан на обнаружении молекулярных колебаний или вибрационных мод в твёрдых телах, которые активируются лазерным излучением. По сути, спектры КР являются химическими отпечатками веществ и молекул, и позволяют проводить их диагностику, в том числе и при взаимодействии с живыми клетками.

В представленном цикле работ с использованием методов спектроскопии КР и фотолюминесцентной (ФЛ) микроскопии исследовалось взаимодействие наноконтейнеров на основе наночастиц пористого кремния (пКНЧ), загруженных различными противораковыми препаратами, с живыми клетками. Выбор пКНЧ в качестве наноконтейнеров для доставки лекарств связан с их доказанными уникальными свойствами, такими как биосовместимость, биodeградируемость, высокая эффективность загрузки для доставки препаратов, перестраиваемые размеры пор, и возможность химической функционализации поверхности наночастиц для осуществления направленной доставки [1-4].

Показано, что пКНЧ состоят из мелких нанокристаллов кремния (нк-Si) и пор. ФЛ свойства пКНЧ обусловлены квантово-размерными эффектами (КРЭ), возникающими в нк-Si с размерами 2-6 нм. Уменьшение размеров нк-Si сопровождается сдвигом максимума их ФЛ с коротковолновую область спектра. При этом также наблюдается низкочастотный сдвиг максимума КР [1,2].

Наличие ФЛ свойств наночастиц позволяет их использовать для диагностики клеток. Вместе с тем, микроспектроскопия КР предоставляет возможность не только обнаружить поглощение и распределение пКНЧ, локализацию доставляемых ими препаратов (сунитиниб, доксорубин), но и детально исследовать процессы биodeградации наночастиц непосредственно внутри живых клеток [3,4].

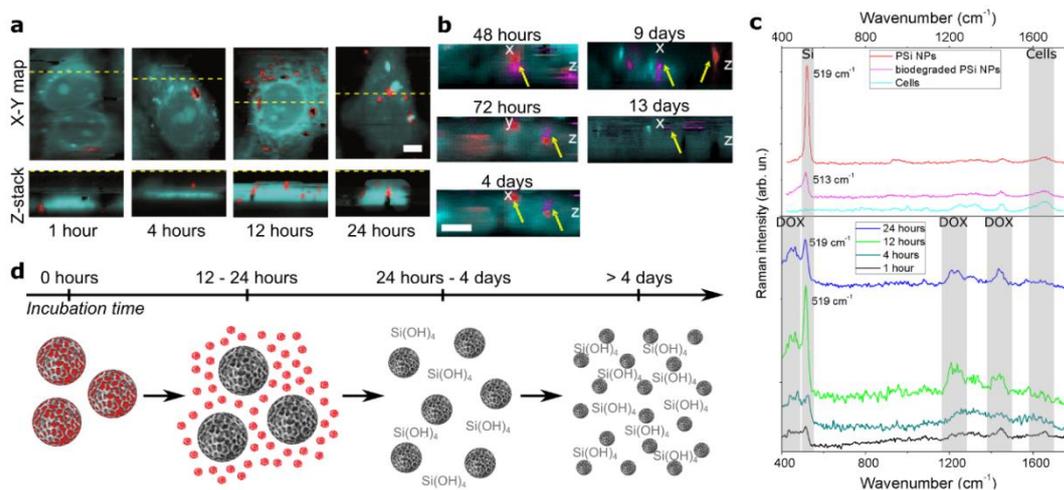


Рис.1. Изучение доставки доксорубина и биodeградации наночастиц внутри раковых клеток методом КР [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10062, <https://rscf.ru/project/22-72-10062/>.

Литература

1. Gongalsky M. B. et al. //Semiconductors. 2021. Т. 55. С. 61-65.
2. Gongalsky M. B. et al. //Faraday Discussions. 2020. Т. 222. С. 318-331.
3. Maximchik P. V. et al. //ACS Biomater Sci & Eng. 2019. Т. 5. №. 11. С. 6063-6071.
4. Tolstik E. et al. //Frontiers in Pharmacology. 2022. Т. 13: 962763.

Частоты ОН-колебаний в кристалле KN_2PO_4 и их зависимость от давления из первопринципных расчётов

В.А. Абалмасов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск,

630090, пр. Академика Коптюга, 1

тел: +7 (383) 330-9048, факс: +7 (383) 330-8878, эл. почта: abalmasov@iae.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-76

KN_2PO_4 (KDP) – сегнетоэлектрик, типичный представитель кристаллов с сильной водородной связью, имеющий важное технологическое значение в приложениях нелинейной оптики. Несмотря на обилие экспериментальной и теоретической литературы, до сих пор нет однозначного объяснения фонованого спектра кристалла в области частот ОН-колебаний вдоль водородной связи (Рис. 1), где методами инфракрасной спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) [1] и неупругого рассеяния нейтронов (НРН) зафиксированы три широких пика на частотах около 1800, 2400 и 2700 см^{-1} . Как правило, появление подобной структуры в спектре KDP связывают с Ферми резонансом ОН-колебаний вдоль водородной связи с обертонами ОН-колебаний поперёк связи, но детальное физическое описание на сегодняшний день отсутствует.

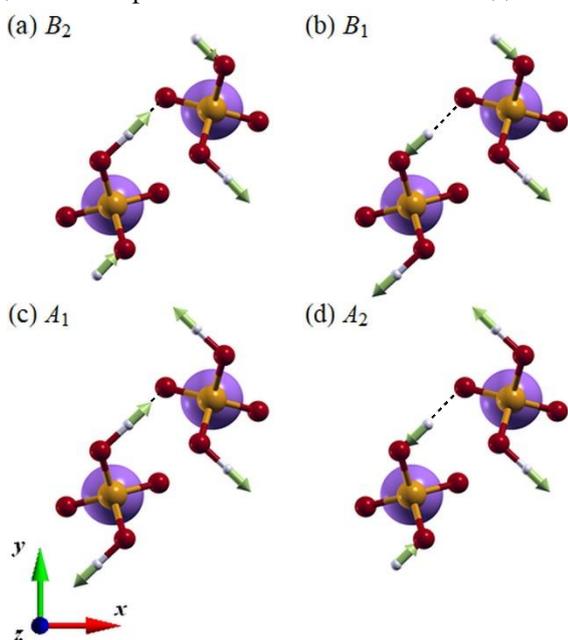


Рис.1. Моды ОН-колебаний вдоль водородной связи в кристалле KDP с соответствующими неприводимыми представлениями

центра водородной связи и не двухъямным. Частота ОН-колебаний вдоль водородной связи симметрии A_1 оказывается в диапазоне 1800 см^{-1} и также смягчается при наложении внешнего давления. Данное обстоятельство может позволить отделить линии в спектре, соответствующие ОН-колебаниям вдоль водородной связи, от обертонов гармонических ОН-колебаний поперёк связи, частоты которых увеличиваются с давлением.

В то же время предварительные данные НРН не указывают на наличие подобного смягчения в области высоких частот в кристалле KDP при давлениях до 2.5 ГПа [3]. Мы полагаем, что экспериментальные данные КРС могли бы внести дополнительную ясность по данному вопросу.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №23-22-00320.

Литература

1. В.А. Абалмасов, Н.В. Суровцев. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018, Т. 82, вып. 3. С. 338–343.
2. P. Giannozzi *et al.* // J. Phys.: Condens.Matter. 2009. Vol. 21, P. 395502.
3. А.С. Иванов, А.В. Белушкин. // частное сообщение.

Нелинейно-оптическая спектроскопия КР: вращение орто-пара спиновых изомеров H_2O в воде и их конверсия

С.М. Першин, А.Ф. Бункин

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Вавилова 38

+7 (499) 503 88-58, pershin@kapella.gpi.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-77

В 1972 г. пионерская работа С.А. Ахманова с сотр. [1] открыла новую эру нелинейно-оптической спектроскопии: активной спектроскопии комбинационного рассеяния (АСКР или CARS), основы которой были продемонстрированы ранее [2]. Позднее выявленные преимущества CARS [1] перед спектроскопией комбинационного рассеяния (КР): бигармоническая накачка фазует колебания молекул и обеспечивает выигрыш сигнала пропорционально квадрату числа молекул - были подтверждены и в США [3]. Успехи CARS были суммированы в монографии [4], ряде обзоров и современных работах с уникальными результатами [5]. Модификация CARS, проведённая А.Ф. Бункиным [6], для изучения ТГц-ТГц движений в конденсированных средах непрозрачных в этой области спектра позволила получить прорывные результаты. Так впервые, насколько нам известно, мы с помощью CARS открыли вращения спиновых изомеров H_2O в воде как в газе без смещения частоты вращательных резонансов [6]: орто- H_2O (с магнитным моментом) и пара- H_2O (не магнит). На Рис.1 показаны линии орто- и пара- H_2O в воде (круги) и водном растворе (квадраты) белка α -химотрипсина ($C=10$ мг/мл). Отметим отсутствие линии 79.8 см $^{-1}$ пара-изомеров H_2O в растворе белка. Эти изомеры, по-нашему мнению [7], вовлечены в формирование льдоподобных каркасов гидратных оболочек белка. Открытие [6] магнитных орто-изомеров H_2O в воде позволило обосновать взаимодействие воды с постоянным (3-6 Тл) магнитным полем и снижение вязкости на 150 минут [8]. Впервые мы измерили [9] неравновесное орто/пара отношение (1:1, как при температуре 30 К) вместо ожидаемого равновесного 3:1 в воде, а также обогащение воды орто- H_2O до 15-17 % при кавитации [9]. Заметим, что в обогащенной орто-изомерами воде кристалл почечного камня оксалата кальция растворяется [10], тогда как в дистиллированной воде – нет. На Рис.2, справа, показан кристалл оксалата кальция через 120 минут пребывания в воде с обогащением на 15 % изомерами орто- H_2O . Обнаруженные новые свойства воды (неравновесность, снижение вязкости и растворение кристалла оксалата кальция) обсуждаются как проявление постоянного вращения орто-изомеров H_2O , у которых нет нулевого вращательного уровня. Этот уровень «появляется» при спин-конверсии в пара-изомер H_2O .

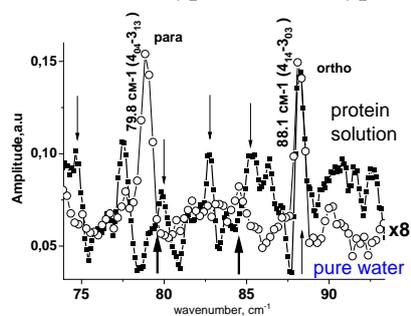


Рис.1. Спектр водного раствора.

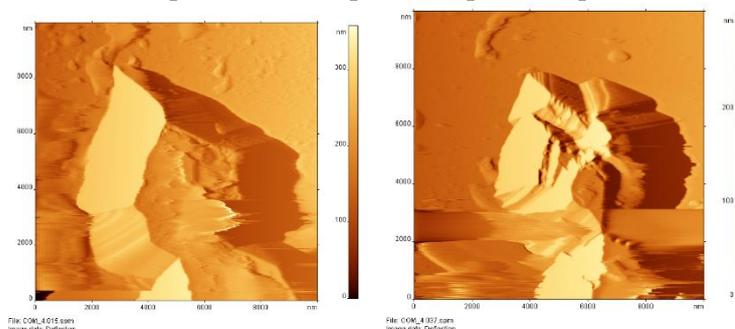


Рис.2. Кристалл оксалата кальция (120 минут, справа)

Работа выполнена при финансовой поддержке грантом РНФ № 23-42-10019.

Литература

1. С.А. Ахманов, В.Г. Дмитриев и др. // Письма в ЖЭТФ. 20 мая 1972г. Т. 15. №10. С. 425-428.
2. P.D. Maker and R.W. Terhune. // Physical Review. 1965. V. 137. P. A801-A818.
3. E. Yablonovich., N. Bloembergen et al. // Phys. Rev. Lett. 25 сентября 1972. V. 29. P. 865-868.
4. С.А. Ахманов, Н.И. Коротеев. // Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света, Москва: «Наука». 1981. 543 с.
5. S.M. Pershin, A.I. Vodchits et al. // Opt. Lett. 2020. V. 45. #19. P. 5624-5627.
6. A.F. Bunkin, S.M. Pershin, and A.A. Nurmatov. // Laser Physics Lett. 2006. V. 3. #6. P. 275-277.
7. С.М. Першин, А.Ф. Бункин, В.Л. Голо. // ЖЭТФ. 2012. Т. 142. №6. С. 1151-1154.
8. S. M. Pershin, A.F. Bunkin. // Laser Physics. 2009. V. 19. #7. P. 1410-1414.
9. I. Otsuka and S. Ozeki. // Phys. Chemistry B. 2006. V. 110. P. 1509-1512.
10. N.V. Gvozdev, L.N. Rashkovich et al. // Journal of Crystal Growth. 2004. V. 261. P. 539-548.

Комбинационное рассеяние света на межмолекулярных колебаниях воды в воде и в слабых водных растворах и свойства спектральных параметров этих полос в частотных координатах

А.В. Крайский

Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН, Москва,

119991 г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

тел.: +7 (968) 485-0386, эл. почта: kraiski@sci.lebedev.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-78

Исследования межмолекулярных колебаний (ММК) важны для изучения свойств межмолекулярных связей и структурных особенностей жидкостей. В работе [1] была высказана мысль о возможности изучения ММК с помощью комбинационного рассеяния (КР). Вскоре появился обзор работ на эту тему [2]. Особенно бурно такие исследования ММК развивались в последней трети прошлого века – начале настоящего. В докладе изложены основные результаты, полученные в цикле работ [3-8]. Работы основаны на результатах исследований и методиках обработки результатов, разработанных ранее научным сообществом, и на основе нового подхода к представлению спектральных параметров, характеризующих динамические свойства воды и водных растворов. Предметом исследований была вода, слабые водные растворы медицинской перекиси водорода (ПВ) и 0.9% раствор хлорида натрия (ХН). Спектры расположены в области $4 - 320 \text{ см}^{-1}$. Из оптического спектра вычислялся редуцированный спектр характеристики среды – динамической восприимчивости (ДВ). Этот спектр имеет вид двух широких полос с максимумами около 46 см^{-1} (низкая частота (НЧ)) и около 170 см^{-1} (высокая частота (ВЧ)). Эти полосы обычно аппроксимируют лоренцианами с тремя параметрами каждый, из них 2 - частотных. Для лучшего согласования с экспериментом во всем указанном диапазоне частот требуются добавочные компоненты аппроксимирующей функции. Исходя из известных представлений о свойствах воды, мы использовали два дополнительных слагаемых с тремя параметрами, что значительно увеличило спектральный диапазон хорошего согласования с экспериментом до указанных выше пределов [3]. Это позволило при традиционном подходе в работе с концентрационными зависимостями всех параметров получить размер искажений сетки связей воды возле молекулы ПВ. Было обнаружено, что все спектральные параметры сильно флуктуируют, но частотные параметры каждой полосы флуктуируют коррелированно. Это легло в основу нового подхода к рассмотрению распределению точек: представлению частотных параметров полосы в координатах квадрат ширины – квадрат частоты положения максимума (спектральные или частотные координаты). В этих координатах точки спектров КР ПВ с концентрацией 3%-0.33% легли вблизи аппроксимирующей их прямой линии, что было объяснено на основе представлений о свойствах свободных колебаний классического затухающего осциллятора. Из свойств этой прямой были получены значения собственных частот (СЧ) осцилляторов, совпавшие с частотами поглощения воды, величины неоднородного уширения полосы, значения однородной ширины колебаний и времена затухания колебаний. В частотных координатах распределения точек при достаточном их количестве (17 - 65) занимают обширную область и распределены неоднородно, многие из них группируются в линейно расположенные группы, каждая со своей СЧ. При этом было высказано предположение, что спектральные точки с одинаковыми ширинами, но с более высокими частотами соответствуют состояниям с большим средним числом связей на 1 молекулу воды. При этом для ВЧ в ПВ даже с концентрациями 0.023% число связей заметно понижается. Для ХН это понижение существенно большее. Были получены все собственные частоты воды растворов в широком диапазоне частот от 207 см^{-1} до 169 см^{-1} , что сопоставимо со спектром КР льда [8], где полоса с вершиной от 206 см^{-1} до 210 см^{-1} на склоне имеет более слабые пики 200 см^{-1} и 194 см^{-1} .

Литература

1. Г.С.Ландсберг. // Успехи химии, 1932 т.1, с.491.
2. М. В.Волькенштейн. // УФН, 1937, т.18 (2), с.153–202.
3. А.В.Крайский, Н.Н.Мельник. // Кр. сообщ. по физике ФИАН, 2005, №12, с.26-33.
4. А.В. Крайский, Н.Н. Мельник. // Биофизика, 2012, т.57, №6, с.965–972.
5. А.В. Крайский, Н.Н. Мельник. // Оптика и спектроскопия, 2018, т.124, №5.
6. А.В. Крайский и др. // Оптика и спектроскопия, 2020, т.128, №2, с.195-203.
7. А.В. Крайский, Н.Н. Мельник и др. // Опт. и спектроск., 2022, т.130, №10, с.1506-1511.
8. А.В.Крайский, Н.Н. Мельник. // В сб. «Комбинационное рассеяние - 80 лет исследований: Коллективная монография» (Ред.В.С.Горелик, Москва: ФИАН, 2008) с.339-351.

Индикаторы упорядоченности липидного бислоя в области валентных CH_2 колебаний спектров КРС

Ю.В. Зайцева¹, Н.В. Суровцев¹

¹ Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск,

630090, пр. академика Коптюга, 1

Тел. +73833307978, эл. почта: julmari3@mail.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-79

Важной частью любой животной клетки является ее мембрана, образованная липидным бислоем. В основном липидный бислой в клеточной мембране находится в разупорядоченном (флюидном) состоянии. Однако могут образовываться небольшие функциональные участки, образованные более упорядоченной фазой - липидные рафты. Для понимания механизма образования липидных рафтов и исследования их структуры необходимо развитие методов, позволяющих характеризовать упорядоченность липидного бислоя. Одним из таких методов является спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС). Многие пики в спектрах КРС фосфолипидов проявляют чувствительность к упорядоченности липидных молекул. Например, пики валентных С-С колебаний в области $1000-1150\text{ см}^{-1}$, пик CH_2 twist колебаний на частоте $\sim 1300\text{ см}^{-1}$ и др. Анализ поведения этих пиков позволяет определять конформационный порядок ацильных цепей липидов бислоях [1]. Кроме того, большой интерес представляют пики симметричных и антисимметричных CH_2 колебаний на частотах 2850 см^{-1} и 2880 см^{-1} . Спектр в этом диапазоне проявляет чувствительность не только к конформационному порядку хвостов фосфолипидов, но и к межмолекулярным взаимодействиям.

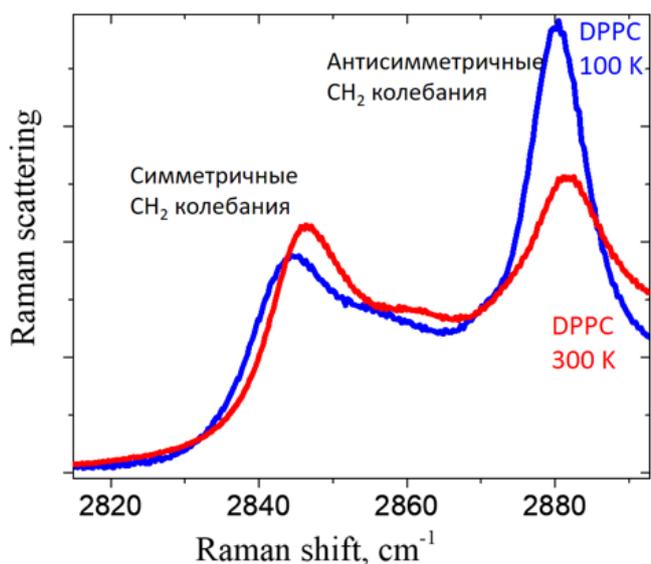


Рис. 1. Спектры КРС многослойных везикул DPPC на температурах 100 К и 320 К.

В данной работе проведено исследование спектров КРС многослойных везикул липида DPPC в температурном диапазоне 100-320 К. Показано, что с температурой меняется не только интенсивность пика антисимметричных CH_2 колебаний, как принято считать, но и интенсивность пика симметричных CH_2 колебаний. Исследование смесей DPPC с его дейтерированным аналогом показало, что пик антисимметричных колебаний характеризует преимущественно конформационный порядок, а пик на частоте 2850 см^{-1} проявляет чувствительность к межмолекулярным взаимодействиям. Также было проведено исследование плоских липидных бислоев в различных поляризованных условиях, чтобы разделить вклады в рассеяние от симметричных и антисимметричных CH_2 колебаний и проанализировать их температурные изменения независимо.

Литература

1. Y. V. Zaytseva, I. V. Zaytseva, N. V. Surovtsev Conformational state diagram of DOPC/DPPC/cholesterol mixtures, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 1864 (4) (2022) 183869.

Исследование криоконсервации преимплантационных эмбрионов млекопитающих методом спектроскопии комбинационного рассеяния света с использованием дейтерированных меток

К.А. Окотруб¹, А.Н. Омельченко^{1,2}, Т.Н. Игонина³, Е.Ю. Брусенцев^{1,3}, С.Я. Амстиславский^{1,3},
Н.В. Суровцев¹

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск,
630090, пр-кт Академика Коптюга, 1

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

³Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск, 630090, пр-кт Академика Лаврентьева, 10
тел: +7 (383) 330-79-69, эл. почта: okotrub@iae.nsk.su

DOI 10.34077/SCATTERING95-80

Соединения меченые стабильными изотопами, в частности дейтерием, используется в биологии для изучения обмена веществ и при изучении цепочек реакций клеточного метаболизма. Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) является перспективный методом, позволяющим отслеживать накопление клетками меченых соединений, их распределение, отслеживать их химические трансформации. По сравнению с другими методами как масс-спектрометрия и ЯМР, КРС имеет такие сильные стороны как возможность проведения неразрушающих измерений и обладает высоким пространственным разрешением. Это делает КРС подходящим для проведения исследования одиночных клеток и эмбрионов ранних стадий.

Данная работа посвящена исследованию криоконсервации и её влияния на метаболизм в преимплантационных эмбрионах мыши методом спектроскопии КРС дейтерированных соединений. Эксперименты проводились на эмбрионах домашней кошки полученных с помощью экстракорпорального оплодотворения (ЭКО) и эмбрионах мыши, полученных в виварии ИЦиГ СО РАН. Была исследована возможность культивирования эмбрионов мыши в присутствии тяжелой воды, дейтерированных жирных кислот (стеариновой кислоты), глюкозы и аминокислот: лейцина и фенилаланина. Показано что в растворе с 20 % тяжелой воды развитие эмбрионов прекращается. Также к снижению скорости развития эмбрионов приводит добавление в культуральные среды дейтерированных аминокислот.

Показано, что при замораживании эмбрионов происходит перераспределение жирных липидов внутри липидных гранул [1]. Липиды с насыщенными углеводородными цепочками кристаллизуются на периферии, в то время как липиды с ненасыщенными углеводородными цепочками локализуются в центральной части липидных гранул. Было проведено сравнение накопления дейтерированных соединений в эмбрионах, культивируемых после криоконсервации по методам программного замораживания и витрификации. В результате было обнаружено что эмбрионы после криоконсервации демонстрируют более активное накопление стеариновой кислоты в первые сутки после криоконсервации по сравнению с контрольной группой [2]. При этом во вторые сутки различия в накоплении не наблюдаются. Также нами было выявлено отсутствие значимых различий между экспериментальными группами в их способности к накоплению дейтерированных глюкозы и аминокислот. Из спектров КРС следует что дейтерированная глюкоза преимущественно усваиваются в виде гликогена или рибозы, предположительно в составе нуклеиновых кислот и аденозинтрифосфата (АТФ). Аминокислоты встраиваются в новосинтезируемые белки без химических трансформаций.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность применения спектроскопии КРС дейтерированных клеток для преимплантационных эмбрионов. На эмбрионах домашней кошки показано что замораживание приводит к перераспределению липидов в липидных гранулах. На эмбрионах мыши показано что в первые сутки после отогрева наблюдаются отклонения в липидном метаболизме.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 21-74-10108).

Литература

1. К.А. Okotrub, S.V. Okotrub, V.I. Mokrousova, S.Y. Amstislavsky, N.V. Surovtsev. Biophysical Journal 2021 V.120 P.5619-5630
2. А.Н. Omelchenko, Т.Н. Igonina, Е.Yu. Brusentsev, К.А. Okotrub, S.Ya. Amstislavsky, N.V. Surovtsev. Cryobiology 2022 V.109 P.44-52

Light scattering for physical characterization of samples cryopreserved by quench cooling

K. Rolle

IA&E SB RAS, Academician Koptyug Avenue, 1, Novosibirsk, Novosibirsk region, Russia, 630090

Tel.: +7 (383) 330-79-69, 339-93-58. Fax: +7 (383) 330-88-78, e-mail: krolle@iae.nsk.su

DOI 10.34077/SCATTERING95-81

Cryopreservation protocols for biological samples are frequently optimized using Raman confocal microscopy, which permits characterizing chemical variables of interest (e.g. cryoprotectant distribution, simple and eutectic crystallization etc.). Less well explored however are light scattering experiments that probe physical variables relevant to cryobiology. E.g. thermal gradients during cooling can induce strain which leads to sample cracking, but pressure can also have beneficial effects, as the melting point of ice reaches a minimum around 210 [MPa]. This circumstance forms the basis of high pressure freezing (HPF) in electron microscopy, but less well-known is self-pressurized rapid freezing (SPRF) where pressure is generated by ice forming under isochoric conditions inside sealed capillaries. The compact size of the latter, required to achieve high quench rates, has made direct pressure verification difficult. By embedding a fiber optic probe inside capillaries, we show how Raman spectroscopy can address this issue, enabled by the large pressure sensitivity of the O-H mode of hexagonal ice [1]. Looking beyond Raman scattering, Brillouin spectroscopy is a related light scattering technique that offers access to the glass transition temperature (T_g). Vitrification by either dehydration or quench cooling forms the basis of most cryopreservation protocols, but Brillouin T_g measurements in the latter regime were traditionally not thought to be within the capabilities of the instrument. We show how T_g after quench-cooling can be probed by a time-resolved 'flash' Brillouin spectroscopy (FBS) measurement [2], where a focused infrared laser pulse is used to heat a minimal volume of the sample (and thereby, achieve high cooling rates). In practical terms, a convenient proxy for T_g inside flash-frozen biological samples is often provided by the temperature of ice-formation, which is the main damage mechanism in cryobiology. However, FBS can potentially probe T_g inside both quench-cooled and dehydrated sample regions, facilitating comparisons. Thus, the possible relevance of FBS in cryobiology is likely to hinge on prior progress with conventional Brillouin confocal T_g measurement in this domain, as well as in related ones, most notably anhydrobiology.

Bibliography

1. Rolle, K., Okotrub, K. A., Zaytseva, I. V., Babin, S. A., & Surovtsev, N. V. (2022). Self-pressurized rapid freezing at arbitrary cryoprotectant concentrations. *bioRxiv*, 2022-12.
2. Rolle, K., Butt, H.-J., & Fytas, G. (2020). Flash Brillouin scattering: A confocal technique for measuring glass transitions at high scan rates. *ACS photonics*, 8(2), 531-539.

Исследование упругих свойств гидрогелей на основе желатина методом спектроскопии рассеяния Мандельштама-Бриллюэна

А.В. Лактионова^{1,2}, В.А. Зыкова¹, Е.А. Добрынина^{1,2}

¹ *Институт автоматизации и электрометрии, Новосибирск,
630090, Проспект Академика Коптюга, 1*

² *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Пирогова, 2
тел: +7 (962) 822-6768, эл. почта: a.laktionova@g.nsu.ru*

DOI 10.34077/SCATTERING95-82

Гидрогели представляют собой трехмерные полимерные сетки, образованные посредством топологической, электростатической или ковалентной сшивок из гидрофильных мономеров.

Благодаря особой структуре сетки вода эффективно заполняет внутрисеточное пространство - ее количество в полимерной матрице может достигать 99%, что оказывает сильное влияние на упругие свойства материала. Уникальные физико-химические свойства гидрогелей на основе различных биополимеров и их высокая биосовместимость делают их незаменимыми во многих областях медицины. Гидрогели на основе желатина нашли применение в тканевой инженерии, в биопечати, а также используются в лабораториях как среда для культивирования клеток. Важным параметром геля при его эксплуатации в вышеперечисленных областях является модуль упругости, характеризующий его механические свойства, значения которого напрямую зависят от степени гидратации полимерной сетки. Помимо варьирования водной компоненты изменение упругих свойств биополимера можно осуществлять также путем создания дополнительных связей (сшивок) между молекулами гидрогеля с помощью добавления сшивающих агентов. Например, глутаровый альдегид (ГА) применяется в задачах тканевой инженерии и при подготовке биоимплантов с целью вариации упругого модуля и уменьшения их биодegradации. Спектроскопия рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ) – это бесконтактная неинвазивная методика, позволяющая получать информацию об упругих характеристиках материала (скорости звука и упругом модуле) в гигагерцовом частотном диапазоне. Указанная методика хорошо зарекомендовала себя при исследовании различных биологических объектов и может быть успешно применена при исследовании гидрогелевых образцов.

Данная работа посвящена исследованию зависимости механических свойств гидрогелей в гигагерцовом диапазоне от степени гидратации материала и концентрации сшивающего агента ГА методом спектроскопии РМБ. Изучаемые образцы представляли собой тонкие пленки и были изготовлены путем нагревания водного раствора медицинского желатина на водяной бане. После изготовления пленок образцы помещались в резервуары с различной влажностью воздуха, что приводило к изменению содержания воды в гидрогеле. Для варьирования концентрации ГА образец помещался над парами альдегида на различные промежутки времени. Качественно формирование сшивок в гидрогеле можно было распознать по изменению цвета пленок. В ходе работы были изучены спектры РМБ пленок с различной концентрацией медицинского желатина и ГА, для образцов, содержащих ГА были получены спектры в гидратированном и дегидратированном состоянии.

Из анализа спектров РМБ следует, что степень гидратации гидрогеля сильно влияет на его упругие свойства - при изменении содержания водной компоненты от полностью гидратированного образца до дегидратированного наблюдается увеличение скорости звука в гидрогеле более чем в два раза. Также была получена зависимость скорости звука в гидрогеле в зависимости от концентрации ГА для дегидратированных пленок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-74-00122.

Спектроскопия комбинационного рассеяния нанореакторов в обратных микроэмульсиях

И.В. Пластинин^{1,2}, Т.А. Доленко^{1,2}

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,
Москва, 119991, ГСП-1, Ленинские горы, дом 1, строение 2*

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Физический факультет, Москва, 119991, ГСП-1, Ленинские горы, дом 1, строение 2
тел: +7 (951) 994-6401, эл. почта: plastinin_ivan@mail.ru*

DOI 10.34077/SCATTERING95-83

С активным развитием и внедрением нанотехнологий в медицине, экологии, электронике, энергетике и других областях науки и промышленности [1] возросла потребность в наноматериалах с определёнными физико-химическими свойствами, на которые существенное влияние оказывают их размер и форма. Анализ литературных источников показывает, что, несмотря на расширяющиеся области применения наночастиц и активное развитие методов синтеза наночастиц, до сих пор не разработаны дистанционные методы диагностики реакционной среды и определения параметров синтезируемых наночастиц, которые могут работать в режиме реального времени непосредственно в процессе синтеза наночастиц.

Одним из наиболее распространённых методов в нанотехнологиях является мицеллярный синтез, в частности, синтез в обратных микроэмульсиях, который позволяет получать наночастицы с достаточно узким распределением по размерам. Однако, определение размеров синтезированных наночастиц осуществляется уже после завершения реакции синтеза и всевозможных трудоёмких и времязатратных процедур очистки. Таким образом, разработка метода дистанционного контроля за размерами синтезирующихся наночастиц в режиме реального времени является весьма актуальной задачей. Лазерная спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) является дистанционным и очень информативным методом, который позволяет в режиме реального времени исследовать свойства и взаимодействия компонентов раствора [2,3].

В данной работе представлены результаты проведённых исследований мицеллярных нанореакторов с помощью спектроскопии КР. Изучены взаимодействия компонентов реакционной среды, определено влияние растворённых в ядрах мицелл прекурсоров на процессы самоорганизации поверхностно-активных веществ (ПАВ) и характеристики обратных мицелл – их размер и форму. Предложен метод определения размеров и формы обратных мицелл в микроэмульсиях по калибровочным зависимостям спектральных характеристик определенных полос спектров КР. Полученные результаты позволят разработать бесконтактный и экспрессный метод диагностики обратных микроэмульсий в процессе синтеза в них наночастиц.

Литература

1. S. Sohni, T. Hassan, S.B. Khan, K. Akhtar, E.M. Bakhsh, R. Hashim, H. Nidaullah, M. Khan, S.A. Khan, Lignin nanoparticles-reduced graphene oxide based hydrogel: A novel strategy for environmental applications, *International Journal of Biological Macromolecules*. 225 (2023) 1426–1436.
2. И.В. Пластинин. Лазерная спектроскопия самоорганизации амфифильных соединений в растворах. Автореф. дис. на соискание учёной степени канд. физ.-мат. наук., Москва, 2022, 31 с.
3. I.V. Plastinin, S.A. Burikov, T.A. Dolenko, Laser diagnostics of self-organization of amphiphiles in aqueous solutions on the example of sodium octanoate, *Journal of Molecular Liquids*. 317 (2020) 113958.

Применение поляризационной спектроскопии КР для газоанализа

Д.В. Петров¹, И.И. Матросов¹

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск,
634055, Академический, 10/3

тел: +7 (3822) 493-185, эл. почта: dpetrov@imces.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-84

Одним из преимуществ спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) перед другими видами колебательной спектроскопии является возможность осуществления поляризационных измерений. Основа данного подхода заключается в том, что спектры КР состоят из изотропной (I_i) и анизотропной (I_a) частей. Данные составляющие могут быть найдены посредством регистрации спектров плоскости поляризации которых параллельны (I_{\parallel}) и перпендикулярны (I_{\perp}) плоскости поляризации возбуждающего лазерного излучения и вычисления их разности. Как правило, изотропное рассеяние характерно для Q-ветвей полос, соответствующих валентным симметричным колебаниям, и полос, находящихся с ними в Ферми-резонансе [1]. В большинстве случаев именно данные ветви являются характеристическими пиками при определении компонентного состава из спектров КР. Таким образом, выделение изотропной части из неполяризованных спектров КР позволяет их упростить без потери информативности для целей газоанализа.

Для проверки этой идеи в КР-газоанализатор, использованный в работе [2], был установлен поляризатор, который позволял регистрировать спектры соответствующие I_{\parallel} и I_{\perp} . В качестве анализируемых газовых смесей были использованы различные образцы природного газа. Рисунок 1 показывает, что полученный изотропный спектр КР является более простым по сравнению с обычным (неполяризованным) и характеризуется меньшим уровнем перекрытий полос от различных компонентов. Стоит отметить, что важной особенностью определения состава природного газа является тот факт, что фундаментальные полосы диоксида углерода и кислорода перекрыты полосой ν_2 метана (1535 см^{-1}). Поскольку данная полоса отсутствует в изотропном спектре (см. рис. 1б), то для это исключает влияние вариации температуры, давления или состава природного газа на точность измерения данных компонентов. Это значительно упрощает методику восстановления концентраций из регистрируемых спектров. Данный подход также позволил повысить точность определения концентрации н-гексана, наиболее интенсивная полоса которого перекрыта деполяризованными линиями этана и пропана. Помимо этого, было установлено, что данный метод позволяет повысить эффективность определения изотопного состава молекул без использования спектрометров высокого разрешения.

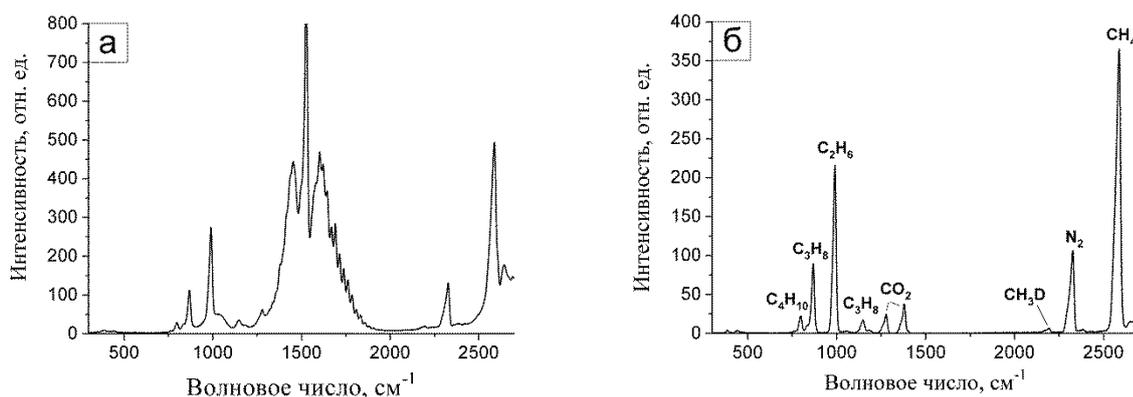


Рис. 1. Неполяризованный (а) и изотропный (б) спектр КР образца природного газа

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-77-10046-П.

Литература

1. D.V. Petrov // *Molecules*. 2020. V. 25, № 8. P. 1951.
2. D.V. Petrov et al. // *Sensors*. 2022. V. 22, № 9. P. 3492.

Оценка эффективной усиливающей площади поверхности ГКР-подложек

Е.П. Кожина^{1,2,3}, С.А. Бедин^{2,3,4}, А.В. Наумов^{2,3,5}

¹ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

² Московский педагогический государственный университет, ИФТИС, Москва, Россия

³ Физический институт им. П.Н.Лебедева, Москва, 119991, Ленинский пр. 53

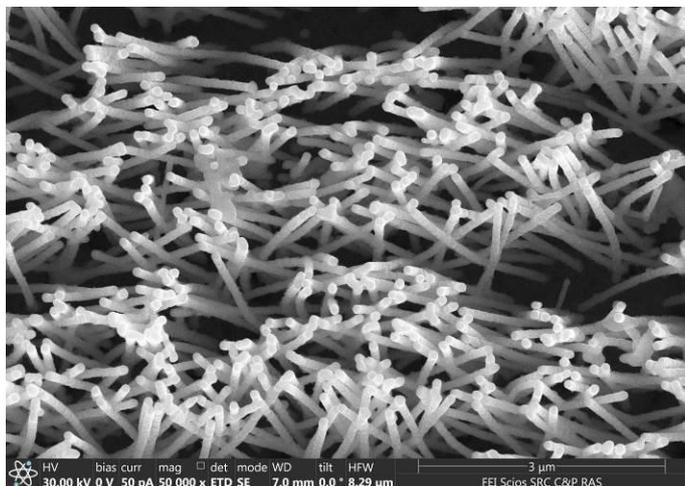
⁴ ФНИЦ «Кристаллографии и фотоники» РАН, Москва, Россия

⁵ Институт спектроскопии РАН, Троицк, Россия

эл. почта: liza.kozhina.99@mail.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-85

Одной из эффективных методик роста наноструктур является метод шаблонного синтеза. Используя в качестве шаблона трековую мембрану (ТМ), можно проводить электрохимическое осаждение в ее поры необходимого для конкретной задачи металла. В результате получается массив вертикально стоящих нанопроволок (НП) из плазмонного металла на металлической поверхности (Рис.1), эффективно усиливающих сигнал комбинационного рассеяния света (КРС). Изменяя параметры синтеза (составы электролита, режимы осаждения и т.д.) и шаблона (размеров, геометрии, плотности пор), можно управлять материалом, структурой, оптическими и магнитными свойствами НП и их массивов. В работе [1] было показано, что при выращивании на металлической подложке большого числа свободностоящих нанопроволок малого диаметра, они склонны к агломерации за счёт капиллярных сил.



Отдельно решалась задача оценки не только усиливающих свойств таких подложек, но и стабильности сигнала. В работе [2] предлагается новая методика оценки эффективной усиливающей площади поверхности подложек с массивом серебряных нанопроволок для регистрации ГКР сигнала, что поможет найти вероятность того, что при фокусировке в случайную точку на поверхности, будет получен усиленный сигнал от молекулы, а не спектральный шум. Данная оценка производится за счет картирования ГКР спектров молекулы на большой площади поверхности (больше 400 квадратных микрон). Было получено, что эффективная усиливающая площадь зависит от количества агломерирующих нанопроволок на поверхности подложки, и может составлять более 65% поверхности для подложек с НП диаметром 100 нм. Используемая в работе методика ГКР картирования также помогает собрать статистику колебательных спектров разных частей сложной молекулы. Долгое время стоял вопрос о возможности использования SERS спектроскопии для изучения сложных органических молекул, так как от точки к точке не было повторяемости, и ГКР спектр раствора вещества не всегда совпадал со спектром КРС вещества. Было показано, что путем регистрации большого количества SERS спектров можно не только собрать статистику спектров разных частей молекулы (усиливаются те связи молекулы, которыми она адсорбируется ближе к горячим точкам), но также путем усреднения этих спектров получить спектр, совпадающий с КРС спектром.

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания МПГУ «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нано-технологиях и фотонике» (АААА-А20-120061890084-9). Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Kozhina E.P., Bedin S.A. et. al. // Applied Sciences. 2021. V.11, №4. P.1375.
2. Kozhina E.P., Bedin S.A. et. al. // Biosensors. 2023. V.13, №1, P.46.

ГКР-подложки с оптимизированными дендритными структурами на основе трековых мембран

С.А. Бедин^{1,2,3}, Е.П. Кожина^{2,4}, А.В. Наумов^{1,2}

¹ Московский педагогический государственный университет, Москва,
119991, Малая Пироговская, 1-1

² Физический институт им. П.Н.Лебедева, Москва, 119991, Ленинский пр. 53

³ ФНИЦ «Кристаллографии и фотоники» РАН, Москва, 119435, Ленинский проспект, 59

⁴ Сколковский институт науки и технологий, Москва

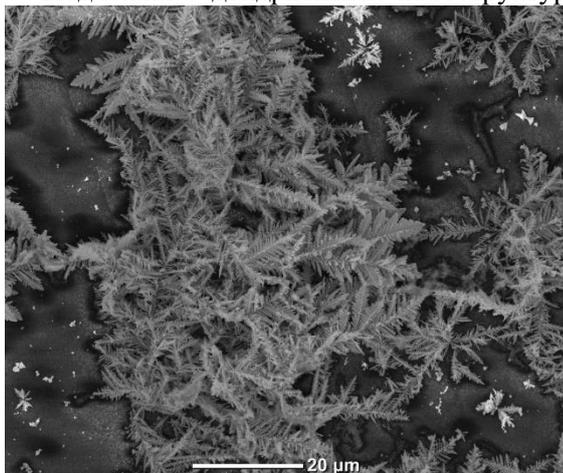
эл. почта: bserg5@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-86

Области концентрации высокоинтенсивных локальных электрических полей вблизи наноструктурированных поверхностей, так называемые «горячие точки», возникают на шероховатых металлических поверхностях, а также в зазорах между соседними наноструктурами [1]. Также, высокое локальное электрическое поле объясняет большие коэффициенты усиления сигналов, наблюдаемые экспериментально в ГКР-спектроскопии, где сигнал комбинационного рассеяния пропорционален - в первом приближении - четвертой степени нормированной амплитуды электрического поля.

В данной работе мы предлагаем изготовление подложек с дендритными наноструктурами, сформированными на вершинах серебряных нанопроволок (НП), используя метод шаблонного синтеза на основе трековых мембран (ТМ) [2]. В результате использования ТМ ветви дендритных НС образуются равномерно по поверхности шаблона и не перекрывают друг друга, сохраняя уникальный рисунок распределения «горячих точек» на поверхности.

Подложки с дендритными наноструктурами, образующихся на вершинах серебряных НП были



изготовлены методом шаблонного синтеза на основе ТМ толщиной 12 мкм, диаметром пор 100 нм. Поры в ТМ электрохимически заполняли серебром. В качестве электролита использовался йодистый электролит серебрения. Используя реверсивное осаждение, при малом значении тока (3-5 мА/см²) добивались равномерного заполнения пор ТМ, затем увеличивали ток до 5-20 мА/см² на 15-20 с, в результате чего на вершинах НП образовывались дендритные структуры. Ветви дендритов разветвлялись с увеличением подаваемого тока.

Полученные образцы с дендритными наноструктурами были аттестованы на растровом электронном микроскопе (см рис.).

Дендритные наноструктуры представляют собой многоветвистые структуры, состоящие из множества ультратонких ветвей, которые формируются на поверхности подложки. В результате такой структуры поверхность наноструктур имеет большую эффективную площадь, что позволяет усилить поглощение и рассеяние света. Кроме того, наличие дендритных структур на поверхности наноструктур приводит к возникновению дополнительных резонансов на различных длинах волн света, что позволяет регулировать оптические свойства наноструктур и использовать их в качестве эффективных платформ для плазмонной оптики, плазмонной спектроскопии и других приложений в области оптики и наноэлектроники.

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания МПГУ «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нано-технологиях и фотонике» (АААА-А20-120061890084-9).

Литература

1. Kozhina E.P., Bedin S.A. et. al. // Applied Sciences. 2021. V.11, №4. P.1375.
2. Kozhina E.P., Andreev S.N. et. al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. V.84, №12. P.1465-1468.

Формирование nanoостровковых плёнок серебра методом диффузии из стекла для сенсоров на основе явления гигантского комбинационного рассеяния

Е.М. Сгибнев^{1,2}, А.В. Шелаев¹, А.В. Барышев¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, 127030, Москва, Суцеская ул., 22, Россия

²Университет ИТМО, 199034, Санкт-Петербург, Биржевая линия, 4, Россия

DOI 10.34077/SCATTERING95-87

В настоящее время сенсоры на основе явления гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) находят широкое применение в качестве сверхчувствительного и селективного метода обнаружения химических веществ. Наибольшее распространение, в том числе среди коммерчески доступных, получили подложки для ГКР на основе плазмонных серебряных и золотых наноструктур [1]. Основными ограничениями таких подложек являются невозможность их многократного использования и недолговечность. Так, например, средний срок службы коммерческих подложек для ГКР составляет 2-4 месяца. В данной работе предложен метод получения nanoостровковых плёнок серебра на поверхности стеклянной подложки с возможностью многократного формирования такой плёнки после её механического удаления.

В качестве подложки использовалось силикатное стекло на основе системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{F}$. Серебро вводилось в подложку методом низкотемпературного ионного обмена Na^+-Ag^+ . Для этого стекло помещалось на 15 минут в расплав смеси нитратов ($5\% \text{AgNO}_3 + 95\% \text{NaNO}_3$) при температуре 320°C . Такая обработка позволяет заместить около 90% ионов натрия в приповерхностных слоях стекла и получить концентрации серебра, недостижимые в силикатных стёклах при использовании традиционного высокотемпературного синтеза. При последующей термической обработке на воздухе при температурах $350-500^\circ\text{C}$ на поверхности стеклянной подложки происходит формирование nanoостровковой плёнки серебра. Температура и длительность термической обработки позволяют контролировать размеры наночастиц серебра на поверхности подложки и, соответственно, свойства nanoостровковой плёнки (рис. 1а). Для исследования возможности применения полученных nanoостровковых плёнок серебра в качестве подложек для ГКР на образцы наносилась капля водного раствора родамина 6Ж в концентрации 800 нмоль/л. Спектры КР измерялись после высыхания капли при помощи конфокального микроскопа при возбуждении излучения на длине волны 633 нм с $50\times/0.55$ объективом. В качестве примера на рисунке 1б представлен КР спектры капли родамина 6Ж на образце с nanoостровковой плёнкой серебра и без плёнки, измеренные в идентичных условиях. Полученные данные свидетельствуют об усилении КР родамина 6Ж nanoостровковой плёнкой. Кроме того, частицы серебра могут быть удалены механически и повторно сформированы термической обработкой.

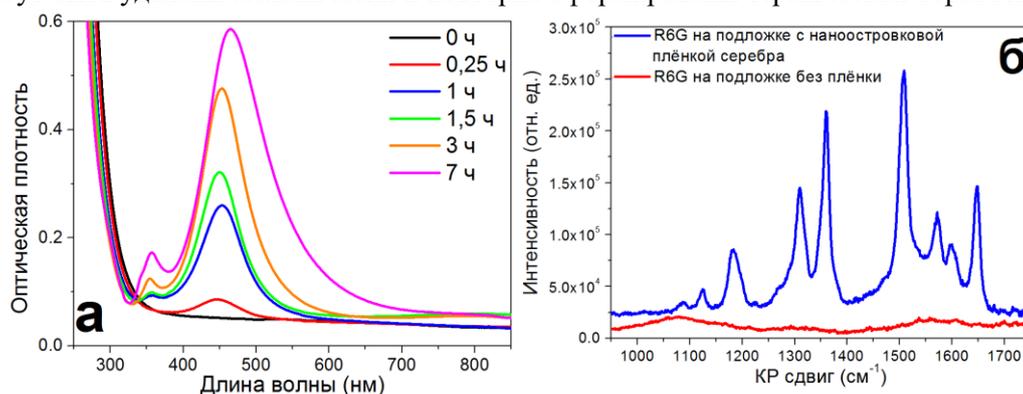


Рис. 1. (а) Спектры поглощения подложки с nanoостровковой плёнкой серебра, полученной при 350°C при различных временах. (б) Спектры КР родамина 6Ж в концентрации 800 нмоль/л на стеклянной подложке с nanoостровковой плёнкой серебра и без плёнки.

Таким образом, предложен технологичный и масштабируемый метод формирования nanoостровковых плёнок серебра на основе диффузии из стеклянной подложки при термическом отжиге в воздушной атмосфере для ГКР. Данный подход позволяет получить подложки для ГКР многократного использования. Кроме того, локальное формирование nanoостровковых плёнок серебра может найти применение в ГКР концентраторах.

Литература

1. R. Alder et al. // Drug Testing and Analysis. 2021. Т.13, вып.5. С.944-952.

Бимодальные ГКР-флуоресцентные метки для биовизуализации и лечебной гипертермии: оптимизация состава и структуры

Е.В. Соловьева, А. И. Деменьшин, В.О. Свинко, А.Н. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,

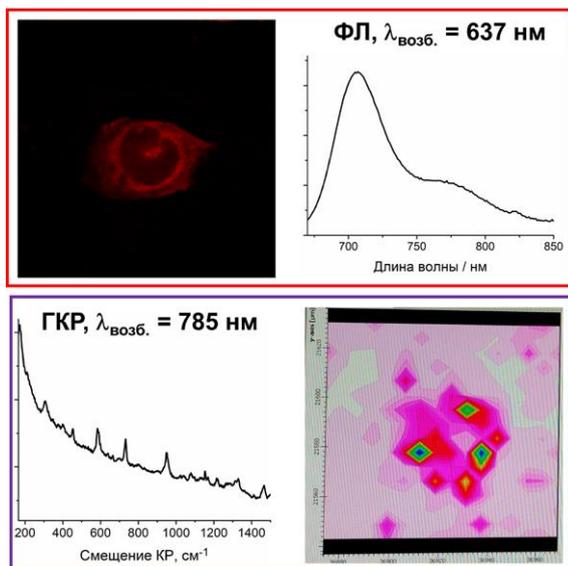
198504, Университетский пр. 26

тел: +7 (950)016-5056, эл. почта: solovyeva.elena.v@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-88

Создание средств визуализации и одновременного фото- и термовоздействия на раковые клетки является значимой научной проблемой. Настоящая работа раскрывает результаты двухлетней работы по разработке бимодальных оптических меток для биовизуализации раковых клеток методами флуоресцентной и КР микроскопии, позволяющих одновременно проводить локализованную гипертермальную терапию с использованием медицинских лазеров 633 и 785 нм. На текущем этапе конкретными составляющими исследуемых оптических меток являются: анизотропные наночастицы золота, хромофоры цианинового ряда, оболочка из биосовместимых материалов (оксид кремния, полиэлектролиты) и модельный вектор доставки – фолиевая кислота.

В работе получен широкий набор меток по типу «ядро-оболочка», отличающихся морфологией золотого ядра, составом оболочки, положением хромофора в ней и способом иммобилизации хромофора (электростатическая адсорбция или ковалентная конъюгация). Все системы охарактеризованы методами просвечивающей электронной микроскопии, динамического светорассеяния, спектроскопии поглощения.



Спектральные исследования меток методами Гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) и флуоресцентной спектроскопии выполнены как для коллоидных растворов, так и для инкубированных клеточных образцов. Путем вариации структуры и состава меток подобраны оптимальные параметры, при которых метки способны работать в бимодальном режиме, что демонстрируется на рисунке. В красной рамке показано изображение клетки и спектральный сигнал, получаемые при воздействии на метки красным излучением с длиной волны 637 нм; в фиолетовой рамке показано изображение клетки и спектральный сигнал, получаемые при воздействии на метки излучением с длиной волны 785 нм. Отказ от ковалентной конъюгации красителя и его расположение на расстоянии 2-3 нм от ядра являются ключевыми факторами достижения бимодальности.

Биологические испытания, проведенные на клеточных линиях HeLa, PANC-1, HEP G2, показали, что разрабатываемые метки на основе наночастиц золота претерпевают эндоцитоз вне зависимости от морфологии ядра и материала покрытия и локализуются в цитоплазме. Тесты на цитотоксичность показали, что метки не токсичны в диапазоне концентраций по атомарному золоту вплоть до 5 мкг/мл. На основе оценки клеточного поглощения выявлено, что метки, поверхность которых модифицирована фолиевой кислотой, подвергаются эндоцитозу более эффективно, чем немодифицированные, степень их поглощения составляет порядка 40-60% от исходной концентрации. Результаты работы в целом свидетельствуют о реальном биомедицинском потенциале разрабатываемых меток.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-73-10052, <https://rscf.ru/project/22-73-10052/>. Авторы благодарят ресурсные центры СПбГУ: «Оптические и лазерные методы исследования вещества», «Методы анализа состава вещества», «Междисциплинарный центр нанотехнологии».

Литература

1. В. О. Свинко и др. Оптические метки на основе золотых нанозвезд для ГКР-картирования тканей с использованием красных медицинских лазеров, *Оптика и спектроскопия*, 2022, Т.130, В.10, С. 1590-1595.

Электродинамические свойства ГКР-активных частиц серебра, бимодально распределенных по размерам

А.В. Бондаренко^{1,2}, С.А. Завацкий¹, А.А. Бурко¹, Д.Д. Лапутько¹, Д.В.Новиков², С.В. Дубков²

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Беларусь, Минск, 220013, ул. Петруся Бровки, 6

тел.: +375297525144, эл. почта: h.bandarenka@bsuir.by

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Россия,

Зеленоград, Москва, 124498, пл. Шокина, 1

тел.: +79168553408, эл. почта: sv.dubkov@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-89

Методом химического контактно-обменного осаждения серебра (Ag) на мезопористый кремний (мезо-ПК) сформированы покрытия из частиц Ag, бимодально распределенных по размерам в диапазонах 10–150 нм и 200–500 нм. Установлено, что изготовленные подложки демонстрируют активность в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света, позволяя достигать предела детектирования как низко- (например, родамина 6G и реактива Элмана, < 0,5 кДа), так и высокомолекулярных соединений (например, лактоферрина, лизоцима, альбумина, миелопероксидазы, 15–80 кДа), соответствующего единичным молекулам (10^{-15} М). При этом на ряде ГКР-спектров высокомолекулярных объектов наблюдалось присутствие полосы амида 1, по положению которой судят о вторичной структуре белковых соединений, что затруднительно с использованием одномодально распределенных по размерам наночастиц Ag [1].

Для объяснения полученных результатов было выполнено моделирование 3D геометрии подложек и распределения в них напряженности электрического поля (E) в программном пакете COMSOL Multiphysics 5.3a (модуль AC/DC). На рисунке 1 представлены результаты моделирования, из которых следует, что подложка обеспечивает усиление сигнала комбинационного рассеяния от молекул не только за счет поверхностного плазмонного резонанса в частицах Ag 1-го размерного диапазона, но и благодаря переотражению значение E за счет вклада поверхностного плазмонного резонанса достигается при возбуждении излучением с длиной волны 445 нм, за счет переотражения – с длиной волны 680 нм.

Полученные результаты позволят подбирать оптимальные режимы регистрации ГКР-спектров соединений с различной молекулярной массой для повышения надежности анализа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00761, <https://rscf.ru/project/21-19-00761/>.

Литература

1. D. Kurouski et al. // Analyst. 2013. Vol. 138, issue 6. P. 1665-1673.

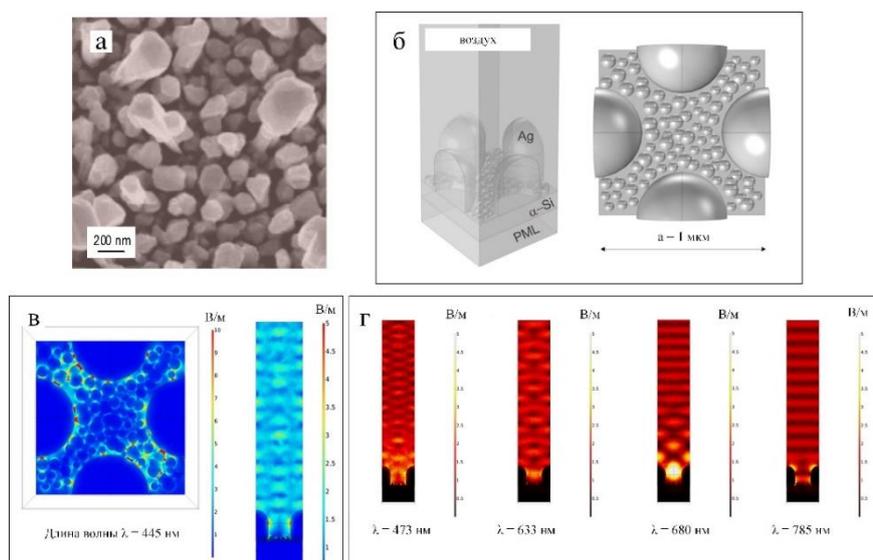


Рис. 1. Результаты моделирования: а – СЭМ-изображение поверхности подложки; б – модель геометрии подложки; в, г – распределение E между частицами при различных длинах волн возбуждающего излучения.

Роль фототермического нагрева в плазмонном фотокатализе

Д.Л. Чешев¹, Р.Д. Родригес¹, А.А. Аверкиев¹, Е.С. Шеремет¹

¹ Томский политехнический университет, Томск, 634050, Пр-кт Ленина, 30

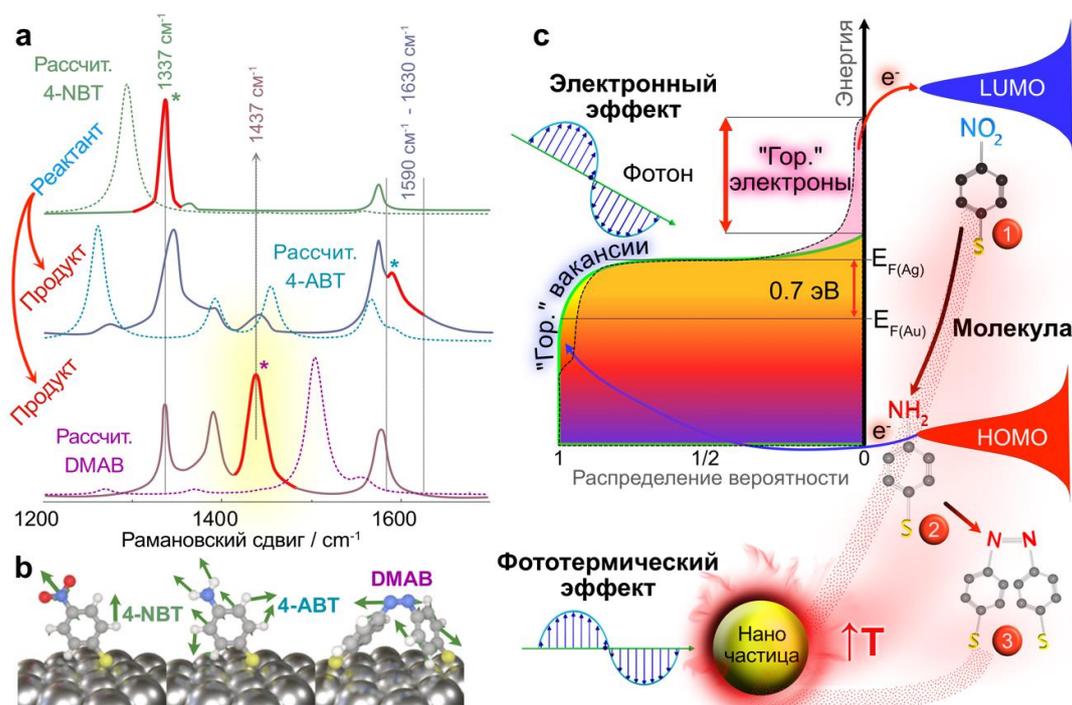
тел.: +7 (951) 628-8923, эл. почта: dlc2@tpu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-90

Фотокатализ, на сегодняшний день, является многообещающим направлением развития зеленой энергетики. Одним из ключевых вопросов фотокатализа является способы его усиления, например, с помощью плазмонного резонанса. Однако даже в этом вопросе существуют пробелы, тем самым существенно замедляется развитие плазмонного фотокатализа как направления. Так, актуальным вопросом является механизм протекания плазмонного фотокатализа. Некоторые работы показывают, что основным механизмом протекания реакции является плазмонно-индуцированный нагрев [1], в то время как другие работы делают акцент на переносе «горячих» электронов, инициирующих реакции [2]. Также есть работы, утверждающие, что плазмонный нагрев и трансфер электронов одновременно имеют место быть в процессах плазмонного фотокатализа [3]. Таким образом, на данный момент не существует единого объяснения механизма процесса.

В данной работе мы поставили своей задачей изучить процесс плазмонного фотокатализа на примере реакции трансформации молекулы нитробензентиола (4-NBT) при помощи золотых и серебряных наночастиц и спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния, а именно зонд-усиленной Рамановской спектроскопии (TERS) и поверхностно-усиленной Рамановской спектроскопии (SERS). Таким образом, было установлено, что преобразованию молекулы 4-NBT способствует перенос электронов, вызванный нагревом образца и показанный на спектрах КР как увеличение сигнала продуктов реакции с ростом температуры. Вдобавок было выяснено, что покрытие поверхности металлических наноструктур влияет на сигнал КР, ослабевая его, что, вследствие, сказывается и на эффективности фотокаталитического преобразовании молекулы.

Работа была выполнена с поддержкой фонда РФФИ, грант №21-53-12045.



Литература

1. Sivan, Y., Un, I. W. & Dubi, Y. Assistance of metal nanoparticles in photocatalysis – nothing more than a classical heat source. *Faraday Discussions*, 214, 215–233 (2019).
2. Simoncelli, S. *et al.* Monitoring plasmonic hot-carrier chemical reactions at the single particle level. *Faraday Discuss*, 214, 73–87 (2019).
3. Li, X., Everitt, H. O. & Liu, J. Synergy between thermal and nonthermal effects in plasmonic photocatalysis. *Nano Res.*, 13, 1268–1280 (2020).

Эволюция приборов для комбинационного рассеяния света

Н.Н. Мельник

ФИАН, Москва, 119991, Ленинский проспект, д.53

тел: +7 (903) 768-4742, эл. почта: melnik@lebedev.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-91

В обзоре рассмотрена эволюция приборов для комбинационного рассеяния света от первых экспериментов Л.И. Мандельштама и Г.С. Ландсберга, до настоящих дней. Рассматриваются наиболее популярные схемы приборов, широко применяемых в методике спектроскопии КРС. Показано влияние актуальных задач разных времён на конструктивные решения КРС спектрометров. Так же рассматриваются открытия и приборы, применение которых позволило существенно расширить возможности спектроскопии КРС. Это: создание различных лазеров, как источников возбуждающего излучения; применение оптических и конфокальных микроскопов; создание интерференционных, пропускающих, notch и краевых фильтров; создание полупроводниковых многоканальных оптических приёмников. Описываются методики для измерения спектров КРС при различных температурах и давлениях. Рассмотрены некоторые оригинальные конструктивные решения для спектрометров КРС, которые так и не нашли широкого применения.

Рассмотрены актуальные задачи нашего времени, которые выдвигают новые требования к характеристикам приборов для КРС.

Разделение колебательных линий, фона и шума в КР спектрах методом модифицированной регуляризации Тихонова

И.А. Ларкин¹, А.В. Вагов², В.И. Корепанов¹

¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Осипьяна, 6*

² *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
123458, г. Москва, Таллинская ул., д. 34
эл. почта: korepanov@iptm.ru*

DOI 10.34077/SCATTERING95-92

При анализе реальных экспериментальных спектров КР и других подобных экспериментальных данных часто возникает ситуация, когда полезный сигнал выглядит как суперпозиция относительно острых пиков, чьи параметры надо определить, и относительно плавной базовой линии. Кроме того, наблюдаемая суперпозиция обычно замаскирована случайным шумом.

Наша задача состоит в том, чтобы наиболее последовательно и корректно разделить эти три составляющих сигнала в КР-спектрах. Решение, предлагаемое в нашей работе, основано на регуляризации Тихонова. Если обозначить исходный спектр как $f(x)$, а пик с номером i как $F_i(x, \mu_{ij})$, то поиск оптимальных параметров каждого пика (μ_{ij}) и базовой линии ($y(x)$) может быть сформулирован как минимизация следующего функционала:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Lambda (y''(x))^2 + (y(x) + \sum_i F_i(x, \mu_{ij}) - f(x))^2 dx \rightarrow \min,$$

где Λ – регуляризирующий параметр. Получаемое решение $y(x)$ и параметры μ_{ij} зависят от Λ , причём оптимальное значение Λ определяется амплитудой шума и гладкостью базовой линии. В нашей работе предложены корректирующие поправки, зависящие от Λ , позволяющие повысить точность решения. Выбор оптимального значения Λ – одна из задач нашей работы.

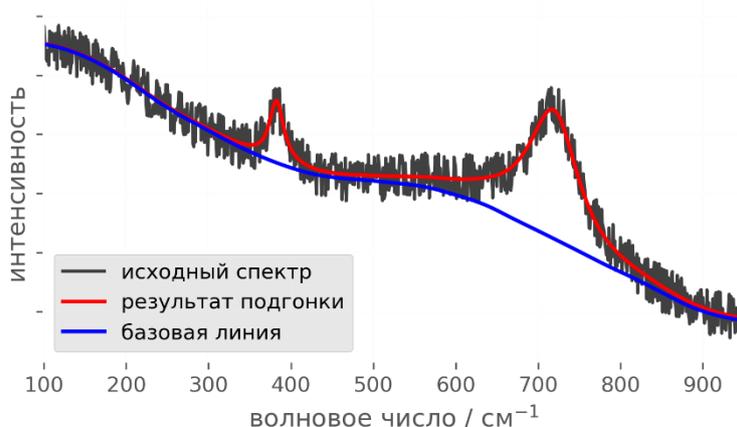


Рис. 1. Пример обработки синтетического спектра предложенным алгоритмом. $\Lambda = 1.9 \cdot 10^5$.

Для алгоритма минимизации функционала написан код на языке Python, доступный на портале GitHub [1]. Пример работы кода, экстрагирующего $y(x)$ и μ_{ij} для модельного спектра, состоящего из плавно меняющейся базовой линии, двух пиков лоренцевой формы и случайного шума, приведён на рис. 1.

Литература

1. https://github.com/the-different-name/multipeak_fit_with_baseline

Оптические свойства экстремально тонких нанопроволок теллура, сформированных в каналах субнанометрового диаметра

В.В. Поборчий^{1,2}, А.В. Фокин¹, А.А. Шкляев^{3,4}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург,
194021, Политехническая, 26

² Национальный институт передовых промышленных наук и технологий, Цукуба, Япония

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск 630090, ул. Пирогова, 2

⁴ Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск 630090, пр.
Лаврентьева, 13

тел: +7 (913) 001-00855, эл. почта: shklyayev@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-93

Объемный Те (t-Te) состоит из параллельных взаимодействующих спиральных цепочек атомов. Межцепочечные связи являются частично ван-дер-ваальсовыми (vdW) и частично ковалентными из-за перекрытия неподеленной пары электронных орбиталей с антисвязывающими состояниями соседних цепей. Ожидается, что экстремальные одномерные нанопроволоки, такие как изолированные одиночные цепи Те, демонстрирующие только взаимодействие vdW с окружающей средой и чистую структуру одномерных электронных зон, будут демонстрировать уникальные электронные и спинтронные свойства, полностью отличные от свойств объемного Те.

Нами капсулирован Те из расплава в каналы цеолитов AFI (диаметр канала ~ 0.73 нм) и морденита (MOR, поперечное сечение канала $\sim 0.67 \times 0.7$ нм²) посредством впрыска под высоким давлением. Используя поляризованные спектры комбинационного рассеяния и оптического поглощения (КР и ОП) монокристаллов цеолитов с Те (AFI-Te и MOR-Te), нами определялись особенности цепочек и колец Те, образующихся в цеолитах. Продемонстрировано хорошее соответствие КР AFI-Te-цепи и ОП с расчетными фононными и электронными спектрами одиночной спирали Те. Это предполагает очень слабое взаимодействие цепи AFI-Te с цеолитом и его почти идеальную спиральную структуру без инверсионной/зеркальной симметрии. На Рис. 1 приведены данные, полученные для цепочек Те в AFI [1].

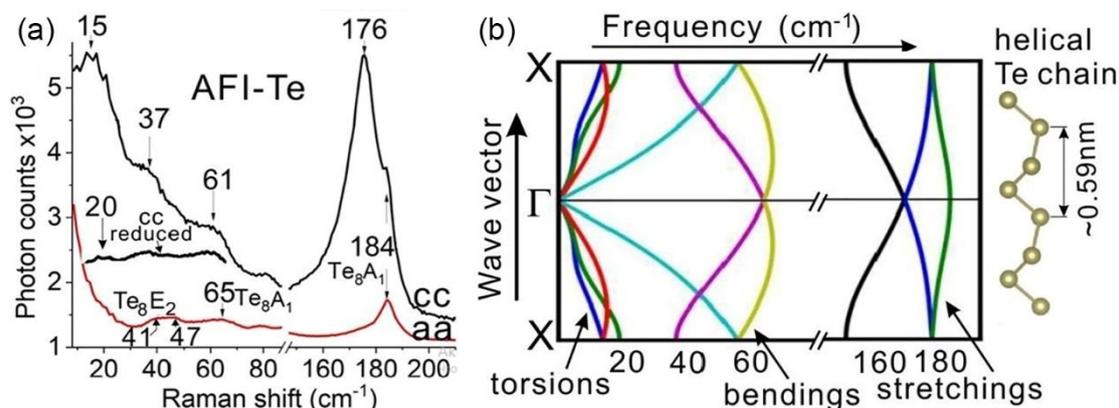


Рис. 1. (a) Спектры комбинационного рассеяния AFI-Te, возбужденные лазером с длиной волны 785 нм, для конфигураций поляризации *cc*- (черный) и *aa*- (красный) с добавлением низкочастотного фрагмента математически редуцированного *cc*-спектра. (b) Рассчитанные фононные дисперсионные кривые тригонально-спиральной цепочки Те.

Особенность ОП (*E*//*c*) AFI-Te отнесена к электронным переходам между валентной зоной и зоной проводимости одномерной спирали теллура, испытывающими расщепление Рашбы [2]. Это указывает на предсказанную возможность идентификации майорановских фермионов, управления спиновым переносом и реализации топологической сверхпроводимости

Литература

1. V.V. Poborchii, A.V. Fokin, A.A. Shklyayev // *Nanoscale Adv.* 2023. Iss.5. P.220-227.
2. P. V. C. Medeiros, *et al.* // *ACS Nano.* 2017, V.11, P.6178–6185.

Комбинационное рассеяние света в структурах кремний-на-изоляторе, имплантированных ионами In^+ и Sb^+ вблизи границы сращивания Si/SiO_2

Ж. Чжан^{1,2}, И.Е. Тыщенко¹, В.А. Володин^{1,2}, В.П. Попов¹

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск, 630090, проспект Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Пирогова, 2
тел: +7 (383) 333-2493, факс: +7 (383) 333-2771, эл. почта: sangexiaoshagua@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-94

Создание гибридных интегральных схем, включающих в себя различные многофункциональные элементы, объединенные на единой кремниевой платформе, требует разработки новых многофункциональных материалов. В настоящее время многие исследователи в качестве таких материалов называют низкоразмерные кристаллы соединений A_3B_5 . Среди всех соединений A_3B_5 InSb обладает наиболее выдающимися электрическими и оптическими свойствами. Однако, создание таких кристаллов на кремнии обычными ростовыми методами осложнено большим рассогласованием решеток Si и InSb , которое составляет 19%. Поэтому развитие новых методов создания гетероструктур InSb/Si является весьма перспективной задачей. В данной работе было изучено комбинационное рассеяние света в структурах кремний-на-изоляторе (КНИ) с нанокристаллами InSb , созданными на границе раздела Si/SiO_2 методом сращивания и последующего водородно-индуцированного переноса слоев, имплантированных ионами In^+ и Sb^+ , в зависимости от температуры и длительности последующего отжига.

Исходная и термически окисленная пластины кремния были имплантированы соответственно ионами Sb^+ и In^+ с энергией 100 кэВ дозой $8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Затем в первую пластину Si были имплантированы ионы H_2^+ с энергией 130 кэВ дозой $2.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. После этого по созданным имплантацией водорода внутренним ослабленным плоскостям осуществлялся перенос слоя кремния толщиной около 640 нм, имплантированного ионами Sb^+ , на окисленную пластину Si , имплантированную ионами индия. В результате была создана структура КНИ, в которой по обе стороны от границы сращивания Si/SiO_2 на расстоянии около 60 нм находились области с концентрацией атомов Sb и $\text{In} \sim 4$ ат.%. Последующий отжиг проводился в потоке паров N_2 при температуре 900-1100°C в течение 3-300 минут. После отжига толщина верхнего слоя кремния

доводилась до нескольких десятков нанометров путем химического травления в водном растворе аммиака при температуре 40 °С. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) исследовались при комнатной температуре при возбуждении излучением Ag лазера с длиной волны 514.5 нм.

После отжига при 900 °С в спектрах КРС наблюдался лишь пик на частоте 134 см^{-1} (Рис. 1), соответствующей частоте оптических фононов в кристаллической сурьме. Увеличение температуры до 1000 °С приводит к появлению в спектрах КРС рассеяния на частоте 180 см^{-1} , совпадающей с частотой TO -фононов в InSb . Рост температуры отжига до 1100°C приводит к сдвигу пика КРС к 187 см^{-1} , что соответствует частоте LO -фонона в InSb . Интенсивность рассеяния на фононах в Sb , In_2O_3 и InSb зависела от времени отжига. Была также установлена немонотонная зависимость частоты оптических фононов в InSb от времени отжига при температуре 1100°C. Природа наблюдаемых сдвигов в положении LO и TO мод обсуждается.

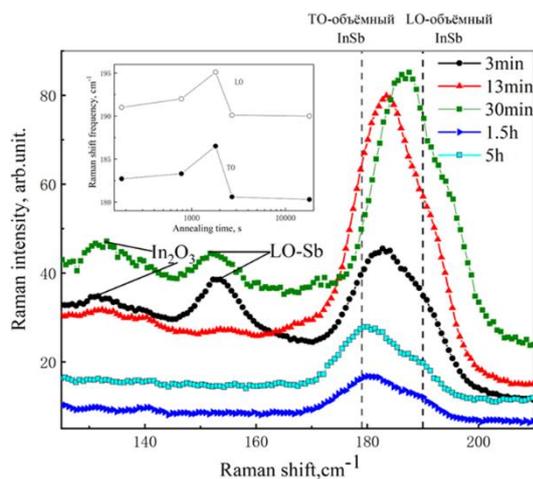


Рис. 1. Спектры КРС после отжига КНИ структур при температуре 1100 °С в течение 3, 13, 30, 90 и 300 минут. На вставке к рисунку – LO и TO моды в наночастицах InSb в зависимости от времени отжига.

Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция в пленках SiO₂, имплантированных ионами In⁺ и As⁺

Ч. Сы^{1,2}, И.Е. Тысченко¹, С.Г. Черкова¹, В.А. Володин^{1,2}, В.П. Попов¹

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск, 630090, проспект Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Пирогова, 2
тел: +7 (383) 333-2493, факс: +7 (383) 333-2771, эл. почта: amaoshihaomao@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-95

Низкоразмерные кристаллы соединений A₃B₅ представляют большой интерес с точки зрения модифицирования электрических и оптических свойств структур на основе кремния и SiO₂. Создание гетероструктур A₃B₅/Si рассматривается многими исследователями как наиболее эффективный способ увеличения быстродействия интегральных схем на основе кремния. Пленки SiO₂ с наночастицами соединений A₃B₅ обладают широким спектром поглощения, перекрывающим диапазон от ультрафиолетовой до инфракрасной области спектра, и могут быть использованы для увеличения эффективности поглощающих покрытий в солнечных элементах. Синтез наночастиц соединений на основе индия и галлия в SiO₂ осложнен рядом физических причин, связанных в основном с различием коэффициентов диффузии элементов III и V группы. В данной работе будут изучены оптические свойства пленок SiO₂, имплантированных ионами In⁺ и As⁺, в зависимости от температуры постимплантационного отжига методами комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции (ФЛ).

Пластина кремния, термически окисленная на толщину SiO₂ около 280 нм, была имплантирована ионами As⁺ с энергией 50 кэВ дозой 6×10¹⁵ см⁻² и ионами In⁺ с энергией 40 кэВ дозой 4×10¹⁵ см⁻². Концентрация имплантированных атомов в максимуме распределения составляла ~1.5 ат.% на глубине около 32 нм. Последующий отжиг проводился в потоке паров N₂ при температуре 700-1100°C в течение 30 минут. Перед отжигом слои SiO₂ были покрыты пленкой Si₃N₄. Спектры КРС исследовались в геометрии обратного рассеяния при комнатной температуре при возбуждении излучением Ar лазера с длиной волны 514.5 нм. Спектры ФЛ возбуждались при комнатной температуре излучениями лазера с длиной волны 442 и 473 нм.

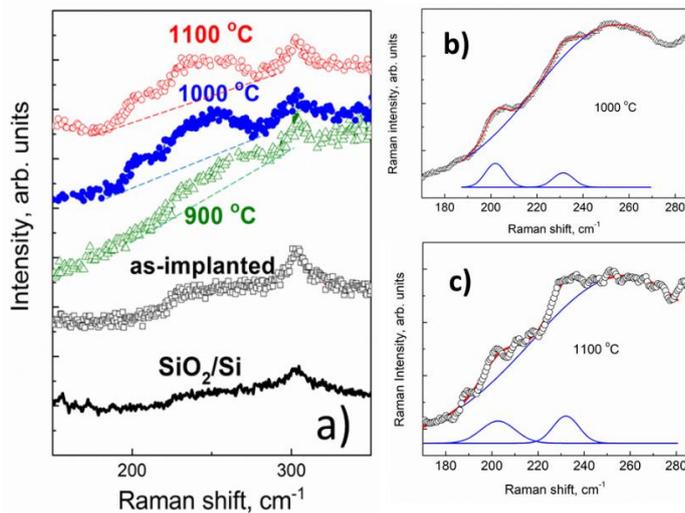


Рис. 1. Спектры КРС пленок SiO₂, имплантированных ионами As и ионами In⁺, до и после отжига при температуре 900, 1000 и 1100 °C. На рисунках b) и c) представлены разложения спектров КРС после отжига 1000 и 1100 °C на составляющие пики в форме Гаусса.

В спектрах КРС имплантированных пленок после отжига при температурах выше 800 °C наблюдались пики рассеяния на частотах оптических фононов в черном мышьяке (201 и 255 см⁻¹) и на частоте 231 см⁻¹, близкой к частоте оптического фонона (LO) в кристаллическом InAs (Рис. 1). В рамках модели фононного ограничения рассчитаны моды оптических фононов в нанокристаллах InAs в зависимости от размера наночастицы. Низкочастотный сдвиг LO моды соответствовал размерному эффекту в наночастицах размером около 3 нм. В спектрах ФЛ наблюдался пик в видимой области спектра, энергетическое положение которого смещалось с изменением энергии возбуждающего излучения. Наблюдаемый эффект объясняется влиянием размерного квантования на излучательную рекомбинацию электронов и дырок в нанокристаллах InAs.

Оптические фононы атомно-тонких нанопластинок ZnSe

Л.С. Басалаева¹, В.П. Графова², Т.А. Дуда¹, Р.Б. Васильев², А.Г. Милёхин¹

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090,
пр. ак. Лаврентьева, 13

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119991, Ленинские горы, 1

тел: +7 (383) 316-6054, факс: +7 (383) 333-2771, эл. почта: basalaeva@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-96

В последние годы двумерные коллоидные полупроводниковые нанопластины продемонстрировали уникальные электронные и оптические свойства вследствие проявления квантово-размерных эффектов [1,2]. Нанопластины толщиной в несколько монослоев и латеральными размерами в десятки нанометров успешно синтезируются методами коллоидной химии. Нанопластины характеризуются узкими линиями поглощения и высоким квантовым выходом. В настоящее время наиболее исследованными оказались свойства нанопластинок на основе CdSe. Так, при изменении толщины таких нанопластинок их оптические свойства меняются в спектральном диапазоне от ИК до видимого диапазона. Расширить спектральный диапазон люминесценции от видимого до УФ можно, используя нанопластины широкозонного полупроводника ZnSe ($E_g=2.7$ эВ). Более того, ZnSe менее токсичен в сравнении с халькогенидами кадмия, поскольку не имеет в составе тяжелых металлов и может использоваться, в том числе, для биологических применений [3].

В данной работе фононный спектр атомно тонких нанопластинок ZnSe исследовался методами колебательной спектроскопии, включая комбинационное рассеяние света (КРС) и ИК спектроскопию. Были синтезированы нанопластины ZnSe треугольной формы при низкой температуре роста (100-130°C) и прямоугольной формы при повышенной температуре (140-170°C). Латеральный размер прямоугольных нанопластинок составлял 10-35 нм, треугольных 100-250 нм. По данным рентгеновской дифракции нанопластины ZnSe имели кристаллическую структуру вюрцита. Методом оптической спектроскопии установлено, что были получены популяции нанопластинок с нижней по энергии экситонной полосой 347 нм (толщиной 1,4 нм) и 293 нм (толщиной <1 нм). Для проведения ИК и КРС экспериментов нанопластины ZnSe наносились на кремниевую подложку, покрытую пленкой золота толщиной 100 нм. В ИК спектрах отражения, регистрируемых при нормальном падении, наблюдались ТО и СО моды. При наклонном падении вследствие эффекта Берремана проявлялись дополнительно LO моды. В спектрах КРС наблюдались преимущественно моды ТО и СО фононов на частотах, близких к определенным из ИК данных. Показано, что при уменьшении толщины происходит низкочастотный сдвиг LO фононных мод при от 252 до 238 см⁻¹ и высокочастотный сдвиг ТО фононов от 198 до 216 см⁻¹. Изменение частот фононных мод объяснено эффектом локализации оптических фононов на толщине пластинки. При сравнении положения LO и ТО фононных мод, локализованных в нанопластинках ZnSe с данными по дисперсии оптических фононов в объемном ZnSe определена толщина нанопластинок, сформированных при низкой температуре, равная 0,567 нм, что хорошо коррелирует с результатами атомно-силовой микроскопии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-12-00302).

Литература

1. С. Bouet et al. // Chem. Mater. 2013, 25, 8, 1262–1271.
2. J.Q. Grim et al. // Chem. Soc. Rev., 2015, 44, 5897-5914.
3. P. Reiss et al. // Chem. Rev., 2016, 116, 10731-10819.

Проявление резонанса Фано в спектрах КРС пористых структур с p-n-переходом, полученных металл-стимулированным травлением

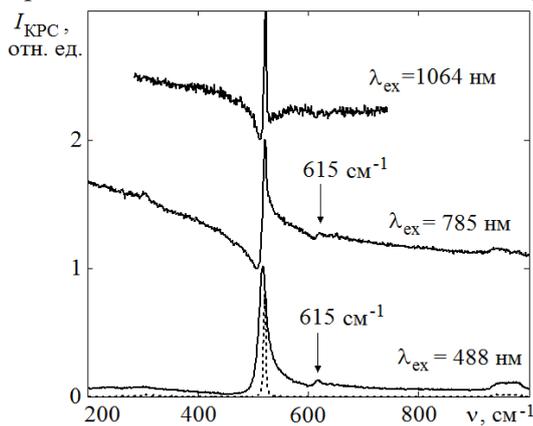
Д.С. Косцов¹, Н.Н. Мельник¹, В.В. Трегулов², Г.Н. Скопцова²

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53

² Рязанский государственный университет им. С. А. Есенина, 390000 Россия, Рязань, ул. Свободы, 46
тел: +7 (903) 768-4742, эл. почта: melniknn@lebedev.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-97

В данной работе рассматривается резонанс Фано наблюдаемый в спектрах комбинационного рассеяния пористых структур с p⁺-n переходом полученным металл-стимулированным травлением. Эффект заключается в изменении формы линии в КРС на оптическом фоне кремния (521 см⁻¹) и полосе, соответствующей примесям бора (615 см⁻¹). При этом линии 2 порядка для акустических и оптических колебаний не изменяются. Данные изменения наблюдаются лишь в случае примеси p-типа, в данном случае бора. При легировании фосфором резонанс Фано не наблюдается, а изменения в форме линий спектра объясняются присутствием нанокристаллической фазы разных размеров. Несмотря на то, что данный резонанс в монокристаллическом кремнии был обнаружен давно, именно в пористой структуре с p⁺-n переходом он был обнаружен нами впервые [1]. Резонанс Фано в таких структурах представляет собой интерес как с практической точки зрения, возможность получения более быстродействующих устройств, так и с точки зрения фундаментальных знаний поскольку прямого взаимодействия фундаментального колебания кремния с континуумом электронных состояний возникать не может. Также стоит отметить, что форма асимметрии линии не зависит от мощности возбуждающего излучения, что говорит о независимости от внешней накачки электронной системы и преобладании взаимодействия именно внутренних состояний в кристалле.



В литературе [2] известна зависимость параметров резонанса Фано от длины волны возбуждающего излучения, что было подтверждено. Однако в силу определённой неоднородности при химических процессах на одном образце при одной и той же возбуждающей длине волны 785 нм в характерных местах регистрировались спектры с разной асимметрией линии, от слабого резонанса (q=8) до полного антирезонанса (q=0). Такое наблюдение говорит о возможности регулирования асимметрии резонанса. В случаях легирования примеси путём диффузии из источника с не очень большим содержанием бора морфология поверхности характеризуется тёмными пятнами с

повышенным содержанием бора. В таких точках спектр проявляет наибольшее соответствие антирезонансному состоянию. В случаях, когда концентрация бора была слишком большой, значительно падал сигнал оптического фона, появлялась широкая полоса на частоте ~150 см⁻¹ и увеличивалась подставка от электронных состояний в системе. Падение сигнала оптического фона вероятно может быть связано с увеличением проводимости и экранированием излучения.

Также исследовались спектры с торца пористой пленки. По изображению СЭМ толщина пористой пленки была оценена ~14 мкм. На спектрах КР при движении вглубь образца по толщине заметно уменьшение параметра асимметрии q, линии оптического фона, что говорит о преобладании резонанса именно в приповерхностной области, где концентрация примеси больше всего. Также роль играет наличие именно пористой структуры позволяющей наблюдать наибольшее проявление резонанса. При легировании сплошного монокристалла в тех же условиях асимметрия минимальна. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00412, <https://rscf.ru/project/22-22-00412/>.

Литература

1. Наблюдение резонанса Фано в полупроводниковой структуре с p-n-переходом, сформированной в пленке пористого кремния / Н.Н. Мельник, В.В. Трегулов, Г.Н. Скопцова, А.И. Иванов, Д.С. Косцов // Краткие сообщения по физике ФИАН. — 2023 — №2. — С. 24–28.
2. F. Cerdeira, T. A. Fjeldly, M. Cardona, Physical Review B 9(10), 4344 (1974).

Исследование изменения структуры $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ под действием лазерного излучения при измерении спектров КРС

А.А. Никифоров¹, Д. В. Пелегов¹

¹ Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620002, Мира, 19

тел: +7 (908) 928-51-25, эл. почта: alexey.nikiforov@urfu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-98

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) часто рассматривается как неразрушающий метод изучения структуры. Возможно, именно поэтому взаимодействие лазерного излучения с объектом исследования зачастую не затрагивается в публикациях, особенно если метод является вспомогательным и используется только для подтверждения целевой фазы. В то же время важность таких исследований велика, поскольку большинство современных измерений спектров КРС производится при помощи микро-спектроскопии КРС, когда лазерное излучение фокусируется в небольшом объеме исследуемого вещества. А если при этом объект исследования представляет собой порошок из частиц с размерами, близкими к длине волны лазерного излучения, то теоретическое описание такой системы сильно затруднена и обойтись без аккуратного экспериментального исследования становится невозможно.

Объектом данного исследования является титанат лития $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO) со структурой шпинели. Из-за низкой электронной проводимости частицы LTO должны иметь субмикронные или даже нано размеры, что делает их сложным, но интересным объектом исследования. LTO используется в качестве электродного материала литиевых аккумулятор (ЛА) как для электротранспорта (преимущественно автобусы), так и для стационарных систем накопления электроэнергии. Бурный рост индустрии ЛА повышает актуальность развития методов контроля качества, в том числе с использованием спектроскопии КРС.

Можно найти большое количество публикаций со спектрами LTO, но возможность деградации под действием лазерного излучения обсуждалась только один раз, нашей группой и только для легированного LTO [1]. Возможно, это связано с тем, что $\text{Li}[\text{Li}_{1/6}\text{Ti}_{5/6}]_2\text{O}_4$ имеет структуру шпинели, которая обычно считается устойчивой к воздействиям различной природы. Также отсутствие таких исследований может быть связано с особенностью деградации LTO и его субмикронными размерами. Нами было показано, что индуцированная лазерным излучением деградация описывается как фазовый переход типа порядок-беспорядок, или, другими словами, индуцированная лазером аморфизация [1]. Поскольку обычно измерения спектров КРС проводятся на порошках LTO, то КР отклик получается от нескольких субмикронных частиц и аморфизацию одной из должно быть трудно заметить экспериментально.

В этой работе мы исследуем изменения структуры LTO под действием лазерного излучения для чистого LTO при помощи двух различных подходов к КРС – статистического и одночастичного. В рамках первого производилась серия из 108 измерений одной и той же области с интервалов в несколько недель и с последующим статистическим и корреляционным анализом параметров спектра. В рамках второго подхода проводились серии измерений спектров КРС отдельных частиц на двух разных подложках – медной и кремниевой (КР-пассивной и КР-активной).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (No 22-22-00350, <https://rscf.ru/project/22-22-00350>).

Литература

1. А.А. Nikiforov и др. // Batteries. 2022. V.8, №12, P.251

Зависимости параметров спектров КРС отдельных частиц ЛТО от температуры и мощности лазерного воздействия

А.А. Никифоров¹, А. С. Крылов², Д. В. Пелегов¹

¹ Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620002, Мира, 19

² Институт физики им. Л.В.Куренского СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок, 50

тел: +7 (908) 928-51-25, эл. почта: alexey.nikiforov@urfu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-99

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) – это вид вторичных химических источников тока. Ключевые параметры ЛИА, над улучшением которых работают исследователи, это: удельная энергоёмкость, удельная энергия (скорость заряда или разряда), а также количество циклов заряд-разряд с сохранением целевых потребительских характеристик. Эти свойства ЛИА зависят от ионной и электронной проводимости активных материалов, которые, в свою очередь зависят от концентрации дефектов или неоднородностей структуры. Такая зависимость потребительских свойств ЛИА от структуры делает комбинационное рассеяние света (КРС) удобным методом контроля качества оксидных активных материалов для ЛИА.

Титанат лития (ЛТО) является основной альтернативой анодным материалам на базе графита, поскольку имеет ряд свойств, выделяющих его из ряда известных материалов. Одним из преимуществ является его стабильность, в том числе при быстром заряде/разряде, что является важной характеристикой для использования его в некоторых типах электробусов (например, тех, что сейчас активно используются в Москве) и в стационарных системах накопления электроэнергии.

С точки зрения спектроскопии КРС ЛТО является одним из самых изученных электродных материалов ЛИА и для него было проведено несколько исследований зависимости параметров спектра от температуры, причем не только при нагреве [1,2], но и при охлаждении [3]. Но при этом мы считаем необходимым перепроверить и, возможно, пересмотреть полученные ранее результаты. Дело в том, что большинство проведенных исследований при определении параметров спектра КРС исходят из того, что ЛТО как материал со структурой шпинели должен иметь 6 КР-активных колебательных мод. При этом даже в самой первой экспериментальной работе [4] было показано, что на самом деле характеристических пиков заметно больше. В этой работе мы исходим из того, что ЛТО имеет структуру дефектной шпинели $\text{Li}[\text{Li}_{1/6}\text{Ti}_{5/6}]_2\text{O}_4$, где часть лития находится на позиции титана. В этом случае шести пиков может оказаться недостаточно для описания полного спектра и поэтому надо провести измерения спектров ЛТО в широком температурном диапазоне и аргументированно предложить альтернативный вариант количественного анализа.

В данной работе использовались два методических подхода к спектроскопии КРС. Во-первых, проводились интегральные измерения компактированного порошка в диапазоне температур: $8\div 345\text{K}$ ($-265\div 72^\circ\text{C}$). Также были проведены локальные измерения спектров отдельных частиц в температурном диапазоне $25\div 400^\circ\text{C}$. Полученные нами температурные зависимости позволяют заключить об оправданности использования дополнительных пиков.

Помимо температурных измерений также были проведены локальные и интегральные исследования зависимости параметров спектра КРС от мощности возбуждающего лазерного излучения. Эти эксперименты важны как с точки зрения фундаментальных исследований особенности взаимодействия лазерного излучения с различными объектами микронных и субмикронных размеров, так и для практически важных целей развития методов контроля качества на базе спектроскопии КРС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (No 22-22-00350, <https://rscf.ru/project/22-22-00350>).

Литература

1. И.А. Леонидов и др. // Физика Твёрдого Тела. 2003. Т.45, вып.11. С.2079–2084.
2. K. Mukai, Y. Kato // J. Phys. Chem. C. 2015. Vol. 119, № 19. P. 10273–10281.
3. A.V. Knyazev et al. // Thermochim. Acta. 2013. Vol. 559. P. 40–45.
4. Е.В. Проскуракова и др. // Журнал Неорганической Химии. 1983. Т.28, вып.6. С.1402–1406.

Комбинационное рассеяние света в квазидвумерных и нанокристаллических пленках моносилицидов Fe, Cr и Ca на кремнии и сапфире

К.Н. Галкин, А.М. Маслов, И.М. Чернев, О.В. Кропачев, Е.Ю. Субботин, Д.Л. Горошко, Н.Г. Галкин
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Радио, 5
тел: +7 (423) 231-0687, факс: +7 (423) 231-0452, эл почта: galkinkn@iacp.dvo.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-100

Моносилициды переходных (ПМ: Fe, Cr) и щелочно-земельного металла (ЩЗМ: Ca) в виде объемных материалов имеют различные электрофизические свойства, которые изменяются от свойств сильно коррелированного изолятора (Кондо изолятора) FeSi [1], до полуметаллического - для CaSi [2] и металлического состояния – для CrSi [3], что, несомненно, влияет на их оптические свойства и фононную структуру. Однако формирование, фононная структура и оптические свойства квазидвумерных (КД) эпитаксиальных и нанокристаллических (НК) пленок моносилицидов ПМ и ЩЗМ на кремнии и сапфире не исследовались.

В данной работе пленки моносилицидов железа (ϵ -FeSi), хрома (CrSi) и кальция (CaSi) выращены на кремнии с ориентацией (111) методами твердофазной эпитаксии (ТФЭ) (КД пленки ϵ -FeSi и CrSi с толщинами от 2 до 5 нм) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) (НК пленки с толщинами от 10 до 50 нм). Для роста пленок на монокристаллическом сапфире использовали метод МЛЭ при соосаждении металла и кремния в стехиометрическом соотношении при температурах: $T=350\text{ }^\circ\text{C}$ для Fe и Cr и $T=500\text{ }^\circ\text{C}$ для Ca. Фазовый состав и кристаллическая структура были подтверждены методом рентгеновской дифракции. Исследования морфологии КД пленок моносилицидов Fe и Cr показали, что они являются сплошными и гладкими со среднеквадратичной шероховатостью от 0.4 до 1.1 нм, а пленки CaSi состоят из нитевидных островков шириной 20-25 нм и длиной 100-150 нм, расположенных под углами 120° друг к другу. Фононная структура пленок исследовалась методом комбинационного рассеяния света (КРС) и дальней ИК-спектроскопии при 300 К на автоматизированной установке NTEGRA SPECTRA-II (лазера накачки 473, 633 и 785 нм) и спектрофотометре BRUKER 80v, соответственно.

Исследования оптических свойств КД пленок CrSi и FeSi показали, что оба типа пленок проявляют полуметаллические свойства и для них обнаружены линейные зависимости коэффициента поглощения от энергии фотонов от 0.01 до 1.1 эВ. В виду двумерного характера пленок на спектрах КРС не наблюдаются пики, связанные с CrSi (толщина 2.85-3.1 нм). Переход к НК пленкам CrSi с толщиной 7 нм и 14 нм привело к появлению слабых КРС пиков при 221 и 260 см^{-1} . При этом в спектрах пропускания дальнего ИК не появляются пики поглощения на фонах для пленок CrSi различной толщины, а величина поглощения заметно уменьшается.

КД пленки FeSi (толщина 2.9-3.2 нм) характеризуются слабыми пиками КРС при 258 и 285 см^{-1} для. Увеличение толщины пленок FeSi до толщин 9.5-38 нм (НК пленки) привело к появлению в спектрах КРС интенсивных пиков при 180 и 314 см^{-1} , а также более слабых при 233 и 262 см^{-1} , что соответствует основным пикам КРС для объемного поликристалла FeSi [4]. Для КД пленки FeSi (2.9-3.2 нм) обнаружен заметный пик ИК-поглощения при 307-308 см^{-1} , который согласуется с КРС-пиком при 285 см^{-1} . При этом амплитуда пика при 307-308 см^{-1} плавно уменьшалась с ростом толщины пленки FeSi, что также связано с ухудшением их кристаллического качества.

Установлено, что однофазные НК пленки CaSi на кремнии и сапфире толщиной 25-40 нм сохраняют прозрачность в диапазоне энергий фотонов 0.04-1.2 эВ, не характеризуются системой ИК-фононов и имеют развитую систему из семи КРС-пиков различной интенсивности с малой полушириной при 186, 202, 244, 277, 336, 375 и 405 см^{-1} , что соответствует их высокому кристаллическому качеству.

КРС исследования показали, что переход к КД пленкам моносилицидов Fe и Cr ведет к снижению интенсивности пиков и исчезновению наиболее слабых из них.

Исследование моносилицидов Fe и Cr финансово поддержано грантом РФФИ №22-12-00036.

Литература

1. C. Fu, M. P. C. M. Krijn, S. Doniach // Phys. Rev. B. 1994. V.49, No.3. P.2219-2222.
2. N.G. Galkin, K. N. Galkin, A.V. Tupkalo, Z. Fogarassy, B. Pécz // J. Alloys and Compounds. 2020. V.813, P.152101(1-15).
3. S. Banik, S. Tripathi and S. N. Jha // AIP Conf. Proc. 2019. V.2265, P.030366(1-4).
4. A.-M. Racu, D. Menzel, J. Schoenes, M. Marutzky, S. Johnsen, and B. B. Iversen // J. Appl. Phys. 2008. V.103, P.07C912(1-3).

Исследование теплопереноса в пленках сплава кремний-германий на кремнии с использованием рассеяния Стокса и анти-Стокса

Д.Л. Горошко¹, И.М. Гаврилин², А.А. Дронов², О.А. Горошко¹

¹ Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН,
Владивосток, 690041, Радио, 5

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва,
Зеленоград, 124498, площадь Шокина, 1

тел.: +7 (423) 232-0682, факс: +7 (423) 231-0926, эл. почта: goroshko@iacp.dvo.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-101

Измерение теплопроводности тонких пленок на массивных подложках имеет ряд особенностей из-за которых стандартные методы определения теплопроводности объемных материалов неприменимы. С другой стороны, специализированные методы определения теплопроводности (такой как 3-омега-метод), требует сложной геометрии образца и тонкого измерения параметров сигнала с прецизионным временным разрешением. В свою очередь, спектроскопия комбинационного рассеяния света успешно используется как простой и удобный метод изучения тепловых свойств различных материалов, в частности тонких пленок на подложке. Например, в работе [1] показано, что теплопроводность k может быть оценена через температурный градиент, наблюдаемый между различными частями образца. Температуры рассчитываются на основе измерения значений сигнала определенной полосы комбинационного рассеяния в положениях Стокса и анти-Стокса. Тогда согласно закону теплопроводности Фурье, теплопроводность может быть определена так:

$$k = \frac{P}{\Delta T} \cdot \frac{L}{A}$$

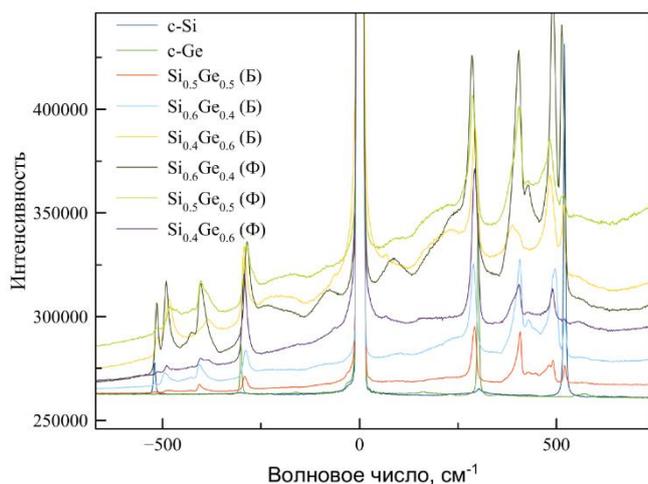


Рис. 1. КРС спектры пленок сплава Si-Ge различного состава на кремниевой подложке.

где P — мощность лазера, поглощаемая образцом толщиной L в направлении нормали к поверхности с площадью поперечного сечения A и возникающий при этом градиент температуры ΔT . На рисунке 1 представлены КРС спектры, полученные в геометрии обратного рассеяния при возбуждении He-Ne лазером. Мощность лазера подбиралась таким образом, чтобы в ходе экспозиции в пленке не происходили необратимые изменения (плавление, рекристаллизация и т.п.) с одной стороны, и достаточная интенсивность антистоксовой линии с другой стороны.

На основе измеренных спектров были вычислены значения отношения стоксовых и антистоксовых компонент для ТО моды Si-Si в сплаве и в подложке для каждого образца и рассчитаны соответствующие температуры. Полученные значения теплопроводности изменяются от 7.7 до 12.8 Вт/(м×К), что больше, чем для объемного материала $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$, используемого в радиоизотопных термоэлектрических генераторах [2], где теплопроводность составляет около 4 Вт/(м×К) в температурном диапазоне от 20°C до 900°C.

В докладе обсуждаются причины выявленного несоответствия, связанные со структурой изученных образцов, а также особенности и детали использованного метода определения теплопроводности и способы повышения достоверности результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект № 20-19-00720).

Литература

1. Mala S. A. et al. // Journal of Applied Physics. 2014. Т.116, № 1. С.014305.
2. Wang X.W. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. Т.93, № 19. С.193121.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света и фотолюминесценция нанопроволок GaAs

И.В. Калачев^{1,2}, И.А. Милёхин^{1,2}, Е.А. Емельянов¹, В.В. Преображенский¹, В.С. Тумашев¹,
А.Г. Милёхин¹, А.В. Латышев^{1,2}

¹ *Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск,
630090, Лаврентьева 13*

² *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Пирогова 2*

DOI 10.34077/SCATTERING95-102

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценция (ФЛ) являются методами, наиболее часто используемыми для оптического анализа полупроводниковых микро- и наноструктур.

Полупроводниковые нанопроволоки имеют потенциально широкое применение в различных областях наносенсорики, фотовольтаики и нанoeлектроники. В связи с этим, существует потребность в детальном изучении их оптических свойств. Несмотря на наличие работ по изучению спектров КРС и ФЛ от массивов нанопроволок, спектры от единичных нанопроволок мало изучены.

Данная работа посвящена изучению ФЛ и КРС на оптических фонах отдельных нанопроволок GaAs с ориентациями (111) и (001), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Структурные параметры нанопроволок GaAs, перенесённых на гладкую золотую подложку, определялись методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Обнаружена сильная анизотропия интенсивности сигналов КРС на оптических фонах GaAs и экситонной ФЛ в зависимости от выбора поляризации падающего света вдоль и поперёк нанопроволок. В спектрах резонансного КРС наблюдаются моды поперечных и продольных оптических фононов, и их обертона вплоть до 4го порядка. Построены спектральные карты распределения интенсивности сигналов КРС и ФЛ в микрометровом масштабе для серии нанопроволок с различными структурными параметрами. Обсуждается причина поляризационной зависимости ФЛ для нанопроволок GaAs разного диаметра (от 30 до 70 нм) и длиной несколько микрон. Обсуждаются механизмы резонансного КРС и поляризационно-зависимой ФЛ нанопроволок GaAs.

Исследование поддержано Российским Научным Фондом (грант №22-12-00302).

Использование микро-КР спектроскопии и подхода отдельных частиц для исследования локальной оптической неоднородности LiCoO_2

А.А. Рябин¹, Н.В. Годяев¹, Д.В. Пелегов^{1,2}

¹ *Институт естественных наук и математики УрФУ, Екатеринбург, 620002, пр. Мира, 19*

² *ЦК НТИ «Мобильные накопители энергии», Институт Электродвижения МФТИ
Московская область, г. Долгопрудный, 141701, Институтский пер., 9
тел.: +7 (902) 2655233, эл. почта: dmitry.pelegov@urfu.ru*

DOI 10.34077/SCATTERING95-103

Литий ионные аккумуляторы (ЛИА) сегодня являются самым популярным типом вторичных химических источников тока и используются в качестве накопителя энергии для портативной электроники, электротранспорта и возобновляемой энергетики. Ввиду бурного развития индустрии электромобилей и интеллектуальных электрических сетей быстро растёт и индустрия ЛИА. Этот рост стимулирует возникновение и модернизацию инструментов контроля качества производства материалов литиевых аккумуляторов.

Одним из наиболее перспективных кандидатов является спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС). Главными плюсами является возможность выявлять структурные и фазовые неоднородности малой концентрации, низкая стоимость оборудования, простота его использования, в том числе и непосредственно в производственных линиях, высокая скорость измерений. Хотя спектроскопия КРС довольно популярна среди исследователей ЛИА, большинство работ не полностью используют многие сильные стороны данного метода – например его достаточно высокое пространственное разрешение. Ранее нашей группой микро-КРС спектроскопии вместе с одночастичным подходом позволили выявить локальную неоднородность LiFePO_4 (LFP), популярного катодного материала ЛИА [1,2]. В этой работе мы используем аналогичный подход для исследования другого популярного катодного материала – LiCoO_2 (LCO). В отличие от прозрачного LFP, LCO является непрозрачным сильно поглощающим материалом. Тем не менее, это не помешало нам также выявить заметную оптическую неоднородность отдельных частиц LCO с размерами от 1 до 10 мкм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (No 22-22-00350, <https://rscf.ru/project/22-22-00350>).

Литература

1. А.А. Ryabin, D. V. Pelegov // *Appl Spectrosc.* 2022. V.76, iss.11. P.1335–1345.
2. А.А. Ryabin, D. V. Pelegov // *J Raman Spectrosc.* 2022. V.53, iss.9. P.1625–1634.

Комбинационное рассеяние света на пористом кремнии, полученном электрохимическим травлением с облучением в разных областях спектра

А.Я. Корец¹, О.В. Семенова¹, Д.А. Балахнин¹, И.Э. Олин¹,
А.С. Крылов²

¹ Сибирский Федеральный университет, Красноярск, 660074, Киренского, 28

² Институт физики им. Л.В. Киренского, Красноярск, 660036, Академгородок, 50
тел: +7(902) 924-9158, эл.почта: AKorets@sfu-kras.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-104

Пропоренный кристаллический кремний, как перспективный материал развития микроэлектроники и фотоники, в настоящее время интенсивно исследуется в разных направлениях: и теоретических, и экспериментальных. Являясь хорошо изученным и основным технологическим материалом современной бытовой электроники, кристаллический кремний было бы практически выгодно модифицировать к новым практическим применениям в микро- и нано-технологиях. Модификация химическим, электрохимическим и фотоэлектрохимическим травлением до нано-структурированного состояния подает надежду на успех в этом направлении со времени обнаружения фотолюминесценции пористого квантово-размерного состояния кремния в видимой области (подобно антистоксовой фотолюминесценции для объемного кремния). При отработке технологии получения пористого кремния (p-Si) с хорошими и стабильными оптоэлектронными свойствами часто облучают электролит при пропоривании светом разных источников. Для выяснения влияния разных спектральных диапазонов светового излучения на свойства получаемого p-Si были получены образцы по стандартной технологии электрохимического травления в растворе плавиковой кислоты из кристаллического кремния (100) n-типа. Одни образцы при травлении освещались УФ-излучением (200-400нм), другие светом видимого диапазона (400-800нм), третьи ближним ИК-излучением (800-1500нм) с использованием соответствующих источников и фильтров. От пористых поверхностей всех полученных образцов при комнатной температуре были получены спектры фотолюминесценции (ФЛ) в видимой области, соотносимые с литературными данными и подтверждающие пористое состояние кремния, и спектры комбинационного рассеяния лазерного света 532нм (КРС), представленные линиями с частотами 520,5 (с.), 620 (сл.), 670 (сл.), 820 (сл.), 960((дублет942/975) ср.)см⁻¹. Существенных различий ни в спектрах ФЛ, ни в спектрах КРС трех серий образцов с разным спектральным облучением не наблюдается. В КРС для самой сильной (с.) интенсивной линии 520,5см⁻¹ для всех трех серий происходит небольшое уширение в зависимости от местоположения точки-фокуса рассеивающего центра на пористой поверхности. Для других линий КРС в пределах аппаратного разрешения уширение не фиксируется. Широкая полоса ФЛ структурируется на ряд отдельных линий. Таким образом, влияние облучения разных спектральных диапазонов для p-Si не обнаружено.

Исследование рассеяния света от частиц железофосфата лития

А.А. Рябин¹, С.А. Мельников¹, В.Р. Сейсембаева¹, М.Г. Кособоков¹, Д.В. Пелегов^{1,2}

¹ *Институт естественных наук и математики УрФУ, Екатеринбург,
620002, пр. Мира, 19*

² *ЦК НТИ «Мобильные накопители энергии», Институт Электродвижения МФТИ
Московская область, г. Долгопрудный, 141701, Институтский пер., 9
тел: +7 (902) 151-9741, эл. почта: a.a.riabin@urfu.ru*

DOI 10.34077/SCATTERING95-105

При использовании микро-спектроскопии КР для исследования частиц микронного и субмикронного размеров важно максимально точно понимать геометрию распространения лазерного излучения в исследуемом объекте. Ранее нами была исследована локальность измерений спектров КР и выявлена существенная оптическая неоднородность для отдельных частиц железофосфата лития LiFePO_4 (LFP), популярного катодного материала для литий-ионных аккумуляторов [1,2]. Измерения показали не только дисперсию глубины проникновения излучения в прозрачном LFP, но также усиление сигнала КР-активной кремниевой подложки под частицей и блокировку отклика на её краях. Для более аккуратной интерпретации полученных результатов мы провели моделирование и дополнительные вертикальные КР-картирования частиц.

Моделирование проводилось методом конечных элементов в программном пакете Comsol Multiphysics. Решались гармонические дифференциальные уравнения, в основе которых лежат уравнения Максвелла. КР-картирование частиц производилось на отдельных частицах LFP на кремниевой подложке захватывая область выше частицы и ниже подложки.

Несмотря на то, что можно ожидать, что амплитуда моды кремния при 521 см^{-1} должна быть максимальной при положении фокуса луча на подложке без частицы, измерения показали, что его амплитуда примерно в полтора-два раза больше при фокусе на подложке под частицей и ниже. Блокировка сигнала кремния на краях варьируется от частицы к частице, при этом отклик уменьшен на всей высоте над и под выступом.

В то время как, для усиления КР сигнала существуют более эффективные методики, исследование актуально для интерпретации измерений и понимания области генерации сигнала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (No 22-22-00350, <https://rscf.ru/project/22-22-00350>).

Литература

1. А.А. Рябин, Д. В. Пелегов // Appl Spectrosc. 2022. V.76, iss.11. P.1335–1345.
2. А.А. Рябин, Д. В. Пелегов // J Raman Spectrosc. 2022. V.53, iss.9. P.1625–1634.

Изучение поверхностных электронных состояний в тонких пленках InSb, сформированных на монокристаллическом кремнии методом твердофазной эпитаксии

Д.Л. Горошко, С.В. Чусовитина, О.А. Горошко

Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, 690041, Радио, 5

тел: +7 (423) 232-0682, факс: +7 (423) 231-0926, эл. почта: goroshko@iacp.dvo.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-106

Индий-содержащие узкозонные полупроводники A3B5 InAs и InSb играют важную роль для многих потенциальных приложений в фотонных и электронных устройствах. Оптические и электрические характеристики делают эти материалы привлекательными не только для инфракрасных детекторов и излучателей, а также для высокоскоростных перспективных устройств фотоники. Несмотря на большое несоответствие решетки с InSb, Si по-прежнему является привлекательным материалом подложки из-за хороших достижений в развитии технологии кремниевых интегральных схем, а также широкой доступностью и относительно невысокой стоимостью кремниевых пластин большой площади. Важным вопросом, например, при формировании омических контактов к эпитаксиальным слоям InSb является положение уровня Ферми на поверхности. Для объемных поверхностей InSb(100), находящихся на воздухе, на основании КРС и Холловских измерений [1] был сделан вывод, что поверхностный уровень Ферми закрепляется близко к краю валентной зоны, вызывая поверхностный

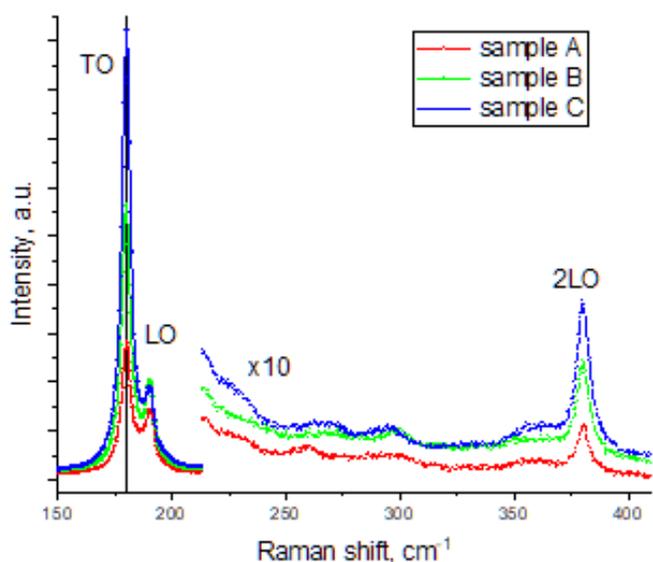


Рис. 1. КРС спектры пленок InSb, выращенных при различных условиях: А – без затравочных островков InSb; В – высокая температура отжига; С – с использованием затравочных островков.

спектры КРС от некоторых образцов, полученные в геометрии обратного рассеяния при возбуждении He-Ne лазером. Из анализа TO, LO и 2LO фоновых пиков были исследованы формирующиеся в пленках механические напряжения, интерфейсные состояния подложка-пленка и область пространственного заряда на поверхности пленки.

Литература

1. Geurts J. // Surface Science Reports. 1993. Т.18, № 1–3. С.1–89.
2. Soderstrom J.R. et al. // Semicond. Sci. Technol. 1992. Т.7, № 3. С. 337–343.
3. Wagner J. et al. // Appl. Phys. Lett. 1993. Т.63, № 3. С.349–351.

Тонкие пленки феррит-гранатов для нанофотоники: структурный анализ

Ю.Е. Высоких¹, Т.В. Михайлова², С.Ю. Краснобородько¹, В.Н. Бережанский², А.Н. Шапошников²,
М.Ф. Булатов¹, Д.В. Чуриков¹

¹ Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия

² Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, 295007, Симферополь, Россия

тел: +79262094163, эл. почта: visokiy@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-107

Магнитооптика, магнитофотоника и магнитоплазмоника остаются на острие научных интересов в последние годы из-за их уникальных возможностей управлять светом и электромагнитным полем. Висмут-замещенный железо-иттриевый гранат (Bi:IG) является одним из наиболее перспективных магнитооптических материалов для этих применений благодаря своей высокой эффективности в видимом и инфракрасном спектрах [1]. Возможность интеграции пленок Bi:IG в процесс производства кремниевых полупроводников приводит к созданию наноразмерных высокоэффективных магнитооптических устройств. Bi:IG структуры различного состава могут быть нанесены методом вакуумного осаждения на различные типы подложек. Исследование процесса кристаллизации двухслойных пленок Bi:IG при различных параметрах процесса на подложках из гадолиний-галлиевого граната и плавленого кварца, позволяет определить зависимости и выработать рекомендации по интеграции Bi:IG в полупроводниковый процесс или многокомпонентные оптические наноструктуры.

Пленки различного состава, нанесенные на различные подложки (гадолиний-галлиевый гранат и плавленый кварц) наноразмерной толщины, были синтезированы методом вакуумного распыления и термического отжига на воздухе. Кривые подвода-отвода в АСМ, полученные для каждого образца, используются для расчета топографических карт, карт жесткости и адгезии, которые могут выявить различную фазу граната на поверхности. Это возможно путем анализа наклона, длины и залипания кривых. Спектры комбинационного рассеяния света помогают нам понять симметрию внутренней структуры и ее изменение, вызванное различными параметрами процесса. Из-за наличия 3-х различных решеток в структуре граната идентификация наблюдаемых сигналов сопряжена с большой сложностью.

Сравнение различных методов кристаллизации выполняется путем анализа рельефа тонких пленок путем сравнения топографических карт поверхности и данных кривых подвода-отвода, а также путем определения гранатовой фазы методом комбинационного рассеяния.

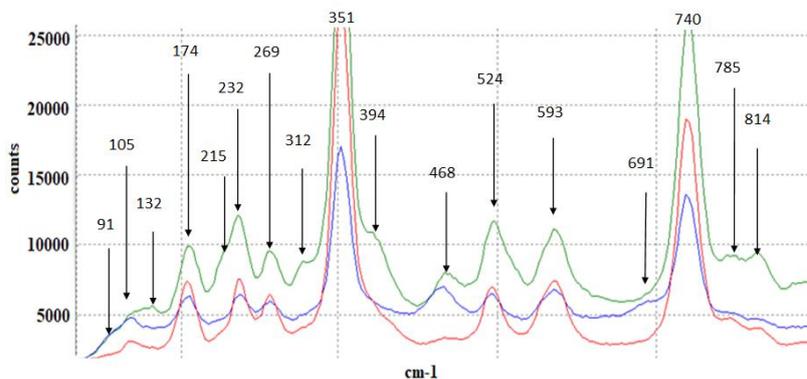


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света подложки GGG – красный, пленки Bi_{2.8}Y_{0.2}Fe₅O₁₂ на GGG – синий, пленки Bi_{1.0}Lu_{0.5}Gd_{1.5}Fe_{4.2}Al_{0.8}O₁₂ на GGG – зеленый.

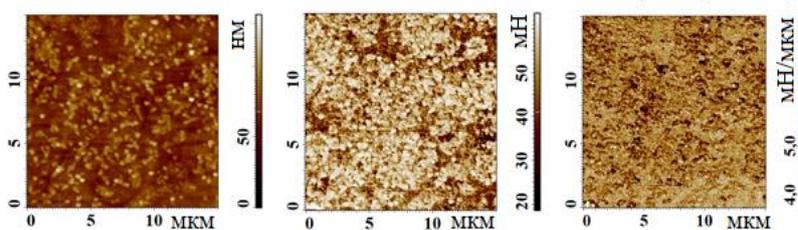


Рис. 2. Карты топографии (слева), жесткости (в центре) и адгезии тонкой пленки Bi:IG на подложке плавленого кварца.

Литература

1. Магнитофотоника (ред. Иноуэ М., Леви М., Барышев А.; Шпрингер, Берлин, Гейдельберг, 2013).

Эффект агломератов и воздействия ультразвука на поглощающие способности коллоидного раствора нанопроволок кобальта

Е.П. Кожина^{1,2}, С.А.Бедин^{2,3}, С.С. Косолобов¹, В.П. Драчев¹

¹ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

² Физический институт им. П.Н.Лебедева, Москва, 119991, Ленинский пр. 53

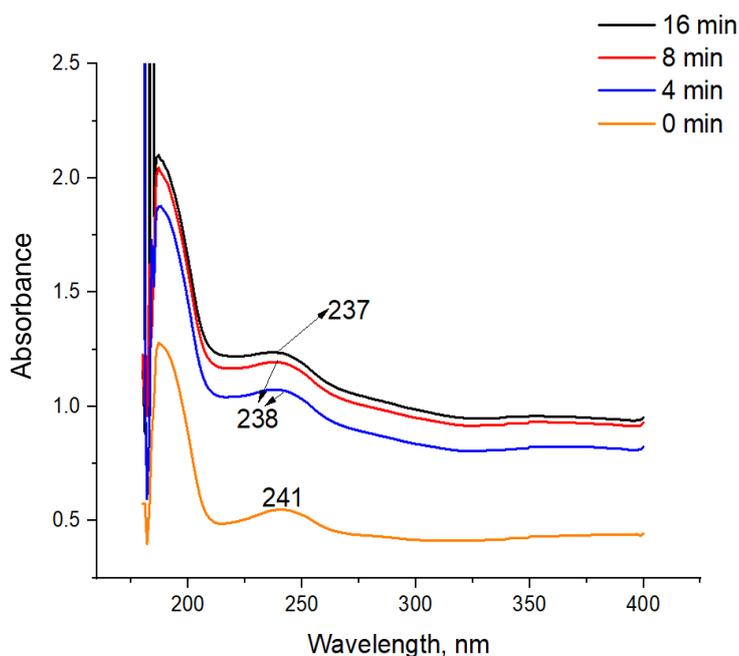
³ ФНИЦ «Кристаллографии и фотоники» РАН, Москва, Россия

эл. почта: liza.kozhina.99@mail.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-108

Магнитная природа наночастиц кобальта объясняет особенности их взаимодействия со светом. Ввиду существования в одной частице двух плазмонов с разной электронной релаксацией, обусловленных наличием электронов со спинами разной ориентации, система может иметь плазмонный резонанс в УФ области с возможностью его «отключения» за счёт процессов агломерации [1]. Одним из перспективных направлений синтеза наноструктур является метод шаблонного синтеза. Используя в качестве шаблона трековую мембрану (ТМ), можно проводить электрохимическое осаждение в ее поры необходимого для конкретной задачи металла в чистом виде, в том числе и серебра, обладающего плазмонными свойствами в видимом диапазоне [2]. В результате синтеза получаются металлические нанопроволоки диаметр которых определяется диаметром пор ТМ, а длина временем осаждения. После растворения шаблона в концентрированном растворе щелочи и промывки получается раствор наночастиц с заданной длиной и диаметром в растворе.

Получаемые наночастицы кобальта имеют магнитную природу, проблемой такой системы является



сильная агломерация, приводящая к ухудшению поглощающей способности коллоидного раствора из-за увеличения размера наночастиц и уменьшения их локальной концентрации в растворе. Одним из способов избежать негативного влияния агломератов является их разрушение ультразвуком, а также стабилизация наночастиц поверхностно-активными веществами.

Оценка воздействия ультразвука на наночастицы в растворе является отдельной научной задачей, требующей детального рассмотрения. С одной стороны, воздействие ультразвука на поглощающие способности коллоидного раствора нанопроволок кобальта может привести к улучшению их диспергирования и стабилизации. Также, ультразвук механически измельчает наночастицы на более мелкие, и помогает

предотвратить образование агломератов. В результате ультразвукового воздействия можно получить более стабильный коллоидный раствор нанопроволок кобальта с улучшенными поглощающими свойствами. На графике (см. рис.) представлена зависимость поглощающей способности водного раствора наночастиц кобальта в зависимости от времени воздействия на него ультразвуком. Один и тот же образец несколько раз последовательно подвергался воздействию УЗ с интервалом в 4 минуты. Из-за того, что положение пиков поглощения стабильно, можно сделать вывод, что уменьшения размера нанопроволок не произошло, но агломераты были разрушены. Отдельно стоит отметить, что в процессе обработки ультразвуком важно избежать перегрева раствора, вызванного кавитацией, что приводит к окислению кобальта с последующей потерей плазмонных свойств.

Литература

1. Bhatta, H.L., Aliev, A.E., & Drachev, V.P. // Scientific Reports. 2019., V.9 №1.
2. Kozhina E.P., Bedin S.A. et. al. // Biosensors. 2023. V.13, №1, P.46.

ГКР исследование ацетиленовых соединений: выбор репортера для биометок на основе анизотропных наночастиц золота

А.И. Деменьшин, В.О. Свинко, А.Н. Смирнов, Е.В. Соловьева
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
198504, Университетский пр. 26
тел: +7 (953) 602-8563, эл. почта: st087334@student.spbu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-109

В настоящее время интенсивно разрабатываются методы биовизуализации, основанные на эффекте комбинационного рассеяния света (КР). Они обладают рядом преимуществ перед флуоресцентной микроскопией, в частности такими как: возможность работы в окне прозрачности биологических тканей (640-950 нм), получение информации о строении образца на молекулярном уровне, меньшая нагрузка образца агентом визуализации. Однако из-за малой вероятности процесса неупругого рассеяния света, КР обладает низкой оптической эффективностью. Одно из решений настоящей проблемы состоит в использовании наночастиц благородных металлов, способных дать усиление сигнала КР за счёт эффекта локализованного поверхностного плазмонного резонанса, ЛППР). Данное явление известно как Гигантское комбинационное рассеяние (ГКР).

Для целей биовизуализации ведутся разработки ГКР-меток, состоящих из плазмонной частицы, покрытой защитной оболочкой, в которую инкапсулированы молекулярные КР-репортеры, и к поверхности которой конъюгированы векторы доставки. Использование наночастиц благородных металлов не только способствует усилению сигнала от репортера, но и даёт возможность проведения гипертермальной терапии. Ацетиленовые производные в спектроскопии КР имеют сигналы в так называемой “тихой” области (1800-2800 см⁻¹), свободной от помех со стороны клеточных компонентов, поэтому являются наиболее привлекательными для использования в качестве КР-репортеров. Известен даже отдельный метод алкин-нацеленной КР визуализации (alkyne-tag Raman imaging, ATRI) [1]. Препграда более бурного развития этого метода состоит в том, что нормальные колебания связи С≡С проявляются в КР спектрах только для ограниченного круга соединений, и ещё для меньшего их количества такие колебания активны в ГКР. Вероятность их проявления в спектрах ГКР определяется не только поляризуемостью связи С≡С в молекуле, но и сродством молекулы к поверхности плазмонной частицы [2].

В настоящей работе изучены спектры ГКР и проведена оценка цитотоксичности для широкого круга ацетиленовых производных красителей (в частности, цианина и ВDP), биоактивных соединений (биотин, нуклеозид уридин) и отдельных сопряженных полиароматических соединений (толан, перилен) с целью выбора репортера для ГКР меток биовизуализации. В качестве плазмонных субстратов использованы наноразмерные анизотропные частицы золота в силу сдвига их полосы ЛППР в красную область спектра. Проведенные исследования показали, что проблема универсального ацетиленового ГКР репортера, который обладал бы интенсивным сигналом, хорошей растворимостью в воде и низкой цитотоксичностью, остается открытой.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-73-10052, <https://rscf.ru/project/22-73-10052/>. Авторы благодарят центры СПбГУ: «Оптические и лазерные методы исследования вещества», «Методы анализа состава вещества».

Литература

1. H. Yamakoshi et al. Imaging of EdU, an Alkyne-Tagged Cell Proliferation Probe, by Raman Microscopy // JACS. 2011. Vol.133, №16. P.6102-6105.
2. B. Andreiuk et al. Design and synthesis of gold nanostars-based SERS nanotags for bioimaging applications // Nanotheranostics. 2022. Vol.6, №1. P.10-30.

Формирование и исследование свойств ГКР-подложек на основе массивов наночастиц, полученных путем низкотемпературного отжига тонких пленок серебра

Т.С. Гришин^{1,2}, Л.С. Волкова^{1,2}, И.А. Михайлов¹, Е.В. Латипов¹, П. А. Едельбекова^{1,2}

¹ ФГБУН ИНМЭ РАН, Москва, 119991, Ленинский проспект, д. 32А

² НИУ МИЭТ, Москва, 124498, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

тел: +7 (926) 166-4076, эл. почта: grishin.t@outlook.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-110

Создание эффективных, стабильных и воспроизводимых подложек для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния является актуальной задачей для развития метода. Наиболее распространенным типом таких подложек является массив плазмонных наночастиц на поверхности твердого тела. Существует несколько подходов к формированию таких подложек, наиболее распространенными из которых являются методы жидкой химии. Как правило, подложки, созданные таким образом, имеют нерегулярное распределение наночастиц по поверхности и, соответственно, распределение интенсивности сигнала КРС. Эта проблема может быть решена путем создания массивов плазмонных наночастиц фотолитографическими методами, однако такой подход крайне трудозатратен.

Регулярные массивы плазмонных наночастиц на поверхности могут быть сформированы путем отжига тонких металлических пленок, полученных методами вакуумного напыления [1]. При таком подходе, размеры и распределение наночастиц гораздо лучше контролируются по сравнению с методами жидкой химии, а трудозатратность значительно меньше по сравнению с литографическими методами.

Представлен метод создания ГКР-подложек на основе массивов плазмонных наночастиц, полученных с помощью низкотемпературного отжига тонких островковых пленок серебра на воздухе и в инертной среде. Исходные тонкие пленки формировались методами вакуум-термического и магнетронного напыления. Исследованы геометрические и оптические свойства массивов, сформированных отжигом исходных пленок различной толщины при температурах от 80°C до 400°C.

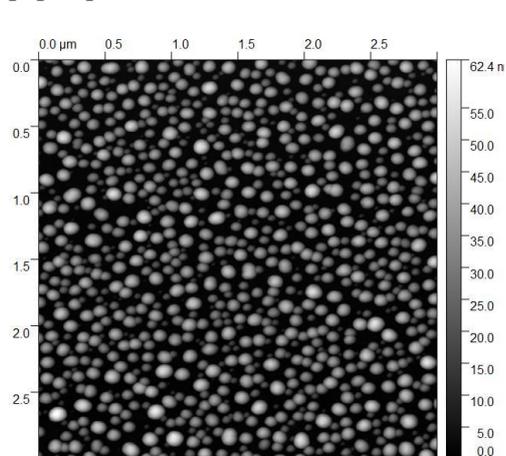


Рис. 1. АСМ-карта массива наночастиц сформированных из тонкой пленки серебра, отожженной в инертной среде при 200°C.

Определение геометрических размеров массивов проводилось методами атомно-силовой микроскопии и растровой электронной микроскопии. Исследование элементного состава, в том числе примесей, связанных с длительным хранением подложек, проводилось методом Оже-электронной спектроскопии и энерго-дисперсионного анализа. Спектры комбинационного рассеяния регистрировались на длине волны возбуждения 532 нм и времени экспозиции 1 с. Были получены сигналы КР раствора красителя малахитовый зеленый концентрации 10^{-6} М на исследуемых ГКР-подложках различных конфигураций. Для вычисления коэффициентов усиления сигнала КР полученные спектры сравнивались со спектром раствора красителя концентрации 10^{-2} М, нанесенного на стекло.

Получены зависимости размеров наночастиц от температуры отжига для различных толщин исходных пленок, изучено влияния геометрических параметров массивов наночастиц на коэффициент усиления сигнала

комбинационного рассеяния. Дополнительное увеличение коэффициента усиления сигнала комбинационного рассеяния было достигнуто на подложках с зеркальным подслоем, отделенным от массива наночастиц тонкой оптически прозрачной пленкой SiO₂.

Литература

1. Gromov D.G. et al., Appl. Phys. A, 118, 1297 (2015).

Исследование влияния изменения поверхности пленок Ag под воздействием окружающей среды на спектры комбинационного рассеяния света

И.А. Михайлов^{1,2}, Т.С. Гришин¹, Е.В. Латипов¹, П. А. Едельбекова¹, Л.С. Волкова¹

¹ ФГБУН ИНМЭ РАН, Москва, 119991, Ленинский проспект, д. 32А

² НИЯУ «МИФИ», Москва, 115409, Каширское ш., д. 31

тел: +7 (925)67-25-67-7, эл. почта: i.mikhaylov1996@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-111

Одной из актуальных задач для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) является создание наиболее эффективных, стабильных и воспроизводимых подложек. Наночастицы серебра на поверхности твердого тела могут усиливать сигнал КР в 10^4 - 10^6 раз [1]. Однако, ввиду склонности серебра к окислению на воздухе с последующей его сульфидизацией, такие подложки теряют свою эффективность со временем.

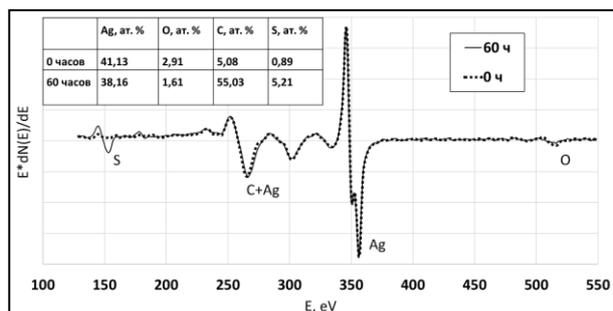


Рис. 1. Оже-спектр поверхности для исходного образца (0 часов) и 60 часов экспонирования на воздухе.

Изучение изменения элементного состава поверхностных слоёв пленок серебра в этой работе проводилась методом Оже-электронной спектроскопии (ОЭС). В отличие от работ [1,2], в которых проводились исследования изменений элементного состава поверхности подложек для ГКР в виде сплошной пленки серебра и наночастиц серебра, нами было обнаружено замещение кислорода серой с течением времени без увеличения количества углеводородных загрязнений (рис. 1).

В спектрах диффузного отражения присутствуют две полосы с максимумами – 312

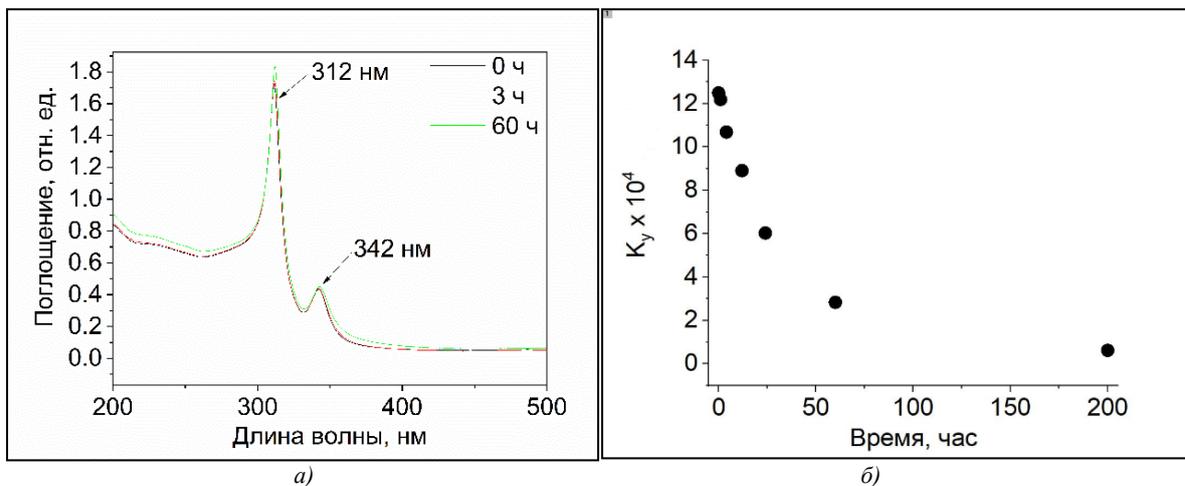


Рис. 2. а) – спектры диффузного отражения; б) – изменение коэффициента усиления комбинационного рассеяния от времени выдержки подложек на воздухе.

нм и 342 нм (рис. 2а), что указывает на наличие бимодального распределения наночастиц серебра на поверхности подложки. С увеличением времени выдержки подложек на воздухе коэффициент усиления комбинационного рассеяния K_y экспоненциально убывает (рис. 2б), что по результатам исследования элементного состава (ОЭС) связано либо с окислением поверхности образца, либо с его сульфидизацией.

Литература

1. Matikainen A. et al. Atmospheric oxidation and carbon contamination of silver and its effect on surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS). Scientific reports. – 2016. – Т. 6. – №. 1. – С. 1-6.
2. Landoulsi, J. et al. Organic adlayer on inorganic materials: XPS analysis selectivity to cope with adventitious contamination. Appl. Surf. Sci. 383, 71–83 (2016).

Создание и исследование свойств подложек для спектроскопии ГКР на основе наностолбиков TiO_x , декорированных наночастицами металлов

Л.С. Волкова^{1,2}, Т.С. Гришин^{1,2}, И.А. Михайлов¹, Д.В. Новиков², Е.В. Латипов¹

¹ ФГБУН ИНМЭ РАН, Москва, 119991, Ленинский проспект, д. 32А

² НИУ МИЭТ, Москва, 124498, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

тел: +7 (985) 144 51 01, эл. почта: Lidiya.Volkova.96@outlook.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-112

Возможность детектирования малых концентраций молекулярных биологических и химических объектов является основной задачей спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния и находит применение в медицине, криминалистике, биологических и химических исследованиях. Основными преимуществами метода являются высокая чувствительность, а также простота пробоподготовки. В качестве подложки для спектроскопии ГКР традиционно используются массивы на основе наночастиц металлов, в основном Ag, Au, Cu. [1]

Одним из перспективных вариантов реализации подложек для ГКР является структура на основе наностолбиков TiO_x , декорированных наночастицами металлов. Такая структура позволяет увеличить площадь поверхности металлических наночастиц, а фотокаталитические свойства TiO_x позволяют при определенной подготовке использовать такие подложки многократно для детектирования различных объектов.

Наностолбики TiO_x были получены путем двухстадийного анодного окисления структуры Si/SiO₂/TiN/Al. Анодирование проводилось в серной и щавелевой кислотах, с помощью выбора кислоты и ее концентрации возможно управлять разреженностью массива наностолбиков. Для придания массиву плазмонных свойств производилось напыление тонкой пленки Cu, которая в процессе отжига в инертной атмосфере разрывалась и собиралась в капли на вершинах наностолбиков.

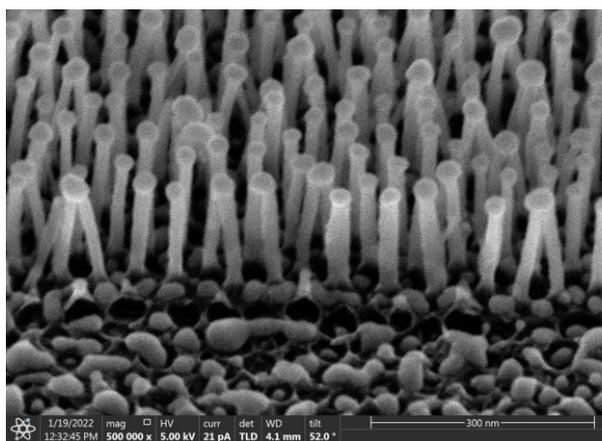


Рис. 1. РЭМ-изображение полученных плазмонных наноструктур

усиления сигнала комбинационного рассеяния составляли $10^4 - 10^6$.

Для изучения фотокаталитических свойств исследуемых подложек, подложки подвергались облучению УФ в течении различного времени и промывались деионизованной водой, после чего снова регистрировались комбинационного рассеяния. Таким образом было показано, что родамин 6G был полностью удален с поверхности подложки и она снова становилась пригодной для использования.

Геометрические размеры массивов определялись с помощью растровой электронной микроскопии. Элементный состав структуры определялся с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и Оже-электронной спектроскопии. Для изучения плазмонных свойств полученных структур регистрировались спектры комбинационного рассеяния раствора красителя родамин 6G с концентрацией 10^{-4} и 10^{-6} М, нанесенного на исследуемые подложки. Спектры регистрировались при длине волны возбуждения 532 нм и 633 нм и времени накопления сигнала 1 с. Для определения коэффициентов усиления сигнала комбинационного рассеяния полученные спектры сравнивались со спектрами раствора родамина 6G концентрацией 10^{-2} М на стеклянной подложке. Определенные коэффициенты

Литература

1. S.V. Dubkov et al., Optical Materials: X, 7, 100055 (2020).

Разработка планарных ГКР-структур на основе массива серебряных наночастиц для детектирования биомаркеров сердечно-сосудистых болезней

С.В. Дубков², С.А. Завацкий¹, А.В. Бондаренко^{1,2}, А.А. Бурко¹, Д.В.Новиков², П.А. Едельбекова³,
А.А. Беставашвили⁴

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,

Беларусь, Минск, 220013, ул. Петруся Бровки, 6

тел.: +375297525144, эл. почта: h.bandarenka@bsuir.by

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Россия,

Зеленоград, Москва, 124498, пл. Шокина, д.1

тел: +79168553408, эл. почта: sv.dubkov@gmail.com

³ Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук,

Россия, Москва, 115487, ул. Нагатинская, д. 16а, корпус 11

тел: +79017209331, эл. почта: edelbekova.p@inme-ras.ru

⁴ Институт персонализированной кардиологии Центра «Цифровой биодизайн и персонализированное здравоохранение», ФГАОУ ВО "Первый Московский Медицинский университет им.И.М.Сеченова"

МЗ РФ (Сеченовский Университет), Россия, Москва, 119435, ул. Б.Пироговская, д. 6

тел: +7 499 248-34-77, эл. почта: afinabestavashvili@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-113

На сегодняшний день перспективным методом анализа является спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР), благодаря высокой скорости, чувствительности и точности проводимых измерений. Сферами её применения являются химическая и пищевая промышленности, экология и медицина. В последнем случае ГКР может применяться для обнаружения маркеров заболеваний, содержащихся в биологических жидкостях. Одним из таких маркеров выступает триметиламин оксид (ТМАО), рост концентрации которого в крови свыше 10 мкМ говорит о повышенном риске возникновения сердечно-сосудистых заболеваний. Основной проблемой является сложность детектирования ТМАО - стандартные методики измерения ГКР не могут обеспечить порог чувствительности ниже 100 мкМ. Таким образом возникает потребность в разработке новых планарных ГКР-структур и методики измерения ТМАО-содержащих аналитов.

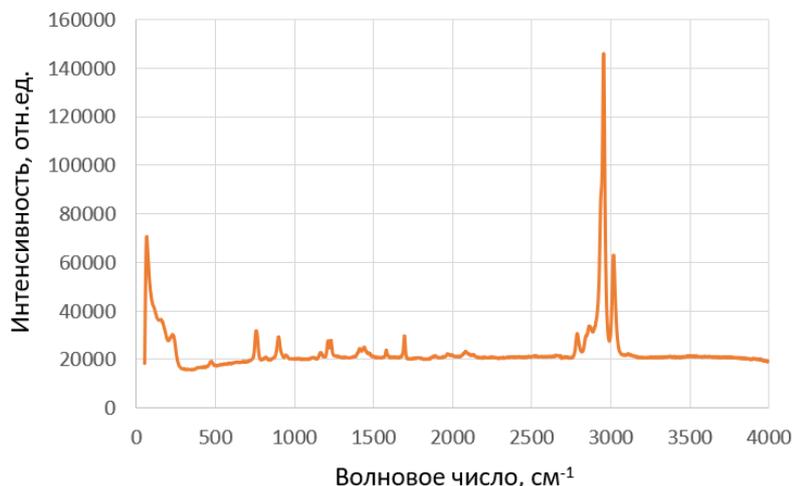


Рис. 1. Спектр комбинационного рассеяния света для ТМАО концентрацией 10 мкМ

На рисунке 1 приведен спектр комбинационного рассеяния света, полученный с планарной ГКР-подложки на основе Ag наночастиц с диаметром ~40 нм для ТМАО с концентрацией 10 мкМ.

Авторы выражают благодарность профессору, д.т.н. Громову Д.Г. и профессору, д.м.н. Копылову Ф.Ю. за помощь в обсуждение результатов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00761, <https://rscf.ru/project/21-19-00761/>.

В данной работе использовались планарные ГКР-подложки структуры: Si/SiO₂ 300 нм/Cr/Ag 100 нм/SiO₂ 20 нм/Ag 5-15 нм. В качестве аналитов применялись спиртовой раствор DTNB и водные растворы ТМАО мили-, микро- и наномолярной концентрации. Нанесение аналитов на ГКР-подложку производилось с помощью микродозатора дозатора в виде капель 2 мкл. Для съемки КР-спектров использовался inVia Renishaw на длинах волн 532 нм, с мощностью лазера от 0.5 до 5 мВт и фокусной линзой x50.

Факторы, влияющие на коэффициент усиления серебряных SERS-подложек

П.А. Едельбекова^{1,2}, Е.В. Латипов¹, Т.С. Гришин^{1,2}

¹ ФГБУН ИНМЭ РАН, Москва, 119991, Ленинский проспект, д. 32А

² НИУ МИЭТ, Москва, 124498, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

тел: +7 (901) 720-93-31, эл. почта: polinaedel51@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-114

Комбинационное рассеяние (КР) с поверхностным усилением (SERS) является эффективным и уникальным аналитическим методом, который широко применяется в самых разнообразных сферах науки [1]. Благодаря поверхностному плазмонному резонансу, в качестве усиливающих SERS-подложек часто используются металлические подложки, обладающие большим количеством свободных электронов (например Au, Ag, Al, Cu и т.д.).

Коэффициент поверхностного усиления (G_{SERS}) комбинационного рассеяния во многом зависит от конструкции, морфологии, качества самой подложки, условий измерения спектров. При использовании химически активных подложек важно учитывать особенности взаимодействия аналита и растворителя с поверхностью, поэтому в данной работе рассматриваются вопросы подбора оптимальной системы: аналит-растворитель для подложки на основе Ag наночастиц.

В качестве подложки во всех измерениях использовались SiO_2 с нанесенными наночастицами Ag сферической формы. Средний размер наночастиц равен 9 нм. Степень заполнения составляет около 39%. В качестве аналитов использовались красители Crystal Violet, Malachite Green, Methylene Blue и Rhodamine 6G (рис1). Эффективность различных растворителей (воды, изопропиловый спирт, этиловый спирт, метиловый спирт) для исследуемых аналитов оценивалась на основании коэффициента усиления, рассчитываемого по формуле: $G_{SERS} = \frac{I_{SERS}}{I_{rs}} * \frac{C_{rs}}{C_{SERS}}$. Где I_{SERS} – абсолютная интенсивность аналита на исследуемой подложке, I_{rs} – абсолютная интенсивность образца сравнения, C_{SERS} – молярная концентрация аналита на исследуемом образце, C_{rs} – молярная концентрация аналита на образце сравнения.

Для определения G_{SERS} на красителях Crystal Violet, Malachite Green, Methylene Blue выбрана полоса $\nu_{str}(C-C) = 1617 \text{ см}^{-1}$, которая проявляется во всех спектрах и является наиболее интенсивной.

В работе определена зависимость G_{SERS} подложек от временных характеристик: корреляция эффективности усиление подложки от времени между нанесением раствора аналита и съемкой КР спектра; влияние времени, прошедшего между приготовлением раствора аналита и съемкой КР спектра, на G_{SERS} .

На основании результатов, полученных в данной работе, можно составить методические рекомендации по проведению измерений, обеспечивающие более высокое качество КР спектров, получаемых на серебряных SERS подложках.

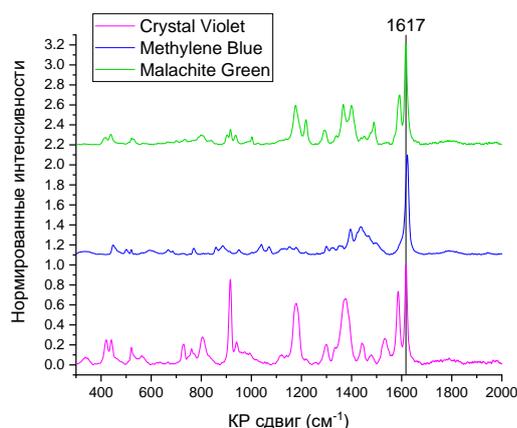


Рис. 1. Внешний вид КР спектров красителей Crystal Violet, Malachite Green, Methylene Blue.

Литература

1. Pilot, R.; Signorini, R.; Durante, C.; Orian, L.; Bhamidipati, M.; Fabris, L. A Review on Surface-Enhanced Raman Scattering. Biosensors 2019, 9, 57.
2. Angeloni, L., Smulevich, G., & Marzocchi, M. P. (1979). Resonance Raman spectrum of crystal violet. Journal of Raman Spectroscopy, 8(6), 305–310.

Исследование методом КРС спектроскопии феррита $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_{3-\gamma}$

К.А. Гавриличева¹, О.И. Баркалов¹

¹ Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка, Россия

142432, Академика Осипьяна, 2

тел: +7 (926) 849-2231, эл. почта: xenia.gavrilicheva@issp.ac.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-115

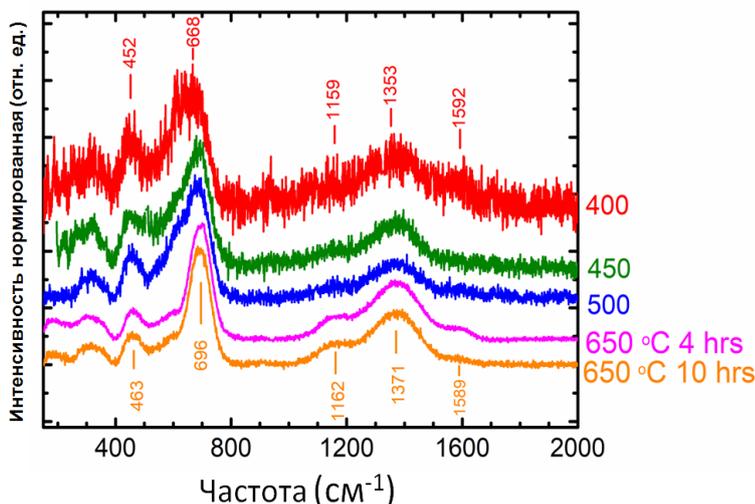


Рис. 1. КРС спектры ферритов $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_{3-\gamma}$. Образцы отжигали в вакууме (10^{-3} мм рт. ст., 4 часа) при 400 - 650°C. Интенсивности спектров нормированы на амплитуду пика при ~ 670 cm^{-1}

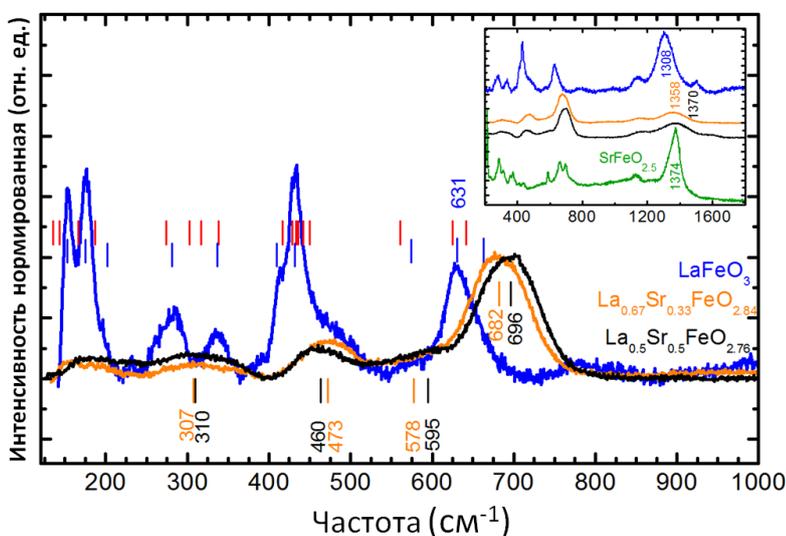


Рис. 2. КРС спектры смешанных ферритов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FO}_{3-\gamma}$ с ионами железа Fe^{3+} . Красные вертикальные штрихи обозначают экспериментальные результаты для LaFeO_3 , представленные в [1]; оранжевая кривая – из [2]. На вставке - спектры в широком диапазоне частот

Литература

1. M.C. Weber et al., Raman spectroscopy of rare-earth orthoferrites RFeO_3 ($\text{R} = \text{La}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$), Phys. Rev. B. 94 (2016) 214103.
2. V. Sedykh et al., Role of Fe atom valence states and oxygen vacancies in substituted lanthanum ferrite $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{FeO}_{3-\gamma}$, J. Phys. Chem. Solids. 171 (2022) 111001.

В смешанных ферритах, синтезированных золь-гель методом, $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_{3-\gamma}$ с повышением температуры вакуумного отжига (Рис. 1) происходит постепенная потеря кислорода и рост количества кислородных вакансий.

В работе [1] методом КРС спектроскопии были изучены ферриты редкоземельных элементов и проведены расчеты для LaFeO_3 , которые позволили отнести наблюдаемые в настоящей работе пики, при частотах ниже 1000 cm^{-1} , к модам колебаний Fe-O (Рис. 2).

Высокочастотные пики (>1000 cm^{-1}) были отнесены к двухмагнному рассеянию по аналогии с антиферромагнетиком LaFeO_3 .

С ростом температуры вакуумного отжига уменьшается ширина и растет амплитуда пиков КРС спектров, что говорит о понижении степени дефектности кристаллической структуры.

Появление кислородных вакансий в смешанных ферритах приводит к заметному повышению частоты двухмагнного пика (вставка, рис. 2).

Системы вайраakit-вода и филлипсит-вода в условиях зоны холодной субдукции

У.О. Бородина¹, С.В. Горяинов¹, С.Н. Крылова², А.С. Крылов², А.Н. Втюрин²

¹Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, 630090, Академика Коптюга пр., 3

²Институт физики СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок ул., 50-38

тел: +7 (913) 204-0912, эл. почта: borodinauo@igm.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-116

Методом *in situ* КР-спектроскопии были изучены стабильность цеолитов вайраакита состава $\text{Ca}_{0.95}\text{Na}_{0.06}[\text{Al}_{1.96}\text{Si}_{4.04}\text{O}_{12}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и филлипсита, $\text{K}_2(\text{Ca}_{0.5}, \text{Na})_4[\text{Al}_{6.18}\text{Si}_{9.86}\text{O}_{32}] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, при сжатии в водной среде в алмазной ячейке при одновременно высоких *P-T* параметрах. Эксперименты были проведены с помощью спектрометра Horiba Jobin Yvon T64000 (ИФ СО РАН).

В ходе сжатия в водной среде вайраakit сохраняет кристаллическую структуру до $T = 250$ °С и $P = 0.4$ ГПа, после чего претерпевает полиморфный переход. При $T = 300-450$ °С и $P = 1$ ГПа КР-спектр кристаллического вайраакита почти исчезает и вайраakit претерпевает аморфизацию, которая, вероятно, частично обратима. После частичного растворения вайраакита из флюида происходит рост кристаллов другого цеолита, филлипсита. Кроме филлипсита, среди продуктов эксперимента была найдена неизвестная фаза X с интенсивными дуплетными модами при 412 и 435 cm^{-1} . Спектр можно сравнить со спектром эпистилбита (группа морденита) с сильной дуплетной модой при 410 и 438 cm^{-1} и со спектром Са-шабазита (группа шабазита) с сильными модами при 454 и 481 cm^{-1} .

Большая часть точек эксперимента лежит между зон стабильности ломонтита и системы лавсонит + кварц + флюид (рис. 1). Филлипсит кристаллизовался в области верхнего предела стабильности вайраакита по давлению, что, наиболее вероятно, связано с быстрой кинетикой данного перехода. Реакция разложения вайраакита на лавсонит и кварц не наблюдалась, вероятно, ввиду её низкой кинетической способности и растворения вайраакита в избытке воды.

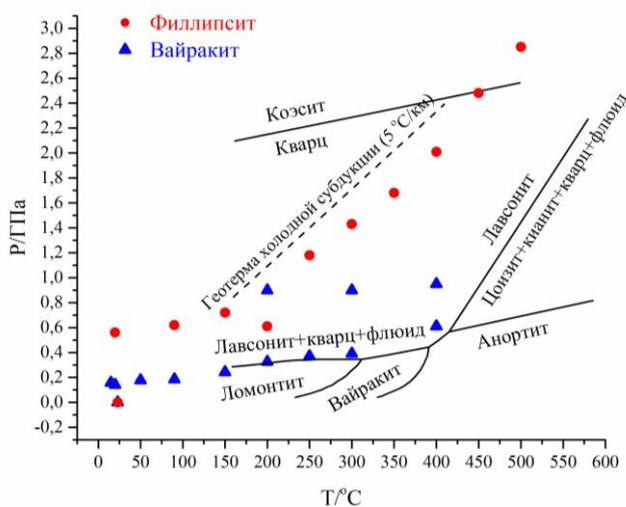


Рис. 1. *P-T* диаграмма системы вайраakit-вода с точками наших экспериментов в сжатии филлипсита (красные круги) и вайраакита (синие треугольники).

При сжатии в водной среде филлипсит не претерпевает полиморфных переходов при исследованных *P-T* параметрах. При параметрах около 1.7 ГПа, 350 °С начинается аморфизация филлипсита; при 2.85 ГПа, 500 °С, филлипсит полностью растворяется и, вероятно, разлагается, но продуктов разложения в кристаллической форме мы не наблюдаем. В сравнении с вайраакитом, растворение которого в водной среде начинается при $P \geq 0.4$ ГПа, $T \geq 300$ °С, филлипсит обладает большей стабильностью при исследуемых условиях. Таким образом, наше *in situ* наблюдение трансформации вайраакита в филлипсит (основной продукт разложения) и *P-T*-исследование стабильности филлипсита могут служить подтверждениями того, что филлипсит среди Са-цеолитов наиболее стабилен в зоне холодной субдукции в океанических осадочных породах, что согласуется с исследованиями, проведёнными Программой Океанического Бурения [1].

Литература

1. F. Vitali, et al. // Clays and clay minerals. 1995. V.35. P. 92-104.

Ангармонизм колебаний решетки магний-алюминиевой шпинели с неупорядоченным распределением катионов по позициям

Л.Я. Сушанек¹, Ю.В. Щапова^{1,2}

¹ Институт Геологии и Геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, 620016, ул. Академика Вонсовского 15

² Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, 620062, ул. Мира 21
эл. почта: lev.sushanek@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-117

Шпинель $MgAl_2O_4$ (пр.гр. $Fd\bar{3}m$) представляет интерес для исследования в связи со своими радиационными, химическими, термическими, оптическими свойствами и разработкой на ее основе функциональных материалов. Обращение структуры, т.е. нарушение упорядоченного распределения катионов Mg^{2+} и Al^{3+} по тетра- (IV) и окта- (VI) позициям, существенно влияет на свойства материала. Ангармонизм колебаний – один из важных параметров динамики решетки; он проявляется в спектрах комбинационного рассеяния света (КР) в изменении энергии, интенсивности, ширины колебательных мод в зависимости от температуры.

Цель настоящей работы – определение влияния катионного разупорядочения на ангармонизм колебаний решетки шпинели $IV(Mg_{1-\delta}Al_{\delta})^{VI}(Al_{2-\delta}Mg_{\delta})O_4$, где δ – параметр разупорядочения, методом спектроскопии КР в диапазоне температур $T=77-873$ К. Измерения выполнены на спектрометре Horiba LabRam HR 800 Evolution с термоприставкой Linkam THMS 600. Исследуемые образцы – монокристаллы природной низкопримесной шпинели (Кухилал, Юго-Западный Памир) и синтетической керамики $MgAl_2O_4$, полученной методом горячего прессования; для частичного разупорядочения природных образцов использован лабораторный отжиг на воздухе (700-760 °С, 3 часа) с закалкой в воде.

Для спектров шпинели с упорядоченным распределением катионов, $\delta=0$, характерны моды 311 (F_{2g}), 408 (E_g), 670 (F_{2g}), 727 (A_{1g}), 770 cm^{-1} (A_{1g}); в спектрах шпинели с $0 < \delta < 1$ регистрируются дополнительные моды 720 (A_{1g}), 380 (E_g), ~ 302 и ~ 220 cm^{-1} [1]. Температурные зависимости положения и ширины колебательных мод (см. рис.1 на примере моды E_g) демонстрируют различия в зависимости от степени катионного разупорядочения. Положение моды E_g деформационных колебаний тетраэдрических группировок MgO_4 при 408 cm^{-1} наименее чувствительно к катионному перемешиванию: значения изобарического параметра $\left(\frac{\delta v_i(T)}{\delta T}\right)_P$ при $T=293K$ для упорядоченной природной и неупорядоченной синтетической шпинели близки (-0.0111 и -0.0108 cm^{-1}/K , соответственно); значение указанного параметра для дополнительной E_g моды 380 cm^{-1} почти в два раза выше (-0.0199 cm^{-1}/K). Анализ ангармонизма колебаний по известному соотношению $\left(\frac{\delta v_i(T)}{\delta T}\right)_P = -\frac{\beta}{\chi} \left(\frac{\delta v_i}{\delta P}\right)_T + \left(\frac{\delta v_i(T)}{\delta T}\right)_V$ показал, что для моды 408 cm^{-1} вклад фонон-фононного взаимодействия $\left(\frac{\delta v_i(T)}{\delta T}\right)_V$ практически не зависит от разупорядочения и близок к нулю. Проанализирована роль размерного фактора и взаимодействия фононов в наблюдаемом ангармонизме колебаний мод различной симметрии при перемешивании катионов.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИГГ УрО РАН (№ 123011800012-9) с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, дооснащение и развитие которого поддержано грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075 -15-2021-680.

Литература

1. Минералы-концентраторы d- и f-элементов: локальные спектроскопические и ЛА-ИСП-МС исследования состава, структуры и свойств, геохронологические приложения: монография / Ю.В. Щапова и др./ под ред. Вотякова С.Ю. – из-во СО РАН, 2020. – 424 с.

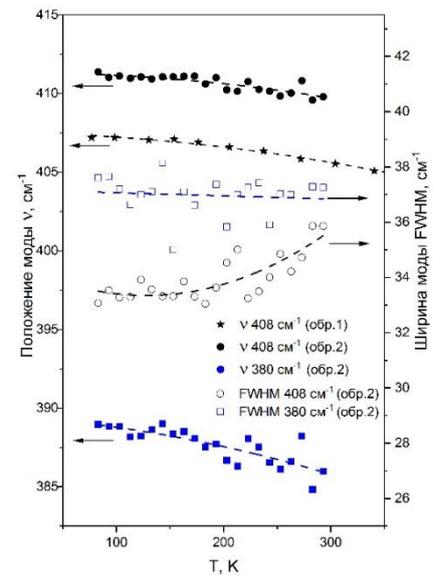


Рис. 1. Зависимость положения ν и ширины FWHM моды E_g от температуры в спектрах природной (обр.1) и синтетической (обр.2) шпинели

ВКР в жидкостях со случайной распределенной обратной связью

М.В. Тареева, М.А. Карпов, М.А. Шевченко, С.Ф. Уманская, А.Д. Кудрявцева, Т.В. Миронова,
Н.В. Чернега, А.Н. Маресев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва,

119991, Ленинский пр., 53

тел: +7 (499) 132-6923, эл.почта: tareevamv@lebedev.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-118

Для большинства практических приложений вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), таких как спектроскопия ВКР, создание ВКР-преобразователей, ВКР микроскопия, ключевым является вопрос энергетической эффективности процесса. Оптимизация энергетических, спектральных, временных характеристик возбуждающего излучения, использование эффекта локального поля и структур, обладающих фотонными запрещенными зонами, активно используются для повышения эффективности преобразования при ВКР. Ещё одним из способов повышения эффективности ВКР является использование распределенной обратной связи, впервые рассмотренной в [1] и активно применяемой в настоящее время [2]. Существенное влияние на эффективность процесса ВКР может также оказывать точечная обратная связь, приводящая к резким скачкам интенсивности.

В данной работе приведены экспериментальные результаты исследования влияния ультразвуковой волны, создающей случайную распределенную обратную связь, на эффективность процесса ВКР для комбинационно-активных жидкостей: воды, тяжелой воды и этанола.

Для возбуждения ВКР использовалось излучение второй гармоники Nd: YAG-лазера с синхронизацией мод (длина волны-532 нм, длительность импульса-30пс, максимальная энергия в импульсе 10мДж, частота 10Гц). Эксперимент проводился для двух различных геометрий, в первом случае излучение заводилось сверху в образец, через свободную поверхность (Рис. 1). В этом случае регистрировалось ВКР «назад». Также исследовалось влияние положения фокальной перетяжки относительно поверхности жидкости на эффективность. Во втором случае излучение фокусировалось через окно кюветы и регистрировалось как ВКР «вперед», так и «назад». Для исследования влияния ультразвука на сигнал ВКР использовалась ультразвуковая ванна максимальной мощностью 200 Вт, работающая на частоте 40 кГц.

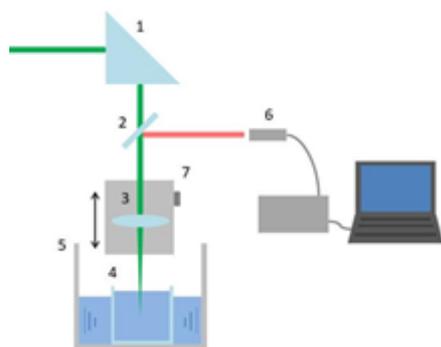


Рис.1 Схема эксперимента (рассеяние назад). 1- поворотная призма, 2-стеклянная пластина, 3- линза, 4- кювета с образцом, 5- ультразвуковая ванна, 6- волоконный спектрометр с ПК, 7- платформа с микрометрической подвижкой.

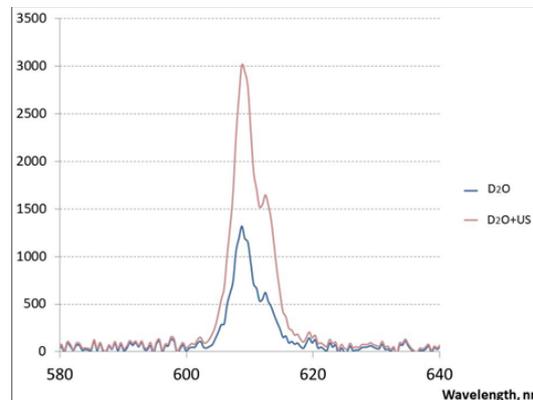


Рис.2. Спектры ВКР в тяжелой воде при фокусировке излучения сверху через свободную поверхность жидкости при выключенном и включенном ультразвуковом воздействии.

Результаты экспериментальных исследований показали, что в комбинационно-активных жидкостях включение ультразвука приводит к существенному увеличению эффективности ВКР как в направлении возбуждения («вперед»), так и в противоположном направлении («назад»). Экспериментально получено более чем десятикратное увеличение эффективности. В качестве примера на Рис.2 показаны спектры ВКР в тяжелой воде при фокусировке возбуждающего излучения на открытую поверхность при включенном и при выключенном ультразвуке

Литература

1. С.А. Ахманов и // Г.А. Ляхов ЖЭТФ. 1974. Т. 66. С. 96.
2. Sébastien Loranger and Raman Kashyap // Optics Letters V. 43, Issue 23, P. 5705-5708.

Терморамановская *in situ* спектроскопия природного фенакита Be_2SiO_4 и *ab initio* расчеты его фононного спектра

М.С. Печурин^{1,2}, Е.А. Панкрушина¹, С.Л. Вотяков¹, Е.В. Комлева³

¹ Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, 620110, Ак. Вонсовского 15

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Мира 23, 620078

³ Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, 620108, С.Ковалевской 18
тел: +7 (919) 389-6694, эл. почта: lizaveta.94@list.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-119

Фенакит (Be_2SiO_4) имеет простую кристаллическую решетку, состоящую из каркаса вершинно-связанных SiO_4 и BeO_4 -тетраэдров, и характеризуется уникальными оптическими свойствами, которые обуславливают целый ряд его практических приложений [1]. Структуру фенакита можно рассматривать и как ортосиликатную с изолированными SiO_4 -тетраэдрами, и как трехмерную сетку («гигантскую молекулу»), включающую атомы Be, Si и O, подобную таковой в кварце. Последнее делает невозможным разбиение колебательных мод фенакита на «внутренние» и «внешние» по отношению к SiO_4 или BeO_4 -тетраэдрам [2]. Детальный анализ колебаний фенакита в литературе не представлен; терморамановские *in situ* данные отсутствуют; нет информации о возможных термоиндуцированных фазовых переходах и особенностях динамики решетки и ангармоназма колебаний фенакита. На основе структурных данных для фенакита набор фононных мод в центре зоны Бриллюэна имеет вид $\Gamma = 21A_g + 20A_u + 21^1E_g + 20^1E_u + 21^2E_g + 20^2E_u$; однако их расшифровка и интерпретация соответствующих рамановских данных остается под вопросом и сегодня. Цель настоящей работы – исследование кристалла природного фенакита по данным терморамановской *in situ* спектроскопии и *ab initio* расчеты его фононного спектра в рамках DFT. Анализ динамики решетки минерала выполнен в диапазоне температур 83–873К (спектрометр Labram HR Evolution с термоприставкой Linkam TSM 600); поляризованные рамановские спектры получены в двух геометриях эксперимента $z(xx)z$ (A_g+E_g), $z(xy)z$ (E_g) (рис.а).

Согласно данным терморентгеновского анализа [3] единственным значительным изменением структуры фенакита с ростом температуры является увеличение длин связи Be-O. При этом данные терморамановской спектроскопии демонстрируют значимые вариации относительной интенсивности колебательной моды $A_g \sim 221 \text{ см}^{-1}$ (рис. б). Согласно *ab initio* расчетам данная мода характеризует поворот Be-O-кольца вокруг оси c (рис. а), а также отвечает достаточно большому значению параметра Грюнайзена (~ 2), что подтверждает преимущественное деформирование Be-O-полиэдров. Расчетный фононный спектр согласуется с авторскими экспериментальными данными.

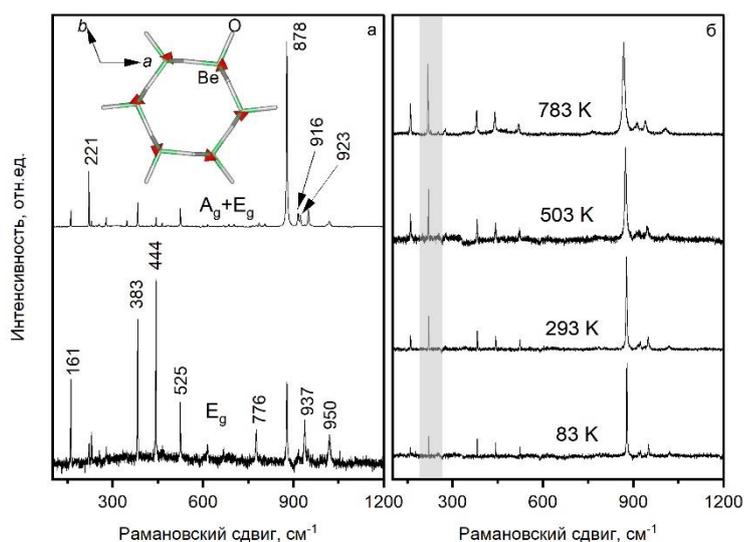


Рис. 1. Поляризованные рамановские спектры природного фенакита при 293 К (а); неполяризованные спектры фенакита при 83, 293, 493, 873 К. Серая область - мода A_g ($\sim 221 \text{ см}^{-1}$).

Работа выполнена в рамках г/б темы №123011800012-9. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2021-680.

Литература

1. Кортв В.С. и др. Украинский физический журнал. 1980. Т. 25. №. 10. С. 1624.
2. Pilati T. et al. Journal of Physical Chemistry A. 1998. V. 102, N.26. P. 4990-4996.
3. Hazen R. M., Finger L. W. Physics and Chemistry of Minerals. 1987. V. 14. №. 5. P. 426-434.

Оптические свойства двумерных островков дисульфида вольфрама (WS₂)

А.Ю. Кривоногова^{1,2}, Н.Н. Курусь¹, И.А. Милёхин^{1,3}, А.А. Колосветов⁴, А.Г. Милёхин¹

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, Лаврентьева, 13

² НГТУ, 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

³ НГУ, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

⁴ МФТИ, 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9

тел: +7 (383) 316-60-54, эл. почта: krivonogova1bann@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-120

Интерес к дихалькогенидам переходных металлов обусловлен заметным изменением оптических и электронных свойств при переходе от объемного материала к двумерному. Так, для них характерен переход от непрямозонной электронной структуры к прямозонной при уменьшении толщины образца от объемного значения до монослоя, вследствие чего становятся возможными прямые межзонные переходы и значительно усиливается фотолюминесценция (ФЛ). В этой связи, двумерные дихалькогениды металлов являются перспективными материалами для решения задач оптоэлектроники. Ярким представителем данного класса является дисульфид вольфрама (WS₂), демонстрирующий высокий квантовый выход фотолюминесценции, имеющий большую энергию связи экситона, что обеспечивает стабильность эмиссии света даже при комнатной температуре. При этом, как сообщалось ранее, существует сильная взаимосвязь оптических и структурных свойств материала. В этой связи, исследование колебательных спектров и фотолюминесценции является эффективным инструментом для контроля структурных свойств двумерных кристаллов WS₂.

В данной работе выполнен анализ структурных и оптических свойств островков WS₂ методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), комбинационного рассеяния света (КРС), микро- и нано-фотолюминесценции (микро-ФЛ и нано-ФЛ). АСМ изображение островков WS₂ представлено на Рис. 1а. Островки размером ~ 10 мкм имеют треугольную форму и толщину от 1 до нескольких монослоев. Наблюдаются особенности высотой ~10 нм, природа которых остается дискуссионной.

На основе анализа спектров КРС, представленных на Рис. 1б, получена зависимость частот основных колебательных мод WS₂ (A_{1g} и E_{2g}) от толщины образца, определенной методом АСМ (Рис. 1в). Установлено, что при увеличении толщины островка WS₂ наблюдается смещение моды E_{2g} в область низких частот и моды A_{1g} - в область высоких частот, что согласуется с ранее опубликованными данными [1].

Получены спектры и карты распределения интенсивности ФЛ (микро-ФЛ и нано-ФЛ) в двумерных островках WS₂. Показано, что энергия ФЛ зависит от толщины и структурного совершенства двумерного кристалла WS₂. Так, с уменьшением толщины островка WS₂ до нескольких монослоев интенсивность ФЛ возрастает, что соответствует изменению электронной зонной структуры с не прямой на прямую, в результате чего начинают преобладать излучательные переходы. В то же время, обнаружен существенный спад интенсивности и красный сдвиг положения пика ФЛ от 650 до 680 нм в области с наименьшей толщиной островка, что, по-видимому, связано с окислением образца.

Таким образом, показано, что совместное применение методов АСМ, КРС и ФЛ позволяет получить наиболее полную информацию о структурных и оптических свойствах двумерных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проект № 19-52-12041).

Литература

1. Barbosa, A. N. et al. // Materials Chemistry and Physics, 2020, vol. 243, p.122599.

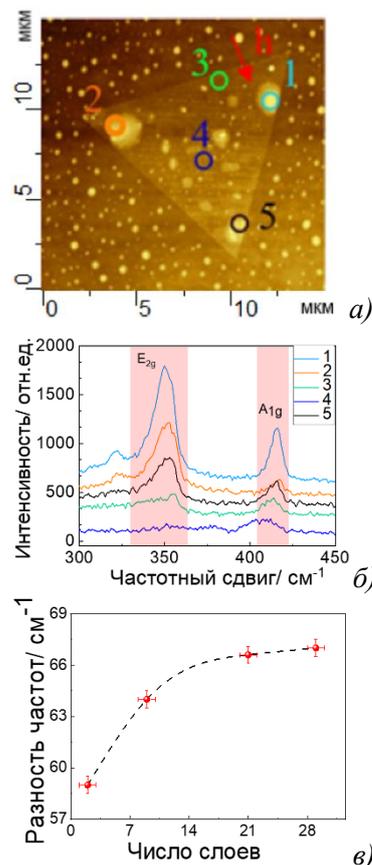


Рис. 1. а)- АСМ-изображение, б)- спектры КРС от областей островка разной толщины и в)- зависимость разности частот от толщины образца.

Исследование методом КРС структуры пленок CaSi_2 формируемых в условиях радиационного воздействия на структуру $\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$

А.В. Кацюба¹, А.В. Двуреченский^{1,2}, Г.Н. Камаев¹, В.А. Володин^{1,2}, П.А. Кучинская¹

¹ ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова,

Новосибирск, 630090, пр. к. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

тел: +7 (383)333-27-71, факс: +7 (383)333-27-71, эл. почта: kacuba@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-121

Для получения эпитаксиальных пленок CaSi_2 на Si , используют нанесение атомарного Ca , и нагрев подложки, что приводит к взаимодействию Ca с Si [1]. Нами при исследовании роста пленок CaF_2 на $\text{Si}(111)$ методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в условиях одновременного облучения электронным пучком с энергией 20 кэВ с плотностью тока 50 мкА/м^2 было обнаружено, что на границе подложки кремния и эпитаксиальной пленки CaF_2 наблюдается радиационно-стимулированный рост пленки CaSi_2 [2]. Практический интерес к методу радиационно-стимулированного роста пленок CaSi_2 состоит в возможности формирования на пластине локальных областей пленок CaSi_2 , размер которых ограничивается только диаметром сфокусированного пучка электронов, а также контролировать толщину вплоть до монослоя путем изменения как дозы облучения, так и толщины исходного слоя Si и жертвенного слоя CaF_2 .

В работе показано, что облучение эпитаксиальной пленки CaF_2 во время ее роста и после формирования приводит к разной морфологии пленки CaSi_2 , обусловленной условиями зародышеобразования. На Рис.1 представлены спектры КРС, зарегистрированные в месте облучения во время эпитаксиального роста CaF_2 (Рис.1а) и после роста (Рис.1б), с разной поляризацией падающего и рассеянного света, где оси X' и Y' повернуты на 45° относительно XY .

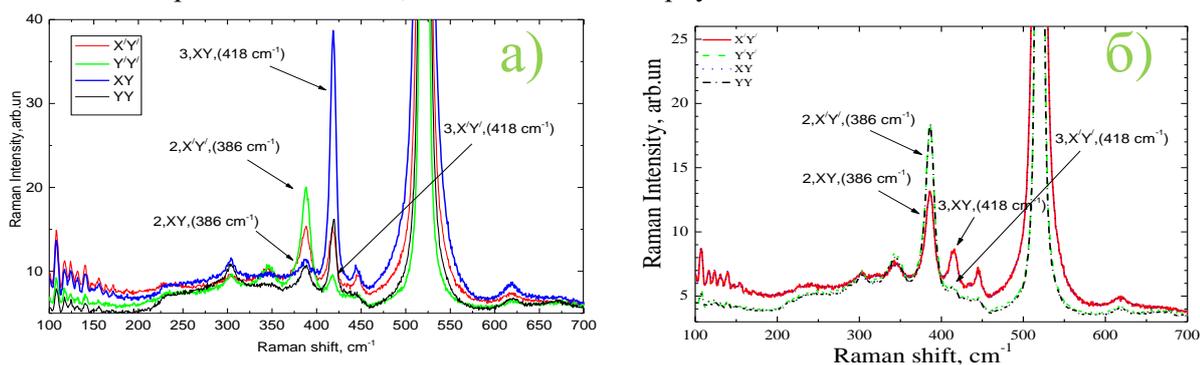


Рис.1. Спектры поляризованного КРС: а) облучение во время роста CaF_2 , б) облучение после роста CaF_2 .

При облучении во время роста изменение поляризации (Рис. 1а) приводит к изменению интенсивности основных пиков от CaSi_2 в области 413 см^{-1} , 386 см^{-1} и 344 см^{-1} при всех углах падающего и отраженного света. Изменение интенсивности пиков при всех углах свидетельствует о том, что кристаллы CaSi_2 имеют определенную ориентацию. На Рис.1б представлены спектры КРС, зарегистрированные в месте облучения после роста CaF_2 с разной поляризацией падающего и рассеянного света, где оси X' и Y' также повернуты на 45° относительно XY . В отличие от спектров на Рис.1а, где интенсивность пиков от CaSi_2 меняется во всех поляризационных геометриях, присутствуют только две пары спектров. Положение пиков в координатных плоскостях XY и $X'Y'$ полностью совпадают. Следовательно, облучение после роста приводит к образованию ориентационно-несвязанных с исходной подложкой кристаллитов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-12-00070)

Литература

1. J.F. Morar, M. Wittmer, Growth of epitaxial CaSi_2 films on $\text{Si}(111)$, J. Vac. Sci. Technol. A 6 (1988) 1340.
2. Aleksey V. Kacyuba, Anatoly V. Dvurechenskii, Gennady N. Kamaev, Vladimir A. Volodin, Aleksey Y. Krupin, Radiation-Induced epitaxial CaSi_2 film growth at the molecular-beam epitaxy of CaF_2 on Si , Materials Letters, 268(2020).

Особенности комбинационного рассеяния света метастабильной кристаллической фазы фосфида галлия GaP *P63mc*

М.А. Аникина^{1,2}, О.Ю. Коваль²

¹СПбАУ им. Ж.И. Алфёрова, Санкт-Петербург, 194021, Хлопина 8 к. 3

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., 141701, Институтский пер., 9

эл. почта: mari.a.nikina@yandex.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-122

В работе представлено описание особенностей комбинационного рассеяния света (КРС) для недавно расшифрованной нами кристаллической структуры фосфида галлия типа вюрцита, стабилизированной в геометрии ННК, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [1]. Использование метода микроспектроскопии КР при комнатной температуре подтвердило существование двух кристаллических фаз в одиночном самокаталитическом нанокристалле GaP.

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) были получены по всей длине нитевидного нанокристалла (ННК) GaP в геометрии обратного рассеяния $\bar{z}(x,x)z$ (рис. 1а).

Результаты, полученные на торцах ННК (рис. 1с), демонстрируют высокоинтенсивные продольные LO- и поверхностные оптические (SO) моды КР из-за нарушения правил отбора, вызванных размерными эффектами [2]. На спектрах КР, представленных на рисунке 1с, можно выделить 7 активных колебательных мод: E_2^H на положении 357 cm^{-1} , $A_1(\text{TO}) - 363 \text{ cm}^{-1}$, $E_1(\text{TO}) - 365.5 \text{ cm}^{-1}$, $B_1^H - 380 \text{ cm}^{-1}$, SO - 395 cm^{-1} , $A_1(\text{LO}) - 400$ и $E_1(\text{LO}) - 402 \text{ cm}^{-1}$. О подобных результатах ранее сообщалось в работах [3] и [4] для Au-каталитических ННК. Положение колебательной моды E_2^H близко по частоте с TO-фононами в критической точке L на границе зоны Бриллюэна GaP [5]. Кроме того, на торце разрешается появление «мягкой» моды B_1^H .

Спектры КР, полученные в средней части ННК (рис. 1б), демонстрируют низкоинтенсивную продольную оптическую (LO) моду, поскольку она запрещена симметричными правилами отбора в данной геометрии съемки.

Таким образом, микроспектроскопия КРС подтверждает наличие сфалеритной и вюрцитной фаз в структуре рассматриваемых образцов ННК GaP.

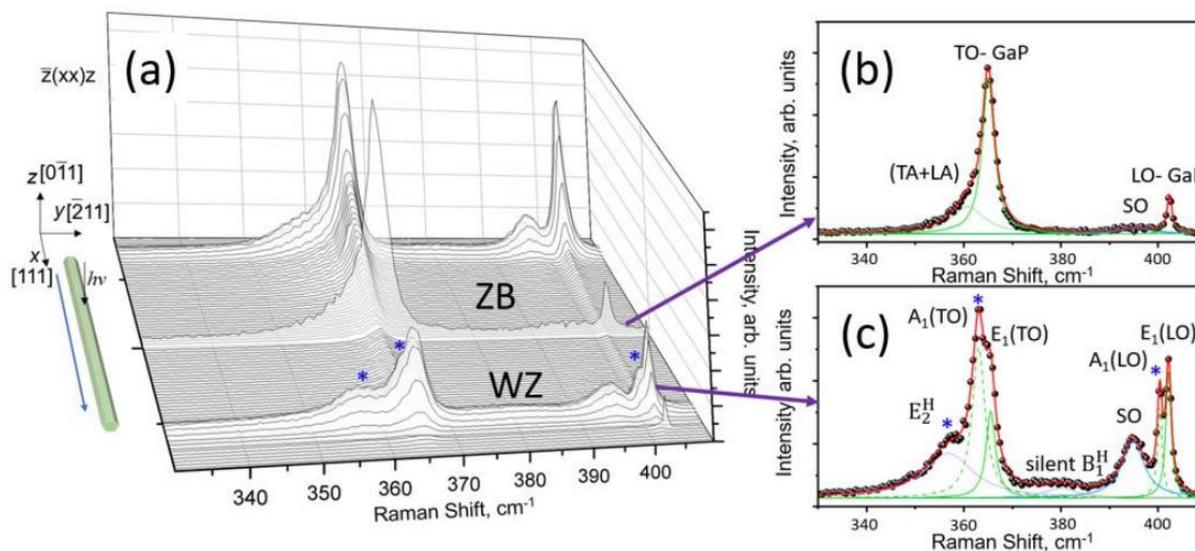


Рис. 1. Экспериментальные результаты: а) Профиль спектров КР по всей длине образца с максимальным содержанием кристаллической вюрцитной фазы, вставка: геометрия эксперимента; б) Спектр КР, полученный из средней части ННК GaP (сфалеритная фаза); в) Спектр КР, полученный с торца ННК GaP (вюрцитная фаза)

Литература

1. O.Y. Koval et al. // *Nanomaterials*. 2021. V.11. no.4. P.1.960.
2. D. Spirkoska et al. // *Nanotechnology*. 2008. V.19. no.43. P.435704.
3. B. C. Da Silva et al. // *Scientific Reports*. 2020. V.10. no.1. P.7904.
4. K. Park et al. // *ACS Omega*. 2019. V.4. no.2 P.3098–3104.
5. A. Dobrovolsky et al. // *Applied Physics Letters*. 2014. V.105 no.19 P.193102.

Особенности в спектрах комбинационного рассеяния при структурном фазовом переходе в пентаоксиде ванадия интеркалированного литием

А.В. Савин¹, Е.М. Рогинский¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург,
194021, Политехническая, 26

тел: +7 (812) 247-2245, факс: +7 (812) 247-1017, эл. почта: aleksandr.savin@mail.ioffe.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-123

В сфере развития возобновляемой энергетики самым проблемным является вопрос эффективного накопления энергии и использования её по мере необходимости. Однако проблема выбора оптимального материала для катода до сих пор остаётся нерешенной. Наиболее широко в промышленном производстве таких аккумуляторов в качестве катодного материала используют слоистые кристаллы Li_xMO_2 (здесь М – атом переходного металла), например катод из LiFePO_4 обеспечивает ёмкость 165 mA h/g [1]. Альтернативой может служить наиболее термодинамически устойчивый оксид ванадия V_2O_5 , который имеет слоистую кристаллическую структуру, что определяет его привлекательность в качестве катодного материала.

Структура интеркалированного атомами лития синтезированного химически с помощью окислительно-восстановительной реакции иодида лития и пентоксида ванадия была определена экспериментально с помощью рентгеноструктурного анализа [2]. Однако, при определении пространственного упорядочения не удалось, основываясь только на рентгеноструктурных данных, однозначно установить группу симметрии. С целью устранения неоднозначности были выполнены квантово-химические расчеты динамики решетки. В результате *ab initio* расчетов оптимизации структурных параметров дельта фазы пентоксида ванадия интеркалированного атомами лития показано, что структура $\delta\text{-LiV}_2\text{O}_5$ сохраняет свою слоистую природу (как и в $\alpha\text{-V}_2\text{O}_5$). Расчёт фонового спектра centrosymmetric структуры выявил наличие мнимых мод, что указывает на ее нестабильность, поэтому был выполнен поиск пространственного упорядочения атомов с помощью искажения структуры вдоль мнимых мод. В результате установлена пространственная группа в которой отсутствует центр инверсии. Выполнен расчет динамических свойств, который подтвердил стабильность данной фазы по отношению к колебательным состояниям. В дальнейшем был выполнен расчет электронной структуры и построена парциальная плотность электронных состояний локализованных на каждом атоме в элементарной ячейке. Показано, что в результате интеркалирования атомами лития атомы V принимают различное валентное состояние, а именно V^{4+} и V^{5+} .

Согласно фазовой диаграмме, при температуре 100 °С происходит плавное изменение структурных параметров ванадиевой бронзы, приводящее в конечном итоге к новой структуре – эпсилон фазе. Расчет динамических свойств $\epsilon\text{-LiV}_2\text{O}_5$ в пространственной группе без центра инверсии продемонстрировал устойчивость структуры по отношению к колебательным состояниям.

В фоновом спектре низкотемпературной фазы обнаружено низкочастотное колебание на границе Зоны Бриллюэна, которое соответствует коллективному противофазному колебанию атомов в соседних слоях, причем данное колебание отсутствует в высокотемпературной фазе. Показано, что искажение структуры дельта фазы вдоль низкочастотного колебания приводит к взаимному смещению соседних слоев, в результате чего нарушается пространственная структура и индуцируется структурный фазовый переход в эпсилон фазу. Для экспериментального подтверждения фазового перехода был выполнен расчет спектра комбинационного рассеяния в котором обнаружены характерные особенности для каждой из фаз.

В результате в рамках теории функционала плотности выполнен расчёт динамических свойств дельта и эпсилон фаз пентоксида ванадия интеркалированного литием, предложена микроскопическая модель фазового перехода, сопровождаемого изменениями в спектрах комбинационного рассеяния.

Литература

1. Tarascon, J.-M. & Armand, M., Nature 414, 359–367 (2001).
2. Millet, P. et al., J. Solid State Chem. 136, 56–62 (1998).

Спектральные исследования кристаллов $ABF_6 \cdot 6H_2O$

Ю.В. Герасимова^{1,2}, А.С. Крылов¹, А.Н. Втюрин^{1,2}, М.А. Герасимов¹, Н.М. Лапташ³,
А.С. Александровский¹, А.А. Дубровский¹

¹ ИФ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок д.50/38

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660074, ул. Киренского д. 28

³ Институт химии ДВО РАН, 690022, Владивосток, 100-летия Владивостока, д. 159
тел: +7 (923) 273-1745, эл. почта: jul@iph.krasn.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-124

Фтористые гексагидраты с общей формулой $ABF_6 \cdot 6H_2O$ (где $A=Mg, Mn, Fe, Co, Zn, Ni, Cd$; $B=Ti, Si, Ge, Zr$) образуют обширное семейство кристаллов, исследуемое различными методами. Во многих кристаллах семейства при понижении температуры обнаружены структурные переходы. Эти соединения состоят из двухвалентных ионов $[A(H_2O)_6]^{2+}$ и $[BF_6]^{2-}$, представляющих собой октаэдры, упакованные в ромбоэдрически искаженную структуру типа CsCl. Как правило, фторные октаэдры имеют правильную форму, а водные могут быть слегка вытянуты или сжаты вдоль оси 3^- [1]. В последнее время большое внимание уделяется активированным Mn^{4+} фторидным люминофорам в качестве красных компонентов для тепло-белых светоизлучающих диодов (WLED). Среди них описан ряд люминофоров с общей формулой $ZnMF_6 \cdot 6H_2O : Mn^{4+}$ ($M = Si, Ge, Sn, Ti$). Но до сих пор неясными остаются вопросы, касающиеся симметрии фаз, наличие последовательности и механизмов фазовых переходов. С целью решения некоторых из этих вопросов были выполнены исследования ряда кристаллов методом комбинационного рассеяния света.

1. В соединении $FeTiF_6 \cdot 6H_2O$ (НТФ) установлен сегнетоэластический фазовый переход первого рода при $T = 272$ К с предполагаемым преобразованием симметрии $P3^- \leftrightarrow P(1)^-$.
2. Для комплекса $[Fe(xH_2O \cdot yD_2O)]^{2+}$ замена H_2O на D_2O привела к небольшому изменению температуры фазового перехода, которая составила 283 К. Сравнивая системы $FeTiF_6 \cdot xH_2O \cdot yD_2O$ и $FeTiF_6 \cdot 6H_2O$ можем говорить о том, что в данных соединениях основную роль в механизме фазового перехода играет реконструкция водного комплекса.
3. В $CoTiF_6 \cdot 6H_2O$ реализуется фазовый переход ниже 100 К механизм которого связан с ориентационным упорядочением фторных, а затем и водных октаэдров не зависимо друг от друга при понижении температуры. При проведении температурных экспериментов в вакуумированной камере выше 250 К в спектре наблюдаются изменения, связанные с деградацией образца. Скорее всего, под действием пучка лазера кристалл $CoTiF_6 \cdot 6H_2O$ растворяется в собственной кристаллизационной воде. Поскольку процесс сопровождается переносом заряда ($Co^{2+}, Ti^{4+} \rightarrow Co^{3+}, Ti^{3+}$), то процесс плавления можно считать инконгруэнтным (нарастание кристаллов разного цвета при снятии облучения). Эти изменения можно увидеть на представленном рисунке.
4. Был получен спектр поглощения $CoSiF_6 \cdot 6H_2O$ при комнатной температуре. Согласно спектру, кристалл характеризуется большим окном прозрачности в области длин волн менее 400 нм. Согласно анализу Тауца, прямая оптическая ширина запрещенной зоны $CoSiF_6 \cdot 6H_2O$ равна 6,42 эВ.



Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках исследовательского проекта № 23-22-10037.

Литература

1. И.Н. Флёрв, М.В. Горев, С.В. Мельникова, М.Л. Афанасьев, К.С.Александров. Исследование фазовых переходов в кристаллах $ABF_6 \cdot 6H_2O$. // ФТТ. 1991. Т.33, вып.7. С.1921-1928.

Колебательные спектры систем «электролитный раствор-наполнитель»

К.Ш. Рабаданов¹, М.М. Гафуров², М.А. Ахмедов¹, Д.И. Рабаданова¹

¹ Дагестанский государственный университет, Махачкала,
367000, ул. М. Гаджиева, 43а

² Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН
тел: +7 (988) 780-1972, эл. почта: rksh83@mail.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-125

Развитие современной техники требует создания новых химических источников тока (ХИТ), обладающих, прежде всего, высокой удельной энергией, повышенной циклируемостью и безопасностью. Технические и эксплуатационные характеристики источников энергии определяются свойствами, как электродов, так и электролитов. Поэтому в настоящее время интенсивно развиваются исследования, направленные на разработку методов и изучение закономерностей синтеза функциональных электродных материалов, и оптимизацию физико-химических свойств электролитов. Литий-ионные батареи (ЛИБ) которые обладают высокой плотностью энергии, пользуются большим спросом в качестве решения для хранения энергии во многих портативных электронных гаджетах / устройствах, таких как мобильные телефоны и ноутбуки. Кроме того, они могут стать наиболее многообещающими вариантами хранения энергии для электромобилей следующего поколения и технологий интеллектуальных сетей.

В последнее время были предприняты значительные усилия для понимания строения электролитных растворов ХИТ, в частности, была детально описана структура растворов и межчастичные взаимодействия в них. В случае ХИТ электроды являются сложными дисперсными высокопористыми системами. В таких системах ответ на вопрос, каковы различия в составе, концентрации и подвижности носителей тока в объеме раствора и в приэлектродном слое, неочевиден, поскольку известно, что в малых объемах пор на первый план выступают эффекты взаимодействия частиц друг с другом и со стенками пор. Исследование этих эффектов в материалах ХИТ до сих пор не проводилось. Колебательная спектроскопия – один из наиболее мощных инструментов для решения этой важной проблемы, связанной с выяснением структуры объектов, присутствующих в растворах. Важной особенностью колебательных спектров частиц в конденсированных средах является их «реакция» на фазовые превращения, растворение, сольватацию, проявляющаяся в существенных изменениях спектральных линий и полос.

Для первоначальных исследований межчастичных взаимодействий в наполненных ионных растворах были изучены колебательные спектры для системы $xLiClO_4-(1-x)(CH_3)_2SO$ ($x=0; 0.05M; 0.1M; 0.15M; 0.2M; 0.25M$) с добавками наноразмерного порошка оксида алюминия методами КР и ИК-Фурье спектроскопии. показано, что в гетерофазной системе $xLiClO_4-(1-x)(CH_3)_2SO + Al_2O_3$, контуры колебательных ИК полос при добавлении нанопорошка приводит к ярко выраженному расщеплению ИК полосы симметричного колебания $\nu_{10}(A')$ диметилсульфоксида, при одновременном смещении максимума полосы асимметричного колебания $\nu_{22}(A'')$ ~ 700 cm^{-1} в сторону больших волновых чисел на величину порядка 3-4 cm^{-1} . Предполагаем, что при низких концентрациях соли $x \leq 0,1M$ наночастицы оксида алюминия и ионы лития координируются свободными молекулами диметилсульфоксида, за счёт чего и происходит сдвиг $\nu_{22}(A'')$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00247, <https://rscf.ru/project/23-23-00247>.

Миллифлюидный чип для измерения КРС от биологических клеток в условиях меняющегося состава окружающей среды

К.А. Окотруб¹, С.Г. Кондюрина², Ю.В. Зайцева¹, С.В. Адищев¹, Т.А. Рахманова^{1,3},
С.Я. Амстиславский^{1,3}

¹*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск,
630090, пр-кт Академика Коптюга, 1*

²*Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2*

³*Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск,
630090, пр-т Академика Лаврентьева, 10
тел: +7 (383) 330-79-69, эл. почта: okotrub@iae.nsk.su*

DOI 10.34077/SCATTERING95-126

При исследовании биологических клеток достаточно распространенной является задача изучения влияния окружающей среды на биологическое состояние клеток или транспорта веществ через клеточную мембрану. Возникает необходимость в контейнерах, позволяющих относительно быстро менять окружающий клетку раствор. Обычно микрофлюидные чипы изготавливаются с применением элементов технологии «мягкой» литографии (soft-lithography). При этом сам чип изготавливается, как правило, из полидиметилсилоксана, который дает интенсивный вклад в сигнал комбинационного рассеяния света (КРС) на частотах характерных для КРС биоорганических соединений. В последние годы широкое распространение получила технология фотополимерной стереолитографии, которая позволяет формировать трехмерные структуры масштабом в несколько десятков микрон. К сильным сторонам данного подхода является доступность и высокая скорость и простота изготовления изделий. Слабые стороны связаны с относительно крупным размером элементов, сам фотополимер имеет достаточно сильный флуоресцентный сигнал.

В данной работе мы изучили возможность создания и использования чипов, созданных методом фотополимерной стереолитографии, для измерения спектров КРС. В результате был изготовлен миллифлюидный чип совместимый с криостатом THMS350V (Linkam). Чип был напечатан из смолы Plant-based UV Resin White (Anycubic) на 3D принтере Photon Mono X 6K (Anycubic) с номинальным латеральным разрешением 34 мкм. Ширина каналов в чипе составила 400 мкм, высота 300 мкм. Для непротекания клеток в излив, в чипе предусмотрен фильтр с каналами толщиной 30 мкм. Во избежание паразитного флуоресцентного и КРС вклада от пластика, в чип вклеены покровные стекла. Для вклеивания окон использовалась та же фотополимеризующаяся смола из которой был напечатан чип.

В докладе представлены результаты использования данного чипа для исследования спектров КРС от одиночного ооцита мыши в условиях с разной концентрацией криопротектора. Представлены динамические характеристики описанной миллифлюидной системы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 21-74-10108).

Применение спектроскопии комбинационного рассеяния света для анализа и мониторинга состояния биологических систем

Е.В. Переведенцева¹, А.В. Карменян², Ч.Л. Ченг², Н.Н.Мельник¹

¹ *Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, 119991, Ленинский пр-т, 53*

² *National Dong Hwa University, Hualien, Taiwan, 97401, 1 Sec. 2, Da-Hsueh Rd. Shoufeng*

тел: +7 (499) 132-68-34, эл. почта: perevedentsevaev@lebedev.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-127

Применение спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) в исследованиях биологических объектов позволяет получить подробную биохимическую и структурную информацию и визуализировать ее без необходимости использования меток и неразрушающим образом [1]. Разрабатываются различные модификации КР спектроскопии [2, 3] и их применения для исследования процессов жизнедеятельности в норме и патологии, при различных внешних воздействиях, для разработки методик медицинской диагностики и мониторинга. Однако, как любая из современных модификаций, так и конвенциональная КР спектроскопия (потенциал которой в таких исследованиях далеко не исчерпан) имеют каждая не только свои преимущества, но и ограничения, в основном определяемые собственно природой исследуемых систем и их чувствительностью к условиям измерений (в частности, к лазерному излучению). Презентация обсуждает применение КР спектроскопии и микроскопии для исследований, комбинирующих получение спектральной информации и возможность визуализации [4, 5] на примерах одноклеточных и многоклеточных биологических систем на микроскопическом уровне, а также способы преодолеть вышеупомянутые ограничения.

В наших работах продемонстрировано использование КР спектроскопии для исследований крови, в частности, для определения состояния эритроцитов, измерения степени оксигенации гемоглобина и влияния на процессы оксигенации и деоксигенации взаимодействия эритроцитов с наночастицами [5-7]. Показана возможность использования КР спектроскопии для исследования эмбрионов млекопитающих и для развития методов преимплантационной диагностики их состояния [8-10]. Разрабатываются методы детектирования и исследований патогенных и непатогенных микроорганизмов [11, 12]. Использование современных методов статистической обработки и анализа результатов [9, 10] с применением методов машинного обучения позволяет облегчить процесс классификации, создание базы данных для практического применения в соответствующих областях. Обсуждается важность подбора условий измерений и подходы к нему как в научных исследованиях, так и с точки зрения практических применений.

Литература

1. E. S. Allakhverdiev et al.// Cells. 2022. 11(3). 386.
2. A. Downes, A. Elfick. // Sensors. 2010. 10(3). 1871-1889.
3. W. A. El-Said et al.// Plos ONE. 2011. 6(2). e15836.
4. E. Perevedentseva, et al.// J. Nanopart. Res. 2013. 15. 1834.
5. E. Perevedentseva et al.// Materials. 2021. 14(20). 5920.
6. L.W. Tsai et al. // Int. J. Mol. Sci. 2016. 17 (7), 1111.
7. Y.-C. Lin et al.// J. Biomed. Optics. 2012. 17(10), 101512.
8. E. Perevedentseva, et al.// Sci. Rep. 2019. 9. 6636.
9. A. V. Karmenyan, et al.// Proc. SPIE. 2020. 11582, 115820W.
10. A. V. Karmenyan, et al.// Proc. SPIE. 2021. 12086. 120861H.
11. A. Chatterjee, et al.// J. Biomed. Optics. 2015. 20(5). 051014.
12. Y. C. Lin et al.// J. Biomed. Optics. 2015. 20(5). 051042.

Рамановская спектроскопия металлоорганических каркасов

Е.В. Головкина¹, А.С. Крылов², С.Н. Крылова², А.Н. Втюрин^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660074, ул. Киренского, д. 28

² Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, 660036,

Академгородок, д. 50/38

тел: +7 (913) 5651872, эл. почта: e.v.golovkina@mail.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-128

Для изучения неориентированных кристаллических веществ появилась необходимость разработки методики измерения спектров микрокристаллов. Несмотря на то, что в природе и в процессе роста кристаллы имеют четко выраженную огранку, их грани не всегда располагаются вдоль кристаллографических осей. По этой причине, а также из-за малых размеров кристаллов, правильно расположить кристалл для измерения поляризованных спектров становится затруднительным. В данной методике стало бы возможным определение угловых зависимостей спектров, а также выявление поведения линий и симметрии колебаний молекул кристаллов.

Металлоорганические каркасы представляют собой кристаллические твердые вещества, в которых атомы металла или оксида металла соединены органическими линкерами и образуют кристаллическую решетку. Металлоорганические каркасы приобрели большой интерес из-за их высокой пористости, большой площади поверхности и характеристик поглощения. Некоторые из таких веществ являются перестраиваемыми, что означает, что несколько стабильных кристаллических структур могут быть получены путем абсорбции и десорбции [1].

Кристаллы металлоорганических каркасов имеют размер менее 0.1 мкм и не имеют правильной огранки вдоль кристаллографических осей. Поэтому для измерения спектров комбинационного рассеяния света неориентированных кристаллов металлоорганических каркасов была использована разработанная методика измерения угловых зависимостей спектров [2]. В результате автоматизированного периодического вращения кристалла и измерения соответствующих данному углу спектров были построены угловые зависимости спектров, анализ которых дает распределение максимумов линий спектра по углам.

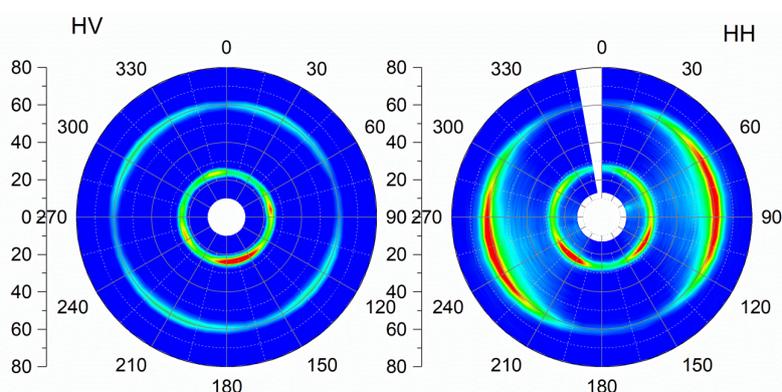


Рис. 1. Угловые зависимости спектров КРС в различных поляризациях в полярных координатах для кристалла DUT-8(Ni) в промежуточной фазе.

В работе проведено исследование металлоорганических каркасов DUT-8(Ni), синтезированных в Дрезденском техническом университете. Сопоставляя результаты с модельными расчетами, представляется возможность распознать группу симметрии колебаний кристалла, а также выяснить отличительные признаки спектра различных фаз металлоорганических каркасов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Немецкого научно-исследовательского сообщества в рамках научного проекта № 21-52-12018.

Литература

1. Metal-Organic Frameworks (MOF), или металлоорганические координационные полимеры (МКОП) : Метод. Пособ. / ФГБУН ИОиФХ им. А.Е. Арбузова, Казань (2013)
2. Munisso M. C., Zhu W., Pezzoti G. Phys. Status Solidi. v. 246, № 8, 1893-1900 (2009).

Новый пикосекундный ВКР-лазер на воде/жидком азоте с кратным снижением порога генерации

М.Я. Гришин¹, С.М. Першин¹, Е.В. Шашков¹, В.А. Орлович², А.И. Водчиц², И.А. Ходасевич²

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, ул. Вавилова, 38

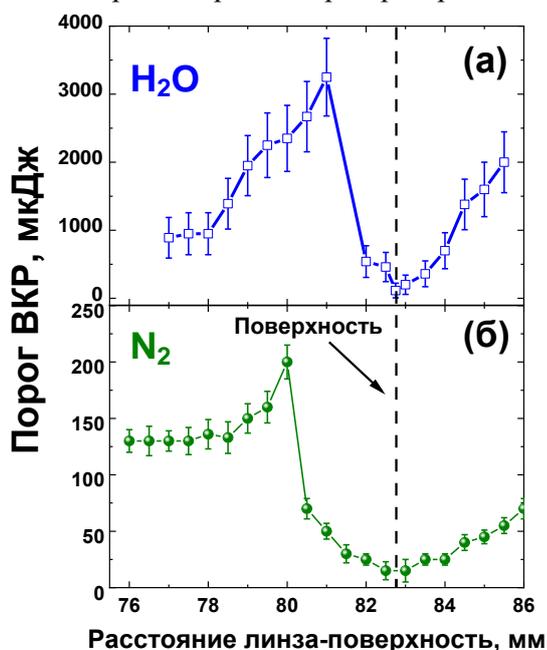
² Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, 220072, пр. Независимости, 68-2

тел: +7 (495) 503-8777 доб. 858, эл. почта: mikhail.grishin@kapella.gpi.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-129

Новый ВКР-лазер с кратным (до 30 раз) снижением порога генерации реализован нами в поле пикосекундных лазерных импульсов при перемещении перетяжки фокусированного пучка накачки из объёма воды, а также жидкого азота, через свободную поверхность. Излучение пикосекундного Nd:YLF лазера (527 нм, 15 пс, 2 Гц, 0.03-5 мДж/имп) направляли в образец вертикально, по нормали к открытой поверхности. Лазерный пучок фокусировали линзой с фокусным расстоянием 82 мм. Кювету с водой или сосуд Дьюара с жидким азотом закрепляли на вертикальной подвижке с микрометрической подачей. Энергию лазерных импульсов измеряли цифровым пироэлектрическим приёмником. Для каждого расстояния между линзой и поверхностью регистрировали пороговую энергию, при которой начиналось развитие ВКР. Как видно из рисунка, полученная зависимость порога ВКР в воде (а) и жидком азоте (б) имеет N-образный вид. Обнаруженное подобие зависимостей порога ВКР для полярной (снижение ~30 раз) и неполярной (~10 раз) жидкости указывает на фундаментальную природу явления.

Ранее [1], мы впервые при накачке параллельным пучком обнаружили скачок интенсивности первой стоксовой компоненты ВКР в жидком азоте на 7 порядков, что было обусловлено самовозбуждением в симметричном резонаторе с распределённой обратной связью [2].



Из рисунка следует, что порог ВКР достигает минимума при совмещении фокальной плоскости пучка с поверхностью среды, которая за счёт френелевского отражения (~2%) играет роль плоского зеркала несимметричного резонатора. Такое зеркало молекулярным качеством поверхности повышает добротность резонатора на порядок-два по сравнению с «распределённым зеркалом» [2]. Отметим, что в параллельном пучке была реализована [3] схема четырёхволнового смешения, или активной спектроскопии комбинационного рассеяния (АСКР, С.А. Ахманов и др. [4]), с генерацией антистоксовой компоненты. Фокусировка пучка накачки на поверхность среды увеличивает набор возможных углов волновых векторов, что должно обеспечивать выполнение условий синхронизма АСКР. Нам удалось экспериментально подтвердить это предположение регистрацией набора кольцевых структур и антистоксовой компоненты в пятне ВКР [5].

Таким образом, в работе открыт новый тип ВКР-лазера с кратным снижением порога генерации до величины существенно ниже порога разрушения среды. Несомненно, этот фактор является ключевым для неограниченного расширения ряда источников когерентного излучения (ВКР-лазеров) как конвертеров частоты серийных лазеров, например, для подавления активности вирусов резонансной бигармонической накачкой на собственных частотах в ГГц области спектра [6].

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку исследований (грант №23-42-10019).

Литература

1. С.А. Ахманов, Б.В. Жданов, А.И. Ковригин, С.М. Першин. // ПЖЭТФ. 1972. Т. 15. С. 266-269.
2. С.А. Ахманов, Г.А. Ляхов. // ЖЭТФ. 1974. Т. 66. №1. С. 96-108.
3. Б.В. Жданов, Л.Л. Кулюк, С.М. Першин. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. 1027-1034.
4. С.А. Ахманов, В.Г. Дмитриев и др. // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 15. №10. С. 425-428.
5. S.M. Pershin, A.I. Vodchits et al. // Opt. Lett. 2020. V. 45, №19. 5624-5627.
6. V.V. Oshurko, S.M. Pershin, M.Ya. Grishin et al. // Phys. Rev. A. 2022. V. 105. P. 043513.

Спектры прямого и обратного ВКР пикосекундных импульсов в воде вблизи поверхности

В.А. Орлович¹, С.М. Першин², А.И. Водчиц¹, М.Я. Гришин², И.А. Ходасевич¹

¹Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, 220072, проспект Независимости, 68-2

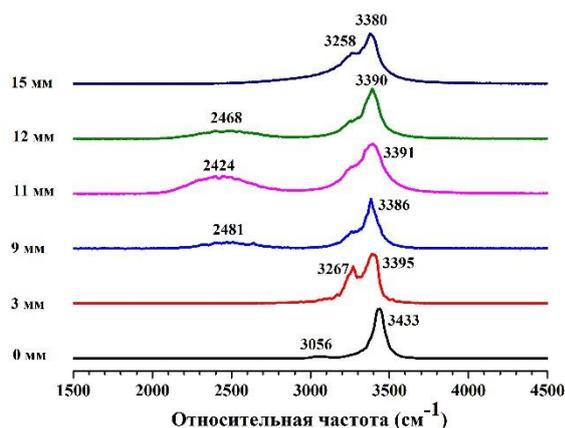
²Институт общей физики им.А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991, ул. Вавилова, 38

тел: +375 172 708 665, эл. почта: v.orlovich@dragon.bas-net.by

DOI 10.34077/SCATTERING95-130

В последнее время проводятся исследования, связанные с влиянием границы раздела фаз (жидкость-газ, жидкость-плазма и др.) на разные нелинейно-оптические процессы, в том числе вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) [1, 2]. В данной работе мы приводим результаты исследований пикосекундного ВКР в лёгкой воде (H₂O). Исследованы спектры обратного (ОВКР) и прямого ВКР (в отсутствие оптического пробоя в толще воды) в зависимости от расстояния фокальной перетяжки пучка излучения накачки (532 нм, 60 пс, 3-5 мДж, вертикальная схема возбуждения, вода в кювете открытого типа, фокусное расстояние линзы 83 мм) до поверхности раздела вода-воздух и на самой границе раздела. Лазер работал с частотой повторения импульсов 15 Гц. Спектры суммировались из 10-30-50 импульсов лазера.

Результаты, полученные для прямого ВКР (ПВКР), совпадают с результатами, измеренными нами ранее [2]. На рисунке представлены нормированные спектры ОВКР в области первой стоксовой



компоненты воды в зависимости от расстояния до границы раздела. Расстояния от центра фокальной перетяжки пучка накачки в глубине воды до поверхности воды указаны слева в мм. По оси абсцисс отложена относительная частота смещения полосы КР в см⁻¹ (0 условно соответствует положению линии накачки на длине волны 532 нм). Вблизи наблюдаемых полос указаны частоты максимумов полос в см⁻¹. Видно, что по мере приближения фокальной перетяжки из глубины к поверхности воды спектр ОВКР существенно изменяется и в спектре появляются новые полосы. Основная ВКР полоса вблизи 3400 см⁻¹ флуктуирует по положению и имеет асимметричную форму с

затянутым низкочастотным хвостом, что аналогично поведению при ПВКР. На границе раздела (0 мм) имеется две субкомпоненты с частотным разделением 377 см⁻¹, что также соответствует свойствам первой стоксовой компоненты ПВКР на границе раздела. Однако, на глубине примерно 3 мм в спектре ОВКР появляется дополнительное разбиение на две субкомпоненты с частотным сдвигом между ними всего 128 см⁻¹. Мы не наблюдали ранее такого разбиения при исследовании ПВКР. Кроме того, начиная с глубины примерно 12 мм в спектре обратного стока появляется новая комбинационно-активная полоса на частоте вблизи 2450 см⁻¹, которая тоже флуктуирует по положению и на глубине 3 мм исчезает. Наблюдаемые новые эффекты в спектрах первой стоксовой компоненты ОВКР связаны, по нашему предположению, с изменением структуры воды в разных слоях на глубине и вблизи поверхности. Кроме того, при исследовании ОВКР нами было обнаружено осевое антистоксовое излучение и измерены спектры в области первой антистоксовой компоненты в зависимости от расстояния фокальной перетяжки до границы раздела вода-воздух, характеризующиеся появлением новых комбинационно-активных полос.

Данные исследования профинансированы в рамках научного проекта БРФФИ-РНФ (проект Ф23РНФ-040).

Литература

1. H. Yui // Anal Bioanal Chem. 2010. V. 397. P. 1181-1190.
2. S.M. Pershin et al. // Optics Letters. 2020. V. 45, N 19. P. 5624-5627.

Термический отжиг тонкопленочной структуры Au/Al₂O₃/a-Ge

Н.А. Лунев^{1,2}, А.О. Замчий¹, В.О. Константинов¹, И.Е. Меркулова¹, М.А. Морозова¹, В.А. Володин³,
Е.А. Баранов¹

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
630090, пр. Академика Лаврентьева, 1

² НГУ, Новосибирск, 630090, Пирогова, 2

³ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск
630090, пр. академика Лаврентьева, 13

тел: +7 (983) 129-8751, эл. почта: nanochirik9@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-131

В настоящее время, одним из перспективных способов получения тонких пленок поликристаллического германия (poly-Ge), позволяющего использование низкотемпературных подложек (пластик, стекло), является метод металлоиндуцированной кристаллизации [1]. В данной работе, в качестве катализатора кристаллизации тонких пленок аморфного германия (a-Ge) было использовано золото. Для снижения плотности центров зародышеобразования (и, как следствие, увеличение размера кристаллита poly-Ge), в качестве тонкого промежуточного слоя, разделяющего пленки Au и a-Ge, был использован слой Al₂O₃.

На подложки из кварцевого стекла осаждали пленки Au толщиной 80 нм методом термовакуумного напыления. Затем был проведен синтез мембранного слоя Al₂O₃ с помощью методом атомно-слоевого осаждения. Толщины мембранного слоя составили 0.2, 0.4, 0.6 и 0.8 нм. Далее на образец наносили тонкие пленки германия толщиной 140 нм методом магнетронного распыления. Отжиг синтезированных образцов был проведен в вакуумной камере при температурах от 220 до 330 °С в течение нескольких часов при давлении 5×10⁻⁴ Па.

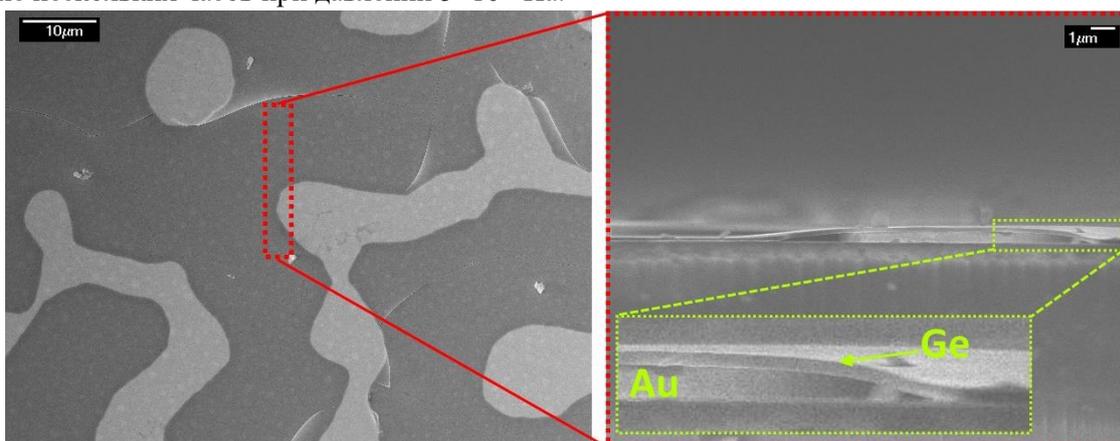


Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности и поперечного сечения образца после отжига.

Использование тонкой мембраны (0.2 нм) приводит к реализации процесса обмена слоями с формированием poly-Ge, что хорошо видно на спектрах комбинационного рассеяния света (КРС) как со стороны пленки, так и со стороны подложки. При этом увеличение толщины Al₂O₃ до 0.8 нм приводит к существенному уменьшению диффузионных процессов, что полностью подавляет кристаллизацию германия в исследуемом интервале температур отжига.

На рис. 1 слева представлено СЭМ-изображение верхней поверхности образца с толщиной мембраны 0.6 нм после отжига при температуре 330 °С. Показанная морфология характерна для толщин Al₂O₃ слоя 0.4 нм и 0.6 нм. Согласно картированию элементного состава, проведенного методом ЭДС, светлые области, это области с повышенным содержанием Au. На рис. 1 справа показано изображение поперечного среза образца после отжига. Видно, что в темных областях пленка Au отсутствует, а в светлых областях произошло утолщение пленки золота до ≈ 500 нм. Согласно КРС-исследованиям, спектры светлых областей со стороны пленки содержат особенности, характерные для a-Ge. Со стороны подложки сигнал от германия в спектрах КРС отсутствует. При этом, в спектрах КРС в темных областях, как со стороны подложки, так и со стороны пленки, присутствует сигнал от аморфного и кристаллического германия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10079, <https://rscf.ru/project/22-79-10079>.

Анализ Li-содержащих соединений на основе β - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ методом КР спектроскопии

Е.В. Латипов¹, Л.С. Волкова¹

¹ ФГБУН ИНМЭ РАН, Москва, 119991, Ленинский проспект, д. 32А

тел.: +7 (967) 266-9733, эл. почта: la_019@mail.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-132

Соединение β - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (β -ТКФ) со структурным типом витлокит, обладает способностью к гетеровалентному замещению, что дает возможность варьирования его функциональных свойств. Введение Li^+ в состав β -ТКФ, содержащий люминесцирующий катион лантанида, может интенсифицировать его люминесценцию. В данной работе с помощью КР спектроскопии проведено уточнения структуры β -ТКФ, содержащей Li^+ [1].

Методом высокотемпературного твердофазного синтеза получены соединения: $\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{PO}_4)_7$, $\text{Ca}_9\text{LiMg}(\text{PO}_4)_7$, $\text{Ca}_9\text{LiZn}(\text{PO}_4)_7$, $\text{Ca}_{8.5}\text{LiSc}(\text{PO}_4)_7$, $\text{Ca}_{8.5}\text{LiLu}(\text{PO}_4)_7$. Методами ЭДС и ИСП-МС установлено, что элементный состав близок к заложенной стехиометрии для всех соединений. Методом рентгеновской дифракции установлено, что все соединения не содержат примесных фаз. Методом Ритвельда определены параметры кристаллической решетки. Все соединения имеют пространственную группу R3c, соответствующую структуре витлокит.

Все полученные соединения имеют характерные для фосфатов моды $\nu(\text{PO}_4)$ (рис.1-2) [2]. Наиболее интенсивная мода $\nu_1(\text{PO}_4)$ (рис.2б), соответствующая симметричному растяжению связей P-O в тетраэдре, смещается в ряду увеличения катиона [3]. Смещение $\nu_1(\text{PO}_4)$ в более энергетическую область относительно β -ТКФ происходит для $\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{PO}_4)_7$. Значения $\nu_1(\text{PO}_4)$ β -ТКФ и $\text{Ca}_9\text{LiZn}(\text{PO}_4)_7$ практически совпадают, что может быть связано с стабилизацией M5 позиции более крупным катионом Zn^{2+} , а также компенсация фоновного взаимодействия Li^+ , полузаполненной позиции M4. Наибольшее смещение $\nu_1(\text{PO}_4)$ наблюдается $\text{Ca}_{8.5}\text{LiLu}(\text{PO}_4)_7$.

Литература

1. Zhang D. et al. Li^+ Ion Induced Full Visible Emission in Single Eu^{2+} -Doped White Emitting Phosphor: Eu^{2+} Site Preference Analysis, Luminescence Properties, and WLED Applications // *Adv. Opt. Mater.* 2021. Vol. 9, № 19. P. 1–13.

2. Nandha Kumar P. Structural Perceptions and Mechanical Evaluation of β - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2/\text{c-CeO}_2$ Composites with Preferential Occupancy of Ce^{3+} and Ce^{4+} // *Inorg. Chem.* 2017. Vol. 56, № 6. P. 3600–3611.

3. De Aza P.N. et al. Vibrational Properties of Calcium Phosphate Compounds. 1. Raman Spectrum of β -Tricalcium Phosphate // *Chem. Mater.* 1997. Vol. 9, № 4. P. 912–915.

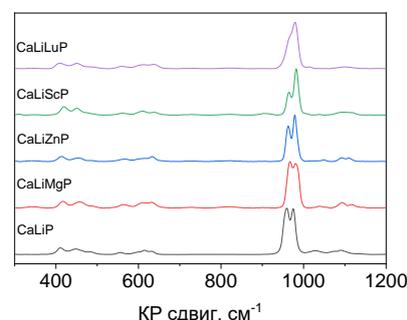


Рис. 1. КР спектры β -ТКФ допированного различными катионами.

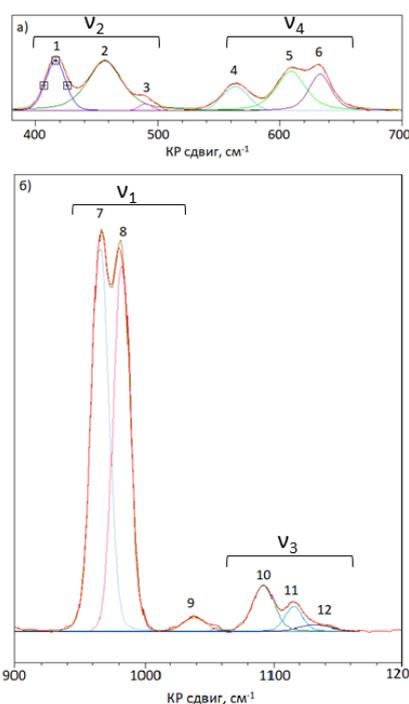


Рис. 2. Аппроксимация КР спектра $\text{Ca}_9\text{LiMg}(\text{PO}_4)_7$: а) область ν_2 и ν_4 мод, б) область ν_1 и ν_3 мод.

Применение методов машинного обучения для определения ионного состава водных сред по спектрам комбинационного рассеяния света

К.А. Лаптинский¹, С.А. Буриков^{1,2}, А.М. Вержвальд², А.Д. Кудряшов², И.В. Пластинин¹,
О.Э. Сарманова², Л.С. Утегенова², Т.А. Доленко^{1,2}

¹ НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва, 119991 Ленинские горы 1, стр. 2

² Физический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова, Москва, 119991 Ленинские горы 1, стр. 2

тел.: +7 (495) 939-1818, факс: +7 (495) 939-0896, эл. почта: laptinskiy@physics.msu.ru

DOI 10.34077/SCATTERING95-133

В настоящее время существует множество методов определения ионного состава водных сред. Все они делятся на два класса: 1) контактные методы - химические; 2) неконтактные методы – радиометрические и оптические. Химические (аналитические) методы обеспечивают достаточно высокую точность определения концентрации ионов, но они времязатратны, требуют грамотной пробоподготовки и расхода дорогостоящих реактивов. Для получения оперативной информации об ионном составе водной среды в настоящее время все больше привлекаются неконтактные методы диагностики водных сред – методы оптической спектроскопии, в частности, спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света. Многие неорганические вещества со сложными ионами (сульфиды, сульфаты, нитраты, фосфаты и др., Рис.1) имеют собственные полосы в колебательных спектрах в области 300–2000 см⁻¹. По колебательным полосам водных сред в указанной области волновых чисел можно определить, какие из сложных ионов присутствуют в воде и в каких количествах. Известно, что положение и форма валентной полосы КР воды (2700–4000 см⁻¹) в большой степени зависят от типа соли и ее концентрации в растворе (Рис.1), причем, различные ионы вызывают различные изменения положения и формы валентной полосы КР воды. Ввиду неспецифичности влияния различных ионов на форму валентной полосы воды и неизбежного взаимодействия ионов не только с молекулами воды, но и друг с другом, анализ спектров КР воды представляется нетривиальным. Для одновременного определения типа и концентрации многих ионов в водной среде по спектрам КР в настоящей работе были использованы искусственные нейронные сети.

В качестве объектов исследования использовались водные растворы нитратов и сульфатов: Zn(NO₃)₂, ZnSO₄, Cu(NO₃)₂, CuSO₄, LiNO₃, Fe(NO₃)₃, NiSO₄, Ni(NO₃)₂, (NH₄)₂SO₄, NH₄NO₃. (производство Баумлюкс) с концентрациями от 0 до 0.9 М, что соответствует, в среднем, диапазону концентраций искомых ионов в технологических водных средах заводов по производству цветных металлов. Для применения нейронных сетей было приготовлено 3744 водных раствора солей с различными концентрациями в деионизованной воде и получены их спектры КР.

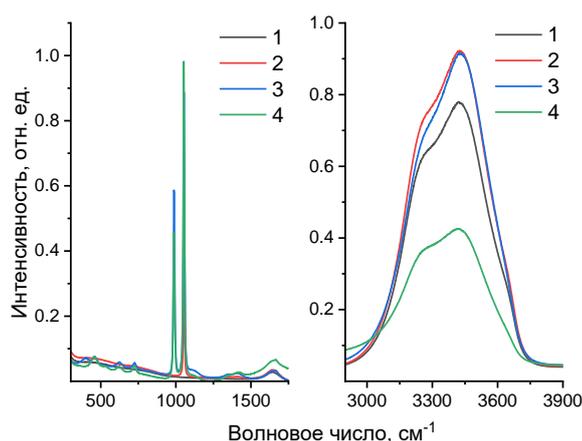


Рис. 1. Спектры КР воды и водных растворов солей. 1 – дист. вода; 2 - 0.22M LiNO₃; 3 - 0.47M Zn(NO₃)₂, 0.62M ZnSO₄; 4 - 0.22M Cu(NO₃)₂, 0.47M LiNO₃, 0.40M (NH₄)₂SO₄.

Полученные в результате применения перцептронов точности определения концентрации искомых ионов удовлетворяют потребности экологического мониторинга природных и сточных вод, а также диагностики технологических сред.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-2143.2022.4).

Изменение спектров комбинационного рассеяния LiNbO₃ при приложении внешнего электрического поля

A. Irzhak¹, D. Irzhak¹, K. Pundikov¹, A. Sergeev²

¹*Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow district, 142432, Russia*

²*Federal State Institution, Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, Nakhimovskiy pr., 36-1, Moscow, 117218, Russia*

DOI 10.34077/SCATTERING95-134

В данной работе метод Рамановской спектроскопии в сочетании с PCA (principal components analysis) использовался для исследования деформации кристаллической решетки вследствие обратного пьезоэффекта при приложении электрического напряжения между штырями ВШП. Помимо обнаружения влияния приложенного электрического поля, продемонстрировано, что использование PCA позволяет разделить влияние воздействий различной физической природы на изменение спектров.

Исследования проводились на Y-срезе монокристалла ниобата лития, на поверхности которого был сформирован Al встречно-штыревой преобразователь. Ширина штырей и зазор между ними составлял 25 μm . Во избежание электрического пробоя по поверхности кристалла была нанесена прозрачная пленка оксида титана толщиной 150 нм. Выбор TiO₂ обусловлен тем, что линии спектра комбинационного рассеяния TiO₂ совпадают с линиями Y-среза ниобата лития, не добавляя дополнительных линий в спектр комбинационного рассеяния образца.

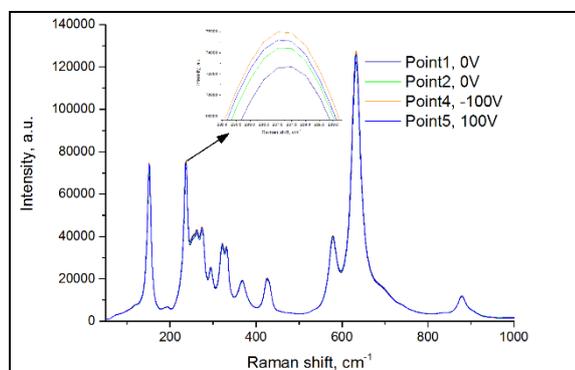


Рис. 1. Экспериментальные спектры комбинационного рассеяния, полученные в различных точках образца при различных напряжениях на ВШП.

Для разделения вклада этих воздействий в изменение спектров комбинационного рассеяния был использован метод главных компонент. На рисунке 2а показаны зависимости первых четырех главных компонент от номера точки съемки (область на поверхности образца) Рамановского спектра и от приложенного к ВШП электрического напряжения. Первая, вторая и четвертая главные компоненты зависят от номера точки съемки, причем их изменения нескоррелированы. Третья главная компонента линейно зависит от величины приложенного напряжения.

Форма нагрузок главных компонент (рисунок 2 б) позволяет определить характер изменения пиков комбинационного рассеяния и сделать выводы о причинах этого изменения.

Приложение электрического напряжения к ВШП вызывает деформацию кристаллической решетки вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта. На рисунке 1 продемонстрированы Рамановские спектры для различных точек на поверхности образца, полученные при различных значениях приложенного к ВШП электрического напряжения. Интенсивность и положение спектральных линий соответствуют известным литературным данным [1,2]. Наблюдаются незначительные различия спектров при одинаковом напряжении на ВШП, так и для спектров, полученных в одной точке при различных значениях приложенного электрического напряжения. Очевидно, что изменения спектров связаны как с неоднородностью кристалла, так и с изменением значения приложенного электрического напряжения.

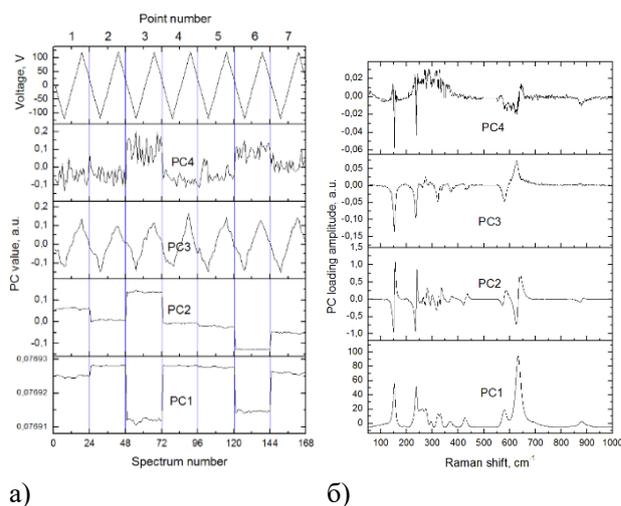


Рис. 2. Главные компоненты

Литература

1. D. Irzhak, R. Fahrtdinov, A. Sergeev, Direct optical reading of resistive switching in a TiO₂ film, *Optical Materials*, Vol. 109, 110361, (2020).
2. S. Margueron, A. Bartaszyte, A. M. Glazer, E. Simon, J. Hlinka, I. Gregora, and J. Gleize, Resolved E-symmetry zone-centre phonons in LiTaO₃ and LiNbO₃, *J. Appl. Phys.* 111, 104105 (2012).

ГКР метки визуализации с ковалентно конъюгированным красителем: получение, тестирование и выявленные особенности

В.О. Свинко, Е.В. Соловьева

Институт Химии, Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург,

198504, Университетский проспект, 26

тел: +7 (963) 126-9599, эл. почта: vaslisa0@gmail.com

DOI 10.34077/SCATTERING95-135

Создание оптических меток, способных работать в режиме визуализации с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), является активной темой научных разработок в последние годы. Спектроскопия КР является широко используемым методом качественного и количественного анализа различных молекул, с помощью которого можно не только детектировать присутствие биологически активных веществ, но и изучать их метаболизм. Для подобных задач часто используют наночастицы (НЧ) благородных металлов в качестве агентов усиления сигнала [1]. Немаловажный момент для таких систем состоит в способе связывания оптически активного красителя с металлическим ядром. Существует два метода: электростатическая и ковалентная иммобилизации. Первый дает более интенсивный сигнал флуоресценции, а при использовании второго можно получить более интенсивный ГКР отклик, именно поэтому на данный момент оптимизация структуры и состава таких систем является актуальной задачей.

Целью данной работы стала разработка меток на основе НЧ золота и красителя цианина 5.5 для работы в области прозрачности биологических тканей. Для увеличения биосовместимости систем производилось покрытие НЧ полимером по технике «слой-за-слоем». Краситель внедрялся в оболочку путем электростатической адсорбции или путем ковалентной конъюгации к аминокислотному полимеру. В результате была получена серия меток, отличающихся номером слоя, к которому присоединялся краситель, т.е. степенью его удаления от плазмонного ядра. После синтеза метки охарактеризованы с помощью ПЭМ, динамического светорассеяния, спектроскопии поглощения. Для полученных систем «ядро-оболочка» также зарегистрированы спектры КР и флуоресценции, с их использованием проведено ГКР картирование клеточных образцов линии карциномы поджелудочной железы (PANC-1).

Для меток с ковалентно иммобилизованным цианином 5.5 получен значительно более интенсивный ГКР сигнал по сравнению с метками с электростатически связанным красителем. Неожиданным стало наблюдение интенсивного сигнала даже для систем, в которых краситель конъюгирован к 4 слою полимера. Полученные ГКР карты клеточных образцов показали высокий потенциал полученных меток.

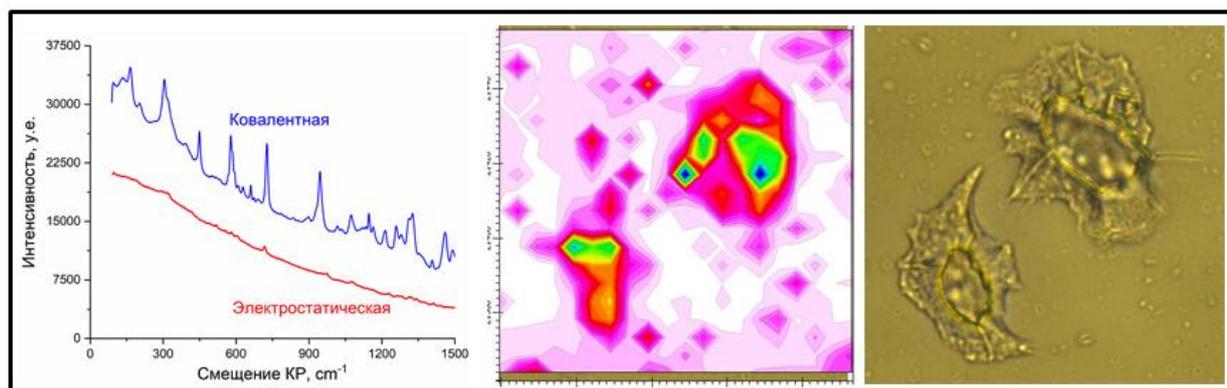


Рис. 1. ГКР спектры меток с красителем, иммобилизованным разными способами (слева); ГКР карта двух клеток линии PANC-1, полученная после инкубации с метками ($\lambda_{\text{возб.}} = 785 \text{ нм}$) (посередине); оптическое изображение картируемых клеток (справа).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-73-10052. Авторы выражают благодарности ресурсным центрам СПбГУ: «Методы анализа состава вещества», «Оптические и лазерные методы исследования вещества».

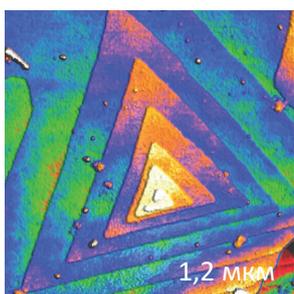
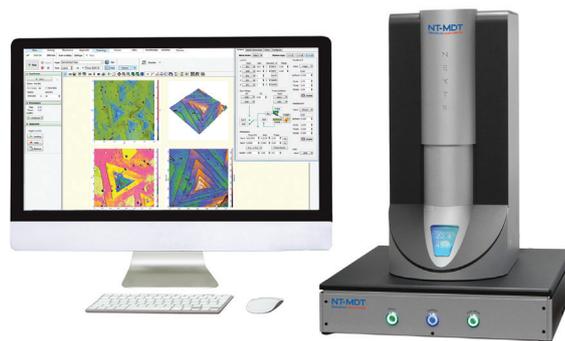
Литература

1. K. Hering et al. SERS: a versatile tool in chemical and biochemical diagnostics // Anal. Bioanal. Chem. 2008. Vol.390, №1. P.113-124.

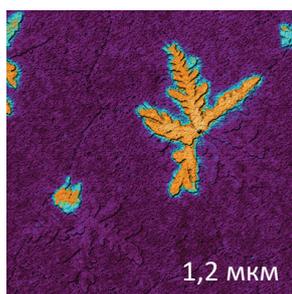
NEXT II

Результаты предельно высокого качества на повседневной основе

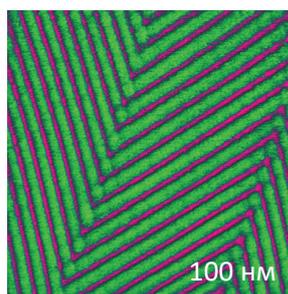
- Исследовательский АСМ с исключительным уровнем автоматизации подготовки и проведения эксперимента
- Рекордно низкий уровень шумов и высочайшая стабильность
- Полный набор самых современных методов АСМ, включая методы прыжковой микроскопии (Hybrid Mode™)



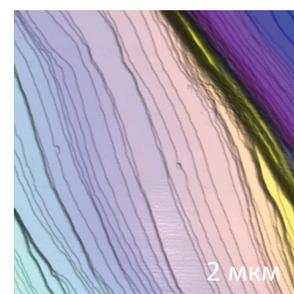
Остроконечная структура Al_2O_3 полученная с использованием ScanTronic и в ручном режиме



Кристаллы пентацена. ЭСМ карта наложенная на рельеф



Молекулярные цепочки фторалканов F14H20 на слюде

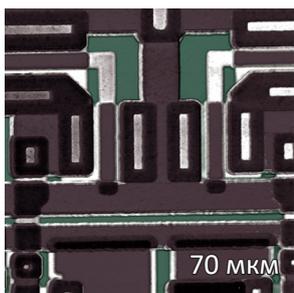


Кристалл поваренной соли

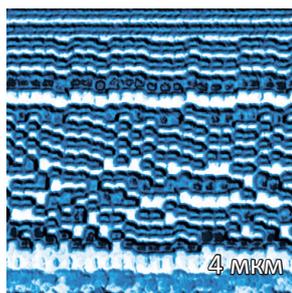
VEGA

Высокопроизводительный АСМ для исследования большеразмерных образцов

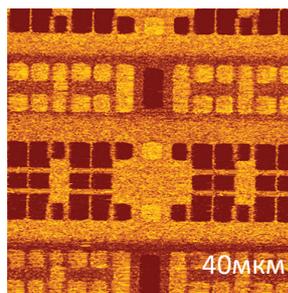
- Измерения рельефа и других поверхностных свойств с нанометровым пространственным разрешением на пластинах диаметром до 200 мм, большеразмерных образцах и массивах образцов
- Высочайший уровень автоматизации процессов настройки и измерений
- 50+ современных методов АСМ, включая методы высокоскоростной прыжковой микроскопии
- Быстрое сканирование для рутинных потоковых измерений морфологии структур



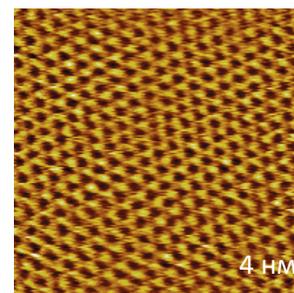
Рельеф фрагмента микросхемы



Магнитные домены в HDD 1 T5



Поверхностный пртенциал в SRAM



Атомное разрешение на графите

www.ntmdt-si.com

Узнать больше

www.ntmdt-tips.com

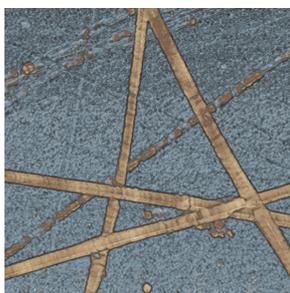
Контроллер HD 2.0

Реализует самый широкий набор методов прыжковой атомно-силовой микроскопии

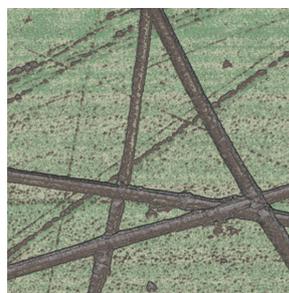
- Неразрушающие исследования мягких, хрупких и плохо зафиксированных объектов
- Быстрые количественные наномеханические и объемно-силовые измерения, неразрушающие измерения проводимости, пьезоэлектрического отклика, теплопроводности и термоэлектрических свойств, измерения магнитно-силовой, электростатической, сканирующей емкостной или Кельвин-зондовой силовой микроскопией
- Новые возможности картирования в зондово-усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния (2D TERS mapping)



Рельеф



Адгезия



Модуль Юнга



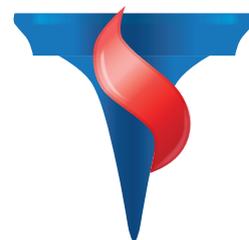
Латеральный пьезоотклик

Неразрушающее исследование пептидных нанотрубок на основе дифенилаланина методом Прыжковой АСМ. Размер скана: 7×7 мкм

ScanTronic™

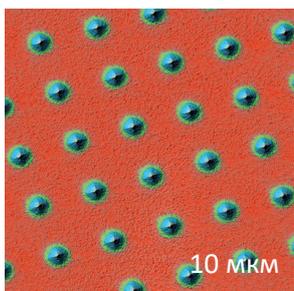
Программный модуль ScanTronic: полностью автоматическая настройка сканирования в полуконтактной АСМ

- Автоматическая настройка параметров обратной связи, амплитуды колебаний зонда, значения рабочей точки и скорости сканирования
- Выбор режима притяжения или отталкивания
- Сканирование без артефактов парашютирования или их компенсация
- Блестящие изображения рельефа и фазового контраста на образцах любой морфологии

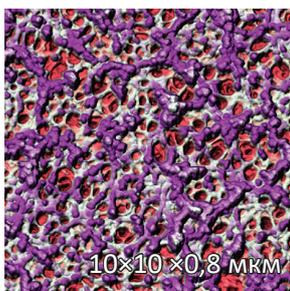


Техника дойдет до такого совершенства, что человек сможет обойтись без себя

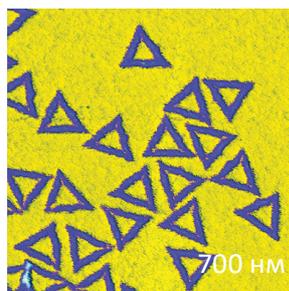
Станислав Ежи Лец



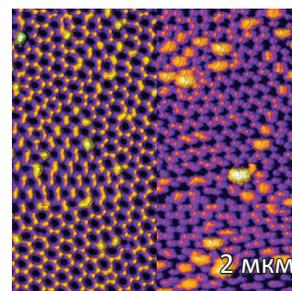
Массив заготовок АСМ зондов
10 мкм



Нитроцеллюлозная мембрана
10×10 × 0,8 мкм



ДНК-оригами на слайде
700 нм



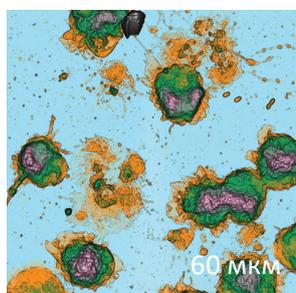
Остроконечная структура Al₂O₃ полученная с использованием ScanTronic и в ручном режиме
2 мкм

NTEGRA II

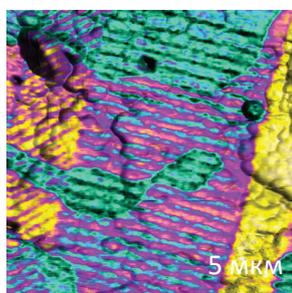
Легендарный АСМ для научных исследований,
 оснащенный всеми новейшими решениями



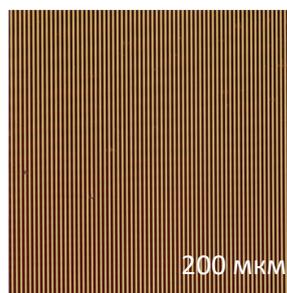
- Открытая архитектура: потрясающая гибкость системы и широчайшие возможности конфигурирования под конкретную научную задачу
- Все самые современные методы АСМ, включая самый широкий набор методов прыжковой микроскопии (Hybrid Mode)
- Автоматизация эксперимента благодаря интеллектуальному программному модулю ScanTronic
- Возможность развития до АСМ-Раман систем, систем микроскопии и спектроскопии нанометрового пространственного разрешения в видимом, ИК и ТГц диапазоне



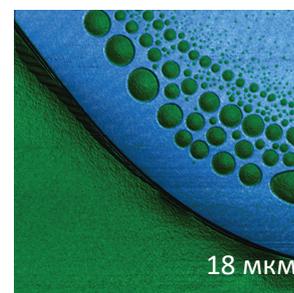
АСМ изображение нейтрофилов на стекле



Доменная структура тонкой пьезоэлектрической пленки



Изображение калибровочной решетки, полученное в конфигурации DualScan™

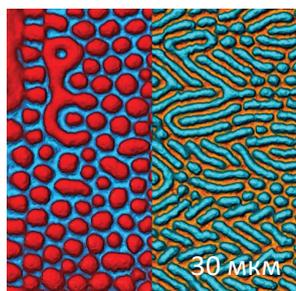


Карта модуля упругости смеси полистирола (голубой) с полиэтиленом (зелёный)

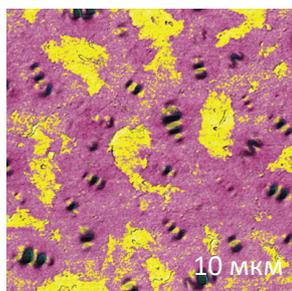
NTEGRA II - конфигурации и опции



- Чтобы исключить влияние шумной среды, NTEGRA II поставляется в стандартном шкафу, обеспечивающем стабилизацию термодрейфов, акустическую и виброизоляцию
- NTEGRA II позволяет сканировать до 10 Гц со стандартными кантилеверами (резонансная частота до 500 кГц) и до 25 Гц с короткими кантилеверами (резонансная частота более 1 МГц)
- Для традиционной биологической визуализации АСМ, а также биохимии и биоорганических приложений NTEGRA II использует уникальную герметичную ячейку с жидкостью, которая поддерживает замкнутый объем.
- Проведение АСМ-измерений в условиях контролируемой атмосферы, низкого и среднего вакуума, а также в условиях приложения внешнего магнитного поля



МСМ карты иттриевого железного граната до и после приложения латерального магнитного поля



Карта адгезии пленки битума



Поверхность ВОПГ в вакууме

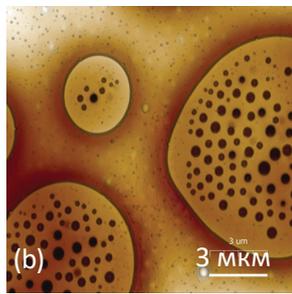
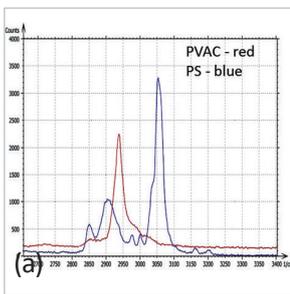


Карта поверхностного потенциала чешуек WS_2 выращенных на эпитаксиальном графене. Изображение получено в вакууме

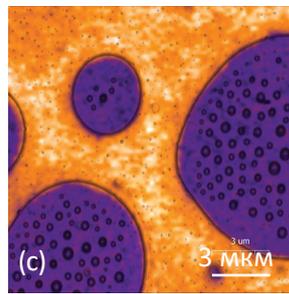
NTEGRA Spectra II

Автоматизированная АСМ-Раман система

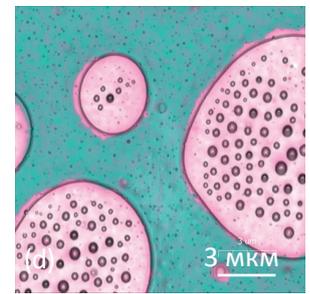
- Оптический доступ сверху, сбоку и снизу оптимизирован для Рамана, TERS и SNOM
- Открытый дизайн обеспечивает широкие возможности в настройке системы
- Допускается использование до 5 различных автоматически подключаемых лазеров
- АСМ-Раман исследования на воздухе, в контролируемой атмосфере, жидкости, при переменной температуре
- Полная автоматизация системы упрощает рутинные операции



Height



PVAC (2839 cm^{-1} - 2980 cm^{-1})



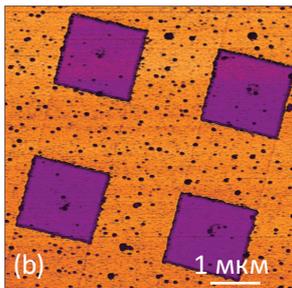
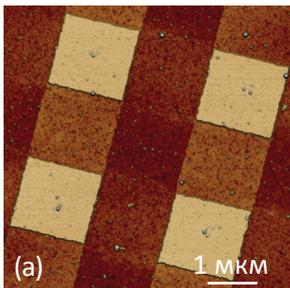
PS (3000 cm^{-1} - 3140 cm^{-1})

(a) Рамановские спектры поливинилацетата (PVAC) и полистирена (PS), (b) изображение рельефа пленки PS/PVAC. (c)-(d) Рамановские карты полос PVAC и PS

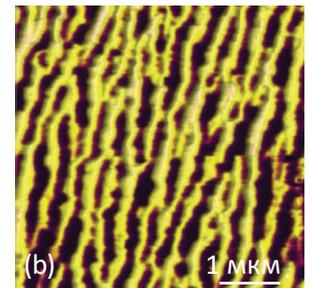
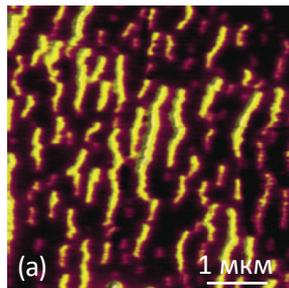
NTEGRA nano IR

Инфракрасная микроскопия и спектроскопия с нанометровым пространственным разрешением

- Рассеивающая ближнепольная оптическая микроскопия (s-SNOM) в видимом, инфракрасном (ИК) и ТГц диапазонах
- Низкий дрейф и высокая стабильность системы
- Универсальный исследовательский АСМ с полным набором самых современных методов исследования морфологии, наномеханических, электрических и магнитных свойств образца, включая методы прыжковой микроскопии (Hybrid Mode™)
- Интеллектуальная система ScanTronic™ обеспечивает оптимальную для получения s-SNOM контрастов настройку режима взаимодействия зонда и образца



Рельеф (a) и p-SNOM амплитуда (b) решетки Si/SiO₂



Наложенные на рельеф изображения контрастов отражения при 55 °C (a) и при 67 °C (b), $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$. Образец представлен prof. Liu (Stony Brook University, New York, USA)



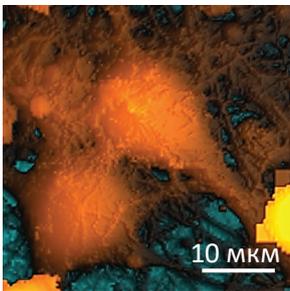
NTEGRA Marlin

Новейшая система АСМ-Раман-СМИП для биологических исследований

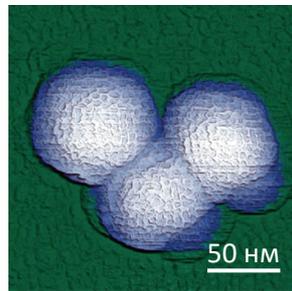
- Высокоскоростная сканирующая микроскопия ионной проводимости
- Бесконтактное исследование живых клеток в естественной физиологической среде
- Измерение механических свойств в широком диапазоне жесткостей
- Patch-clamp измерения с нанометровой локализацией
- Комбинация с оптическими методиками



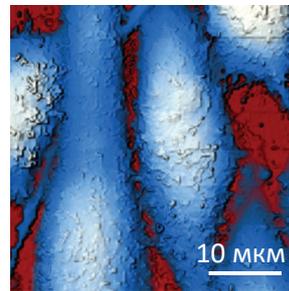
Проект реализуется при содействии Фонда содействия инновациям



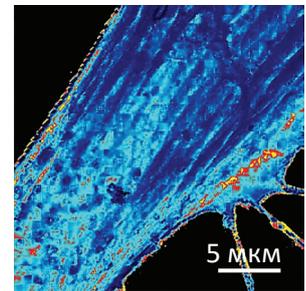
СМИП-изображение живого нейрона из гиппокампа мыши



АСМ-изображение частиц риновируса



СМИП-изображение клеток карциномы РСЗ предстательной железы человека

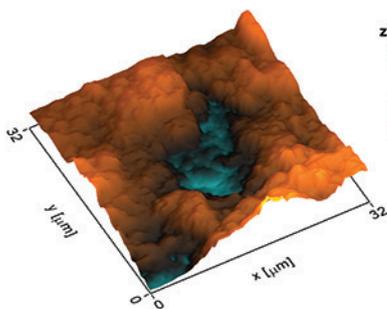


СМИП карта модуля упругости живого фибробласта. $E=2$ Па..3,4 МПа

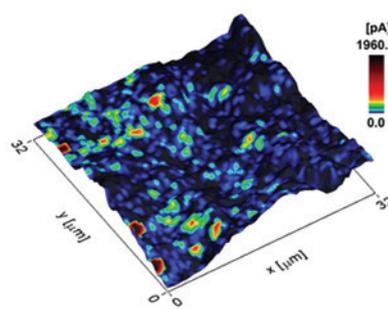
NTEGRA Helios

Интеграция наноИК-спектроскопии и электрохимической микроскопии

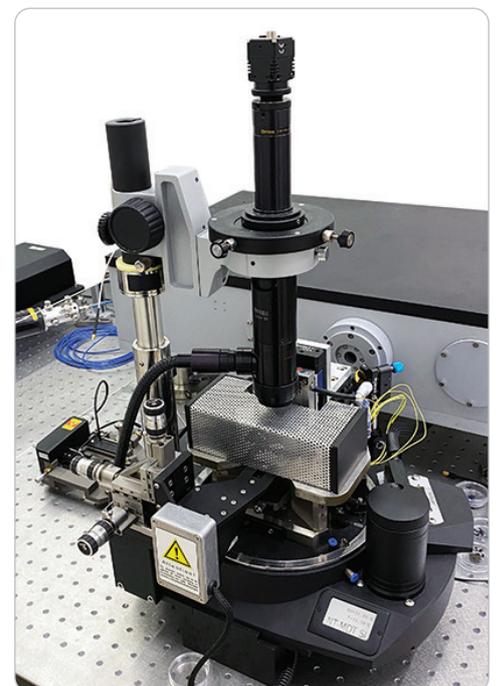
- Измерение электрохимической активности различных топливных элементов с наноразмерным разрешением путем создания локальной электрохимической ячейки
- Совмещенная система представляет собой капиллярный нанозонд, который заполняется катализатором, активирующим процесс зарядки-разрядки электрохимической ячейки



Топография поверхности образца CuHCF



Карта электрохимической активности образца CuHCF



ИНТЕГРА Гелиос с измерительной головкой СЭХМ

ЭМТИОН

ООО НТЦ ЭМТИОН – это российская инновационная компания, специализирующаяся на производстве и поставках аналитического и технологического оборудования.

Ведущие специалисты компании имеют 15-летний опыт работы в области приборостроения. НТЦ ЭМТИОН предлагает Заказчикам как отдельные решения, так и комплексное оснащение лабораторий, начиная с этапов проработки концепции и предпроектных работ и заканчивая вводом оборудования в эксплуатацию. Опытные инженеры осуществляют сервис в течении всего срока эксплуатации Оборудования.

Рентгеновская дифрактометрия



- Порошковые и монокристалльные дифрактометры
- Высокопроизводительные детекторы Mythen
- Вращение образца 360°
- Автосменщик до 12 образцов
- Высокоточный гониометр
- Угловой диапазон сканирования -110°/161°
- Минимальный шаг сканирования 0,0001°
- Температурный диапазон от -196°С до 1600°С
- База данных спектров, программа обработки

Электронная микроскопия



- Термомиссионный катод
- Катод с полевой эмиссией типа Шоттки
- Ускоряющее напряжение от 0.1кВ до 30кВ
- Увеличение от 6 до 1 000 000x
- Разрешение до 1 нм
- Опции низкого вакуума и низкого ускоряющего напряжения
- Система энергодисперсионного микроанализа
- Опции EBSD, CL, AFM, Tensile stage и др

Оптические профилометры



- Быстрое бесконтактное сканирование 2D профиля образца и 3D топографии.
- Измерение шероховатости образца, кривизны поверхности, толщины пленок, анализ дефектов (микротрещины, сколы, царапины) и др.
- Вертикальное z разрешение до 0.1 (PSI)
- Возможность изменения поля зрения за счет использования разных объективов.
- Высокая повторяемость и воспроизводимость измерений

Атомно-силовая микроскопия



- Поддержка всех существующих АСМ методик
- Прыжковая микроскопия для количественного нано-механического анализа
- Измерение линейной ВАХ в диапазоне токов от 50пА до 100мкА
- Диапазон сканирования 100x100x10мкм
- Разрешение по оси Z – 0,05 нм
- Опции нагрева, охлаждения, измерения в жидкости, в вакууме, в магнитном поле и др

Вибромагнетометры (VSM)



- Вибромагнетометры с охлаждением жидким азотом
- Диапазон магнитных полей до 9 Тл
- Широкий выбор опций
- Измерение кривой намагниченности, петли гистерезиса и множества других параметров
- Безжидкостные низкотемпературные вибромагнетометры 1.5-400 К

КР (рамановская) спектроскопии и микроскопия



- До 5ти автоматически выбираемых лазеров
- Пространственное разрешение до 0,2мкм
- Спектральный диапазон 350-1100 нм
- Спектральное разрешение 0.25 см⁻¹
- Четыре автоматизированные дифракционные решетки
- Возможность комбинации с жидкостными, газовыми, охлаждающими и вакуумными ячейками

23

года группе компаний
«Научное оборудование»

В СВОЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МЫ СЧИТАЕМ
НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫМИ СЛЕДУЮЩИЕ
МОМЕНТЫ:

→ **ЮРИДИЧЕСКАЯ ЧИСТОТА И БЕЗОПАСНОСТЬ**

Мы полностью соблюдаем налоговое и таможенное законодательство и избегаем рисков, связанных с ненадлежащим его исполнением. Наши заказчики получают оборудование, оформленное с соблюдением всех необходимых формальностей.

→ **ОБЪЕКТИВНОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ**

Своевременное предоставление партнерам полной и достоверной информации по всем интересующим их вопросам – приоритет нашей компании, позволяющий партнёрам получать наилучший результат.

→ **ОТКРЫТОСТЬ И КОМПЕТЕНТНОСТЬ**

Ежедневно мы сталкиваемся с задачами, связанными с коммерческой деятельностью в России. Нам известны все нюансы и подводные камни этой деятельности в условиях сложной российской действительности. Мы всегда берем на себя решение этих задач и эффективно с ними справляемся.

> 6460

исполненных контрактов
за 3 года

> 500

городов-заказчиков
оборудования

> 50

стран-импортеров
оборудования

> 10000

партнеров

> 1000

брендов мы предлагаем
нашим заказчикам

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

B

Bayer M. 38

C

Cheshev Dmitry 57

D

Darwin Kurniawan 30

I

Irzhak D. 134

Irzhak A. 134

J

Jin L. 17

K

Kudlacik D. 38

M

Matković A. 57

Milekhin I.A. 16

Muhammad Awais 57

Aslam

N

Nelson E. Villa 57

P

Pesic Jelena 57

Pundikov K. 134

R

Rodriguez Raul .D. 57

Rolle K. 81

S

Senkovska I. 56

Sergeev A. 134

Sheremet E. 57

T

Tian Y. 17

Tuan-Hoang Tran 57

W

Wei X. 17

Wei-Hung Chiang 30

Z

Zahn D.R.T. 16

Zahn D.R.T. 42

A

Абалмасов В.А. 76

Аверкиев А.А. 90

Адищев С.В. 63, 126

Азаров И.А. 64

Александровский А.С. 124

Алексеев П.А. 37

Амстиславский С.Я. 80, 126

Аникин К.В. 16, 42

Аникина М.А. 122

Антонов В.А. 19, 65

Антонова И.В. 34, 70

Архипенко М.В. 59

Ахмедов М.А. 125

Б

Баграмов Р.Х. 18

Балахнин Д.А. 104

Баранов Е.А. 49, 131

Баркалов О.И. 115

Барышев А.В. 45, 87

Басалаева Л.С. 16, 39, 96

Бедин С.А. 67, 85, 86, 108

Бережанский В.Н. 107

Бережной П.С. 43

Беставашвили А.А. 113

Богданова Л.И. 29

Бокова-Сирош С.Н. 46

Бондаренко А.В. 89, 113

Бородина У.О. 25, 116

Брусенцев Е.Ю. 80

Булатов М.Ф. 107

Бункин А.Ф. 59, 77

Буриков С.А. 133

Бурко А.А. 89, 113

Быков А.А. 14

Быков Ан.В. 14

Быков В.А. 14

В

Вагов А.В. 92

Ваньков А.Б. 43

Васильев Р.Б. 16, 96

Венер М.В.	62	Деменьшин А.И.	88, 109
Вервальд А.М.	133	Демин С.П.	21
Власов И.И.	18	Добрынина Е.А.	54, 60, 63, 82
Водчиц А.И.	129, 130	Доленко Т.А.	83, 133
Волкова Л.С.	110, 111, 112, 132	Домнин П.А.	71
Володин В.А.	22, 27, 40, 47, 64, 65, 72, 94, 95, 121, 131	Драчев В.П.	108
Воног В.В.	17	Дронов А.А.	101
Воробьев Ю.В.	49	Дубков С.В.	89, 113
Вотяков С.Л.	26, 119	Дубровский А.А.	124
Вражнов Д.А.	32	Дуда Т.А.	96
Втюрин А.Н.	17, 24, 56, 116, 124, 128	Дудин А.А.	31
Высоких Ю.Е.	107	Е	
Г		Едельбекова П. А.	110, 111, 113, 114
Гаврилин И.М.	101	Елисеев И.А.	30
Гавриличева К.А.	115	Емельянов Е.А.	16, 39, 102
Галкин Н.Г.	100	Ермолаева С.А.	71
Галкин К.Н.	100	Ж	
Гафуров М.М.	51, 52, 125	Журавлев К.С.	16, 42
Герасимов М.А.	124	З	
Герасимова Ю.В.	124	Заботнов С.В.	73
Гисматулин А.А.	64	Завацкий С.А.	89, 113
Годяев Н.В.	103	Зайцева И.В.	54
Гойхман А.Ю.	20	Зайцева Ю.В.	79, 126
Головань Л.А.	36	Замчий А.О.	49, 131
Головкина Е.В.	128	Зацепин А.Ф.	41
Голубев Е.А.	35	Зыкова В.А.	60, 63, 82
Гончар К.А.	71	И	
Горошко О.А.	101, 106	Ивченко Е.Л.	55
Горошко Д.Л.	100, 101, 106	Игонина Т.Н.	80
Горайнов С.В.	25, 116	Калачев И.В.	102
Графова В.П.	96	Калинин В.А.	34, 70
Гриценко В.А.	64	Камаев Г.Н.	27, 64, 121
Гришин Т.С.	110, 111, 112, 114	Карменян А.В.	127
Гришин М.Я.	129, 130	Карпов М.А.	118
Гришина С.Н.	25	Карпова О.В.	59
Гудим И.А.	24	Карташев И.А.	19
Гутаковский А.К.	31	Кацюба А.В.	27, 121
Гюппенен О.Д.	71	Кашкаров П.К.	73
Д		Кириленко Д.А.	37
Давыдов В.Ю.	30, 37	Киряков А.Н.	41
Давыдов М.А.	59	Киселева Д.В.	48
Данилов П.А.	69, 73	Кистенев Ю.В.	32
Двуреченский А.В.	27, 121	Ковалец Н.П.	67
		Коваль О.Ю.	122

Кожина Е.П.	67, 85, 86, 108	Лихачева А.Ю.	25
Козодаев Д.А.	23	Лунев Н.А.	49, 131
Колесов Б.А.	74		
Колосветов А.А.	120	М	
Комлева Е.В.	26, 119	Максимова К.Ю.	20
Кондюрина С.Г.	126	Малин Т.	42
Константинов В.О.	49, 131	Мансуров В.Г.	16, 42
Кореев А.С.	43	Маресев А.Н.	118
Корепанов В.И.	92	Маслов А.М.	100
Корец А.Я.	104	Матросов И.И.	84
Корсаков А.В.	21	Мельник Н.Н.	33, 91, 97, 127
Кособоков М.Г.	105	Мельников С.А.	105
Косолобов С.С.	108	Меркулова И.Е.	131
Косцов Д.С.	33, 97	Милёхин А.Г.	16, 34, 39, 42, 70, 96, 102, 120
Котов В.В.	14	Милёхин И.А.	42, 102, 120
Крайский А.В.	78	Миронова Т.В.	118
Краснобородько С.Ю.	107	Михайлов И.А.	110, 111, 112
Кривоногова А.Ю.	120	Михайлова Т.В.	107
Кропачев О.В.	100	Можаров А.М.	37
Крылов А.С.	17, 24, 25, 28, 44, 56, 99, 104, 116, 124, 128	Морозова М.А.	131
Крылова С.Н.	17, 24, 25, 44, 56, 116, 128	Мухин И.С.	37
Кубатаев З.Ю.	51, 52	Мяконьких А.В.	65
Кудрявцев О.С.	18		
Кудрявцева А.Д.	118	Н	
Кудряшов А.Д.	133	Назаровская Д.А.	71
Кудряшов С.И.	69	Насимов Д.А.	31
Кузнецов Е.В.	23	Наумов А.В.	13, 67, 85, 86
Кузьмин Е.В.	73	Небогатикова Н.А.	34, 70
Кукушкин И.В.	43	Никифоров А.А.	98, 99
Кункель Т.С.	73	Новиков Д.В.	89, 112, 113
Курусь Н.Н.	16, 31, 34, 42, 70, 120	Новиков Ю.Н.	64
Кучинская П.А.	27, 121	Новиков В.Н.	54
Л		О	
Лактионова А.В.	82	Образцова Е.Д.	30, 46
Лапташ Н.М.	124	Окотруб К.А.	66, 80, 126
Лаптинский К.А.	133	Олин И.Э.	104
Лапутько Д.Д.	89	Омельченко А.Н.	66, 80
Ларкин И.А.	92	Орешонков А.С.	58
Латипов Е.В.	110, 111, 112, 114, 132	Орлович В.А.	129, 130
Латышев А.В.	16, 31, 34, 42, 70, 102	Осминкина Л.А.	71, 75
Лебедев О.И.	18	Остриков С.А.	69
Леесмент С.И.	14		
		П	
		Павликов А.В.	46
		Павлов А.А.	31
		Панкрушина Е.А.	26, 48, 119

Панькин Д.В.	61	Скопцова Г.Н.	97
Паращук Д.Ю.	62	Скуратов В.А.	65
Паращук О.Д.	62	Смирнов А.Н.	37, 88, 109
Пастернак Д.Г.	18	Смирнов М.Б.	61
Пелегов Д. В.	44, 50, 98, 99, 103, 105	Соколовская О.И.	36
Переведенцева Е.В.	127	Соловьева Е.В.	88, 109, 135
Першин С.М.	59, 77, 129, 130	Сосорев А.Ю.	62
Петров Д.В.	53, 84	Степанов А.Л.	46
Печурин М.С.	119	Субботин Е.Ю.	100
Пластинин И.В.	83, 133	Сулейманов С.Х.	41
Поборчий В.В.	93	Суровцев Н.В.	15, 60, 63, 79, 80
Подлесный С.Н.	19	Суханова Е.В.	58
Поляков В.В.	14	Сушанек Л.Я.	41, 117
Попов В.П.	19, 40, 65, 94, 95	Сы Ч.	95
Попов З.И.	58		
Преображенский В.В.	16, 39, 102	Т	
Просвирин И.П.	64	Тананаев П.Н.	45
Пугачёв А.М.	63	Таничев А.С.	53
Путято М.А.	16, 39	Тареева М.В.	118
		Трегулов В.В.	97
Р		Трубицын А.А.	62
Рабданов К.Ш.	51, 52, 125	Трусов М.А.	23
Рабданова Д.И.	125	Тумашев В.С.	102
Разумовская И.В.	67	Тыщенко И.Е.	40, 94, 95
Рахманова Т.А.	126		
Рогило Д.И.	31	У	
Рогинский Е.М.	17, 123, 61	Уманская С.Ф.	118
Рогов А.М.	46	Утегенова Л.С.	133
Родина А.В.	55	Уткин Д.Е.	72
Родригес Р.Д.	90		
Родякин С.В.	31	Ф	
Родякина Е.Е.	34, 70	Федина Л.И.	31
Руденко К.В.	65	Федоров А.Н.	59
Рябин А.А.	44, 103, 105	Фёдоров В.В.	37
		Федотов П.В.	30
С		Филоненко В.П.	18
Савин А.В.	61, 123	Фокин А.В.	93
Самаринова А.	32		
Сарманова О.Э.	133	Х	
Сатанин А.М.	18	Харланов О.Г.	62
Сачков В.А.	22	Ходасевич И.А.	129, 130
Свинко В.О.	88, 109, 135		
Сгибнев Е.М.	45, 87	Ц	
Сейсембаева В.Р.	105	Царёв А.В.	72
Семенова О.В.	104	Циняйкин И.И.	71
Семенова О.И.	31	Цырлин Г.Э.	37
Симаков С.К.	33		

Ч

Ченг Ч.Л.	127
Черкасова О.П.	32
Черкова С.Г.	64, 95
Чернев И.М.	100
Чернега Н.В.	118
Чешев Д.Л.	90
Чжан Ж.	94
Чжан Ф.	47
Чуриков Д.В.	107
Чусовитина С.В.	106

Ш

Шагалов Е.С.	48
Шамирзаев Т.С.	38
Шапошников А.Н.	107
Шарафутдинова А.М.	46
Шаров В.А.	37
Шашков Е.В.	129
Швец П.В.	20
Шевченко М.А.	118
Шека Е.Ф.	35
Шелаев А.В.	45, 87
Шеремет Е.С.	90
Шкляев А.А.	72, 93
Шубина Т.В.	68
Шулейко Д.В.	73

Щ

Щапова Ю.В.	29, 41, 117
Щеглов Д.В.	31

Ю

Юшина И.Д.	28, 56
------------	--------

Я

Яковлев Д. Р.	38
---------------	----

СПИСОК УЧАСТНИКОВ

Tuan-Hoang Tran

Tomsk Polytechnic University г. Tomsk

Абалмасов Вениамин Александрович

ФГБУН Институт автоматики и
электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
abalmasov@iae.nsc.ru

Адищев Сергей Владимирович

ФГБУН Институт автоматики и
электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
adish@ngs.ru

Алексеев Прохор Анатольевич

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,
г. Санкт-Петербург
prokhor@mail.ioffe.ru

Аникина Мария Александровна

Московский физико-технический
институт (национальный
исследовательский университет),
г. Москва
mari.a.nikina@yandex.ru

Басалаева Людмила Сергеевна

ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А. В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
basalaeva@isp.nsc.ru

Бедин Сергей Александрович

Московский педагогический
государственный университет, г. Москва
bserg5@gmail.com

Богданова Луиза Илшатовна

Институт геологии и геохимии имени
академика А.Н. Заварицкого УрО РАН,
г. Екатеринбург
bogdanovalouisa@gmail.com

Бондаренко Анна Витальевна

Белорусский государственный
университет информатики и
радиоэлектроники, г. Минск,
Республика Беларусь
h.bandarenka@bsuir.by

Бункин Алексей Фёдорович

Институт общей физики им.
А.М. Прохорова РАН, г. Москва
abunkin@rambler.ru

Волкова Лидия Сергеевна

Институт нанотехнологий
микроэлектроники РАН, г. Москва
lidiya.volkova.96@outlook.com

Володин Владимир Алексеевич

ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А. В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
volodin@isp.nsc.ru

Втюрин Александр Николаевич

Институт физики им. Л. В. Киренского
СО РАН, г. Красноярск
vturin@iph.krasn.ru

Высоких Юрий Евгеньевич

Научно-технологический центр
уникального приборостроения РАН,
г. Москва
visokihy@gmail.com

Гаврилин Илья Михайлович

Национальный исследовательский
университет «Московский институт
электронной техники», г. Зеленоград
gavrilin.ilya@gmail.com

Гавриличева Ксения Андреевна
Институт физики твердого тела им.
Ю.А. Осипьяна РАН, г. Черноголовка
[Xenia.gavrilicheva@issp.ac.ru](mailto: Xenia.gavrilicheva@issp.ac.ru)

Галкин Константин Николаевич
Институт автоматики и процессов
управления ДВО РАН, г. Владивосток
[galkinkn@iacp.dvo.ru](mailto: galkinkn@iacp.dvo.ru)

Герасимова Юлия Валентиновна
Институт физики им. Л.В. Киренского
СО РАН, г. Красноярск
[jul@iph.krasn.ru](mailto: jul@iph.krasn.ru)

Головкина Елена Вячеславовна
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск
[e.v.golovkina@mail.ru](mailto: e.v.golovkina@mail.ru)

Голубев Евгений Александрович
Институт геологии ФИЦ
Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
[yevgenyGolubev74@mail.ru](mailto: yevgenyGolubev74@mail.ru)

Горошко Дмитрий Львович
Институт автоматики и процессов
управления ДВО РАН, г. Владивосток
[goroshko@iacp.dvo.ru](mailto: goroshko@iacp.dvo.ru)

Горяйнов Сергей Владимирович
ФГБУН Институт геологии и
минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск
[svg@igm.nsc.ru](mailto: svg@igm.nsc.ru)

Гришин Тимофей Сергеевич
Институт нанотехнологий
микроэлектроники РАН, г. Москва
[grishin.t@outlook.com](mailto: grishin.t@outlook.com)

Деменьшин Андрей Игоревич
Санкт-Петербургский государственный
университет, Институт химии,
г. Санкт-Петербург
[svenszivaldemar@gmail.com](mailto: svenszivaldemar@gmail.com)

Добрынина Елизавета Александровна
ФГБУН Институт автоматики и
электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
[liza.dobrynina.99@mail.ru](mailto: liza.dobrynina.99@mail.ru)

Дубков Сергей Владимирович
Национальный исследовательский
университет "МИЭТ", г. Зеленоград
[sv.dubkov@gmail.com](mailto: sv.dubkov@gmail.com)

Едельбекова Полина Андреевна
Институт нанотехнологий
микроэлектроники РАН, г. Москва
[polinaedel51@gmail.com](mailto: polinaedel51@gmail.com)

Зайцева Юлия Вячеславовна
ФГБУН Институт автоматики и
электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
[julmari3@mail.ru](mailto: julmari3@mail.ru)

Казанцева Анастасия Владиславовна
Казанский федеральный университет,
г. Казань
[nastyakazantseva13@gmail.com](mailto: nastyakazantseva13@gmail.com)

Калачев Иван Владимирович
ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А.В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
[i.kalachev1@g.nsu.ru](mailto: i.kalachev1@g.nsu.ru)

Калинин Владислав Алексеевич
ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А.В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
[v.kalinin@g.nsu.ru](mailto: v.kalinin@g.nsu.ru)

Карташев Игорь Анатольевич
ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А.В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
kart@isp.nsc.ru

Кацюба Алексей Владимирович
ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А.В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
kacuba@ngs.ru

Киселева Дарья Владимировна
Институт геологии и геохимии УрО РАН,
г. Екатеринбург
podarenka@mail.ru

Ковалец Наталья Павловна
Московский педагогический
государственный университет, г. Москва
zabalueva_1991@mail.ru

Кожина Елизавета Павловна
Сколковский институт науки и
технологий, г. Москва
liza.kozhina.99@mail.ru

Колесов Борис Алексеевич
ФГБУН Институт неорганической химии
им. А.В. Николаева СО РАН,
г. Новосибирск
kolesov@niic.nsc.ru

Кореев Алексей Сергеевич
Институт физики твердого тела
им. Ю.А. Осипьяна РАН, г. Черноголовка
koreyev.alexis@yandex.ru

Корепанов Виталий Игоревич
Институт проблем технологии
микроэлектроники и особочистых
материалов РАН, г. Черноголовка
korepanov@iptm.ru

Корец Анатолий Яковлевич
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск
Korets1947@rambler.ru

Корсаков Андрей Викторович
ФГБУН Институт геологии и
минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск
korsakov@igm.nsc.ru

Косцов Даниил Сергеевич
Физический институт им. П.Н. Лебедева
РАН, г. Зеленоград
d.kostzov@lebedev.ru

Крайский Александр Владиславович
Физический институт им. П.Н. Лебедева
РАН, г. Москва
kraiski@sci.lebedev.ru

Кривоногова Анна Юрьевна
ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А. В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
16112001anna@list.ru

Крылов Александр Сергеевич
Институт физики им. Л.В. Киренского
СО РАН, г. Красноярск
shusy@iph.krasn.ru

Крылова Светлана Николаевна
Институт физики им. Л.В. Киренского
СО РАН, г. Красноярск
slanky@iph.krasn.ru

Кубатаев Заур Юсупович
Дагестанский федеральный
исследовательский центр РАН,
г. Махачкала
kzu-05@ya.ru

Кудрявцев Олег Сергеевич
Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва
leolegk@mail.ru

Кудряшов Сергей Иванович
Физический институт
им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва
kudryashovsi@lebedev.ru

Курूसь Нина Николаевна
ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А. В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
n.kurus91@gmail.com

Лактионова Анна Валерьевна
ФГБУН Институт автоматизации и
электротехники СО РАН, г. Новосибирск
a.laktionova@g.nsu.ru

Лаптинский Кирилл Андреевич
Научно-исследовательский институт
ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
г. Москва
laptinskiy@physics.msu.ru

Латипов Егор Викторович
Институт нанотехнологий
микроэлектроники РАН, г. Москва
la_019@mail.ru

Латышев Александр Васильевич
ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А. В. Ржанова СО
РАН, г. Новосибирск
latyshev@isp.nsc.ru

Лунев Никита Александрович
Институт теплофизики им.
С.С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск
nanochirik9@gmail.com

Мельник Николай Николаевич
Физический институт
им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва
melnik@sci.lebedev.ru

Милёхин Александр Германович
ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А. В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
milekhin@isp.nsc.ru

Милёхин Илья Александрович
Новосибирский государственный
университет, г. Новосибирск
mia2994@gmail.com

Михайлов Иван Андреевич
Институт нанотехнологий
микроэлектроники РАН, г. Москва
i.mikhaylov1996@gmail.com

Назаровская Дарья Андреевна
Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва
nazarovskaia.da22@physics.msu.ru

Наумов Андрей Витальевич
Троицкое подразделение
ФИАН им. П.Н. Лебедева, г. Троицк
naumov@isan.troitsk.ru

Никифоров Алексей Андреевич
Уральский федеральный университет,
г. Екатеринбург
Alexey.Nikiforov@urfu.ru

Новиков Владимир Николаевич
ФГБУН Институт автоматизации и
электротехники СО РАН, г. Новосибирск
novikov@iae.nsk.su

Образцова Елена Дмитриевна
Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва
elobr@kapella.gpi.ru

Окотруб Константин Александрович
ФГБУН Институт автоматике и
электротметрии СО РАН, г. Новосибирск
okotrub@iae.nsk.su

Омельченко Анастасия Николаевна
ФГБУН Институт автоматике и
электротметрии СО РАН, г. Новосибирск
a.omelchenko@g.nsu.ru

Орешонков Александр Сергеевич
Институт физики им. Л.В. Киренского
СО РАН, г. Красноярск
Институт биохимической физики им.
Н.М. Эмануэля РАН, г. Москва
orëshonkov@iph.krasn.ru

Осминкина Любовь Андреевна
Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва
osminkina@physics.msu.ru

Павликов Александр Владимирович
Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва
pavlikovav@my.msu.ru

Панкрушина Елизавета Алексеевна
Институт геологии и геохимии УрО РАН,
г. Екатеринбург
lizaveta.94@list.ru

Паращук Ольга Дмитриевна
Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва
olga_par@physics.msu.ru

Пелегов Дмитрий Вячеславович
Уральской федеральный университет,
г. Екатеринбург
dmitry.pelegov@urfu.ru

Першин Сергей Михайлович
Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва
pershin@kapella.gpi.ru

Петров Дмитрий Витальевич
Институт мониторинга климатических и
экологических систем СО РАН, г. Томск
dpetrov@imces.ru

Печурин Михаил Сергеевич
Институт геологии и геохимии УрО РАН,
г. Екатеринбург
Mikhail.Pechurin@urfu.me

Пластинин Иван Владимирович
Научно-исследовательский институт
ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
МГУ, г. Москва
plastinin_ivan@mail.ru

Попов Владимир Павлович
ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А. В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
popov@isp.nsc.ru

Пундиков Кирилл Сергеевич
Институт проблем технологии
микроэлектроники и особочистых
материалов РАН, г. Черноголовка
kbbhbr2010@yandex.ru

Рабданов Камиль Шахриевич
Дагестанский федеральный
исследовательский центр РАН,
Дагестанский государственный
университет, г. Махачкала
rksh83@mail.ru

Рогинский Евгений Михайлович
Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург
e.roginskii@mail.ioffe.ru

Родина Анна Валерьевна
Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург
anna.rodina@mail.ioffe.ru

Ролле Конрад Рихард Маркус
ФГБУН Институт автоматики и
электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
krolle@iae.nsk.su

Рябин Александр Алексеевич
Уральский федеральный университет,
г. Екатеринбург
Ryabin.Alexandr.1@yandex.ru

Савин Александр Владимирович
Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург
alekssavin97@gmail.com

Свинко Василиса Олеговна
Санкт-Петербургский государственный
университет, Институт химии,
г. Санкт-Петербург
st077077@student.spbu.ru

Соколовская Ольга Игоревна
Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва
oi.sokolovskaja@physics.msu.ru

Соловьева Елена Викторовна
Санкт-Петербургский государственный
университет, г. Санкт-Петербург
solovyeva.elena.v@gmail.com

Суровцев Николай Владимирович
ФГБУН Институт автоматики и
электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
snv@iae.nsk.su

Сушанек Лев Ярославович
Институт геологии и геохимии им.
академика А.Н. Заварицкого УрО РАН,
г. Екатеринбург
lev.sushanek@gmail.com

Таничев Александр Сергеевич
Институт мониторинга климатических и
экологических систем СО РАН, г. Томск
tanichev_aleksandr@mail.ru

Тареева Мария Вячеславовна
Физический институт им. П.Н. Лебедева
РАН, г. Москва
tareevamv@lebedev.ru;
tareeva.ufficiale@yandex.ru

Трусов Михаил Александрович
ООО «НОВА СПБ», г. Санкт-Петербург

Тыщенко Ида Евгеньевна
ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А. В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
tys@isp.nsc.ru

Харинцев Сергей Сергеевич
Казанский федеральный университет,
г. Казань
skharint@gmail.com

Черкасова Ольга Павловна
ФГБУН Институт автоматики и
электрометрии СО РАН, г. Новосибирск,
o.p.cherkasova@gmail.com

Чешев Дмитрий Леонидович
Томский политехнический университет,
г. Томск
dlc2@tpu.ru

Чжан Жонань
Новосибирский государственный
университет, г. Новосибирск
sangexiaoshagua@gmail.com

Чжан Фань
Новосибирский государственный
университет, г. Новосибирск
840003068@qq.com

Швец Пётр Валерьевич
Балтийский федеральный университет
им. Иммануила Канта,
г. Калининград
pshvets@kantiana.ru

Шелаев Артём Викторович
Всероссийский научно-
исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова, г. Москва
shelaev.artiom@phystech.edu

Шкляев Александр Андреевич
ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А. В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
shklyaev@isp.nsc.ru

Шубина Татьяна Васильевна
Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург
shubina@beam.ioffe.ru

Шулейко Дмитрий Валерьевич
Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва
dmitriy1815@gmail.com

Щапова Юлия Владимировна
Институт геологии и геохимии имени
академика А.Н. Заварицкого УрО РАН,
г. Екатеринбург
shchapova@igg.uran.ru

Щеглов Дмитрий Владимирович
ФГБУН Институт физики
полупроводников им. А. В. Ржанова
СО РАН, г. Новосибирск
sheglov@isp.nsc.ru

Юрков Александр Сергеевич
Омский научный центр СО РАН,
г. Омск
fitec@mail.ru

Юшина Ирина Дмитриевна
Южно-Уральский государственный
университет, г. Челябинск
iushinaid@susu.ru



**Комбинационное рассеяние - 95 лет исследований:
Тезисы докладов Российской конференции и школы молодых
ученых по актуальным проблемам спектроскопии
комбинационного рассеяния света
Новосибирск, 5-9 июня 2023 г.**

Издательство «Перо»
109052, Москва, Нижегородская ул., д. 29-33, стр. 15, ком. 536
Тел.: (495) 973-72-28, 665-34-36
Подписано в печать 16.05.2023. Формат 60×90/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 21,25. Тираж 100 экз. Заказ 435.