



Федеральное агентство научных организаций
Институт прикладной физики РАН



Научно-производственное предприятие
ГИКОМ

X ВСЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО РАДИОФИЗИКЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

29 февраля – 3 марта 2016 года, Нижний Новгород

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Нижний Новгород
2016

Секции

- Источники и приемники излучения терагерцового диапазона
- Источники мощного микроволнового излучения
- Приемники микроволнового излучения, спектроскопия и метрология
- Миллиметровое и субмиллиметровое излучение в прикладных исследованиях

Программный комитет семинара

Г.Г. Денисов	чл.-корр. РАН, Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород (председатель)
О.С. Моченева	к.ф.-м.н., Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород (ученый секретарь)
А.А. Андронов	чл.-корр. РАН, Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород
А.В. Аржанников	профессор, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск
В.Ф. Вдовин	д.ф.-м.н., Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород
С.В. Голубев	профессор, Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород
Б.А. Князев	профессор, Институт ядерной физики СО РАН, г. Новосибирск
В.П. Кошелец	профессор, Институт радиотехники и электроники РАН, г. Москва
А.Г. Литвак	академик, Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород
В.В. Ростов	профессор, Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск
В.А. Черепенин	чл.-корр. РАН, Институт радиотехники и электроники РАН, г. Москва
А.П. Шкуринов	профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва
М.И. Яландин	чл.-корр. РАН, Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

Ответственный за выпуск – О.С. Моченева

Семинар организован при поддержке РФФИ (грант №16-02-20023 Г)

СОДЕРЖАНИЕ

Источники и приемники излучения терагерцового диапазона

<i>Бакунов М.И., Машкович Е.А., Горелов С.Д., Тапи М.</i> Неколлинеарное электрооптическое стробирование терагерцовых волн.....	15
<i>Гавриленко В.И.</i> Лазеры терагерцового диапазона на основе узкозонных полупроводников.....	16
<i>Кубарев В.В., Кулипанов Г.Н., Шевченко О.А., Гетманов Я.В., Чесноков Е.Н., Кошляков П.В., Пальчиков Е.И., Долгих А.В., Красников И.Ю.</i> Эксперименты с мощным перестраиваемым терагерцевым излучением новосибирского лазера на свободных электронах.....	17
<i>Шевченко О.А., Арбузов В.С., Винокуров Н.А., Воблый П.Д., Волков В.Н., Гетманов Я.В., Давидюк И.В., Дейчули О.И., Дементьев Е.Н., Довженко Б.А., Князев Б.А., Колобанов Е.И., Кондаков А.А., Козак В.Р., Козырев Е.В., Кубарев В.В., Кулипанов Г.Н., Купер Э.А., Купцов И.В., Куркин Г.Я., Крутихин С.А., Медведев Л.Э., Мотыгин С.В., Овчар В.К., Осипов В.Н., Петров В.М., Пилан А.М., Попик В.М., Репков В.В., Саликова Т.В., Седляров И.К., Середняков С.С., Скринский А.Н., Тарарышкин С.В., Трибендис А.Г., Ческидов В.Г., Чернов К.Н., Щеглов М.А.</i> Новосибирский лазер на свободных электронах: последние достижения и ближайшие перспективы.....	18
<i>Чопорова Ю.Ю., Володкин Б.О., Князев Б.А., Павельев В.С.</i> Терагерцовые пучки с орбитальным угловым моментом	19
<i>Андронов А.А., Додин Е.П., Зинченко Д.И., Ноздрин Ю.Н., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Беляков В.А., Ладенков И.В., Фефелов А.Г.</i> Стимулированные излучения при переходах между лестницами Ваннье – Штарка в полупроводниковых сверхрешетках	20
<i>Анцыгин В.Д., Мамрашев А.А., Николаев Н.А., Потатуркин О.И.</i> Особенности исследования нелинейно-оптических материалов в терагерцовом диапазоне	22
<i>Вакс В.Л.</i> Источники излучения терагерцового частотного диапазона для спектроскопии высокого разрешения	24
<i>Герасимов В.В., Князев Б.А., Никитин А.К., Лемзяков А.Г., Булгакова В.В.</i> Результаты исследований поверхностных плазмон-поляритонов на терагерцовом лазере на свободных электронах.....	25
<i>Дорофеев А.А., Гладышева Н.Б., Аверин С.В., Алкеев Н.В.</i> Резонансно-туннельный диод на основе гетеросистемы InGaAs/AlAs для субгармонического смесителя терагерцового диапазона	26

<i>Глявин М.Ю., Мануилов В.Н., Зотова И.В., Заславский В.Ю., Седов А.С., Запезалов В.Е., Куфтин А.Н., Корнишин С.Ю., Малкин А.М., Морозкин М.В., Розенталь Р.М., Фокин А.П., Гинзбург Н.С.</i> Разработка многолучевого терагерцового гиротрона с рекордной частотой генерации для спектроскопических исследований.....	27
<i>Клушин А.М., Галин М.А., Курин В.В., Вдовичева Н.К., Шерешевский И.А.</i> Автофазировка многоконтактных джозефсоновских систем	28
<i>Китай М.С., Назаров М.М., Недорезова П.М., Сапожников Д.А.</i> Связь изменений в спектрах «малопоглощающих» полимеров в терагерцовом диапазоне частот со структурными переходами в этих материалах при вариации температуры	29
<i>Рудаков К.И., Дмитриев П.Н., Барышев А.М., Худченко А.В., Кошелец В.П.</i> Сверхпроводниковые приемные структуры диапазона 700–950 ГГц для радиоастрономии	30
<i>Кузнецов К.А., Германский С.А., Китаева Г.Х., Ковалев С.П., Пенин А.Н.</i> Дисперсия диэлектрической проницаемости кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ в терагерцовом диапазоне	31
<i>Богомолов Г.Д., Громов В.Д., Завьялов В.В., Летунов А.А.</i> Сегментный формирователь терагерцовых пучков	32
<i>Морозов С.В., Румянцев В.В., Антонов А.В., Кудрявцев К.Е., Дубинов А.А., Кадыков А.М., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Гавриленко В.И.</i> Длинноволновая фотолюминесценция и стимулированное излучение в структурах на основе твердых растворов HgCdTe	34
<i>Оладышкин И.В.</i> Оптико-терагерцовая конверсия на поверхности металлов как метод диагностики	35
<i>Ревин Л., Чигинев А., Вopilкин Е., Мастеров Д., Парафин А., Павлов С., Тропанова А., Шулешова И., Панкратов А.</i> Развитие технологий изготовления образцов терагерцовых генераторов на основе высокотемпературных сверхпроводников	36
<i>Галиев Г.Б., Климов Е.А., Пушкарёв С.С., Китаева Г.Х., Кузнецов К.А., Корниенко В.В.</i> Генерация терагерцового излучения в эпитаксиальных плёнках LT-InGaAs , выращенных на подложках InP с ориентациями (100) и (411)	37
<i>Балаль Н., Бандуркин И.В., Братман В.Л., Савилов А.В.</i> Спонтанное когерентное терагерцовое излучение короткого электронного сгустка в ондуляторе в режиме отрицательной массы.....	38
<i>Селиверстов С., Русова А., Каурова Н., Гольцман Г.</i> Энергетическое разрешение терагерцового детектора на основе NbN -боллометра на горячих электронах	39

<i>Буравлев А.Д., Мустафин И.А., Трухин В.Н., Цырлин Г.Э., Kakko J.P., Huhtio T., Lipsanen H.</i> Эффективный излучатель терагерцового излучения на основе периодического массива полупроводниковых нитевидных нанокристаллов GaAs	41
<i>Черкасова О.П., Назаров М.М., Шкуринов А.П.</i> Особенности измерения и описания диэлектрической функции растворов белков и сахаров	42
<i>Вилков Е.А., Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Маликов И.В., Михайлов Г.М., Черных А.В., Чигарев С.Г.</i> Спин-инжекционный генератор терагерцового диапазона на базе ферромагнитной структуры типа «метапереход»	43
<i>Балакин А.В., Гордиенко В.М., Джиджоев М.С., Есаулкин М.Н., Жвания И.А., Иванов К.А., Кузечкин Н.А., Ожередов И.А., Савельев-Трофимов А.Б., Солянкин П.М., Шкуринов А.П.</i> Генерация терагерцового и рентгеновского излучений в газовых и газопо-нанокластерных средах при использовании мощных фемтосекундных лазерных импульсов	45
<i>Опарина Ю.С., Песков Н.Ю., Савилов А.В., Каминский А.К., Седых С.Н., Перельштейн Э.А., Балаль Н.</i> Двухволновый мазер на свободных электронах терагерцового частотного диапазона	47

Источники мощного микроволнового излучения

<i>Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Вилков М.Н., Зотова И.В., Сергеев А.С.</i> Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в электронных СВЧ-генераторах с просветляющимся поглотителем в цепи обратной связи	51
<i>Денисов Г.Г.</i> Гиросприборы: достижения и новые направления в разработке	52
<i>Яландин М.И., Гинзбург Н.С., Голованов А.А., Ельчанинов А.А., Зотова И.В., Романченко И.В., Ростов В.В., Ульмаскулов М.Р., Шарыпов К.А., Шунайлов С.А.</i> Генерация экстремальных СВЧ-полей при когерентном сложении излучения черенковских источников с релятивистскими сильноточными электронными пучками	53
<i>Тимофеев И.В., Аржанников А.В.</i> Система «релятивистский электронный пучок – плазма» как источник мощного субмиллиметрового и терагерцового излучения (теоретические и экспериментальные результаты)	54

<i>Бандуркин И.В., Калынов Ю.К., Ошарин И.В., Савилов А.В.</i> Гиротрон, основанный на возбуждении бегущей волны в резонаторе с фазовыми корректорами	55
<i>Богдашов А.А.</i> Оптимизация роом частиц: высокоэффективные преобразователи волн	56
<i>Гаштури А.П., Денисов Г.Г., Соболев Д.И.</i> Эффективный метод синтеза трехмерных электродинамических систем	57
<i>Гинзбург Н.С., Голованов А.А., Зотова И.В., Яландин М.И.</i> Инициация черенковского сверхизлучения спонтанным излучением фронта импульса тока.....	58
<i>Демихов Е.И., Демихов Т.Е., Костров Е.А., Лысенко В.В.</i> Высокопольные криомагнитные системы sruogen-free для гиротронов	58
<i>Гинзбург Н.С., Малкин А.М., Зотова И.В., Железнов И.В., Заславский В.Ю., Сергеев А.С., Шарыпов К.А., Шунайлов С.А., Ульмаскулов Р.М., Яландин М.И.</i> Генерация импульсов сверхизлучения при возбуждении электронным пучком поверхностных волн в сверхразмерных гофрированных волноводах	59
<i>Запезалов В.Е.</i> Неканонические гиротроны.....	60
<i>Запезалов В.Е.</i> Современные тенденции развития гиротронов	61
<i>Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Песков Н.Ю., Сергеев А.С.</i> Моделирование мощного субмиллиметрового МЦАР с модифицированным брэгговским резонатором	62
<i>Иванов А.А.</i> Разработка ЛБВ W-диапазона с выходной мощностью 10 Вт.....	63
<i>Бандуркин И.В., Гинзбург Н.С., Каминский А.К., Перельштейн Э.А., Песков Н.Ю., Савилов А.В., Седых С.Н., Тютюнников С.И.</i> МСЭ-усилители и генераторы нового поколения: первые результаты пучковых экспериментов.....	64
<i>Корниенко В.Н., Румянцев Д.Р., Черепенин В.А.</i> Структура электромагнитного поля, возбуждаемого трапециевидным током	65
<i>Абубакиров Э.Б., Кузиков С.В., Вихарев А.А.</i> Высокоселективные резонаторы гироприборов на релятивистских электронных пучках.....	67
<i>Бадарин А.А., Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.</i> Исследование эффекта увеличения частоты генерации релятивистского виркатора вследствие взаимодействия бурсиановской и диокотронной неустойчивостей	68

<i>Лукиша О.И., Трофимов П.А.</i> Многоступенчатая рекуперация в гиротроне, основанная на сепарации электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях	69
<i>Лещева К.А., Мануилов В.Н., Уткина И.Е.</i> 3D-моделирование возмущения скоростного распределения в магнетронно-инжекторных пушках гиротронов с нарушенной аксиальной симметрией	70
<i>Любченко В.Е., Радченко Д.Е., Телегин С.А., Юневич Е.О.</i> Микрорешетчатая антенна-генератор с выводом излучения в волновод, встроенный в диэлектрическую подложку	71
<i>Гольденберг А.Л., Глявин М.Ю., Лещева К.А., Мануилов В.Н.</i> Неадиабатическая электронно-оптическая система технологического гиротрона	73
<i>Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.</i> Субтерагерцовые оротроны с двухрядной периодической структурой	74
<i>Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В., Фокин А.П.</i> Влияние конкуренции мод на режим захвата частоты многомодового гиротрона внешним сигналом	75
<i>Ошарин И.В., Завольский Н.А., Калынов Ю.К., Савилов А.В.</i> Использование квазирегулярных резонаторов с короткими неоднородностями для повышения селективности гиротронов, работающих на второй циклотронной гармонике	76
<i>Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Калинин П.В., Кузнецов С.А., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Сеницкий С.Л., Степанов В.Д., Тумм М.</i> Синхронизация излучения параллельных ленточных электронных пучков в планарном МСЭ с двумерной распределенной обратной связью	77
<i>Планкин О.П., Семенов Е.С.</i> Развитие программного комплекса моделирования электронно-оптических систем ANGEL-2.5DS	78
<i>Глявин М.Ю., Мануилов В.Н., Проявин М.Д.</i> Магнитоэкранированная электронно-оптическая система непрерывного гиротрона с рабочей частотой 24 ГГц	80
<i>Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С.</i> Нестационарная теория гироклистронов с дифракционным вводом и выводом излучения	81
<i>Розенталь Р.М., Сергеев А.С.</i> Сверхширокополосная шумовая генерация в гиротронах с большой надкритичностью	82

<i>Бандуркин И.В., Каминский А.К., Корнишин С.Ю., Песков Н.И., Савилов А.В., Седых С.Н.</i> Винтовые токовые ондуляторы для МСЭ-усилителей и МСЭ-генераторов нового поколения	83
<i>Семенов Е.С., Морозкин М.В.</i> О рекуперации энергии электронов в многосекционном коллекторе гиротрона с касповой конфигурацией магнитного поля	84
<i>Нечаев В.Е., Планкин О.П., Семенов Е.С.</i> Анализ неадиабатических эффектов при формировании электронного пучка в высоковольтном гиротроне	85
<i>Аржанников А.В., Бурдаков А.В., Бурмасов В.С., Иванов И.А., Касатов А.А., Кузнецов С.А., Макаров М.А., Меклер К.И., Полосаткин С.В., Попов С.С., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Синецкий С.Л., Скляр В.Ф., Степанов В.Д., Тимофеев И.В.</i> Спектральные и угловые характеристики эмиссии излучения из плазменного столба при релаксации в нем сильнооточного микросекундного РЭП	86
<i>Денисов Г.Г., Кальнова Г.И., Луковников Д.А., Соболев Д.И., Чирков А.В.</i> Широкополосные волноводные уголки для моды HE_{11} круглого гофрированного волновода	87
<i>Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Тарадаев Е.П., Тумарева Т.А.</i> Перспективные полевые эмиттеры для высоковольтных электронных приборов	88
<i>Махалов П.Б., Федот ов А.Э.</i> Проект ЛБВ трехмиллиметрового диапазона с планарным электронным пучком, формируемым в пушке с умеренной компрессией	89
<i>Фокин А.П., Глявин М.Ю., Нусинович Г.С.</i> Устойчивость одномодовых колебаний в гиротронах на гармониках гирочастоты с симметричными рабочими модами	90
<i>Фролов Н.С., Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.</i> Моделирование гибридного аксиального генератора на виртуальном катоде с фольговым фотонным кристаллом для вывода мощности	91
<i>Цветков А.И., Гачев И.Г., Гаштури А.П., Гойхман М.Б., Гузнов Ю.М., Мишакин С.В., Морозкин М.В.</i> К теории квазиоптического ввода сигнала в электронные микроволновые усилители	92

Приемники микроволнового излучения, спектроскопия и метрология

<i>Щербатенко М., Лобанов Ю., Ковалюк В., Селиверстов С., Гольцман Г.</i> Когерентные и прямые детекторы терагерцового диапазона на основе болометров на горячих электронах	95
---	----

<i>Жукова Е.С., Прохоров А.С., Торгашев В.И., Томас В.Г., Kadlec С., Kadlec F., Savinov M., Ostapchuk T., Petzelt J., Prokleška J., Томас П.В., Пестряков Е.В., Фурсенко Д.А., Шакурров Г.С., Горелик В.С., Белянчиков М.А., Кадыров Л.С., Усков В.В., Kremer R., Dressel M., Горшунов Б.П.</i> Субмиллиметровая спектроскопия диполь-дипольных корреляционных эффектов в ансамбле нанолокализованных молекул H ₂ O	96
<i>Зинченко И.И.</i> Перспективные задачи и инструменты миллиметровой и субмиллиметровой астрономии	97
<i>Хохлов Д.Р., Долженко Д.Е., Галеева А.В., Рябова Л.И., Аронзон Б.А., Пудалов В.М., Перваков К.С., Ельцев Ю.Ф., Смирнов А.В.</i> Эффективность сверхпроводящего покрытия зеркала «Миллиметра»	98
<i>Бубнов Г.М., Артеменко Ю.Н., Вдовин В.Ф., Данилевский Д.Б., Зинченко И.И., Носов В.И., Никифоров П.Л., Шанин Г.И., Раупов Д.А.</i> Измерения астроклимата на плато Суффа в 2015 году и перспективы на 2016 год	99
<i>Леснов И.В., Абашин А.Е., Большаков О.С., Бубнов Г.М., Дрягин С.Ю., Елисеев А.И., Кортаев Д.В., Мансфельд М.А., Мухин А.С., Вдовин В.Ф.</i> Разработка и исследования характеристик криогенных малошумящих приемных устройств для радиоастрономии, аэрономии и телекоммуникаций	100
<i>Вдовичев С.Н., Вдовин В.Ф., Климов А.Ю., Мухин А.С., Удалов О.Г.</i> Керметы как искусственный многофункциональный материал для создания охлаждаемых микроболометров СВЧ-диапазона	102
<i>Голубятников Г.Ю., Белов С.П., Лапинов А.В., Кочанов В.П.</i> Особенности использования частотной модуляции при исследовании спектральных линий нелинейного поглощения	103
<i>Гордеева А.В., Зброжек В.О., Панкратов А.Л., Шампоров В.А., Гунбина А.А., Ревин Л.С., Кузьмин Л.С.</i> Исследование шумов болометров на холодных электронах	104
<i>Жукова Е.С., Прохоров А.С., Мотовилов К.А., Savinov M., Пронин А.А., Гагкаева З.В., Сидорук К.В., Тобохова А.С., Гребенко А.К., Кадыров Л.С., Барзилович П.Ю., Grinenko V., Dressel M., Торгашев В.И., Горшунов Б.П.</i> Универсальности диэлектрического отклика в субмиллиметровых и радиочастотных спектрах биологических материалов	106
<i>Лапинов А.В., Голубятников Г.Ю.</i> Субдуплеровские исследования квадрупольного расщепления в спектрах молекул CH ₃ OD и HNCO	107
<i>Мораренко В.В.</i> Анализ радиосигналов микроволнового и миллиметрового диапазонов с помощью широкополосных осциллографов реального времени	108

<i>Савкин Л.В.</i> Восстановление радиоизображений с помощью биполярной автокоррекции опорного изображения	110
<i>Буренков Ю.А., Каминский О.В., Малай И.М., Саргсян М.В.</i> Состав и технические характеристики разрабатываемого комплекса аппаратуры эталона спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения ГЭТ 21-2011 в диапазоне частот 178–220 ГГц	112
<i>Леонов И.И., Чернова А.И., Бубнов Г.М., Андриянов А.Ф., Шкаев А.П., Кошелев М.А., Серов Е.А., Паршин В.В., Третьяков М.Ю.</i> Повышение быстродействия резонаторного спектрометра миллиметрового – субмиллиметрового диапазона волн	113
<i>Хайкин В.Б., Лебедев М.К., Байрамуков Р.Р.</i> Способ радиоголографического контроля отражающей поверхности субмиллиметрового телескопа космической обсерватории «Миллиметр».....	114
<i>Хайкин В.Б., Шендрик А.В., Бурсов Н.Н., Лебедев М.К., Стороженко А.А.</i> Способы и результаты контроля характеристик антенной системы «юг + плоский» радиотелескопа РАТАН-600 в многоазимутальном режиме работы по сигналу геостационарных спутников Земли.....	115
<i>Востоков Н.В., Королёв С.А., Резник А.Н., Шашкин В.И.</i> Микроволновые методы исследования полупроводниковых наноструктур и приборов на их основе	116
<i>Малай И.М., Арсаев И.Е., Лапшин А.И., Саргсян М.В., Юрчук Э.Ф.</i> Широкоапертурные низкотемпературные генераторы шума – эталонные и рабочие меры единицы шумовых и яркостных температур	118

Миллиметровое и субмиллиметровое излучение в прикладных исследованиях

<i>Голубев С.В., Изотов И.В., Разин С.В., Сидоров А.В., Скалыга В.А.</i> Компактный источник нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии ...	123
<i>Горбачев А.М.</i> Выращивание монокристаллического CVD-алмаза в плазме СВЧ-разряда и его применения	124
<i>Муравьев В.М., Кукушкин И.В.</i> Системы субтерагерцового видения: настоящее и будущее	125
<i>Швецов А.А., Беликович М.В., Большаков О.С., Рыскин В.Г., Фейгин А.М., Korabovskiy A., Konti A.</i> Дистанционное зондирование снежного покрова в миллиметровом диапазоне волн	127

<i>Беликович М.В., Мухин Д.Н., Куликов М.Ю., Фейгин А.М.</i> Восстановление вертикальных профилей атмосферы по данным наземного пассивного многоуглового зондирования в микроволновом диапазоне.....	128
<i>Водопьянов А.В., Мансфельд Д.А., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Цветков Ю.В.</i> Получение нанопорошков оксидов металлов методом испарения-конденсации с использованием сфокусированного СВЧ-излучения с частотой 24 ГГц	129
<i>Егоров С.В., Быков Ю.В., Еремеев А.Г., Сорокин А.А., Паршин В.В., Балабанов С.С., Беляев А.В., Новикова А.В., Пермин Д.А.</i> Применение излучения миллиметрового диапазона для спекания радиопрозрачной $MgAl_2O_4$ -керамики	130
<i>Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Зуев А.С., Седов А.С.</i> Многочастотные субтерагерцовые гиротроны для спектроскопии и диагностики плазмы.....	131
<i>Кропоткина Е.П., Соломонов С.В., Розанов С.Б., Игнатьев А.Н., Лукин А.Н.</i> Спектры излучения озоносферы на миллиметровых волнах: новые данные о вертикальном распределении озона над Москвой по наблюдениям в 1996–2015 годах.....	132
<i>Дерюгина А.В., Цветков А.И., Ошевский Л.В., Таламанова М.Н., Шабалин М.А., Хламова Ю.Н., Куваева С.С., Морозкин М.В., Фокин А.П., Глявин М.Ю., Крылов В.Н.</i> Морфофункциональные изменения эритроцитов крови под влиянием низкоинтенсивного терагерцового излучения гиротрона.....	133
<i>Летунов А.А., Скворцова Н.Н., Харчев Н.К., Малахов Д.В., Соколов А.С.</i> Спектральная диагностика разрядов, инициируемых излучением гиротрона в порошковых смесях	134
<i>Лубяко Л.В., Шалашов А.Г., Архипцев Ф.Ф., Геннеберг В.А., Яковлев Д.В.</i> Радиометр для диагностики плазмы в магнитной ловушке ГДЛ.....	136
<i>Малахов Д.В., Укрюков Г.В., Черноусов А.Д., Скворцова Н.Н., Летунов А.А.</i> Система регистрации и анализа параметров микроволнового разряда, инициируемого гиротронным излучением, для прикладных плазмохимических исследований	138
<i>Мансфельд Д.А., Викторов М.Е., Водопьянов А.В., Голубев С.В.</i> Применение мощных источников СВЧ-излучения для формирования стационарных и квазистационарных источников неравновесных частиц при исследовании кинетических неустойчивостей плазмы	141
<i>Паршин В.В., Серов Е.А.</i> Керамические материалы для миллиметровых и субмиллиметровых волн	142

<i>Водопьянов А.В., Голубев С.В., Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Разин С.В., Сафронова М.И., Сидоров А.В., Фокин А.П.</i> Измерение концентрации плазмы в разряде, поддерживаемом мощным излучением терагерцового диапазона частот, по штарковскому уширению линии H_{α} атома водорода	143
<i>Завгородний А.С., Розанов С.Б., Игнатьев А.Н., Лукин А.Н., Соломонов С.В.</i> Частотно-временной анализ вариаций микроволнового излучения ночного мезосферного озона над Москвой	144
<i>Рыскин В.Г., Швецов А.А., Куликов М.Ю., Большаков О.С., Кукин Л.М., Фейгин А.М.</i> Микроволновый радиометрический комплекс для исследования термической структуры атмосферы Земли	145
<i>Рябикина И.Г., Скворцова Н.Н., Малахов Д.В., Летунов А.А.</i> Пылевые частицы как центры образования гексагонального нитрида бора в разрядах, инициируемых гиротроном, в порошках металл – диэлектрик.....	146
<i>Скворцова Н.Н., Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Летунов А.А., Малахов Д.В., Образцова Е.Д., Образцова Е.А., Петров А.Е., Рябикина И.Г., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Соколов А.С., Харчев Н.К.</i> Синтез частиц микро- и наноразмеров в разрядах, инициируемых излучением гиротрона в порошках металл – диэлектрик	148
<i>Степахин В.Д., Скворцова Н.Н., Малахов Д.В., Сорокин А.А., Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Глявин М.Ю., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Летунов А.А., Петров А.Е., Рябикина И.Г., Сарксян К.А., Соколов А.С., Смирнов В.А., Харчев Н.К.</i> Осаждение веществ на молибденовых и кварцевых пластинах в разрядах, инициируемых излучением гиротрона в порошках металл – диэлектрик.....	150
<i>Водопьянов А.В., Цветков А.И., Морозкин М.В., Глявин М.Ю., Фокин А.П., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Синайский М.А.</i> Применение непрерывного 263 ГГц / 1 кВт гиротрона для получения нанопорошков оксидов металлов методом испарения-конденсации	152

**ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ
ИЗЛУЧЕНИЯ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА**

НЕКОЛЛИНЕАРНОЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЕ СТРОБИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН

М.И. Бакунов¹, Е.А. Машкович¹, С.Д. Горелов¹, М. Тани²

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

² Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui, Japan

Электрооптическое стробирование (ЭОС) – распространенная техника измерения временной формы импульсного терагерцового излучения с широкими применениями в терагерцовой спектроскопии и терагерцовом имиджинге [1]. В стандартной схеме ЭОС пробный фемтосекундный лазерный импульс распространяется коллинеарно с терагерцовой волной в электрооптическом кристалле и испытывает изменение поляризации из-за эффекта Поппельса. Измерение поляризации как функции задержки между пробным импульсом и терагерцовой волной дает осциллограмму терагерцового поля. Для реализации метода необходим синхронизм между пробным импульсом и терагерцовой волной, что требует подбора кристалла под длину волны пробного импульса и не всегда возможно. В докладе представлены результаты разработки неколлинеарных методов ЭОС, в которых синхронизм достигается путем выбора угла между направлениями распространения пробного импульса и терагерцовой волны.

Неколлинеарное ЭОС основано на идее обращения эффекта Черенкова [2]. Терагерцовая волна вводится в кристалл ниобата лития с помощью кремниевой призмы под черенковским углом $\beta \approx 63^\circ$ к пробному импульсу с длиной волны $\lambda = 0,8$ мкм [2]. При использовании кристалла GaAs, где $\beta \approx 12^\circ$ для импульса с $\lambda = 1,55$ мкм, вместо призмы можно использовать наклонное падение пробного импульса на границу кристалла [3]. Неколлинеарная схема позволяет также реализовать неэллипсометрический метод ЭОС, который не требует поляризационной оптики и балансного фотодетектора и основан на измерении модуляции интенсивности пробного пучка [4].

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Минобрнауки РФ.

1. Wu Q., Zhang X.-C. Ultrafast electro-optic field sensors // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 1604–1606.

2. Tani M., Horita K., Kinoshita T., Que C.T., Estacio E., Yamamoto K., Bakunov M.I. Efficient electro-optic sampling detection of terahertz radiation via Cherenkov phase matching // Opt. Express. 2011. V. 19, № 21. P. 19901–19906.

3. Mashkovich E.A., Shugurov A.I., Ozawa S., Estacio E., Tani M., Bakunov M.I. Non-collinear electro-optic sampling of terahertz waves in a thick GaAs crystal // IEEE Trans. Terahertz Sci. Techn. 2015. V. 5, № 5. P. 732–736.

4. Tani M., Kinoshita T., Nagase T., Horita K., Que C.T., Estacio E., Yamamoto K., Bakunov M.I. Non-ellipsometric detection of terahertz radiation using heterodyne EO sampling in the Cherenkov velocity matching scheme // Opt. Express. 2013. V. 21, № 7. P. 9277–9288.

ЛАЗЕРЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ УЗКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В.И. Гавриленко

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Квантовые каскадные лазеры на основе полупроводников A3B5 являются эффективными источниками излучения в среднем ИК и терагерцовом (ТГц) диапазонах. Однако сильное решеточное поглощение в области длин волн 20–60 мкм делает этот участок спектра практически недоступным для таких приборов [1]. В этом диапазоне могут работать инжекционные лазеры на основе PbSnSe, где частоты оптических фононов существенно ниже, а симметрия законов дисперсии электронов и дырок практически исключает оже-рекомбинацию; рекордная длина волны генерации составляет 46 мкм. Несмотря на то что в длинноволновой области мощность таких лазеров составляет менее 1 мВт, они могут быть использованы для целей спектроскопии (см., например, [2]). Известны попытки создания лазеров на основе квантовых ям (КЯ) II типа InAs/GaInAs/InAs, где удалось достичь длины 10,4 мкм в межзонной каскадной структуре [3]. В качестве препятствий для продвижения в длинноволновую область отмечалось возрастающее поглощение на свободных носителях и слабое перекрытие волновых функций электронов и дырок в КЯ II типа.

В другой узкозонной полупроводниковой системе A2B6 на основе соединений HgCdTe, которая свободна от последнего недостатка, сообщалось о достижении лазерной генерации вплоть до длины волны 5,3 мкм [4, 5]. В работе [5] в качестве основного препятствия продвижения в более длинные волны рассматривалась оже-рекомбинация, хотя и отмечалось, что она может быть подавлена в структурах с КЯ. В цикле работ группы ИФМ РАН, выполненных совместно с технологами из ИФП СО РАН, продемонстрирована эффективная фотолюминесценция из HgCdTe-структур вплоть до длины волны 26 мкм и показано, что доминирующим механизмом рекомбинации при высоких уровнях оптического возбуждения, необходимых для создания инверсии населенностей, является излучательная рекомбинация [6]. В работе [7] было продемонстрировано, что при этих условиях времена жизни фотоносителей могут достигать 5 пс, что позволяет рассчитывать на лазерный эффект при умеренном уровне накачки. Были рассчитаны и выращены лазерные структуры с квантовыми ямами с диэлектрическим волноводом на различные длины волн и получено стимулированное излучение вплоть до рекордно большой длины волны 9,5 мкм при мощности оптического возбуждения $\sim 0,1$ кВт/см² при $T = 18$ К [8]. В докладе обсуждаются возможности продвижения в дальний ИК/ТГц-диапазон вплоть до длин волн 30–50 мкм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 15-42-02249, 16-32-00609, 16-02-00685) и РАН.

1. *Williams B.S.* Terahertz quantum-cascade lasers // *Nature Photonics*. 2007. V. 1. P. 517-525.

2. *Маремьянин К.В., Иконников А.В., Антонов А.В., Румянцев В.В., Морозов С.В., Бовкун Л.С., Умбеталиева К.Р., Чижевский Е.Г., Засавицкий И.И., Гавриленко В.И.* Длинноволновые инжекционные лазеры на основе твердого раствора $Pb_{1-x}Sn_xSe$ и их использование для спектроскопии твердого тела // *ФТП*. 2015. Т. 49, вып. 12. С. 1672-1675.

3. *Tian Z., Li L., Ye H., Yang R.Q., Mishima T.D., Santos M.B., Johnson M.B.* InAs-based interband cascade lasers with emission wavelength at 10.4 mm // *Electronics Lett.* 2012. V. 48, № 2. P. 113-114.

4. *Arias J.M., Zandian M., Zucca R., Singh J.* HgCdTe infrared diode lasers grown by MBE // *Semicond. Sci. Technol.* 1993. V. 8. P. S255-S260.

5. *Bleuse J., Bonnet-Gamard J., Mula G., Magnea N., Pautrat J.-L.* Laser emission in HgCdTe in the 2-3.5 μm range // *J. Cryst. Growth*. 1999. V. 197. P. 529-536.

6. *Morozov S.V., Rumyantsev V.V., Antonov A.V., Maremyanin K.V., Kudryavtsev K.E., Krasilnikova L.V., Mikhailov N.N., Dvoretiskii S.A., Gavrilenko V.I.* Efficient long wavelength in-terband photoluminescence from HgCdTe epitaxial films at wavelengths up to 26 μm // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 104. P. 072102.

7. *Morozov S.V., Rumyantsev V.V., Antonov A.V., Kadykov A.M., Maremyanin K.V., Kudryavtsev K.E., Mikhailov N.N., Dvoretiskii S.A., Gavrilenko V.I.* Time resolved photoluminescence spectroscopy of narrow gap $Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_yHg_{1-y}Te$ quantum well heterostructures // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 105. P. 022102.

8. *Morozov S.V., Rumyantsev V.V., Kadykov A.M., Dubinov A.A., Kudryavtsev K.E., Antonov A.V., Mikhailov N.N., Dvoretiskii S.A., Gavrilenko V.I.* Long wavelength stimulated emission up to 9.5 μm from HgCdTe quantum well heterostructures // *Appl. Phys. Lett.* [in press].

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МОЩНЫМ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМ ТЕРАГЕРЦЕВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НОВОСИБИРСКОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

*В.В. Кубарев^{1, 2}, Г.Н. Кулипанов¹, О.А. Шевченко^{1, 2}, Я.В. Гетманов^{1, 2},
Е.Н. Чесноков³, П.В. Кошляков³, Е.И. Пальчиков^{4, 2}, А.В. Долгих^{4, 2},
И.Ю. Красников^{4, 2}*

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

³Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН,
Новосибирск

⁴Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Новосибирский терагерцевый лазер на свободных электронах (НЛЭСЭ) имеет следующие уникальные (рекордные) параметры: большую

импульсную мощность, большую среднюю мощность в непрерывном режиме, большую спектральную мощность и возможность плавной перестройки в широком спектральном диапазоне. Использование в пользовательском эксперименте хотя бы одного из этих уникальных свойств может служить критерием адекватности проводимых исследований этому достаточно дорогому в эксплуатации лазеру. В докладе описываются три различные экспериментальные работы, удовлетворяющие этому критерию, начатые несколько лет назад и развивающиеся в настоящее время.

Первая работа – сверхбыстрая спектроскопия молекул и излучения НЛСЭ – является образцом адекватности установке, поскольку в ней используются все перечисленные уникальные свойства лазера. Эти свойства, а также разработанная аппаратура позволили создать различные спектроскопические методики с параметрами недоступными другим известным спектроскопическим методам. Фактически эти методики являются дополнительными к известным спектральным методам, распространяя их на сверхбыстрые однократные или неповторяющиеся явления.

Вторая работа, интенсивно проводимая в настоящее время на НЛСЭ, – это исследование уникального непрерывного плазменного лазерного терагерцевого разряда. В экспериментах получены метрологические данные по пробойным параметрам атмосферных газов и определены фундаментальные физические закономерности, присущие этому виду разряда.

Третья работа связана с исследованием водород-кислородного горения и детонации при помощи терагерцевого излучения НЛСЭ.

Проводимые спектроскопические исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080). Работы по оптическому терагерцевому разряду выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 14-22-02070 офи_м).

НОВОСИБИРСКИЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ: ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ И БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

О.А. Шевченко, В.С. Арбузов, Н.А. Винокуров, П.Д. Воблый, В.Н. Волков, Я.В. Гетманов, И.В. Давидюк, О.И. Дейчули, Е.Н. Дементьев, Б.А. Довженко, Б.А. Князев, Е.И. Колобанов, А.А. Кондаков, В.Р. Козак, Е.В. Козырев, В.В. Кубарев, Г.Н. Кулипанов, Э.А. Купер, И.В. Купцов, Г.Я. Куркин, С.А. Крутихин, Л.Э. Медведев, С.В. Мотыгин, В.К. Овчар, В.Н. Осипов, В.М. Петров, А.М. Пилан, В.М. Полик, В.В. Репков, Т.В. Саликова, И.К. Седяров, С.С. Середняков, А.Н. Скринский, С.В. Тарарышкин, А.Г. Трибендис, В.Г. Ческидов, К.Н. Чернов, М.А. Щеглов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) являются уникальными источниками электромагнитного излучения с перестраиваемой длиной волны. В ИЯФ СО РАН создан мощный ЛСЭ, длина волны которого может изменяться в широких пределах в терагерцовой и инфракрасной области спектра. В качестве источника электронов в нем используется многооборотный ускоритель с рекуперацией энергии, который имеет пять прямолинейных промежутков. В трех из них установлены ЛСЭ, работающие в разных диапазонах длин волн (90–240 мкм для первого, 37–80 мкм для второго и 5–20 мкм для третьего).

Первый и второй ЛСЭ были запущены соответственно в 2004 и 2009 году и в настоящее время работают на пользователей. Третий ЛСЭ установлен на последней, четвертой, дорожке ускорителя, где энергия электронов максимальна. Он состоит из трех секций ондулятора и оптического резонатора длиной 40 м. Летом 2015 года на этом ЛСЭ впервые была получена генерация на длине волны 9 мкм со средней мощностью около 100 Вт. Проектная мощность излучения составляет 1 кВт при частоте повторения 3,75 МГц. В ближайшее время планируется вывести излучение третьего ЛСЭ из защищенного зала на пользовательские станции.

В работе представлены результаты запуска третьего ЛСЭ, а также состояние дел на первом и втором ЛСЭ и ближайшие перспективы развития.

ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ПУЧКИ С ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ

Ю.Ю. Чопорова^{1,2}, Б.О. Володкин³, Б.А. Князев^{1,2}, В.С. Павельев³

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

³ Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва

Факт, что оптическое излучение может нести помимо спинового углового момента (состояние поляризации) орбитальный угловой момент (ОУМ), или момент импульса, известен давно. Всплеск публикаций на эту тему случился после публикации Аллена о трансформации пучков лаггер-гауссовых мод в пучки с ОУМ с последующей передачей углового момента механической системе. В терагерцовом спектральном диапазоне имеется только три работы, посвященные формированию ОУМ, все они выполнены с использованием широкополосного излучения и сообщают о формировании лаггер-гауссовых пучков низкой мощности. В данной работе были с помощью мощного источника монохроматического перестраиваемого по длине волны излучения впервые получены и исследованы бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом. Амплитудные и фазовые характеристики пуч-

ков исследованы с помощью предложенных интерференционных и дифракционных методов компьютерного моделирования, теория и результаты экспериментов хорошо согласуются.

Сформированные бинарной кремниевой дифракционной пластинкой пучки с ОУМ являются бесселевыми и демонстрируют все уникальные свойства, характерные для бесселевых пучков. Была продемонстрирована «бездифракционность» бесселевых пучков, то есть инвариантность амплитудного распределения в пространстве на определенной длине. Экспериментально обнаружено, что распределение интенсивности в пучке сохраняется на расстоянии до 180 мм, после чего по причине ограниченности пучка по радиусу он начинает расходиться. Вторым уникальным свойством, продемонстрированным экспериментально, является самовосстановление бесселева пучка после прохождения через препятствия и мутные среды. Подобные пучки можно использовать для мониторинга объектов сложной формы, для формирования ловушек для микрообъектов, а также для применения в лазерных радарах (лидарах) терагерцового диапазона.

Экспериментальные исследования поддержаны Минобрнауки РФ и грантом РФФИ 15-02-06444. Оборудование для исследования характеристик ДОЭ изготовлено при поддержке гранта Российского научного фонда 14-50-00080. Эксперименты выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения (ЦКП СЦСТИ)».

СТИМУЛИРОВАННЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДАХ МЕЖДУ ЛЕСТНИЦАМИ ВАННЬЕ – ШТАРКА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ

*А.А. Андронов¹, Е.П. Додин¹, Д.И. Зинченко¹, Ю.Н. Ноздрин¹,
М.А. Ладугин², А.А. Мармалюк², А.А. Падалица², В.А. Беляков³,
И.В. Ладенков³, А.Г. Фефелов³*

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

² «Салют», Нижний Новгород

³ «Сигм-Плюс», Москва

Продемонстрированы новые лазеры на основе простых сверхрешеток GaAs-GaAlAs со слабыми барьерами – ваннье-штарковские (В.-Ш.) лазеры. Механизм усиления (рис. 1) в лазерах основан на инверсии населенности между основным уровнем В.-Ш. в ямах СР и слабо заселенным верхним уровнем В.-Ш. в ямах два, три, четыре периода вниз по приложенному потенциалу [1]. Механизм является обобщением второго предложения Казари-

нова и Суриса 1972 г. первое привело к созданию каскадных лазеров. В чипах лазеров обнаружены множественные области интенсивного стимулированного СВЧ- и мм-излучения при резонансах между лестницами В.-Ш.

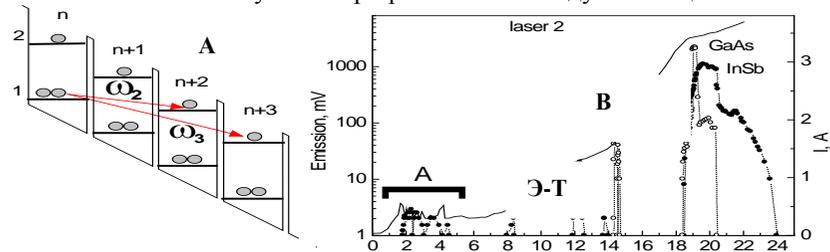


Рис. 1. А – Схема 2 лестниц уровней В.-Ш. в СР в электрическом поле и переходов между ними. В – ВАХ и сигналы детекторов GaAs и InSb для чипа из пластины 1755; Э-Т – область ОДП Эсаки – Тсу

В докладе обсуждаются результаты, полученные на чипах из двух пластин со сверхрешетками, № 1755 и 2239. В одном из чипов диаметром 1 мм, изготовленных из пластины № 1755, излучение существует на частоте около 7,3 ГГц при температуре до 150 К, и по оценке имеет мощность до 1 Вт. В то же время продемонстрировано, что все атрибуты механизма излучения сохраняются и при 300К [2]. В то же время в чипах из пластины 2239, с улучшенной структурой контактов, наблюдалось и миллиметровое излучение; кроме того, расчеты показывают, что в чипах со сверхрешетками с большей концентрацией электронов будет наблюдаться и ТГц-излучение (рис. 2).

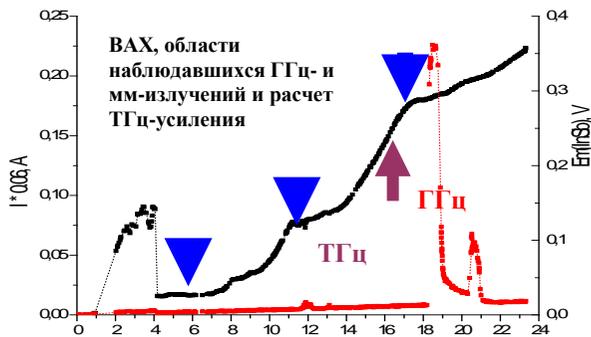


Рис. 2. Области наблюдавшихся стимулированного ГГц- и мм-излучений чипа из пластины 2239 и рассчитанной области усиления ТГц-излучения

Пластины со СР выращены методом МOCVD, имеют 1000 периодов и стоп-слой для создания терагерцового резонатора металл-СР-металл. ТГц-излучение не наблюдалось из-за малого коэффициента усиления в сравнении с потерями в резонаторе ввиду малой остаточной концентрации элект-

тронов в СР ($\approx 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). Эксперименты, расчеты и обсуждения показывают, что при оптимизации параметров подобные сверхрешетки могут стать основой для источников излучения на частотах от ТГц до ПГц и выше с хорошей эффективностью.

Работа поддерживалась грантами программ РАН «Физика наноструктур» и «Проблемы радиофизики» и поддержана РФФИ грантом 15-02-05503-а.

Авторы благодарны Andreas Wacker за предоставление предварительных результатов усиления ТГц-излучения в исследованных сверхрешетках.

1. Андронов А.А., Додин Е.П., Зинченко Д.И., Ноздрин Ю.Н., Мармалюк А., Падалица А.А. Усиление терагерцового излучения на переходах между «лестницами» Ваннье – Штарка в сверхрешетках со слабыми барьерами // Квант. электрон. 2010. Т. 40, вып. 5. С. 400–405.

2. Андронов А.А., Додин Е.П., Зинченко Д.И., Ноздрин Ю.Н., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Беляков В.А., Ладенков И.В., Фефелов А.Г. Стимулированные излучения на переходах между лестницами Ваннье – Штарка в простых полупроводниковых сверхрешетках // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102, вып. 4. С. 235–239.

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

В.Д. Анцыгин¹, А.А. Мамрашев^{1,2}, Н.А. Николаев^{1,2}, О.И. Потатуркин^{1,3}

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

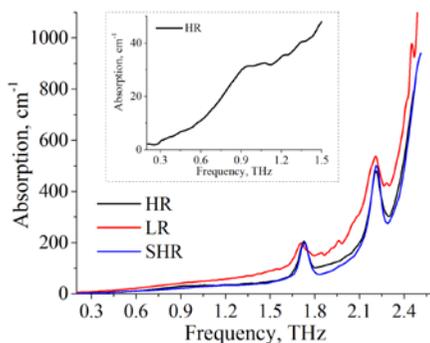
²Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

³Новосибирский государственный университет

Нелинейно-оптические кристаллы могут быть применены для генерации, регистрации и управления терагерцовым излучением. Для их эффективного использования необходимы знания коэффициентов поглощения и показателей преломления в терагерцовой области [1]. Часто эти материалы являются сильноанизотропными (дихроичными и двулучепреломляющими), вследствие чего возникают проблемы при измерении их свойств. Две особенности импульсной терагерцовой спектроскопии (time-domain terahertz spectroscopy) позволяют решить эти проблемы. Во-первых, она позволяет зарегистрировать временную форму терагерцовых импульсов, проходящих через исследуемый образец, и разделить компоненты ТГц-импульса с различной поляризацией во временной области. Во-вторых, она является поляризационно-чувствительной, то есть обеспечивает регистрацию ортогональных компонент ТГц-излучения с различной эффективностью.

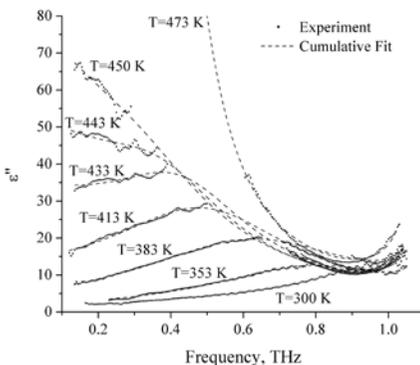
Изучены терагерцовые свойства кристаллов семейства боратов: LBO, LB4, α -BBO, β -BBO, фторбората бария, а также кристаллов титанил-фосфата калия КТР и германата свинца PGO. Для кристаллов семейства боратов характерны большие значения двулучепреломления. Триборату лития кроме значительного двулучепреломления $\sim 0,4$ свойствен значительный дихроизм. Получены аппроксимации свойств уравнениями Зельмеера. Обнаружена дополнительная полоса поглощения в кристаллах боратов бария, обусловленная входением в кристаллическую решетку атомов и ионов натрия из раствора-расплава в процессе роста.

Рис. 1. Спектры поглощения кристаллов КТР с различной проводимостью вдоль оси z. Проводимости: LR – $2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, HR – $10^{-11} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, SHR – $10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$



Изучено влияние проводимости калиевой подрешетки на терагерцовые свойства кристаллов КТР (рис. 1). Установлено, что ширина линий поглощения, связанных с калиевой подрешеткой, зависит от проводимости кристаллов и приобретает наибольшее значение у низкоомных образцов.

Рис. 2. Мнимая часть диэлектрической проницаемости кристаллов германата свинца вдоль оптической оси в зависимости от температуры



Спектры мнимой части диэлектрической проницаемости аппроксимированы набором лоренцевских осцилляторов: на нулевой частоте, на фиксиро-

ванной частоте 2,7 ТГц и частоте, изменяющейся от 0,8 до 0,3 ТГц при нагревании до температуры фазового перехода 174 °С (см. рис. 2). Линия поглощения на нулевой частоте и фоновая мода, частота которой меняется при изменении температуры, отражают две особенности кристаллической структуры материала: центральный пик и мягкую моду. Центральный пик является признаком фазового перехода типа «порядок-беспорядок» в сегнетоэлектриках, а мягкая мода характеризует фазовый переход типа смещения.

Результаты исследований показывают, что кристаллы семейства боратов могут быть использованы для создания элементов поляризационной оптики в терагерцовой области спектра. Триборат лития может использоваться для преобразования импульсного ИК-излучения в терагерцовое. Германат свинца может выступать в качестве широкополосного поляризационного фильтра.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 15-19-10021.

1. Bründermann E., Hübers H.-W., Kimmitt M.F. Terahertz Techniques. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2012.

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В.Л. Вакс

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского

Актуальной проблемой для спектроскопии высокого разрешения является создание высокостабильных, перестраиваемых когерентных источников излучения. Требования, предъявляемые к таким источникам излучения в терагерцовом (ТГц) диапазоне, – это обеспечение доплеровского разрешения спектральных линий ($\sim 10^{-6}$ от несущей), стабильность частоты излучения $\sim 10^{-8}$ – 10^{-10} и плавная перестройка частоты в широком спектральном диапазоне. Сегодня существует несколько типов источников когерентного излучения ТГц-частотного диапазона, включая лампы обратной волны (ЛОВ), генераторы Ганна, умножители на диодах Шоттки, транзисторы, лазеры на свободных электронах, молекулярные лазеры и квантовые каскадные лазеры (ККЛ).

ТГц ККЛ работают на межподзонных переходах, позволяя управлять энергией перехода по всему диапазону частот от 1,2 до 4,8 ТГц. Выходная мощность при криогенных температурах составляет обычно десятки милли-

ватт, но в литературе сообщалось о мощностях выше 248 мВт в импульсном и 138 мВт в непрерывном режимах на частоте 4,4 ТГц для 10 К. Возможность управления частотой ККЛ в сочетании с высокой выходной мощностью делает ТГц ККЛ привлекательными для спектроскопических приложений. Рассмотрена возможность разработки источников излучения на основе ККЛ для применения в ТГц-спектроскопии высокого разрешения. Выявлены ограничения и проблемы, связанные с их практической реализацией (в частности, низкая направленность излучения ККЛ и неоднородный волновой фронт, многомодовый режим генерации, низкая рабочая температура, задача управления частотой, которая включает режим стабилизации и перестройки частоты, введения модуляции того или иного параметра излучения ККЛ), показаны пути их решения, а также преимущества и перспективы использования ККЛ для ТГц-спектроскопии высокого разрешения.

ККЛ являются перспективными источниками ТГц-излучения для чувствительных ТГц-спектрометров широкого применения (обнаружение взрывчатых веществ, поиск молекул-маркеров различных заболеваний и т.д.).

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Проблемы радиофизики» и Минобрнауки РФ (грант № 14.607.21.0100).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНОВ НА ТЕРАГЕРЦОВОМ ЛАЗЕРЕ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

В.В. Герасимов¹, Б.А. Князев¹, А.К. Никитин², А.Г. Лемзяков¹, В.В. Булгакова¹

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

² Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

В работе представлены результаты исследований поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), выполненных в течение последних лет на терагерцовом (ТГц) монохроматическом излучении Новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ).

В экспериментах по изучению распространения ППП вдоль плоских металл-диэлектрических поверхностей было установлено, что существенную роль в ослаблении ППП играют «радиационные» потери на неоднородностях поверхности (шероховатость, зернистая структура напыленного металла и др.) [1]. Нанесение очень тонкого ($\sim \lambda/500$) диэлектрического покрытия существенно уменьшает радиационные потери, увеличивая длину пробега поверхностной волны по сравнению с непокрытым металлом в несколько

раз. Обнаружено, что существует оптимальная толщина диэлектрического покрытия, при которой полные потери плазмона (джоулевое поглощение в металле и радиационные потери) минимальны, а длина пробега достигает нескольких десятков сантиметров. Учет данных эффектов может быть полезен для диагностики металлических поверхностей большой площади, а также при создании ТГц-устройств передачи информации.

Измерения прохождения терагерцевых плазмонов между двумя проводящими поверхностями, разделенными воздушным промежутком, показали, что ППП могут преодолевать воздушные зазоры от нескольких сантиметров до десяти, в зависимости от структуры поверхностей [2]. Теоретические расчеты подтвердили экспериментальные результаты. Способность ТГц-плазмонов преодолевать макроскопические промежутки может быть использована, например, в системах коммуникации и безопасности, а также для создания плазмонных интерферометров.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 14-50-00080.

1. *Gerasimov V. V., Knyazev B. A., Lemzyakov A. G., Nikitin A. K.* Study of radiative losses of terahertz surface plasmons on plane metal-dielectric interfaces // IRMMW-THz-2015, 23-28 Aug., Hong Kong. P. 1-2.

2. *Gerasimov V. V., Knyazev B. A., Nikitin A. K., Zhizhin G. N.* Experimental investigations into capability of terahertz surface plasmons to bridge macroscopic air gaps // Opt. Express. 2015. V. 23(26). P. 33448-33459.

РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫЙ ДИОД НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСИСТЕМЫ InGaAs/AlAs ДЛЯ СУБГАРМОНИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

А.А. Дорофеев¹, Н.Б. Гладышева¹, С.В. Аверин², Н.В. Алкеев²

¹ ОАО НПП «Пульсар», Москва

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Резонансно-туннельный диод (РТД), с равными толщинами барьеров, обладает антисимметричной вольт-амперной характеристикой и может быть использован в качестве нелинейного элемента субгармонического смесителя (СГС).

В настоящей работе исследованы РТД на основе гетеросистемы GaAs/AlAs с толщиной AlAs-барьеров 1,7 нм и шириной GaAs-ямы 4 нм. Изготовленные РТД предназначались для работы в СГС миллиметрового диапазона длин волн. ВАХ и другие параметры РТД приведены в [1]. Импеданс РТД измерялся в диапазоне 0,1 ... 40 ГГц. По частотной зависимости импеданса РТД найдена величина «квантовой» индуктивности $L_Q = 0,09$ нГ

эквивалентной схемы (ЭС) РТД, что соответствует времени задержки электронов в квантовой яме (КЯ) РТД $\tau_{DL} = 1,3$ пс. Получена формула для предельной частоты РТД в схеме СГС с учетом задержки электронов в его КЯ. Показано, что максимальная предельная частота РТД на основе гетеросистемы GaAs/AlAs не может превышать $\sim 0,8$ ТГц.

По формулам из [2] и известным из литературы параметрам гетеросистемы $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{AlAs}$ нами разработана конструкция слоев РТД: квантовая яма из $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ толщиной 4,7 нм (32 ml), два барьера из AlAs, толщиной по 1,1 нм (8 ml), снаружи от барьеров располагаются по три слоя $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ с различной концентрацией доноров. Рассчитанные параметры разработанной нами конструкции РТД: время задержки электронов в КЯ $\tau_{DL} = 1,3 \cdot 10^{-14}$ с, предельная частота не менее ~ 6 ТГц.

1. Алкеев Н. и др. Резонансно-туннельный диод на основе гетеросистемы GaAs/AlAs для субгармонического смесителя // Микроэлектроника. 2010. Т. 39, № 5. С. 331.

2. Тагер А.С. Размерные квантовые эффекты в субмикронных полупроводниковых структурах и перспективы их применения в электронике СВЧ. Ч. I : Физические основы // Электронная техника. Электроника СВЧ. 1987. Вып. 9(403). С. 21-34.

РАЗРАБОТКА МНОГОЛУЧЕВОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ГИРОТРОНА С РЕКОРДНОЙ ЧАСТОТОЙ ГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*М.Ю. Глявин, В.Н. Мануилов, И.В. Зотова, В.Ю. Заславский, А.С. Седов,
В.Е. Запезалов, А.Н. Куфтин, С.Ю. Корнишин, А.М. Малкин, М.В. Морозкин,
Р.М. Розенталь, А.П. Фокин, Н.С. Гинзбург*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Источники непрерывного терагерцового излучения находят все более широкое применение в различных областях науки и техники. Одним из наиболее актуальных приложений является ДПЯ/ЯМР-спектроскопия высокого разрешения. В мире (в основном компанией Bruker Biospin) создана линейка спектрометров, использующих в качестве источника излучения гиротроны, работающие на частотах 263–526 ГГц с уровнем микроволновой мощности в десятки ватт. Целью работы является исследование возможности создания для задач спектроскопии источника микроволнового излучения с рекордными частотой и мощностью излучения, что позволит реализовать новое поколение ДПЯ/ЯМР-спектрометров.

При попытках реализации непрерывных гиротронов с частотами выше 300 ГГц исследователи неизбежно сталкиваются с необходимостью обеспе-

чить селективное возбуждение высших циклотронных гармоник. Для этой цели предлагаются различные электродинамические (как правило, это резонаторы сложного профиля) или электронно-оптические (например, использование приосевых электронных пучков) методы. Представляется возможным воспользоваться хорошо себя зарекомендовавшим методом селекции, основанным на использовании в одном цилиндрическом резонаторе нескольких трубчатых электронных потоков с различными радиусами ведущих центров электронных орбит. В докладе представлены результаты разработки гиротрона на второй циклотронной гармонике с рабочей частотой 790 ГГц. Реализованы программные средства, решающие усредненные уравнения для определения КПД прибора и исследований электронно-волнового взаимодействия в резонаторах гиротронов. Выполнены расчеты для двухлучевого гиротрона на второй гармонике гирочастоты как на основе усредненных уравнений, так и с помощью трехмерного моделирования кодами KARAT и CST Studio. Проведено сравнение результатов, продемонстрирована корректность использованных подходов. Выполнено сравнение различных типов электронно-оптических систем двухлучевых гиротронов. Доказана целесообразность использования варианта с двумя излучающими пучками. Разработана конструкторская документация для изготовления двухлучевой магнетронно-инжекторной пушки.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант 14-12-00887.

АВТОФАЗИРОВКА МНОГОКОНТАКТНЫХ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ СИСТЕМ

А.М. Клушин, М.А. Галин, В.В. Курин, Н.К. Вдовичева, И.А. Шерешевский

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Когерентное излучение из большого числа джозефсоновских контактов с общим латеральным размером, существенно превышающим длину излучаемой волны, возможно только в условиях, когда все контакты находятся в одинаковых электродинамических условиях. Эти условия могут быть реализованы при взаимодействии джозефсоновских контактов с бегущими волнами. В этом случае фазы высокочастотных джозефсоновских осцилляций разных контактов автоматически синхронизируются с распространяющейся и излучающейся в открытое пространство волной. Таким образом, речь идет о создании активной многоэлементной антенной решетки, эффективно излучающей в открытое пространство. Взаимодействуя с бегущей по антенне электромагнитной волной, джозефсоновские контакты будут испытывать автофазировку.

Следующие результаты служат обоснованием возможности реализации изложенного выше подхода. Во-первых, мы наблюдали максимальную мощность джозефсоновского излучения вдали от резонансной частоты исследуемой структуры. Мы считаем это подтверждением взаимодействия джозефсоновского излучения с бегущими волнами, распространяющимися в исследованном массиве контактов [1]. Во-вторых, измерения диаграмм направленности показали, что джозефсоновские цепочки в основном излучают в продольном направлении, что свидетельствует об излучении волн, бегущих вдоль поверхности. Наиболее вероятно, что этими волнами являются прижатые к границе раздела неоднородные электромагнитные волны, типа поверхностных плазмонов. В-третьих, результаты численного моделирования с помощью разработанной нами программы подтверждают концепцию достижимости интенсивного когерентного излучения систем джозефсоновских контактов при взаимодействии с бегущей волной, направляемой джозефсоновской структурой.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 15-02-05793, 15-42-02469. а также РНФ, грант № 15-12-10020.

1. Galin M.A., Klushin A.M., Kurin V.V. et al. Towards local oscillators based on arrays of niobium Josephson junctions // Supercond. Sci. Technol. 2015. V. 28. P. 055002.

СВЯЗЬ ИЗМЕНЕНИЙ В СПЕКТРАХ «МАЛОПОГЛОЩАЮЩИХ» ПОЛИМЕРОВ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ СО СТРУКТУРНЫМИ ПЕРЕХОДАМИ В ЭТИХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

М.С. Кутай¹, М.М. Назаров¹, П.М. Недорезова², Д.А. Сапожников³

¹Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Москва

²Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

В последние годы полимеры со сравнительно малым коэффициентом поглощения начинают широко использоваться в устройствах и приборах терагерцового диапазона частот. Химический состав большинства «малопоглощающих» полимеров известен. Вблизи определенных температур эти полимеры испытывают своеобразные структурные переходы (аналог фазовых переходов в твердых телах). В частности, к такого рода структурным преобразованиям относятся процесс стеклования кристаллизующихся полимеров (температура T_G) и процесс их плавления (температура T_M). В данной работе анализируются изменения в комплексных терагерцовых

спектрах восприимчивости типичных «малопоглощающих» полимеров при различных температурах, в том числе вблизи T_G и T_M .

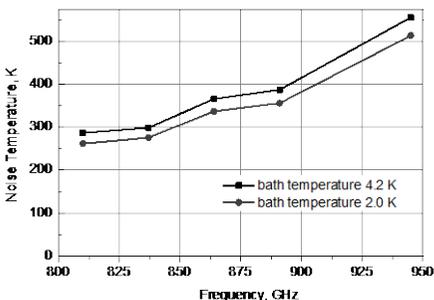
СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНЫЕ СТРУКТУРЫ ДИАПАЗОНА 700–950 ГГц ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИИ

*К.И. Рудаков¹, П.Н. Дмитриев¹, А.М. Барышев², А.В. Худченко^{1,2},
В.П. Кошелец¹*

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

² Space Research Organization of the Netherlands (SRON), Groningen, Netherlands

Для существенного расширения частотного диапазона и реализации предельных параметров сверхпроводниковых элементов была разработана технология изготовления туннельных СИС-переходов на основе структуры Nb/Al-AlN_x/NbN субмикронного размера (площадь 0,5 мкм²) с плотностью тока ($J_c > 70$ кА/см²) и высоким щелевым напряжением ($V_g = 3,2$ мВ). Разра-



ботаны, изготовлены и исследованы смесительные структуры Nb/AlN/NbN с согласующей структурой на основе пленок Al и NbTiN для нового радиоастрономического матричного приемника SHAMP+ диапазона 790–950 ГГц на телескопе APEX (Atacama Pathfinder Experiment). Для определения электрофизических параметров структуры было проведено сравнение экспериментально изме-

ренных характеристик приемника с результатами численного моделирования, выполненного с учетом частотно-зависимых потерь в пленках. Определена удельная емкость СИС-перехода, для используемой технологии ее величина составила $C_{уд} = 80$ фФ/мкм². Конечной целью данного исследования является разработка сверхпроводникового приемника в диапазоне 0,79–0,95 ТГц с шумовой температурой не выше 200 К.

Данная работа выполнена в рамках соглашения с Минобрнауки РФ № 14.607.21.0100 (идентификатор проекта RFMEFI60714X0100).

ДИСПЕРСИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КРИСТАЛЛОВ $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

К.А. Кузнецов, С.А. Германский, Г.Х. Китаева, С.П. Ковалев, А.Н. Пенин

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Ниобат лития широко используется в современной лазерной физике в связи с уникальными электрооптическими и нелинейно-оптическими свойствами. Он по-прежнему остается одним из лучших материалов для преобразования частоты лазерного излучения благодаря высокой нелинейной восприимчивости и возможности осуществления квазисинхронных процессов, используется в электрооптике. В большинстве приложений, фоторефрактивные свойства ниобата лития не востребованы, поэтому в расплавы, из которых выращивают кристаллы, добавляют примеси различных химических элементов (Mg, Sc, Zn), существенно влияющих на дефектную структуру кристаллов и на тип носителей, являющихся глубокими электронными ловушками (поляроны, биполярны). В результате удается существенно подавить фоторефракцию. Для различных терагерцовых приложений требуется точно знать оптические свойства легированных кристаллов ниобата лития (показатели преломления и коэффициенты поглощения) в терагерцовом диапазоне частот.

Для решения этой задачи в диапазоне частот $f < 1$ ТГц была собрана установка терагерцовой спектроскопии временного разрешения на основе фемтосекундного эрбиевого волоконного лазера с длиной волны генерации 1,56 мкм, работающая в черенковской схеме генерации с интегрированной кремниевой призмой. В качестве детектора использовалась коммерческая фотопроводящая антенна на основе гетероструктуры, изготовленной из InGaAs. В диапазоне 1–5,5 ТГц измерения осуществлялись с помощью метода трехволновой интерферометрии спонтанного параметрического рассеяния света в схеме Юнга [1].

Исследовались кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$, выращенные методом Чохральского, с концентрациями легирующей примеси от 0 до 7,1 мол. % MgO. Для номинально чистого LiNbO_3 и кристалла, легированного магнием с «пороговой» концентрацией 5,1 мол. %, получены аппроксимирующие зависимости для диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega)$, учитывающие связывание терагерцовой поляритонной волны с релаксационной модой, а также вклад в диэлектрическую проницаемость дефектов решетки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (14-22-02091, 16-02-00258).

1. Бурлаков А.В., Мамаева Ю.Б., Пенин А.Н., Чехова М.В. Трехчастотная интерференция с участием поляритонов // ЖЭТФ. 2001. Т. 120. С. 67.

СЕГМЕНТНЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ПУЧКОВ

Г.Д. Богомолов¹, В.Д. Громов², В.В. Завьялов¹, А.А. Летунов³

¹ Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва

² Институт космических исследований РАН, Москва

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

При использовании в научных исследованиях [1] мощных когерентных терагерцовых источников излучения, таких как, например, лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) [2], необходимо уделить внимание вопросам формирования пучков для облучения исследуемого объекта. Предпочтительными для этого являются сплошные металлические отражатели ввиду их малого поглощения ТГц-излучения и высокой теплопроводности.

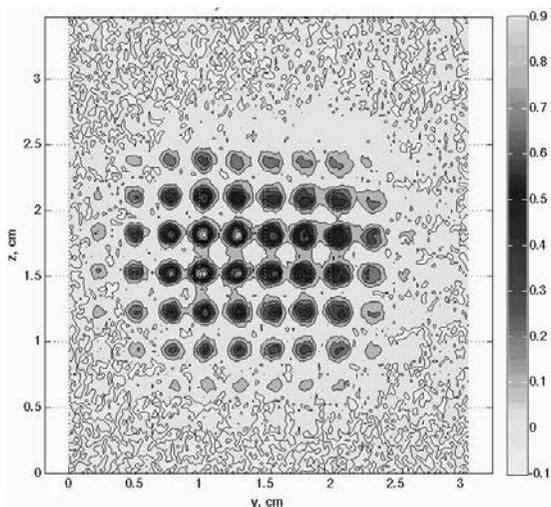
Описываются результаты расчета и измерений в ТГц-диапазоне распределения поля в фокусе металлического зеркала, составленного из плоских сегментов, довольно простого в изготовлении. Для удобства использования падающий пучок одновременно с фокусировкой поворачивается зеркалом на 90°.

Аппроксимирующей гладкой поверхностью сегментного зеркала является внешняя приэкваториальная область тора. Мозаичная поверхность конструктивно подразделена на сегменты, вытянутые в направлении оси тора. Формирователь размером ~140×200 мм состоит из семи одинаковых сегментов, изготовленных на электроэрозионном станке. Каждый сегмент является частью клина с углом при вершине 1°38', и его рабочая поверхность состоит из 7 трапециевидных площадок длиной 20 мм, ширина прямоугольной средней площадки 28,2 мм. В результате мозаичное зеркало состоит из 49 трапециевидных плоских зеркальных элементов, собранных вместе на специальной оправке. Каждый из сегментов касается в своем центре поверхности тора с большим и малым радиусами, равными 70 см. Равенство радиусов обеспечивает одновременно с фокусировкой поворот луча на 90°. Формирователь собирает пучок в перетяжку на расстоянии ≈ 0,5 м от вертикальной оси ТГц-пучка. Качество полученной поверхности было проконтролировано на интерферометре белого света Zygo5000 и оказалось вполне удовлетворительным для ТГц-диапазона.

Мы провели расчет распределения интенсивности в фокальной плоскости в приближении Гюйгенса – Френеля. Он достаточно адекватно отражает реальное распределение, что подтверждено экспериментальными измерениями (рисунок). Распределение интенсивности излучения в фокальной плоскости сегментного зеркала имеет заметную неравномерность. Однако пиковая интенсивность в «пятнах» на порядок ниже, чем при фокусировке внеосевым параболическим зеркалом с фокусным расстоянием 0,5 м. По оценкам, этого достаточно для того, чтобы избежать пробоя.

Измерения были проведены с однододовым H_2O -лазером [3], работавшим на длинах волн 118,6 и 220 мкм. Детекторы охлаждались жидким гелием. Коротковолновое излучение (118,6 мкм) детектировалось германиевыми кристаллами (Ge:V), а длинноволновое (220 мкм) – кристаллами InSb в резонансном магнитном поле [4].

Сканирование реализовалось с помощью электромеханической системы поставленного вертикально на переднюю торцевую стенку двухкоординатного самописца BRIANS. В его каретке был шарнирно закреплен входной торец лучевода, а на входные усилители подавались меандры от двух цифровых, управляемых ПК генераторов Agilent.



Результаты измерений распределения интенсивности пучка, сформированного сегментным зеркалом. Длина волны 118,6 мкм. Максимум интенсивности на рисунке равен единице, контуры интенсивности проведены через 0,1

1. *Богомолов Г.Д., Громов В.Д.* Экспериментальные исследования прохождения терагерцового излучения через взвешенную пыль. Постановка задачи и оценки // Генерация и применение терагерцового излучения : сб. трудов первого раб. совещания / отв. ред. Б.А. Князев. Новосибирск, 2006. С. 85-95.

2. *Винокуров Н.А.* Состояние дел и перспективы лазера на свободных электронах Сибирского центра фотохимических исследований // Там же. С. 5-10.

3. *Завьялов В.В., Богомолов Г.Д.* // ПТЭ. 1982. Вып 3. С. 174.

4. *Завьялов В.В., Зотова Е.М., Шампаров Е.И.* // ПТЭ. 2008. Вып 3. С. 109.

ДЛИННОВОЛНОВАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ HgCdTe

*С.В. Морозов¹, В.В. Румянцев¹, А.В. Антонов¹, К.Е. Кудрявцев¹,
А.А. Дубинов¹, А.М. Кадыков¹, С.А. Дворецкий², Н.Н. Михайлов²,
В.И. Гавриленко¹*

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

² Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

Получены рекордные (до 26 мкм) по длине волны спектры межзонной фотолюминесценции (ФЛ) в узкозонных эпитаксиальных слоях $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и исследована их зависимость от температуры. Показано, что температурное гашение фотолюминесценции в гетероструктурах с квантовыми и потенциальными ямами на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ выражено слабее по сравнению с объемными. В эпитаксиальных слоях и гетероструктурах с квантовыми ямами на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ исследования спектров фотолюминесценции при импульсном возбуждении показали, что время релаксации сигнала фотолюминесценции в структурах с квантовыми ямами увеличивается с ростом интенсивности накачки и достигает 5 мкс. В структурах с квантовыми ямами обнаружена узкая линия, связываемая с излучением на переходах между состояниями континуума и уровнем глубокого центра, связанного с вакансиями катионов в барьерах.

Получено стимулированное излучение в лазерных структурах с квантовыми ямами (КЯ) с диэлектрическим волноводом вплоть до рекордной длины волны 9,5 мкм. На основе пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с КЯ был произведен расчет дизайна волноводных структур специальной конструкции, предназначенных для усиления длинноволнового излучения в диапазоне длин волн 10–30 мкм, обеспечивающих локализацию ТЕ-моды около активного слоя.

Таким образом, полученные в работе результаты свидетельствуют о потенциале гетероструктур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ для создания длинноволновых лазеров.

ОПТИКО-ТЕРАГЕРЦОВАЯ КОНВЕРСИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ КАК МЕТОД ДИАГНОСТИКИ

И.В. Оладышкин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Проведено обобщение тепловой модели генерации терагерцового излучения с поверхности металлов под действием лазерных импульсов [1] на случай зависящей от температуры частоты столкновений электронов. Экспериментальная зависимость энергии терагерцового сигнала W_{THz} от энергии лазерного импульса W_{opt} [2] интерпретирована как следствие температурной зависимости частоты столкновений электронов. Получено выражение для интенсивности оптического поля, при которой функция $W_{THz}(W_{opt})$ переходит от квадратичного вида к экспоненциальному. На основе развитой модели предложен метод измерения константы a , характеризующей интенсивность электрон-электронного рассеяния и зависящей только от зонной структуры металла. Показано, что посредством экспериментального определения зависимости $W_{THz}(W_{opt})$ можно восстановить неизвестную зависимость эффективной частоты столкновений от температуры электронов $\nu(T)$ в диапазоне до единиц электрон-вольт.

Показано, что временная форма излучаемого низкочастотного сигнала позволяет восстановить динамику температуры электронов вблизи поверхности во время и после воздействия оптического излучения. Таким образом, сформулирован метод экспериментального наблюдения процессов перераспределения тепловой энергии в электронном газе на временах от десятков фемтосекунд до 1–2 пс, в том числе и в условиях аномальной теплопроводности. По имеющимся экспериментальным данным были выполнены оценки параметров электрон-электронного рассеяния в золоте и в меди, проведено сравнение с результатами других методов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ.

1. *Oladyshkin I.V., Fadeev D.A., Mironov V.A.* Thermal mechanism of laser induced THz generation from a metal surface // *J. Opt.* 2015. V. 17, № 7. P. 075502.
2. *Kadlec F., Kuzel P., Coutaz J.-L.* Optical rectification at metal surfaces // *Opt. Lett.* 2004. V. 29, № 22. P. 2674–2676.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

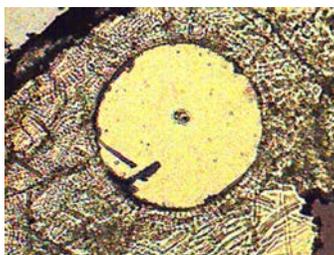
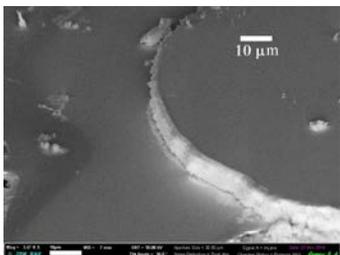
*Л. Ревин^{1,2,3}, А. Чигинев^{1,2,3}, Е. Вopilкин¹, Д. Мастеров¹, А. Парафин^{1,3},
С. Павлов¹, А. Тропанова^{1,3}, И. Шулепова¹, А. Панкратов^{1,2,3}*

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В докладе будет рассказано о развитии технологий изготовления образцов высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для создания перестраиваемых генераторов ТГц-диапазона частот. Будут описаны модификации технологии магнетронного напыления, позволившие получать образцы длинных джозефсоновских контактов YBCO на фианитовых бикристаллических подложках с высокими плотностями критических токов. Будет обсуждаться эффект асимметрии ВАХ из-за анизотропии подложки и его возможное влияние на мощность излучения [1]. Будет рассказано о развитии технологии жидкостного травления слоистых ВТСП BSCCO [2] и проведена характеристика полученных образцов.



Изображение меза-структуры BSCCO, полученной жидкостным травлением

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 15-02-05869) и Министерства образования и науки РФ (проект 3.2054.2014/К).

1. *Revin L.S., Chiginev A.V., Pankratov A.L., Masterov D.V., Parafin A.E., Luchinin G.A., Matrozkova E.A., Kuzmin L.S.* The effect of bias current asymmetry on the flux-flow steps in the grain boundary YBaCuO long Josephson junctions // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 114. P. 243903.

2. *Vopilkin E.A., Chiginev A.V., Revin L.S., Tropanova A.N., Shuleshova I.Yu., Okhapkin A.I., Shovkun A.D., Kulakov A.B., Pankratov A.L.* Quick and reliable technology for fabrication of stand-alone BSCCO mesas // *SUST.* 2015. V. 28. P. 045006.

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЁНКАХ LT-InGaAs, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ InP С ОРИЕНТАЦИЯМИ (100) И (411)

Г.Б. Галиев¹, Е.А. Климов¹, С.С. Пушкарёв¹, Г.Х. Китаева², К.А. Кузнецов²,
В.В. Корниенко²

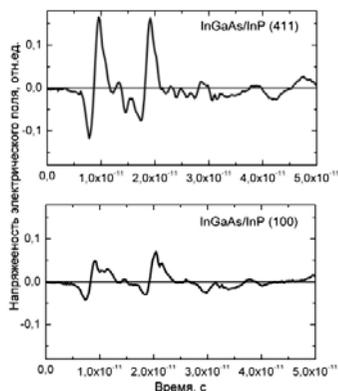
¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Москва

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Эпитаксиальный InGaAs, выращенный при пониженной температуре (low-temperature InGaAs, LT-InGaAs), благодаря крайне малому времени жизни фотовозбуждённых носителей заряда может быть использован для изготовления фотопроводящих антенн – генераторов и детекторов микроволнового и терагерцевого излучения. Преимущество LT-InGaAs над также используемым для этих целей LT-GaAs заключается в возможности использования для фотовозбуждения фемтосекундными импульсами более длинноволнового эрбиевого лазера (с длиной волны 1,56 мкм), во многом более доступного и удобного, чем более коротковолновый титан-сапфировый лазер. В настоящей работе исследуются плёнки $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ толщиной 1 мкм, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии при температуре 200 °С на подложках InP с различной кристаллографической ориентацией поверхности: (100) и (411). Для улучшения кристаллического совершенства плёнки были отожжены в потоке мышьяка при 500 °С в течение часа.

Источником оптической накачки служил Er^+ -волоконный лазер с длительностью импульсов 100 фс и частотой повторения 70 МГц. Через линию временной задержки излучение накачки заводилось на образец, средняя мощность излучения составляла 120 мВт. Терагерцевое излучение, генерируемое в 180-градусной геометрии плёнкой LT-InGaAs, собиралось двумя параболическими зеркалами и регистрировалось дипольной антенной в зависимости от времени задержки между импульсами накачки генератора и детектора.

Показано, что использование подложек с ориентацией (411) приводит к такой модификации кристаллической структуры плёнок LT-InGaAs, которая обеспечивает существенно большую интенсивность терагерцевого излучения (см. рисунок).



Временные зависимости
напряжённости терагерцевого поля

СПОНТАННОЕ КОГЕРЕНТНОЕ ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КОРОТКОГО ЭЛЕКТРОННОГО СГУСТКА В ОНДУЛЯТОРЕ В РЕЖИМЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ МАССЫ

Н. Балаль¹, И.В. Бандуркин², В.Л. Братман^{1,2}, А.В. Савилов²

¹ Ариэльский университет, Ариэль, Израиль

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Ряд важных физических приложений связывается в настоящее время с созданием перестраиваемого по частоте источника мощного ТГц-излучения. В их числе «pump-probe» эксперименты на рентгеновских ЛСЭ (например, в рамках проекта European XFEL). Важными требованиями, предъявляемыми к такому источнику, являются использование фотоинжекторной электронной пушки (что необходимо для синхронизации ТГц и рентгеновского источников), узкополосность спектра и фиксация фазы сигнала, а также возможность изменения («чирпирования») частоты в течение одного импульса. Один из сравнительно простых способов создания подобного источника может быть основан на использовании спонтанного когерентного излучения движущегося в ондуляторе электронного сгустка, длина которого не превышает длину волны. При этом длительность импульса излучения плотного сгустка и, соответственно, энергетика и ширина спектра ограничены, очевидно, быстрым кулоновским расплыванием сгустка. Так, для генерируемых в современных фотоинжекторах пикосекундных сгустков с зарядом порядка 1 нКл и сравнительно небольшой энергией частиц 3–6 МэВ характерная длина расплывания составляет ~ 10 см, т.е. всего несколько периодов ондулятора. Для предотвращения быстрого расплывания предложено использовать режим отрицательной массы, который может быть реализован в винтовом ондуляторе с сильным продольным однородным магнитным полем. При определенных условиях сильная зависимость осцилляторной скорости частиц от их энергии приводит к тому, что рост энергии частиц при их кулоновском расталкивании ведет к уменьшению их поступательной скорости и эффективному притяжению частиц в коротком сгустке. Согласно расчетам, стабилизация сгустков (а в модифицированных вариантах ондуляторов также и их компрессия) делает возможным создание ТГц-источника с длинным ондулятором. Для реализации идеи разработан и протестирован в моделирующем эксперименте ондулятор с сильным ведущим магнитным полем, основанный на перераспределении поля соленоида помещенной в него периодической винтовой ферромагнитной вставкой. При использовании такого ондулятора может быть реализован источник сравнительно длинноимпульсного и узкополосного ТГц-излучения, обладающий высоким (до 20 %) КПД.

Работа поддержана РФФИ, проект 16-02-00794.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ NbN-БОЛОМЕТРА НА ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНАХ

С. Селиверстов¹, А. Русова¹, Н. Каурова¹, Г. Гольцман^{1,2}

¹ Московский педагогический государственный университет

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

Использование излучения ТГц-диапазона в реальных практических приложениях в настоящее время сопряжено с рядом трудностей, связанных, прежде всего, с тем, что существующие источники ТГц-излучения являются маломощными и обладают низкой стабильностью либо сложны в эксплуатации и дорогостоящи. Это касается в первую очередь источников непрерывного ТГц-излучения, таких как квантово-каскадные и газоразрядные лазеры, умножители частот на полупроводниковых сверхрешетках и др.

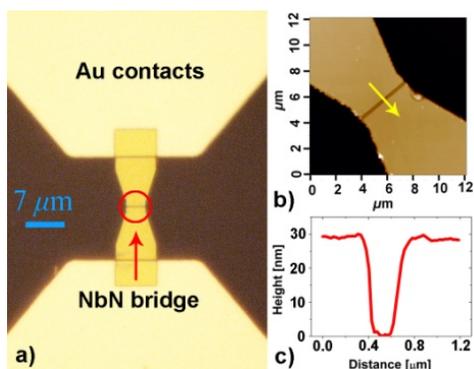
По этой причине одним из наиболее перспективных путей дальнейшего развития является разработка устройств на основе эффективных методов генерации импульсного ТГц-излучения (таких как метод оптического выпрямления или метод генерации разностной частоты в оптических нелинейных кристаллах), которые зачастую лишены указанных недостатков источников непрерывного ТГц-излучения.

Реально работающие на практике устройства, основанные на использовании импульсного ТГц-излучения, должны быть оснащены чувствительными и быстродействующими детекторами, позволяющими воспроизводить импульсы без искажения их формы.

В докладе представлен чувствительный и быстродействующий детектор с аттоджоулевым энергетическим разрешением, работающий при температуре около 10 К. Данный детектор может быть использован в ряде востребованных практических приложений, связанных с медициной и системами обнаружения наркотических и взрывчатых веществ, где требуется использование импульсного ТГц-излучения.

Детектор изготовлен на основе двухслойной структуры NbN-Au (толщина слоя NbN составляет 3,5 нм, толщина слоя Au – 15 нм), нанесенной на кремниевую подложку по технологии *in situ*, т. е. в едином технологическом процессе без разрыва вакуума. Чувствительный элемент болометра (участок структуры размерами $0,1 \times 1$ мкм², с которой стравлен слой Au) интегрируется с планарной логарифмической спиральной антенной. Измеренное значение оптической эквивалентной мощности шума детектора составляет $2,0 \cdot 10^{-13}$ Вт·Гц^{-0,5} на частоте излучения 2,5 ТГц [1]. Постоянная времени детектора составляет порядка 35 пс. Соответствующее значение энергетического разрешения – около 1,2 аДж.

Данное значение было подтверждено в дополнительном прямом измерении с использованием импульсного лазера с длиной волны излучения 1,55 мкм и длительностью импульса менее 50 пс. Для проведения данного эксперимента были изготовлены образцы болометров на кварцевой подложке, прозрачной для оптического излучения, что облегчало согласование болометра с оптическим волокном. На рисунке представлена фотография центральной части болометра, полученная с помощью оптического микроскопа, а также вертикальный профиль слоев, полученный с помощью микроскопа атомных сил. Поскольку механизм отклика болометра частотно независим, измеренное в данном эксперименте значение энергетического разрешения соответствует также ТГц-диапазону.



Изображение центральной части детектора, полученное с помощью: *a* – оптического микроскопа; *b*, *c* – микроскопа атомных сил

Эффективность представленного детектора продемонстрирована на примере регистрации импульсов ТГц-излучения наносекундной длительности, генерируемых методом оптического выпрямления в периодически поляризованном кристалле LiNbO₃ [2], а также при изучении эффекта генерации разностной частоты в нелинейном оптическом кристалле GaSe [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00622 мол_а.

1. Seliverstov S. *et al.* Fast and Sensitive Terahertz Direct Detector Based on Superconducting Antenna-Coupled Hot Electron Bolometer // Applied Superconductivity, IEEE Transactions on. – 2015. – V. 25, № 3. – P. 1-4.

2. Тучак А. Н. и др. Генерация терагерцовых импульсов наносекундной длительности методом оптического выпрямления // Письма в ЖЭТФ. – 2012. – Т. 96, № 2. – С. 97-101.

3. Angeluts A. A. *et al.* Compact 1.64 THz source based on a dual-wavelength diode end-pumped Nd: YLF laser with a nearly semiconfocal cavity // Laser Physics Letters. – 2014. – V. 11, № 1. – P. 015004.

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО МАССИВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ GaAs

*А.Д. Буравлев^{1,3}, И.А. Мустафин^{1,2}, В.Н. Трухин^{1,2}, Г.Э. Цырлин^{1,3},
J.P. Kakko⁴, T. Huhtio⁴, H. Lipsanen⁴*

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

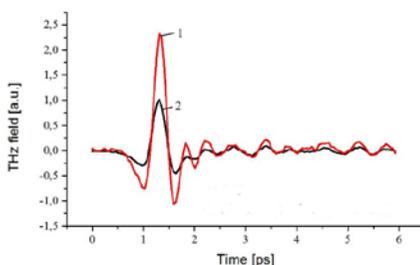
² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет РАН

⁴ Micronova, Aalto University, Finland

Обнаружена эффективная генерация терагерцового излучения в периодическом массиве полупроводниковых нитевидных нанокристаллов на основе GaAs при возбуждении сверхкороткими оптическими импульсами. Определены механизмы генерации, которые обусловлены быстрым движением фотовозбужденных носителей заряда в нанопроводах в поверхностном и контактном полях, а также амбиполярной диффузией фотовозбужденных носителей заряда. Установлено, что эффективность ТГц-генерации определяется усилением электромагнитного поля с помощью резонансного возбуждения вытекающих волновых мод (резонансы Ми) в нанокристалле и при оптимальных геометрических параметрах массива полупроводниковых нитевидных нанокристаллов превышает аналогичную величину для объемного полупроводника *p*-InAs, являющегося наиболее эффективным когерентным терагерцовым эмиттером [1].

Волновые формы терагерцовых импульсов, генерируемых в нитевидных нанокристаллах (1) ($d = 160$ нм, $a = 600$ нм) и от поверхности объемного полупроводника *p*-InAs (2)



Работа выполнена при поддержке РФФИ и гранта Президента России для ведущих научных школ.

1. Adomavičius R., Urbanowicz A., Molis G., Krotkus A., Šatkovskis E. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 2463.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ И ОПИСАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ РАСТВОРОВ БЕЛКОВ И САХАРОВ

О.П. Черкасова¹, М.М. Назаров², А.П. Шкуринов^{2, 3}

¹ Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

² Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура,
Московская область

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Работа посвящена исследованию водных растворов сахаров (глюкозы и фруктозы), белка (бычьего сывороточного альбумина, БСА) и их смесей методом импульсной терагерцовой (ТГц) спектроскопии. Определена наиболее простая модель диэлектрической проницаемости растворов этих веществ, которая с достаточной точностью описывает изменения в диапазоне 0,05–3,0 ТГц. Основная причина изменения ТГц отклика состоит в том, что при наличии сахаров или белков в растворе значительная часть молекул воды становится связанной. В таком предположении в работе исследуется изменение характеристик водного раствора. Излучение ТГц- и субТГц-диапазонов частот используется для диагностики относительных изменений концентраций и свойств воды, поскольку именно этим частотам соответствуют времена релаксации молекул воды [1]. Для повышения достоверности мы проводим измерения двумя независимыми методами: нарушенного полного внутреннего отражения и пропускания. Объединение результатов измерений в этих двух конфигурациях позволяет расширить используемый спектральный диапазон в сторону низких частот.

Показано, что изменение ТГц-отклика водных растворов с возрастанием концентрации растворенного вещества с достаточной точностью описывается изменением только в одном, основном дебаевском (гамма) процессе, который описывает «медленную» релаксацию молекул воды. Одним уменьшением амплитуды $\Delta\varepsilon_1$ (или увеличением времени τ_1) этого процесса можно количественно описать наблюдаемые изменения ТГц-отклика (как в отражении, так и в пропускании) в ТГц-диапазоне.

1. Dielectric relaxation in biological systems: Physical Principles, Methods, and Applications / Eds. V. Raicu, Y. Feldman. Oxford University Press, 2015. 464 p.

СПИН-ИНЖЕКЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА НА БАЗЕ ФЕРРОМАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ ТИПА «МЕТАПЕРЕХОД»

*Е.А. Вилков¹, Ю.В. Гуляев¹, П.Е. Зильберман¹, И.В. Маликов²,
Г.М. Михайлов², А.В. Черных², С.Г. Чигарев¹*

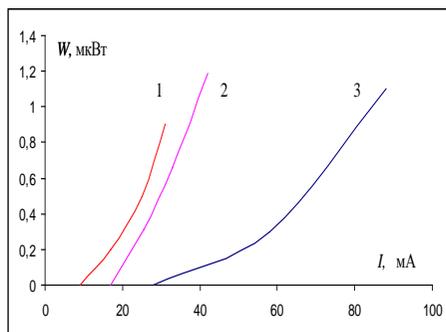
¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова

² Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,
Черноголовка, Московская область

В последнее время появился интерес к возможности создания источников электромагнитного излучения на принципах спинтроники. Процессы спинтроники протекают в особых средах – магнитных переходах, образованных различными магнитными и немагнитными слоями, характерные размеры которых, как правило, десятки нанометров. При прохождении тока в магнитном переходе происходит разделение неравновесных свободных электронов по спин-энергетическим подзонам, приводящее при определенных плотностях тока к инверсной заселенности энергетических подуровней [1]. Последнее приводит к излучательным межподзонным квантовым переходам с переворотом спина [2]. Наиболее наглядно этот механизм проявляется в спиновых лазерах, где расщепление по спиновым подзонам происходит под действием внешнего магнитного поля (эффект Зеемана) [3]. Кроме этого, интенсивно исследуются ферромагнетики, в которых расщепление спиновых подзон свободных электронов происходит из-за *sd*-обменного взаимодействия без использования внешних источников магнитного поля [2, 4]. Подобные процессы лежат в основе работы спин-инжекционных генераторов ТГц-диапазона.

Спин-инжекционные генераторы можно отнести к классу квантовых генераторов с токовой накачкой. До настоящего времени экспериментально исследовались спин-инжекционные ТГц-генераторы на основе магнитного перехода из диффузного точечного контакта (конструкция «стержень – пленка»), в котором, как считалось, критично распределение намагниченности разных областей вдоль распространения спинового потока. Намагниченности соседних магнитных областей должны быть (предпочтительно) антипараллельны или близкими к такому состоянию. Генерируемое под действием тока излучение наблюдалось в диапазоне частот 8–40 ТГц при максимальном уровне генерации до 10 мВт [3]. Проведенные в последнее время расчеты показали, что есть возможность спин-инжекционного генерирования в магнитных переходах при произвольном изменении намагниченностей граничных областей, через которые проходит электрический ток. Тем самым сняты жесткие требования к характеру распределения магнитного поля. Кроме этого, установлен один из механизмов управления частотой

спин-инжекционного генератора с помощью изменения угла между намагниченностями в соседних областях. Экспериментальное подтверждение этому было получено при использовании монокристаллической ферромагнитной структуры типа «метапериод» [5]. Установлена магнитная природа наблюдаемого ТГц-излучения при прохождении тока в такой структуре (см. рисунок). Экспериментально проведено сравнение работы такой структуры с ранее исследованной структурой типа «стержень – пленка». Показана практическая значимость полученных результатов для наблюдения лазерного эффекта в ТГц-диапазоне частот (твизер) на базе «метапериода».



Зависимость мощности, генерируемой терагерцевым спин-инжекционным генератором с «метапериодом» и магнитными контактными площадками от тока. «Метапериод» с ферромагнитными столбиками: 1 – с подмагничиванием, 2 – без подмагничивания, 3 – без ферромагнитных столбиков

Работа выполнена при поддержке РФФИ и программ РАН РФ.

1. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Эпштейн Э.М., Элиот Р. Дж. Инжекция спинов током в магнитных переходах металл-металл // РЭ. 2003. Т. 48, № 9. С. 1030–1044.

2. Kadigrobov A., Shtrhter R.I., Jonson M. Novel laser based on the magnetic tunneling // Fizika Nizkikh Temperatur. 2005. V. 31, № 3/4.

3. Виглин Н.А., Устинов В.В., Осипов В.В. Спиновый инжекционный мазер // Письма в ЖТЭФ. 2007. Т. 86, вып. 3. С. 221–225.

4. Naidyuk Yu.G., Balkashin O.P., Fisun V.V., Yanson I.K., Kadigrobov A., Shekhter R., Jonson I.M., Neu V., Seifert M., Andersson S., Korenivski V. Stimulated emission and absorption of photons in magnetic point contacts // New J. Physics. 2012. V. 14. P. 093021.

5. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Маликов И.В., Михайлов Г.М., Панас А.И., Чигарев С.Г., Эпштейн Э.М. Инжекция спинов током и терагерцевое излучение в ферромагнитных переходах // ДАН. 2011. Т. 438, № 1. С. 1–3.

6. Вилков Е.А., Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Маликов И.В., Михайлов Г.М., Панас А.И., Черных А.В., Чигарев С.Г. Спин-инжекционный терагерцевый генератор на базе монокристаллической структуры типа «метапериод» // РЭ. 2015. Т. 60, № 9. С. 1–5.

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ В ГАЗОВЫХ И ГАЗОВО-НАНОКЛАСТЕРНЫХ СРЕДАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОЩНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

*А.В. Балакин¹, В.М. Гордиенко¹, М.С. Джиджоев¹, М.Н. Есаулков²,
И.А. Жвания¹, К.А. Иванов¹, Н.А. Кузечкин²,
И.А. Ожередов¹, А.Б. Савельев-Трофимов¹, П.М. Солянкин¹,
А.П. Шуринов^{1,2}*

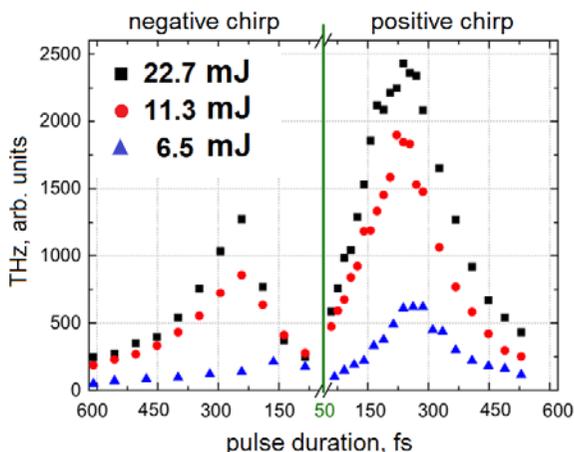
¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Физический факультет и международный лазерный центр

² Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН,
Шатура, Московская область

Большое внимание в настоящее время вызывают исследования нелинейных процессов, возникающих при воздействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения на нанокластеры атомов или молекул. В настоящей работе мы представляем результаты экспериментального исследования генерации терагерцового (ТГц) излучения в сверхзвуковых струях газовых кластеров с использованием мощных импульсов фемтосекундной длительности. В нашей работе мы использовали метод создания нанокластеров, основанный на конденсации газа при его сверхзвуковом расширении через импульсное сопло в вакуум [1]. Мы использовали для приготовления кластеров инертные газы – Ar, Ne и CF₂Cl₂, а также смеси газов CF₂Cl₂ + Ne и Ar + Ne. Образованные при этом кластеры являются уникальными физическими объектами в том числе и с точки зрения создания источника широкополосного электромагнитного излучения от рентгеновского до терагерцового при воздействии на них высокоинтенсивного ($I > 10^{15}$ Вт/см²) фемтосекундного лазерного излучения [2]. Кластерная мишень объединяет в себе преимущества твердотельной и газообразной мишеней и может поглощать до 95 % энергии взаимодействующего с ней лазерного излучения. Кластерная наноплазма, возникающая под действием интенсивного фемтосекундного лазерного излучения, обладает ярко выраженными нелинейно-оптическими свойствами: распространение фемтосекундного лазерного излучения в ней сопровождается филаментацией [3], генерацией характеристического рентгеновского излучения и терагерцового излучения [4]. Анализ свойств электромагнитного излучения из кластерной наноплазмы позволяет получать информацию о динамике процессов, происходящих в них после фотовозбуждения. В этой связи одной из интересных и актуальных проблем является одновременное изучение генерации характеристического рентгеновского и терагерцового излучений из кластерной наноплазмы в одном эксперименте.

В нашей работе мы анализируем две экспериментальные схемы генерации терагерцового и рентгеновского излучений – одночастотную и двухчастотную (основное излучение смешивается с его второй гармоникой). Мы изучили зависимости параметров терагерцового излучения от множества принципиальных экспериментальных параметров, таких как длительность и энергия лазерного импульса, давление и состав газовой смеси при формировании кластерной наноплазмы и других. Одновременно с исследованием свойств терагерцового излучения мы исследовали рентгеновское излучение которое является результатом взаимодействия лазерного излучения с кластерной средой.

Проведенные эксперименты дали обильную информацию для развития модели взаимодействия мощного фемтосекундного излучения с нанокластерной средой. Нами было установлено, что мощность характеристического рентгеновского излучения максимальна для частотно-ограниченного лазерного импульса (т.е. для импульса минимальной длительности 50 фс), однако мощность ТГц-излучения максимальна для импульсов с длительностью порядка 150–200 фс. Зависимость интенсивности ТГц-излучения от длительности лазерного импульса изображена на рисунке.



Зависимость интенсивности ТГц-излучения из кластеров Ag от длительности лазерного импульса и знака «чирпа» для различных энергий лазерных импульсов в однопучковой схеме возбуждения

Мы предполагаем, что за время лазерного импульса значительная доля атомов отдельного кластера успевает ионизоваться до весьма значительных значений зарядового числа Z (число электронов, вырванных из атома), а разлет вещества кластера и соответствующий процесс генерации ТГц-излучения происходит после прохождения лазерного импульса. В настоящее время проводятся теоретические расчеты и дополнительные эксперимен-

тальные исследования, которые направлены на выяснение взаимосвязи между генерируемыми ТГц и рентгеновским излучениями.

1. *Hagena O.F.* Cluster Formation in Expanding Supersonic Jets: Effect of Pressure, Temperature, Nozzle Size, and Test Gas // *J. Chem. Phys.* 1972. Vol. 56, № 5. P. 1793.

2. *Posthumus J.* Molecules and Clusters in Intense Laser Fields. Cambridge : Cambridge University Press, 2001. 261 p.

3. *Alexeev I., Antonsen T., Kim K., Milchberg H.* Self-Focusing of Intense Laser Pulses in a Clustered Gas // *Phys. Rev. Lett.* 2003. Vol. 90, № 10. P. 103402.

4. *Nagashima T., Hirayama H., Shibuya K., Hangyo M., Hashida M., Tokita S., Sakabe S.* // *Opt. Express.* 2009. Vol. 17. P. 8807.

ДВУХВОЛНОВЫЙ МАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ ТЕРАГЕРЦОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

*Ю.С. Опарина^{1,2}, Н.Ю. Песков¹, А.В. Савилов¹,
А.К. Каминский³, С.Н. Седых³, Э.А. Перельштейн³, Н. Балаль¹*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская область

Мазеры на свободных электронах (МСЭ) на основе интенсивных релятивистских электронных пучков (РЭП) остаются одними из наиболее мощных источников импульсного микроволнового излучения. В совместных экспериментах ОИЯИ и ИПФ РАН на базе ускорителя ЛИУ-3000 реализован узкополосный высокоэффективный МСЭ с брегговским резонатором. Для продвижения этого МСЭ в более коротковолновые диапазоны длин волн привлекательно использовать «скаттронные» режимы взаимодействия, в которых в качестве раскачки электронов используется не периодическое поле магнитостатического ондулятора (убитрон), а высокочастотная встречная волна (скаттрон). Рассмотрены параметры электронного пучка, реализуемого в ЛИУ-3000. При энергии электронов 800 кэВ и периоде магнитостатического ондулятора 6 см длина волны генерации в МСЭ составляет примерно 1 см. Для продвижения этого МСЭ в диапазон длин волн 0,3 мм (что соответствует частоте 1 ТГц) при условии использования того же магнитостатического ондулятора необходимо увеличить энергию электронов почти на порядок, т.е. до 7 МэВ. Однако при использовании для раскачки электронов СВЧ-волны (с длиной волны 1 см) терагерцовый диапазон оказывается достижим при той же энергетике электронного пучка (800 кэВ).

Еще одна сложность при реализации скаттронного МСЭ – необходимость мощного источника волны накачки – решается в данной работе ис-

пользованием оригинальной схемы, в которой для генерации как низкочастотной волны накачки, так и высокочастотной волны рассеяния в скаттроне используется один и тот же электронный пучок. Электронный пучок сначала проходит сквозь рабочее пространство скаттрона, а потом – через рабочее пространство убитрона. Возбуждаемая в убитроне низкочастотная волна посылается назад в скаттрон и используется там в качестве волны накачки. Основным результатом работы является демонстрация принципиальной возможности и привлекательности реализации такого двухволнового источника мощного (на уровне нескольких сотен киловатт) когерентного терагерцового излучения при относительной высоте (процент и выше) электронном КПД и компактности электродинамической системы.

Работа частично финансируется Российским фондом фундаментальных исследований (проект 13-02-01037).

**ИСТОЧНИКИ
МОЩНОГО
МИКРОВОЛНОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

ГЕНЕРАЦИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ МОЩНЫХ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В ЭЛЕКТРОННЫХ СВЧ-ГЕНЕРАТОРАХ С ПРОСВЕТЛЯЮЩИМСЯ ПОГЛОТИТЕЛЕМ В ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Н.С. Гинзбург, Г.Г. Денисов, М.Н. Вилков, И.В. Зотова, А.С. Сергеев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Предложен и теоретически исследован метод генерации мощных ультракоротких микроволновых импульсов на основе широкополосных электронных усилителей, в цепь обратной связи которых включен нелинейный насыщающийся поглотитель. Подобные системы, в которых, фактически, реализуется метод пассивной синхронизации мод, хорошо известны в физике лазеров, однако до настоящего времени не были реализованы в устройствах мощной вакуумной электроники. Возможность импульсной генерации была продемонстрирована на основе как общей модели электронных усилителей с преобладающей инерционной группировкой частиц [1], так и на основе модели giro-ЛБВ с рабочим пространством в виде регулярного [2] или винтового волновода. Для поглотителя использовались как типичная для лазерных систем безынерционная модель с насыщающейся нелинейностью, так и более реалистичная модель резонансного циклотронного поглощения излучения прямолинейным электронным пучком в дополнительной секции. На основе численного моделирования показано, что мощность формирующихся импульсов может существенно превышать мощность стационарных режимов генерации, а в ряде случаев и мощность запитываемого электронного потока. Предлагаемая схема генерации ультракоротких импульсов носит достаточно универсальный характер и применима к широкому классу электронных усилителей, работающих в различных диапазонах от сантиметрового до субмиллиметрового и запитываемых пучками как релятивистских, так и субрелятивистских энергий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-08-04506-а.

1. *Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Вилков М.Н., Зотова И.В., Сергеев А.С.* Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в лампе бегущей волны с просветляющимся поглотителем в цепи обратной связи // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, № 17. С. 44-52.

2. *Вилков М.Н., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Зотова И.В., Сергеев А.С.* Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в giro-ЛБВ с просветляющимся циклотронным поглотителем в цепи обратной связи // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 8. С. 664-673.

ГИРОПРИБОРЫ: ДОСТИЖЕНИЯ И НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В РАЗРАБОТКЕ

Г.Г. Денисов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Гироприборы являются наиболее мощными источниками СВЧ-излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Основное использование мегаваттных гиротронов – локальный нагрев плазмы в установках УТС. Гироприборы применяются также в разнообразных технологических установках (спекание керамики, выращивание CVD-алмазов, генерация многозарядных ионов), в радиолокации и связи, диагностике плазмы и других сред, спектроскопии...

В разработке мегаваттных гиротронов наибольшие усилия приложены к созданию источников для международного проекта ИТЭР. В последних прототипах гиротронов продемонстрированы требуемые характеристики 170 ГГц, 1 МВт, 1000 с, КПД 53 %. Завершено создание и продемонстрирована работоспособность *прототипа гиротронного комплекса для ИТЭР*, включающего гиротрон, сверхпроводящий магнит, вспомогательные магниты, источники питания, систему охлаждения, систему управления и другие вспомогательные системы.

Широкополосные усилители (гирос-ЛБВ) обеспечивают выходную мощность 150 кВт в импульсном режиме в Ka -диапазоне. Непрерывная гирос-ЛБВ обеспечивает мощность до 8 кВт при полосе 2 ГГц по уровню –1 дБ. Реализация схемы с рекуперацией энергии позволяет получить электронный КПД 30–40 %. Разрабатываются гирос-ЛБВ для работы в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн: гирос-ЛБВ W -диапазона с уровнем импульсной мощности десятки киловатт и шириной полосы до 7 ГГц, перспективную для систем радиолокации высокого разрешения и гирос-ЛБВ и гирос-ЛБВ на центральную частоту 260 ГГц с параметрами (непрерывная мощность несколько сотен ватт, полоса 5–6 ГГц), привлекательными для спектроскопических приложений.

Среди новых направлений разработок гиротронов стоит отметить исследование захвата осцилляций прибора внешним сигналом, что позволяет обеспечить работу генератора на очень высоких модах, стабилизировать частоту при нестабильных параметрах высоковольтных источников, повысить КПД. Стабилизация фазы излучения генератора внешним сигналом представляется перспективной также для создания большого числа когерентных источников и сложения мощностей нескольких гиротронов. Исследуется возможность формирования периодической последовательности ультракоротких импульсов в гирос-ЛБВ с нелинейным поглотителем в цепи обратной связи.

ГЕНЕРАЦИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СВЧ-ПОЛЕЙ ПРИ КОГЕРЕНТНОМ СЛОЖЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕНКОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ С РЕЛЯТИВИСТСКИМИ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

*М.И. Яландин¹, Н.С. Гинзбург², А.А. Голованов², А.А. Ельчанинов³,
И.В. Зотова², И.В. Романченко³, В.В. Ростов³, М.Р. Ульмаскулов¹,
К.А. Шарыпов¹, С.А. Шунайлов¹*

¹ Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

³ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

В работе систематизированы результаты, полученные в развитие концепции квадратичного наращивания плотности потока мощности микроволновых пучков из-за когерентного суммирования в свободном пространстве полей нескольких сильноточных электронных автогенераторов (релятивистских ЛОВ) без электродинамической связи. Рассмотрена нелинейная динамика активации взрывоэмиссионных катодов, объясняющая формирование параллельных сильноточных электронных пучков со стабильными идентичными субнаносекундными фронтами – источниками затравочного сигнала для фазированного возбуждения автономных субгигаваттных ЛОВ. Приведены данные теоретического анализа процесса установления СВЧ-колебаний в различных режимах генерации, стартующей с затравочного сигнала – спонтанного излучения фронта тока. Для случая сверхкороткого внешнего затравочного СВЧ-сигнала в численном эксперименте проанализирован эффект захвата фазы излучения ЛОВ, что показывает перспективу существенного увеличения синфазных генераторных каналов.

В экспериментах продемонстрирована четырёхканальная 8-мм сверхизлучательная ЛОВ с возбуждением токовыми фронтами, которая при мощности каждого канала 600 МВт обеспечила 16-кратное увеличение плотности потока мощности в главном максимуме интерференционного волнового пучка.

Для случая квазистационарной генерации многоканальной ЛОВ анализируется эффект суммирования полей волновых пучков со сдвинутыми частотами. Такой режим суммирования приводит к сверхбыстрому угловому сканированию радиационного максимума в параксиальной области диаграммы, где плотность потока мощности увеличена квадратично числу источников.

Работа выполнена в развитие тем ИЭФ УрО РАН № 0389-2014-0005 и 15-17-2-47, а также при частичной поддержке РФФИ (гранты 14-08-01180, 14-08-00111 и 16-02-00029).

**СИСТЕМА «РЕЛЯТИВИСТСКИЙ
ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК – ПЛАЗМА»
КАК ИСТОЧНИК МОЩНОГО СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО
И ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
(ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ)**

И.В. Тимофеев, А.В. Аржанников

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

В работе представлен обзор последних результатов, полученных в экспериментах по наблюдению эмиссии электромагнитных волн из турбулентной замагниченной плазмы на открытой ловушке ГОЛ-3 при инжекции в неё сильноточного релятивистского электронного пучка. Исследованы спектральные, поляризационные и угловые характеристики выходящего из плазмы излучения в диапазоне 0,1–0,5 ТГц при различных режимах пучково-плазменного взаимодействия.

С помощью аналитической теории и численного моделирования исследованы способы повышения эффективности генерации электромагнитных волн в этих экспериментах за счёт линейной конверсии наиболее неустойчивых пучковых мод на специально создаваемых возмущениях плотности плазмы. В двумерном численном моделировании методом частиц в ячейках показано, что инжекция релятивистского пучка в тонкую плазму с продольной модуляцией плотности может приводить к весьма эффективному (до 10 %) преобразованию мощности пучка в мощность излучения. Установлено, что плазма в таком режиме излучает как антенна, а соотношение между периодом модуляции и длиной пучковой волны однозначно фиксирует угол излучения. Расчёты с инжекцией пучка в первоначально однородную плазму показали, что такая квазипродольная модуляция плотности может нарастать самосогласованно в процессе развития модуляционной неустойчивости доминирующей пучковой волны. Нелинейная стадия этой неустойчивости сопровождается захватом плазменных колебаний в нарастающие ямы плотности плазмы, внутри которых автоматически выполняется условие эффективного излучения плазменной антенны. В таком режиме излучение сосредоточено вблизи плазменной частоты, выходит преимущественно поперёк плазмы и достигает эффективности 4 %.

Работа выполнена при поддержке РФН (грант 14-12-00610) и РФФИ (грант 15-32-20432).

ГИРОТРОН, ОСНОВАННЫЙ НА ВОЗБУЖДЕНИИ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ В РЕЗОНАТОРЕ С ФАЗОВЫМИ КОРРЕКТОРАМИ

И.В. Бандуркин, Ю.К. Калынов, И.В. Ошарин, А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Предложена и теоретически исследована схема гиротрона, основанная на возбуждении в длинном цилиндрическом резонаторе волны, относительно далекой от отсечки, и периодической корректировке ее фазы на локальных расширениях стенки резонатора. Согласно расчетам, в терагерцовом гиротроне на высокой циклотронной гармонике данная схема может обеспечить значительное снижение омических потерь благодаря существенно меньшей дифракционной добротности далекой от отсечки волны по сравнению с основной квазикритической модой. Расширения волновода при этом помогают, во-первых, подавить возбуждение квазикритической моды, которая в обычном резонаторе имеет преимущество, а в данной схеме деструктивно искажается на фазовых корректорах, и, во-вторых, уменьшить чувствительность бегущей волны к скоростному разбросу в пучке.

Численное моделирование проводилось для схемы, нацеленной на реализацию слабoreлятивистского гиротрона на четвертой циклотронной гармонике. Предполагалось, что рабочей модой является мода $TE_{4,8}$ с групповой скоростью, соответствующей моде $TE_{4,8,3}$ цилиндрического резонатора, а форма и положение фазовых корректоров, и, как следствие, продольная структура рабочей моды, были оптимизированы для достижения максимального КПД. Согласно расчетам, дифракционная добротность рабочей моды составляет около 20 000, что при омической добротности 10 000 позволяет вывести из резонатора треть всей излучаемой пучком мощности. С учетом того что электронный КПД в этой схеме лишь на треть уступает КПД возбуждения квазикритической моды цилиндрического резонатора (2 % против 3 % в традиционной схеме при одинаковом стартовом токе), а дифракционная добротность последней превышает для требуемой длины резонатора 100 000, схема с коррекцией фазы обеспечивает трехкратный выигрыш в выходной мощности по сравнению с традиционной схемой и позволяет при токе 0,7 А получить около 120 Вт на частоте 520 ГГц. Кроме того, расчеты подтвердили очень низкую чувствительность режима генерации к скоростному разбросу электронов, а также к ошибкам изготовления фазовых корректоров – наибольшая точность, требуемая при этом, не превышает 0,02 мм. Изготовление и экспериментальное исследование данного резонатора должно начаться в ближайшее время.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 14-02-00594 и 15-42-02260).

ОПТИМИЗАЦИЯ РОЕМ ЧАСТИЦ: ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ВОЛН

А.А. Богданов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Оптимизация роём частиц в многомерном пространстве параметров основана на движении агентов (частиц) в соответствии с правилами [1]:

$$\begin{aligned}\tilde{V}_j &= V_j + C_g \cdot (X_g - X_j) + C_p \cdot (X_{p_j} - X_j), \\ \tilde{X}_j &= X_j + \tilde{V}_j,\end{aligned}\quad (1)$$

где V_j – скорость j -агента, X_j – координаты агента, X_g – координаты текущего наилучшего состояния, X_{p_j} – координаты текущего персонального оптимального состояния j -агента. Оптимизация профиля преобразователей роём частиц находит широкое применение при разработке волноводных компонентов: волноводных переходов, уголков, изгибов, излучающих рупоров. В работе обсуждаются подходы, обеспечивающие высокую скорость и эффективность оптимизации. Для примера на рис. 1 показана сходимость процедуры оптимизации для преобразователя моды TE11 в моду TE01 круглого волновода. Профиль преобразователя показан на рис. 2.

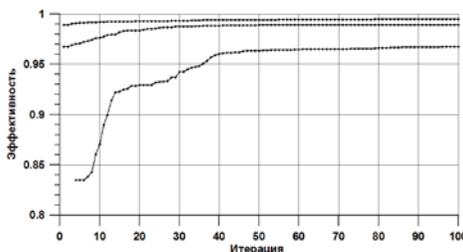


Рис. 1. Сходимость алгоритма оптимизации роём частиц. Параметры: число узлов сплайн-функции – 11, число частиц в роём – 20. Оптимизация с рестартом

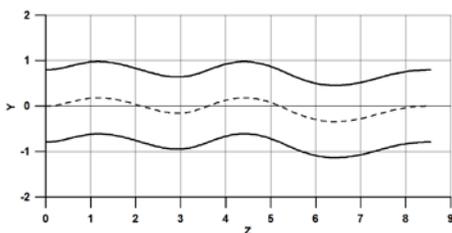


Рис. 2. Профиль оптимизированного преобразователя мод TE11-TE01. Диаметр волновода – $1,6\lambda$, длина преобразователя – $8,6\lambda$. Эффективность – 0,995

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-02-00243.

1. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // Proc. of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. IEEE Press, 1995. P. 1942–1948.

ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.П. Гаштури, Г.Г. Денисов, Д.И. Соболев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Многомодовые волноводы широко используются для передачи микроволнового излучения высокой мощности во многих приложениях, таких как нагрев плазмы. Для многомодовых линий передач нужны компоненты преобразования одного распределения поля в другое, специально подобранное. Задача синтеза волноводных преобразователей есть обратная задача расчету полей в подобных системах и может иметь не единственное решение, которое может и не удовлетворять всем аспектам задачи. Многие ранее используемые методы синтеза (такие как метод градиентного спуска, роя частиц и генетические алгоритмы) требовали огромных вычислительных ресурсов, и часто синтезируемое устройство обладало низким коэффициентом трансформации мод или большими размерами. Количество расчетов полей в подобных методах значительно растет с ростом свободных параметров задачи и может достигать тысяч.

В этой работе представлен метод синтеза волноводных преобразователей высокой эффективности с совершенно новыми свойствами. Для поиска волноводного профиля, преобразующего известное (входное) распределение поля в требуемое (выходное), предложен итерационный процесс, в котором на каждой итерации производится два расчета полей: прямой (от входа к выходу) и обратный (от выхода к входу), имеющий своим источником как раз требуемое выходное распределение. Суперпозиция полей этих двух расчетов на стенке волновода и дает поправку профиля преобразователя на каждой итерации. Число же итераций для данного метода редко превышает нескольких десятков.

Мы предлагаем использовать данный метод синтеза с методом расчета полей с помощью интегрального уравнения для поверхностного тока (EFIE). Во-первых, это один из самых точных методов расчета полей (векторное интегральное уравнение выводится напрямую из уравнений Максвелла), автоматически учитывающий внутреннее отражение в преобразователе и многие другие возможные паразитные эффекты. К тому же он не так требователен к компьютерным ресурсам, как метод конечных элементов (например, FDTD). Во-вторых, искомой функцией уравнения EFIE является распределение поверхностного тока на стенке преобразователя, которое мгновенно переписывается в терминах электромагнитных полей на стенке, требуемых для процедуры синтеза. Начальный профиль может быть задан как недеформированный волновод (в общем случае) или волновод с приближенным (например, сосчитанным на основе синтеза с методом возмущений) профилем.

ИНИЦИАЦИЯ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ СПОНТАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ФРОНТА ИМПУЛЬСА ТОКА

Н.С. Гинзбург¹, А.А. Голованов¹, И.В. Зотова¹, М.И. Яландин²

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

²Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Разработана теоретическая модель [1], которая описывает трансформацию спонтанного излучения (под которым понимается излучение резкого фронта токового импульса) в индуцированное черенковское излучение. В рамках этой модели электронный пучок конечной длины, движущийся в гофрированном волноводе, разбивается на отдельные макроэлектроны, взаимодействующие между собой через поля излучения и поля пространственного заряда. Процесс инициируется спонтанным излучением переднего фронта токового импульса. Далее возникает группировка электронов, в результате чего первоначальный электромагнитный импульс растет по амплитуде и сокращается по длительности. Формирующийся таким образом импульс сверхизлучения (СИ) по мощности многократно (на несколько порядков) превосходит мощность спонтанного излучения. Разработанная модель позволяет описать привязку фазы импульса СИ к фазе внешнего затравочного импульса относительно малой амплитуды

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №14-08-01180.

1. *Ginzburg N.S., Cross A.W., Golovanov A.A. et al.* Generation of Electromagnetic Fields of Extremely High Intensity by Coherent Summation of Cherenkov Superradiance Pulses // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115, № 9. P. 114802-1 – 114802-5.

ВЫСОКОПОЛЬНЫЕ КРИОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ CRYOGEN-FREE ДЛЯ ГИРОТРОНОВ

Е.И. Демихов, Т.Е. Демихов, Е.А. Костров, В.В. Лысенко

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

ООО «РТИ, Криомагнитные системы», Москва

Применение криогенных рефрижераторов замкнутого цикла позволяет обеспечить работу сверхпроводящих соленоидов без дорогостоящих криогенных жидкостей. Кроме того, криомагниты на основе замкнутого цикла охлаждения примерно в три раза компактнее, чем заливные системы на основе жидкого гелия. Нашей рабочей группой создана серия сверхпроводящих магнитных систем для гиротронов на основе криогенных рефрижераторов с полями 5–15 Тл.

В работе подробно представлена криомагнитная система для гиротрона с напряженностью магнитного поля в центре 10 Тл. Диаметр отверстия комнатной температуры составляет 80 мм. Сверхпроводящий магнит состоит из двух секций. Внешняя секция изготовлена из сверхпроводника на основе NbTi, внутренняя секция из сверхпроводника на основе Nb₃Sn. Длина участка с однородностью магнитного поля 0,3 % составляет 30 мм. Спад напряженности магнитного поля до 5 % от максимального на оси системы обеспечивается на расстоянии 310 мм от центра. Конструкция криомагнита позволяет размещать гиротрон на верхнем фланце криомагнита. Сверхпроводящий магнит находится в вакууме и охлаждается с помощью криорефрижератора Гиффорда – Мак-Магона.

ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В СВЕРХРАЗМЕРНЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ВОЛНОВОДАХ

*Н.С. Гинзбург¹, А.М. Малкин¹, И.В. Зотова¹, И.В. Железнов¹,
В.Ю. Заславский¹, А.С. Сергеев¹, К.А. Шарыпов², С.А. Шунайлов²,
Р.М. Ульмаскулов², М.И. Яландин²*

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

²Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Для генерации мультимегаваттных субнаносекундных импульсов в коротковолновой части миллиметрового диапазона предложено использовать эффект черенковского сверхизлучения (СИ) протяженных электронных сгустков, прямолинейно движущихся в сверхразмерных гофрированных волноводах (рис. 1). Теоретический анализ указанного процесса проведен как в рамках развитого квазиоптического подхода [1], так и с использованием прямого PIC (particles in cell) моделирования.

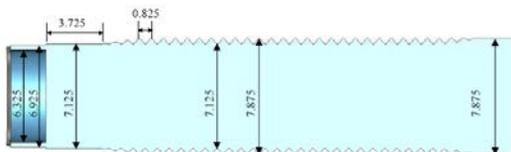


Рис. 1. Замедляющая структура на основе сверхразмерного гофрированного волновода

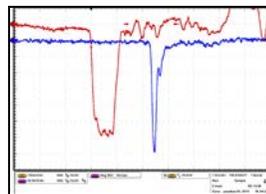


Рис. 2. Ускоряющий импульс и импульс черенковского СИ диапазона 150 ГГц

В экспериментах на основе ускорителя РАДАН с дополнительным блоком временной компрессии ускоряющего импульса до -300 кВ в близком к расчетному режиме получены импульсы СИ с центральной частотой 150 ГГц и длительностью по полувысоте 180 – 200 пс (рис. 2). По предварительным оценкам в детекторных измерениях интегральная мощность излучения составила не менее 50 – 70 МВт, что существенно превосходит уровень мощности импульсов СИ, полученных в этом диапазоне ранее при использовании малоразмерных одномодовых волноводов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 14-08-01180.

1. *Ginzburg N.S., Malkin A.M., Sergeev A.S., Zotova I.V., Zaslavsky V.Yu., Zhelez-nov I.V.* 3D Quasioptical Theory of Terahertz Superradiance of an Extended Electron Bunch Moving Over a Corrugated Surface // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110, № 18. P. 184801-1 – 184801-4.

НЕКАНОНИЧЕСКИЕ ГИРОТРОНЫ

В.Е. Запевалов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Научный поиск в 60-х годах минувшего века привел к созданию целого ряда гирорезонансных устройств, принцип действия которых основан на синхронном взаимодействии криволинейного электронного пучка и электромагнитной волны: совокупное действие релятивистских эффектов и неоднородности высокочастотного поля приводит к вынужденному циклотронному излучению на гирочастоте и ее гармониках [1]. Канонический гиротрон (КГ) содержит адиабатическую магнетронно-инжекторную электронную пушку (МИП), формирующую трубчатый винтовой электронный пучок (ВЭП), слабонерегулярный, сверхразмерный цилиндрический резонатор, систему вывода излучения и коллектор электронного пучка (часто с рекуперацией). Для производства КГ благоприятны аксиальная симметрия и отсутствие мелкомасштабных элементов. За минувшие годы созданы мощные высокоэффективные гиротроны от сантиметрового до субмиллиметрового диапазонов [1–3] и сформировался ряд фундаментальных научных направлений, успешное развитие которых прямо обусловлено наличием этих источников. Каждое из приложений диктует свои направления развития гироприборов. Для некоторых из них крайне востребованы повышение частоты гиротронов и ее перестройка, но сложность задачи обостряется проблемой конкуренции мод и высоким уровнем омических потерь, особенно в гиротронах, работающих на гармониках циклотронной частоты в суб-

миллиметровом диапазоне [2]. Между тем в КГ весьма ограничены возможности перестройки частоты и селекции мод при работе на гармониках.

В процессе достижения максимальных энергетических характеристик в силу разных причин сошел с дистанции и оказался на обочине прогресса целый ряд гироприборов, отличающихся от канонической версии: секционированная активная среда или (и) пространство взаимодействия, нетрубчатый ВЭП, нецилиндрический (коаксиальный, квазиоптический, эшелеттный и т. д.) резонатор. Проведен обзор перспективных вариантов неканонических гиротронов (включая многолучевые и многовольные) с точки зрения перестройки частоты и повышения селекции мод.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-42-02380 р_поволжье_a.

1. *G.S. Nusinovich, M. Thumm, M.I. Petelin.* The Gyrotron at 50: Historical Overview // *J. Infrared Mm Thz Waves* (2014) 35:325–381.

2. *Sh.E. Tsimring.* Electron beams and microwave vacuum electronics. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.

3. *M. Thumm.* State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. KIT Scientific Publishing, 2013.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ГИРОТРОНОВ

В.Е. Запезалов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

За время, прошедшее от создания гиротрона и других гирорезонансных устройств, в ведущих исследовательских и промышленных организациях ряда стран (Россия, США, Япония, Германия, Франция и др.) созданы высокоэффективные гиротроны высокого уровня мощности от сантиметрового до субмиллиметрового диапазонов [1–3]. Сформировались фундаментальные научные направления, успешное развитие которых прямо обусловлено наличием указанных источников (нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС), получение новых материалов, спектроскопии (ЭПР и динамической ядерной поляризации в ЯМР) и др. Каждое из приложений диктует свои направления развития гироприборов, которые проанализированы в данной работе.

В мощных гиротронах для плазменных приложений на частотах до 170 ГГц реализованы квазинепрерывные (порядка 1000 с) высокоэффективные (КПД более 50 %) режимы мегаваттного уровня мощности, в том числе и со ступенчатой перестройкой частоты в широких пределах, а также моду-

лящей выходной мощности. Конструкция мощного гиротрона обычно включает в себя встроенный квазиоптический преобразователь и коллектор электронов с рекуперацией остаточной энергии электронного пучка, окно вывода излучения выполнено, как правило, из синтетического алмаза [2, 3]. Продолжаются разработки гиротронов с мощностью до 2 МВт и более с расширением интервала рабочих частот.

Для гиротронов средней мощности для технологических приложений желательны повышение эффективности и перестройка частоты. Для гиротронов малой мощности для спектроскопии крайне востребованы долговременная стабильность работы и перестройка частоты, повышение КПД, но сложность задачи обостряется проблемой конкуренции мод и высоким уровнем омических потерь, особенно в гиротронах, работающих на гармониках циклотронной частоты в субмиллиметровом диапазоне [1–4].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 14-29-00192.

1. *Nusinovich G.* Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore ; London : The Johns Hopkins University Press, 2004.

2. *Thumm M.* State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. KIT Scientific Publishing, 2013.

3. *Запевалов В.Е.* Эволюция гиротронов // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8/9. С. 559–572.

4. *Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В.* Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения // УФН. 2011. Т. 181. С. 867–874.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОГО СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО МЦАР С МОДИФИЦИРОВАННЫМ БРЭГГОВСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

Н.С. Гинзбург, В.Ю. Заславский, Н.Ю. Песков, А.С. Сергеев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Современные установки управляемого термоядерного синтеза (УТС) оснащены электронно-циклотронными системами нагрева плазмы на базе гиротронных комплексов, в которых к настоящему времени достигнута наибольшая непрерывная (мегаваттная) мощность излучения в миллиметровом диапазоне длин волн. Вместе с тем проектируемые компактные реакторы УТС с сильным магнитным полем требуют увеличения частоты микроволновых источников. Для активно обсуждаемых в настоящее время проектов реакторов DEMO, SPHERE, IGNITOR планируется разработка квазинепрерывных источников с частотой 300–500 ГГц и мощностью 300–500 кВт.

Увеличение частоты излучения по сравнению с гиротронами может быть достигнуто при использовании умеренно релятивистских электронных пучков (РЭП) в генераторах, основанных на доплеровском преобразовании частоты. Одним из перспективных решений, ориентированных на указанные приложения, может рассматриваться мазер на циклотроном авторезонансе (МЦАР). При этом реализация режима устойчивой узкополосной генерации в условиях большой сверхразмерности пространства взаимодействия может быть достигнута путем использования модифицированных брэгговских структур, основанных на связи бегущих и квазикритических волн. Предлагаемая схема позволяет объединить ряд достоинств, присущих релятивистским электронным мазерам (доплеровское преобразование частоты) и гиротронам (высокая селективность), и таким образом обеспечить селективное возбуждение рабочей моды при сверхразмерности пространства взаимодействия до ~ 10 длин волн, что представляется достаточным для транспортировки интенсивных РЭП в указанном частотном диапазоне.

Данный доклад посвящен исследованию возможности реализации МЦАР-генератора на основе микросекундного РЭП 500–700 кВ / 10–20 А, работающего в диапазоне 250–300 ГГц с мегаваттным уровнем мощности. В качестве электродинамической системы генератора рассмотрен гибридный двухзеркальный резонатор, основанный на входном модифицированном и выходном традиционном брэгговских рефлекторах. Для подавления гиротронного механизма самовозбуждения на паразитных квазикритических модах исследована система широких азимутальных разрезов в регулярной секции резонатора. Проведено сравнение результатов теоретического анализа в рамках усредненного подхода и прямого трехмерного PIC-моделирования на основе коммерческого кода *CST STUDIO SUITE*.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-08-00908).

РАЗРАБОТКА ЛБВ W-ДИАПАЗОНА С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ 10 Вт

А.А. Иванов

ОАО НПП «Салют», Нижний Новгород

Разработка и создание ЭВП коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн и длинноволновой части терагерцового диапазона частот с новыми параметрами и, прежде всего, с достаточно большим уровнем выходной мощности в настоящее время является актуальной задачей вакуумной электроники. Сейчас это бурно развивающееся направление, имеющее большие перспективы в разных отраслях народного хозяйства. Такие

приборы находят свое применение в области радиовидения, используются в высокоскоростных линиях связи, позволяют повысить чувствительность и разрешающую способность радиолокационных станций бортового и наземного базирования.

На предприятии ОАО НПП «Салют» ведутся исследования по созданию ЛБВ W -диапазона с выходной мощностью достаточной для решения перечисленных выше задач. Типовые проблемы разработки ЛБВ, связанные с токопрохождением, теплоотводом, согласованием замедляющей системы (ЗС) и т.п., в исследуемом диапазоне проявляются особенно остро и обусловлены малыми размерами СВЧ-узлов прибора. Спиральная ЗС W -диапазона с диаметром пролетного канала порядка 0,2 мм не позволяет обеспечить необходимую соосность элементов электронно-оптической системы (ЭОС), что приводит к значительному токооседанию на спираль и, из-за ограниченного теплоотвода, к ее разрушению.

По результатам анализа различных типов замедляющих систем была выбрана цельнометаллическая ЗС типа «петляющий волновод». Размеры, полученные в результате расчетов, позволяют изготавливать ее с достаточной точностью с помощью современных технологий электроэрозионной обработки. Медь, которая служит материалом для ЗС, обладает хорошей теплопроводностью, и эта конструкция устойчива к значительному токооседанию.

В ходе работы:

1) с помощью пакета CST Studio исследованы и рассчитаны варианты конструкции ЗС, согласующих устройств и ЭОС; проведен расчет основных параметров;

2) разработана технология и изготовлены экспериментальные макеты ЛБВ;

3) измерены электрические параметры макетов, которые показали, что ЛБВ с рабочим напряжением 12 кВ, током пучка 90 мА и токопрохождением 85 % обладает выходной мощностью более 10 Вт и коэффициентом усиления более 27 дБ в рабочей полосе 7 %.

МСЭ-УСИЛИТЕЛИ И ГЕНЕРАТОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПУЧКОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

*И.В. Бандуркин², Н.С. Гинзбург², А.К. Каминский¹, Э.А. Перельштейн¹,
Н.Ю. Песков², А.В. Савилов², С.Н. Седых¹, С.И. Тютюнников¹*

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Генератор с брэгговским резонатором со скачком фазы гофрировки на протяжении ряда лет был основной схемой работы ОИЯИ – ИПФ МСЭ [1]. В настоящее время нами начаты исследования усилительных и генераторных схем МСЭ нового поколения, позволяющие расширить частотный

диапазон и сферу возможных приложений. Для МСЭ-усилителей перспективным представляется режим нерезонансного захвата, реализуемый в ондуляторе с профилированными параметрами, который, как показывает проведенный теоретический анализ, позволяет увеличить выходную мощность излучения и расширить мгновенную полосу усиливаемых частот [2]. МСЭ-генераторы с новой разновидностью брэгговского резонатора, основанного на связи бегущей и квазикритической волн, согласно результатам моделирования позволяют значительно повысить частоту генерации при сохранении одномодового режима [3].

Для экспериментальной реализации указанных схем были разработаны ондуляторы нового типа, которые обеспечивают продвижение в коротковолновые диапазоны за счет уменьшения периода, а оптимизация распределения тока в их обмотке позволяет обеспечить высокое качество формирования рабочего винтового пучка. Исследованы ондуляторы, в которых шаг (период) винтовых обмоток профилировался по заданному закону на цилиндрическом участке, а спад поля на концах (пространственное включение и выключение) обеспечивался сближением противотоков на нелинейных конусах. В докладе приводятся результаты первых пучковых экспериментов, проведенных на данном этапе на ускорителе ЛИУ-3000 (ОИЯИ).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01723).

1. Каминский А.К., Перельштейн Э.А., Седых С.Н. и др. Демонстрация работы мощного 30-ГГц МСЭ на резонансную нагрузку // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 5. С. 37-46.

2. Бандуркин И.В., Каминский А.К., Перельштейн Э.А. и др. Моделирование мощного широкополосного МСЭ-усилителя диапазона 30 ГГц, ориентированного на ускорительные приложения // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 8. С. 674-671.

3. Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Зотова И.В. и др. Коротковолновые секционированные МСЭ с брэгговскими резонаторами, основанными на связи бегущих и квазикритических волн // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 8. С. 619-626.

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, ВОЗБУЖДАЕМОГО ТРАПЕЦИЕВИДНЫМ ТОКОМ

В.Н. Корниенко¹, Д.Р. Румянцев², В.А. Черепенин¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

В работе исследована пространственно-временная структура электромагнитного поля, формируемого прямолинейным током конечной длины с заданным законом зависимости от времени. Была рассмотрена следующая задача. Пусть вдоль цилиндра малого радиуса, ось которого направлена по

оси z декартовой системы координат, а основания пересекают эту ось в точках $P_1 = \{0, 0, -L/2\}$ и $P_2 = \{0, 0, L/2\}$ протекает ток, плотность которого $\mathbf{j} = \{0, 0, j\}$ имеет следующую зависимость от времени:

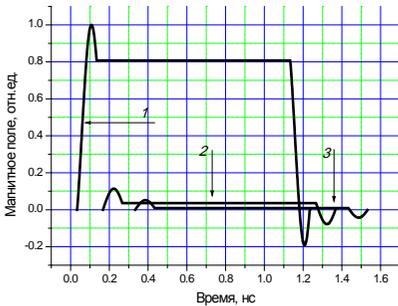
$$\begin{aligned}
 j &= 0 \text{ при } t < 0, \quad j = j_0 \sin^2(\pi t / (2 T_1)) \text{ при } 0 < t < T_1, \\
 j &= j_0 \text{ при } T_1 < t < T_2, \\
 j &= j_0 \sin^2(\pi (t - T_2) / (2 (T_3 - T_2)) + \pi/2) \text{ при } T_2 < t < T_3, \\
 j &= 0 \text{ при } T_3 < t,
 \end{aligned}$$

где j_0 – значение постоянной составляющей; $T_1, (T_3 - T_2)$ – длительности переднего и заднего фронтов импульса тока соответственно.

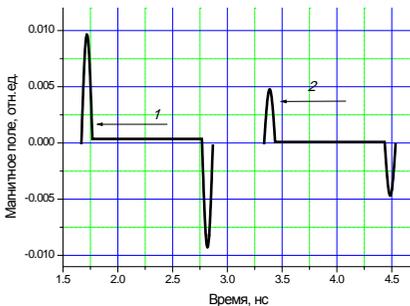
Необходимо определить значение компонент электромагнитного поля в любой точке пространства вне указанного цилиндра. Для этого случая наиболее удобным представляется использование уравнений Максвелла, которые записаны в виде интегральных соотношений в пространственно-временном представлении [1]. Для напряженности магнитного поля соотношение имеет следующий вид:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, t) = \int \{ [\mathbf{j}, (\mathbf{x} - \mathbf{x}') / |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3] + [\dot{\mathbf{j}}', (\mathbf{x} - \mathbf{x}') / |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2] \} dV' / (4 \pi),$$

где $\mathbf{H}(\mathbf{x}, t)$ – магнитное поле в точке наблюдения \mathbf{x} ; $\mathbf{j}, \dot{\mathbf{j}}'$ – плотность тока и ее производная по времени в точке \mathbf{x}' , взятые в запаздывающий момент времени $\tau = t - |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|/c$, c – скорость света в вакууме.



a



б

Зависимость напряженности магнитного поля в точках, расположенных на расстоянии, сравнимом с высотой цилиндра с током (*a*) (l – 1 см, 2 – 5 см, 3 – 10 см), и на значительном удалении (*б*) (l – 50 см, 2 – 1 м)

На рисунке приведены временные зависимости магнитного поля в различных точках наблюдения, полученные при помощи численного алгоритма, который изложен в [2], для $L = 1$ см, $T_1 = T_3 - T_2 = 0,1$ нс. На удалении от источника $\sim 100L$ поле излучения, формируемое фронтами тока, значительно превосходит ближнее, при этом в свободном пространстве распространяются два уединенных монополярных импульса противоположного знака, расстояние между которыми равно $(T_2 - T_1)c$.

Расчеты произведены на вычислительных мощностях Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.

1. Вычислительные методы в электродинамике / под ред. Р. Митры. М. : Мир, 1977. 485 с.

2. Корниенко В.Н., Пикунов В.М., Черепенин В.А. Численная модель для исследования нестационарных процессов взаимодействия интенсивных электронных пучков и электромагнитных полей в электродинамических структурах с дифракционными потерями // Радиотехника и электроника. 1994. Вып. 1. С. 141-147.

ВЫСОКОСЕЛЕКТИВНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ ГИРОПРИБОРОВ НА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ

Э.Б. Абубакиров, С.В. Кузиков, А.А. Вихарев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Проблема селекции мод является ключевой для обеспечения одномодового режима работы мощных гиротронов и гироклистронов, основанных на релятивистских электронных пучках. К настоящему времени в ИПФ РАН выполнено несколько экспериментов, показывающих удачные варианты решения проблемы селекции в гироклистроне, в котором электронный пучок током ~ 100 А формировался магнетронно-инжекторной пушкой, работающей на напряжении 300 кВ. В этих экспериментах входной модулирующий резонатор длиной $\sim 2\lambda$ (λ – длина волны в вакууме) работал на моде шепчущей галереи [1]. Также были предложены несколько вариантов селективных гиротронных резонаторов на электропрочной моде TE_{03} , в одном из которых селекция обеспечивается широкими радиальными щелями в боковой поверхности, в другом — азимутальной гофрировкой конических стенок резонатора [2].

Увеличение выходной мощности и тока в гироклистроне естественно связывать с селективным возбуждением во входном резонаторе высшей вращающейся по азимуту моды. Для возбуждения моды $TE_{7,4}$ был предложен ввод, состоящий из цилиндрического резонатора с системой щелей для подавления паразитных мод. Рабочая мода резонатора образована суперпо-

зицией мод $TE_{7,4}$ и $TE_{13,2}$. Электронный пучок встреливается в максимум моды $TE_{7,4}$, при этом поле моды $TE_{13,2}$, быстро спадающей от стенок к пучку, мало в месте встрела пучка. Такой вариант ввода был недавно испытан в эксперименте с гироклистроном на частоту 35 ГГц.

Дальнейшее продвижение в область высоких пиковых мощностей и токов электронных пучков может быть обеспечено при использовании коротких квазиоптических резонаторов максимально открытого типа. Один из таких резонаторов, построенный по типу радиального брегговского рефлектора, был рассчитан на моду с $m = 6$ вариаций по азимуту и показал высокую селективность в полосе частот более 3 %.

1. Кузиков С.В., Плоткин М.Е., Зайцев Н.И. Метод возбуждения объемной моды высокого порядка во входном резонаторе гироклистрона // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 1. С. 78-84.

2. Денисов Г.Г., Зайцев Н.И., Кузиков С.В., Плоткин М.Е. Повышение селективности резонаторов релятивистских гиротронов, работающих на осесимметричных модах // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 10. С. 837-849.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА УВЕЛИЧЕНИЯ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАЦИИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ВИРКАТОРА ВСЛЕДСТВИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БУРСИАНОВСКОЙ И ДИОКОТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ

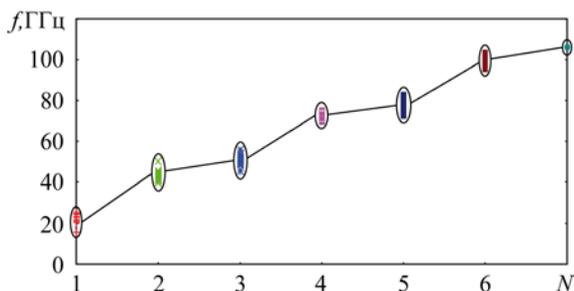
А.А. Бадарин, С.А. Куркин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Одной из важных задач для современной плазменной электроники больших мощностей является создание сверхмощных генераторов СВЧ- и ТГц-диапазонов, в частности, требуется разработка новых методов повышения частоты генерации с сохранением высокой выходной мощности [1]. Перспективным направлением решения данной задачи является использование интенсивных релятивистских электронных потоков (РЭП) в режиме одновременного развития диокотронной и бурсиановской неустойчивостей [2]. Взаимодействие данных неустойчивостей приводит к образованию виртуального катода (ВК) сложной структуры с несколькими областями отражения (электронными сгустками) в азимутальном направлении, вращающимися вокруг оси пространства дрейфа и формирующими вихревую структуру.

В настоящей работе с помощью среды CST Particle Studio была исследована классическая модель релятивистского виркатора. Управляющие параметры системы (ток пучка, индукция внешнего магнитного поля) определяют количество формирующихся в азимутальном направлении электронных

сгустков в РЭП, причем с ростом тока их количество возрастает. Обнаружено, что увеличение количества сгустков в азимутальном направлении приводит к скачкообразному росту частоты выходного сигнала виркатора (см. рисунок).



Зависимость частоты основной спектральной составляющей генерируемого излучения от количества электронных сгустков N в азимутальном направлении

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-12-00222).

1. *Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E.* High Power Microwaves. 3rd Ed., CRC Press, Taylor and Francis Group, 2016.

2. *Kurkin S.A., Badarin A.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E.* The development and interaction of instabilities in intense relativistic electron beams // *Physics of Plasmas*. 2015. V. 22. P. 122110.

МНОГОСТУПЕНЧАТАЯ РЕКУПЕРАЦИЯ В ГИРОТРОНЕ, ОСНОВАННАЯ НА СЕПАРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

О.И. Лукиша, П.А. Трофимов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Важной задачей, стоящей при разработке мощных гиротронов для энергоемких приложений, является повышение полного КПД системы. Эта задача решается, в частности, применением коллекторов с рекуперацией остаточной энергии электронов в отработанном потоке. Повышенная эффективность рекуперации может быть достигнута при использовании многоступенчатого коллектора, в котором происходит разделение в пространстве фракций пучка с разными энергиями электронов и осаждение этих фракций

на секции коллектора, имеющие различные потенциалы. В данной работе обсуждается возможность реализации многоступенчатой рекуперации, основанной на новом методе сепарации электронов при их движении в скрещенных азимутальном магнитном и продольном электрическом полях [1]. Анализ проводился применительно к экспериментальному гиротрону СПБПУ с рабочей частотой 74,2 ГГц и выходной мощностью 100 кВт с использованием распределений электронов по энергиям в отработанном пучке, измеренных в данном приборе. В рамках численного моделирования с помощью программного пакета *CST Studio* показана возможность достижения эффективной сепарации электронов при типичных значениях скоростного разброса и толщины стенки пучка для распределений магнитного поля, заданных аналитически. Исследована схема 4-ступенчатой рекуперации, в которой был получен полный КПД гиротрона, превышающий 70 %. Проанализирована возможная конструкция электромагнита, обеспечивающего требуемое распределение магнитного поля в коллекторной области гиротрона.

1. Лукша О.И., Трофимов П.А. Метод сепарации электронов для систем многоступенчатой рекуперации в гиротронах // ПЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 18. С. 38–45.

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ СКОРОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В МАГНЕТРОННО-ИНЖЕКТОРНЫХ ПУШКАХ ГИРОТРОНОВ С НАРУШЕННОЙ АКСИАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ

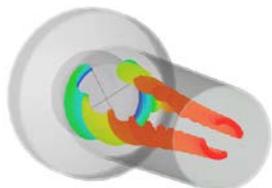
К.А. Лецева¹, В.Н. Мануилов^{1,2}, И.Е. Уткина³

¹ Институт прикладной физики, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород

Гиротроны используют для формирования активной среды в виде винтового электронного пучка (ВЭП) адиабатические аксиально-симметричные магнетронно-инжекторные пушки (МИП). МИП в гиротронах, в отличие от большинства других вакуумных приборов СВЧ, работают в режиме температурного ограничения эмиссии. Поэтому, вследствие неоднородности прогрева катода по азимуту, в них наблюдается существенное нарушение азимутальной симметрии распределения плотности тока эмиссии. Другой причиной нарушения симметрии системы является сдвиг осей катода и анода МИП. Наконец, для улучшения селекции рабочих типов колебаний в гиротронах короткой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов



Пример МИП с эмиссией из двух секторов по 90°

целесообразно использовать эллиптические или двухзеркальные резонаторы. В таких приборах для увеличения КПД целесообразно использовать МИП, где эмиссия идет только с двух секторов катода. Очевидно, в таких МИП также будут наблюдаться трехмерные возмущения распределения осцилляторных скоростей в пучке. В докладе приведены как аналитические оценки возмущения скоростного распределения, так и результаты прямого численного моделирования по 3D-программе CST Studio Suite различных вариантов ЭОС гиротронов сантиметрового и миллиметрового диапазонов с перечисленными выше нарушениями симметрии плотности тока или формы электродов. Показано, что нарушение симметрии существенно увеличивает ширину скоростного распределения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-32-00166.

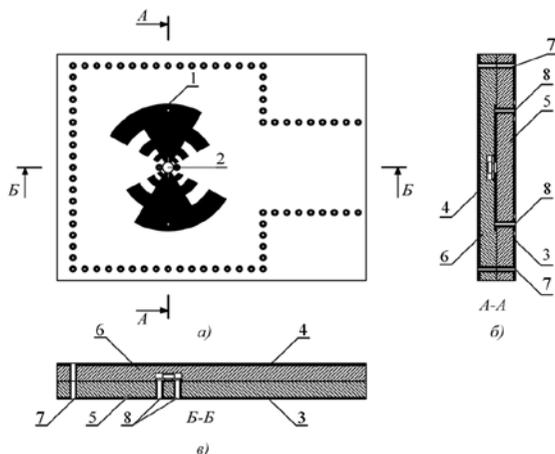
МИКРОПОЛОСКОВАЯ АНТЕННА-ГЕНЕРАТОР С ВЫВОДОМ ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛНОВОД, ВСТРОЕННЫЙ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПОДЛОЖКУ

В.Е. Любченко, Д.Е. Радченко, С.А. Телегин, Е.О. Юневич

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

Активные микрополосковые антенны или антенны-генераторы (АГ) на полевых транзисторах используются в качестве источников микроволнового излучения, в том числе в качестве элементов фазированных антенных решеток [1]. Ранее авторами были изучены конструкции таких АГ на основе антенн логопериодического типа с выводом излучения в свободное пространство [2]. Совмещение АГ с волноводом, встроенным в диэлектрическую подложку (рисунок) открывает новые возможности для управления процессом генерации СВЧ-колебаний, в частности для синхронизации путем подачи сигнала от внешнего источника, а также для выделения высоких гармоник при работе в многочастотном режиме.

Особенности электродинамики волновода, встроенного в диэлектрическую подложку, описаны в [3]. Компьютерное моделирование показало, что на частоте 15 ГГц (основная мода для волновода) значительная часть энергии излучения отводится в волновод. Для измерения мощности излучения, выводимой через встроенный волновод, на конце его был сделан скос, позволяющий согласовать диэлектрический волновод с полым металлическим волноводом. Измеренная в полном металлическом волноводе мощность излучения оказалась сравнимой с мощностью, излучаемой этой же антенной в



Микрополосковая антенна-генератор, совмещенная с волноводом, встроенным в диэлектрическую подложку: 1 – логопериодическая антенна; 2 – транзистор; 3, 4 – внешняя металлизация; 5, 6 – диэлектрические пластины; 7, 8 – металлизированные отверстия, определяющие границы встроенного в диэлектрик резонатора и волновода

открытое пространство. При работе в многочастотном режиме и соответствующем размере поперечного сечения волновода удастся выделить излучение 2-й гармоники. Экспериментально в таком режиме наблюдалось излучение на частоте 27 ГГц, и есть возможность повысить частоту выходного сигнала до 40 ГГц и выше с использованием транзисторов, рассчитанных на работу в более низкочастотном диапазоне волн.

Работа выполнена при поддержке РФФИ.

1. Chang K., York R.A., Hall P.S., Itoh T. Active Integrated Antennas // IEEE Trans. 2002. V. 50, 3. P. 937-944.

2. Любченко Е., Юневич Е.О., Котов В.Д., Калинин В.И. Генерация СВЧ-колебаний в логопериодической антенне, интегрированной с полевым транзистором // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 11. С. 1417-1419.

3. Kumar H., Jadhav R. and Ranade S. A review on substrate integrated waveguide and its microstrip interconnect // J. Electronics and Communication Engineering. 2010. V. 3, № 5. P. 36–40.

НЕАДИАБАТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГИРОТРОНА

А.Л. Гольденберг¹, М.Ю. Глявин¹, К.А. Лещева², В.Н. Мануилов^{1,2}

¹ Институт прикладной физики, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В гиротронах, наиболее мощных источниках электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн – от миллиметрового до субмиллиметрового, в качестве активной среды (источника энергии излучения) используются трубчатые пучки электронов, движущихся по винтовым траекториям в постоянном магнитном поле (так называемые винтовые электронные пучки – ВЭП). Для формирования ВЭП применяются магнетронно-инжекторные пушки (МИП), работающие в режиме температурного ограничения эмиссии. Особенностью МИП является то, что вследствие адиабатичности формирующих полей на качество ВЭП и, прежде всего, на скоростной разброс сильное влияние оказывают тепловые скорости и шероховатость поверхности эмиттера. Эти факторы разброса тем значительней, чем короче рабочая длина волны гиротрона. Таким образом, хотя МИП используются во всех мощных гиротронах вплоть до мегаваттного уровня выходной мощности, они имеют серьезные недостатки. Действие указанных выше факторов может быть в значительной степени нивелировано при использовании неадиабатических электронных пушек, где эти факторы вносят возмущение в распределение компонент скоростей электронов только как величины второго порядка малости и при потенциале анодов порядка и выше 10 кВ их вклад оказывается малым.

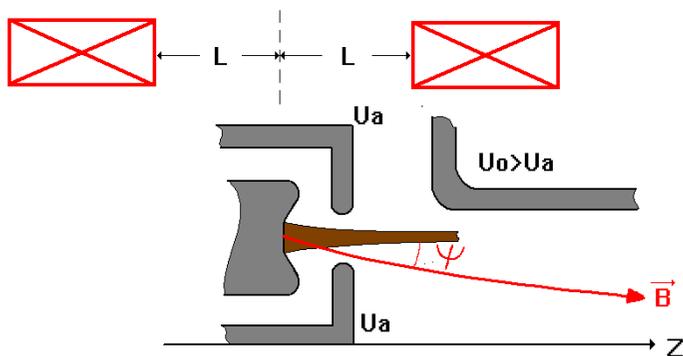


Схема триодной неадиабатической ЭОС: U_a – потенциал первого анода, U_0 – потенциал резонатора относительно катода, ψ – угол между электронным пучком и магнитным полем. Симметрично относительно центра эмиттера на расстоянии L расположены две встречные катушки для регулировки величины g

В докладе приведены результаты анализа и оптимизация геометрии неадиабатической низковольтной (15 кВ, 3 А) ЭОС для гиротрона с рабочим магнитным полем 6,5 кГс. Исследованы специфические для данного типа неадиабатических систем механизмы возрастания скоростного разброса и на этой основе – методы его снижения до приемлемых величин. Показано, что в них возможна реализация питч-фактора g более 1,7 при величине скоростного разброса $\delta v_{\perp} \approx 15\%$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-02-00674.

СУБТЕРАГЕРЦОВЫЕ ОРОТРОНЫ С ДВУХРЯДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Е.А. Мясин, В.В. Евдокимов, А.Ю. Ильин

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

Субтерагерцовые оротроны были впервые созданы в 70-х годах прошлого столетия. Это были приборы с однорядной четвертьволновой периодической структурой (четвертьволновая «гребёнка»), в которых эффективно взаимодействовали с ВЧ-полем тонкие плоские электронные потоки [1, 2].

Исследования возможности создания оротрона с двухрядной периодической структурой (ДРПС) в субтерагерцовом диапазоне были начаты в 2002 году. В 2004 году эта работа успешно завершилась разработкой и созданием оротрона с ДРПС, перестраиваемого по частоте в диапазоне 100–145 ГГц (0,1–0,145 ТГц). Рабочее напряжение на высокочастотной границе перестройки (ВЧГП) не превышало 20 кВ. Период ДРПС был 0,55 мм, высота рядов $b_1 = b_2 = 0,5$ мм, высота пролётного канала $2H = 0,2$ мм. Максимальная мощность 40 Вт была получена на частоте 123 ГГц при подборе оптимальной связи с нагрузкой. В течение ряда лет при частичной поддержке программ ОФН РАН («Проблемы радиофизики», «Современные проблемы радиофизики») были продолжены исследования возможности продвижения ВЧГП-оротрона с ДРПС вверх по частоте. При этом исследовалась возможность генерации как на первой пространственной гармонике ДРПС, так и на 2-й и 3-й. Были исследованы оротроны как с короткими, так и с длинными ДРПС и соответственно как с простыми однофокусными сферическими фокусирующими зеркалами ОР, так и с многофокусными сферическими и сфероцилиндрическими зеркалами. Несмотря на то что ДРПС является низкочастотной по сравнению с однорядной структурой (почти в 2 раза при ра-

венстве высоты рядов), в результате теоретических исследований удалось сформулировать требования к параметрам электродинамической системы и электронного потока, позволившие создать оротроны с ДРПС диапазона 0,14–0,30 ТГц, 0,15–0,36, 0,15–0,4 ТГц. Используя этот подход при создании прибора, удалось в диапазоне 0,3–0,35 ТГц существенно увеличить мощность генерации на отдельных частотах до 450–600 мВт и не менее 50 мВт во всём диапазоне. При этом период ДРПС был 0,182 мм, а высота пролётного канала 0,1 мм. Поэтому их отношение было 1,82, а для эффективного электронно-волнового взаимодействия в оротроне с ДРПС оно должно быть не мене 3. Поэтому потенциально генерируемую мощность можно существенно увеличить за счёт увеличения периода ДРПС, т.е. увеличения рабочего напряжения.

В докладе более подробно будут приведены результаты как теоретических, так и экспериментальных исследований.

1. Богомолов Г.Д., Русин Ф.С., Куц В.С. // Радиотехника и электроника. 1970. Т. 15, № 4. С. 854.

2. Шестопалов В.П. Дифракционная электроника. Харьков : Вища школа, 1976. 231 с.

ВЛИЯНИЕ КОНКУРЕНЦИИ МОД НА РЕЖИМ ЗАХВАТА ЧАСТОТЫ МНОГОМОДОВОГО ГИРОТРОНА ВНЕШНИМ СИГНАЛОМ

В.Л. Бакунин, Г.Г. Денисов, Ю.В. Новожилова, А.П. Фокин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Исследованы режимы захвата частоты и фазы излучения многомодового гиротрона мегаваттного уровня мощности при воздействии внешнего монохроматического сигнала. Численно найдены области одномодовой одночастотной генерации на частоте внешнего сигнала (зоны захвата) на плоскости параметров ток – расстройка по магнитному полю и напряжению. Исследована зависимость конфигурации зон захвата и максимально достижимого КПД от уровня мощности внешнего сигнала. Предполагается, что поступающая из выходного тракта гиротрона монохроматическая заданная волна, источником которой может служить задающий гиротрон со стабилизированной частотой, трансформируется в рабочую моду с помощью разработанного в ИПФ РАН квазиоптического преобразователя [1].

Показано, что зависимости ширины зон захвата, а также максимально достижимых КПД при захвате тока от мощности внешнего сигнала являются немонотонными и имеют максимумы. Это объясняется конкуренцией

мод: энергия поля рабочей моды в резонаторе при увеличении мощности внешнего сигнала возрастает и может перекачиваться в паразитные моды. Действительно, при увеличении мощности внешнего сигнала выход из режима захвата сопровождается возбуждением двух ближайших к рабочей моде боковых сателлитов – мод эквидистантного спектра, симметрично отстоящих по частоте от рабочей моды. Этот процесс можно интерпретировать как распад двух квантов основной моды на кванты сателлитов [2, 3].

Показано, что в условиях конкуренции мод режим захвата благоприятен для достижения высокого КПД: значения КПД могут быть выше и достигаются при меньших токах по сравнению с автономным режимом. При флуктуациях напряжения в пределах практической нестабильности высоковольтных источников питания (1–2 кВ) КПД в режиме захвата остается близким к оптимальному значению, а изменения фазы излучения незначительны.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 14-29-00192.

1. *Chirkov A.V., Denisov G.G., Kufitin A.N.* Perspective gyrotron with mode converter for co- and counter-rotation operating modes // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 106. P. 263501; doi: 10.1063/1.4923269

2. *Нусинович Г.С.* Взаимодействие мод в лазерах на свободных электронах // *Письма в ЖТФ.* 1980. Т. 6, № 14. С. 848–852.

3. *Nusinovich G.S.* Mode interaction in gyrotrons // *Int. J. Electron.* 1981. V. 51, № 4. P. 457–474.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАЗИРЕГУЛЯРНЫХ РЕЗОНАТОРОВ С КОРОТКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СЕЛЕКТИВНОСТИ ГИРОТРОНОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ВТОРОЙ ЦИКЛОТРОННОЙ ГАРМОНИКЕ

И.В. Ошарин¹, Н.А. Завольский¹, Ю.К. Калынов¹, А.В. Савилов^{1,2}

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Для повышения селективности генерации гиротронов, работающих на второй циклотронной гармонике, предложено использовать квазирегулярные резонаторы с одной или несколькими короткими неоднородностями (расширениями). Параметры каждой такой неоднородности (величина расширения радиуса резонатора и ее длина) подбираются таким образом, чтобы обеспечить на такой неоднородности набег фазы, близкий к π , для квазикритических волн с частотой, близкой с циклотронной частоте электронов рабочего пучка гиротрона. Это приводит к существенному ухудшению электронно-волнового взаимодействия на основном циклотронном резонансе.

Действительно, скачок фазы волны, близкий к π , соответствует резкому переходу электронного сгустка, сформированному резонансным полем возбуждаемой электромагнитной волны, из тормозящей фазы в ускоряющую, что приводит к «смене знака» электронно-волнового взаимодействия, то есть переходу от излучения волны к ее поглощению. В то же время для волн на удвоенной частоте (соответствующей генерации на второй циклотронной гармонике) та же самая неоднородность обеспечивает вдвое больший набег фазы (т. е. близкий к 2π), что в первом приближении соответствует отсутствию влияния таких неоднородностей на эффективность возбуждения рабочей волны на второй гармонике.

Описанный выше метод повышения селективности теоретически исследован в рамках упрощенных моделей, учитывающих нестационарную пространственно-временную динамику эволюции в резонаторе гиротрона в процессе его возбуждения квазихроматического электромагнитного поля (формируемого волнами, соответствующими резонансам на основной и на второй гармониках циклотронной частоты). Очевидно, что чем больше неоднородностей удастся уместить на всей длине рабочего резонатора, тем сильнее оказывается эффект подавления генерации на основном циклотронном резонансе. Так, наличие одной неоднородности может обеспечить увеличение стартового тока возбуждения паразитной низкочастотной волны в 3–5 раз. Наличие двух-трех неоднородностей приводит к росту стартового тока паразитных волн на порядок. При этом заметного снижения эффективности генерации на рабочей, второй циклотронной гармонике не наблюдается.

Работа поддержана РФФИ, проекты 16-02-00794, 14-02-00594.

СИНХРОНИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ПЛАНАРНОМ МСЭ С ДВУМЕРНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

*А.В. Аржанников^{1,3}, Н.С. Гинзбург², В.Ю. Заславский²,
П.В. Калинин^{1,3}, С.А. Кузнецов^{1,3}, Н.Ю. Песков²,
А.С. Сергеев², С.Л. Сеницкий^{1,3}, В.Д. Степанов¹, М. Тумм³*

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

³ Новосибирский государственный университет

В сотрудничестве ИПФ РАН и ИЯФ СО РАН развивается концепция мощных планарных МСЭ на основе сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) ленточной конфигурации. Их отличительной особенностью является использование нового механизма двумерной распре-

ленной обратной связи (РОС), позволяющего обеспечить высокую когерентность излучения в пространственно-развитых генераторах.

В докладе обсуждается возможность дальнейшего увеличения мощности МСЭ путем создания многомодульных схем, запитываемых параллельными ленточными РЭП и синхронизируемых с помощью двумерной РОС. На ускорителе ЭЛМИ (ИЯФ СО РАН) реализована система формирования двух параллельных идентичных ленточных РЭП 1 МэВ / 1 кА / 4 мкс в едином катодном узле. На основе этих пучков в диапазоне 75 ГГц создан макет планарного двухканального МСЭ и продемонстрирована синхронизация их излучения при использовании двумерной брэгговской структуры, установленной на входе пространства взаимодействия и формирующей двумерную РОС. В результате получен режим стабильной узкополосной генерации при рекордных поперечных размерах системы $45 \times 2,5$ длин волн, мощности излучения в каждом канале 30–50 МВт и длительности импульса ~ 100 нс.

Для продвижения в коротковолновые диапазоны исследована возможность увеличения сверхразмерности пространства взаимодействия МСЭ по двум поперечным направлениям путем комбинации механизмов селекции, реализуемых в гибридных резонаторах на основе двумерных и модифицированных брэгговских структур. Согласно результатам моделирования в данной схеме модифицированная брэгговская структура способна обеспечить селекцию мод при ширине зазора до 10–20 длин волн благодаря включению в цепь обратной связи квазикритических мод. Двумерная брэгговская структура с помощью формирования поперечных волновых потоков вдоль пластин резонатора позволяет обеспечить синхронизацию излучения и одномодовый режим генерации в МСЭ при ширине вплоть до 100–1000 длин волн.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 16-08-00811).

РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ANGEL-2.5DS

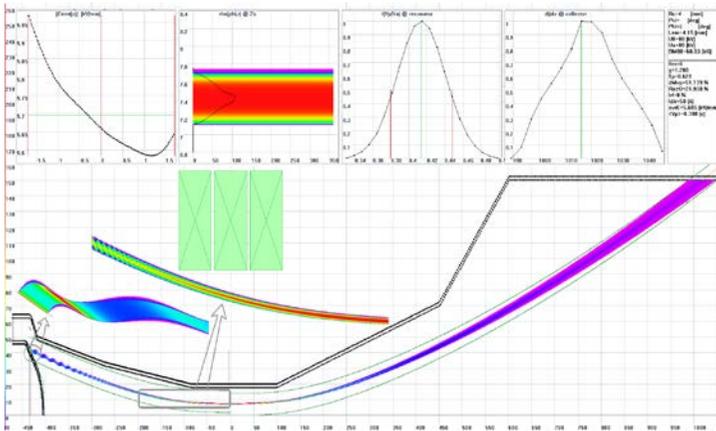
О.П. Планкин, Е.С. Семенов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Программный комплекс ANGEL-2.5DS предназначен для расчета электронно-оптических систем формирования прямолинейных и винтовых электронных пучков. В его основе лежат методы трубок тока и дискретных источников [1, 2]. Программа позволяет рассчитывать приосевые пушки с реверсом магнитного поля, традиционные магнетронно-инжекторные пуш-

ки, приборы с многосекционными коллекторами и многокатодные ЭОС. Реализована возможность моделирования ионной компенсации пространственного заряда, азимутально-несимметричной эмиссии, наклона оси магнитного поля относительно электродов. Конфигурации с металлическими вставками и постоянными магнитами поддерживаются посредством использования файлов с таблично заданным магнитным полем.

Современный интерфейс программного комплекса позволяет свести к минимуму временные затраты на его освоение и облегчает визуализацию результатов (рисунок). Использование технологии распараллеливания на многопроцессорных системах с общей памятью значительно увеличивает скорость счета.



Вид рабочего экрана ANGEL-2.5DS

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-41-02608.

1. Лыгин В.К., Цимринг Ш.Е. Расчет электронных траекторий в винтовых пучках, формируемых аксиально-симметричными магнетронно-инжекторными пушками // ЖТФ. 1973. Т. 43, № 8. С. 1695.
2. Лыгин В.К., Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е. О методах интегральных уравнений и вспомогательных зарядов в траекторном анализе интенсивных электронных пучков // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. 1987. № 7 (401). С. 36–38.

МАГНИТОЭКРАНИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО ГИРОТРОНА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 24 ГГц

М.Ю. Глявин¹, В.Н. Мануилов^{1,2}, М.Д. Проявин^{1,2}

¹ Институт прикладной физики, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Непрерывные гиротроны с рабочими частотами 24–28 ГГц и выходной мощностью несколько десятков киловатт рассматриваются сейчас как следующая ступень развития хорошо известных технологических комплексов [1, 2] для спекания композитных материалов, выращивания CVD-алмазов и ряда других перспективных технологий. В связи с этим актуальным оказывается снижение мощности питания комплекса и, в частности, снижение энергозатрат P_B на создание магнитного поля B_0 в рабочем пространстве гиротрона. В докладе рассмотрена возможность уменьшения P_B с помощью установки ферромагнитных экранов, окружающих основной соленоид. Анализировался гиротронный комплекс с рабочим полем 8,9 кГс, напряжением 30 кВ и током пучка 3 А. Показано, что из-за экранирования возможно уменьшение мощности питания электромагнита примерно в 2 раза при сохранении высокой (лучше 1 %) степени однородности магнитного поля в области резонатора. Исследована возможность использования в таком магнитном поле традиционных для гиротронов магнетронно-инжекторных пушек (МИП). Показано, что при установке в области эмиттера МИП дополнительной катодной катушки возможно формирование ВЭП с приемлемыми для непрерывной работы параметрами.

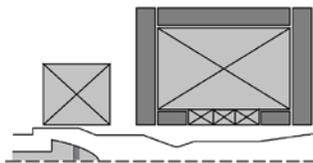


Схема ЭОС с экранированным соленоидом.
Ферромагнитные экраны заштрихованы

Работа выполнена при поддержке РФФИ.

1. Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I., Denisov G., Bogdashev A., Kalynova G., Semenov V., Zharova N. 24-84 GHz Gyrotron Systems for Technological Microwave Applications // IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. V. 32, № 1. P. 67-72.

2. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V., Koldanov V.A., Litvak A.G., Ovechkin N.M., Radishev D.V., Bykov Yu.V., Caplan M. Diamond films grown by millimeter wave plasma-assisted CVD reactor // Diamond and related materials. 2006. V. 15, is. 4-8. P. 502-507.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕОРИЯ ГИРОКЛИСТРОНОВ С ДИФРАКЦИОННЫМ ВВОДОМ И ВЫВОДОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Р.М. Розенталь, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Показана эффективность использования пространственно-временного подхода для моделирования гироклистронов с дифракционным вводом и выводом излучения. Указанный подход основан на описании эволюции поля параболическим уравнением, в котором фактор возбуждения находится из усредненных уравнений движения электронов.

Выполнены расчеты экспериментально реализованных в ИПФ РАН слаботорелятивистских гироклистронов на 1-й и 2-й гармониках гирочастоты с дифракционным вводом излучения [1, 2]. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными. Наряду с режимами усиления исследованы режимы захвата внешним сигналом гироклистрона в условиях самовозбуждения выходной секции.

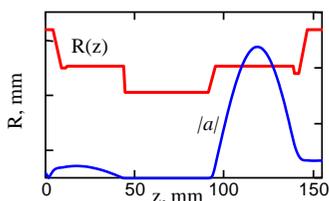


Рис. 1. Профиль гироклистрона с дифракционным вводом-выводом излучения и продольная структура поля

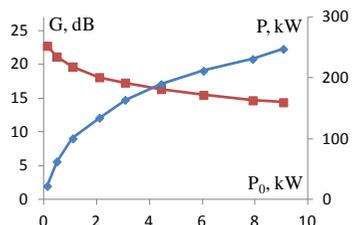


Рис. 2. Результаты расчета гироклистрона $TE_{02} / 32$ ГГц на 2-й гармонике гирочастоты. Зависимости выходной мощности и коэффициента усиления от мощности входного сигнала

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 14-29-00192.

1. Антаков И.И., Гачев И.Г., Засыпкин Е.В. Экспериментальное исследование гироклистрона, работающего в поле постоянного магнита // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 3. С. 185–194.

2. Засыпкин Е.В., Гачев И.Г., Антаков И.И. Экспериментальное исследование гироклистрона с высшим типом колебаний TE_{021} в резонаторах в коротковолновой части миллиметрового диапазона // Известия вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 5. С. 341–350.

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ШУМОВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ГИРОТРОНАХ С БОЛЬШОЙ НАДКРИТИЧНОСТЬЮ

Р.М. Розенталь, А.С. Сергеев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Исследованы характеристики шумового излучения в нестационарной модели гиротрона с нефиксированной структурой поля, включающей учет изменения продольной структуры поля за время пролета электронов (эффект «проскальзывания» [1]).

Найдены оптимальные значения параметров, обеспечивающие максимальную ширину спектра хаотической генерации. Для параметров установки [2] выполнены расчеты, показывающие возможность получения шумовых СВЧ-сигналов в диапазоне 17 ГГц со средней мощностью в десятки киловатт и шириной спектра до 3 ГГц.

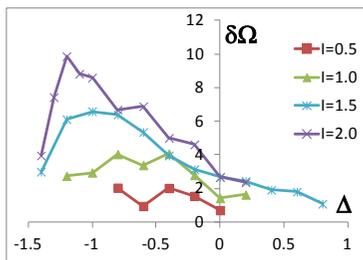


Рис. 1. Зависимость ширины спектра в режиме хаотической генерации от расстройки синхронизма при увеличении параметра тока (в нормированных переменных)

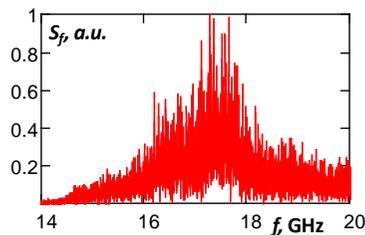


Рис. 2. Спектр сверхширокополосного шумового сигнала в слаборелятивистском гиротроне, запитываемом электронным пучком с энергией 70 кэВ и током 10 А

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-02-00745.

1. *Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V., Zheleznov I.V.* Time-domain theory of gyrotron traveling wave amplifiers operating at grazing incidence // *Phys. Plasmas*. 2015. V. 22. P. 013112.

2. *Samsonov S.V., Gachev I.G., Denisov G.G., Bogdashov A.A., Mishakin S.V., Fiks A.S., Soluyanov E.A., Tai E.M., Dominyuk Y.V., Levitan B.A., Murzin V.N.* Ka-Band Gyrotron Traveling-Wave Tubes With the Highest Continuous-Wave and Average Power // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014. V. 61, № 12. P. 4264-4267.

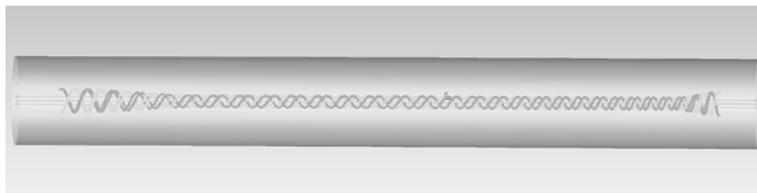
ВИНТОВЫЕ ТОКОВЫЕ ОНДУЛЯТОРЫ ДЛЯ МСЭ-УСИЛИТЕЛЕЙ И МСЭ-ГЕНЕРАТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*И.В. Бандуркин², А.К. Каминский¹, С.Ю. Корнишин², Н.И. Песков²,
А.В. Савилов², С.Н. Седых¹*

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Мазер на свободных электронах ОИЯИ и ИПФ РАН до сих пор в основном работал в конфигурации генератора с брэгговским резонатором со скачком фазы гофрировки [1]. При этом использовались винтовые токовые ондуляторы с резистивными шунтами для формирования плавного спада поля на концах [2]. В настоящее время нами начаты исследования усилительных и генераторных схем МСЭ нового поколения, в том числе с реализацией режима нерезонансного захвата [3] и с использованием резонаторов с квазикритической модой [4]. Это потребовало разработки ондуляторов нового типа. Спад поля на концах обеспечен сближением противотоков на нелинейных конусах. На цилиндрическом участке шаг винтовых обмоток изменяется по заданному закону для реализации режима нерезонансного захвата.



Форма обмоток ондулятора с уменьшающимся периодом и формированием плавного входа и выхода сближением противотоков на нелинейных конусах

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-19-01723 от 26.06.2014 г.).

1. Песков Н.Ю., Гинзбург Н.С., Каминский А.А. и др. Высокоэффективный узкополосный МСЭ-генератор с брэгговским резонатором со скачком фазы гофрировки // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, № 11. С. 19-29.

2. Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Sedykh S.N., Sergeev A.P. Field distribution investigation in few types of helical undulators // Proceedings of II Asian Symposium on Free Electron Lasers. Novosibirsk, 1996. P. 232-239.

3. Savilov A.V., Bandurkin I.V., Peskov N.Yu. Regime of non-resonant trapping in an FEM-amplifier // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research A. 2003. V. 507, № 1/2. P. 158-161.

4. Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Зотова И.В. и др. Коротковолновые секционированные МСЭ с брэгговскими резонаторами, основанными на связи бегущих и квазикритических волн // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 8. С. 619-626.

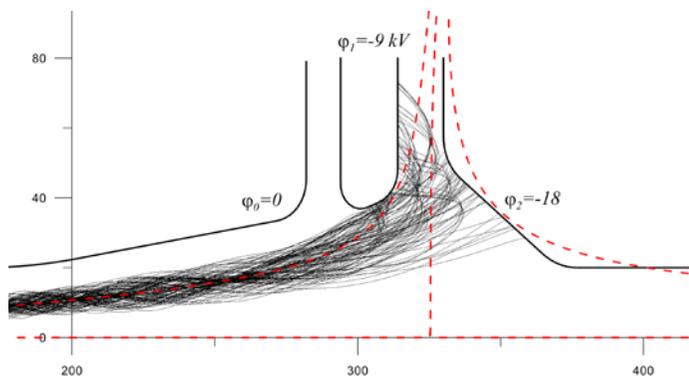
О РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ В МНОГОСЕКЦИОННОМ КОЛЛЕКТОРЕ ГИРОТРОНА С КАСПОВОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Е.С. Семенов, М.В. Морозкин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Для повышения КПД гиротрона можно воспользоваться тем, что на выходе из резонатора в неоднородном магнитостатическом поле происходит пространственное разделение электронного пучка по энергетическим фракциям, каждую из которых можно посадить на участок коллектора со своим потенциалом, пониженным относительно резонатора. Благоприятную структуру магнитостатического поля в коллекторной области можно реализовать, в частности, с помощью дополнительного встречного соленоида [1].

В предлагаемом сообщении описана численная оптимизация такого коллектора (рисунок) для гиротрона с частотой 28 ГГц. Расчет производился с учетом того, что электроны на выходе из резонатора имеют разные энергии, разные питч-углы и разные фазы циклотронного вращения. Получено, что при одноступенчатой рекуперации на коллекторе рассеивается 53 %, а при двухступенчатой — 41 % мощности обработанного пучка.



Геометрия электродов и траектории электронного пучка
с пятью энергетическими фракциями,
различными питч-факторами и фазами электронов

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-41-02608.

1. *Manuilov V.N. et al.* Separation of energetic fractions of electron beam by cusped magnetic field // Proc. Int. Workshop Strong Microwaves in Plasmas. 1997. V. 2. P. 723-729.

АНАЛИЗ НЕАДИАБАТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ГИРОТРОНЕ

В.Е. Нечаев, О.П. Планкин, Е.С. Семенов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Работа посвящена аналитическому исследованию и численному моделированию особенностей движения релятивистского электрона в магнетронно-инжекторной пушке с очень малым числом осцилляций до влёта во входное отверстие анода (короткая пушка), а также влиянию нарушения характера изменения электрического поля в короткой анодной линзе, что приводит к подкачке (или ослаблению) энергии орбитального движения [1]. Эти процессы приводят в итоге к нерегулярности нарастания питч-фактора электрона с образованием «полочки» замедленного роста при изменении напряжения на аноде от 50 до 500 кВ и фиксированных прочих параметрах системы. Этот эффект был отмечен при траекторном анализе пушки гиротрона диапазона 94 ГГц [2], работавшей ранее в гиротроне диапазона 1 см. Дополнительные тестовые расчёты для вариантов с разными радиусами закруглений анода подтвердили указанную причину явления; более того, даже при сглаженных анодах характер изменения вращательного и продольного импульса не обнаруживает согласия с адиабатическим расчётом. Исходя из приводимого объяснения изложенного эффекта, можно предложить некое «управление» питч-фактором, которое, в первую очередь, зависит от подбора фазы вращательного движения вблизи анодного отверстия.

Развита аналитическая теория движения электрона в короткой пушке на базе неусреднённых уравнений и с учётом существенного электрического дрейфа (с полями, проникающими вглубь анодного канала).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-41-02608.

1. *Нечаев В.Е., Планкин О.П., Семенов Е.С.* Моделирование неадиабатических эффектов в магнетронно-инжекторной пушке мощных гиротронов // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: материалы конференции. Севастополь, 2015. Т. 1. С. 797–798.

2. *Абубакиров Э.Б., Гузнов Ю.М., Денисов Г.Г., Завольский Н.А., Запелалов В.Е., Запелалов С.А., Планкин О.П., Розенталь Р.М., Седов А.С., Семенов Е.С., Чирков А.В., Шевченко А.С.* Проект релятивистского гиротрона диапазона 100 ГГц с выходной мощностью 5–10 МВт // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2015. Т. 23, № 2. С. 94–107.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМИССИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ПЛАЗМЕННОГО СТОЛБА ПРИ РЕЛАКСАЦИИ В НЕМ СИЛЬНОТОЧНОГО МИКРОСЕКУНДНОГО РЭП

А.В. Аржанников^{1,2}, А.В. Бурдаков^{1,3}, В.С. Бурмасов^{1,2}, И.А. Иванов^{1,2}, А.А. Касатов¹, С.А. Кузнецов², М.А. Макаров¹, К.И. Меклер¹, С.В. Полосаткин^{1,3}, С.С. Попов¹, В.В. Поступаев^{1,2}, А.Ф. Ровенских¹, С.Л. Синицкий^{1,2}, В.Ф. Скляр^{1,2}, В.Д. Степанов^{1,2}, И.В. Тимофеев^{1,2}

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

³ Новосибирский государственный технический университет

В экспериментах по релаксации сильноточного электронного пучка в замагниченной плотной плазме регистрируется интенсивная эмиссия электромагнитного излучения на частотах, соответствующих модам электронных плазменных колебаний и процессам их превращения в электромагнитное излучение. Так, в серии текущих экспериментов ГОЛ – ПЭТ, проводимых в ИЯФ СО РАН, эти частоты лежат в интервале от 100 до 600 ГГц [1].

В докладе представлены результаты измерений спектральной плотности излучения из плазменного столба с плотностью в диапазоне $n_e = 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при инжекции в него микросекундного пучка релятивистских электронов с плотностью тока пучка $\sim 1 \text{ кА/см}^2$. Эксперименты проведены в условиях, когда плазменный столб удерживается в равновесии продольным магнитным полем 4,7 Тл. Установлено, что интенсивная эмиссия излучения происходит во время роста температуры плазмы, то есть именно тогда, когда реализуется процесс интенсивной передачи энергии от пучка к плазме. Спектральная плотность излучения из плазмы имеет локальные максимумы в двух интервалах частот: $\Delta\nu_1 = 120 - 240 \text{ ГГц}$ и $\Delta\nu_2 = 400 - 500 \text{ ГГц}$, которые соответствуют окрестности верхне-гибридной плазменной частоты и ее удвоенного значения. В окрестности верхне-гибридной плазменной частоты удельная мощность эмиссии достигает величины $0,7 \text{ кВт/см}^3$ при плотности плазмы $n_e \approx 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В свою очередь, в частотной полосе $\Delta\nu_2 = 400 - 500 \text{ ГГц}$ она достигает величины $0,1 \text{ кВт/см}^3$. В докладе детально обсуждается выход излучения вдоль и поперёк оси пучково-плазменной системы при различной плотности плазмы в диапазоне от 10^{14} до 10^{15} см^{-3} .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект RFMEFI61914X0003) и гранта РФФИ № 14-12-00610.

1. Manuscript ID T-TST-REG-08-2015-00203 “Dynamics and Spectral Composition of Subterahertz Emission from Plasma Column Due to Two-stream Instability of Strong Relativistic Electron Beam” submitted to the Transactions on Terahertz Science and Technology.

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ УГОЛКИ ДЛЯ МОДЫ HE_{11} КРУГЛОГО ГОФРИРОВАННОГО ВОЛНОВОДА

Г.Г. Денисов, Г.И. Калынова, Д.А. Луковников, Д.И. Соболев, А.В. Чирков

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В линиях передачи СВЧ-излучения на основе круглого гофрированного волновода простые волноводные уголки с плоским зеркалом имеют неудовлетворительные потери при умеренных радиусах волновода (несколько длин волн) [1]. Ранее были предложены различные варианты уголков, имеющих низкие потери на заданной частоте, и предложены регулярные методы синтеза таких компонентов [2]. Однако данные решения имеют недостаточную для многих применений частотную полосу.

В данной работе исследованы различные методы расширения частотной полосы: волноводные уголки с плоским зеркалом и специально синтезированными широкополосными волноводными преобразователями [3], одним синтезированным зеркалом [4] и двумя синтезированными зеркалами. Используя особенности излучения моды HE_{11} в свободное пространство, удалось разработать компактные конструкции уголков, имеющие низкие потери в широкой полосе. В частности, для радиуса волновода, примерно втрое превышающего длину волны, уголок с одним синтезированным зеркалом практически не превышает по размерам простой уголок, но имеет потери менее 3 % в полосе 10 %, а конструкция с двумя зеркалами ценой несколько больших размеров имеет практически нулевую кроссполяризацию. Также исследованы альтернативные варианты геометрии с тремя зеркалами (из которых одно плоское) на основе участка конфокальной зеркальной линии передачи, имеющие несколько худшие характеристики в полосе 10 % и большие размеры, но с неограниченно широкой полосой в сторону увеличения частоты.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-29-00192.

1. *Doane J.L., Moeller C.P.* HE_{11} mitre bends and gaps in a circular corrugated waveguide // *Int. J. Electronics*. 1994. V. 77, № 4. P. 489–509.

2. *Sobolev D.I., Chirkov A.V., Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Malygin V.I.* Minimization of diffraction losses in big gaps of multi-mode waveguides // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. 2005. V. 26, № 7. P. 953–966.

3. *Sobolev D.I., Denisov G.G.* Method for synthesis of wideband multimode waveguide elements // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2007. V. 50, № 9. P. 720–725.

4. *Bogdashov A.A., Chirkov A.V., Denisov G.G., Vinogradov D.V., Kuffin A.N., Malygin V.I., Zapevalov V.E.* Mirror synthesis for gyrotron quasi-optical mode converters // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. 1995. V. 16, № 4. P. 735–744.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОЛЕВЫЕ ЭМИТТЕРЫ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Е.П. Тарадаев, Т.А. Тумарева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Полевые эмиттеры привлекательны для использования во многих электронных устройствах. Однако широкому их применению в высоковольтных электронных приборах препятствует невысокая долговечность при отборе больших токов в условиях технического вакуума. В последние годы интерес к полевым эмиттерам существенно возрос в связи с созданием гиротронов и других СВЧ-приборов коротковолнового миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. Миниатюрные холодные полевые эмиттеры не требуют накала и больше подходят для коротковолновых СВЧ-устройств, чем термокатоды. Но трудности использования полевых эмиттеров в таких приборах усугубляются тем, что при их эксплуатации, наряду с высокой долговечностью, должны быть обеспечены одновременно большие токи эмиссии, превышающие пороговые значения порядка (или более) 20–30 мА, а также плотности токов эмиссии порядка (или более) 100–150 мА/см².

В докладе анализируются возможности использования в высоковольтных приборах разработанных к настоящему времени полевых эмиттеров. Выделены кажущиеся перспективными для таких приложений сэндвич-структуры из углеродных нанотрубок, катоды спиндтовского типа и катодные системы, состоящие из многослойных ячеек с дисковыми эмиттерами из углерода, а также разработанные авторами многоострийные эмиттеры с защитными покрытиями и эмиттеры из нанослоев материалов с разной работой выхода. Обсуждаются достоинства и недостатки существующих эмиттеров. Приведены результаты экспериментов и расчетов, свидетельствующие о преимуществах разработанных в СПбПУ катодных систем и о возможности их использования в высоковольтных электронных приборах, в том числе в диагностических гиротронах малой мощности.

Работа частично выполнялась при поддержке Министерства образования и науки РФ.

ПРОЕКТ ЛБВ ТРЕХМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ПЛАНАРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ, ФОРМИРУЕМЫМ В ПУШКЕ С УМЕРЕННОЙ КОМПРЕССИЕЙ

П.Б. Махалов, А.Э. Федотов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В последние годы в мире активно ведутся работы по созданию мощных усилителей в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. В частности, в трехмиллиметровом диапазоне усилители с выходной мощностью несколько сотен ватт представляют интерес для спектроскопии, телекоммуникаций, дистанционного зондирования, а также как предусилители для еще более мощных гироусилителей. Сложность создания лампы бегущей волны (ЛБВ) с требуемыми параметрами связана в том числе с очень высокой требуемой плотностью тока (до 1 кА/см^2) при использовании наиболее распространенной в настоящий момент конфигурации нитевидного электронного пучка. Проведение такого плотного пучка в непосредственной близости к поверхности замедляющей системы неизбежно приводит к токоосаждению и к высокой тепловой нагрузке на стенки, поэтому сейчас активно разрабатываются приборы на основе планарных пучков с существенно меньшей плотностью тока.

В работе приводятся результаты расчета черенковской ЛБВ трехмиллиметрового диапазона с планарным пучком и замедляющей системой в виде двух гребенок, сдвинутых друг относительно друга на половину периода. Такая периодическая структура представляется простой в изготовлении и совместимой с планарным электронным пучком. Моделирование показывает возможность получения выходной мощности 200–300 Вт и коэффициента усиления 21 дБ при использовании пучка толщиной 0,17 мм и шириной 1,7 мм с током 300 мА (плотность тока 100 А/см^2) при напряжении 20 кВ. Приводятся результаты численного исследования электронной пушки на основе термокатода с плотностью эмиссии 30 А/см^2 . Такие катоды широко используются в субмиллиметровых генераторах небольшой мощности – лампах обратной волны (ЛОВ), клинотронах и оротронах. Согласно расчетам, пушка квазипирсовской геометрии с умеренной магнитной компрессией позволяет формировать электронный пучок с необходимыми для ЛБВ параметрами и провести его через замедляющую структуру в поле постоянного магнита индукцией 0,65 Тл, при этом осаждается менее 5 % полного тока. Для того же электронного пучка и близкой по геометрии периодической структуры рассчитана ЛОВ, которая может быть использована для первоначальной экспериментальной проверки электронно-оптической системы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-38-20874.

УСТОЙЧИВОСТЬ ОДНОМОДОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГИРОТРОНАХ НА ГАРМОНИКАХ ГИРОЧАСТОТЫ С СИММЕТРИЧНЫМИ РАБОЧИМИ МОДАМИ

А.П. Фокин¹, М.Ю. Глявин¹, Г.С. Нусинович²

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Institute for Research in Electronics and Applied Physics, University of Maryland,
College Park, USA

Симметричные моды ($TE_{0,p}$) обладают особой привлекательностью для применения в высокочастотных гиротронах (суб-ТГц и ТГц) из-за малых омических потерь по сравнению с модами, чей азимутальный индекс $m \neq 0$. Как было недавно показано в [1], при работе на гармониках гирочастоты связь электронного пучка с конкурирующими модами оказывается слабее и может быть достигнута стабильная работа на гармонике гирочастоты. Однако при этом не рассматривалось синхронное взаимодействие рабочей моды с сателлитами $TE_{m,p}$ разного вращения на основном резонансе, для которых выполняются условия $m_1 + m_3 = m_2$ и $|\omega_1 + \omega_3 - \omega_2| \leq \omega/Q$. В данной работе проведено теоретическое и численное исследование возбуждения паразитных мод на первой гармонике в работе гиротрона с симметричной рабочей модой. В рамках теории малых возмущений построена теория синхронного взаимодействия мод и определена область устойчивости одномодовых колебаний на второй гармонике гирочастоты, при помощи численного моделирования исследован процесс установления колебаний в гиротроне, определена область устойчивого возбуждения колебаний симметричной моды на второй гармонике и показано влияние стартового сценария на эту область. Показано, что расширение области возбуждения при изменении стартовых условий позволяет повысить КПД гиротрона и увеличить максимальный рабочий ток.

1. *Nusinovich G S., Kashyn D.G., Antonsen, T.M.Jr.* Harmonic gyrotrons operating in high-order symmetric modes // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 106. P. 013502.

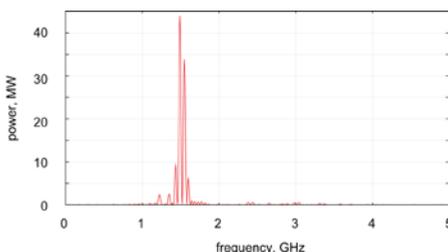
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО АКСИАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ВИРТУАЛЬНОМ КАТОДЕ С ФОЛЬГОВЫМ ФОТОННЫМ КРИСТАЛЛОМ ДЛЯ ВЫВОДА МОЩНОСТИ

Н.С. Фролов, С.А. Куркин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Генераторы на виртуальном катоде, или виркаторы, – интересный класс приборов плазменной СВЧ-электроники больших мощностей [1, 2]. Помимо высокого уровня выходной мощности подобные СВЧ-устройства обладают такими достоинствами, как простота конструкции, в том числе из-за возможности работать без приложения внешнего магнитного поля, и легкость в перестройке частоты колебаний или колебательных режимов благодаря изменению параметров пучка или геометрических размеров пространства дрейфа [1, 2]. Однако существенным недостатком виркаторов является низкий КПД из-за того, что существующие средства вывода мощности не позволяют вывести значительную часть излучаемой СВЧ-энергии.

Спектр мощности выходных СВЧ-колебаний гибридного аксиального виркатора с фотонным кристаллом при токе пучка 1,5 кА и энергии пучка 150 кэВ



В настоящей работе предлагается гибридная система «аксиальный виркатор с фотонным кристаллом». Фотонный кристалл в данном случае представляет собой двумерную периодическую структуру, состоящую из набора отрезков медной фольги. Дисперсионная характеристика данной периодической структуры показывает возбуждение прямых и обратных волн на частотах, близких к частотам виртуального катода, поэтому представляется эффективным использование фотонного кристалла для повышения КПД виркаторов. В рамках настоящей работы было проведено моделирование описанной системы в среде CST Particle Studio.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 14-12-00222).

1. *Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E.* High Power Microwaves. 3rd Edition. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2016.

2. *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* Электронные приборы с виртуальным катодом // РиЭ. 2002. Т. 47, № 6. С. 575.

К ТЕОРИИ КВАЗИОПТИЧЕСКОГО ВВОДА СИГНАЛА В ЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ

*А.И. Цветков, И.Г. Гачев, А.П. Гаштури, М.Б. Гойхман, Ю.М. Гузнов,
С.В. Мишакин, М.В. Морозкин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Одним из эффективных методов увеличения мощности и частоты вакуумных электронных микроволновых генераторов и усилителей является увеличение сечения пространства взаимодействия электронов с высококачественным полем. Однако продвижение по этому пути возможно лишь при условии обеспечения когерентности выходного излучения. Примером могут служить мощные субтерагерцовые гиротроны-автогенераторы, в которых комбинируется нескольких методов селекции мод. Подобные методы разрабатываются и применительно к мощным усилителям, основанным на стимулированных черенковском и циклотронно-резонансном излучениях субрелятивистских и релятивистских электронных пучков.

В частности, вращающуюся рабочую моду высокого порядка в модулирующем резонаторе гироклистрона можно возбудить волной, приходящей из коаксиального волновода (рисунок) [1] (внутренняя стенка коаксиального волновода на некотором отрезке гофрирована для смены азимутального индекса моды «шепчущей галерее»). В предлагаемом сообщении описан вариант такой системы ввода сигнала в имеющийся в ИПФ РАН мультимегаваттный 34,5 ГГц гироклистрон. На основе комбинации аналитических и численных методов конфигурация синтезирована так, чтобы, исключив самовозбуждение модулирующего резонатора, эффективно сопрячь его с питающим волноводом и минимизировать добротности паразитных мод в волноводном канале.



Схематическое изображение квазиоптической коаксиальной системы ввода излучения в модулирующий резонатор гироклистрона

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00431 мол_а.

1. *Petelin M., Danilov Yu., Pavelev V., Zasytkin E., Zaitsev N.* A research to high-order-mode gyroklystrons // Proc. IVEC-2010. Monterey, 2010. P. 191-192.

**ПРИЕМНИКИ
МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,
СПЕКТРОСКОПИЯ И МЕТРОЛОГИЯ**

КОГЕРЕНТНЫЕ И ПРЯМЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ БОЛОМЕТРОВ НА ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНАХ

*М. Щербатенко^{1,2}, Ю. Лобанов^{1,2}, В. Ковалюк¹, С. Селиверстов¹,
Г. Гольцман^{1,3}*

¹ Московский педагогический государственный университет

² Московский физико-технический институт

³ Национальный исследовательский университет

«Высшая школа экономики», Москва

Сверхпроводниковые болометры на эффекте электронного разогрева (НЕВ) зарекомендовали себя как одни из наиболее эффективных приёмников ТГц-излучения. В режиме прямого детектирования их эквивалентная мощность шума достигает значения $2,0 \times 10^{-13}$ Вт \times Гц $^{-0.5}$ при постоянной времени порядка 40 пс. Соответствующее значение энергетического разрешения составляет порядка 3 аДж. Такие быстродействующие и чувствительные ТГц-детекторы востребованы во многих важнейших практических приложениях, связанных с медициной, а также с системами обнаружения наркотических и взрывчатых веществ.

В смесительном режиме достигнутое значение шумовой температуры НЕВ составляет 600 К на частоте гетеродина 2,5 ТГц, а максимальное значение ширины полосы преобразования смесителей с диффузионным каналом охлаждения превышает 6 ГГц. Данные смесители находят свое применение в таких амбициозных проектах, связанных с гетеродинной астрономией, как RLT, Herschel, SOFIA, а также в российском проекте «Миллиметронтрон».

При разработке гетеродинного приемника одной из главных задач является уменьшение шумов вплоть до квантового предела. В ТГц-диапазоне актуальной задачей является уменьшение оптимальной мощности гетеродина. Новым интересным подходом является использование однофотонного детектора в качестве смесителя. Чувствительность однофотонного детектора по своей природе соответствует квантовому пределу. Кроме того, требуемая мощность гетеродина, необходимая для работы такого смесителя, составляет порядка пиковатта.

В данном докладе представлены результаты эксперимента по демонстрации гетеродинного детектирования в ИК-диапазоне с использованием сверхпроводникового однофотонного детектора на основе нанопровода (SNSPD) в качестве смесителя. Экспериментально установлено, что использованный гетеродинный приемник обладает чувствительностью близкой к квантовому пределу.

СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В АНСАМБЛЕ НАНОЛОКАЛИЗОВАННЫХ МОЛЕКУЛ H₂O

*Е.С. Жукова^{1,2,3}, А.С. Прохоров^{1,2}, В.И. Торгаев⁴, В.Г. Томас⁵, С. Kadlec⁶,
F. Kadlec⁶, M. Savinov⁶, T. Ostaruchuk⁶, J. Petzelt⁶, J. Prokleška⁷, П.В. Томас⁸,
Е.В. Пестряков⁹, Д.А. Фурсенко⁵, Г.С. Шакуров¹⁰, В.С. Горелик¹,
М.А. Белянчиков¹, Л.С. Кадыров¹, В.В. Усков¹, R. Kremer¹², M. Dressel³,
Б.П. Горшунув^{1,2,3}*

¹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

³ Physikalisches Institut, Universität Stuttgart, Germany

⁴ Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону

⁵ Институт геологии и минералогии РАН, Новосибирск

⁶ Institute of Physics AS CR, Praha, Czech Republic

⁷ Charles University, Prague, Czech Republic

⁸ Национальный исследовательский центр Высшей школы экономики, Москва;
Независимый московский университет

⁹ Институт лазерной физики РАН, Новосибирск

¹⁰ Казанский физико-технический институт РАН

¹¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

¹² Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, Germany

Отдельные молекулы воды обладают значительным электрическим дипольным моментом $d = 1,85 D$. Тем не менее ни жидкая вода, ни лёд не проявляют признаков (анти)сегнетоэлектрического дипольного упорядочения. Это связано с наличием короткодействующих водородных связей, которые подавляют дальнедействующее диполь-дипольное межмолекулярное взаимодействие. Известно, что свойства воды могут кардинально меняться при помещении отдельных молекул H₂O либо молекулярных кластеров в наноразмерные полости. При такой нанолокализации происходит изменение конфигурации водородных связей, что и ведёт к тому, что вода и лёд проявляют свойства, не наблюдающиеся в их макроскопическом (bulk) состоянии. В частности, многочисленные компьютерные симуляции и расчёты предсказывают возможность упорядочения дипольных моментов воды при образовании слоёв нанометровых толщин на двумерных интерфейсах либо при помещении молекул H₂O в углеродные нанотрубки. Экспериментально, однако, «водяное сегнетоэлектричество» до настоящего времени не наблюдалось. С применением методов субмиллиметровой ЛОВ-спектроскопии нам впервые удалось наблюдать чёткие свидетельства диполь-дипольного упорядочения в подсистеме молекул воды, расположенных в нанопорах кристаллической решётки диэлектрического кристалла – берилла: а) существование сегнетоэлектрической мягкой моды в субмиллиметровых диэлектрических спектрах; б) зависимость типа Кюри – Вейсса статической диэлектрической проницаемости; в) выход на плато при охлаждении ниже 10 К диэлектрической проницаемости и параметров мягкой моды. Последний результат гово-

рит о потенциальном (incipient) (анти)сегнетоэлектричестве в подсистеме водяных молекул. Упорядочение реализуется благодаря расположению отдельных молекул H_2O в кристаллической матрице на расстояниях, превышающих масштабы действия водородных связей, но достаточно близких для сохранения эффективности электрического диполь-дипольного взаимодействия.

В докладе обсуждаются детали выполненных исследований и полученные результаты.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЗАДАЧИ И ИНСТРУМЕНТЫ МИЛЛИМЕТРОВОЙ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ АСТРОНОМИИ

И.И. Зинченко

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

История миллиметровой астрономии насчитывает примерно полвека. За это время построено немало антенн этого диапазона и достигнут колоссальный прогресс в повышении чувствительности приемников. Позднее появились технические возможности астрономических наблюдений и на субмиллиметровых волнах. Это позволило получить важные астрофизические результаты. Но возникают новые задачи, и интерес к наблюдениям в этих диапазонах не ослабевает. Активно создаются новые инструменты.

Основные научные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии связаны с изучением «холодной» Вселенной, поскольку именно на этих волнах лежит пик излучения холодных межзвездных облаков, а также наблюдается наибольшее количество спектральных линий молекул, присутствующих в этих объектах. Облака эти интересны прежде всего тем, что в них происходят процессы звездообразования, которые до сих пор не вполне понятны.

В то же время наблюдения в этом диапазоне важны для космологии (микроволновый «реликтовый» фон), а также для исследований объектов совсем другого типа, с огромным энерговыделением – таких как сверхмассивные черные дыры в ядрах галактик. Это обусловлено, в частности, возможностью реализовать на этих волнах рекордное угловое разрешение.

Для решения этих задач строятся и проектируются новые наземные и космические инструменты. Так, недавно введена в строй антенная решетка ALMA. Ее подобием в северном полушарии будет NOEMA. Ведется разработка космических обсерваторий SPICA и «Миллиметр».

Работа выполнена при поддержке РФФИ.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ПОКРЫТИЯ ЗЕРКАЛА «МИЛЛИМЕТРОНА»

*Д.Р. Хохлов^{1,2}, Д.Е. Долженко¹, А.В. Галеева¹, Л.И. Рябова¹, Б.А. Аронзон²,
В.М. Пудалов², К.С. Перваков², Ю.Ф. Ельцев², А.В. Смирнов²*

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

В 2020–2023 годах планируется запуск автономной космической обсерватории «Миллиметр», работающей в терагерцовом спектральном диапазоне. Существенным источником шума в этой спектральной области является шум, связанный с собственным излучением материала, из которого сделано зеркало. Одним из способов уменьшения этого шума является снижение температуры зеркала телескопа. Оценки показывают, что при использовании стандартного металлического покрытия (например, алюминия) достижение необходимого уровня тепловых шумов зеркала будет происходить при температуре последнего около 7–10 К. Криогенные системы активного охлаждения, работающие в космическом пространстве, которые позволили бы охладить зеркало до таких температур, очень дороги и ненадежны. Кроме того, их установка существенно увеличит вес обсерватории, что, в свою очередь, может привести к проблемам с запуском.

Альтернативным решением является использование материалов с высокой отражательной способностью в терагерцовом диапазоне, например высокотемпературных сверхпроводников. Это могло бы позволить ограничиться пассивным охлаждением зеркал с использованием лишь солнцезащитных экранов до температуры 40–50 К. В то же время сведения об излучательной способности сверхпроводников в терагерцовой спектральной области в сравнении с металлическими покрытиями отсутствуют. Настоящая работа направлена на решение данной проблемы и состоит из нескольких частей: выбор оптимального сверхпроводящего материала, синтез материала, нанесение его на пластиковые модули, из которых состоит зеркало, создание установки для измерения низкотемпературной излучательной способности материалов, тестирование излучательной способности сверхпроводников и металлов при низких температурах в различных спектральных диапазонах.

Доклад представляет полученные к настоящему времени результаты в указанных выше направлениях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-02-00385.

ИЗМЕРЕНИЯ АСТРОКЛИМАТА НА ПЛАТО СУФФА В 2015 ГОДУ И ПЕРСПЕКТИВЫ НА 2016 ГОД

*Г.М. Бубнов^{1,2}, Ю.Н. Артеменко³, В.Ф. Вдовин^{1,2}, Д.Б. Данилевский⁴,
И.И. Зинченко¹, В.И. Носов¹, П.Л. Никифоров¹, Г.И. Шанин⁴, Д.А. Раупов⁴*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

³ Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

⁴ Радиоастрономическая обсерватория РТ-70 АН РУз, Ташкент

Одной из важнейших проблем освоения коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов для целей радиоастрономии и телекоммуникаций является наличие значительного поглощения волн этих диапазонов атмосферными газами. Оно подвержено существенным сезонным и суточным вариациям и существенно зависит от климата местности и высоты над уровнем моря.

В работе главным образом представлены результаты сезонных измерений астроклимата на месте строительства радиотелескопа РТ-70 на плато Суффа (2400 м над уровнем моря). Наблюдения производились в автоматическом режиме каждые 12 минут в течение целого сезона, начиная с ноября 2014 года. Рассмотрены кратковременные и долговременные закономерности изменения параметров прозрачности атмосферы, построены статистические диаграммы.

Также представлены характеристики аппаратуры, особенности её размещения на станции и особенности обработки данных. Наблюдения производились при помощи радиометрического комплекса МИАП-2, разработанного в ИПФ РАН. Комплекс позволяет определить оптическую толщину в 3- и 2-миллиметровых окнах прозрачности атмосферы при помощи метода «атмосферных разрезов».

В целом проведённые исследования позволяют сделать некоторые выводы о статистических параметрах атмосферного поглощения, что особенно важно в свете предстоящего возобновления строительства телескопа. Согласно этим данным, можно прогнозировать эффективность работы радиотелескопа на разных длинах волн и, как следствие, необходимую точность поверхности рефлектора. В частности, ставится под сомнение эффективность наблюдений в 1,3 мм окне прозрачности непосредственно с плато Суффа. Целесообразным представляется дополнить РТ-70 коротковолновым инструментом меньших размеров, расположив его на ближайшей вершине высотой 3400 м.

В работе анонсируются планы исследований астроклимата в 2016 году по проекту РФФИ 16-32-0038716. В рамках проекта планируется измерять прозрачность атмосферы в течение года в обсерватории «Бадары».

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КРИОГЕННЫХ МАЛОШУМЯЩИХ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИИ, АЭРОНОМИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

*И.В. Леснов^{1,2}, А.Е. Абашин^{1,2}, О.С. Большаков¹, Г.М. Бубнов^{1,2},
С.Ю. Дрягин^{1,2}, А.И. Елисеев^{1,2}, Д.В. Коротаев¹, М.А. Мансфельд¹,
А.С. Мухин^{1,2}, В.Ф. Вдовин^{1,2}*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработка высокочувствительной приемной аппаратуры и ее элементов в микроволновом и соседних диапазонах волн на сегодня остается актуальной задачей. К основным сферам приложений такой аппаратуры в радиоастрономии и аэрономии добавились телекоммуникации. И если радиоастрономические приемники, как правило, строятся под конкретные задачи и инструменты, являясь уникальными устройствами, задачи атмосферной спектроскопии тоже не носят и не могут носить массового характера, то телекоммуникации имеют серьезные перспективы массового внедрения, и наблюдается нарастающий интерес к разработкам, предсказанный нами на прошлом семинаре [1].

В докладе представлены результаты трехлетнего цикла работ команды авторов как определенный вклад в указанную общемировую тенденцию, в разработках собственной элементной базы и в исследованиях ее характеристик в лабораторных и натуральных экспериментах. Отчасти результаты отражены в публикациях последних лет [2–5], отчасти заявляются впервые.

Предсказанное продвижение развития телекоммуникационных приемников в ТГц-диапазон частот на сегодня четко прослеживается в росте публикаций о приемных системах коммуникационного характера [6, 7]. Уже имеется продвижение классических супергетеродинов с твердотельными УВЧ на входе вплоть до субмм-диапазона, хотя по параметрам они по-прежнему уступают лучшим образцам сверхпроводниковых приемников со смесителями на входе на контактах СИС (сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник) и на болометрических структурах. Необходимо отметить, что последние, в силу типичного заблуждения, обычно относят исключительно к приемникам прямого детектирования, не сохраняющим информацию о фазе принятого сигнала и, следовательно, бесполезным для когерентного приема, характерного для телекоммуникаций. Но это далеко не так, и болометры могут иметь чрезвычайно низкую инерционность выходной цепи, позволяющую реализовать в ТГц-диапазоне супергетеродинный прием на промежуточной частоте до десятков гигагерц [6]. Но это скорее экзотический режим, и по-прежнему востребованы традиционные ДБШ-смесители. Один из образцов смесительной камеры на волну около 1,2 ТГц был изго-

товлен для европейского проекта с российским участием *JUICE* [8]. Наряду с камерой отработана технология изготовления других волноводных и квазиоптических элементов и компонент криогенных и неохлаждаемых устройств и элементов приемной техники и экспериментального лабораторного оборудования для исследования их характеристик.

Ради преодоления определенного скепсиса в отношении ограничений использования ТГц-волн в силу значительного атмосферного поглощения продолжены разработки аппаратуры и методов исследования атмосферного поглощения, а также выполнены исследования, детально представленные в настоящем сборнике (см. Бубнов Г.М. и др. «Измерения астроклимата на плато Суффа в 2015 году и перспективы на 2016 год», с. 99).

Важным итогом работ последних лет стало завершение разработки и исследований двух комплектов криогенного МШУ X диапазона для двух 64-метровых антенн в Калязине и в Медвежьих Озерах, предназначенных для обеспечения дальней космической связи. Натурные тесты по небесным источникам подтвердили серию лабораторных экспериментов, заявивших кратное увеличение производительности телекоммуникационного канала благодаря использованию криогенной элементной базы.

Также велись разработки радиоастрономической аппаратуры для различных инструментов. Если для давнего партнера РАТАН-600 создан макетный образец двухчастотного двухполяризационного приемника, то для перспективных строящихся инструментов, в частности 70-метрового телескопа на Суффе (Узбекистан) и 110-метрового – в Урумчи (Китай), на сегодняшний день сформированы технические предложения и разрабатываются эскизные проекты и прототипы отдельных элементов приемных комплексов, которыми они будут оснащены в процессе строительства и ввода в эксплуатацию.

1. *Вдовин В., Леснов И., Ширяев М.* Перспективы реализации ТГц-телекоммуникационных каналов // IX Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. 2013.

2. *Вдовин В., Леснов И.* Повышение производительности беспроводных телекоммуникационных каналов и использование криоэлектронных приемных устройств // Журнал радиоэлектроники. 2015. Т. 9.

3. *Вдовин В., Грачёв В., Дрягин С., Елисеев А., Камалетдинов Р., Коротаев Д., Леснов И., Перминов В., Пилепенко А., Сапожников Б., Саурин В.* Криогенный малошумящий усилитель для систем дальней космической связи на сантиметровых волнах // Астрофизический Бюллетень. 2016. Т. 71, № 1.

4. *Abashin A., Bol'shakov O., Vdovin V., Kovalev F., Kuz'min L., Lesnov I., Morugin S., Mukhin A., Shiryaev M.* Cold electron bolometers: High-precision sensors of extremely weak signals in terahertz wave band // Automation & Remote Control. 2013. V. 74, № 1. P. 123.

5. *Abashin A., Artelny V., Baryshev A., Bolshakov O., Bubnov G., Ermolaev R., Korotaev D., Lesnov I., Mukhin A., Parshin V., Samsonov A., Serov E., Smirnov A., Trofimov V., Vdovin V., Vinogradov I.* 25th Space Cryogenics Workshop // Electromagnetic

and Thermal Performances Measurements of Components and Materials of Cryogenic Space Telescope Millimetron. Alyeska Resort in Girdwood, 2013.

6. *Schneider T.* Ultrahigh-Bitrate Wireless Data Communications via THz-Links; Possibilities and Challenges // *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.* 2015. V. 36, № 2. P. 159.

7. *Seliverstov S., Maslennikov S., Ryabchun S. et al.* Fast and Sensitive Terahertz Direct Detector Based on Superconducting Antenna-Coupled Hot Electron Bolometer Applied Superconductivity // *IEEE Transactions on.* 2015. V. 25, is. 3, P. 1; DOI: 10.1109/TASC.2014.2372171.

8. <http://sci.esa.int/juice/>.

КЕРМЕТЫ КАК ИСКУССТВЕННЫЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ МИКРОБОЛОМЕТРОВ СВЧ-ДИАПАЗОНА

*С.Н. Вдовичев^{1,3}, В.Ф. Вдовин^{2,3}, А.Ю. Климов¹, А.С. Мухин³,
О.Г. Удалов^{1,4}*

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

³ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

⁴ California State University, USA

С 1970-х годов ведутся исследования по формированию неохлаждаемых микроболометров на основе кремния, смеси кремний – германий и др., но пока не удается превзойти параметры болометров на основе окиси ванадия [1, 2]. В конце 1990-х группа французских исследователей обратила внимание на интересное свойство керметных пленок (кремний – металл) на основе ниобия – при концентрации ниобия менее 8 % сопротивление керметных пленок SiNb_x экспоненциально растет в рабочей точке около 0,3 К, при этом ТКС может достигать и превосходить $0,1 \text{ K}^{-1}$ [3].

В данной работе представлены результаты исследований по созданию тонких резистивных керметных пленок (Si-Cr_x , Si-Ti_x и др.) с возможностью управления «рабочей точкой» в широком температурном интервале при экспоненциальной зависимости сопротивления от температуры. Проводимость сформированных пленок хорошо описывается моделью прыжковой проводимости в гранулированных металлических пленках при наличии явлений кулоновской блокады: $R(T) \sim (T/T_0)^n$, где $n = 1/2$ (при термоактивационной (прыжковой) проводимости $n = 1$) [4].

Также представлены результаты работ по изготовлению и исследованию свойств свободновисящих микроболометров, болометров на твердом основании на основе керметных пленок, а также потенциальная возможность построения сверхвысокочувствительных болометров, используя комбинацию сегнетоэлектрик – керметная пленка.

Работа выполнена при поддержке CRDF № FSCX-14-61077-0 и РФФИ.

1. *Liddiard K.C.* Thin-film resistance bolometer IR // *Infrared Physics & Technology*. 1984. V. 24, iss. 1. P. 57.

2. *Wang B. et al.* Nanostructured vanadium oxide thin film with high TCR at room temperature for microbolometer // *Infrared Physics & Technology*. 2013. V. 57. P. 8.

3. *Hoffmann C. et al.* Nanostructured vanadium oxide thin film with high TCR at room temperature for microbolometer // *EAS Publications Series*. 2009. V. 37. P. 83.

4. *Beloborodov I.S., Lopatin A.V., Vinoku V.M.* Coulomb effects and hopping transport in granular metals // *Phys. Rev. B*. 2005. V. 72. P. 125121.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Г.Ю. Голубятников¹, С.П. Белов¹, А.В. Лапинов¹, В.П. Кочанов²

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева, Томск

В настоящей работе рассмотрен метод частотной модуляции (ЧМ) для детектирования спектральных линий в условиях нелинейного поглощения (провал Лэмба). Узкие резонансы насыщения на вершине доплеровских линий существенно повышают точность лабораторных значений частот молекулярных переходов и дают возможность изучения их сверхтонкой структуры, что диктуется интересами наземной и космической радиоастрономии [1].

Кратко рассмотрены теоретические основы используемого метода ЧМ для анализа детектируемых сигналов и форм линий [2, 3]. В измерениях использовался прецизионный субдоплеровский спектрометр мм- и субмм-диапазонов, работающий в режиме нелинейного насыщения спектральных переходов в стоячей волне – метод провала Лэмба [4].

Экспериментально показано влияние эффектов нелинейного поглощения на величину и форму регистрируемых ЧМ сигналов в квадратурных каналах при синхронном детектировании, а также показана необходимость учета влияния дисперсии групповой скорости («медленный свет») на форму регистрируемых спектральных линий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, Министерства образования и науки РФ и государственного задания № 0035-2014-0009.

1. Лапинов А.В., Левшаков С.А., Козлов М.Г., Голубятников Г.Ю., Белов С.П., Андриянов А.Ф., Шкаев А.П., Агафонова И.И., Зинченко И.И. Исследование фундаментальных свойств Вселенной на основе прецизионной спектроскопии молекул // Вестник РФФИ. 2012. № 1(73). С. 111-118.

2. Kochanov V.P., Belov S.P., Golubiatnikov G.Yu. Lamb-dip spectroscopy with the use of frequency-modulated radiation // JQSRT. 2014. V. 149. P. 146-157.

3. Kluczynski P., Gustafsson J., Lindberg A.M., Axner O. Wavelength modulation absorption spectrometry – an extensive scrutiny of the generation of signals // Spectrochimica Acta B. 2001. V. 56. P. 1277-1354.

4. Голубятников Г.Ю., Белов С.П., Леонов И.И., Андриянов А.Ф., Зинченко И.И., Лапинов А.В., Марков В.Н., Шкаев А.П., Guarnieri A. Прецизионный субдоплеровский спектрометр мм- и субмм-диапазонов длин волн на основе эффекта провала Лэмба // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8/9. С. 666-677.

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВ БОЛОМЕТРОВ НА ХОЛОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

А.В. Гордеева^{1,2}, В.О. Зброжек¹, А.Л. Панкратов^{1,2,3}, В.А. Шампоров²,
А.А. Гунбина¹, Л.С. Ревин^{2,3}, Л.С. Кузьмин^{1,4}

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

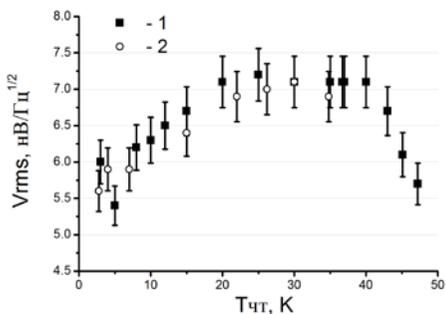
³ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

⁴ Чалмерский университет технологии, Швеция

В настоящее время задачи космологии выдвигают очень жесткие требования к детекторам, устанавливаемым на телескопы. Болومتر на холодных электронах является перспективными детекторами для космологических приложений, так как обладают всеми качествами, необходимыми для выполнения поставленных задач, такими как высокая чувствительность к терагерцовому излучению и устойчивость к воздействию космических лучей.

Цель этой работы – экспериментальная демонстрация того, что болометры на холодных электронах обладают высокой чувствительностью, т. е. чувствительны к фотонному шуму. Фотонный шум – это флуктуации, неизбежно присутствующие в любом излучении благодаря дискретной природе фотонов. Умноженный на вольт-ваттную чувствительность приемника, фотонный шум превращается в шумы напряжения / тока на детекторе. В идеальном детекторе все остальные компоненты шума, включая собственные шумы, меньше фотонной компоненты. Если это условие выполняется, говорят, что детектор ограничен фотонным шумом.

Зависимость шумов от температуры черного тела: 1 – первый запуск криостата; 2 – второй запуск криостата. Температура плиты 200 мК, ток через болометр 2 нА



Экспериментальная демонстрация фотонного шума является необходимым условием для установки этого типа болометров на телескопы. В данной работе мы измеряем отклик болометров на излучение черного тела и шумы при разных температурах черного тела $T_{чт}$. На рисунке представлены шумы как функция температуры черного тела. Увеличение шумов с ростом $T_{чт}$ и последующее спадание качественно совпадают с тем, что болометры «видят» фотонный шум. Однако нужен более детальный количественный анализ, чтобы определить долю фотонного шума среди других компонент шума болометра.

Очевидно, что требуется дальнейшая модификация схемы болометра, чтобы достичь режима «детектора, ограниченного фотонным шумом».

Работа выполнена при поддержке МОН (грант 3.2054.2014/К) и РФФИ (грант 15-47-02552).

УНИВЕРСАЛЬНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ И РАДИОЧАСТОТНЫХ СПЕКТРАХ БИОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Е.С. Жукова^{1,2}, А.С. Прохоров^{1,2}, К.А. Мотовилов¹, М. Savinov³,
А.А. Пронин², З.В. Гагкаява¹, К.В. Сидорук⁴, А.С. Тобохова¹,
А.К. Гребенко¹, Л.С. Кадыров¹, П.Ю. Барзилович¹,
V. Grinenko⁵, M. Dressel⁶, В.И. Торгашев⁷, Б.П. Горшунов^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

³ Institute of Physics AS CR, Praha, Czech Republic

⁴ Государственный научно-исследовательский институт генетики и селекции
промышленных микроорганизмов, Москва

⁵ Institute for Metallic Materials, Dresden, Germany

⁶ Physikalisches Institut, Universität Stuttgart, Germany

⁷ Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону

Замечательной особенностью низкочастотного диэлектрического отклика разупорядоченных материалов является универсальность температурного и частотного поведения динамической проводимости $\sigma_{ac}(v, T)$. При наличии квазисвободных носителей заряда, дающих вклад σ_{dc} в статическую проводимость, динамическая проводимость демонстрирует «универсальный диэлектрический отклик» (Universal Dielectric Response, UDR) $\sigma_{ac} = \sigma_{dc}[1 + (v/v_{co})^s]$ [1]. Здесь v_{co} – частота, при которой поведение проводимости меняется с частотно-независимого друдевского на прыжковое $\sigma_{ac} \sim v^s$ ($s \leq 1$). Еще одна универсальность наблюдается при достаточно низких температурах и высоких частотах, когда мнимая часть диэлектрической проницаемости оказывается практически не зависящей от частоты, $\epsilon'' \approx \text{const}$ (режим Nearly Constant Loss, NCL) [2].

Целью настоящей работы является использование аппаратурных возможностей твердотельной спектроскопии и соответствующих наработок в отношении микроскопических интерпретаций универсальностей диэлектрического отклика для исследования молекулярной и зарядовой динамики высокомолекулярных *биологических* систем, структура которых является принципиально «разупорядоченной» ввиду сложности биологических молекул. С использованием методов субмиллиметровой (сбмм) ЛОВ-спектроскопии (0,15 ТГц – 1 ТГц) в сочетании с радиоспектрометрами (1 Гц – 1 МГц) нами выполнены первые измерения диэлектрического отклика трех биологических объектов: *Shewanella oneidensis* MR-1 (pili), цитохрома С (CytC) и бычьего сывороточного альбумина (BSA) при температурах $T = 5\text{--}300$ К. Образцы представляли собой прессованные таблетки диаметром порядка 1 см и толщиной от миллиметра до долей миллиметра. Были также выполнены измерения теплоемкости (2–300 К). В pili-объектах нами обнаружены универсальности обоих видов, UDR и NCL. При этом наблюдаемая «сквозная» проводимость связывается с ионным транспортом по жидкой *связанной* во-

де, подчиняющимся скейлинговому соотношению $\sigma_{ac}(\nu)/\sigma_{dc} = F(\nu\sigma_{dc}^{-1}T^{-1})$ [3]. При гелиевых температурах в субмм-спектрах ν_{11} обнаружены признаки бозонного пика – возбуждения, типичного для разупорядоченных систем. Данные по теплоемкости ν_{11} ниже 2 К указывают на наличие стекланной фазы. Диэлектрические спектры CytC и BSA демонстрируют NCL-режим при температурах от комнатных до гелиевых. Полученные результаты анализируются в сравнении с известными микроскопическими моделями, развитыми для неорганических материалов.

1. A.K. Jonscher. Dielectric Relaxation in Solids. London : Chelsea Dielectric Press, 1983.
2. B.S. Lim, A.V. Vaysleyb, A.S. Nowick // Appl. Phys. A **56** 8 (1993).
3. B. Roling et al. // Phys. Rev. Lett. **78**, 2160 (1997).

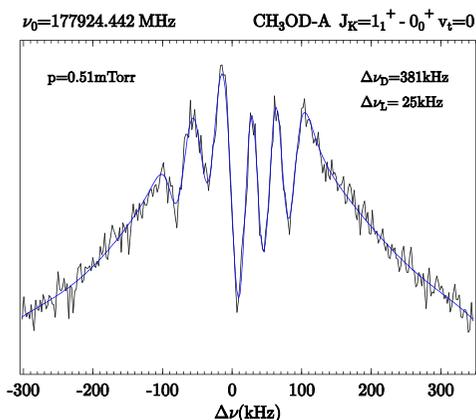
СУБДОПЛЕРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КВАДРУПОЛЬНОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ В СПЕКТРАХ МОЛЕКУЛ CH_3OD И HNCO

А.В. Лапинов, Г.Ю. Голубятников

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

На основе прецизионных лабораторных измерений при помощи созданного субдоплеровского спектрометра выполнены исследования сверхтонкого расщепления торсионно-вращательных переходов молекул CH_3OD , обусловленных электрическим квадрупольным моментом дейтерия, а также сверхтонкого расщепления чисто вращательных переходов молекул HNCO , обусловленных электрическим квадрупольным моментом азота, в основном и трех нижних возбужденных колебательных состояниях. Приводится сравнение точности измерений частот в доплеровском режиме при низких давлениях и измерений, полученных на основе провала Лэмба. Объяснены «аномалии» в отношениях интенсивностей сверхтонких компонент, вызванных различиями в уширениях линий мощностью излучения. Исследованы сдвиги линий давлением и интенсивностью излучения.

Выполненные измерения представляют большой интерес для исследования сверхтонкого расщепления в спектрах молекулах, а также для дальнейшего использования измеренных частот переходов при изучении физических условий в областях звездообразования и высокоточных исследованиях вариаций фундаментальных констант.



Пример субдоплеровских изменений на второй гармонике частоты модуляции сверхтонкого расщепления торсионно-вращательного перехода *b*-типа в молекуле CH_3OD и аппроксимации лэмбовских провалов на контуре профиля поглощения методом наименьших квадратов

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ и программы фундаментальных исследований ОФН РАН «Новые источники миллиметрового и терагерцового излучения и их перспективные приложения».

АНАЛИЗ РАДИОСИГНАЛОВ МИКРОВОЛНОВОГО И МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ С ПОМОЩЬЮ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ОСЦИЛЛОГРАФОВ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В.В. Мораренко

ООО «Кейсайт Текнолоджиз», Москва

Известно, что импульсная модуляция – основной формат модуляции сигналов радиолокационных станций. Но только лишь импульсная модуляция не сможет обеспечить выполнение современных требований по рабочему диапазону, разрешению и РЭБ. Поэтому используются комплексные схемы модуляции и в то же время растут частоты несущего сигнала и расширяется занимаемая полоса частот сигнала. При измерениях сигналов миллиметрового диапазона зачастую достаточно иметь определённый набор параметров: значения мощности сигнала в канале, спектральных характеристик, параметров модуляции (частотная модуляция, фаза, временные характеристики огибающей). При этом очень важно иметь точные инструменты для анализа таких сложных сигналов. Такими инструментами могут быть анализаторы сигналов или спектра, дигитайзеры или цифровые осциллографы. Но в первую очередь, подбирая инструмент, необходимо учесть не-

сколько ключевых параметров: полосу частот приемника для детектирования несущей частоты, полосу анализа для захвата всей занимаемой полосы частот сигнала и динамический диапазон.

Истинный широкополосный аналоговый тракт

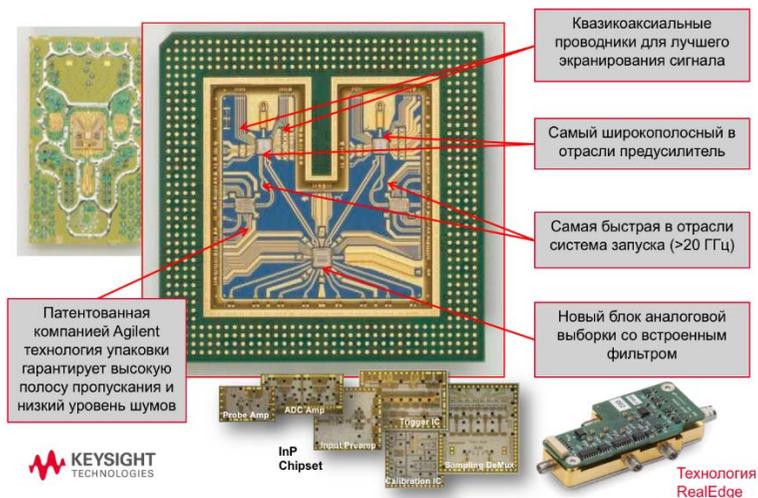


Рис. 1. Основные компоненты широкополосных осциллографов Keysight

Современные цифровые осциллографы могут иметь полосу пропускания, необходимую для детектирования и анализа сигналов микроволнового и миллиметрового диапазонов. Но не только лишь полоса делает осциллографы пригодными для таких измерений. Необходимо учитывать и равномерность частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ), и динамический диапазон, и паразитные составляющие и т.д. Так, например, основные компоненты осциллографов компании Keysight Technologies семейства Infiniium (рис. 1) традиционно выполнены с применением новейших запатентованных технологий, разрабатываются и производятся только для приборов компании Keysight и представляют собой поистине широкополосные, прецизионные элементы. Например, новые специализированные интегральные схемы на основе фосфида индия (InP) в сериях V и Z (рис. 2) позволяют достичь лучших в отрасли характеристик, среди которых: истинная аналоговая полоса пропускания 63 ГГц, самый низкий уровень собственных шумов, самый высокий динамический диапазон и наиболее равномерные частотные характеристики.

Осциллографы Keysight семейства Infiniium

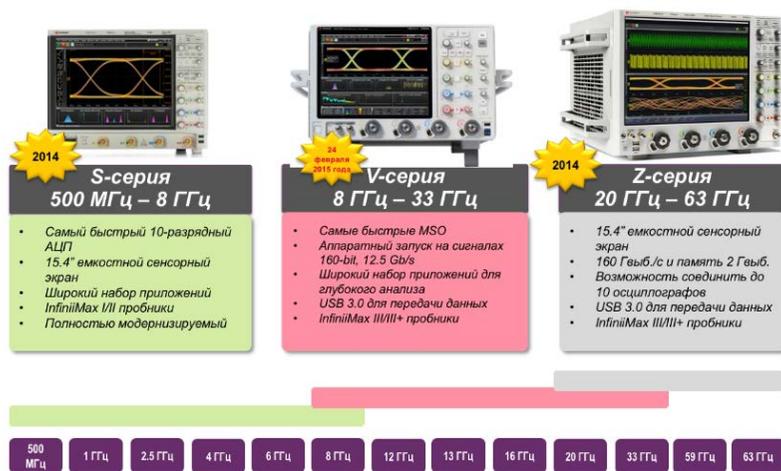


Рис. 2. Цифровые осциллографы компании Keysight семейства Infiniium и их полосы пропускания

В работе показаны характеристики приборов, влияющие на качество и точность анализа высокочастотных широкополосных радиосигналов, а также возможности базового интерфейса и программных пакетов, которые нашли применение в данном направлении.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ БИПОЛЯРНОЙ АВТОКОРРЕКЦИИ ОПОРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Л.В. Савкин

Публичное акционерное общество «Радиофизика», Москва

Как было отмечено в [1, 2], одной из проблем, связанных с компенсацией параметров аппаратной функции, влияющих на изменение пространственного спектра изображения, является невозможность учета всех шумовых воздействий на приемный сигнал. Там же был предложен способ восстановления искаженного оптической системой радиоизображения, основанный на использовании спектра предварительно сформированного опор-

ного изображения и не требующий знания шумовых (помеховых) воздействий на принимаемый сигнал [2]. Большим достоинством данного способа является его простота при практической реализации, поскольку алгоритмически процедура фильтрации шумов будет представлять собой прямое (аддитивное) наложение опорного и регистрируемого изображений с последующим вычетом «лишних» спектральных значений итогового (восстановленного) радиоизображения. В то же время предложенный способ будет недостаточно эффективным при получении «зашумленных» радиоизображений от динамически перестраиваемых в пространстве объектов, таких, например, как водная поверхность, фрагменты мегаполиса и т. д.

В данной работе от вышеотмеченного недостатка предлагается частично избавиться, используя возможности биполярной автокоррекции опорных изображений. Суть данного способа состоит в том, что вместо одного спектра опорного изображения формируются два независимых, которые одновременно могут накладываться на спектр изображения, регистрируемого на выходе приемного тракта. В зависимости от изменения значений шумовых параметров аппаратной функции спектры опорного изображения могут либо расходиться по частотной оси, либо приближаться друг к другу. Процедура автокоррекции опорного изображения будет заключаться в том, чтобы достичь такого аддитивного наложения двух опорных спектров, при котором шумовая составляющая на входе приемного тракта будет однозначно различима. Задача алгоритма автокоррекции – свести к минимуму общее число итераций, отвечающих за единичное перемещение каждого из опорных спектров на общей оси частот.

В докладе приводятся примеры восстановленных радиоизображений, полученных с использованием биполярной автокоррекции опорного изображения.

1. *Зражевский А.Ю., Кокошкин А.В., Новичихин Е.П., Титов С.В.* Повышение качества радиоизображений // *Нелинейный мир.* 2010. № 9. С. 582-590.

2. *Зражевский А.Ю., Коротков В.А.* Восстановление искаженного оптической системой радиоизображения с помощью метода опорного изображения // *IX Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн : тезисы докладов.* Нижний Новгород, 2013. С. 122.

СОСТАВ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО КОМПЛЕКСА АППАРАТУРЫ ЭТАЛОНА СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ШУМОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ГЭТ 21-2011 В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 178–220 ГГц

Ю.А. Буренков, О.В. Каминский, И.М. Малай, М.В. Саргсян

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево Московской области

Для разработки и контроля метрологических характеристик пассивных и активных устройств необходимо обеспечение контроля таких параметров, как ослабление, коэффициент передачи, коэффициент шума и спектральная плотность шумового радиоизлучения (СПМШ).

Освоение частотного диапазона в субмиллиметровой области длин волн даст большой эффект в расширении дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности в интересах решения экологических проблем и создания систем дистанционного контроля технологических процессов.

Технические характеристики экспериментальных образцов составной части ГЭТ 21-2011, заданные в НИР, приведены в таблице:

Наименование метрологических и технических характеристик	Значения метрологических и технических характеристик
Диапазон частот, ГГц	от 178 до 220
Диапазон эквивалентной шумовой температуры низкотемпературного генератора шума, К	от 85 до 95
Погрешность воспроизведения шумовой температуры низкотемпературным генератором шума, К, не более	от 3 до 5

Экспериментальный образец составной части ГЭТ 21-2011 должен обеспечивать выполнение следующих задач:

- воспроизведение, хранение единицы СПМШ;
- передачу единицы СПМШ рабочим эталонам и рабочим средствам измерений.

Для решения этих задач необходимо выполнить комплекс научно-исследовательских и конструкторско-технологических работ, направленных на получение вышеуказанных метрологических характеристик экспериментального образца составной части ГЭТ 21-2011. В ходе работы предполагается расширить частотный диапазон эталона СПМШ от 178 до 220 ГГц. Это даст возможность метрологически обеспечивать радиопромышленность и ВПК Российской Федерации.

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ РЕЗОНАТОРНОГО СПЕКТРОМЕТРА МИЛЛИМЕТРОВОГО – СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

*И.И. Леонов, А.И. Чернова, Г.М. Бубнов, А.Ф. Андриянов, А.П. Шкаев,
М.А. Кошелев, Е.А. Серов, В.В. Паршин, М.Ю. Третьяков*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Выполнена модернизация резонаторного спектрометра для исследования поглощения в газах в мм/субмм-диапазонах [1]. Реализован режим автоматической записи спектра исследуемого газа во всем диапазоне частот ЛОВ, поддерживающий режим ФАПЧ во время сбора данных, включая управление перестройкой напряжения блока питания ЛОВ, частотой опорного синтезатора и аттенюатора в тракте возбуждения резонатора. Значительно уменьшено время записи резонансной кривой резонатора. Измерительный резонатор дополнен системой дистанционного управления перемещением зеркала, позволяющей изменять межмодовый интервал резонатора.

Для быстрого сканирования частоты при записи резонансного контура применен синтезатор частоты прямого цифрового синтеза PTS x10. Он позволил уменьшить время, требуемое для переключения частоты без фазовых скачков при записи резонансной кривой более чем в 10 раз: с 58 мкс до 4–5 мкс. Для использования возможностей синтезатора PTS x10 была разработана новая автоматизированная система управления и сбора данных, включающая быстрый ЦАП-АЦП National Instruments USB-6251, шаговый двигатель для управления аттенюатором в тракте возбуждения резонатора. Автоматическая запись спектра исследуемого газа в диапазоне одной ЛОВ (120 точек, 105–150 ГГц) занимает 20 мин (в прошлой модификации на это уходило 90 мин).

Выполненная модернизация позволяет при стабильности условий (температуры, давления газа) увеличить чувствительность резонатора в несколько раз. Перемещение зеркала резонатора позволяет записывать спектр с произвольно заданным шагом по частоте.

Работа частично поддержана РФФИ и грантом Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых № МК-6696.2015.2.

1. *Tretyakov M.Yu., Krupnov A.F., Koshelev M.A., Makarov D.S., Serov E.A., Parshin V.V.* Resonator spectrometer for precise broadband investigations of atmospheric absorption in discrete lines and water vapor related continuum in millimeter wave range // *Rev. Scientific Instr.* 2009. V. 80. P. 093106.

СПОСОБ РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ТЕЛЕСКОПА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН»

В.Б. Хайкин, М.К. Лебедев, Р.Р. Байрамуков

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз,
Карачаево-Черкесская республика

В [2] рассмотрены и предложены оптические и радиотехнические способы юстировки главного зеркала (ГЗ) и контррефлектора (КР) субмиллиметрового радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметрон» [1]. С этой целью предложено у основания трех из шести опор гексапода, поддерживающего КР, разместить три бесконтактных лазерных радара (БЛР) в специальном космическом исполнении АРІ. Четвертый БЛР предложено разместить в фокальной области на платформе с приемниками для контроля ее положения относительно КР через перископическое зеркало. Ожидаемая погрешность измерения топографии поверхности БЛР составляет 25 мкм (СКО) при углах между лазерным лучом и нормалью к поверхности не более 70°. Как показало моделирование, при размещении БЛР у основания опор гексапода это условие выполняется для всей поверхности ГЗ и для 2/3 поверхности КР.

В работе [2] показано, что ожидаемые термические деформации отдельных панелей ГЗ проекта «Миллиметрон» при скачке температур Земля – космос существенно превышают требуемую точность поверхности, что требует увеличения числа актуаторов панели с 3 до 4–5. В настоящей работе получены термические деформации панелей ГЗ в составе лепестка, что подтверждает ранее сделанный вывод и требует достижения пространственного разрешения основного метода контроля отражающей поверхности, существенно большего, чем размер панели, что и обеспечивают предложенные ранее оптические методы [2].

Для независимого контроля качества всей поверхности ГЗ и ее частей с разрешением размера панели предлагается применить радиоголографию по H_2O -мазерам в диапазоне 22 ГГц и 183 ГГц и ультракомпактным областям НШ в диапазоне до 850 ГГц с использованием штатных приемников радиотелескопа. С этой целью в качестве внеосевой опорной волны в процессе формирования голограмм предложено использовать отраженный сигнал от периферийной панели ГЗ, дискретно и циклично смещаемой по радиусу в пределах длины волны, что обеспечит временную и пространственную когерентность метода, позволит получить линейный сдвиг фазы и разделить восстановленное действительное и мнимое изображения поля в раскрыве. Точность метода зависит от фактически достижимого отношения С/Ш и переменного потока H_2O -мазера. По нашим оценкам, достижимая среднеквадратичная точность метода не лучше 50 мкм в процессе быстрых изме-

рений (1 секунда на точку), но может быть повышена при длительном накоплении сигнала в условиях наблюдения неподвижного источника из точки расположения телескопа ($L2$) в отсутствие земной атмосферы. Достижимая в случае длительного накопления точность метода требует дальнейшего моделирования и проведения экспериментов на полноповоротном радиотелескопе с активной поверхностью. Максимально достижимая точность метода также ограничена фазовой ошибкой диаграмм направленности облучающих рупоров и не может быть выше 15–20 мкм при любом отношении С/Ш.

Приводятся результаты моделирования радиологического способа контроля качества поверхности телескопа. Предложенный способ в наземных условиях успешно испытан на радиотелескопе РАТАН-600 с использованием его активной поверхности по сигналу ГСЗ в Ку-диапазоне и в режиме автоколлимации на волне 10 мм.

1. *Smirnov A.V., Baryshev A.M., Pilipenko S.V., Myshonkova N.V., Bulanov V.B., Arkhipov M.Y., Vinogradov I.S., Likhachev S.F., Kardashev N.S.* Space mission Millimeter for terahertz astronomy // Proc. SPIE 8442, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 84424C (August 22, 2012) ; doi:10.1117/12.927184.

2. *Хайкин В.Б., Лебедев М.К., Байрамуков Р.Р.* Способы моделирования характеристик и юстировки субмиллиметрового телескопа космической обсерватории «Миллиметрон» // Труды конференции «III Московская микроволновая неделя». 2015. [в печати].

СПОСОБЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ «ЮГ + ПЛОСКИЙ» РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600 В МНОГОАЗИМУТАЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ПО СИГНАЛУ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

В.Б. Хайкин, А.В. Шендрик, Н.Н. Бурсов, М.К. Лебедев, А.А. Стороженко

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз,
Карачаево-Черкесская республика

Описаны способы измерения антенных характеристик: фокального поля (ФП), диаграммы направленности (ДН) и КПД отражающих элементов антенной системы «юг + плоский» (АС «Ю+П») радиотелескопа РАТАН-600 в многоазимутальном режиме по сигналу геостационарных спутников Земли (ГСЗ). С этой целью ось АС последовательно наводится на заданный ГСЗ по азимуту и углу места до получения максимального отклика и достижения минимального уровня внеосевых аберраций. Для измерения КПД вклад

каждого щита сравнивается с опорным. Измерение антенных характеристик выполняется с помощью штатных приемников и автоматического сканирования ГСЗ кареткой облучателя, продольного смещения облучателя (ФП) или наклона плоского отражателя (ДН).

Смещением расчетного фокуса параболы найдены оптимальные положения продольного фокуса АС «Ю+П» в 13 азимутах (по 13 ГСЗ). Впервые в автоматическом (безлюдном) режиме измерен КПД (вклад) всех щитов АС «Ю+П» в меридиане по сигналу ГСЗ. Получены первые успешные записи и результаты восстановления радиолографического сигнала по ГСЗ для решения задачи быстрого контроля качества поверхности радиотелескопа.

Антенные измерения по сигналу ГСЗ выполнены в *Ku*-диапазоне (12,5–16,5 ГГц), в настоящее время в тех же целях на РАТАН-600 осваивается более высокочастотный *Ka*-диапазон работы ГСЗ. Результаты антенных измерений в многоазимутальном режиме работы АС «Ю+П» сравниваются с модельными и результатами автоколлимационных антенных измерений на волнах 8 и 10 мм. Некоторые полученные результаты антенных измерений и моделирования антенных характеристик в многоазимутальном режиме работы АС «Ю+П» приведены ранее в [1, 2].

1. Хайкин В.Б., Тохчукова С.Х., Лебедев М.К., Бурсов Н.Н., Стороженко А.А., Шендрик А.В., Богод В.М. Результаты моделирования и измерений характеристик антенной системы «юг + плоский» радиотелескопа РАТАН-600 в режиме многоазимутальных наблюдений // Тр. ВРК-2014. Пушино. 2014.

2. Хайкин В.Б., Лебедев М.К., Бурсов Н.Н., Стороженко А.А. Контроль характеристик радиотелескопа РАТАН-600 по ГСЗ // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 7.

МИКРОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР И ПРИБОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Н.В. Востоков, С.А. Королёв, А.Н. Резник, В.И. Шашкин

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

При отработке технологии изготовления полупроводниковых приборов требуются методы электрофизической диагностики экспериментальных образцов. Особенно важными являются измерения на частотах близких к рабочим частотам данного прибора. Настоящая работа посвящена применению и развитию двух методов диагностики в микроволновом диапазоне: ближнепольной микроскопии и малосигнальной характеризации.

Микроволновая ближнепольная микроскопия позволяет исследовать объекты на микронных и субмикронных пространственных масштабах, на

много порядков меньше рабочей длины волны. Наилучшее разрешение достигается в настоящее время микроскопами с коаксиальными зондами. Для описания подобных устройств предлагается использовать концепцию монопольной антенны, в которой переменный заряд сосредоточен только на заостренном конце центрального проводника торца коаксиальной линии. Соответствующая модель была нами разработана для случая взаимодействия зонда с произвольной плоскостной средой. Показано, что разработанная модель микроскопа хорошо согласуется с экспериментальными данными.

На примере тонких (толщина 0,5÷1,2 мкм) полупроводниковых плёнок *n*-GaN, легированных кремнием, выращенных на сапфировой подложке, показано, что развитая теория может быть положена в основу метода характеристики планарных структур. Было измерено удельное сопротивление R_{sh} [Ом/□] плёнок. С этой целью для каждого исследуемого образца снимаются высотные зависимости резонансной частоты $f_0(h)$ и добротности резонатора $Q_0(h)$; строится параметрическая функция $y(x)$, где $x = (f_0(h) - f_0^S(h)) / f_0^S(h)$, $y = 0,5 \cdot (1/Q_0(h) - 1/Q_0^S(h))$ – изменения резонансной частоты и обратной добротности на образцах относительно значений $f_0^S(h)$, $Q_0^S(h)$, измеренных для сапфировой подложки без полупроводниковой пленки. Та же самая функция $y(x)$ рассчитывается с использованием подгоночных параметров модели, которые определяются по данным калибровочных измерений эталонных образцов. В качестве эталонов выбираются достаточно простые структуры – однородные полупроводниковые пластины с различной величиной объемного легирования. За R_{sh} плёнки принимается величина, для которой результаты расчёта функции $y(x)$ наилучшим образом соответствуют экспериментальным данным. Выполненные измерения показали систематическое превышение статических данных над микроволновыми, что может быть связано с высокой плотностью протяжённых дефектов – дислокаций различного типа в образцах. Это наблюдение требует дальнейшего изучения для извлечения дополнительной информации методами микроволновой диагностики.

Методом малосигнальной характеристики определялись параметры изготовленных полевых транзисторов, низкобарьерных диодных структур и СВЧ-диодов Мотта на их основе. Измерения проводились на векторном анализаторе цепей E8361A (Agilent Technologies) в полосе частот от 10 МГц до 67 ГГц.

По измеренным *S*-параметрам транзисторов рассчитывались частотные зависимости коэффициентов усиления по току и по мощности, определялись параметры стандартной малосигнальной эквивалентной схемы. Слабая зависимость параметров малосигнальной модели транзистора от частоты показывает, что использованная модель достаточно точно описывает поведение транзисторов. Данные высокочастотных измерений хорошо совпадают со

статическими характеристиками. Максимальная частота усиления транзисторов по току составляет 25 ГГц, по мощности – 75 ГГц.

Для измерения S -параметров низкобарьерных диодов Мотта они монтировались в разрыв копланарной линии. По частотным зависимостям S -параметров определялись зависимости импеданса диодов от частоты и рассчитывались параметры эквивалентной схемы. Проведенные измерения показали, что в исследуемом диапазоне частот диоды хорошо описываются простой эквивалентной схемой с параллельным соединением дифференциального сопротивления и ёмкости перехода Мотта и дополнительным сопротивлением, включённым к ним последовательно. Дополнительные элементы схемы не потребовались. Исследованы зависимости параметров диодов от постоянного смещения. С увеличением прямого смещения на диодах наблюдается рост последовательного сопротивления и сильный рост емкости. При прямых смещениях больше эффективной высоты барьера перехода дифференциальное сопротивление становится меньше последовательного, а емкость на порядок больше емкости несмещенного диода.

Аналогичные измерения проведены на низкобарьерных диодных структурах. Для определения частотной зависимости импеданса перехода Мотта измерялась зависимость от частоты коэффициента отражения от встречно включенных контактов Мотта, сформированных на поверхности образца. Показано, что данная методика позволяет с необходимой точностью определять дифференциальное сопротивление и ёмкость низкобарьерного перехода Мотта в заданной точке приборной структуры.

Работа выполнена при поддержке Программы РАН и гранта РФФИ № 15-02-04081.

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ШУМА – ЭТАЛОННЫЕ И РАБОЧИЕ МЕРЫ ЕДИНИЦЫ ШУМОВЫХ И ЯРКОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР

И.М. Малай, И.Е. Арсаев, А.И. Лапшин, М.В. Саргсян, Э.Ф. Юрчук

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская область

Для обеспечения единства и правильности измерений шумовых и яркостных температур спутниковыми и наземными радиометрами дистанционного зондирования Земли, радиотелескопами, радиометрами, предназначенными для измерений температуры и влажности атмосферы, в ФГУП «ВНИИФТРИ» разрабатываются широкоапертурные низкотемпературные

генераторы шума (ШНГШ) – эталонные и рабочие меры единиц шумовой и яркостных температур.

Характеристики эталонных и рабочих мер единиц шумовой и яркостной температур		Широкополосные генераторы шума									
НГШ		ФГУП ВНИИФТРИ (Россия)									
Разработчик		ВНИИФТРИ (Россия)		ВНИИФТРИ (Россия)		ИПА РАН (Россия)		ЦКНПТ (АН КНР)		Berkeley University of California (USA)	
Владелец		ВНИИФТРИ (Россия)		ВНИИФТРИ (Россия)		ВНИИФТРИ (Россия)		ИПА РАН (Россия)		Berkeley University of California (USA)	
Средство измерений	НГШ – К-В государственный первичный эталон единицы шумовой температуры, ГЭТ 21-2011	НШИ-100 государственный эталон единицы шумовой температуры, З.1.ZZT.0014.2012	ПНШИ-200 государственный рабочий эталон единицы ШТ 1-го разряда З.1.ZZT.0218.2015	КСК РШТ – комплекс средств калибровки радиотелескопа РСДБ «Казань-Мь»	Комплект ШНГШ для наземной и бортовой калибровок китайских спутниковых радиометров, НШИ-200, НШИ-300, НШИ-500	LiHcSL – рабочий эталон для калибровки средств измерений параметров фонового (реликтового) излучения	ШНГШ для национального эталона единицы яркостной температуры	НШИ (USA)	НШИ (USA)	НШИ (USA)	НШИ (USA)
Параметры											
Диапазон частот, ГГц	0,01÷178	18,1 ÷ 118,3	2,0 ÷ 40,0	2,0 ÷ 40,0	6,6 ÷ 220,0	1,3 ÷ 12	18 ÷ 26				
Воспроизводимые уровни ШТ, К	78-122	78; 294	81; 293	~ 80; ~ 294	~ 77,4; ~ 294	~ 3,8	200 ÷ 300				
Попрежность воспроизведения единицы ШТ, К	СКО 0,6 НСП 1,0	СКО 0,1 НСП 0,5 ÷ 1,5	$U_c = 0,7 \div 1,7$	$\Delta T_{sh} = 3,0 (P=0,95)$	$\Delta T_{sh} = 0,9 \div 1,8 (P=0,95)$	~ 0,3	≤ 1,0				
Апертура, мм	Волноводы, коаксиал 7/3	100	210	~ 260	200, 300, 500	780	300				
Хладагент	Жидкий азот	Жидкий азот	Жидкий азот	Жидкий азот	Жидкий азот	Жидкий гелий	Нагреваемый				

Диапазоны частот, уровни шумовых и яркостных температур, погрешности воспроизведения единицы ШТ и ЯТ разработанных ШНГШ приведены в таблице.

В докладе приведены характеристики разработанных ШНГШ, результаты их использования для поверки и калибровки радиотелескопов радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ), спутниковых радиометров ДЗЗ, наземных радиометров водяного пара и радиометров для измерений профиля температуры атмосферы.

Приведены характеристики предполагаемых к разработке эталонных волноводных и широкоапертурных НГШ в диапазоне частот от 140 до 325 ГГц (см. табл. на стр. 119).

**МИЛЛИМЕТРОВОЕ
И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
В ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

КОМПАКТНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ДЛЯ БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

С.В. Голубев, И.В. Изотов, С.В. Разин, А.В. Сидоров, В.А. Скалыга

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Лучевая терапия была и остается одним из основных методов лечения злокачественных новообразований. В ней нуждается не менее 65–70 % онкологических больных. Несмотря на впечатляющие успехи в развитии методик и аппаратуры для лучевой терапии, которые позволяют максимально эффективно облучать опухоль без повреждения окружающих нормальных тканей, существует группа новообразований, устойчивых к стандартным лучевым воздействиям. Решением данной проблемы может стать бор-нейтронозахватная лучевая терапия (БНЗТ). Суть метода БНЗТ заключается в следующем. Стабильный изотоп бора ^{10}B вводится в организм больного и захватывается раковыми клетками (в настоящее время существует несколько способов, позволяющих достичь максимальной концентрации препарата именно в опухоли). Затем пациент облучается потоком эпитепловых нейтронов (с энергией в диапазоне $0,5 \text{ эВ} < E_n < 30 \text{ кэВ}$). В результате захвата нейтрона стабильным изотопом ^{10}B (сечение этой реакции примерно в 3500 раз превосходит сечение захвата нейтрона ядрами ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , H , составляющими основу животных тканей) происходит ядерная реакция и раковая клетка гибнет.

Преимущества БНЗТ уже были наглядно продемонстрированы при лечении новообразований, устойчивых к любым другим видам терапевтических воздействий с использованием потоков нейтронов от мощных экспериментальных ядерных реакторов, поскольку в настоящее время только они могут обеспечить необходимую плотность потока нейтронов на уровне $10^9 \text{ n}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ с соответствующим уровнем коллимации и размерами терапевтической апертуры. Уникальные результаты были получены при проведении нейтронозахватной терапии наиболее злокачественной и агрессивно протекающей опухоли головного мозга – мультиформной глиобластомы, в течение последних 20 лет методами БНЗТ проведено успешное лечение более 1000 пациентов с подобными заболеваниями.

К сожалению, высокая стоимость лечения на уникальных ядерных реакторах, расположенных, как правило, в крупных ядерных исследовательских центрах, без соответствующего медицинского оборудования, сильно сдерживает развитие БНЗТ. В этой связи представляются весьма перспективными разработки специализированных медицинских источников нейтронов. Таким компактным, мощным, чистым (не использующим радиоактивные вещества) источником нейтронов может быть источник нейтронов на основе D-D-генератора нового поколения, в котором используется оригинальный высокоточный ЭЦР-источник ионов дейтерия с накачкой мощным миллиметровым излучением современных гиротронов. Использование для

поддержания разряда в магнитных ловушках в условиях электронно-циклотронного резонанса миллиметрового излучения позволяет получать плазму с уникальными параметрами (плотностью свыше 10^{14} см⁻³, температура электронов на уровне нескольких десятков электрон-вольт. В результате, на выходе такого источника могут формироваться потоки плазмы с рекордной плотностью на уровне 10 А/см², а после ускорения ионов до энергии ~ 100 кэВ и бомбардировки дейтерий-содержащих мишеней обеспечивать поток нейтронов с плотностью на уровне 10^{11} см⁻²·с⁻¹. Первые эксперименты, проведенные в ИПФ РАН в импульсном режиме, подтвердили возможность создания источника нейтронов нового поколения, удовлетворяющего требованиям БНЗТ.

Работа выполнена по соглашению № 14.604.21.0065 от 27.06.2014 (уникальный номер RFMEFI60414X0065) в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы»

1. Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Razin S., Sidorov A., Maslennikova A., Volovecky A., Kalvas T., Koivisto H., Tarvainen O. Gyrotron-driven High Current ECR Ion Source for Boron-neutron Capture Therapy Neutron Generator // Nucl. Instrum. & Methods in Phys. Res. A. 2014. V. 768. P. 146–150.

2. Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Sidorov A., Razin S., Strelkov A., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T. High yield neutron generator based on a high-current gasdynamic electron cyclotron resonance ion source // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 093301.

ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО CVD-АЛМАЗА В ПЛАЗМЕ СВЧ-РАЗРЯДА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

А.М. Горбачев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В докладе представлен обзор последних результатов исследований процессов синтеза монокристаллического алмаза из газовой фазы (CVD-метод) в плазме СВЧ-разряда, выполненных в ИПФ РАН. Благодаря своим уникальным физическим свойствам монокристаллический алмаз является привлекательным для целого ряда приложений. Однако для широкого использования алмаза необходимо иметь отработанную технологию получения монокристаллического алмаза с заданными свойствами.

CVD-метод позволяет выращивать высококачественный (с низким уровнем примесей и высоким кристаллическим совершенством) монокристаллический алмаз благодаря высокой чистоте рабочих газов, отсутствию контакта газоразрядной плазмы со стенками вакуумной камеры и высокой удельной

(в единице объема) СВЧ-мощности, поглощаемой в плазме. В докладе описываются все стадии процесса получения монокристаллического CVD-алмаза, от подготовки подложек до анализа полученных монокристаллов.

Для широкого применения монокристаллического алмаза в промышленности перспективным представляется использование так называемых комбинированных подложек, которые представляют собой поликристаллические алмазные пластины с выращенными в них монокристаллическими областями. В докладе обсуждаются особенности технологии выращивания таких подложек.

Алмаз является широкозонным полупроводником и благодаря высоким полям пробоя, высокой теплопроводности, большой насыщенной дрейфовой скорости носителей и другим свойствам является перспективным материалом для создания электронных приборов нового поколения. Главным препятствием для реализации потенциала CVD-алмаза в области электроники является проблема легирования алмаза. Из-за высокой энергии активации легирующих примесей в алмазе (наименьшей энергией активации 0,37 эВ обладают примеси бора) для получения достаточной проводимости в стандартных условиях требуются высокие концентрации бора, при которых подвижность носителей значительно снижается. Решением этой проблемы является разработка технологии создания дельта-легированных слоев в CVD-алмазе, которые представляют собой очень тонкие (несколько нанометров) легированные слои с высокой концентрацией бора. В докладе приведено описание специально разработанного для получения дельта-слоев плазменного CVD-реактора и результаты первых экспериментов по выращиванию дельта-легированного монокристаллического алмаза.

СИСТЕМЫ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ВИДЕНИЯ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин

ООО «Терасенс Девелопмент Лабз», Черноголовка
Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка

Создание компактных и дешевых электронных устройств, работающих в субтерагерцовом частотном диапазоне (0,1–1 ТГц) является одним из наиболее перспективных направлений развития современной электроники. Любой замкнутый субтерагерцовый аппаратный комплекс должен включать две компоненты: детектор излучения и генератор.

Компания «Терасенс» разработала и выпускает линейку полупроводниковых матричных приемников субтерагерцового излучения – TERA. Детек-

торы разработанных приемников имеют широкополосную чувствительность в частотном диапазоне 50 ГГц – 0,7 ТГц с мощностью эквивалентных шумов около 1 нВт/Гц^{0.5}. Физический принцип работы детекторов основан на приеме электромагнитного излучения метаматериальной антенной с последующим преобразованием переменного потенциала в плазменную волну, распространяющуюся в высококачественном двумерном слое AlGaAs/GaAs гетероструктуры [1–3].

Для реализации замкнутых субтерагерцовых комплексов: дистанционных систем досмотра людей и багажа, быстрых конвейерных систем контроля продукции и т. д. – кроме матричных приемников необходимы также и генераторы излучения. Для этой цели компания «Терасенс» освоила технологию и выпускает субтерагерцовые лавинно-пролетные (ЛПД) генераторы со следующими параметрами: 80 мВт (100 ГГц), 30 мВт (140 ГГц).

На основании анализа накопленной за 3 года клиентской базы компании делаются прогнозы развития мирового рынка терагерцовых устройств.



Субтерагерцовые камеры компании «Терасенс» TERA-1024 и TERA-256

1. *Kukushkin I., Muravev V.* Apparatus and method of detecting electromagnetic radiation : Patent US 8772890 B2 (2008).

2. *Muravev V.M., Kukushkin I.V.* Plasmonic detector/spectrometer of subterahertz radiation based on two-dimensional electron system with embedded defect // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 100. P. 082102.

3. *Muravev V.M., Gusikhin P.A., Andreev I.V., Kukushkin I.V.* Novel relativistic plasma excitations in a gated two-dimensional electron system // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 114. P. 106805.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

*А.А. Швецов¹, М.В. Беликович¹, О.С. Большаков¹, В.Г. Рыскин¹,
А.М. Фейгин¹, А. Korabovsky², А. Kontu³*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² SIA "Snowision", Riga, Latvia

³ Finnish Meteorological Institute Arctic Research Centre, Sodankylä, Finland

Информация о состоянии снежного покрова играет важную роль в описании температурного и теплового баланса поверхности и атмосферы, прогнозировании стока рек, наводнений и схода лавин, моделировании и контроле климата. Как правило, в настоящее время дистанционное микроволновое зондирование используется для определения границ снежного покрова и оценки его водного эквивалента.

В ИПФ РАН предложен метод пассивного дистанционного микроволнового зондирования, позволяющий получать дополнительную информацию о состоянии снежного покрова. Метод основан на сравнении спектров излучения поверхности и подсвечивающего ее нисходящего излучения атмосферы. Прием осуществляется в участках спектра с сильной частной зависимостью яркостной температуры атмосферы и позволяет одновременно определять коэффициент излучения и термодинамическую температуру покрова для различных его слоев. Эти характеристики, в свою очередь, связаны со структурой снежного покрова и его тепловым режимом.

Для реализации данного метода создан мобильный микроволновый спектрорадиометрический комплекс, работающий в миллиметровом диапазоне длин волн. Он включает двухдиапазонный супергетеродинный спектрорадиометр, работающий в окрестности 5-миллиметровой полосы и 2,5 мм линии молекулярного кислорода (диапазоны частот 50–55 ГГц и 113–118 ГГц соответственно), а также широкополосный радиометр прямого усиления 8-мм диапазона. Анализ спектра производится на ПЧ с помощью банка аналоговых фильтров. Внутренняя автоматическая калибровка осуществляется с помощью твердотельных модуляторов-калибраторов.

С помощью прибора выполнена серия натурных измерений излучательных характеристик снежного покрова (Arctic Research Centre, Sodankylä, Finland). Произведено сравнение микроволновых измерений параметров покрова с контактными измерениями, выполненными стандартными методами.

Работа выполнена при поддержке SIA "Snowision" (Латвия), договор о создании прототипа № 01.01-2014 от 14.09.2014.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО ПАССИВНОГО МНОГОУГЛОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

М.В. Беликович, Д.Н. Мухин, М.Ю. Куликов, А.М. Фейгин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Одним из перспективных методов дистанционного зондирования атмосферы является пассивная микроволновая диагностика: измерение характеристик атмосферы по данным радиометрических наблюдений. Существенным достоинством микроволнового диапазона длин волн является значительно меньшая, по сравнению с инфракрасным и оптическим диапазонами, зависимость погрешности измерений от метеоусловий и времени суток. В настоящее время наиболее распространены микроволновые системы спутникового базирования. Наземные приборы находят свое применение при исследовании быстропротекающих мелкомасштабных процессов, когда нужен продолжительный мониторинг с высоким временным разрешением в конкретных географических областях.

Как и все дистанционные методы, пассивное микроволновое зондирование измеряет характеристики атмосферы не напрямую: спектро радиометр регистрирует спектр собственного излучения атмосферы. Этот спектр имеет нетривиальную форму (в нем содержатся резонансные линии, спектральные полосы, области континуума), которая зависит от высоты, термодинамического состояния и состава атмосферы. Анализируя форму спектра сигнала, порожденного конкретной областью атмосферы, можно получить информацию о ее характеристиках на различных участках пути распространения сигнала. Задача определения (восстановления) профиля характеристик атмосферы по таким данным является некорректной обратной задачей. Каждая такая задача требует специального рассмотрения, в частности потому, что особенности аппаратуры и ее характеристики существенно влияют на результаты восстановления.

В ИПФ РАН создан комплекс микроволновых радиометров для исследования и мониторинга различных высотных эшелонов атмосферы. Также создан набор алгоритмов восстановления, реализованный в программных кодах. В 2015 году комплекс был дополнен несколькими новыми спектро радиометрами, в одном из которых для последующего восстановления высотных профилей необходимо сканирование по углу места. Данная особенность прибора потребовала модифицировать имеющиеся алгоритмы восстановления.

Доклад посвящен алгоритмам восстановления вертикального профиля характеристик атмосферы по радиометрическим данным сканирующего радиометра. Рассматриваются некорректные обратные задачи, относящиеся как к новому прибору (предназначенному для мониторинга профиля темпе-

ратуры в приземном слое), так и к уже существующим (осуществляющим мониторинг термической структуры тропосферы и вертикального распределения озона в стратосфере и мезосфере), для которых рассматривается возможность использования в сканирующем режиме работы. Для каждой из них описан алгоритм решения, в основе которого лежит байесов (вероятностный) подход. Приведено описание алгоритмов. Оценены (с учетом реальных значений уровней шума) точность и разрешение по высоте, обеспечиваемые разработанными алгоритмами. Демонстрируются результаты работы алгоритмов на модельных данных. Обсуждаются корректность используемых приближений.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014–2020 годы» (соглашение о предоставлении субсидии 14.607.21.0107 от 28 ноября 2014 года между Министерством образования и науки РФ и ИПФ РАН, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0107).

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОПОРОШКОВ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ИСПАРЕНИЯ-КОНДЕНСАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СФОКУСИРОВАННОГО СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧАСТОТОЙ 24 ГГц

*А.В. Водопьянов¹, Д.А. Мансфельд¹, А.В. Самохин², Н.В. Алексеев²,
Ю.В. Цветков²*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

Наноразмерные порошки элементов и их неорганических соединений с размером частиц менее 100 нм находят широкое применение в различных приложениях: создании наноструктурных материалов и покрытий с особыми свойствами, в биологии и медицине для селективного воздействия на клетки тканей и направленного транспорта лекарственных средств, для защиты окружающей среды от токсичных соединений и др.

В настоящее время известно порядка сотни методов и их модификаций для получения наночастиц элементов, их соединений и композиций со свойствами, которые могут варьироваться вследствие изменения параметров процесса и его аппаратурного оформления. Одно из ведущих мест в получении наночастиц занимают процессы испарения-конденсации, в которых формирование наночастиц происходит при конденсации пересыщенного пара целевого продукта, предварительно образовавшегося в результате испарения исходного сырья и последующего охлаждения пара. К наиболее

универсальному варианту организации процесса испарения-конденсации может быть отнесено испарение объема материала под воздействием концентрированного потока энергии (электрическая дуга, излучение лазера, поток электронов) с последующей конденсацией в потоке инертного или химически активного газа.

В данной работе представлены результаты впервые выполненных экспериментальных исследований формирования частиц оксидов металлов из паров, образующихся при испарении исходного материала сфокусированным потоком электромагнитного излучения с частотой 24 ГГц, генерируемым в гиротронном комплексе.

Впервые выполнены экспериментальные исследования формирования частиц оксидов металлов WO_3 , SnO_2 и ZnO из паров, образующихся при испарении исходного материала сфокусированным потоком электромагнитного излучения с частотой 24 ГГц, генерируемым в гиротронном комплексе номинальной мощностью 7 кВт.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 13-03-12075.

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ СПЕКАНИЯ РАДИОПРОЗРАЧНОЙ $MgAl_2O_4$ -КЕРАМИКИ

*С.В. Егоров¹, Ю.В. Быков¹, А.Г. Еремеев¹, А.А. Сорокин¹, В.В. Паршин¹,
С.С. Балабанов², А.В. Беляев², А.В. Новикова², Д.А. Пермин²*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, Нижний Новгород

Разработка методов получения материалов с малыми диэлектрическими потерями имеет практический интерес для развития современного радио- и электротехнического оборудования общего и специального назначения, в том числе для изготовления радиопрозрачных окон в мощных электровакуумных СВЧ-приборах миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. Наименьшими микроволновыми потерями обладает поликристаллический алмаз, однако высокая стоимость получения ограничивает его широкое использование. Одним из наиболее перспективных материалов с низкими диэлектрическими потерями и высокими механическими свойствами является алюмомагниева шпинель ($MgAl_2O_4$).

В работе представлены результаты исследования процесса получения поликристаллической $MgAl_2O_4$ -шпинели при нагреве излучением миллиметрового диапазона. Отсутствии нагревательных элементов в СВЧ-печи обеспечивает спекание в чистых вакуумных условиях и позволяет получать ке-

рамику с минимальными диэлектрическими потерями. Использование излучения миллиметрового диапазона позволяет эффективно нагревать слабопоглощающие материалы и создавать достаточно однородное распределение электромагнитного поля в рабочей камере.

Наряду с изучением условий и режимов микроволнового спекания $MgAl_2O_4$ -керамики исследовались ее фазовые и микроструктурные особенности, механические и диэлектрические характеристики. Для получения исходного материала применялся алкоксидный золь-гель-метод синтеза особо чистых нанодисперсных порошков алюмомагниевого шпинели. Показана возможность получения керамики с размером зерна от 4 мкм до нескольких десятков микрометров путем изменения параметров режима СВЧ-нагрева. Установлено, что спекающая добавка – оксид иттрия в концентрации 1 % масс. позволяет получать вакуумно-плотную керамику с малым коэффициентом поглощения. При температуре спекания 1750 °С и времени спекания 10 минут получена керамика с $tg \delta = 7 \cdot 10^{-4}$ на частотах 206±252 ГГц.

МНОГОЧАСТОТНЫЕ СУБТЕРАГЕРЦОВЫЕ ГИРОТРОНЫ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ И ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

Н.А. Завольский, В.Е. Запелов, А.С. Зуев, А.С. Седов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Разработка источников непрерывного излучения субтерагерцового и терагерцового диапазона различного уровня выходной мощности с возможностью плавной или ступенчатой перестройки частоты представляет интерес для многих приложений. Одним из перспективных источников для решения таких задач является многочастотный гиротрон [1, 2].

В настоящем докладе рассмотрены два варианта таких гиротронов для работы в интервале частот 0,2–0,26 ТГц с различным уровнем выходной мощности (200 Вт и 200 кВт). Гиротроны проектировались для работы с «сухим» криомагнитом JASTEC-10T100 (максимальное магнитное поле 10 Тл, проходное отверстие 100 мм). Расчеты проведены на основе теории с фиксированной и нефиксированной продольной структурой высокочастотного поля с учетом реальных омических потерь в резонаторе. При оптимизации параметров гиротрона исследовались зависимости стартового тока от магнитного поля, проанализирован режим жесткого возбуждения, типичный для области высоких КПД. Рассмотрены возможные стартовые сценарии, обеспечивающие установление режима стабильной одномодовой генерации. Для гиротронов с выходными мощностями 200 Вт и 200 кВт характерные значения максимального КПД составили 20 % и 35 % соответственно.

Рассмотрена возможность использования рабочих мод с большим числом продольных вариаций для перестройки частоты, а также учтено влияние паразитных мод с такой структурой. Исследована ступенчатая перестройка частоты генерации вследствие последовательного возбуждения соседних мод резонатора при изменении магнитного поля. Рассмотрена дополнительная подстройка частоты, осуществляемая при помощи управления температурой резонатора. Данный способ применим только для маломощных гиротронов, где отсутствует проблема с удельной тепловой нагрузкой на стенки резонатора. Учтено изменение коэффициента отражения от различных типов выходного окна при изменении частоты генерации.

Работа выполнена при поддержке регионального гранта РФФИ 15-42-02380 р_поволжье_а.

1. Запевалов В.Е., Богдашов А.А., Денисов Г.Г., Куфтин А.Н., Лыгин В.К., Моисеев М.А., Чирков А.В. Разработка прототипа многочастотного мегаваттного гиротрона в диапазоне 105–156 ГГц // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 5/6. С. 443–452.

2. Thumm M., Arnold A., Borie E., Braz O., Dammertz G., Dumbrajs O., Koppenburg K., Kuntze M., Michel G., Piosczyk B. Frequency step-tunable megawatt gyrotrons for plasma physics applications // Fusion Eng. and Design. 2001. V. 53. P. 407–421.

СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ОЗОНОСФЕРЫ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ: НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВЕРТИКАЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ОЗОНА НАД МОСКВОЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В 1996–2015 ГОДАХ

Е.П. Кропоткина, С.В. Соломонов, С.Б. Розанов, А.Н. Игнатьев, А.Н. Лукин

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

Представлены результаты анализа данных многолетнего дистанционного зондирования атмосферного озона над Москвой [1], выполненного в 2-миллиметровом окне прозрачности атмосферы на частотах спектральной линии озона с центром на 142,175 ГГц в период с 1996 по 2015 г. Регулярные измерения спектров излучения озона проводились с помощью высокочувствительного спектрометра. Для восстановления вертикального распределения озона (ВРО) из измеренных спектров использовались методы Тихонова и статистической регуляризации [1].

Обнаружена закономерность в межгодовых изменениях сезонного хода озона. При этом различия в содержании озона в средней стратосфере над Москвой между группой зим с сильным среднезимним стратосферным потеплением в январе и группой зим с долгоживущим глубоким стратосфер-

ным полярным вихрем превышают 2 ppm в декабре и январе, что составляет около 40 % от средних значений содержания озона.

Установлено, что развитию сильных среднеземных потеплений обычно предшествуют явления продолжительного пониженного содержания озона в средней стратосфере над Москвой в зимние периоды. Значительное весеннее истощение озона над Москвой возникало в воздухе долгоживущего полярного вихря (в марте, апреле) при низкой температуре в области холода.

Даны количественные оценки связи зарегистрированных изменений озона в стратосфере над Москвой с глобальными характеристиками атмосферы: с глубиной полярного вихря, величиной среднезонального ветра, с амплитудами планетарных волн и др. Представленные результаты показывают важность исследований озоносферы радиофизическими методами на миллиметровых волнах.

Работа поддержана программами ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики», «Новые источники миллиметрового и терагерцового излучения и их перспективные приложения» и «Радиоэлектронные методы в исследовании природной среды и человека».

1. Соломонов С.В., Гайкович К.П., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Лукин А.Н., Игнатъев А.Н. Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 113-121.

МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭРИТРОЦИТОВ КРОВИ ПОД ВЛИЯНИЕМ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГИРОТРОНА

*А.В. Дерюгина¹, А.И. Цветков², Л.В. Ошевский¹, М.Н. Таламанова¹,
М.А. Шабалин¹, Ю.Н. Хламова¹, С.С. Куваева¹, М.В. Морозкин²,
А.П. Фокин², М.Ю. Глявин², В.Н. Крылов¹*

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Проблема защиты организма от повреждающего действия внедряемых в практику жизнедеятельности человека новых устройств, генерирующих электромагнитные излучения (ЭМИ), стоит так же остро, как и поиск новых методов и средств терапии и профилактики распространенных заболеваний с применением ЭМИ. В этом плане появление относительно мощных (от сотен ватт до десятков киловатт) источников излучения терагерцового диапазона, к которым относятся, прежде всего, лазеры на свободных электронах и гиротроны, делает необходимым исследование влияния этого

частотного диапазона на организм человека и животных. Известно, что излучение указанного диапазона обладает рядом специфических особенностей, и для ряда биологических задач представляет интерес исследование механизмов модификации мембран клеток под действием терагерцового излучения. Состояние мембран во многом определяет протекание физиологических процессов и тем самым является исходным звеном в сложной цепи приспособительных реакций на всех уровнях организма. В этом плане эритроцитарные мембраны клеток крови представляют собой удобный объект исследования, поскольку отражают общие принципы структуры и функции мембран клеток всех тканей организма. Было показано, что одной из показательных характеристик функционального состояния мембран является электрофоретическая подвижность (ЭФП), которая отражает изменения электрокинетических характеристик клеток крови при стрессовых воздействиях и нарушениях функций организма разного патогенеза.

В работе изучено изменение электрофоретической подвижности эритроцитов крови крыс и концентрации в них мало диальдегида при воздействии излучения гиротрона с частотой 263 ГГц. Показано, что при действии на изолированные эритроциты низкоинтенсивного ($0,5\text{--}10$ мВт/см²) излучения электрофоретическая подвижность эритроцитов уменьшается независимо от интенсивности изученного воздействия, тогда как концентрация малонового диальдегида повышается при меньшей интенсивности ($0,5\text{--}1$ мВт/см²) и снижается при большей ($5\text{--}10$ мВт/см²).

СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА РАЗРЯДОВ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА В ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ

А.А. Летунов¹, Н.Н. Скворцова¹, Н.К. Харчев¹, Д.В. Малахов¹, А.С. Соколов²

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

² Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники

Эксперименты по созданию микро- и нанообъектов в разряде, возникающем при воздействии мощного излучения импульсного гиротрона миллиметрового диапазона на порошковые смеси сложного состава [1, 2], сопровождались спектральными измерениями. Описываются способы оценки из этих измерений термических характеристик разрядов. Использовались атомная, молекулярная и тепловая компоненты спектра. Свечение регистрировалось в энергетических единицах одновременно несколькими калиброванными по чувствительности спектрометрами Avantes. Излучение собиралось микрообъективами и по световодам поступало в спектрометры.

Слой порошка с открытой верхней поверхностью, лежавший на кварцевой подложке в плазмохимическом реакторе, облучался снизу. Спектрометры могли регистрировать излучение от верхней и нижней поверхностей слоя порошка и из области на некоторой высоте над ним. Спектры содержат линейчатое излучение атомов и молекулярные полосы (см. центр нижней кривой на рис. 2) и тепловой континуум (подложка на верхнем спектре там же). Все три компонента могут служить источником информации о температурах различных областей и компонент разряда. Спектры, снятые в последовательные моменты, отражают динамику свечения.

Свечение разряда начиналось с линий атомов. Затем появлялись молекулярные полосы, а атомарные начинали постепенно уступать им в интенсивности. Оценки электронной температуры по отношению амплитуд атомных линий основных веществ в рамках ЛТР модели составляют 0,2–1 эВ.

Даже небольших количеств Ti могло хватить для появления в диапазоне 705–730 нм γ -системы TiO (рис. 1). Имеющиеся расчеты [3] позволяют по отношению амплитуд двух первых пиков делать оценки температур в области 1–4 кК, что включает диапазон интересующих нас реакций синтеза.

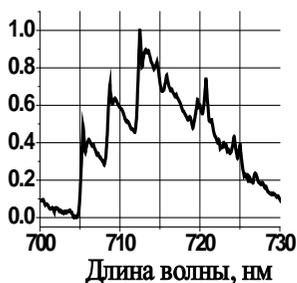


Рис. 1. Характерный вид спектра гамма-полосы TiO

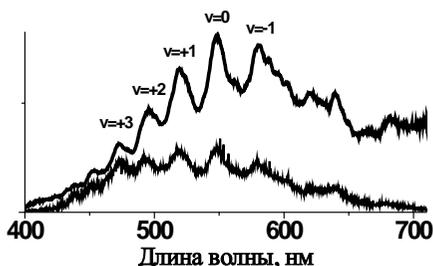


Рис. 2. Спектр разряда в опытах по созданию рельефа на молибденовых пластинах [2]

Слой бора предохраняет кварцевую подложку. На него помещается слой смеси порошков металла и диэлектрика. В порошке всегда остается много кислорода. В результате в области 480–590 нм, как правило, видны частично накладывающиеся колебательные полосы $v = -1, 0, +1, +2$ электронного перехода А-Х молекул VO_2 . Их желательно использовать для оценок вращательной и колебательной температур этих молекул. Отношение полных интенсивностей колебательных полос растет с температурой. Растет и их полуширина, частично скрытая из-за наложения. Ее динамика может быть качественно оценена по изменению «глубины модуляции» спектра или более явно восстановлена при выделении отдельных полос в некоторых предположениях об их форме. Но это имеет смысл, если вклад других источников излучения в эту область спектра мал или может быть отделен.

Такая ситуация реализуется, в частности, в опытах по созданию рельефа на молибденовых пластинах [2]. Атомы В не имеют сильных линий в видимой области, а линий Мо немного, и они легко выделяются. Кроме того, даже тепловое излучение, регистрируемое одним из спектрометров, удается отделить, хотя и только с логарифмической точностью. На рис. 2 показаны спектры, снятые через 3–5 мс после окончания СВЧ-импульса. На спектре с нижнего спектрометра правый край приподнят из-за теплового континуума. Построив этот спектр в полулогарифмическом масштабе в координатах Вина, по его общему наклону можно с приемлемой точностью оценить температуру. К концу СВЧ-импульса температура достигала 3–3,5 кК, а к моменту снятия представленных спектров снижалась примерно на 0,8 кК.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14–08–00753).

1. *Batanov G.M., Kharchev N.K., Letunov A.A., Malakhov D.V., Obratzova E.A., Sarkisian K.A., Skvortsova N.N. et al.* Boron Nitride and Titanium Diboride Synthesis Initiated by Microwave Discharge in Ti–B Powder Mixture in Nitrogen Atmosphere // *J. Nanoelectronics and Optoelectronics*. 2013. V. 8. P. 58–66.

2. *Скворцова Н.Н., Малахов Д.В., Батанов Г.М., Глявин М.Ю., Летунов А.А., Рябикина И.Г., Сарксян К.А., Соколов А.С., Харчев Н.К. и др.* Создание рельефа на молибденовых пластинах в разрядах, инициируемых излучением гиротрона в порошках металл – диэлектрик // *Известия вузов. Радиофизика*. 2015. Т. 58, № 9. С. 779–788.

3. *Hermann J., Perrone A., Dutouquet C.* Analyses of the TiO- γ system for temperature measurements in a laser-induced plasma // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2001. V. 34. P. 153.

РАДИОМЕТР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ ГДЛ

*Л.В. Лубяко^{1,2}, А.Г. Шалашов^{1,2}, Ф.Ф. Архитцев³, В.А. Геннеберг⁴,
Д.В. Яковлев²*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

³ НПП «Салют», Нижний Новгород

⁴ НИИ ИП, Томск

Диагностика плазмы радиометрическим методом базируется на том, что на частотах электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) плазма по своим свойствам близка к абсолютно черному телу и измеряемая яркостная температура плазмы близка к локальной температуре электронов T_e в области резонанса. В токамаках и стеллараторах конфигурация магнитного поля позволяет снять радиальный профиль электронной температуры. В открытых магнитных зеркальных ловушках конфигурация магнитного

поля не столь удачна, но, тем не менее, радиометрические измерения дают информацию, позволяющую проследить динамику средней электронной температуры, а также установить наличие энергичных электронов в разряде.

В экспериментах, проводимых ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск) совместно с ИПФ РАН на крупномасштабной осесимметричной зеркальной магнитной ловушке ГДЛ (газодинамическая ловушка) [1] предложено и опробовано использование радиометра при решении задачи оптимизации ЭЦ-нагрева. Для этих целей был спроектирован и изготовлен лабораторный макет радиометра, отвечающий задаче. В данном сообщении обсуждаются конструкция, рабочие характеристики макета, а также методика измерений и некоторые результаты, иллюстрирующие работу прибора на установке.

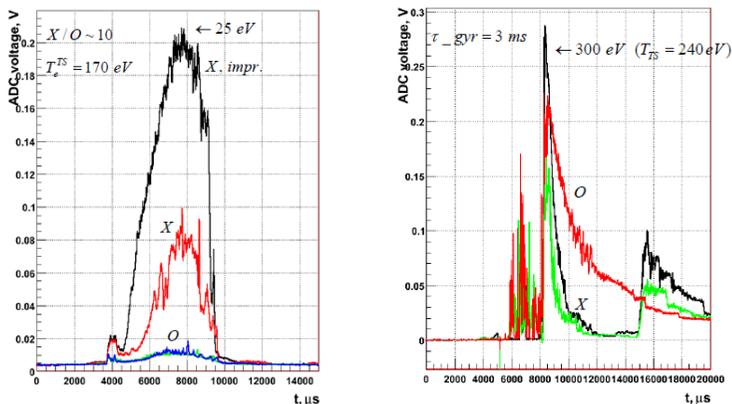
Радиометр отвечает схеме супергетеродинного приемника и имеет следующие параметры:

рабочий диапазон	54,5–59,5 ГГц
полоса приема SSB	100 МГц
полоса видеоусилителя	30 КГц
шумовая температура	0,2 эВ
флуктуационная чувствительность	$3 \cdot 10^{-3}$ эВ
динамический диапазон	не менее 60 дБ

Для обеспечения совместной работы с гиротроном, генерирующим на частоте 54,5 ГГц импульс мощностью до 400 кВт, на входе приемника установлены режекторный фильтр и быстродействующий *p-i-n* аттенуатор. Это позволяет снизить уровень попадающего в приемный тракт излучения гиротрона до безопасной величины. Используемый фильтр одновременно решает задачу подавления приема по зеркальному каналу.

Прибор вполне оправдал наши ожидания. Было проведено исследование уровня собственного ЭЦ-излучения плазмы в окрестности частоты ЭЦР-нагрева в различных режимах работы установки ГДЛ. Приемник излучения был подключен к волноводной линии одного из гиротронов, неиспользуемого при проведении эксперимента. Уровень собственного ЭЦ-излучения плазмы в разрядах без дополнительного ЭЦР-нагрева электронов совпал с теоретическими представлениями для излучения электронов, имеющих максвелловское распределение по скоростям (рис., *слева*). Было установлено, что излучение плазмы на необыкновенной волне эффективно «экранируется» паразитным ЭЦ-резонансом, формирующимся вне плазменного столба в окрестности вакуумного порта. Применение дополнительной магнитной катушки позволило в значительной мере подавить этот резонанс. В результате радиационная температура зарегистрированного теплового излучения на необыкновенной волне стала соответствовать расчетному излучению плазмы с температурой, независимо измеренной при помощи томсоновского рассеяния. В экспериментах с ЭЦР-нагревом плазмы в собственном излучении стабильно регистрировался сигнал, который был интерпретирован как

собственное излучение быстрых электронов (рис., *справа*). В этих измерениях регистрация излучения начиналась сразу после выключения гиротрона, при этом сигнал оставался сильным в течение длительного времени после распада основной плазмы. Характерная энергия быстрых электронов, оцененная по скорости спадаания их собственного излучения, лежит в диапазоне 10–50 кэВ.



Осциллограмма сигнала радиометра в процессе плазменного разряда на установке ГДЛ: тепловое излучение в разряде без ЭЦР (*слева*) и излучение быстрых электронов в разряде с дополнительным ЭЦР-нагревом

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 14-12-01007.

1. Bagryansky P.A. et al. // Nucl. Fusion., 2015, **55**, 053009.

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА, ИНИЦИИРУЕМОГО ГИРОТРОННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ, ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Д.В. Малахов^{1,2}, Г.В. Укрюков², А.Д. Черноусов¹, Н.Н. Скворцова¹, А.А. Летунов¹

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

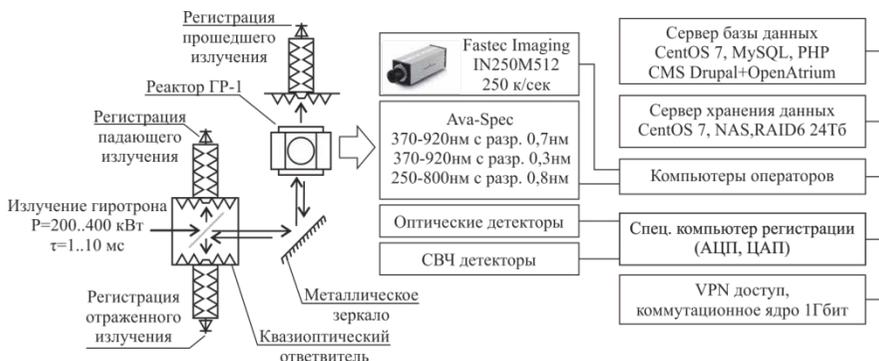
Использование мощного гиротронного излучения в качестве инициатора микроволнового разряда при синтезе новых веществ является одной из перспективных прикладных задач. Ранее нами был проведен ряд экспери-

ментов, посвященных микроволновым методам синтеза частиц веществ микро- и наноразмеров с использованием мощного импульсного излучения гиротрона [1]. По итогам поисковых научных исследований был разработан сначала прототип, а затем полнофункциональная модель оригинального плазмохимического реактора ГР-1, использующего энергию СВЧ для синтеза новых веществ, на который получен патент [2].

Проведение такого рода исследований накладывает достаточно жесткие ограничения на системы сбора и анализа данных. Это связано, прежде всего, с большими объемами и различными типами данных, которые необходимо регистрировать и обрабатывать. Типовая экспериментальная сессия состоит из нескольких наборов образцов, над которыми проводятся исследования. На каждый из образцов, закладываемых в плазмохимический реактор, воздействуют серией СВЧ-импульсов различной мощности и длительности. В реакторе реализован режим разряда с фазой развития химических и плазмохимических реакций, на порядок и более превышающей длительность импульса гиротрона (более 10 мс). Для проведения корректных измерений нами была разработана специализированная система, включающая программную и аппаратную части. К программной части реализации относятся электронный журнал, программные модули обработки данных и модули взаимодействия с аппаратурой. К аппаратной части относятся пул высокоскоростной и низкоскоростных IP-видеокамер, СВЧ-детекторы и блок высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей, группа оптических спектрометров.

На рисунке представлена структурная схема экспериментального стенда. Излучение разряда регистрируется с помощью ряда спектрометров Ava-Spec, работающих в диапазоне 370–920 нм с разрешением 0,7 нм и 0,3 нм, в диапазоне 250–800 нм с разрешением 0,8 нм. В одном микроволновом разряде каждым спектрометром измеряется до 100 оптических спектров со скважностью порядка 4 мс. По полученным спектрам анализируется эволюция развития разряда во времени, как в интегральном свете, так и в отдельных спектральных интервалах. Для оценки энергоклада СВЧ-мощности в образец используется система СВЧ-детекторов и квазиоптический ответвитель [3]. Данные о падающей, прошедшей и отраженной мощностях регистрируются детекторными головками и оцифровываются системой малошумящих АЦП. Дополнительно фиксируется информация о поведении разряда в пространстве с помощью высокоскоростной камеры со скважностью до 4 мс и выдержкой до 200 мкс. Все данные сохраняются на удаленный сетевой накопитель и анализируются в дальнейшем на локальных машинах ученых-исследователей. Дополнительно над образцами, прошедшими воздействие СВЧ-разряда, проводится рентгенофазовый анализ, рамановская спектроскопия и электронная микроскопия. Комплексный анализ данных позволяет получать достоверную информацию о новых полученных веществах. Программная часть реализована на связке различных языков программирования

(C++, Python, Matlab) и систем хранения и управления данными (MySQL, CMS Drupal с надстройкой OpenAtrium).



Структурная схема экспериментального стенда

Исследование выполнено при частичной поддержке научного гранта РФФИ 14-07-31278 мол_а.

1. *Batanov G.M. et. al.* Application of microwave discharge for the synthesis of TiB₂ and BN nano- and microcrystals in a mixture of Ti-B powders in a nitrogen atmosphere // Plasma Phys. Reports. 2013. V. 39, № 10. P. 843–848.

2. Способ получения нанодispersных порошков нитрида бора и диборида титана : пат. 2523471 РФ / Г.М. Батанов и др. ; заявитель и патентообладатель ИОФ РАН. № 2013102266/05 ; заявл. 18.01.2013 ; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.

3. Устройство для ответвления и регистрации прямой и отраженной микроволновой мощности в квазиоптическом тракте : пат. 2548392 РФ / Г.М. Батанов и др. ; заявитель и патентообладатель ИОФ РАН. № 2013155511/28 ; заявл. 13.12.2013 ; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11.

ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ И КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕРАВНОВЕСНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КИНЕТИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПЛАЗМЫ

Д.А. Мансфельд¹, М.Е. Викторов¹, А.В. Водопьянов¹, С.В. Голубев¹

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Источники мощного СВЧ-излучения – гиротроны – все чаще используются для электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы в лабораторных магнитных ловушках, находя применение в установках по термоядерному синтезу, в ЭЦР-источниках многозарядных ионов, источниках рентгеновского и ультрафиолетового излучения. Одной из характерных особенностей нагрева в условиях ЭЦР является формирование электронных фракций с неравновесным распределением по скоростям и последующее возбуждение волн в плазме в результате кинетических неустойчивостей. Высыпания горячих частиц в результате кинетических неустойчивостей могут существенно влиять на удержание плазмы, а возникающее электромагнитное излучение – нести ценную диагностическую информацию о ее свойствах.

Одна из причин интереса к подобным исследованиям связана с тем, что в последнее время стали доступны цифровые осциллографы с широкой полосой (вплоть до 60 ГГц) и скоростными АЦП (вплоть до 160 Гвыб/с), в реальном времени измеряющие электрическое поле волны. Последующая цифровая обработка позволяет определить на динамических спектрах различные частотно-временные паттерны, в том числе выделить маломощное излучение на фоне интенсивного сигнала в другом частотном диапазоне.

В докладе обсуждаются процессы стационарной и квазистационарной генерации электромагнитного излучения при кинетических неустойчивостях неравновесной плазмы низкого давления, создаваемой на двух экспериментальных стендах. Условия со стационарным источником горячих частиц воспроизведены в плазме электронно-циклотронного резонансного разряда, поддерживаемого непрерывным СВЧ-излучением гиротрона на частоте 24 ГГц, в зеркальной магнитной ловушке. Условия с квазистационарным источником горячих частиц создавались в сильно неравновесной плазме импульсного ЭЦР-разряда в зеркальной магнитной ловушке, создаваемого и поддерживаемого импульсным излучением гиротрона на частоте 37,5 ГГц с мощностью до 100 кВт. Использование мощного импульсного излучения позволяет существенно увеличить концентрацию и энергию запасаемых в ловушке частиц (вплоть до релятивистских значений), а также изучать режимы возбуждения волн как при наличии источника неравновесных частиц, так и в его отсутствие.

КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

В.В. Паршин, Е.А. Серов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Проведены исследования показателя преломления и $\tan \delta$ широкого класса керамических материалов на основе окиси алюминия, окиси циркония и различного состава композитов на их основе, нитрида алюминия фирмы FRIATEC (Germany), а также аналогичных отечественных образцов в широком диапазоне частот и температур.

Исследованы новые пенокерамики, разработанные ОАО «Завод “Магнетон”» (Санкт-Петербург) в рамках программы по импортозамещению изделий американских и японских производителей.

Проведены пионерские исследования нового широкозонного полупроводника – карбида кремния политипа 6H-SiC. Показано, что образцы 6H-SiC, выпуск которых освоен ЗАО «Светлана – Электронприбор» (также в рамках программы по импортозамещению), по основным параметрам не уступают образцам фирмы CREE (US). Полученные предварительные зависимости основных диэлектрических параметров (n и $\tan \delta$) от температуры и частоты позволяют надеяться, что этот материал можно будет использовать в качестве относительно дешевого окна вывода энергии гиротронов средней мощности. К сожалению, проведенные исследования зависимостей диэлектрических параметров нитрида алюминия от температуры похоронили надежду на его использование в качестве окна средней мощности.

Параметры наименее поглощающих материалов приведены в таблице.

Материал (170 ГГц)	n	ΔE [эВ]	$\tan \delta$ [10^{-4}]	k Вт/(см·К)	α [10^{-6} К $^{-1}$]	E ГПа
Алмаз	2,38	5,1	0,05	22	0,8	1050
4H-SiC	3,15	3,26	0,7	6,7 / 4,7	4	700
6H-SiC	3,15	3,03	1,7	4,9	4,3	700
3C-SiC	3,12	2,36	?	5,0	4	700?
BN	2,15		8	0,35	3	60
Degussit AlN 180	2,91		5,8	1,8–2	3,6	330
Degussit Al23 hf	3,14		2,7	0,35	7,3	380
Degussit Al23(Al ₂ O ₃)	3,13		3,6	0,35	8,2	350
Frialit 99.7 hf (Al ₂ O ₃)	3,15		2,7	0,35	7,3	350
Frialit 99.7 (Al ₂ O ₃)	3,15		6	0,35	7,3	350
Frialit FZT (ZrO ₂)	3,36		9	0,25	7,5	460
FrialitFZM (Mg+ZrO ₂)	5,46		40	0,03	10,4	500

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-02-90458).

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ В РАЗРЯДЕ, ПОДДЕРЖИВАЕМОМ МОЩНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ, ПО ШТАРКОВСКОМУ УШИРЕНИЮ ЛИНИИ H_{α} АТОМА ВОДОРОДА

*А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, М.Ю. Глявин, А.Г. Лучинин,
С.В. Разин, М.И. Сафронова, А.В. Сидоров, А.П. Фокин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Проведены спектроскопические исследования свечения плазмы разряда, возникающего в неоднородном потоке газа (аргона) под действием мощного импульсного излучения гиротрона (0,67 ТГц, 40 кВт, 20 мкс). Поток создавался при инжекции газа в разрядную камеру через отверстие малого (0,14 мм) диаметра. Концентрация электронов в разряде оценивалась по вызванному эффектом Штарка уширению атомарной линии излучения H_{α} (656,3 нм) водорода, который присутствовал в разряде в качестве малой остаточной примеси. Указанная линия была выбрана из-за удобства наблюдения, поскольку она является наиболее интенсивной в серии Бальмера и не накладывается на другие линии, присутствующие в спектре свечения плазмы. Измерения проводились при фоновом давлении аргона в разрядной камере на уровне 0,01 Торр, при котором разряд существовал только в небольшой, около 1 мм, области пространства вблизи отверстия напуска газа («точный» разряд) [1]. Измеренное в таких условиях штарковское уширение линии H_{α} соответствовало величине концентрации плазмы порядка $2 \cdot 10^{16}$ см⁻³, которая превышает критическую для используемой частоты греющего излучения 0,67 ТГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 14-12-00609.

1. *Глявин М.Ю., Голубев С.В., Зорин В.Г., Изотов И.В., Литвак А.Г., Лучинин А.Г., Морозкин М.В., Разин С.В., Сидоров А.В., Скалыга В.А.* Разряд в неоднородном потоке газа, поддерживаемый мощным излучением терагерцового диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8/9. С. 622-627.

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОЧНОГО МЕЗОСФЕРНОГО ОЗОНА НАД МОСКВОЙ

А.С. Завгородний, С.Б. Розанов, А.Н. Игнатьев, А.Н. Лукин, С.В. Соломонов

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

В 2014–2015 гг. в Москве в вечерние и ночные часы с помощью передвижного озонметра ФИАН [1] проведены наблюдения линии излучения атмосферного озона с центральной частотой 142,175 ГГц. Спектры озона с разрешением 0,1 МГц в центре линии записывались с периодом около 2 мин. В условиях астрономической ночи интенсивность центрального пика линии ожидаемо [2] увеличивалась, что связано с ростом содержания озона выше 50 км. В ходе измерений отмечались вариации амплитуды и формы пика линии. Изменения яркостных температур в центральных каналах анализатора спектра достигали 2–4 К. Вариации имели вид квазипериодических колебаний или единичных всплесков.

Моменты записи спектров в ходе измерений расположены нерегулярно вследствие перерывов на калибровку озонметра, поэтому для определения характерных частот колебаний разностей яркостных температур в центральных каналах анализатора спектра и длительностей таких колебаний был разработан алгоритм, использующий метод периодограмм Ломба [3] в сочетании с временными окнами различной длительности. Выявлены спектральные составляющие вариаций излучения ночного озона, превышающие шум аппаратуры, с периодами от примерно 5 мин до десятков минут. Эти вариации могут быть связаны с прохождением внутренних гравитационных волн в мезосфере и нижней термосфере.

Работа выполнена при поддержке программ ОФН РАН «Радиоэлектронные методы в исследованиях природной среды и человека» и «Новые источники миллиметрового и терагерцового излучения и их перспективные приложения».

1. *Розанов С.Б., Завгородний А.С., Логвиненко С.В., Лукин А.Н., Штанюк А.М., Большаков О.С.* Малошумящий приёмник для микроволновой озонметрии // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8/9. С. 708-718.

2. *Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Семенов А.И.* Наблюдение мезосферного озона на миллиметровых волнах // Краткие сообщения по физике. 2001. № 10. С. 31-39.

3. *Lomb N.R.* Least-squares frequency analysis of unequally spaced data // *Astrophys. Space Sci.* 1976. V. 39. P. 447-462.

МИКРОВОЛНОВЫЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

*В.Г. Рыскин, А.А. Швецов, М.Ю. Куликов, О.С. Большаков, Л.М. Кукин,
А.М. Фейгин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Изучение термической структуры атмосферы является составной задачей исследования климата, процессов формирования погоды, а также других прикладных аспектов. Эта задача решается различными средствами как с поверхности Земли, включая аэрорадиозондирование, так и с помощью приборов спутникового базирования.

В Институте прикладной физики РАН создан наземный микроволновый комплекс для дистанционного измерения вертикального распределения температуры в атмосфере Земли от ее поверхности до высот стратопазы (~ 55 км). Комплекс состоит из трех спектрорадиометров, работающих в диапазоне частот 50–60 ГГц, расположенных на низкочастотном склоне полосы поглощения молекулярного кислорода. Все спектрорадиометры выполнены по схеме супергетеродинного приема сигнала с малошумящим усилителем (МШУ) на входе. МШУ обеспечивает коэффициент шума не более 4 дБ и коэффициент усиления ~ 16 дБ.

Спектрорадиометр, предназначенный для измерения температуры в приземном слое воздуха, работает в диапазоне 55–59 ГГц и имеет три спектральных канала с полосами 55,2–55,8 ГГц, 56,0–57,0 ГГц и 57,4–59,0 ГГц. Информация о высотном профиле температуры извлекается из анализа угловой зависимости яркостной температуры атмосферы, которая получается путем сканирования антенной системы по углу места.

Для измерения температурного профиля свободной тропосферы (до высот ~ 10 км) используется спектрорадиометр среднего спектрального разрешения. Частотный анализ в полосе 50–55 ГГц осуществляется с помощью восьмиканального банка аналоговых фильтров. Антенная система, состоящая из гофрированного рупора и тефлоновой линзы, имеет ширину диаграммы направленности около 3°.

Для исследования термического режима стратосферы предназначен третий радиометр, работающий в диапазоне частот 52,45–53,5 ГГц, включающий две слабые линии O_2 : 27₋ и 29₋, которые разрешаются с поверхности Земли, а также склон кислородной полосы между ними. Цифровой анализатор быстрого преобразования Фурье фирмы Acqiris (AC240) формирует в полосе промежуточных частот от ~ 0 до 1 ГГц 16384 эффективных спектральных канала, реализуя высокое частотное разрешение (~ 64 кГц).

Все спектрорадиометры оснащены аналогичными твердотельными устройствами внутренней калибровки интенсивности принимаемого излу-

чения (модуляторами-калибраторами), которые предварительно откалиброваны по горячему и холодному эталонным тепловым источникам.

Оцифрованные выходные сигналы всех спектрорадиометров через платы интерфейса поступают в ПК. Управление процессом периодической внутренней калибровки и сканированием диаграммы направленности также осуществляется программно с помощью ПК. Все три прибора компактны и питаются от преобразователей типа AC-DC, находящихся внутри их корпуса.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014–2020 годы» (соглашение о предоставлении субсидии 14.607.21.0107 от 28 ноября 2014 года между Министерством образования и науки РФ и ИПФ РАН, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0107).

ПЫЛЕВЫЕ ЧАСТИЦЫ КАК ЦЕНТРЫ ОБРАЗОВАНИЯ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА В РАЗРЯДАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ГИРОТРОНОМ, В ПОРОШКАХ МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК

И.Г. Рябикина^{1,2}, Н.Н. Скворцова¹, Д.В. Малахов¹, А.А. Летунов¹

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

² Московский технологический университет (МИРЭА)

Синтез нитрида бора в виде нанотрубок, нанококонов, нанолент является важной технологической задачей [1]. Такой синтез может быть осуществлен методом лазерной абляции, химическим осаждением, плазменным дуговым способом, техникой атомного осаждения и др. [2].

Доклад посвящен образованию пылевых частиц и их важности для синтеза гексагонального нитрида бора. В данном исследовании нитрид бора синтезировали микроволновым методом в разрядах в порошках металл – диэлектрик, иницированных излучением гиротрона. Эксперименты были проведены на плазмохимическом стенде, состоящем из специального реактора, встроенного в гиротронный комплекс МИГ-3 [3]. Микроволновый разряд состоял из трех стадий:

- 1) СВЧ-поверхностного пробоя,
- 2) химического и плазмохимического горения и разлета частиц,
- 3) образования пылевой плазмы.

Процессы синтеза и напыления частиц NB происходили на 2-й и 3-й стадиях разряда. На стадии пробоя наблюдались атомные линии, по которым определили, что температура достигала 8000–9000 К. Эти температуры превышают температуры плавления (2400 К) и кипения бора (4000 К), плавления (2900 К) и кипения (5100 К) молибдена.

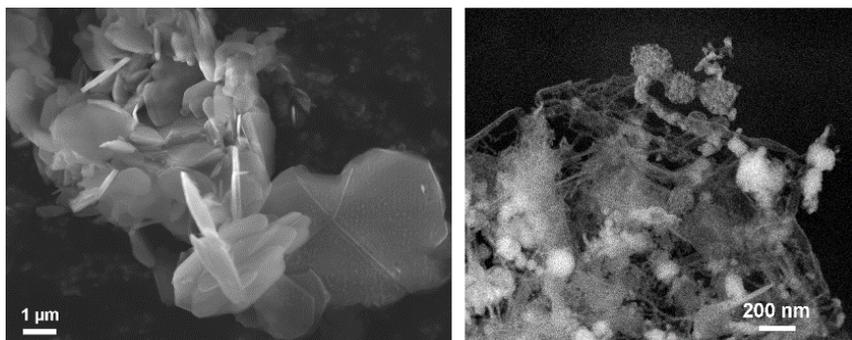
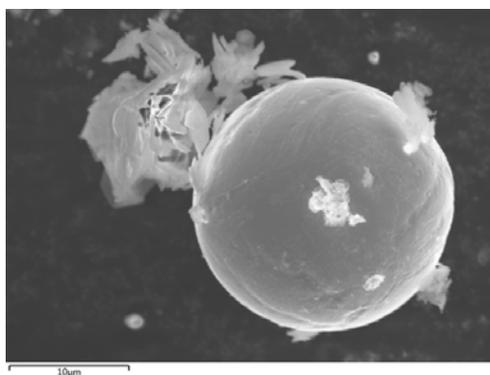


Рис. 1. Складчатые структуры гексагонального NB в двух масштабах

К третьей стадии происходило охлаждение до 2300 К, что соответствует температуре синтеза нитрида бора (образования ковалентной связи N—B). Оценка температуры проводилась по континууму сплошного спектра и молекулярным полосам [4]. На третьей стадии образуются заряженные пылевые частицы в объеме реактора. Эти частицы могут служить центрами кристаллизации. Молибден, бор, нитрид молибдена, борид молибдена и другие соединения являются сферическими или кристаллическими частицами, на которых может происходить как синтез, так и закалка/осаждение структур микро- и наноразмеров нитрида бора. Анализ рамановских спектров показал наличие линии 1380 см^{-1} , что указывает на гексагональную форму нитрида бора.

Электронные микрофотографии полученных веществ показали разнообразие форм и структур синтезированных частиц [5].

Рис. 2. Гексагональный нитрид бора в форме складчатых структур на сферолите бориде молибдена



Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 08-14-00753.

1. Boron Science. New Technologies and Applications. Ed. By Narayan S. Hosmane CRC Press, 2012. 825 p.

2. Golberg D. et al. Boron Nitride Nanotubes // Adv. Mater. 2007. V. 19. P. 2413–2432.

3. Batanov G.M. et al. Boron Nitride and Titanium Diboride Synthesis Initiated by Microwave Discharge in Ti–B Powder Mixture in Nitrogen Atmosphere // J. Nanoelectronics and Optoelectronics. 2013. V. 8. P. 58–66.

4. Летунов А.А., Скворцова Н.Н., Рябикина И.Г. и др. Эволюция температуры и свечения в импульсном микроволновом разряде в порошках молибден – бор // Инженерная физика. 2013. № 9. С. 36–42.

5. Batanov G.M., Borzosekov V.D., Golberg D. et al. Microwave method for synthesis of micro- and nanostructures with controllable composition during gyrotron discharge // J. Nanophotonics. 2015. V. 10, XXXXXX-1. [in print].

СИНТЕЗ ЧАСТИЦ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРОВ В РАЗРЯДАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА В ПОРОШКАХ МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК

*Н.Н. Скворцова¹, Г.М. Батанов¹, В.Д. Борзосеков¹, Л.В. Колик¹,
Е.М. Кончехов¹, А.А. Летунов¹, Д.В. Малахов¹, Е.Д. Образцова¹,
Е.А. Образцова¹, А.Е. Петров¹, И.Г. Рябикина², К.А. Сарксян¹,
В.Д. Степахин¹, А.С. Соколов², Н.К. Харчев¹*

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

² Московский технологический университет (МИРЭА)

Синтез частиц с различной пространственной геометрией является одним из главных направлений современного материаловедения. Плазменные методы находятся среди самых многообещающих методов для синтеза, модификации и обработки таких структур. Доклад посвящен синтезу и осаждению микро и наноструктур веществ с контролируемым размером и химическим составом синтетическим микроволновым плазмохимическим методом. Рассмотрен новый подход к синтезу структур веществ микро- и наноразмеров в неравновесных микроволновых разрядах, инициируемых гиротроном в смесях порошков металл – диэлектрик. Показана возможность синтеза веществ во всех фазах (порошковая смесь – микроволны – пылевая плазма – газ) неравновесного разряда при атмосферном давлении.

В течение последнего десятилетия изучались свойства микроволнового разряда, который возникает в смеси порошков металла и диэлектрика в СВЧ-поле большой мощности [1] в замкнутом объеме (порошок располагался между двумя кварцевыми стеклами). После СВЧ-пробоя в объеме порошков возникала плазма с высокой плотностью заряженных частиц ($\sim 10^{17} \text{см}^{-3}$)

и температурой внутри порошка до 10 кК, в которой эффективно поглощалось излучение гиротрона [2].

В настоящих экспериментах смесь порошков металл – диэлектрик располагалась в специально сконструированном реакторе, в котором верхняя поверхность порошка оставалась свободной. После СВЧ-пробоя, инициируемого излучением гиротрона, в смеси порошков происходил свободный газодинамический разлет веществ порошка, что способствовало возникновению неравновесной плазменно-газовой субстанции [3]. После выключения гиротрона развиваются химические и плазмохимические экзотермические реакции, время протекания которых на порядок и более превышает длительность СВЧ-импульса гиротрона. В объеме реактора наблюдался синтез новых веществ из материала порошков и газа. На стенках реактора и на пылевых частицах в объеме реактора происходит закалка синтезированных веществ. Метод синтеза был апробирован для разрядов, инициируемых гиротроном в порошках металл – диэлектрик: титан – бор, молибден – бор, титан – кремний – нитрид бора, молибден – нитрид бора, вольфрам – молибден – бор и др. [4, 5]. Были синтезированы частицы следующих веществ: столбчатые наноструктуры диборида титана, сферолитные микронные структуры борида молибдена и диборида титана, игольчатые и складчатые наноструктуры нитрида бора. На рисунках 1 и 2 представлены примеры микрофотографий осажденных веществ в разряде, инициированном гиротроном в смеси порошков молибден – нитрид бора (мощность СВЧ 400 кВт, длительность 10 мс): сферолит молибдена и слоистая структура из гексагонального нитрида бора.

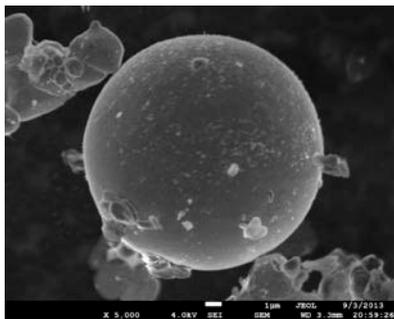


Рис. 1. Сферолит молибдена

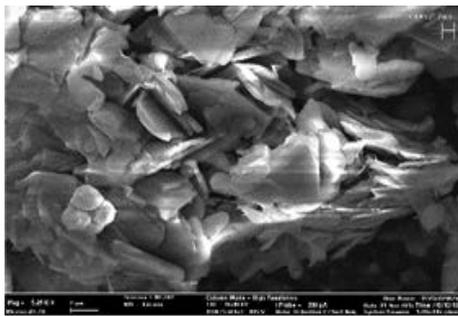


Рис. 2. Слоистая структура гексагонального нитрида бора

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14–08–00753).

1. Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Косый И.А. и др. Иницирование твердофазной химической реакции с помощью оптического и микроволнового облучения // ЖТФ. 2001. Т. 71. С. 119-123.

2. Летунов А.А., Скворцова Н.Н., Рябикина И.Г. и др. Эволюция температуры и свечения в импульсном микроволновом разряде в порошках молибден – бор // Инженерная физика. 2013. № 10. С. 36-42.

3. *Batanov G.M., Berezhetzkaya N.K., Borzosekov V.D. et al.* Boron Nitride and Titanium Diboride Synthesis Initiated by Microwave Discharge in Ti–B Powder Mixture in Nitrogen Atmosphere // *J. Nanoelectronics and Optoelectronics*. 2013. Vol. 8. P. 58–66.

4. Способ получения нанодispersных порошков нитрида бора и диборида титана : а. с. 2523471 РФ, МКИ / Батанов Г.М., Колик Л.В., Харчев Н.К., Петров А.Е., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Борзосексов В.Д., Малахов Д.В., Кончечков Е.М., Степахин В.Д., Косский И.А., Щербаков И.А. Заявл. 16.05.2014.

5. *Skvortsova N., Batanov G., Borzosekov V. et al.* Microwave method for the synthesis of micro and nano sized particles in high-pressure gyrotron discharge // 8 Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology (PPPT-8), 14–18 September 2015, Minsk, Belarus. 2015. V. 2. P. 388-389.

ОСАЖДЕНИЕ ВЕЩЕСТВ НА МОЛИБДЕНОВЫХ И КВАРЦЕВЫХ ПЛАСТИНАХ В РАЗРЯДАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА В ПОРОШКАХ МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК

В.Д. Степахин^{1,3}, Н.Н. Скворцова^{1,4}, Д.В. Малахов^{1,3}, А.А. Сорокин², Г.М. Батанов¹, В.Д. Борзосексов¹, М.Ю. Глявин², Л.В. Колик¹, Е.М. Кончечков^{1,3}, А.А. Летунов¹, А.Е. Петров^{1,3}, И.Г. Рябикина⁵, К.А. Сарксян¹, А.С. Соколов⁵, В.А. Смирнов⁵, Н.К. Харчев¹

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

³ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

⁵ Московский технологический университет (МИРЭА)

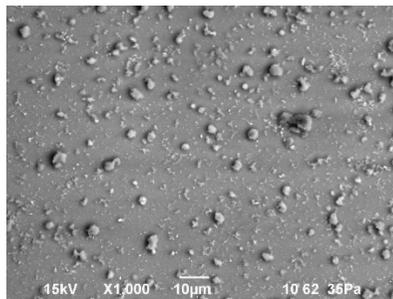
Микроволновые разряды для целей материаловедения могут быть созданы или инициированы различными микроволновыми источниками, в том числе гиротронами. В последние годы выяснилось, что в режиме разряда при атмосферном давлении, при воздействии на порошок с открытой поверхностью и при свободном газодинамическом разлете веществ после пробы по окончании работы гиротрона наблюдается длительное развитие разряда. В таких режимах была показана возможность синтеза структур с микро- и наноразмерами в различных смесях порошков металла и диэлектрика в воздухе и азоте [1, 2].

В докладе представлены результаты создания микрорельефа на поверхности полированных пластин молибдена и пластин кварца в плазменно-

газовой фазе разряда (после выключения СВЧ), инициируемого гиротроном в порошках молибден – бор в воздухе при атмосферном давлении в синтез-камере.

Микрорельеф на пластинах кварца образуется частицами бора (от десятков до долей микрометра) с неоднородным распределением по поверхности (рисунок).

Агломераты частиц бора на кварце.
Мощность излучения 350 кВт, длительности импульса 10 мс, содержание молибдена в порошке 40 %



Микрорельеф на пластинах кварца образован частицами, неоднородно распределенными по поверхности подложки. Сами частицы (можно предположить, что это кристаллы молибдена) являются агломератами кристаллических зерен, сильно отличающихся по размеру: от менее 0,5 мкм до нескольких единиц микрометра. На более крупных зернах, входящих в агломераты, наблюдается огранка. Указанный микрорельеф сохраняется в течение нескольких месяцев в обычных условиях в воздухе при атмосферном давлении материала. В дальнейшем созданные образцы предполагается проверить на различие в работах выхода электронов с гладких пластин и пластин с микрорельефом [3]. Результаты экспериментов позволяют предположить, что описанный метод может быть использован для получения поверхностей с микрорельефом в работах по созданию многоострийных полевых эмиттеров [4].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 14–08–00753, 15–08–05455, 16–38–00651 мол_a).

1. *Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D. et al.* // J. Nanoelectronics and Optoelectronics. 2013. V. 8. P. 58.

2. *Скворцова Н.Н., Степахин В.Д. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 9. С. 779.

3. *Соминский Г.Г., Тарадаев Е.П. и др.* // Журн. техн. физ. 2015. Т. 85, вып. 1. С. 138.

4. Патент РФ на изобретение № 2523471 «Способ получения нанодисперсионных порошков нитрида бора и диборида титана»; правообладатель(ли): Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН), заявл. 18.01.2013, опубл. 26.05.2014.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО 263 ГГц / 1 кВт ГИРОТРОНА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ИСПАРЕНИЯ-КОНДЕНСАЦИИ

*А.В. Водопьянов¹, А.И. Цветков¹, М.В. Морозкин¹, М.Ю. Глявин¹,
А.П. Фокин¹, А.В. Самохин², Н.В. Алексеев², М.А. Синайский²*

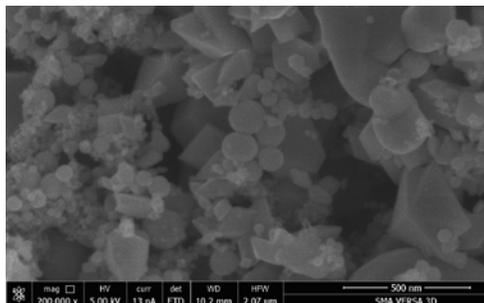
¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

Ряд современных приложений, таких как создание наноструктурных материалов и покрытий с уникальными свойствами, приложения биологии и медицины, связанные с селективным воздействием на клетки тканей и направленным транспортом лекарственных средств, защита окружающей среды от токсичных соединений и т. д., требуют применения наноразмерных порошков химических элементов и их неорганических соединений с размерами частиц менее 100 нм [1, 2].

В докладе приводятся результаты экспериментов по получению наночастиц оксидов металлов из паров, образующихся при испарении исходного материала сфокусированным потоком электромагнитного излучения с частотой 263 ГГц и номинальной мощностью около 1 кВт, источником которого являлся созданный в ИПФ РАН автоматизированный микроволновый комплекс на базе гиротрона [3].

Проведена серия экспериментов по созданию частиц оксидов металлов WO_3 , ZnO , $Fe_2Ti_3O_9$, Al_2O_3 . Расчетная плотность мощности СВЧ-излучения составила 16 кВт/см².



Микроструктура порошка триоксида вольфрама WO_3 , полученного методом испарения-конденсации с помощью сфокусированного излучения 263 ГГц гиротрона с номинальной мощностью 1 кВт

Аналогичные эксперименты проводились ранее с использованием в качестве источника излучения гиротронного комплекса с частотой 24 ГГц и номинальной мощностью 7 кВт [4, 5]. Увеличение частоты излучения приводит к повышению эффективности нагрева за счет увеличения коэффициента поглощения и позволяет получить большую плотность мощности благодаря лучшей фокусировке излучения. Продемонстрировано увеличение

скорости испарения вещества в 3 раза по сравнению с экспериментами с 24 ГГц гиротроном, размер наночастиц при этом лежит в пределах от 20 до 500 нм (см. рисунок).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 13-03-12075.

1. *Vajtai R.*, 2013, Springer Handbook of Nanomaterials, Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg, p. 1257.

2. *Guo Z., and Tan L.*, 2009, Fundamentals and Applications of Nanomaterials, Artech House, Norwood, MA, p. 249.

3. *Glyavin M.Yu., Chirkov A.V., Denisov G.G., Fokin A.P., Kholoptsev V.V., Kuftin A.N., Luchinin A.G., Golubyatnikov G.Yu., Malygin V.I., Morozkin M.V., Manuilov V.N., Proyavin M.D., Sedov A.S., Sokolov E.V., Tai E.M., Tsvetkov A.I., Zapevalov V.E.* Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // Rev. Sci. Instr. 2015. 86(5), 054705.

4. *Самохин А.В., Алексеев Н.В., Водопьянов А.В., Мансфельд Д.А., Синайский М.А., Цветков Ю.В., Еремеев А.Г., Плотников И.В.* // Химия высоких энергий. 2015. Т. 49, № 4. С. 302–307.

5. *Samokhin A.V., Alexeev N.V., Vodopyanov A.V., Mansfeld D.A. and Tsvetkov Yu.V.* Metal Oxide Nanopowder Production by Evaporation–Condensation Using a Focused Microwave Radiation at a Frequency of 24 GHz // J. Nanotechnol. Eng. Med. 6(1), 011008 (2015), doi: 10.1115/1.4032015.

Авторский указатель

А		В		Горшунов Б.П.	96, 106
Абашин А.Е.	100	Вакс В.Л.	24	Гребенко А.К.	106
Абубакиров Э.Б.	67	Вдовин В.Ф.	99, 100,	Громов В.Д.	32
Аверин С.В.	26		102	Гузнов Ю.М.	92
Алексеев Н.В.	129, 152	Вдовичев С.Н.	102	Гуляев Ю.В.	43
Алкеев Н.В.	26	Вдовичева Н.К.	28	Гунбина А.А.	104
Андриянов А.Ф.	113	Викторов М.Е.	141	Д	
Андронов А.А.	20	Вилков Е.А.	43	Давидюк И.В.	18
Антонов А.В.	34	Вилков М.Н.	51	Данилевский Д.Б.	99
Анцыгин В.Д.	22	Винокуров Н.А.	18	Дворецкий С.А.	34
Арбузов В.С.	18	Вихарев А.А.	67	Дейчули О.И.	18
Аржанников А.В.	54, 77, 86	Воблый П.Д.	18	Дементьев Е.Н.	18
Аронзон Б.А.	98	Водопьянов А.В.	129, 141,	Демихов Е.И.	58
Арсаев И.Е.	118		143, 152	Демихов Т.Е.	58
Артеменко Ю.Н.	99	Волков В.Н.	18	Денисов Г.Г.	51, 52, 57,
Архипцев Ф.Ф.	136	Володкин Б.О.	19		75, 87
Б		Вопилкин Е.	36	Дерюгина А.В.	133
Бадарин А.А.	68	Востоков Н.В.	116	Джиджоев М.С.	45
Байрамуков Р.Р.	114	Г		Дмитриев П.Н.	30
Бакунин В.Л.	75	Гавриленко В.И.	16, 34	Довженко Б.А.	18
Бакунов М.И.	15	Гагкаева З.В.	106	Додин Е.П.	20
Балабанов С.С.	130	Галеева А.В.	98	Долгих А.В.	17
Балакин А.В.	45	Галиев Г.Б.	37	Долженко Д.Е.	98
Балаль Н.	38, 47	Галин М.А.	28	Дорофеев А.А.	26
Бандуркин И.В.	38, 55,	Гачев И.Г.	92	Дрягин С.Ю.	100
	64, 83	Гаштури А.П.	57, 92	Дубинов А.А.	34
Барзилович П.Ю.	106	Геннеберг В.А.	136	Е	
Барышев А.М.	30	Герасимов В.В.	25	Евдокимов В.В.	74
Батанов Г.М.	148, 150	Германский С.А.	31	Егоров С.В.	130
Беликович М.В.	127, 128	Гетманов Я.В.	17, 18	Елисеев А.И.	100
Белов С.П.	103	Гинзбург Н.С.	27, 51, 53,	Ельцев Ю.Ф.	98
Беляев А.В.	130		58, 59, 62,	Ельчанинов А.А.	53
Беляков В.А.	20		64, 77, 81	Еремеев А.Г.	130
Белянчиков М.А.	96	Гладышева Н.Б.	26	Есаулков М.Н.	45
Богдашов А.А.	56	Глявин М.Ю.	27, 73, 80,	Ж	
Богомоллов Г.Д.	32		90, 133,	Жвания И.А.	45
Большаков О.С.	100, 127,		143, 150,	Железнов И.В.	59
	145		152	Жукова Е.С.	96, 106
Борзосеков В.Д.	148, 150	Гойхман М.Б.	92	З	
Братман В.Л.	38	Голованов А.А.	53, 58	Завгородний А.С.	144
Бубнов Г.М.	99, 100	Голубев С.В.	123, 141,	Завольский Н.А.	131
	113		143	Завьялов В.В.	32
Булгакова В.В.	25	Голубятников Г.Ю.	103, 107	Запесалов В.Е.	27, 60, 61,
Буравлев А.Д.	41	Гольденберг А.Л.	73		131
Бурдаков А.В.	86	Гольцман Г.	39, 95	Заславский В.Ю.	27, 59, 62,
Буренков Ю.А.	112	Горбачев А.М.	124		77
Бурмасов В.С.	86	Гордеева А.В.	104	Зброжек В.О.	104
Бурсов Н.Н.	115	Гордиенко В.М.	45		
Быков Ю.В.	130	Горелик В.С.	96		
		Горелов С.Д.	15		

Зильберман П.Е.	43	Кубарев В.В.	17, 18	Мармалюк А.А.	20
Зинченко Д.И.	20	Куваева С.С.	133	Мастеров Д.	36
Зинченко И.И.	97, 99	Кудрявцев К.Е.	34	Махалов П.Б.	89
Зотова И.В.	27, 51, 53, 58, 59, 81	Кузечкин Н.А.	45	Машкович Е.А.	15
Зуев А.С.	131	Кузиков С.В.	67	Медведев Л.Э.	18
И		Кузнецов К.А.	31, 37	Меклер К.И.	86
Иванов А.А.	63	Кузнецов С.А.	77, 86	Михайлов Г.М.	43
Иванов И.А.	86	Кузьмин Л.С.	104	Михайлов Н.Н.	34
Иванов К.А.	45	Кукин Л.М.	145	Мишакин С.В.	92
Игнатъев А.Н.	132, 144	Кукушкин И.В.	125	Мораренко В.В.	108
Изотов И.В.	123	Куликов М.Ю.	128, 145	Морозкин М.В.	27, 84, 92, 133, 152
Ильин А.Ю.	74	Кулипанов Г.Н.	17, 18	Морозов С.В.	34
К		Купер Э.А.	18	Мотовилов К.А.	106
Кадыков А.М.	34	Купцов И.В.	18	Мотыгин С.В.	18
Кадыров Л.С.	96, 106	Курин В.В.	28	Муравьев В.М.	125
Калинин П.В.	77	Куркин Г.Я.	18	Мустафин И.А.	41
Кальников Ю.К.	55, 76	Куркин С.А.	68, 91	Мухин А.С.	100, 102
Кальнова Г.И.	87	Куфтин А.Н.	27	Мухин Д.Н.	128
Каминский А.К.	47, 64, 83	Л		Мясин Е.А.	74
Каминский О.В.	112	Ладенков И.В.	20	Н	
Касатов А.А.	86	Ладугин М.А.	20	Назаров М.М.	29, 42
Каурова Н.	39	Лапинов А.В.	103, 107	Недорезова П.М.	29
Китаева Г.Х.	31, 37	Лапшин А.И.	118	Нечаев В.Е.	85
Китай М.С.	29	Лебедев М.К.	114, 115	Никитин А.К.	25
Климов А.Ю.	102	Лемзяков А.Г.	25	Никифоров П.Л.	99
Климов Е.А.	37	Леонов И.И.	113	Николаев Н.А.	22
Клушин А.М.	28	Леснов И.В.	100	Новикова А.В.	130
Князев Б.А.	18, 19, 25	Летунов А.А.	32, 134, 138, 146, 148, 150	Новожилова Ю.В.	75
Ковалев С.П.	31	Лещева К.А.	70, 73	Ноздрин Ю.Н.	20
Ковалюк В.	95	Лобанов Ю.	95	Носов В.И.	99
Козак В.Р.	18	Лубяко Л.В.	136	Нусинович Г.С.	90
Козырев Е.В.	18	Лукин А.Н.	132, 144	О	
Колик Л.В.	148, 150	Луковников Д.А.	87	Образцова Е.А.	148
Колобанов Е.И.	18	Лукша О.И.	69	Образцова Е.Д.	148
Кондаков А.А.	18	Лучинин А.Г.	143	Овчар В.К.	18
Кончечков Е.М.	148, 150	Лысенко В.В.	58	Ожередов И.А.	45
Корниенко В.В.	37	Любченко В.Е.	71	Оладышкин И.В.	35
Корниенко В.Н.	65	М		Опарина Ю.С.	47
Корнишин С.Ю.	27, 83	Макаров М.А.	86	Осипов В.Н.	18
Королёв С.А.	116	Малай И.М.	112, 118	Ошарин И.В.	55, 76
Короновский А.А.	68, 91	Малахов Д.В.	134, 138, 146, 148, 150	Ошевский Л.В.	133
Коротяев Д.В.	100			П	
Костров Е.А.	58	Маликов И.В.	43	Павельев В.С.	19
Кочанов В.П.	103	Малкин А.М.	27, 59	Павлов С.	36
Кошелев М.А.	113	Мамрашев А.А.	22	Падалица А.А.	20
Кошелец В.П.	30	Мансфельд Д.А.	129, 141	Пальчиков Е.И.	17
Кошкин П.В.	17	Мансфельд М.А.	100	Панкратов А.Л.	36, 104
Красников И.Ю.	17	Мануилов В.Н.	27, 70, 73, 80	Парафин А.	36
Кропоткина Е.П.	132			Паршин В.В.	113, 130, 142
Крутихин С.А.	18				
Крылов В.Н.	133				

Пенин А.Н.	31	Сарксян К.А.	148, 150	У	
Перваков К.С.	98	Сафронова М.И.	143	Удалов О.Г.	102
Перельштейн Э.А.	47, 64	Седяров И.К.	18	Укрюков Г.В.	138
Пермин Д.А.	130	Седов А.С.	27, 131	Ульмаскулов М.Р.	53
Песков Н.И.	83	Седых С.Н.	47, 64, 83	Ульмаскулов Р.М.	59
Песков Н.Ю.	47, 62, 64,	Сезонов В.Е.	88	Усков В.В.	96
	77	Селиверстов С.	39, 95	Уткина И.Е.	70
Пестряков Е.В.	96	Семенов Е.С.	78, 84, 85		
Петров А.Е.	148, 150	Сергеев А.С.	51, 59, 62,	Ф	
Петров В.М.	18		77, 81, 82	Федотов А.Э.	89
Пилан А.М.	18	Середняков С.С.	18	Фейгин А.М.	127, 128,
Планкин О.П.	78, 85	Серов Е.А.	113, 142		145
Полосаткин С.В.	86	Сидоров А.В.	123, 143	Фефелов А.Г.	20
Попик В.М.	18	Сидорук К.В.	106	Фокин А.П.	27, 75, 90,
Попов С.С.	86	Синайский М.А.	152		133, 143,
Поступаев В.В.	86	Синицкий С.Л.	77, 86		152
Потатуркин О.И.	22	Скалыга В.А.	123	Фролов Н.С.	91
Пронин А.А.	106	Скворцова Н.Н.	134, 138,	Фурсенко Д.А.	96
Прохоров А.С.	96, 106		146, 148,		
Проявин М.Д.	80		150	Х	
Пудалов В.М.	98	Скляр В.Ф.	86	Хайкин В.Б.	114, 115
Пушкарев С.С.	37	Скринский А.Н.	18	Харчев Н.К.	134, 148,
		Смирнов А.В.	98		150
Р		Смирнов В.А.	150	Хламова Ю.Н.	133
Радченко Д.Е.	71	Соболев Д.И.	57, 87	Хохлов Д.Р.	98
Разин С.В.	123, 143	Соколов А.С.	134, 148,	Храмов А.Е.	68, 91
Раупов Д.А.	99		150	Худченко А.В.	30
Ревин Л.С.	36, 104	Соломонов С.В.	132, 144		
Резник А.Н.	116	Солянкин П.М.	45	Ц	
Репков В.В.	18	Соминский Г.Г.	88	Цветков А.И.	92, 133,
Ровенских А.Ф.	86	Сорокин А.А.	130, 150		152
Розанов С.Б.	132, 144	Степанов В.Д.	77, 86	Цветков Ю.В.	129
Розенталь Р.М.	27, 81, 82	Степахин В.Д.	148, 150	Цырлин Г.Э.	41
Романченко И.В.	53	Стороженко А.А.	115		
Ростов В.В.	53			Ч	
Рудаков К.И.	30	Т		Черепенин В.А.	65
Румянцев В.В.	34	Таламанова М.Н.	133	Черкасова О.П.	42
Румянцев Д.Р.	65	Тарадаев Е.П.	88	Чернов К.Н.	18
Русова А.	39	Тарарышкин С.В.	18	Чернова А.И.	113
Рыскин В.Г.	127, 145	Телегин С.А.	71	Черноусов А.Д.	138
Рябкина И.Г.	146, 148,	Тимофеев И.В.	54, 86	Черных А.В.	43
	150	Тобохова А.С.	106	Ческидов В.Г.	18
Рябова Л.И.	98	Томас В.Г.	96	Чесноков Е.Н.	17
		Томас П.В.	96	Чигарев С.Г.	43
С		Торгашев В.И.	96, 106	Чигинев А.	36
Савельев-	45	Третьяков М.Ю.	113	Чирков А.В.	87
Трофимов А.Б.		Трибендис А.Г.	18	Чопорова Ю.Ю.	19
Савилов А.В.	38, 47, 55,	Тропанова А.	36		
	64, 76, 83	Трофимов П.А.	69	Ш	
Савкин Л.В.	110	Трухин В.Н.	41	Шабалин М.А.	133
Саликова Т.В.	18	Тумарева Т.А.	88	Шакуров Г.С.	96
Самохин А.В.	129, 152	Тумм М.	77	Шалашов А.Г.	136
Сапожников Д.А.	29	Тютюнников С.И.	64	Шампоров В.А.	104
Саргсян М.В.	112, 118			Шанин Г.И.	99

Шарыпов К.А.	53, 59	D		P	
Шашкин В.И.	116	Dressel M.	96, 106	Petzelt J.	96
Швецов А.А.	127, 145			Prokleška J.	96
Шевченко О.А.	17, 18	G		S	
Шендрик А.В.	115	Grinenko V.	106	Savinov M.	96, 106
Шерешевский И.А.	28			T	
Шкаев А.П.	113	H		Tani M.	15
Шкуринов А.П.	42, 45	Huhtio T.	41		
Шулешова И.	36				
Шунайлов С.А.	53, 59	K			
		Kadlec C.	96		
Щ		Kadlec F.	96		
Щеглов М.А.	18	Kakko J.P.	41		
Щербатенко М.	95	Kontu A.	127		
		Korabovsky A.	127		
Ю		Kremer R.	96		
Юневич Е.О.	71				
Юрчук Э.Ф.	118	L			
		Lipsanen H.	41		
Я		O			
Яковлев Д.В.	136	Ostapchuk T.	96		
Яландин М.И.	53, 58, 59				

Научное издание

**X ВСЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР
ПО РАДИОФИЗИКЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ
И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН**

Тезисы докладов

Оригинал-макет
подготовлен редакционно-издательской группой ИПФ РАН

Формат $60 \times 90^{1/16}$.
Усл. печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 8,5.
Тираж 180 экз. Заказ № 20(2016)

Отпечатано на ризографе в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК