

**НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ПРАВИТЕЛЬСТВО НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ**

**МАТЕРИАЛЫ  
52-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**МНСК–2014**

**11–18 апреля 2014 г.**

**КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**

**Новосибирск  
2014**

УДК 53  
ББК 22.3

*Конференция проводится при поддержке  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Российского фонда фундаментальных исследований,  
Правительства Новосибирской области,  
инновационных компаний России и мира,  
Фонда «Эндаумент НГУ»*

Материалы 52-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2014: Квантовая физика / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2014. 82 с.

ISBN 978-5-4437-0246-9

Научный руководитель секции – чл.-корр. РАН А. В. Латышев  
Председатель секции – д-р физ.-мат. наук, проф. А. В. Тайченачев  
Ответственный секретарь секции – канд. физ.-мат. наук А. А. Блошкин

**Экспертный совет секции:**

чл.-корр. А. В. Латышев, канд. физ.-мат. наук А. А. Блошкин,  
д-р физ.-мат. наук В. Л. Альперович, канд. физ.-мат. С. С. Косолюбов,  
Д. И. Роголо, С. В. Ситников, канд. физ.-мат. наук Е. Е. Родякина,  
канд. физ.-мат. наук О. Е. Терещенко, канд. физ.-мат. наук А. В. Ненашев,  
Л. И. Федина, канд. физ.-мат. наук И. И. Бетеров,  
канд. физ.-мат. наук А. В. Каламейцев, канд. физ.-мат. наук В. В. Петров,  
д-р физ.-мат. наук И. И. Рябцев, д-р физ.-мат. наук П. Л. Чаповский,  
д-р физ.-мат. наук А. В. Тайченачев, д-р физ.-мат. наук Б. А. Шварц,  
д-р физ.-мат. наук В. Ф. Дмитриев, канд. физ.-мат. наук А. В. Резниченко,  
канд. физ.-мат. наук В. Е. Блинов, канд. физ.-мат. наук Е. А. Кравченко,  
канд. физ.-мат. наук Ф. В. Игнатов.

**УДК 53  
ББК 22.3**

ISBN 978-5-4437-0246-9

© Новосибирский государственный  
университет, 2014

**NOVOSIBIRSK NATIONAL RESEARCH STATE UNIVERSITY  
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
GOVERNMENT OF THE NOVOSIBIRSK REGION**

**PROCEEDINGS  
OF THE 52<sup>nd</sup> INTERNATIONAL STUDENTS  
SCIENTIFIC CONFERENCE**

**ISSC-2014**

**April, 11–18, 2014**

**QUANTUM PHYSICS**

**Novosibirsk, Russian Federation  
2014**

*The conference is held with the significant support of  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
Russian Foundation for Basic Research,  
Novosibirsk Region Government*

Proceedings of the 52<sup>nd</sup> International Students Scientific Conference. Quantum physics / Novosibirsk State University. Novosibirsk, Russian Federation. 2014. 82 pp.

ISBN 978-5-4437-0246-9

Section scientific supervisor –  
Corr. Member RAS, Dr. Phys. Math, Prof. A. V. Latyshev  
Section head – Dr. Phys. Math, Prof. A. V. Taichenachev  
Responsible secretary – Cand. Phys. Math. A. A. Bloshkin

**Section scientific committee:**

Corr. Member RAS A. V. Latyshev, Cand. Phys. Math. A. A. Bloshkin  
Dr. Phys. Math V. L. Alperovich, Cand. Phys. Math. S. S. Kosolobov,  
D. I. Rogilo, S. V. Sitnikov, Cand. Phys. Math. E. E. Rodyakina,  
Cand. Phys. Math. O. E. Tereschenko, Cand. Phys. Math. A. V. Nenashev,  
L. I. Fedina, Cand. Phys. Math. I. I. Beterov,  
Cand. Phys. Math. A. V. Kalameytsev, Cand. Phys. Math. V. V. Petrov,  
Dr. Phys. Math I. I. Ryabtsev, Dr. Phys. Math P. L. Chapovskiy,  
Dr. Phys. Math A. V. Taychenachev, Dr. Phys. Math B. A. Shvarts,  
Dr. Phys. Math V. F. Dmitriev, Cand. Phys. Math. A. V. Reznichenko,  
Cand. Phys. Math. V. E. Blinov, Cand. Phys. Math. E. A. Kravchenko,  
Cand. Phys. Math. F. V. Ignatov.

ISBN 978-5-4437-0246-9

© Novosibirsk State University, 2014

## ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК SnO<sub>2</sub>

А. В. Алмаев

Томский государственный университет

Газовые сенсоры на основе полупроводниковых тонких (толщина чувствительного слоя – 100нм) плёнок SnO<sub>2</sub> применяются для определения малых концентраций (около 0,1 ПДК) взрывоопасных и токсичных газов. В реальных условиях на параметры таких устройств влияют множество факторов, одним из них является влажность окружающей среды.

Известно, что при увеличении уровня влажности проводимость тонких плёнок SnO<sub>2</sub> растёт. Это явление связано физико-химическими процессами, которые имеют место на поверхности плёнки диоксида олова [1]. В настоящем сообщении приводятся данные по влиянию влажности окружающей среды на величину изгиба энергетических зон на границах раздела микрокристаллов SnO<sub>2</sub> в плёнке диоксида олова.

При проведении исследований использовали оригинальную методику определения изгиба энергетических зон, которая была предложена в работе [2]. Эксперимент проводили на образцах из партии Pt/Pd/SnO<sub>2</sub>:Sb.

Увеличение уровня абсолютной влажности от 1,7 до 7,4 г/м<sup>3</sup> приводит к уменьшению величины изгиба энергетических зон с 0,43 до 0,35 эВ. При дальнейшем увеличении влажности до 13,6 г/м<sup>3</sup> наблюдается постоянство значения изгиба энергетических зон.

Снижение изгиба зон на первом участке объясняется диссоциативной адсорбцией молекул воды и может быть описана формулами, полученными в работе [1]. Для объяснения данных в области высоких уровней влажности требуются дальнейшие исследования.

---

1. В. И. Гаман. Физика полупроводниковых газовых сенсоров: монография. – Томск: Издательство НТЛ, 2012. – 112 с.

2. В. И. Гаман, Е. Ю. Севастьянов, Н. К. Максимова и др. Характеристики полупроводниковых резистивных сенсоров водорода при работе в режиме термоциклирования // Известия ВУЗов. Физика. – 2013. – Т.56. – №12. – С.96-102.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, Н. К. Максимова.

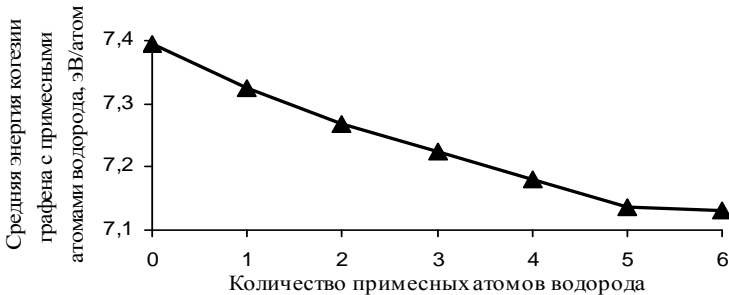
## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАФЕНА С ПРИМЕСЯМИ АТОМОВ ВОДОРОДА

Д. В. Алябьев, В. Г. Стельмах

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, г. Ташкент

Методом Монте-Карло исследовались свойства графена, имеющие примесные атомы водорода. Для описания межатомного взаимодействия использовался потенциал Бреннера второго поколения [1].

Графен моделировался из 112 атомов углерода, расположенных в одной плоскости и в характерной для графена гексагональной конфигурации атомов, причем на граничные атомы накладывались периодические условия вдоль плоскости графена. Затем атомы одного и того же гексагона графена последовательно заменялись на атомы водорода и находили среднюю энергию когезии получившихся структур. На рисунке внизу показаны зависимости средней энергии когезии графена в зависимости от количества примесных атомов водорода в нем.



Как видно из рисунка с увеличением количества примесных атомов водорода в основном линейно уменьшаются средняя энергия когезия графена и, соответственно, связанные с этой характеристикой прочностные свойства графена.

---

1. D. W. Brenner, O. A. Shenderova, J. A. Harrison, S. J. Stuart, B. Ni, S. B. Sinnott. A second-generation reactive empirical bond order (REBO) potential energy expression for hydrocarbons // J.Phys: Condens. Matter 14 (2002), 783–802

Научный руководитель – д-р физ.-мат.наук, проф. А. А. Джурахалов.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ОДНОМЕРНЫХ СУБВОЛНОВЫХ РЕШЕТОК ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА

А. Е. Гайдук

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Современное развитие технологий наноструктурирования сделало возможным создание элементной базы нанофотоники и интегральной оптики. Гибридные (металл-диэлектрические) субволновые решетки с толстой металлизацией хорошо исследованы и используются в качестве поляризаторов, высокоотражающих покрытий, биосенсоров и т. Д. Однако периодические структуры с ультратонкими слоями металла изучены недостаточно, в частности, структуры, проявляющие плазмонный резонанс в видимой области спектра. В данной работе исследованы оптические свойства одномерных субволновых решеток (СВР) с ультратонкими слоями золота.

Одномерные полимерные СВР большой площади ( $>10 \text{ см}^2$ ) были изготовлены методом штамповой нанолитографии. Измерения рельефа решеток выполнены с помощью атомно-силового микроскопа. Показано, что параметры изготовленных СВР имеют хорошую воспроизводимость по площади, период решетки составляет 180 нм, ширина канавок — 60 нм, глубина — 160 нм. На поверхность полученных СВР были напылены ультратонкие слои золота толщиной 5-20 нм.

Экспериментальное исследование поляризационных спектров отражения СВР выполнено на спектральном эллипсомере в диапазоне длин волн 250-1000 нм при различных ориентациях решетки относительно падающего луча. Показано, что в диапазоне длин волн 500-900 нм возникают особенности спектров отражения, обусловленные локализованным плазмонным резонансом, особенности же в области 250-500 нм определяются возбуждением и взаимодействием решеточных мод. Проведено численное моделирование спектров отражения СВР с помощью метода конечных элементов. Результаты эксперимента и численного расчета удовлетворительно согласуются.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. Н. Речкунов.

**КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА  
НА КОЛЕБАНИЯХ Si-H И Si-H<sub>n</sub> СВЯЗЕЙ  
В АМОРФНОМ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОМ КРЕМНИИ**

М. С. Галков

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Пленки аморфного гидрогенизированного кремния применяются в устройствах широкоформатной микроэлектроники, таких как активные матрицы ТПТ и солнечные элементы. Полученные плазмохимическим осаждением, они содержат до 50% водорода. Известно, что водород влияет на свойства пленок, их деградацию а также играет существенную роль в процессе кристаллизации. Развитие неразрушающих оптических методов исследования водорода в пленках остается актуальной задачей.

Пленки, полученные с применением методов плазмохимического осаждения при температурах от 100 до 380 °С, исследовались с применением спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Использовалось оборудование НОК «Наносистемы и современные материалы» НГУ. По положению пиков КРС можно определить состояние водорода в пленках, валентные колебания Si-H связей имеют частоту 2000 см<sup>-1</sup>, а Si-H<sub>n</sub> связей — 2100 см<sup>-1</sup>.

В работе применялись 2 поляризационные геометрии КРС, XY – в которой вектор поляризации рассеянного света перпендикулярен вектору поляризации падающего света, и YY – в которой оба этих вектора параллельны. Из сравнительного анализа спектров КРС было установлено, что интенсивность пиков для валентных колебаний Si-H связей в параллельной (YY) геометрии в 4.5 раза больше чем в перпендикулярной (XY) геометрии. Были усреднены тензоры КРС для случайно ориентированных Si-H связей, и установлено соотношение для дифференциальной поляризуемости данной связи вдоль и поперек её направления. Из анализа интенсивностей пиков КРС на колебаниях Si-H и Si-H<sub>n</sub> связей установлено, что дифференциальная поляризуемость в первом случае в 1.6 выше, чем во втором. Полученные данные полезны для анализа концентрации и состояния водорода в аморфном гидрогенизированном кремнии.

Научный руководитель – доцент, канд. физ.-мат. наук В. А. Володин.



## ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОЕДИНЕНИЙ $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ и $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ СО ВСТРОЕННЫМ P-N ПЕРЕХОДОМ

М. Г. Горынина

Новосибирский государственный университет  
 Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

Полупроводниковые соединения  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$  и  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  интересны тем, что они являются 3D топологическими изоляторами (ТИ). Т. Е. в объеме этих соединений существует запрещенная зона, но на поверхности присутствуют проводящие спин-поляризованные состояния с линейным законом дисперсии. Эти материалы также обладают хорошими термоэлектрическими свойствами, а именно, высокими значениями коэффициента Зеебека ( $S$ ) (например, для  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$   $S=280 \mu\text{V/K}$  при комнатной температуре). Наличие спин-поляризованных поверхностных состояний позволяет высказать гипотезу о возможности наблюдения в данных ТИ спинового эффекта Зеебека [1]. Общей проблемой для этих соединений является их сильная вырожденность и фиксация уровня Ферми в разрешенных зонах, что не позволяет изучать спин-зависимые транспортные явления. Одним из решений является поиск такого состава ТИ, при котором происходит компенсация носителей (электронов и дырок) и уровень Ферми находится в запрещенной зоне. Этого можно добиться в области p-n перехода. Целью данной работы было получение соединений  $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$  и  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  со встроенным латеральным p-n переходом и изучение их термоэлектрических свойств.

Исследуемые кристаллы были выращены вертикальным методом Бриджмена, что позволило использовать эффект сегрегации для изменения состава вдоль растущего кристалла и получить встроенные p-n переходы. Был изучен эффект Зеебека при комнатной температуре в кристаллах  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (с избытком теллура 2%),  $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$  и  $\text{Bi}_{1,34}\text{Sb}_{0,66}\text{Te}_3$  со встроенным латеральным p-n переходом. Вдоль полученных кристаллов наблюдалась смена знака коэффициента термоЭДС, что совпадало с изменением знака коэффициента Холла. Максимальное значение  $S$  было достигнуто в образце  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$ , и составило  $-340 \mu\text{V/K}$ . Изучены температурные зависимости концентрации и подвижности носителей вдоль кристаллов. В работе обсуждается связь особенностей дефектов кристаллической структуры и электрофизических свойств исследуемых кристаллов.

---

1. K. Uchida, *et al.* Observation of the spin Seebeck eff. *Nature* 455, 778(2008).

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук О. Е. Терещенко.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕТА НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

А. Г. Гулямов

Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце” АН Руз, г. Ташкент

Известно, что вблизи каких-либо резонансов (межзонных, межпримесных, экситонных) существенно меняются макроскопические коэффициенты – коэффициенты поглощения, фотоупругости, диэлектрическая проницаемость и т.д.

В данной работе было исследовано влияние света на коэффициент тензочувствительности полупроводника с р-п-переходом. Известно, что деформация полупроводника вызывает смещение энергетических уровней, что приводит к изменению темнового тока в р-п-переходе. Если же, при этом, полупроводник освещается светом с частотой, вблизи межзонного резонанса, то возникает дополнительный фототок, стимулированный увеличением концентрации электронов в зоне проводимости. То есть деформация, изменяя ширину запрещенной зоны, будет менять условия резонанса, а значит и концентрацию электронов в зоне проводимости. Степень изменения тока естественным образом характеризует тензочувствительность, так как тензочувствительность характеризуется степенью изменения сопротивления полупроводника.

Исследования проводились в режиме генератора напряжения для случая, когда к р-п-переходу подано большое обратное смещение и освещение производилось светом на частоте ниже межзонного перехода для недеформированного полупроводника.

Показано, что тензочувствительностью освещённого р-п-перехода можно управлять постоянной деформацией, частотой, шириной частотной полосы и интенсивностью света. Вблизи резонанса под действием деформации коэффициент поглощения может сильно изменяться и вследствие этого коэффициент тензочувствительности р-п-перехода может принимать аномально большие значения.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Р. А. Аюханов.

## ВЛИЯНИЕ КРИОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК СПЛАВА $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$

А. К. Дроздова, Е. В. Короткова  
Восточно-Казахстанский государственный университет  
им. С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

В настоящее время активно исследуются твердофазные процессы, которые могут иметь место при пластической деформации. Механическое воздействие инициирует механохимические реакции. Высокие скорости физико-химических превращений инициируются волнами пластической деформации, то есть волны пластической деформации переносят энергию и массу. Механизмы появления новой фазы путем возникновения и роста зародышей в условиях волн пластической деформации работать не могут из-за кратковременности процесса, который завершается за время порядка  $10^{-5}$  –  $10^{-7}$  с. На практике размеры частиц новой фазы могут иметь размеры от нанометров до микрон. Известно, что при криомеханической обработке могут возникать волны пластической деформации.

Целью данной работы являлось исследовать эволюцию оптических свойств тонких пленок сплава  $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$  при их криомеханической обработке. Для этого решались следующие задачи: 1. Получение тонкопленочных образцов сплава заданного химического и фазового состава; 2. Обработка жидким азотом полученных пленок с целью создания в них частиц новой фазы. Эти частицы могут быть квантовыми точками; 3. Получение и обработка спектров оптического поглощения на исходных и обработанных жидким азотом образцах.

В микроструктуре образцов, подвергнутых криомеханической обработке, были обнаружены частицы, имеющие размер 50-10 нм и структуру Франка-Каспера. В таких образцах обнаружили аномальные эффекты в спектре оптического поглощения: в области длин волн 400-900 нм наблюдались оптические переходы. Пластическая деформация создает структурно-фазовые превращения. В результате в образцах возникают квантовые эффекты.

Экспериментальные исследования, проведенные в данной работе, позволяют обосновать возможности создания квантовых точек в пленках  $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$  в результате их криомеханической обработки.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Л. И. Квеглис.

## СТАБИЛЬНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ СЕНСОРОВ $H_2S$ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК $SnO_2$ С ДОБАВКАМИ Au И Ni

Г. Р. Золоторева

Томский государственный университет

Сероводород является одним из токсичных газов, который присутствует в выбросах целого ряда предприятий добывающих и перерабатывающих отраслей. Предельно допустимая концентрация (ПДК)  $H_2S$  в воздухе рабочей зоны составляет 7 ppm. Поэтому необходима разработка миниатюрных быстродействующих сигнализаторов для селективного детектирования сероводорода в воздухе.

Для сенсоров  $H_2S$  наиболее перспективно использование металлооксидных полупроводников тонких пленок диоксида олова вольфрама с различными каталитическими добавками в объеме и на поверхности. Изучение стабильности параметров таких сенсоров в процессе эксплуатации показало, что имеет место дрейф характеристик: снижается чувствительность и растет время отклика.

Данная работа посвящена исследованию влияния добавок золота и никеля в объеме и на поверхности диоксида олова на процессы деградации сенсоров при воздействии сероводорода.

Стабильность параметров исследовали при длительных испытаниях в процессе работы сенсоров в рабочем режиме при воздействии  $H_2S$ , а также при их хранении. Длительность испытаний сенсоров составляла около 390 суток.

Показано, что при хранении и эксплуатации сенсоров в течение ~60 суток не происходит заметной деградации значений отклика на сероводород. После последующего хранения сенсоров в течение ~60 суток при измерениях обнаружено снижение отклика примерно в два раза на  $n_{H_2S}=1-10$  ppm, причем уменьшение отклика тем существеннее, чем выше концентрация сероводорода. Дальнейшие испытания в течение ~340 суток не привели к изменению характеристик сенсоров.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Н. К. Максимова.

## ИЗМЕРЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДОМ ПЕРЕХОДНОЙ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

И. А. Зятиков, И. В. Романов  
Томский государственный университет

Органические полупроводники (ОП) имеют самое широкое применение в различных областях оптотехники. Существует серьезная потребность в систематических экспериментальных исследованиях подвижности носителей заряда в таких материалах из-за значительного влияния этого параметра на характеристики органических светоизлучающих структур.

Одним из основных методов измерения дрейфовой подвижности основных носителей заряда в органических полупроводниках является метод переходной электролюминесценции (ПЭЛ) [1]. Представленный метод ПЭЛ позволяет оценивать подвижность носителей заряда и параметр дисперсии подвижности носителей заряда на основе анализа формы сигнала интенсивности переходной электролюминесценции в органических полупроводниковых плёнках.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований переходной электролюминесценции в полимерных органических полупроводниковых излучающих структурах. Измерения подвижности дырок в эмиссионном слое проводились со следующими веществами: поли(2-метокси-5-(2'-этилгексилокси)-1,4-фениленвинилена), поли(2-метокси-5-(2'-этилгексилокси)-1,4-фениленвинилена с присоединённым полиэдральным олигомерным силескиоксаном. Результаты измерения подвижности дырок в эмиссионном слое органической светоизлучающей структуры согласуются с литературными данными полученными другими исследователями МЕН-PPV и (МЕН-PPV-POSS) [2].

---

1. А. Р. Тамеев, В. Р. Никитенко, Д. А. Лыпенко, А. В. Ванников. Переходная электролюминесценция и аномальная дисперсия носителей заряда в тонких полимерных пленках // ФТТ. – 2009. – Т. 51. – №9. – С. 1840-1845.

2. D. J. Pinner, R. H. Friend, N. Tessler. Transient electroluminescence of polymer light emitting diodes using electrical pulses // J. of Applied Physics. – 1999. – V. 86. – P. 5116-5130.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. П. Коханенко.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО  
ПРОЦЕССА ВЫГЛАЖИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ GaAs (001)  
В РАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ**

Д. М. Казанцев

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Атомно-гладкие поверхности полупроводников необходимы для научных исследований, а также для создания наноструктур и приборов микро- и оптоэлектроники. В работах [1,2] была предложена и реализована методика получения поверхностей GaAs(001) с регулярными атомно-гладкими террасами, разделенными ступенями моноатомной высоты, путем отжига в условиях равновесия между кристаллом и парами мышьяка и галлия. Данная работа посвящена выяснению механизмов атомного выглаживания поверхностей GaAs(001) с помощью моделирования методом Монте-Карло.

Установлено, что основные особенности экспериментальной кинетики выглаживания поверхности GaAs(001) описываются на качественном уровне с помощью моделирования по методу Монте-Карло. Моделирование позволило выявить различные этапы кинетики формирования террасированной поверхности, которые состоят в рекомбинации адатомов и вакансий, зарождении островков и увеличении их размеров ("оствальдовское созревание"), встраивании островков в ступени и выпрямлении ступеней. Для количественного описания процесса выглаживания использовалась длина атомных ступеней, которая более адекватно характеризует процесс формирования террасированной поверхности, чем среднеквадратичная шероховатость [2]. Из сравнения кинетики измеренной длины ступеней с расчетом по методу Монте-Карло в модели кристалла Косселя оценены значения параметров, определяющих процесс выглаживания: энергия латеральных связей поверхностных атомов и энергия активации диффузии. Обсуждаются относительные вклады переноса атомов путем поверхностной диффузии и через газовую фазу в процесс выглаживания.

---

1. V. L. Alperovich, I. O. Akhundov, N. S. Rudaya, D. V. Sheglov, E. E. Rodyakina, A. V. Latyshev, and A. S. Terekhov. Appl. Phys. Lett. 94, 101908 (2009).

2. I. O. Akhundov, V. L. Alperovich, A. V. Latyshev, and A. S. Terekhov. Appl. Surf. Sci. 269, 2 (2013).

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук В. Л. Альперович.

## О ВЛИЯНИИ НЕОДНОРОДНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

А. Б. Каршиев

Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце“ АН РУз, г. Ташкент

Многокомпонентные твердые растворы содержат значительно большее количество примесей и дефектов, чем кремний и германий. Особенно важно, что распределение примесей в них может быть неоднородным, причем неоднородность возрастает, если примесь не одна (см. например [1]). Так как в базе фотоэлемента обычно соблюдается условие квазинейтральности, то, соответственно, все примеси подстраиваются друг к другу, и распределение концентрации тех примесей или дефектов, которые играют роль рекомбинационных центров, также может стать неоднородным. Пусть полная концентрация рекомбинационных центров возрастает линейно вдоль длины базы фотоэлемента;

$$N_R = N_{R0}(1 + \beta x), \quad (1)$$

где  $\beta$ -коэффициент, учитывающий вероятность возрастания,  $N_{R0}$ -концентрация рекомбинационных центров в точке  $x=0$ , т. Е. на границе квазинейтральной р-базы с р-п переходом. Основное уравнение, описывающее распределение электронов в р-базе фотоэлемента, имеет вид;

$$D_n \frac{d^2 n}{dx^2} - \frac{n}{\tau} = G(x). \quad (2)$$

Решение (2) имеет вид:

$$n = C_1 e^{-\frac{x}{L}}(1 + 2\beta L + \beta x) + C_2 e^{\frac{x}{L}}(1 - 2\beta L + \beta x) \quad (3)$$

При  $\beta=0$  это выражение переходит в известное решение для диффузионного режима. Получаемое решение позволяет рассчитать изменения, вносимые в ВАХ фотоэлемента, наличием зависимости  $N_R(x)$ .

Проведем оценку. Если  $N_R/N_{R0}=2$ , т. Е. концентрация рекомбинационных центров на тыловом контакте в 2 раза больше, чем исходная концентрация  $N_{R0}$  в точке  $x=0$ , т. Е. на границе базы с р-п переходом, то  $\beta=1/d$  и, соответственно,  $J_s/J_{s0}=1+\beta L=2$ , ( $J_{s0} \equiv J_s|_{\beta=0}$ ), т. Е. ток насыщения возрастет в 2 раза. Соответственно,  $V_{xx}$  будет неизбежно убывать.

---

1. С. В. Булярский, В. И. Фистуль. Термодинамика и кинетика взаимодействующих дефектов в полупроводниках. М.: Наука. 1997, 352 с.

Научный руководитель — д.ф.-м.н., проф. А. Ю. Лейдерман.

## ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РОСТА GaAs НАНОВИСКЕРОВ С ПОМОЩЬЮ МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИ<sup>1</sup>

М. В. Князева

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный технический университет

Нановискеры (НВ) на основе GaAs интересны с точки зрения их возможного применения в качестве элементов опто- и нанoeлектронных систем. Понимание процессов формирования НВ остаётся важной задачей для осуществления контролируемого роста НВ. Моделирование помогает выявить основные закономерности и особенности роста на атомарном уровне. Реализована Монте-Карло модель каталитического роста GaAs НВ по механизму пар-жидкость-кристалл. В модели учтены разная растворимость Ga и As в капле катализатора, высокая летучесть мышьяка, слабая смачиваемость поверхности GaAs материалом капли катализатора (золота) и зависимость поверхностного натяжения капли от концентрации растворённого вещества.

Изучено формирование эвтектических капель Au-Ga при отжиге плёнки золота на подложке GaAs(111)В. После отжига состав капли катализатора находился в соответствии с фазовой диаграммой тройного соединения Ga-As-Au. При одновременном осаждении Ga и As<sub>2</sub> на поверхности с каталитическими каплями наблюдался рост НВ. Продемонстрировано влияние параметров роста (диаметра капли катализатора, температуры, интенсивности и соотношения потоков Ga и As<sub>2</sub>) на скорость роста и морфологию НВ. Получены убывающие зависимости скорости роста от диаметра капли катализатора и от плотности расположения НВ на подложке, что характерно для диффузионного режима. Рост НВ происходил в ограниченном температурном диапазоне, и только начиная с некоторого критического значения  $F_{As_2}/F_{Ga}$ . При увеличении  $F_{As_2}/F_{Ga}$  скорость роста возрастала и выходила на насыщение, и наблюдалось выглаживание границы раздела капля-вискер. Определены оптимальные условия роста, при которых достигается максимальная скорость роста и гладкая граница раздела капля-вискер. Продемонстрирован эффект затенения НВ в процессе роста на подложке с высокой плотностью расположения затравочных капель.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доцент Н. Л. Шварц.

---

<sup>1</sup> Работа поддержана грантом РФФИ (14-02-00776).



## ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ КОМПЕНСАЦИИ НА ПОДВИЖНОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ ДЫРОК В МЛЭ CdHgTe P-ТИПА

С. С. Кобылкин

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время лидирующее место среди материалов для изготовления инфракрасных фотоприемников занимают твердые растворы CdHgTe (кадмий-ртуть-теллур, КРТ). Это обусловлено физическими свойствами КРТ: высокой подвижностью электронов, низкой диэлектрической постоянной, изменяемой в широких пределах ширины запрещенной зоны и высокой квантовой эффективностью [1].

Одним из методов роста полупроводниковых структур на основе КРТ является молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). Важной задачей является создание образцов с заданными воспроизводимыми концентрациями электронов и дырок, а также стабильность концентрации во времени, сохранение высокой подвижности. Для ее решения необходимо знание примесной структуры образца.

Одним из параметров, определяющих электрофизические свойства образца является соотношение между концентрацией донорных и акцепторных примесей и дефектов, которое характеризуется величиной степени компенсации —  $K$ . В образцах в  $p$ -типа, выращенных методом МЛЭ в ИФП СО РАН,  $K$  близка к единице. Степень компенсации получаемых в институте образцов КРТ  $p$ -типа ранее не измерялась.

В данной работе исследуется влияние степени компенсации в образцах  $p$ -типа на подвижность тяжелых дырок.  $K$  изменялась путем добавления различного количества донорных примесей In в процессе роста. Были проведены магнитотранспортные измерения при температурах 25К-77К в результате которых определены параметры электронов, легких и тяжелых дырок. Полученные данные использовались для построения зависимостей подвижностей носителей заряда от температуры. Сравнение измеренных температурных зависимостей подвижностей с теоретическими подтвердило основной механизм рассеяния — рассеяние на заряженных центрах.

---

1. М. В. Якушев. Гетероэпитаксия ZnTe, CdTe и твердых растворов CdHgTe на подложках GaAs и Si: автореферат диссертации на соискание ученой степени д.ф.-м.н.. ИФП СО РАН. — Новосибирск, 2011. — 40 с.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. Ю. Протасов.

## ЭЛЕКТРОННОЕ СТРОЕНИЕ ФУЛЬМИНАТА СЕРЕБРА

Е. В. Ковалев

Кемеровский государственный университет

Фульминат серебра  $\text{AgCNO}$  – взрывчатое вещество, используемое для производства капсулей-детонаторов.  $\text{AgCNO}$  встречается в двух полиморфных формах [1], в данной работе исследовалось электронное строение  $\text{AgCNO}$ , имеющего тригональную решетку Бравэ, с пространственной группой симметрии №148 ( $a=9.087 \text{ \AA}$ ,  $\alpha=115.73^\circ$ , [1]).

Расчет проводился в рамках теории функционала электронной плотности в приближении гибридного обменно-корреляционного функционала B3LYP, программным кодом CRYSTAL09 [2, 3] с использованием базиса контрактированных гауссовых орбиталей TZVP [3]. Полученные постоянные решетки  $a=9.248 \text{ \AA}$ , угол  $\alpha=115.79^\circ$  находятся в хорошем согласии с экспериментально определенными значениями [1], погрешность составляет для постоянной решетки  $a$  – 1.7%, угла  $\alpha$  – 0.05%.

Анализ зарядов атомов, рассчитанных по схеме Малликена, показал, что атомы серебра приобретают избыточный положительный заряд, равный  $0.808|e|$ , так что связь между катионом и комплексным анионом близка к ионной. Из карт полной кристаллической плотности видно, что в анионе CNO существует замкнутый контур, величиной  $0.422 e/\text{bohr}^3$ , охватывающий атомы углерода и азота. Следующий замкнутый контур величиной  $0.358 e/\text{bohr}^3$  охватывает уже три атома C, N, O. Карты деформационной плотности указали в фульминат-ионе на такое перераспределение заряда, при котором он натекает на линию связи C-N, максимум, величиной  $0.1 e/\text{bohr}^3$ , при этом приходится на ее центр. Также наблюдается небольшой максимум деформационной плотности по центру связи N-O, который по величине почти в 30 раз меньше и составляет  $0.003 e/\text{bohr}^3$ . Все это говорит о том, что в анионе связь C-N сильнее, чем N-O. Подтверждается это тем, что при разложении неорганических фульминатов в температурном диапазоне  $60-120^\circ\text{C}$  на выходе присутствуют комплексы  $-\text{CN}-$  и  $-\text{CN}_2-$  [4].

1. Doyle Britton. Acta Cryst. (1991). C47, 2646-2647

2. R. Dovesi, et al. University of Torino, Torino, 2010.

3. R. Dovesi, R. Orlando, B. Civalleri, et al., Z. Kristallogr.220, 571–573 (2005)

4. T. Boddington, Z. Iqba. Trans. Faraday Soc., 1969, 65, 509-518

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Н. Г. Кравченко.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ И МОРФОЛОГИИ ПЛЕНОК InSb В МАТРИЦЕ AlAs МЕТОДОМ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Д. А. Колотовкина

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

В настоящий момент особый интерес вызывает система AlAs-InSb-AlAs, а именно случай, когда антимонид сурьмы формируется в виде квантовых точек. В такой ситуации реализуется непрямозонная энергетическая структура, что позволяет проводить фундаментальные исследования, в частности исследовать спиновую релаксацию экситона. Интерпретация результатов таких исследований требует знания структурных данных, которые для этой системы отсутствуют в литературе. Поэтому целью данной работы является определение структуры и морфологии эпитаксиальных слоев InSb в широкозонной матрице AlAs с помощью высокоразрешающей электронной микроскопии и установление влияния условий эпитаксии на вышеперечисленные параметры.

Объекты исследования были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии путем осаждения чередующихся моноатомных слоев In и Sb. Варьировалось количество циклов (N) и время осаждения. Образцы препарировались в виде поперечных срезов по плоскости (110). Исследования структурных особенностей проводились на электронных микроскопах Titan 80-300 (FEI) и JEOL 2200FS в режимах HREM и STEM. Анализ химического состава был проведен методом энерго-дисперсионной спектроскопии характеристического Рентгеновского излучения (EDAX).

По данным ВРЭМ в матрице AlAs формируется сплошная пленка толщиной 3-4 нм, зависящей от условий эпитаксии. Параметр решетки этой пленки ( $a$ ) для разных образцов лежит в интервале 0,566 – 0,571 нм. Это указывает на формирование твердого раствора  $In_xAl_{1-x}Sb_yAs_{1-y}$ , вместо бинарного соединения InSb ( $a_{InSb}=0,648$  нм). В предположении выполнения закона Вегарда для четверного твердого раствора с  $a = 0,566-0,571$  нм проведены оценки концентрации In и Sb и показано, что «x» и «y» не превышают 0,1, что согласуется с результатами EDAX. Обнаружено, что при N = 3 помимо сплошной пленки наблюдается формирование островков с высотой ~35 нм, латеральным размером ~83 нм и плотностью  $\sim 10^7$  см<sup>-2</sup>. Островки содержат дефекты упаковки и микродвойниковые ламели. Обсуждаются возможные механизмы их образования.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. К. Гутаковский.

## **ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТОВ БЛИЗОСТИ ПРИ СОЗДАНИИ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ЛИТОГРАФИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

К. А. Конфедератова

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время одним из актуальных направлений развития нанотехнологий является разработка метаматериалов, например, таких как фотонные кристаллы (ФК), структура которых характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях. Одним из способов контролируемого создания ФК с упорядоченными и однородными по размеру и расстоянию массивами отверстий является метод травления через маску в резисте, сформированную с помощью электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) или ионной литографии (ИЛ).

Процесс экспонирования является сложным процессом и основная проблема ЭЛЛ – это эффект близости (ЭБ), который проявляется как искажение получаемого на подложке изображения вследствие упругого и неупругого рассеяния электронов на подложке. ЭБ оказывает негативное влияние на однородность элементов в массиве по размеру и расстоянию между ними и на разрешающую способность ЭЛЛ. При ИЛ такой проблемы не возникает, но при этом происходит имплантация ионов, в образец. Кроме того ИЛ имеет меньшую производительность, чем ЭЛЛ, но более высокую разрешающую способность. *Целью* данной работы является изучение и минимизация ЭБ при контролируемом создании методами ЭЛЛ ФК с упорядоченными массивами однородных по размеру отверстий в широком диапазоне размеров и периодов на основе кремний на изоляторе (КНИ) и сравнение со структурами, созданными методом ИЛ.

В данной работе создан методом ЭЛЛ наноразмерный рисунок в позитивном резисте (полиметилметакрилате) на подложке (КНИ) упорядоченных массивов однородных по размеру отверстий в широком диапазоне размеров и периодов. Изучены влияния параметров экспонирования (ускоряющего напряжения, дозы, размера поля рисования без перемещения стола и т.д.) на топологию получаемых методами ЭЛЛ и ИЛ структур и их оптимизация. Получены зависимости распределения размеров отверстий в резисте от параметров экспонирования. Проведены сравнения структур сформированных методами ЭЛЛ и ИЛ.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Е. Е. Родякина.

## ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ОТЖИГА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$

Б. А. Костюк

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Материал  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  широко применяется в производстве ИК – фотодиодов в диапазоне длин волн от 1 до 20 мкм. Для изготовления многоцветных матричных ИК – фотоприемников необходимо получение фоточувствительных элементов малых размеров, для чего используется плазмохимическое травление (ПХТ). Недостатком этого метода является изменение электрофизических параметров (ЭП) образца после ПХТ.

В работе было исследовано влияние травления метан – водородной плазмой, и последующего отжига на ЭП пленок  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ , р – типа проводимости (вакансионный) и n – типа проводимости.

Непосредственно после ПХТ в образце р – типа происходит конверсия типа проводимости по всей толщине пленки, и концентрация электронов достигает  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . В образце n – типа концентрация возрастает также до  $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Вне зависимости от исходного типа проводимости наблюдается градиент концентрации носителей по толщине с максимумом вблизи поверхности, со значениями порядка  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

После ПХТ происходит уменьшение удельной проводимости образца с течением времени. После первых суток хранения при комнатной температуре концентрация подвижных носителей заряда в объеме образца падает на порядок со значений  $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  до  $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , с выходом на насыщение. При последующей выдержке образца при температуре 323 К процесс возобновляется и после двух суток выходит на насыщение с концентрацией  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Наблюдаемые эффекты объясняются тем, что высвобождаемая в процессе травления ртуть диффундирует с поверхности вглубь пленки, заполняет вакансии и захватывается на ловушки, образуя с последними донорные комплексы. Эти комплексы являются термически неустойчивыми, что приводит к релаксации проводимости. Проведено сравнение модельных расчетов с экспериментальными данными.

В работе исследовалось также влияние отжига после ПХТ на ЭП пленок  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  для изучения возможности возвращения ЭП образцов в исходное состояние.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент В. С. Варавин.

## СПИНОВАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В СИСТЕМЕ Ge-Si С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ – РАСЧЕТ МЕТОДОМ СИЛЬНОЙ СВЯЗИ

А. А. Кошкарев

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Исследование возможности применения спиновой степени свободы для квантовых вычислений и для создания приборов нового поколения является актуальной задачей современной физики. Основными требованиями для создания подобных устройств являются: длительное время хранения информации, а также возможность управления спином с помощью света, электрического поля или тока. Полупроводниковые структуры с квантовыми точками являются наиболее перспективными для этих целей, поскольку локализация электрона в данной системе происходит в кремнии, где времена спиновой релаксации наиболее длительны, а асимметрия локализирующего потенциала обеспечивает появление дополнительных возможностей для управления спинами электронов.

В данной работе были исследованы две системы, позволяющие локализовать электрон в кремнии: 1) Ge квантовые точки, встроенные в Si матрицу и 2) Si квантовые точки в Ge матрице. На основе метода сильной связи исследована спиновая релаксация при резонансном туннелировании электрона между двумя туннельно-связанными квантовыми точками. Для вычисления времени спиновой релаксации была рассчитана вероятность переворота спина при туннелировании. Вероятность туннелирования зависит от величины интеграла перекрытия между волновыми функциями в соседних квантовых точках. Для нахождения интеграла перекрытия был рассмотрен бесконечный одномерный кристалл, построенный из одинаковых квантовых точек. Расчет, проведенный для структуры 1-ого типа с размерами квантовых точек  $l=10$  нм (размер основания),  $h=1$  нм (высота), дал спиновое расщепление зоны одномерного кристалла  $\Delta E_{\square\square}=0.01$  мэВ, что дает значение интеграла перекрытия с переворотом спина  $I_{\square\square}=0.25 \cdot 10^{-5}$  эВ, и соответственно константу Рашбы  $\alpha=0.3 \cdot 10^{-11}$  эВ $\cdot$ см. Для структуры второго типа расчет дал спиновое расщепление на два порядка меньше  $\Delta E_{\square\square}=0.1$  мэВ, что соответствует в эксперименте временам 10 пс. Соответственно можно оценить время спиновой релаксации для электронов в Si квантовых точках как 1 нс.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук А. В. Ненашев, канд. физ.-мат. наук А. Ф. Зиновьева.

## ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ СО В ВОЗДУХЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{SnO}_2$ В РЕЖИМЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ

А. А. Краковская  
Томский государственный университет

Оксид углерода является одним из токсичных газов, загрязняющим атмосферу. Предельно допустимая концентрация угарного газа в воздухе рабочей зоны составляет 17 ppm. Поэтому необходимо определять концентрацию СО в воздухе без использования градуировочного графика, изображающего зависимость отклика сенсора на воздействие оксида углерода  $G_1/G_0$  от  $n_{\text{CO}}$ , так как при хранении сенсора в течение некоторого времени или его эксплуатации возможны изменения  $G_1/G_0$ . Отсюда следует, что перед каждым измерением  $n_{\text{CO}}$  в воздухе необходимо возобновлять градуировочный график, а для этого требуется довольно большой период времени.

Для решения этой задачи предлагается использовать аналитические выражения, описывающие зависимость отклика сенсора от  $n_{\text{CO}}$  в газовой смеси. В настоящей работе для проведения экспериментальных исследований использовались сенсоры на основе тонких поликристаллических пленок диоксида олова, полученных методом магнетронного распыления на постоянном токе мишени из сплава олова с сурьмой (0.49 ат.%). На поверхность наносились различные катализаторы. Сенсоры работали в режиме термоциклирования:  $T_1=603$  К,  $T_2=683$  К. Толщина пленок составляла около 100 нм. За отклик принимали отношение  $G_1/G_0$ , где  $G_1$  и  $G_0$  – проводимость сенсоров в смеси СО+воздух и в чистом воздухе, соответственно.

Полученные в эксперименте значения  $G_{\text{CO}}(T_2)$  и  $G_0(T_2)$  позволили рассчитать  $n_{\text{CO}}$  с помощью формулы при  $T=T_2$ ,  $\eta_{\text{CO}}=2.35 \cdot 10^{-3}$  ppm<sup>-1</sup> и  $M_1=21.37$ . Полученные расчетные значения  $n_{\text{CO}}$  хорошо совпадают с концентрациями СО  $n'_{\text{CO}}$ , задаваемыми в измерительной камере с помощью шприца – дозатора. Измерения отклика сенсора для всех значений  $n'_{\text{CO}}$  проводились при одной и той же относительной влажности газовой смеси RH=30 %. Совпадение экспериментальных данных с расчетными данными позволяют определять концентрацию СО без использования градуировочного графика.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Н. В. Сергейченко.

## ИЗМЕРЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Н. Н. Кречетова

Международный научный центр по теплофизике и энергетике  
Новосибирский государственный технический университет

Существуют различные способы применения тонких пленок в электронике, например при создании дисплеев, сенсорных экранов, датчиков. В последнее время большой интерес вызывает их применение в качестве прозрачного проводящего слоя в солнечных элементах (СЭ).

Материал для этого слоя должен быть электропроводящим и оптически прозрачным. В своей работе мы предлагаем применять в этих целях углеродные нанотрубки (УНТ).

Между ключевыми параметрами пленки, пропусканием  $T$  и сопротивлением  $R$ , существует следующая связь:

$$T = \left( 1 + \frac{188.5}{R \cdot FOM} \right)^{-2}$$

где FOM (figure of merit) - характеристика качества прозрачного проводящего проводника.

Как видно из формулы, величины сопротивления покрытия при заданном пропускании напрямую зависит от этого показателя. Пленка должна быть достаточно прозрачная (~90%), чтобы пропускать падающей на солнечный элемент свет, а ее сопротивление должно быть достаточно низким (<100 Ом/□), чтобы обеспечить высокую эффективность СЭ.

Для проведения эксперимента углеродный материал, содержащий УНТ, в растворе бидистиллированной воды с добавлением додецилбензолсульфонат натрия проходит обработку ультразвуком. В своей работе мы используем метод нанесения пленок путем распыления раствора УНТ при помощи аэрокисти. В качестве материала подложки для нанесения слоя УНТ служит гибкий полимер полиэтилентерефталат (PET).

Для улучшения их качества, пленки проходят последующую обработку, которая включает в себя вымачивание готовых пленок в бидистиллированной воде и выдерживание в парах азотной кислоты.

В работе показано, что технология изготовления пленок из углеродных нанотрубок является альтернативой оксиду индия-олова (ITO), используемого сегодня в электронике.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук В. О. Сайк.



## ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ЗАРЯДА В ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$

Д. Л. Кузьмина

Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Одной из важнейших проблем современной техники является разработка нетрадиционных, возобновляемых источников энергии. Отдельным направлением этой проблемы является разработка микромощных электрогенераторов, применительно, в частности, к задачам создания сетей автономных беспроводных датчиков.

Пример подобного устройства – электростатический микрогенератор энергии. Его ключевым элементом является заряженный диэлектрический слой, в электрическом поле которого за счёт внешней энергии совершает колебания подвижный электрод. То есть, генератор преобразует механическую энергию колебаний в электрическую энергию. Возникает необходимость поиска такого материала, который мог бы сохранять электрический заряд в течение длительного времени. Предлагается использовать электреты – диэлектрики, способные долгое время после зарядки сохранять заряженное состояние.

В данной работе проведено исследование электретных тонкоплёночных структур из слоёв  $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{Si-SiO}_2$ . Образцы создавались стандартным пиролизом на поверхности кремниевых подложек. Зарядка пластин проводилась методом коронного разряда при напряжении 11 кВ в течение 30 минут при комнатной и при повышенной до 200°C температуре. Максимальная плотность полученного отрицательного заряда достигла  $1,1 \cdot 10^{-2} \text{ Кл/м}^2$ . Потенциал заряженной поверхности измерялся компенсационным методом с помощью виброконденсатора, измерения проводились до 100 часов. При исследовании использовались кремниевые подложки с различными толщинами слоёв  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (0,2 ÷ 0,8 мкм и 0,1 ÷ 0,2 мкм соответственно).

Исследование показало, что за 2-3 часа заряд стабилизируется и в течение остального времени сохраняет свою величину. Установлено, что наибольший заряд генерируется на пластине с толщиной диэлектрического слоя  $\text{SiO}_2$  0,8 мкм при температуре зарядки 200°C, осаждение нитрида кремния на плёнку увеличивает стабильность полученного заряда.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Э. Г. Косцов.

## УЛУЧШЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

К. А. Лозовой, А. А. Пищагин  
Томский государственный университет

В последнее десятилетие исследователи проявляют очень большой интерес к созданию фотоприемников инфракрасного диапазона и солнечных элементов на основе материала с квантовыми точками (КТ) германия в кремнии. Столь высокий интерес к созданию подобных оптоэлектронных приборов на основе наногетероструктур с КТ Ge на Si обусловлен рядом уникальных свойств таких структур.

Цель данной работы являлось определение оптимальных с точки зрения приборного применения ростовых условий для создания фотоприемников с как можно более высокой обнаружительной способностью и солнечных элементов с максимальным коэффициентом полезного действия.

В работе на основе выражений для обнаружительной способности инфракрасных фотодетекторов [1] и для коэффициента преобразования солнечной энергии солнечным элементом с КТ [2] показывается, что данные характеристики напрямую зависят от поверхностной плотности и разброса КТ по размерам и указывается характер этих зависимостей.

С помощью теоретической модели роста КТ Ge на Si, позволяющей рассчитывать поверхностную плотность и функцию распределения квантовых точек по размерам, даются рекомендации по условиям роста, необходимым для улучшения рабочих характеристик приборов оптоэлектроники. Показано, что для достижения оптимальных характеристик фотоприемников следует выращивать квантовые точки при достаточно высоких температурах, а для увеличения коэффициента преобразования солнечных элементов, наоборот, при низких температурах роста.

---

1. J. Phillips. Evaluation of the fundamental properties of quantum dot infrared detectors // J. Appl. Phys. – 2002. – V. 91. – № 7. – P. 4590-4594.

2. А. В. Войцеховский, Д. В. Григорьев, О. П. Пчеляков, А. И. Никифоров. Эффективность преобразования солнечной энергии солнечным элементом на основе Si с квантовыми точками Ge // Прикладная физика. – 2010. – Т. 6. – № 2. – С. 96-102.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. П. Коханенко.

**УДЛИНЕННЫЕ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ Ge НА Si**

К. А. Лозовой, В. Г. Сатдаров, Е. А. Калин  
Томский государственный университет

Начиная с 90-х годов XX века полупроводниковые материалы, содержащие кластеры Ge нанометровых размеров (квантовые точки, КТ), нашли самое широкое применение в оптоэлектронике. Они применяются для создания светоизлучающих и фотоприемных устройств, на равных конкурирующих с традиционными оптоэлектронными материалами, такими как соединения A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>. Повышение эффективности устройств на основе наногетероструктур Si с квантовыми точками Ge достигается благодаря проявлению эффектов пространственного квантования, когда геометрические размеры nanoостровков составляют менее 100 нм и реализуется максимально высокая плотность массивов КТ [1].

В работе описана математическая модель расчета зависимостей параметров самоорганизующихся КТ германия на кремнии от условий роста в методе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Проведен расчет энергий образования пирамидальных и клиновидных островков в системе Ge/Si(001) с учетом вкладов поверхностной энергии, релаксации упругих напряжений и уменьшения энергии притяжения атомов к подложке. С использованием известной модели [2], основанной на обобщении классической теории зародышеобразования, показано, что клиновидные островки образуются позднее, чем пирамидальные, но с течением времени должны начать доминировать в массиве квантовых точек. Проведены вычислительные эксперименты по определению поверхностной плотности и функции распределения по размерам клиновидных КТ с различным отношением длины основания к его ширине. Обнаружено наличие выделенной геометрии КТ с отношением сторон основания 2:1, для которой поверхностная плотность и средний размер островков достигают экстремальных значений. Сделанные выводы согласуются с экспериментальными наблюдениями.

---

1. J.-N. Aqua, I. Berbezier, L. Favre. Growth and self-organization of SiGe nanostructures // Physics Reports. – 2013. – V. 522. – P. 59-189.

2. В. Г. Дубровский. Расчет функции распределения квантовых точек по размерам на кинетической стадии роста // ФТП. – 2006. – Т. 40. – № 10. – С. 1153-1160.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. П. Коханенко.

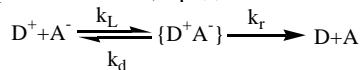
## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕКОМБИНАЦИИ ЗАРЯДОВ В КОМПОЗИТАХ РЗНТ/РС<sub>70</sub>ВМ МЕТОДОМ СТАЦИОНАРНОГО ЭПР

Е. А. Лукина

Институт химической кинетики и горения СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Композит проводящего полимера РЗНТ и производной фуллерена РС<sub>70</sub>ВМ используется для изготовления активного слоя органических фотоэлементов [1]. Светоиндуцированный сигнал ЭПР в данном композите наблюдается при комнатной температуре, что позволяет изучать методом ЭПР процессы фотогенерации и рекомбинации свободных зарядов в условиях, максимально близких к условиям работы фотоэлемента.

Из данных ЭПР получено, что рекомбинация зарядов в данной системе не может быть описана моделью Ланжевена. Для объяснения полученных результатов был выбран механизм, предложенный в [2]:



Со скоростью, соответствующей рекомбинации Ланжевена, свободные заряды образуют комплекс  $\{D^+ A^-\}$ , который может рекомбинировать, либо разделиться на свободные заряды. В результате суммарная скорость рекомбинации ниже, чем в модели Ланжевена, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. Для объяснения отличия экспериментального порядка реакции рекомбинации от 2 была выбрана модель бимолекулярной рекомбинации, ограниченной локализацией зарядов на молекулах полимера [3]. В данной модели  $k_L$  зависит от концентрации носителей заряда из-за различной степени заполнения локализованных состояний при больших и малых концентрациях.

Была измерена температурная зависимость константы скорости рекомбинации. При температурах 150-300 К определена энергия активации  $E_0 = 0,16 \pm 0,01$  эВ. Предположительно, эта энергия определяется энергией активации реакции  $\{D^+ A^-\} \rightarrow D + A$ . При температурах 80-150 К константа скорости рекомбинации не зависит от температуры. Предполагается, что реакция идет в режиме тунелирования.

1. J. Y. Kim et al., *Science*, 2007, 317, 222-225
2. A. J. Ferguson et al., *J. Phys. Chem. C*, 2011, 115, 23134-23148
3. T. M. Clarke et al., *J. Phys. Chem. C*, 2009, 113, 20934-20941

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Л. В. Кулик.

## **ВЛИЯНИЕ СУЛЬФИДОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 20ГЛ**

С. Э. Лямкин, Н. И. Заруцкая, А. А. Романова  
Восточно-Казахстанский государственный университет  
им. С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск  
Красноярский научный центр ЦКП

Эффективность процессов, связанных с удалением серы из стали, является актуальной в черной металлургии. Сера является одной из наиболее вредных примесей стали, снижающих механическую прочность, пластичность и свариваемость металла, его эксплуатационные свойства.

Целью данной работы было выяснить причину образования большого количества микротрещин в литых изделиях из стали 20ГЛ производимых на АО «Востокмашзавод». Для достижения цели сравнивали результаты ультразвукового метода дефектоскопии и магнитно-порошкового метода с микроструктурой образцов-свидетелей подвергнутых испытаниям на ударную вязкость маятниковом копре.

Магнитно-порошковый метод и метод УЗД позволяют разрешить дефекты минимальными размерами порядка миллиметров. В исследуемых образцах эти методы оказались недостаточными для выяснения причины низкой ударной вязкости образцов – свидетелей, химический состав которых находится в пределах ГОСТа. Требовалось использовать более высокоразрешающий метод контроля свойств и структуры материала. Для этого использовали сканирующий электронный микроскоп с микроанализатором Hitachi TM3000. Изображение поверхности излома образца стали 20ГЛ получали во вторичных электронах и в лучах характеристического рентгеновского излучения.

По результатам исследования обнаружены капсулы размером порядка десятых долей миллиметра и менее, содержащие марганец и серу. С помощью рентгеноструктурного анализа установлено присутствие сульфида марганца, сформировавшегося, вероятно, в процессе кристаллизации расплава стали 20ГЛ. Капсула представляет собой гладкую полость, на дне которой находится частица сульфида марганца. В таких полостях происходит концентрация напряжений при механическом ударе, что приводит к дальнейшему образованию микротрещин и разрушению детали.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Л. И. Квеглис.

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ С ПЛЁНКАМИ НАНОФАЗНОГО АЛМАЗА

Ф. Ф. Меркушев, О. В. Семёнова, С. А. Подорожняк  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Наиболее эффективными источниками возобновляемой солнечной энергии в настоящее время являются полупроводниковые солнечные батареи, в частности кремниевые. Поверхность монокристаллических полупроводников характеризуется сильным оптическим отражением, что приводит к потере эффективности преобразования поглощенных фотонов в электрический ток, что актуализирует проблему создания антиотражающих покрытий. В качестве такого материала может быть использован пористый кремний, сформированный на поверхности монокристаллического кремния. Однако, пористый кремний подвергается значительной деградации (изменению оптических свойств во времени), особенно в условиях влияния агрессивных сред. Алмазоподобные углеродные плёнки могут стать альтернативой  $\text{SiO}_2$  и  $\text{SiN}$  плёнкам в качестве защитных покрытий для кремниевых солнечных элементов [1].

Для создания оптических структур на пористом кремнии используются достаточно простые, экономичные технологии с использованием электрохимического анодирования. Плёнки нанозазного алмаза (НФА) в данной работе получали из органических суспензий НФА методами погружения и накатывания[2].

Образцы пористого кремния, полученные методом электрохимического анодирования, были исследованы методами оптической спектроскопии и микроскопии. Установлено, что плёнки НФА, полученные из органических суспензий, изменяют коэффициент отражения пористого кремния в пределах 1-4 %. При этом известно, что алмазоподобные плёнки, нанесенные на рабочую сторону кремниевых солнечных ячеек, позволяют повысить их устойчивость к воздействию протонов и ультрафиолетового излучения.

---

1. V. G. Litovchenko, N. I. Klyui. Solar cells based on DLC film-Si structures for space application // Solar Energy Materials & Solar Cells 68 (2001) 55-70.

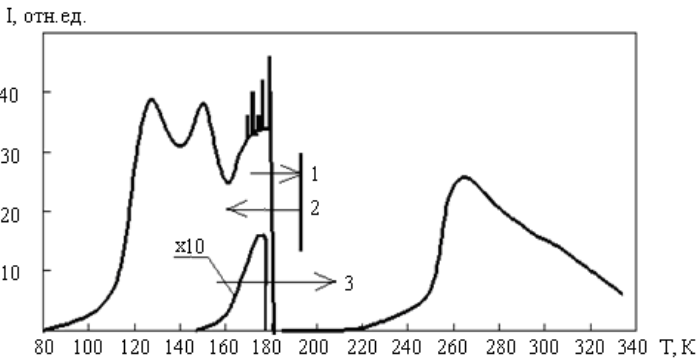
2. T. N. Patrusheva, A. Ya. Koretz, E. M. Mironov. Transparent carbon coatings of ultra fine diamond // Indian Journ. of Pure and Appl. Phys. 2005. V. 43. P. 115–118.

Научные руководители – канд. техн. наук, проф. В. А. Юзова, д-р техн. наук, проф. Т. Н. Патрушева.

## ВЛИЯНИЕ ПОЛИМОРФНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В КРИСТАЛЛЕ $\text{LiKSO}_4$

Г. И. Мусина, Д. А. Темирбаева, А. У. Кабдиева  
 Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова

В данной работе рассматривается влияние полиморфных фазовых переходов в кристалле  $\text{LiKSO}_4$ . После облучения рентгеновскими квантами при температуре жидкого азота были измерены спектры термостимулированной люминесценции (ТСЛ).



«Холодная» вспышка рекомбинационной люминесценции в  $\text{LiKSO}_4$ . Стрелками указаны направления изменения хода температуры, цифрами – последовательность

Вид кривой ТСЛ выявляет ряд аномалий в температурных областях 180К и 250К. При 180К интенсивность рекомбинационной люминесценции резко падает до нуля, с другой стороны при 250К наблюдается резкое возрастание рекомбинационного свечения.

Появление «холодной» вспышки при температуре немного более низкой, чем температура полиморфного фазового перехода согласуется с тем, что согласно литературным данным [1] в режиме охлаждения этот структурный фазовый переход имеет гистерезис в пределах 5 градусов.

---

1. К. С. Александров, Б. В. Безносиков. Структурные фазовые переходы в кристаллах (семейство сульфата калия). — Новосибирск: Россия, 1993. — 287 с.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Б. С. Тагаева.

## ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАНОСТРУКТУР Si/Ge С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ Ge КАК МАТЕРИАЛА С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЗОНОЙ

А. А. Пицагин, А. В. Барко  
Томский государственный университет

Быстрый рост энергопотребления – одна из характерных особенностей технологической деятельности человека. Одним из путей развития энергетики будущего видится использование возобновляемых источников энергии. Среди альтернативных источников энергии наибольшие перспективы повсеместного внедрения имеет солнечная энергетика.

Для создания эффективных фотопреобразователей наиболее эффективно использовать материалы, которые обладают оптимальной шириной запрещенной зоны материала для поглощения максимального количества фотонов в спектральном диапазоне максимума солнечного излучения. Особый интерес представляет материал Si/Ge с квантовыми точками Ge.

В работе рассматривается приборная структура, в которой основной рабочей областью является Si с квантовыми точками Ge. Предполагается, что массив квантовых точек создает в запрещенной зоне полупроводника промежуточную зону [1]. Положение и ширина промежуточной зоны определяются параметрами массива квантовых точек.

Основными параметрами, описывающими структуру с промежуточной зоной являются энергетические зазоры между разрешенными зонами и промежуточной зоной  $E_{g1}$  и  $E_{g2}$ , ширина промежуточной зоны  $\Delta$ , а также коэффициенты поглощения  $\alpha_h$  и  $\alpha_e$ , связанные с переходами носителей заряда через промежуточную зону.

В работе рассматриваются многослойные p-i-n структуры и структуры с барьерами Шоттки, содержащие слои Si с квантовыми точками Ge и промежуточные слои i-Si. Моделирование структуры проводится программном комплексе «Sentaurus TCAD». Для этих структур рассчитываются основные параметры, электрофизические и оптические характеристики.

---

1. A. Marti, L. Cuadra, A. Luque. Design constraints of the quantum dot intermediate band solar cell // Physica. E. – 2002. – V. 14. – P. 150-157.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. П. Коханенко



## **ПСЕВДОКОНСТАНТЫ И ОБЪЕМНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ЗАТУХАНИЯ**

А. И. Рехтин

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

При определении объемных значений показателей преломления и затухания необходимо учитывать наличие поверхностного (переходного) слоя, который имеется на поверхности любого твердого тела. В противном случае измеряются так называемые «псевдоконстанты», которые не имеют никакого физического смысла.

Влияние поверхностного слоя зависит от длины волны зондируемого излучения, от свойства конкретного вещества (проводник, полупроводник или диэлектрик) и от методов измерений.

Обсуждается влияние поверхностного слоя на определение объемных значений показателей преломления как изотропного, так и анизотропного диэлектрика. Анализируются особенности некоторых хорошо известных методов. Существуют прямые и косвенные методы измерения показателя преломления. Например, по измерениям коэффициента отражения или методом эллисометрии. Эти методы являются косвенными. В этих случаях влияние поверхностного слоя может существенно исказить результаты измерений. Измерение с помощью иммерсионных жидкостей является одним из хорошо разработанных методов. Этот метод, относительно прост. Однако, он относится к косвенным методам и наряду с преимуществами обладает некоторыми существенными недостатками. К сожалению метод предельного угла также нельзя отнести к прямым измерениям. Очевидно, что когда световой пучок проходит сквозь вещества вклад поверхностного слоя на изменение параметров пучка существенно меньше. Так, метод призмы относится к прямым методам измерения, однако, он трудоемкий и разрушающий. В докладе предлагаются модифицированные, более эффективные и дешевые методы, позволяющие определять объемные значения показателей преломления с учетом и без учета поверхностного слоя. Идеология предлагаемых методов основана на прохождении светового пучка через плоскопараллельную пластинку, которая изготовлена из исследуемого объекта. В работе, рассматривается кварц и его использование в качестве подложки при эллисометрических измерениях для определения оптических параметров металлических или диэлектрических пленок.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Т. Х. Хасанов.

## ЕМКОСТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ТРЕХМЕРНОГО ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА НА ОСНОВЕ НАПРЯЖЕННОГО ТЕЛЛУРИДА РТУТИ

М. А. Роенко

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Главным отличием объемного теллурида ртути от обычных полупроводников (например, кремния или арсенида галлия) является его инвертированная зонная структура, возникающая благодаря релятивистским эффектам и сильному спин-орбитальному взаимодействию. В результате этих эффектов две валентные зоны, соответствующие в «обычных» полупроводниках зонам тяжелых и легких дырок, оказываются выше зоны проводимости, тем самым превращая теллурид ртути в полуметалл с инвертированной зонной структурой. Инверсия зон является ключевым моментом для реализации нового класса веществ – трехмерного топологического изолятора, т. Е. тела, в котором объем является изолирующим, а на поверхности образуются проводящие состояния. Теория предсказывает, что состояния такого типа характеризуются линейным законом дисперсии и абсолютной спиновой поляризацией, что, несомненно, делает их необычными и интересными для изучения. Объектом исследования является пленка HgTe толщиной 80 нм, выращенная с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке из CdTe. Благодаря малой толщине пленки и небольшому рассогласованию постоянных решетки у HgTe и CdTe, в спектре пленки между зоной проводимости и валентной зоной открывается энергетическая щель величиной  $\sim 15\text{meV}$ , сохраняя при этом инверсию зон и наличие поверхностных состояний. Таким образом, расчетный спектр исследуемой пленки полностью соответствует представлениям о спектре трехмерного топологического изолятора. Получение любой экспериментальной информации о спектре этой системы является актуальной задачей физики полупроводников. Данная работа посвящена измерению плотности состояний указанной пленки с помощью метода емкостной спектроскопии. Суть метода состоит в измерении дифференциальной емкости системы металлический затвор – пленка HgTe, величина которой зависит от плотности состояний в HgTe, в зависимости от приложенного затворного напряжения. Сопоставление полученных данных с транспортными измерениями (измерениями тензора сопротивления) позволит построить «карту» энергетических подзон.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. А. Козлов.

## РАЗРАБОТКА СПЕКТРОМЕТРА И МЕТОДИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ, ЭМИТИРОВАННЫХ P-GAAS(CS,O) ФОТОКАТОДОМ

А. А. Сапожник

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Поверхность p-GaAs, активированная Cs и O, обладает эффективным отрицательным электронным средством (ОЭС). ОЭС характеризуется понижением уровня вакуума ниже дна зоны проводимости в объёме, что обуславливает высокий квантовый выход фотоэмиссии. Благодаря этому свойству, фотокатоды (ФК) на основе GaAs с ОЭС нашли широкое практическое применение в приборах ночного видения, и источниках электронов для научных исследований. Эффективность данных приборов зависит от рассеяния электронов на поверхности ФК. Поверхностное рассеяние до сих пор не изучено, и наиболее полную информацию о поверхностном рассеянии можно получить из распределения фотоэлектронов по продольной и поперечной энергии  $n(\epsilon_{\text{lon}}, \epsilon_{\text{tr}})$ . В настоящее время не существует спектрометра и методики, позволяющих определять  $n(\epsilon_{\text{lon}}, \epsilon_{\text{tr}})$  при температурах от комнатной до жидкого гелия.

Целью работы является разработка спектрометра и методики, позволяющих определять  $n(\epsilon_{\text{lon}}, \epsilon_{\text{tr}})$  в широком диапазоне температур, и изучение фотоэмиссии с использованием новой методики. Для достижения поставленной цели разработан планарный вакуумный спектрометр, состоящий из ФК и сегментированного анода (А), заключённых в металлокерамическом корпусе. К промежутку ФК — А прикладываются коллинеарные электрическое и магнитное поля, ток фотоэлектронов, регистрируемый А, зависит от величины полей и  $n(\epsilon_{\text{lon}}, \epsilon_{\text{tr}})$ . Таким образом, функция  $n(\epsilon_{\text{lon}}, \epsilon_{\text{tr}})$  может быть восстановлена путём измерения анодного тока при различных величинах полей и решения обратной задачи. Была выполнена оптимизация размеров спектрометра, включающая в себя компьютерное моделирование различных режимов работы, и изготовлен прототип спектрометра. Технология изготовления и сочленения элементов спектрометра обеспечивает надёжность конструкции при криогенных температурах. При помощи разработанных спектрометра и методики была определена и проанализирована функция  $n(\epsilon_{\text{lon}}, \epsilon_{\text{tr}})$  термализованных фотоэлектронов, эмитированных при комнатной температуре.

Научный руководитель – доктор физ.-мат. наук А. С. Терехов.

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР Ge/Si С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

В. Г. Сатдаров, Д. В. Ляпунов  
Томский государственный университет

В настоящее время оптоэлектроника переживает бурное развитие, и основными объектами исследований становятся сложные гетероструктуры с наноразмерными включениями. Большой интерес проявляется к системе материалов Si/Ge с квантовыми точками (КТ) Ge, которые являются перспективными для создания высокоэффективных солнечных элементов, а также приемников излучения, работающих на важных телекоммуникационных длинах волн 1,3-1,55 мкм.

Для приборных применений необходимо создавать структуры с заданными электронными свойствами. Происходит поиск новых методов диагностики создаваемых приборов и структур нанoeлектроники и ревизия существующих методов. Большими потенциальными возможностями для характеристики полупроводниковых квантово-размерных структур обладает группа методов адмиттансной спектроскопии.

В работе проведена серия измерений электрофизических параметров многослойных Si/Ge структур на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса. Установка позволяет за один цикл сканирования получить вольт-фарадные характеристики (ВФХ), частотные и температурные зависимости емкости и проводимости, провести измерения адмиттанса и импеданса образцов в широких пределах температур, приложенных внешних смещений и частот тестового сигнала. Исследовались структуры, изготовленные в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск). Каждая структура имела вид Si *p-i-n*-диода со встроенными в *i*-область слоями, содержащими КТ Ge. Проведены измерения ВФХ, частотных и температурных зависимостей проводимости. Исследуя ВФХ, можно получить информацию о концентрации носителей в образце, о заряде, накопленном в КТ, и о плотности состояний. В методе температурной спектроскопии проводимости регистрируется активная часть адмиттанса как функция температуры. Для положений температурных максимумов спектров проводимости определяется энергия активации, характеризующая положение уровней квантования в КТ. Анализ этих методик может дать полную информацию о поведении носителей заряда в самоорганизующихся КТ.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. П. Коханенко.

## ТУННЕЛИРОВАНИЕ ЗИНЕРА В КВАЗИДВУМЕРНЫХ ДИСКАХ КОРБИНО

И. С. Сtryгин

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Магнетотранспортные явления в двумерных системах на основе соединений  $A^3B^5$  уже более 30 лет являются предметом изучения. Это связано с их практической значимостью в высокочастотной микроэлектронике, а также со значимостью фундаментальных явлений, наблюдаемых в таких системах. Особое место в ряде магнетотранспортных явлений занимают нелинейные явления, которые в настоящее время остаются недостаточно хорошо изученными. Одним из таких явлений является туннелирование Зинера между уровнями Ландау при больших факторах заполнения и классически сильных магнитных полях.

До недавнего времени туннелирование Зинера между уровнями Ландау в двумерных системах наблюдалось только в образцах с геометрией мостика Холла. В таких системах при классически сильных магнитных полях туннелирование Зинера между уровнями Ландау индуцируется полем Холла. Однако, не так давно было показано, что этот эффект наблюдается и в двумерных дисках Корбино, где поле Холла отсутствует. Зависимость положения максимумов осцилляций магнетосопротивления от магнитного поля в этом случае квадратичная, в отличие от мостиков Холла, где зависимость линейная.

Данная работа посвящена исследованию туннелирования Зинера между уровнями Ландау в системах с двумя заполненными подзонами размерного квантования в образцах с геометрией диска Корбино, изготовленных на основе селективно легированной гетероструктуры GaAs/AlAs. Целью работы было обнаружение данного явления в указанных образцах.

Было показано, что туннелирование Зинера между уровнями Ландау в квазидвумерных образцах действительно есть, и зависимость положения максимумов осцилляций магнетосопротивления от магнитного поля квадратичная, как и для одноподзонных систем.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А. А. Быков.

## КОНЦЕНТРАЦИОННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗА, КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ В КРЕМНИИ

Т. У. Тошбоев, Н. Рахматов  
Самаркандский государственный университет им. А. Навои

Известно, что концентрационное распределение железа, кобальт и никель в кремнии не описывается известными решениями диффузионных уравнений. С другой стороны, отсутствие зависимости вида концентрационного распределения от плотности дислокаций и отсутствие зависимости концентрации атомов железа, кобальт и никель в объеме образца от времени отжига противоречат предположению о диссоциативном механизме диффузии указанных примесей в кремнии. Хотя все опыты говорят о большой величине коэффициента диффузии этих примесей. Для определения более точного вида концентрационного распределения были проводилась диффузия железа, кобальт и никеля на воздухе в течение нескольких минут (3-4) для образцов толщиной 2-4 мм.

Как показали измерения, для всех рассматриваемых элементов величина коэффициента диффузии слабо зависит от температуры. Значение температурная коэффициента диффузии изменяется от  $4 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с до  $1,3 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с в интервале температур 1000-1300<sup>0</sup>С, энергии активации составляет 0,66 эВ. Значение коэффициента диффузии никеля и кобальта в интервале температур 1000-1320<sup>0</sup>С меняется от  $2,7 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с до  $7,5 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с и  $8 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с до  $2,1 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с, соответственно. Энергия активации диффузии никеля равно -0,47 эВ, энергия активации кобальта равно -0,51 эВ. Полученные эти результаты показывает, что железо, кобальт и никель в кремнии имеют большую скорость диффузии. Такая большая скорость диффузии обычно характерна для междоузельного механизма диффузии примеси в полупроводниках. Как будет показано в обсуждении, эти элементы действительно диффундируют по междоузлиям. Исследовалась влияние степени легирования на эффективный коэффициент диффузии кобальта и никеля в кремнии [1]. Для этой цели использовался кремний *n* – типа с концентрацией электронов  $2 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> и кремний *p* – типа с концентрацией дырок  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Температура отжига выбиралась таким образом, чтобы при этой температуре концентрация собственных носителей была меньше, чем  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>. А также показано, концентрационное распределение высоколегированным *n* – и *p* – типе, которые отжигались при 1100С в течение 30 минут. Из полученных результатов видно, что тип материала и концентрация носителей тока не влияют на концентрационное распределение кобальта. Аналогичный результат был получен для никеля.

---

1. Бахадырханов М. К. и др. Поведение элементов группы железа в кремнии. ФТТ.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Т. У. Тошбоев

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЫСТРОДИФФУНДИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ (БДП) В КРЕМНИИ

Т. У. Тошбоев, Н. Рахматов

Самаркандский государственный университет им. А. Навои

В последние годы все большее внимание уделяется исследованию электронной структуры глубоких центров и их влиянию на основные физические свойства кристаллов. В работе изучено взаимодействие БДП атомов никеля, кобальта и серы в кремнии как между собой, так и исходными примесными атомами и структурными дефектами. Выявлены механизмы взаимодействия, электронная структура комплексов и их влияние на оптические и электрофизические свойства материала. Проведено систематическое изучение процессов комплексообразования при одновременном легировании кремния двумя быстро диффундирующими примесями. Показано, что при одновременном легировании кремния серой с кобальтом происходит уменьшение концентрации электроактивных атомов как серы, так и кобальта, тогда полное содержание кобальта этих образцов увеличивается. С другой стороны, одновременное легирование кремния никелем и марганцем не приводит к изменению концентрации электроактивных центров никеля и марганца. При этом полное содержание никеля в этих образцах понижается. В процессе диффузионного отжига примесных атомов серы и марганца, а также марганца со структурными дефектами, которые достаточно полно объясняют полученные экспериментальные результаты по изучению растворимости и распределению примесных атомов в образцах  $\text{Si}\langle\text{S},\text{Mn}\rangle$  и  $\text{Si}\langle\text{Ni},\text{Mn}\rangle$ . Действительно, результаты исследования фотоэлектрических свойств образцов кремния легированных как серой, так марганцем показали, что эти материалы отличаются высокой фоточувствительностью, на их основе могут быть созданы приемники ИК излучения с пороговой чувствительностью  $10^{-12}$  Вт. Кроме того эти материалы обладают очень высоким удельным сопротивлением при 77-180 К ( $10^{16} - 10^{18}$  Ом·см). Полупроводники, легированные переходными элементами, позволили создать новый класс материалов – магнитные полупроводники, которые могут быть использованы для создания новых типов полупроводниковых приборов, действующих по двум подсистемам – электронной и магнитной. Ряд БДП в полупроводниках, активно взаимодействующих с дефектами кристаллической решетки, способствует стабилизации их параметров при внешних воздействиях. Следовательно, такие кристаллы могут быть использованы в качестве термостабильного полупроводникового материала. При этом определены оптимальные условия легирования кремния серой и марганцем, позволяющие сохранять исходные параметры образца как при легировании, так при термообработке в интервале температур 300-1200°C.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Т. У. Тошбоев

## НАЧАЛЬНЫЕ СТАДИИ ЭПИТАКСИИ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}$ НА КРЕМНИЙ ИЗ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ

А. Р. Туктамышев

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Методы эпитаксиального роста сталкиваются с тем, что параметры решеток пленки и материала подложки обычно сильно различаются. Это несоответствие создает большие деформации в эпитаксиальных пленках. Деформации, в результате, обеспечивают новый инструмент для технологий инженерии зонной структуры, который позволил создать некоторые современные приборы, такие как полевой транзистор с высокой подвижностью носителей. Существует такая характеристика, как критическая толщина псевдоморфной пленки, выращиваемой на подложке с иным параметром кристаллической решетки. Это налагает некоторые ограничения на технологические возможности по управлению зонной структурой. Если эпитаксиальная пленка – сплав полупроводников, то средний размер параметра решетки сильно зависит от состава, желаемое изменение состава может вызвать энергию напряжений, которая уменьшит критическую толщину пленки до недопустимого значения. Недавно началось изучение тройных полупроводниковых растворов  $\text{GeSiSn}$  для широкого применения в оптоэлектронных приложениях.

В данной работе поставлены задачи:

1. Исследовать начальные стадии роста пленок тройных твердых растворов  $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}$ , выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низких температурах роста;
2. Проанализировать изменения картины дифракции быстрых электронов и зафиксировать момент перехода к трехмерному росту при различных составах сплава в диапазоне температур  $150 \div 450^\circ\text{C}$ ;
3. Исследовать влияние температуры роста и состава тройного раствора на толщину смачивающего слоя  $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}$ ;
4. Изучить морфологию поверхности тонких пленок тройных твердых растворов  $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}$  при различных температурах роста и проанализировать параметры nanoостровков в области трехмерного роста методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей туннельной микроскопии (СТМ).

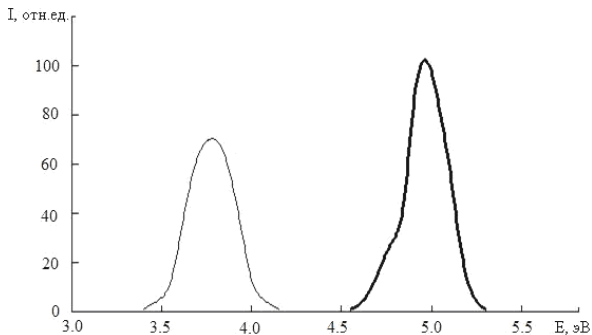
Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук В. И. Машанов.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СОЛИ КУРРОЛЯ

А. К. Тусупбекова, Б. А. Байжигитова, М. С. Идрисова  
 Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова

В работе приведены результаты по исследованию фотолюминесценции соли Курроля ( $KPO_3$ ). На приведенном ниже рисунке спектр излучения представляет собой одиночную элементарную оптическую полосу, максимум которой находится при 3.76 эВ. Данная фотолюминесценция эффективно возбуждается в оптической полосе с максимумом при 4.90 эВ. Установлено, что в чистой соли Курроля и соли Курроля, полученной при дегидратации KDP-KCl, подобных полос в диапазоне 1.55-6.20 эВ нет. Поэтому наблюдаемые оптические полосы в спектрах излучения и возбуждения обусловлены наличием в образцах примесных ионов  $Tl^+$ . По всей ширине оптической полосы спектра возбуждения наблюдается одна и та же люминесценция с максимумом при 3.76 эВ. Следовательно, наблюдаемое искажение контура оптической полосы в спектре возбуждения является проявлением сложной структуры электронного перехода в примесном центре люминесценции.



Спектры возбуждения и излучения  $KPO_3-Tl$  при 80K

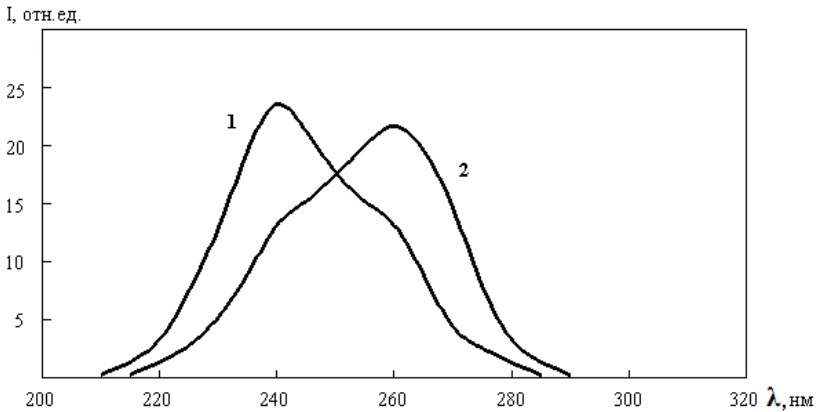
Таким образом, наблюдаемую оптическую полосу с максимумом при 4.90 эВ можно связать с А-полосой ионов  $Tl^+$ , так как она является наиболее низкоэнергетической и обладает сложной структурой даже в соединениях с высокосимметричными кристаллическими решетками.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. Т. А. Кукетаев, канд. физ.-мат. наук Б. С. Тагаева

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ $K_2SO_4$ , АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ $Sn^{2+}$

А. К. Тусупбекова, Б. А. Байжигитова, Д. А. Темирбаева, З. Р. Сыздыкова  
 Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова

Целью данной работы является изучение некоторых спектрально-люминесцентных свойств сульфатов, активированных ионами двухвалентного олова. На нижеприведенном рисунке показаны спектры возбуждения фотолюминесценции  $K_2SO_4-Sn^{2+}$ .



1 – при наблюдении излучения в полосе 325 нм; 2 – при наблюдении излучения в полосе 365 нм

На данном спектре наблюдаются максимумы при 240 нм и 260 нм. В зависимости от области наблюдения излучения на спектрах возбуждения имеется «плечо» либо на коротковолновом, либо на длинноволновом крыле оптической полосы. Таким образом, наличие двух полос возбуждения фотолюминесценции позволяет утверждать, что в  $K_2SO_4$  образуются два типа примесных центра люминесценции, различающихся ближайшим окружением.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. Т. А. Кукетаев,  
 канд. физ.-мат. наук Б. С. Тагаева.

## ТРАНСПОРТНОЕ ВРЕМЯ РАССЕЯНИЯ И КВАНТОВОЕ ВРЕМЯ ЖИЗНИ ЭЛЕКТРОНОВ В АНИЗОТРОПНОЙ ДВУМЕРНОЙ СИСТЕМЕ

М. И. Тырышкин

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Системы с двумерным электронным газом (ДЭГ) в настоящее время являются объектом всестороннего изучения. Это связано как со значимостью фундаментальных физических явлений, наблюдаемых в этих системах, так и с возможностью практического применения этих систем в микроэлектронике, основными тенденциями которой является все большая миниатюризация и быстродействие приборов. ДЭГ в селективно – легированных гетероструктурах на основе соединений  $A^3B^5$  изучается уже на протяжении многих лет. Эти исследования остаются актуальными и значимыми до сих пор. Связано это с тем, что в таких системах достигнута наибольшая низкотемпературная подвижность ДЭГ. Однако даже такая система далека от идеальной, а ее транспортные свойства при низких температурах в значительной степени определяются процессами рассеяния носителей заряда. В силу того, что гетерограницы между квантовой ямой и боковыми барьерами селективно – легированных гетероструктур являются шероховатыми, такие двумерные системы являются анизотропными.

Качество селективно-легированных гетероструктур, как правило, оценивается по величине подвижности, которая определяется транспортным временем релаксации  $\tau_{tr} = (m^*/e)\mu$ . Другим не менее важным параметром, характеризующим процессы рассеяния носителей заряда в неупорядоченных электронных системах, является квантовое время жизни  $\tau_q$ , которое определяет полуширину уровней Ландау. Времена  $\tau_{tr}$  и  $\tau_q$  равны лишь в случае рассеяния на короткодействующем потенциале. В общем же случае они не являются эквивалентными и определяются соотношениями

$$1/\tau_q = \int P(\theta)d\theta, \quad 1/\tau_{tr} = \int P(\theta)(1 - \cos(\theta))d\theta,$$

где  $P(\theta)$  – величина, пропорциональная вероятности рассеяния на угол  $\theta$ . Таким образом,  $\tau_q$  определяется процессами рассеяния на все углы, а  $\tau_{tr}$ , за счет множителя  $1 - \cos(\theta)$ , — преимущественно процессами рассеяния на большие углы.

Данная работа посвящена изучению транспортного времени релаксации и квантового времени жизни электронов в таких анизотропных двумерных системах.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А. А. Быков.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛЕКСОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВКЛАДА ВО ВСТРЕЧНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТОВЫХ ВОЛН В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca,Ga}$ СРЕЗА (111)

А. Е. Урбан, А. О. Злобин, В. С. Горбачев, А. А. Шмидт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

Вклад обратного флексоэлектрического эффекта во встречное взаимодействие световых волн на фоторефрактивных голограммах был обнаружен ранее [1] в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Fe,Cu}$  среза (100).

В настоящем сообщении представлены результаты экспериментального исследования встречного взаимодействия лазерных пучков с длиной волны 633 нм на отражательных фоторефрактивных голограммах, формируемых в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca,Ga}$  среза (111). Полученные результаты позволили оценить для рассматриваемого среза кристалла значение эффективного флексоэлектрического коэффициента, определяющего связь наведенных упругих деформаций с градиентом напряженности электрического поля голограммы.

В экспериментах исследовалось встречное взаимодействие волн с циркулярной поляризацией противоположного знака по методике, описанной в работе [1]. Отражательные голограммы формировались в образце  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca,Ga}$  среза (111), имеющем удельное вращение 7.1 град/мм на используемой длине волны и толщину 8.74 мм. Мощность фазово-модулированного сигнального пучка с левой круговой поляризацией на входной грани кристалла составляла 15 мкВт, при мощности право-поляризованной стационарной волны накачки, равной 1.75 мВт. Фазовая модуляция сигнального пучка осуществлялась на частоте 1.17 кГц. После взаимодействия в кристалле для сигнального пучка, модулированного уже по интенсивности, измерялись зависимости глубины такой модуляции на нулевой, первой и второй гармониках модулирующего сигнала от его амплитуды.

Подгонка под экспериментальные данные теоретических зависимостей для глубины модуляции интенсивности на нулевой, первой и второй гармониках от амплитуды фазовой модуляции позволила оценить значение эффективного флексоэлектрического коэффициента кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca,Ga}$  среза (111) как  $f_{\text{eff}}=2,6$  нКл/м.

---

1. С. М. Шандаров и др., Письма в ЖЭТФ, 95, 699-702 (2012).

Научный руководитель – канд. техн. наук Н. И. Буримов.

**ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА InAs/ОКСИД,  
ПРИГОТОВЛЕННОЙ В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ**

А. Ю. Широков

Новосибирский государственный университет  
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

Приготовление границы раздела диэлектрик /  $A^3B^5$  с низкой плотностью поверхностных состояний является актуальной задачей в полупроводниковом приборостроении. В частности, структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) на основе InAs используются для создания фотоприемников инфракрасного диапазона. К диэлектрику в таких устройствах предъявляются следующие требования: высокое напряжение пробоя, химическая стойкость, низкая плотность поверхностных состояний (ППС) и встроенного заряда. Граница раздела  $SiO_2/InAs$  характеризуется высокой плотностью поверхностных состояний ( $10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1} - 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ ). В связи с этим актуальной задачей является пассивация данной границы раздела. Одним из методов пассивации является создание промежуточного собственного оксидного слоя методом анодного окисления в низкотемпературной (<10 эВ) плазме газового разряда в смеси газов, состоящей из аргона (Ar), кислорода ( $O_2$ ) и тетрафторида углерода ( $CF_4$ ).

Целью данной работы является изучение влияния концентрации  $CF_4$  в газовой смеси (Ar,  $O_2$ ,  $CF_4$ ) на скорость роста оксидной пленки и электрофизические параметры МДП-структур Au/анодный слой (AC)/ $SiO_2$  (220°C)/InAs(111)A. Толщина и оптические свойства пленок контролировалась методами сканирующей эллипсометрии. Электрофизические параметры МДП-структур изучались методами C-V, ВАХ и проводимости на переменном сигнале.

В работе исследовано влияние  $CF_4$  (3%, 6% и 9%) в газовой смеси на плотность поверхностных состояний на границе раздела оксид/InAs, встроенного в диэлектрик заряда, а также на скорость роста анодного оксида. Показано, что ППС уменьшается до величины менее  $10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$  в диапазоне 3-12%  $CF_4$  от объемного содержания. Изучено влияние различных методов обработки исходной поверхности на электрофизические свойства структур Au/  $SiO_2$  /анодный слой /InAs(111)A МДП-структур.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук О. Е. Терещенко, канд. хим. наук Н. А. Валишева.

## ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ПРИМНИКИ НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ РТУТИ

А. В. Яцкий

Томский государственный университет

Терагерцовый диапазон всё ещё недостаточно «освоен» твердотельными приборами, которые могли бы детектировать излучение селективным образом. Такие приборы могли бы иметь широкое применение для формирования ТГц-изображения в медицине, в качестве химических и биологических сенсоров, в широкополосной связи, радиоастрономии, для диагностики атмосферы со спутников, в компьютерной технике, тестировании интегральных схем и др.

Цель данной работы – определение оптимальных, с точки зрения приборного применения, параметров HgCdTe для создания болометра на горячих электронах с максимальной обнаружительной способностью и определение параметров антенн в системе антенна-болометр.

В работе на основе выражений для отклика фотодетектора [1] рассчитывается зависимость чувствительности от частоты излучения для различных типов проводимости. Показано, что КРТ позволяет создавать детекторы для прямого детектирования ТГц сигнала, что значительно упрощает работу с ним. Наиболее пригодным является материал р-типа.

С помощью системы моделирования CST Microwave Studio [2] проведено сравнение трёх типов антенн на полусферической линзе из кремния с подложкой: бабочкообразной, логопериодической и логоспиральной. Показано, что логоспиральная антенна превосходит другие по эффективности излучения и направленности. Кроме того, модификация антенны и размеров подложки линзы позволяют использовать эту систему в желаемой области терагерц.

---

1. F. F. Sizov et al. Millimeter-wave narrow-gap uncooled hot-carrier detectors for active imaging // *Optical Engineering*. – 2013. – Т. 52. – №. 3. – С. 303-314.

2. Y. Huo, G. W. Taylor, R. Bansal. Planar log-periodic antennas on extended hemishperical silicon lenses for millimeter/submillimeter wave detection applications // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. – 2002. – Т. 23. – №. 6. – С. 819-839.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А. П. Коханенко.

# ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

УДК 539.1.074.6

## ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРИОГЕННЫХ ФЭУ ДЛЯ ДВУХФАЗНЫХ КРИОГЕННЫХ ЛАВИННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

К. В. Затримайлов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
Новосибирский государственный университет

В ИЯФ СО РАН создаётся двухфазный криогенный лавинный детектор для изучения слабо взаимодействующих частиц: предполагаемых частиц тёмной материи (Weakly interacting massive particles, WIMP) и когерентного рассеяния нейтрино на ядрах.

Детектор представляет собой криогенную камеру размером 160 л, заполненную аргоном в двух фазах: жидкой и газовой. Электроны первичной ионизации, производимые ядрами отдачи от частиц темной материи или нейтрино, дрейфуют в жидкости к ее поверхности под действием электрического поля. В газовой фазе их сигнал усиливается в два этапа: во-первых, с помощью пропорциональных (вторичных) сцинтилляций в спектральной области вакуумного ультрафиолета (ВУФ); во-вторых, с помощью лавинных сцинтилляций в инфракрасной (ИК) области спектра. Сцинтилляции в ВУФ-диапазоне регистрируются с помощью фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), размещённых на дне и стенках камеры.

Основным преимуществом данной модели должна стать сверхвысокая чувствительность, позволяющая детектировать сигналы от одиночных электронов. Подобная технология также может быть использована в позитрон-эмиссионной томографии для ранней диагностики рака.

Данная работа посвящена исследованию характеристик ФЭУ, применяющихся для регистрации сигнала. Был составлен “паспорт” каждого ФЭУ, включающий значения фоновой скорости счёта и коэффициента усиления сигнала при различных значениях напряжения.

Измерения проводились путём погружения ФЭУ в сосуд с аргоном и последующего охлаждения (все характеристики измерены отдельно при комнатной температуре и при температуре кипения аргона). Для обработки данных использовался программный пакет ROOT.

В работе показано, что зависимости характеристик от напряжения имеют достаточно общий характер для всех изученных ФЭУ и могут быть аппроксимированы кривыми, что, в свою очередь, позволяет оценивать их значения в ходе эксперимента. Кроме того, в некоторых из рассмотренных ФЭУ наблюдался электрический пробой при криогенных температурах.

Научный руководитель – доктор физ.-мат. наук А. Ф. Бузулуцков.

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ ДО 2 ГэВ С ДЕТЕКТОРОМ КМД-3

О. А. Коваленко

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера  
Новосибирский государственный университет

Процесс  $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  является одним из основных адронных каналов  $e^+e^-$  аннигиляции в области энергии до 2 ГэВ. Сечение этого процесса дает заметный вклад в адронную поляризацию вакуума, величину которой необходимо знать для прецизионного определения аномального магнитного момента мюона и позволяет провести проверку Стандартной модели. Большой интерес для теоретических моделей рождения легких адронов представляет изучение динамики трехпионного конечного состояния.

Экспериментальные данные были получены на детекторе КМД-3, расположенном на коллайдере ВЭПП-2000. В работе анализировались данные 2011-2013 годов, с интегральной светимостью 49 1/пбн.

В области  $\phi$ -мезонного резонанса для дальнейшего анализа отбирались события с двумя неколлинеарными треками, импульсы которых попадали в кинематически разрешенную область на диаграмме P1-P2. Для подавления фона от процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$  накладывались условия на энергию, выделенную в калориметре. Для проверки отборов сечение в области резонанса аппроксимировалось функцией Брейта-Вигнера с учетом интерференции между  $\phi$  и  $\omega$ -мезонами. Полученные значения ширины и массы резонанса, а также сечения в пике согласуются с предыдущими измерениями. При энергии эксперимента вне области  $\phi$ -мезона предыдущие ограничения не позволяют отделить фон от событий эффекта, поэтому отбор также включал в себя кинематическую реконструкцию  $\pi^0$  по двум фотонам, которые наилучшим образом подходили по закону сохранения энергии и импульса. Эффективность регистрации была рассчитана из моделирования. Поправки к эффективности посчитаны на основе эксперимента. Радиационные поправки также были учтены при определении сечения.

В данной работе были получены предварительные результаты по сечению  $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  в диапазоне энергий до 2 ГэВ в с. ц. М. Результаты согласуются с предыдущими измерениями на детекторах BaBar и SND и расходятся с результатами, полученными на детекторе DM-2.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Б. А. Шварц.



## ИЗУЧЕНИЕ АННИГИЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ ПАРЫ В ПАРУ КАОН-АНТИКАОН В ОБЛАСТИ $\Phi(1020)$ РЕЗОНАНСА

Е. А. Козырев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
Новосибирский Государственный Университет

Изучение свойств аннигиляции электрон-позитронной пары в адроны является основной задачей экспериментов, проводящихся на коллайдере ВЭПП-2000 в Институте Ядерной Физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Начиная с 1962 г., история изучения распада  $\Phi(1020)$  мезона в пару каон-антикаон насчитывает десятки экспериментов, однако анализ рождения каонных пар при электрон-позитронной аннигиляции остается актуальным. Искомые сечения нужны для расчета вклада адронной поляризации вакуума в бегущую электромагнитную постоянную и аномальный магнитный момент мюона. Сравнение этого момента со значением, измеренным непосредственно, важно для проверки Стандартной Модели. А также отношение констант связи  $\Phi$ -мезона с парой каон-антикаон в заряженном и нейтральном каналах нуждается в уточнении в связи с разногласием как экспериментальных данных [1], так и их отличием от теоретического предсказания [2].

В данной работе представлены предварительные результаты изучения процесса рождения каонных пар в области энергий 1.01 — 1.06 ГэВ в с.ц. М. на основе интегральной светимости  $5.7 \text{ пб}^{-1}$ . Используемые данные получены детектором КМД-3 сканированием области  $\Phi$ -резонанса с шагом 0.5 МэВ. Угловое и импульсное разрешение, а также разрешение по ионизационным потерям в дрейфовой камере позволили эффективно регистрировать и идентифицировать искомые события. Энергия пучков измерялась с точностью 30 кэВ методом обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов электронами.

Эффективная система запуска триггера и разработанная в рамках данной работы процедура определения вероятности регистрации каонов позволили сделать прецизионное измерение сечений  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  и  $e^+e^- \rightarrow K_S^0 K_L^0$  в области  $\Phi$ -мезона и подсчитать вклад пары каон-антикаон в аномальный магнитный момент мюона.

---

1. J. P. Lees, et al., Phys.Rev. D 88, 032013 (2013).

2. A. Bramon, et al., Phys.Lett. B 486, 406 (2000).

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук Е. П. Солодов.

## **МОНТЕ-КАРЛО ГЕНЕРАТОР МНОЖЕСТВЕННОГО РОЖДЕНИЯ АДРОНОВ ДЛЯ ВЭПП-2000**

А. А. Коробов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СОРАН ведутся эксперименты на установке со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2000. Использование методики «круглых» пучков позволило увеличить светимость коллайдера в 10—100 раз по сравнению с предыдущей установкой ВЭПП-2М и, кроме того, расширить диапазон энергий до 2 ГэВ в системе центра масс.

Универсальный детектор КМД-3, используемый в эксперименте, обладает как высокой эффективностью регистрации многочастичных событий, так и высоким энергетическим и угловым разрешением для фотонов и заряженных частиц.

Одной из приоритетных задач КМД-3 является измерение полного и эксклюзивных сечений электрон-позитронной аннигиляции в адроны. Целью данной работы является создание Монте-Карло генератора множественного рождения адронов при суммарной энергии в системе центра масс до 2 ГэВ и его использование в системе моделирования детектора КМД-3. Данный генератор можно использовать для выделения фона для всех изучаемых процессов.

Результатом работы генератора являются события одного из процессов, возможных при данной энергии. Каждое событие содержит информацию о том, какой процесс произошел и 4-импульсы каждой конечной частицы.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. С. И. Эйдельман.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ГАЗОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ**

Т. В. Мальцев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Детекторы элементарных частиц на основе газовых электронных умножителей применяются во многих экспериментах в области физики высоких энергий.

Газовый электронный умножитель (ГЭУ) принадлежит к типу микроструктурных газовых детекторов, работающих в лавинном режиме. В работе ГЭУ главным является принцип газового усиления в микроотверстиях с характерными размерами порядка 50 мкм. Данный принцип позволяет создавать эффективно работающие каскады ГЭУ, в частности, наиболее распространёнными оказались трёхкаскадные структуры.

Многообразие физических явлений, лежащих в основе работы и обнаруженных в процессе исследований детекторов на основе каскадных ГЭУ, обеспечивает важность дальнейшего изучения характеристик данных детекторов.

Настоящая работа представляет собой комплексное исследование детектора на основе трёхкаскадных ГЭУ. Исследование включает в себя экспериментальную часть, расчёт некоторых физических процессов в детекторе, а также моделирование структуры детектора с использованием специальных программ. В эксперименте регистрируются сигналы от радиоактивных изотопов и записываются соответствующие амплитудные спектры. В рамках расчёта проведена оценка угла многократного рассеяния после прохождения электрона с энергией 1 ГэВ через вещество детектора. Также рассчитано распределение дельта-электронов по энергии в дрейфовом газовом промежутке детектора с объёмной долей аргона 75% и диоксида углерода – 25%. По результатам проведённого с помощью пакета FLUKA моделирования было построено распределение энергии в дрейфовом промежутке и на считывающей структуре детектора, вычислены значения пространственного разрешения при различных факторах.

В работе проанализирована согласованность экспериментальных данных, расчёта и моделирования детектора. Обсуждаются методы оптимизации моделирования для более точного исследования.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Л. И. Шехтман.

## **ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕКТОРА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДЕНСИТОМЕТРИИ**

В. П. Олейников

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Остеопороз – это болезнь, которая характеризуется низкой массой костей и структурным ухудшением костной ткани. По данным ВОЗ около 35% травмированных женщин и 20% мужчин имеют переломы, связанные с остеопорозом. Для своевременной диагностики остеопороза используются денситометры. Цель данной работы – создание рентгеновского денситометра на основе микропиксельных лавинных фотодиодов.

Для описания принципов работы денситометра было рассмотрено несколько аналитических моделей: облучение на двух и трех различных энергиях. Рассмотрены случаи описания модели двумя и тремя компонентами.

В качестве детектора был выбран сцинтилляционный детектор на основе микропиксельного лавинного фотодиода (МПЛФ).

Для нахождения оптимального материала сцинтиллятора была собрана установка, включающая ФЭУ и светодиод, запускаемый от генератора. Изучая одноэлектронные импульсы ФЭУ и сигнал при наличии кристаллов с изотопом, были измерены характеристики кристаллов LGSO, LYSO, LFS-3, YAP.

Используя Монте-Карло моделирование в GEANT4, были найдены коэффициенты светосбора кристаллов и восстановлен абсолютный световыход материалов. Наибольший световыход оказался у LYSO.

Для проверки точности моделирования GEANT4, было проведено сравнение расчетных отношений светосбора при различном положении кристаллов и, полученных в эксперименте.

Далее была собрана установка для изучения характеристик МПЛФ различного типа (MAPD, MPPC, MIFI).

В результате работы были найдены оптимальные характеристики сцинтиллятора и параметры, оказывающие основное влияние на энергетическое разрешение детектора. Начаты эксперименты для определения состава образцов с данным типом детектора.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук В. В. Поросев.

**ВКЛАДЫ ВОЗБУЖДЕННЫХ ЯДЕР  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{B}$  И  ${}^{10}\text{B}$   
В ОБРАЗОВАНИЕ  $\alpha$ -ЧАСТИЦ В  ${}^{16}\text{O}$ p-СОУДАРЕНИЯХ  
ПРИ 3.25 А ГЭВ/с**

А. К. Олимов

Физико-технический институт, г. Ташкент

Исследование образования возбужденных легких ядер в адрон-ядерных соударениях при высоких энергиях позволяет получить информацию о многонуклонных системах, участвующих в процессах фрагментации, а также о кластерной структуре, как фрагментирующего ядра, так и промежуточных нестабильных ядер.

Сечения выхода возбужденных ядер  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{B}$  и  ${}^{10}\text{B}$  в  ${}^{16}\text{O}$ p-соударениях при 3.25 А ГЭВ/с определялись соответственно на основе анализа спектров энергии возбуждений многонуклонных систем  $\alpha+d$ ,  $\alpha+t$ ,  $\alpha+\alpha+p$  и  ${}^6\text{Li}+\alpha$ . Фоновые распределения по энергиям возбуждений рассматриваемых систем получены перемешиванием рассматриваемых частиц из разных событий с учетом их топологий по числу  $\alpha$ -частиц. Нормировка фоно-вых и экспериментальных спектров проводилась с учетом энергий возбуждений рассматриваемых ядер.

Сечения выхода возбужденных ядер  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^7\text{Li}$  оказались равными  $7.4\pm 0.6$  мбн и  $4.0\pm 0.5$  мбн, а ядер  ${}^9\text{B}$  и  ${}^{10}\text{B}$  –  $6.0\pm 0.5$  мбн и  $1.7\pm 0.3$  мбн. Таким образом, инклюзивное сечение образования  $\alpha$ -частиц по приведенным выше схемам распада составляет  $25.1\pm 1.0$  мбн.

Научный руководитель – д-р физ.-мат наук С. Л. Лутпуллаев

## ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА ДЛЯ ДЕТЕКТОРА SUPER C $\tau$ ФАБРИКИ

А. В. Рабусов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Для измерения энергий фотонов, электронов и позитронов используют электромагнитные калориметры. Расчёт параметров детектора возможен с использованием методов моделирования. Целью данной работы являлся расчёт оптимальных размеров электромагнитного калориметра, изучение влияния ускорительного фона на разрешение калориметра и методов борьбы с ним. Численный расчёт проводился методом Монте-Карло с помощью библиотеки GEANT4.

Было показано, что основной вклад в энергетическое разрешение практически для всех энергий и длин моделируемой системы дают флуктуации утечек вперёд, при низких энергиях (100--200 МэВ) вклад флуктуаций утечек вбок сопоставим со вкладом утечек вперёд, для всех рассмотренных случаев утечками назад можно пренебречь. Также ясно, что дальнейшее увеличение длины кристаллов нецелесообразно из-за увеличивающихся флуктуациях утечек вбок. Разумной длиной кристалла является 30--35 см.

При увеличении токов электронов и позитронов в ускорителе, возрастает фон от потерь частиц пучка, который приводит к ухудшению разрешения электромагнитного калориметра. Для исследования влияния фона ускорителя сначала был сделан расчёт в простой модели: фоновые фотоны поглощаются полностью, имеют экспоненциальное распределение и среднее значение энергии 1 МэВ, при этом на одно сигнальное событие приходится по фотону на каждый кристалл. Результат моделирования показал, что для  $\gamma$ -квантов с энергией 50 МэВ максимально достижимое разрешение составит  $\sigma = 4$  МэВ, то есть 8%. Чтобы подавить ускорительный фон было предложено разделить калориметр на две части: небольшую по размерам переднюю часть на быстрых сцинтилляторах (в моделировании -- чистый CsI). При этом было сделано моделирование прохождения фоновых фотонов через вещество калориметра. Было показано, что небольшая вставка из чистого CsI порядка 3--5 см не даёт существенного улучшения, однако уже с 8 см передней частью разрешение детектора увеличивалось до  $\sigma \approx 2$  МэВ.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Б. А. Шварц.

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma, \pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma$ НА КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-2000 С ДЕТЕКТОРОМ КМД-3

Г. П. Разуваев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
Новосибирский государственный университет

В Институте Ядерной физики введён в эксплуатацию новый  $e^+e^-$  коллайдер ВЭПП-2000 с проектной светимостью  $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  и максимальной энергией пучков в системе центра масс до 2 ГэВ. Для измерения сечений и изучения динамики процессов электрон-позитронной аннигиляции, идущих в этой области энергий, создан универсальный криогенный магнитный детектор КМД-3. За время работы с 2010 года набрана интегральная светимость  $\sim 60 \text{ пб}^{-1}$  в диапазоне энергий 0.32 – 2.0 ГэВ.

В настоящей работе проводится анализ реакций  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  с тремя фотонами в конечном состоянии. Данные процессы являются мощным средством изучения внутренней структуры адронов, а их сечение и динамика важны для проверки и определения параметров таких теоретических моделей как, например, модель векторной доминантности и модель Намбу-Йона-Лосинию. Основные данные по этим процессам имеются в области  $\omega$  и  $\phi$  резонансов. В других энергетических областях набрана и обработана весьма малая статистика. Так, например, существует всего одно измерение сечения  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  в области 1.4 – 2.0 ГэВ сделанное группой СНД.

На данный момент разработан алгоритм выделения событий интересующих процессов. Отбор основан на трёхчастичности и нейтральности конечных состояний. Также проводится кинематическая реконструкция. Число событий определяется по распределению инвариантных масс пар фотонов. Основным фоновым процессом является трёхфотонная аннигиляция.

Получены предварительные результаты по сечениям данных процессов в области  $\phi$ -мезона. Сейчас проводится дальнейший анализ процессов по набранной статистике во всём доступном диапазоне энергий.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Б. А. Шварц.

## **РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНЫХ ИОНОВ ВО ВРЕМЯПРОЛЕТНОМ ДЕТЕКТОРЕ НА ВЫХОДЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА**

П. А. Савровский

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Ускорительная масс-спектрометрия (УМС) — это современный метод сверхчувствительного измерения концентрации редких изотопов, например,  $^{14}\text{C}$  для проведения датировки археологических и геологических объектов. Первый и пока единственный в России УМС-комплекс был создан в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН в 2008 году.

В настоящее время на УМС ИЯФ проводятся измерения содержания изотопа  $^{14}\text{C}$  на уровне  $10^{-15}$  относительно основного изотопа  $^{12}\text{C}$ , что достаточно для проведения радиоуглеродного анализа. При этом фон от различных изобар ( $^{13}\text{CH}$ ,  $^{12}\text{CH}_2$  и др.) подавляется средствами УМС.

Однако, при измерениях с другими изотопами, например, с изотопом  $^{10}\text{Be}$ , используемым для геологических исследований, возможно недостаточное подавление соответствующих изобар методами, используемыми на УМС ИЯФ. В таком случае, окончательное разделение изобар должно производиться при помощи детектора ионов.

Целью настоящей работы является исследование возможности разделения изобарных ионов по разнице энергетических потерь в тонких пленках во времяпролетном детекторе на выходе УМС ИЯФ.

Были проведены моделирования прохождения различных ионов через тонкие пленки из Майлара с помощью программ GEANT4 и SRIM. Были проведены эксперименты по измерению энергетических потерь и эффективности регистрации за счет рассеяния для различных ионов в тонких пленках из Майлара. Была произведена теоретическая оценка эффективности регистрации ионов, обусловленная рассеянием в пленке. Продемонстрирована возможность разделения изобарных ионов по энергетическим потерям.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. А. Растигеев.



## РОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ ПАРЫ ПРИ РЕКОМБИНАЦИИ ЭЛЕКТРОНА С ТЯЖЕЛЫМ ЯДРОМ

И. В. Фартушев

Томский государственный педагогический университет

Образование  $e+e-$  пар и тормозное излучение является основными процессами квантовой электродинамики, сопровождающие столкновение частиц (см. например [1]). Впервые оценка сечения образования  $e+e-$  пары при столкновении электрона ( $e^-$ ) с ядром дана в работе [2,3].

В данной работе рассмотрен новый механизм образования  $e+e-$  пар при столкновении электрона с атомным ядром. По сравнению с [2,3] новым является то, что в конечном состоянии электрон оказывается в связанном состоянии с ядром.

В рамках квантовой электродинамики найдено дифференциальное сечение данного процесса. Исследована зависимость сечения от углов вылета образованных  $e-$  и  $e+$ .

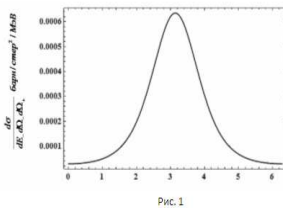


Рис. 1

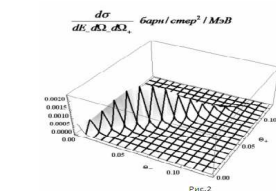


Рис. 2

На рис. 1 показана зависимость дифференциального сечения от угла  $\Phi$  между  $e-$  и  $e+$  в плоскости  $XOY$ , энергия налетающего  $e-$   $E_i = 100 \text{ МэВ}$ , углы вылета относительно оси  $OZ$  равны  $\Theta_{\pm} = 10^{-2}$ , при захвате электрона на К оболочку ядра вольфрама  $Z=74$ . Как видно из рисунка дифференциальное сечение имеет максимум при  $\Phi \approx \pi$ .

На рис. 2 показана зависимость сечения от углов  $\Theta_{\pm}$  вылета образованных  $e-$  и  $e+$  при  $\Phi = \pi$ . Остальные параметры, как на рис. 1.

Из рисунка видно, что дифференциальное сечение симметрично относительно линии

$$\Theta_+ = \Theta_- .$$

---

1. В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. Квантовая Электродинамика — М.: Наука, 1989. 768 с.

2. L. D. Landau, E. M. Lifshitz // Phys. Ztschr. Sov. -1934 -V.6.- P.244.

3. G. Racah // Nuovo Cim.- 1937.- V. 16.-P. 93.

Научный руководитель – д-р. физ.-мат. наук Ю. П. Кунашенко.

## РЕЖИМ МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ В ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА НАСЫЩАЕМОГО ПОГЛОЩЕНИЯ $\text{Bi}_2\text{Te}_3$

И. В. Анкудинов

Новосибирский государственный университет

Получение режима модуляции добротности и синхронизации мод в волоконных лазерах, представляет высокий интерес, как для фундаментальной науки, так и для прикладных исследований. Одним из наиболее практичных и надежных способов запуска этих режимов является использование особых внутриврезонаторных устройств — насыщающихся поглотителей (НП) — специальных материалов просветляющихся под действием света высокой интенсивности, а также механизмов, обеспечивающих модуляцию потерь в резонаторе.

В волоконных лазерах наиболее широко используемыми устройствами являются полупроводниковые НП (SESAM) [1] недостатками которых являются высокая стоимость и склонность к повреждению высокоинтенсивными импульсами, образующимися в процессе формирования режима синхронизации мод и модуляции добротности. В последнее несколько лет большое внимание исследователей привлекает новый материал — графен [2]. В перспективе, он может заменить полупроводниковые НП, так как обладает сильным нелинейным поглощением и высоким порогом разрушения, благодаря своим структурным особенностям.

Схожими квантовыми свойствами также обладает другой материал, топологический изолятор (ТИ) — теллурид висмута  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , его свойства были продемонстрированы в работе [3]. Опираясь на результаты данных авторов было предложено использовать  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  в качестве НП в волоконном лазере иной конструкции.

В ходе данной работы был собран эрбиевый лазер с насыщающимся поглотителем на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . В этой схеме был получен режим модуляции добротности с шириной импульсов 1.25 нс и частотой повторения 6.25 мкс. Было показано, что теллурид висмута может успешно использоваться как нелинейный оптический материал.

---

1. U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kärtner et al. // IEEE J.Sel.Top. Quant.Electron.-1996.-Vol.2.-P.435–453.

2. Xiao Huang, Z. Yin, S. Wu et al. // Small.-2011.-Vol.7.-P.1876-1902.

3. C. Zhao, H. Zhang, X Qi et al. // Appl. Phys. Lett.2012.-Vol.-101.-P.211106.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Ю. С. Федотов.

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР С ВНЕШНИМ РЕЗОНАТОРОМ  
И АКТИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД  
С ВЫСОКОСТАБИЛЬНОЙ МЕЖМОДОВОЙ ЧАСТОТОЙ**

А. В. Астраханцева  
Институт лазерной физики СО РАН  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время существует проблема разработки стандартов частоты. Разрабатываются новые поколения стандартов частоты, которые обладают улучшенными характеристиками. В ИЛФ СО РАН есть разработки на титан-сапфировом и итербиевом лазерах, но они имеют некоторые недостатки в свете современных тенденций (миниатюризация элементной базы). Поэтому, также ведется разработка синтезатора частоты на полупроводниковом лазере, имеющем сравнительно широкую линию усиления, возможность работы в режиме синхронизации мод, и соответственно, возможность получения сверхкоротких импульсов. Такой синтезатор частоты, в сравнении с вышеперечисленными, обладает лучшими характеристиками: меньшими размерами и массой, более простой настройкой и будет необслуживаемым.

Работы по полупроводниковым лазерам активно проводились до 80-х годов XX века, но измерения стабильности межмодовой частоты никто не проводил. И целью данной работы было исследование частотных характеристик лазера с активной синхронизацией мод для получения широкого оптического спектра и создание малогабаритного полупроводникового лазера с внешним резонатором с межмодовой частотой 900 МГц.

В ходе работы был создан экспериментальный стенд и исследованы радиочастотные и оптические спектры выходного излучения полупроводникового лазера, работающего в режиме синхронизации мод, при различных параметрах работы полупроводникового лазера, а также различных мощностях и частотах накачки и при различных отстройках СВЧ генератора накачки от межмодовой частоты внешнего резонатора.

---

1. В. Ф. Захарьяш и др. Квантовая электроника, 35 № 9 (2005).

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук В. М. Клементьев.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА ГИБРИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ Au С ОБОЛОЧКОЙ SiO<sub>2</sub>, ПРОПИТАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕИНОМ**

Ф. А. Бенимецкий

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

В последнее время наноплазмоника получило бурное развитие. Одним из наиболее перспективных направлений исследований являются наноразмерные оптические источники, позволяющие преодолеть дифракционный предел. Теоретически был предсказан и реализован практически спазер (акроним от Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation) – генератор когерентных локальных полей оптической частоты с помощью поверхностных плазмонов.

Спазер состоит из наночастицы, поддерживающей плазмонные колебания и служащей в качестве резонатора, а также нанооболочки с инфильтрованными в нее молекулами красителя, играющими роль активной среды (это могут быть также квантовые точки). Активный переход в молекуле красителя или квантовой точке совпадает с поверхностным плазмонным резонансом металлической наночастицы, так что активная среда служит донором энергии для плазмонных колебаний. Спазер генерирует, в основном, тёмные оптические моды, приводящие к значительным напряжениям электромагнитных полей в ближней зоне. Оптические моды, которые обуславливают распространение света в дальнюю зону, составляют незначительную долю.

Данная работа посвящена определению оптического коэффициента усиления коллоидного раствора спазеров — гибридных наночастиц с ядром из Au и пористой оболочки из SiO<sub>2</sub>, пропитанной флуоресцеином.

Методом переменной длины полосы оптической накачки измерены коэффициенты оптического усиления коллоидов для активной среды флуоресцеина и квантовых точек CdSe.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А. И. Плеханов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУЦИРОВАННОГО СТОЛКНОВЕНИЯМИ УСИЛЕНИЯ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПЕРЕХОДАХ В ОСНОВНОЕ СОСТОЯНИЕ АТОМОВ НАТРИЯ

А. А. Булгаков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН

В последние годы лазеры на парах щелочных металлов с диодной накачкой привлекают к себе повышенный интерес, поскольку такой подход открывает совершенно новый класс лазеров, сочетающих в себе достоинства газовых лазеров и твердотельных, основанных на диодной накачке. Достоинствами диодно накачиваемых щелочных лазеров являются значительный потенциал для масштабирования до крайне высоких уровней мощностей генерации с высоким качеством лазерного пучка, простота управления параметрами газовой активной среды, не имеющей ограничений, присущих твердотельным или химическим средам. При прямой оптической накачке атомов щелочных металлов в паровой фазе наблюдается высокая эффективность преобразования излучения накачки в генерацию из-за низкого квантового дефекта щелочной системы, что также минимизирует тепловую нагрузку. Интенсивная накачка решеткой диодов обеспечивает инверсию населенностей с большим коэффициентом оптического усиления. Теоретический КПД такого лазера относительно энергии излучения диодов превышает 95%.

Частые столкновения атома щелочного металла с атомами буферного газа позволяют получать инверсию населенности и генерацию на резонансном переходе из  $np_{1/2}$  в основное состояние  $ns_{1/2}$ , при оптической накачке на  $D_2$  линии.

Данная работа посвящена получению и исследованию коротковолнового излучения паров натрия на переходе  $4p-3s$ , при двухступенчатом механизме накачки  $3s-3p$ ,  $3p-5s$ . С целью создания инверсии населенностей на энергетических промежутках  $4p-5s$ , больших энергии теплового движения, используется энергия вращательных переходов молекул буферного газа. В работе проводились исследования по определению подходящего буферного газа для эффективного взаимодействия с атомами натрия.

Научный руководитель – А. Э. Симанчук.

## ИЗУЧЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ОТКЛИКА ПЕРИЛЦИАНИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ НА БУТИЛАМИН

В. С. Бурау

Институт автоматики и электрометрии, СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Одной из задач аналитической химии является создание химических датчиков. Он состоит из химически селективного слоя, реагирующего на детектируемое вещество и физического преобразователя. Один из методов детектирования, основан на измерении изменений в фотолюминесценции исследуемого вещества при воздействии на него исследуемым аналитом. Актуальной проблемой является обнаружение бутиламина, являющегося промежуточным продуктом в реакциях со взрывчатыми веществами. Перилцианиновые красители селективно взаимодействуют с бутиламином, образуя пиридоцианины, спектры флуоресценции которых отличается от исходных.

В данной работе исследовались перилцианиновые красители РС-2, РС-3, РС-4. в виде растворов в метиловом спирте и в виде пленок толщиной несколько микрометров, нанесенных на различные подложки методом центрифугирования.

Измерения оптической плотности образцов проводились на спектрофотометре Shimadzu. При использовании флуориметра Agilent Technologies были получены спектры возбуждения и флуоресценции образцов. Измерения проводились в диапазоне 300 — 800 нм. С помощью спектрофотометра Ramanog HG.2S исследовалось комбинационное рассеяния образцов.

С целью усиления отклика на бутиламин растворы красителей смешивались с раствором серебряных частиц, и наблюдался эффект «metal enhanced fluorescence». У пленок красителей, нанесенных на подложку из пористого  $Al_2O_3$  наблюдалось увеличение интенсивности флуоресценции по сравнению с пленками, нанесенными на стеклянные подложки. Исследовано влияние материала подложки на интенсивность комбинационного рассеяния пленки красителя. Показано, что после реакции с бутиламином спектр флуоресценции перилцианиновых красителей сдвигается в коротковолновую область.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. С. Кучьянов.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ЗАХВАТА АТОМОВ РУБИДИЯ В ОПТИЧЕСКУЮ ДИПОЛЬНУЮ ЛОВУШКУ**

Н. В. Васяткин

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный технический университет

Лазерное охлаждение и захват атомов открыли новые возможности для выполнения квантовых вычислений, прецизионных спектроскопических измерений и создания оптических стандартов частоты. Для захвата нейтральных атомов широко используются оптические дипольные ловушки, в которых атом удерживается нерезонансным лазерным излучением в области максимума интенсивности сфокусированного лазерного пучка.

Атомы в оптических дипольных ловушках перспективны для реализации ёквантовых компьютеров. Применение полупроводниковых лазеров для создания оптических дипольных ловушек имеет целый ряд преимуществ по сравнению с традиционно используемыми мощными твердотельными лазерами благодаря компактности полупроводниковых лазеров, низкой потребляемой мощности и малой стоимости.

При этом выбором длины волны излучения можно добиться сравнимой глубины оптического потенциала. Например, при захвате атомов рубидия Nd:YAG лазер (длина волны 1064 нм) мощностью 1 Вт создаёт глубину потенциала, которую, согласно нашим расчётам, можно обеспечить с использованием излучателя на основе лазерного диода Sanyo DL-8142 (длина волны 830 нм) при токе накачки в 200 мА и мощности 150 мВт.

Нами разработан излучатель полупроводникового лазера, включающий модуль для установки лазерного диода и коллимации выходного лазерного пучка, систему стабилизации температуры лазерного диода на основе элемента Пельтье и систему защиты лазерного диода от бросков напряжения. Были измерены зависимости мощности и длины волны лазерного излучения от тока накачки и температуры.

В дальнейшем планируется использовать данный излучатель для захвата холодных атомов рубидия в оптическую дипольную ловушку. Для регистрации дипольной ловушки предполагается использовать метод наблюдения резонансной флуоресценции.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук И. И. Бетеров.

## ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ОТ ОДНОЧАСТОТНОГО ВОЛОКОННОГО ИТТЕРБИЕВОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО ЙОДА

В. И. Вишняков

Институт лазерной физики СО РАН

Новосибирский государственный технический университет

Наличие узких и высокоинтенсивных резонансов в молекуле йода в диапазоне 515 нм представляет научный интерес с точки зрения использования в стандартах частоты в качестве частотного репера (опорной частоты). Т. К. для генерации фундаментальной гармоники используется перестраиваемый волоконный лазер, то изменяя температуру резонатора данного лазера можно добиться перестройки по длине волны в пределах 1 нм. Данная работа посвящена исследованию генерации второй оптической гармоники во внешнем удвоителе. Конечной целью данной работы является проведение экспериментов по изучению спектров поглощения в йодной ячейке с возможностью перестройки частоты лазерного излучения для дальнейшего использования в стандарте частоты.

Для осуществления оговоренной выше цели было необходимо разработать удвоитель частоты оптического диапазона. В данном генераторе второй гармоники использовалось внутррезонаторное удвоение оптической частоты в кольцевом резонаторе, сформированном из 4 зеркал. В качестве нелинейного элемента удвоителя использовался кристалл LBO ( $\text{B}_3\text{LiO}_5$ ). Этот кристалл был выбран по нескольким причинам: окно прозрачности для оптического диапазона составляет 160 нм – 2.6 мкм) [1]; позволяет при комнатной температуре использовать удвоение оптической частоты типа II в диапазоне 0.8-1.1 мкм. [1].

В работе приводятся результаты разработки генератора второй гармоники. В том числе расчет, проектирование и изображение схемы генератора второй гармоники в САПР. Далее была осуществлена сборка, настройка удвоителя и получение второй гармоники. Также в работе показана система активной стабилизации частоты излучения лазера по частоте резонанса интерферометра Фабри-Перо. Затем с помощью схожей системы подстройки частоты была стабилизирована частота удвоителя лазерного излучения.

---

1. Веб-сайт компании Red Optronics (<http://www.redoptronics.com/LBO-crystal.html>).

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук М. Н. Скворцов.



**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ  
ПЛАЗМОНОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА  
ПО МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОВЕРХНОСТЯМ  
РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ**

В. О. Горовой

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Поверхностный плазмон поляритон (ППП) – это комбинация неоднородной ТМ-волны и волны индуцированных свободных зарядов, распространяющихся вдоль проводящей поверхности. Эванесцентное поле PPP локализовано вблизи поверхности проводника и чувствительностью к диэлектрическим свойствам поверхностного слоя, что используется в спектроскопии. В терагерцовой (ТГц) области частот PPP изучены слабо из-за отсутствия до недавнего времени подходящих источников и детекторов ТГц излучения. Для экспериментальных исследований требуется разработка новых методов захвата, управления и диагностики плазмонов. Изучение PPP важно, как для понимания теории поверхностных плазмонов, так и для применения их в исследованиях металлических поверхностей, спектроскопии биологических объектов, в терагерцовых системах передачи и обработки информации.

В работе опробован дифракционный метод генерации PPP сфокусированным пучком на торце образца. Источником излучения являлся ТГц Новосибирский лазер на свободных электронах. Лазер генерирует мощное монохроматическое излучение, перестраиваемое в диапазоне длин волн 120-240 мкм (первая очередь). Элементом захвата являлся четверть–цилиндр, по поверхности которого распространялся сформированный плазмон. К выходному краю цилиндра приставлялись образцы из стекла плоской и цилиндрической формы, поверхность которых была покрыта микронным слоем золота и слоем диэлектрика ZnS толщиной от 0 до 3 мкм. Излучение регистрировалось с помощью оптико-акустической ячейки Голея совместно с синхронным детектором.

Измерены длины продольного затухания PPP на плоских образцах. Впервые в терагерцовом диапазоне экспериментально исследовано распространение плазмонов на изогнутых поверхностях из Au и Au с ZnS, и измерены их радиационные потери. Проведены эксперименты по распространению PPP через стадию объемной волны.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Б. А. Князев.

## **ФОТОДЕСОРБЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ГАЗОВ С ПОЛИМЕРНОЙ ОРГАНИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ**

Н. А. Данилина, К. Д. Потешкина

Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
Новосибирский государственный технический университет

Фотодесорбция представляет собой явление, при котором атомы или молекулы отделяются, т. е. десорбируются, с поверхности твердого тела под действием видимого или ультрафиолетового света. Фотодесорбции уделялось большое внимание в последние годы в связи с ее применением в виде источника атомов, контролируемого светом. Также она успешно использовалась для загрузки магнито-оптических ловушек, для производства конденсата Бозе-Эйнштейна (БЭК) и для генерации контролируемых плотностей паров Rb в полых оптических волокнах. Кроме того, ее использование рассматривалось для атомных магнитометров, гироскопов и часов.

В данной работе представлены результаты исследования фотодесорбции различных молекулярных газов с поверхности полимерной органической пленки. Это исследование проводилось в ячейке из пирекса, внутренняя поверхность которой была покрыта полидиметилсилоксаном (ПДМС). Ячейка освещалась лампой-вспышкой или галогенной лампой. Молекулярный состав газа анализировался с помощью масс-спектрометра. В эксперименте наблюдалось изменение плотности молекулярного газа в ячейке из-за фотодесорбции в зависимости от длительности освещения, интенсивности, длины волны света и температуры покрытия. Было обнаружено, что скорость десорбции сильно зависит от длины волны света, с порогом в области 500 нм. Кроме того, установлена линейная зависимость скорости десорбции от интенсивности падающего света. Результаты экспериментов продемонстрировали, что, при непрерывном освещении ячейки галогенной лампой, молекулярный выход фотодесорбции показывает быстрое уменьшение числа десорбированных частиц в единицу времени, за которым следует длинный диффузионный хвост. Эти результаты свидетельствуют о том, что этот эффект не вызван непосредственно нагревом поверхности и имеет нетепловую природу. Кроме того, показано, что диффузия в объеме органической пленки играет важную роль в процессе фотодесорбции молекулярных газов.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. Н. Атутов.

**ПРИМЕНЕНИЕ АППРОКСИМАЦИИ ПАДЕ  
ДЛЯ УЧЕТА ВНУТРИМОЛЕКУЛЯРНЫХ ЭФФЕКТОВ  
В СПЕКТРЕ  $\nu_2$  ПОЛОСЫ  $\text{H}_2\text{O}$**

О. В. Егоров

Томский государственный университет

Современные методики исследования спектров газов и газовых смесей позволяют регистрировать профили отдельных спектральных линий, для описания параметров которых требуются математические модели, учитывающие особенности в молекулярных движениях в более высоких порядках теории возмущений. Известно, что нежесткость межъядерных связей приводит к возникновению добавок в значениях интенсивностей колебательно-вращательных (КВ) линий трехатомных асимметричных молекул. Ранее авторами работы [1] предложен, широко используемый в настоящее время, подход к одновременному учету центробежных, резонансных и  $\Delta_k$ -эффектов в значениях интенсивностей КВ-линий водяного пара ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Согласно этому подходу величина внутримолекулярных эффектов описывается восемью операторами, входящими в разложение преобразованного дипольного момента молекул с типом симметрии  $C_{2v}$ .

В данной работе предлагается математическая модель в форме аппроксимации Паде, которая показала существенные преимущества (величина стандартного отклонения уменьшена с  $8,94 \pm 0,42$  (%) до  $2,65 \pm 0,12$  (%)) в сравнении с традиционным методом в форме ряда Тейлора [1] при описании внутримолекулярных эффектов в экспериментальных интенсивностях  $\nu_2$  полосы  $\text{H}_2\text{O}$  для переходов с  $\Delta K = \pm 1$  [2]. При выводе конечного выражения учитывались матричные элементы первых семи операторов, входящих в разложение преобразованного дипольного момента полос типа  $B$   $\text{H}_2\text{O}$ . Полученная модель, также как исходное выражение [1], включает в себя семь неизвестных параметров, определяемых в процессе обработке экспериментальных данных.

---

1. C. Camy-Peyret, J.-M. Flaud // J. Mol. Spectrosc. – 1975. – Vol. 55. – P. 278-310.

2. R. A. Toth.  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  // J. Mol. Spectrosc. – 2011. – Vol. 265. – P. 59-68.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. О. К. Войцеховская.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В ЛАЗЕРНОМ КРАСИТЕЛЕ R6G

А. Ю. Искандаров<sup>1</sup>, В. А. Харенков<sup>1</sup>, И. А. Едреев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН

Концентрация наночастиц и лазерно-активных молекул играют важную роль в формировании вынужденного излучения. Для получения максимально усиливающей активной среды необходимо знать оптимальную концентрацию, как наночастиц, так и лазерно-активных молекул в исследуемом растворе. Очевидно что, при малых концентрациях усиление вынужденного излучения может быть не значительным, а при концентрации превышающей оптимальное значение, вклад в суперлюминесценцию могут вносить некоторые негативные факторы, такие как рассеяние и поглощение излучения накачки. Для определения оптимальных концентраций были проведены эксперименты при различных концентрациях наночастиц серебра различной морфологии для кюветы толщиной 1 мм. По спектрам свечения растворов определялась интенсивность излучения, в результате была построена зависимость интенсивности вынужденного излучения от концентрации молекул (при фиксированной энергии накачки 42,7 мДж, диаметр пучка 3 мм), и выявлена оптимальная концентрация активных молекул. Наибольшая интенсивность вынужденного излучения проявлялась при концентрации раствора R6G  $10^{-3}$  моль/л.

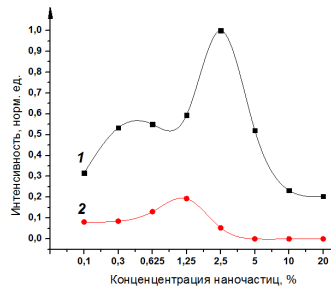


Рис. Нормированная на максимум зависимость интенсивности излучения суперлюминесценции от концентрации агломерированных наночастиц кривая (1) и одиночных наночастиц кривая (2)

Далее были получены зависимости интенсивности свечения красителя R6G с концентрацией  $10^{-3}$  моль/л от концентрации (объемной доли) наночастиц. Для растворов с одиночными наночастицами оптимальная концентрация наночастиц составляет 1,25 %, для агломерированных – 2,5 %. Также полученная зависимость демонстрирует, что использование агломерированных частиц приводит к увеличению интенсивности суперлюминесценции.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. А. Землянов.

## **ВЫСТАВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛИ В БАЛЛИСТИЧЕСКОМ ЛАЗЕРНОМ ГРАВИМЕТРЕ**

Т. Н. Иргалин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время для измерения абсолютного значения ускорения свободного падения  $g$  наиболее точным и перспективным является баллистический метод. Он основан на принципе свободного падения пробного тела в вакууме с интерферометрическим определением параметров его движения. Одной из важных составляющих при подготовке абсолютного лазерного баллистического гравиметра к измерению является выставление лазерного луча вдоль местной вертикали, при этом погрешность выставления не должна превышать  $4 \times 10^{-5}$  Rad. На сегодняшний день одним из самых распространенных способов выставления лазерного луча является метод, основанный на использовании отражения луча от поверхности жидкости. Из недостатков данного способа следует отметить высокую чувствительность к вибросейсмическим помехам, вызывающим колебания её поверхности. Кроме того, контроль вертикальности луча возможен только при статическом положении свободно падающего тела гравиметра.

Разработанный способ выставления лазерного луча в баллистическом гравиметре основан на регистрации высокоскоростной видеокамерой траектории смещения измерительного луча, отраженного от уголкового отражателя в процессе свободного падения пробного тела. Для этого на пути луча устанавливается стеклянная пластинка, блик от которой направляется через объектив на ПЗС матрицу видеокамеры, подключенной к управляющему компьютеру. Определение величины и направления угла отклонения измерительного луча от вертикали проводится с помощью кадровой обработки полученной видеозаписи. При несовпадении направления луча с вертикалью блик движется равноускоренно. Величина ускорения зависит от угла отклонения. Специальная программа по видеозаписи вычисляет величину и направление отклонения от вертикали. Этот способ удобен еще и тем, что позволяет проверять вертикальность луча непосредственно во время проведения измерений, не прерывая работу гравиметра. Экспериментальная проверка способа показала, что погрешность выставления вертикали не превышает  $3 \times 10^{-5}$  Rad, при этом ее вклад в общую ошибку определения  $g$  не превышает  $5 \times 10^{-9}$  м/с<sup>2</sup>.

Научный руководитель - канд. техн. наук Ю. Ф. Стусь.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И МОЩНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНОГО Yb:KYW ЛАЗЕРА

А. А. Кирпичникова  
Институт лазерной физики СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Оптические синтезаторы частот на основе фемтосекундных лазеров применяются в оптических часах и в прецизионных лазерных системах для измерения абсолютных оптических частот и их стабильности. Калиевые вольфраматы, активированные иттербием, являются перспективными активными средами из-за широкой полосы люминесценции, совпадающих с диапазоном генерации мощных полупроводниковых диодных лазеров полос поглощения, и высокой теплопроводности. В работе исследуются различные схемы малогабаритных резонаторов Yb:KYW лазера с мощной многомодовой диодной накачкой.

При использовании типовых резонаторов из-за несимметричного охлаждения в кристалле возникает сильная астигматическая линза, влияние которой существенно уменьшает КПД и не позволяет получить устойчивый режим синхронизации мод. Для ее устранения предложена схема с симметричным охлаждением активной среды, когда тепловая линза может быть скомпенсирована изменением расстояния между сферическим зеркалом и кристаллом. Регистрировалась мощность генерации в зависимости от мощности накачки для свободного режима генерации. Насыщения не наблюдалось, по крайней мере, до мощности накачки 14 Вт. Дифференциальный КПД составил 35%.

Неоптимальную фокусировку излучения лазера накачки можно минимизировать, если установить между линзой и кристаллом зеркало с пропусканием излучения накачки для Р-поляризации и отражением для S-поляризации. Дифференциальный КПД составил 40%, что является рекордным достижением при использовании многомодового источника накачки. Получен режим синхронизации мод.

Была исследована зависимость мощности генерации от мощности накачки при различных поляризациях накачки. Для эффективной Р-поляризации излучения накачки порог генерации уменьшился, а дифференциальный КПД возрос до 46.4%. Предельного КПД можно достичь при использовании для такой схемы одномодовой диодной накачки, когда будет реализовано полное перекрытие перетяжек накачки и генерации.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук В. С. Пивцов,  
С. А. Кузнецов.

**РАЗРАБОТКА БЛОКА УШИРЕНИЯ СПЕКТРА  
ДЛЯ КАНАЛА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ  
МУЛЬТИТЕРАВАТТНОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ  
СИСТЕМЫ С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ**

Г. В. Купцов, В. А. Петров  
Институт лазерной физики СО РАН  
Новосибирский государственный технический университет

Несмотря на широкое использование фемтосекундных лазерных систем высокой интенсивности, внимание, в последнее время, было обращено на разработку таких систем с частотой повторения килогерцового диапазона.

В настоящее время, в ИЛФ СО РАН разрабатывается мультитераваттная фемтосекундная лазерная система с высокой частотой повторения. Основным принципом создания этой системы является гибридный (параметрический + лазерный) метод усиления импульсов, создаваемых задающим фемтосекундным лазером, в двух оптически синхронизованных параллельных каналах [1]. Один из каналов – канал накачки параметрического усилителя. Второй – канал параметрического усиления. Его назначение – усиливать сверхширокополосный оптический сигнал до нескольких миллиджоулей.

На первом этапе создания этого канала был создан волоконный блок уширения спектра, основанный на высоконелинейном фотонно-кристаллическом волокне SC-5.0-1040 (NKT Photonics), которое накачивалось чирпованными импульсами со следующими параметрами: энергия – 1,5 мкДж, частота повторения – 1 кГц, центральная длина волны – 1030 нм, спектральная ширина – 2 нм, длительность – 50 пс. Был получен суперконтинуум негауссова спектрального профиля, простирающийся от 650 до 1500 нм. Проанализированы основные механизмы уширения, показано, что наибольший вклад вносит фазово-согласованное четырехволновое смешение [2].

Несмотря на негауссов профиль, полученный суперконтинуум может быть использован для канала параметрического усилителя в качестве входного сигнала.

---

1. В. В. Петров, Е. В. Пестряков, В. И. Трунов, А. В. Кирпичников, М. А. Мерзляков, А. В. Лаптев, Т.25, №3, С. 285-291, 2012.

2. W. Wadsworth, N. Joly, J. Knight, T. Birks, F. Biancalana, and P. Russell, Opt. Express 12, PP. 299-309, 2004.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук В. В. Петров.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА  
В СЛОЯХ ПОЛИМЕРОВ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ  
РЕВЕРСИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Н. Г. Миронников, К. А. Анисимов  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Одной из проблем в создании мощных твердотельных лазеров является компенсация aberrаций вызванной тепловой линзой кристалла, оптическая сила которой зависит от мощности лазерного излучения. Разработка компенсационных элементов является актуальной научной задачей.

В работе изучается реверсивный компенсационный оптический элемент – термооптический корректор, в котором возникает тепловая линза обратная тепловой линзе кристалла. Изучены два способа построения термооптического корректора, рабочая среда которого является полимером. Первый вариант в виде отдельной тонкой пластины из однородного материала ПММА с добавлением модифицирующих добавок. Второй вариант представляет собой эластичную силиконовую среду, заключенную между двух непоглощающих пластин. Достоинством таких корректоров по сравнению с адаптивными компенсационными элементами является относительная простота и низкая стоимость изготовления.

Сформулирована задача расчета распределения температуры и оптической разности хода в таких элементах. Численное моделирование подтверждает способность полимерных корректоров скомпенсировать тепловую линзу лазерного кристалла. Для определения достоверных физических характеристик конструкционных материалов корректоров созданы установки для измерения коэффициента температурного изменения удельной разности хода в материале. Изготовлены прототипы корректоров и исследованы их характеристики.

Научный руководитель – канд. техн. наук В. П. Корольков.



## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЛАМП ДЛЯ ЦЕЛЕЙ АТОМНО-АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

О. В. Светличная

Институт автоматики и электрометрии СО РАН

Метод атомно-абсорбционной спектроскопии широко используется при анализе различных веществ, для определения концентрации, содержащихся в них элементов. Основными функциональными частями спектрографа для атомно-абсорбционной спектроскопии являются монохроматический источник света, атомизатор, поглощающая ячейка и фотоприемник. В качестве источника света используются наборы ламп или лазеры, частоту излучения которых настраивают на линию поглощения данного элемента. Использование лазеров наталкивается на ряд трудностей: как правило, они имеют высокую стоимость; сложны в эксплуатации и, зачастую, многие лазеры требуют квалифицированного персонала для обслуживания и т. Д. В этой связи для использования в качестве источников более перспективны резонансные лампы, в силу их невысокой стоимости и простоты эксплуатации. Ламповые источники так же пригодны для измерения поглощения элементов в высоко возбужденных состояниях, для которых зачастую отсутствуют подходящие лазерные источники света. Поэтому развитие таких источников света имеет большое значение.

Целью данной работы была разработка и изучение Na и Rb резонансных ламп на основе тлеющего разряда. В работе измерялись интенсивности свечения резонансных линий Na и Rb, излучаемых лампами в зависимости от их концентрации. Концентрации атомов Na и Rb в лампах варьировались путем изменения тока нагрева источников паров этих элементов. С помощью спектрометра OceanOptics были измерены и построены зависимости интенсивности резонансных линий обеих ламп от тока нагрева источников паров. Анализ полученной зависимости позволяет определить диапазон значений тока нагрева, при котором резонансные линии этих элементов ещё не уширены, а интенсивность излучения ламп достаточна для использования в качестве монохроматических источников света атомно-абсорбционных спектрометров.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. Н. Атутов.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОКИСНЫХ ПЛЁНОК Ta, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО АНОДИРОВАНИЯ

В. В. Скубо

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

В настоящее время плёнки оксида тантала  $Ta_2O_5$ , в силу их хороших оптических и электрофизических параметров, перспективны для применения во многих областях. Оксид тантала может быть легко получен методом анодного окисления тантала. Оптические свойства пористого оксида тантала зависят от размера пор, расстояния между ними и упорядочения, причем все эти параметры можно варьировать, подбирая условия анодирования. В данной работе была получена плёнка оксида тантала и исследованы её оптические свойства.

В качестве экспериментального образца использовалась стеклянная подложка с плёнкой Ta, полученной методом магнетронного распыления толщиной 0,3 мкм.

Анодирование тантала проводилось в водном электролите, содержащем 1% — ый раствор лимонной кислоты  $C_6H_8O_7$  при постоянном токе 3 мА и при изменении напряжения от 60 В до 140 В. Время анодирования составило около 8 минут.

С помощью метода эллипсометрии были получены зависимости показателя преломления и коэффициента отражения от длины волны излучения пленки Ta до и после анодирования. Результаты исследований показали, что показатель преломления и поглощения (при  $\lambda=632$  нм) уменьшились из-за наличия воздушных пор в структуре пленки. Коэффициент отражения уменьшился на 53,5%.

На рис.1 показано изображения поверхности анодированной плёнки  $Ta_2O_5$  с электронного микроскопа Hitachi TM-1000. Из рис. 1 видно микроструктура пленки – аморфная с размерами пор от 1 мкм до 5 мкм.

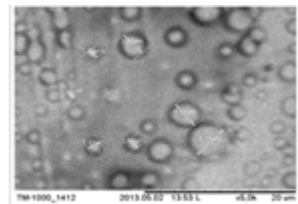


Рис. 1 – Структура плёнки

Как показали эксперименты, оптические параметры пленки, полученной методом электролитического анодирования, зависят от микроструктуры при различных технологических режимах анодирования.

Научный руководитель – канд. тех. наук И. А. Чистоедова.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ ИМПУЛЬСОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОДАВЛЕНИЯ ПОЛЕВОГО СДВИГА РЕЗОНАНСОВ РАМСИ**

Е. И. Сундеева

Институт лазерной физики СО РАН  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время оптические стандарты частоты на одиночных ионах в радиочастотной ловушке и стандарты на ансамбле нейтральных атомов в оптической решетке перспективны, поскольку позволяют практически полностью исключить влияние эффекта Доплера и эффекта отдачи.

Необходимым условием достижения предельно узкой ширины реперного резонанса является малая величина естественной ширины спектральной линии перехода. Таким образом, для создания стандартов частоты на охлажденных и захваченных атомах и ионах чаще всего используются сильно запрещенные переходы. Чтобы возбудить сильно запрещенный переход, необходимо прикладывать сильное пробное поле. В результате этого возникает существенный полевой сдвиг.

При определенных соотношениях длительностей импульсов возбуждающего излучения зависимость сдвига частоты сигнала от сдвига частоты перехода становится близка к кубической, что обеспечивает подавление полевого сдвига. Флуктуации частоты Раби приводят к резкому снижению эффективности подавления полевого сдвига. Если второй импульс является композитным, влияние таких флуктуаций значительно меньше.

В работе рассматривается следующая схема: охлажденные двухуровневые атомы, локализованные в узлах оптической решетки, взаимодействуют с двумя импульсами разной длительности, второй из которых композитный. При анализе схемы учитываются спонтанная релаксация уровней и конечная ширина спектральной линии лазерного излучения.

В данной работе исследована зависимость эффективности подавления полевого сдвига от величины флуктуаций длительностей световых импульсов. Выполнена оценка минимальной точности, с которой необходимо контролировать длительность импульсов, чтобы достичь эффективного подавления полевого сдвига.

Научный руководитель – К. С. Табатчикова.

## ИЗЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО СЛЕДА ОПТИЧЕСКОГО ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РАЗРЯДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Я. С. Терентьева

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН  
Новосибирский государственный университет

Актуальной проблемой при моделировании сверхзвукового летательного аппарата является управление звуковым ударом. В работе [1] исследовано взаимодействие ударной волны (УВ) со слоем горячего воздуха. Полученные в [1] результаты указывают на уменьшение интенсивности УВ при таком взаимодействии.

В докладе для получения горячего воздуха – теплового следа — в сверхзвуковом потоке воздуха использовано излучение мощного импульсно-периодического лазера. Энергоподвод в поток производится через создание оптического пульсирующего разряда (ОПР) и диссипации энергии плазмы разряда в поток. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием лазера со средней мощностью 4,5 кВт, импульсной мощностью до 200 кВт и частотой следования импульсов до 150 кГц. Сверхзвуковой поток формировался на аэродинамической установке МАУ-М с использованием конического сопла с размером критического сечения 50 мм при числе Маха 1,3-1,5. В результате экспериментов зафиксировано излучение теплового следа. Измеренное значение среднemasсовой температуры в тепловом следе составляет величину  $\sim 150^{\circ}\text{C}$ . Такая температура воздуха не может быть причиной свечения.

Целью работы является исследование пространственно-временных и спектральных характеристик излучения теплового следа.

В работе получены следующие результаты:

- Оптическим методом зарегистрированы устойчивые дискретные объекты – каверны низкой плотности, двигающиеся вместе с потоком.
- Измерены скорости теплового следа
- С помощью созданной системы регистрации слабого сигнала теплового излучения следа на фоне мощного излучения плазмоида получен спектр излучения теплового следа

---

1. В. Н. Охитин, С. С. Меньшаков. “О защитных свойствах слоя горячего воздуха”, ПМТФ 2002, том.43, №4, стр.87-97

Научный руководитель – канд. техн. наук А. Н. Малов.

## ВЫСОКЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ СЕЛЕКТИВНЫЙ ХЕМОСЕНСОР НА ОСНОВЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Л. А. Фарафонтова

Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
Новосибирский государственный технический университет

На сегодняшний день существует потребность в дешевых, портативных, быстрых и надежных датчиках газа в различных областях. Фотонные кристаллы (ФК), благодаря своим свойствам (высокая внутренняя поверхность, высокое качество пленок, высокая чувствительность и селективность к адсорбируемым газам, связанная со структурой поверхности), представляют большой интерес, как для различных приложений, так и с фундаментальной точки зрения. Целью наших исследований было исследование его свойств.

Многочисленные применения оптических сенсоров основаны на детектировании спектра света, отраженного либо прошедшего через сенсор. Как правило, в таких случаях сенсор, изготовленный в виде оптической пленки, работает как интерферометр Фабри-Перо: измеряется его отклик на изменения его показателя преломления либо толщины.

В большинстве случаев контроль за изменением этих оптических свойств происходит при условии, что свет падает из воздуха на пленку. При таком падении света маленький коэффициент отражения от поверхности пленки обуславливает малую резкость интерференционной картины и, вследствие этого, слабую чувствительность сенсора.

Нами предлагается следующий подход, увеличивающий коэффициент отражения от поверхностей интерферометра Фабри-Перо, представляющий собой пленку фотонного кристалла. Первое, свет направляется на границу раздела между стеклянной подложкой и ФК. В этом случае создаются лучи, распространяющиеся под углом полного внутреннего отражения. Второе, на стеклянную подложку наносится высокоотражающее покрытие. В нашем случае наполнение пор ФК газом полярных молекул приводит к сдвигу интерференционной картины, обусловленной в основном увеличением расстояния между монодисперсными сферическими частицами кремнезема, а не изменением показателя преломления. Была продемонстрирована селективность сенсорных свойств к полярным газам типа аммиака и воды, связанная с поверхностными свойствами кремнезема. В нашем случае отпадает необходимость в использовании спектральных приборов, что существенно удешевляет сенсор.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. С. Кучьянов.

## **СИСТЕМА МОНИТОРИНГА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ФУТБОЛЬНОГО МАНЕЖА НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

В. В. Шишкин, А. Е. Чурин, И. С. Шелемба  
Инверсия-Сенсор, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Значительную часть новых объектов строительства составляют технически сложные, уникальные сооружения с высокой степенью ответственности. Конструктивная безопасность объекта, закладываемая на стадии проектирования, может существенно измениться в процессе эксплуатации. Чтобы предотвратить возникновение аварийных ситуаций необходимо своевременно проводить диагностику несущих конструкций.

В ходе данной работы была разработана и внедрена автоматизированная система мониторинга, позволяющая следить за техническим состоянием объекта в режиме реального времени при минимальном участии человека. Чувствительным элементом системы являются датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР).

Система мониторинга установлена на стадионе «Заря» в г. Новосибирске и объединяет в себе 119 волоконно-оптических датчика. 85 датчиков деформации и 32 датчика температуры установлены на наиболее нагруженных элементах металлоконструкции. Два датчика смещения с диапазоном измерения  $\pm 40$  мм установлены на фундаменте. Для опроса датчиков используется устройство на основе волоконного лазера, перестраиваемого в диапазоне 1500-1600 нм.

Показания датчиков снимаются раз в 6 часов. Для каждого датчика задано 2 критических уровня измеряемых значений (жёлтый и красный), при превышении которых система оповещения подаёт звуковой сигнал тревоги, выводит сообщение на сигнальный монитор в диспетчерской и отправляет смс- и e-mail-уведомления ответственным лицам. Программное обеспечение позволяет удалённо просматривать показания всех датчиков в виде графиков относительной деформации, температуры и перемещения.

Научный руководитель – И. С. Шелемба.

## РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СУБДОПЛЕРОВСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АТОМОВ Mg

С. С. Якушин

Институт лазерной физики СО РАН  
Новосибирский государственный университет

В последние несколько лет большие надежды на улучшение метрологических характеристик квантовых стандартов частоты связывают с оптической областью спектра. В этом направлении повышенный интерес уделяется созданию стандартов частоты на захваченных в оптическую решетку нейтральных атомах, например Mg[1]. Для загрузки атомов в оптическую решетку требуется глубокое предварительное охлаждение[2]. Его можно осуществить с использованием циклического дипольного перехода  $3^3P_2 \rightarrow 3^3D_3$  в полях с градиентом поляризации [3]. Для этого требуется создание компактных и надежных лазерных источников с шириной линии менее 1 МГц с возможностью перестройки на линию поглощения и стабилизации частоты, работающие на длине волны 383 нм.

В данной работе представлены результаты по удвоению частоты излучения полупроводникового лазера, работающего на длине волны 766 нм. Мощность лазера – 30 мВт. В качестве удвоителя частоты был выбран нелинейный кристалл  $BiV_3O_6$ . Для увеличения мощности излучения кристалл был помещен во внешний резонатор. 30-кратное увеличение мощности основной гармоники внутри резонатора позволило получить мощность второй гармоники равную 30 мкВт. При использовании лазерного источника излучения мощностью 1 Вт ожидаемая мощность излучения второй гармоники составит 0.1 Вт.

Далее излучение проходит через магниевую ячейку, представляющую из себя разрядную трубку с полым катодом. При перестройке длины волны излучения в ячейке наблюдалось поглощение с возбужденных уровней атомов на переходах  $^3P_2 \rightarrow ^3D_3$ (383.83 нм),  $^3P_1 \rightarrow ^3D_2$ (383.23 нм),  $^3P_0 \rightarrow ^3D_1$ (382.94 нм). Максимум пика поглощения на длине волны 382.94 нм составил 4%, полуширина пика – 1 ГГц. Данная магниевая ячейка будет использована для стабилизации частоты эталона.

- 
1. J. Friebe et al. New Journal of Physics, 13, 125010 (2011).
  2. H. Katori et al. PRL, 91, 173005 (2003).
  3. Д. В. Бражников и др. Вестник НГУ, Серия: Физика, 7, 6 (2012).

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. Н. Гончаров.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА .....	5
А. В. Алмаев .....	5
Д. В. Алябьев, В. Г. Стельмах .....	6
А. Е. Гайдук .....	7
М. С. Галков .....	8
М. Г. Горынина .....	9
А. Г. Гулямов .....	10
А. К. Дроздова, Е. В. Короткова .....	11
Г. Р. Золоторева .....	12
И. А. Зятиков, И. В. Романов .....	13
Д. М. Казанцев .....	14
А. Б. Каршиев .....	15
М. В. Князева .....	16
С. С. Кобылкин .....	17
Е. В. Ковалев .....	18
Д. А. Колотовкина .....	19
К. А. Конфедератова .....	20
Б. А. Костюк .....	21
А. А. Кошкарев .....	22
А. А. Краковская .....	23
Н. Н. Кречетова .....	24
Д. Л. Кузьмина .....	25
К. А. Лозовой, А. А. Пищагин .....	26
К. А. Лозовой, В. Г. Сатдаров, Е. А. Калин .....	27
Е. А. Лукина .....	28
С. Э. Лямкин, Н. И. Заруцкая, А. А. Романова .....	29
Ф. Ф. Меркушев, О. В. Семёнова, С. А. Подорожняк .....	30
Г. И. Мусина, Д. А. Темирбаева, А. У. Кабдиева .....	31
А. А. Пищагин, А. В. Барко .....	32
А. И. Рехтин .....	33
М. А. Роечко .....	34
А. А. Сапожник .....	35
В. Г. Сатдаров, Д. В. Ляпунов .....	36
И. С. Стрыгин .....	37
Т. У. Тошбоев, Н. Рахматов .....	38
Т. У. Тошбоев, Н. Рахматов .....	39
А. Р. Туктамышев .....	40
А. К. Тусупбекова, Б. А. Байжигитова, М. С. Идрисова .....	41
А. К. Тусупбекова, Б. А. Байжигитова, Д. А. Темирбаева, З. Р. Сыздыкова .....	42
М. И. Тырышкин .....	43



А. Е. Урбан, А. О. Злобин, В. С. Горбачев, А. А. Шмидт.....	44
А. Ю. Широков.....	45
А. В. Яцкий.....	46
ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ.....	47
К. В. Затримайлов.....	47
О. А. Коваленко.....	48
Е. А. Козырев.....	49
А. А. Коробов.....	50
Т. В. Мальцев.....	51
В. П. Олейников.....	52
А. К. Олимов.....	53
А. В. Рабусов.....	54
Г. П. Разуваев.....	55
П. А. Савровский.....	56
И. В. Фартушев.....	57
КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА.....	58
И. В. Анкудинов.....	58
А. В. Астраханцева.....	59
Ф. А. Бенимецкий.....	60
А. А. Булгаков.....	61
В. С. Бурау.....	62
Н. В. Васяткин.....	63
В. И. Вишняков.....	64
В. О. Горовой.....	65
Н. А. Данилина, К. Д. Потешкина.....	66
О. В. Егоров.....	67
А. Ю. Искандаров <sup>1</sup> , В. А. Харенков <sup>1</sup> , И. А. Едреев <sup>2</sup> .....	68
Т. Н. Иргалин.....	69
А. А. Кирпичникова.....	70
Г. В. Купцов, В. А. Петров.....	71
Н. Г. Миронников, К. А. Анисимов.....	72
О. В. Светличная.....	73
В. В. Скубо.....	74
Е. И. Сундеева.....	75
Я. С. Терентьева.....	76
Л. А. Фарафонтова.....	77
В. В. Шишкин, А. Е. Чурин, И. С. Шелемба.....	78
С. С. Якушин.....	79

Научное издание

**МАТЕРИАЛЫ  
52-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ  
СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**МНСК–2014**

**КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**

*Материалы конференции публикуются в авторской редакции*

Подписано в печать 01.04.2014 г.  
Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 5,1. Усл. печ. л. 4,8.  
Тираж 160 экз. Заказ №

Редакционно-издательский центр НГУ.  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.