



ХII ВСЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО РАДИОФИЗИКЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



Нижний Новгород • 2022



Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики РАН



Научно-производственное предприятие
ГИКОМ

XII ВСЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО РАДИОФИЗИКЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

**IV ШКОЛА ДЛЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОЩНОЙ
ВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ СВЧ:
ИСТОЧНИКИ И ПРИЛОЖЕНИЯ»**

28 февраля – 4 марта 2022 года, Нижний Новгород

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2022

Секции

- Источники мощного микроволнового излучения
- Источники и приемники излучения терагерцового диапазона
- 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.В. Аржанников	профессор, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск
В.Ф. Вдовин	профессор, Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород
В.И. Гавриленко	профессор, Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород
Н.С. Гинзбург	чл.-корр. РАН, Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород
Г.Н. Гольцман	профессор, МПГУ, г. Москва
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	чл.-корр. РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва
М.И. Яландин	академик, Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

Ответственный за выпуск О.С. Моченева

Оригинал-макет подготовлен редакционно-издательской группой
ФИЦ Институт прикладной физики РАН

Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 9,25. Уч.-изд. л. 8,0.
Тираж 140 экз. Заказ № 2 (2022).

Отпечатано на ризографе в типографии ФИЦ Институт прикладной физики РАН,
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

СОДЕРЖАНИЕ

Источники мощного микроволнового излучения

<i>Денисов Г.Г.</i> Принципы построения сверхмощных субтерагерцовых комплексов	13
<i>Яландин М.И., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Зубарев Н.М., Ростов В.В., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А.</i> Ультракороткие замагнитченные электронные пучки, формируемые в пограничном диапазоне вакуум – газ	14
<i>Глявин М.Ю., Денисов Г.Г.</i> Управляемый термоядерный синтез: что, где, когда, как и кто	16
<i>Запезалов В.Е.</i> Повышение рабочей частоты гиротронов	17
<i>Песков Н.Ю., Абубакиров Э.Б., Вихарев А.А., Гинзбург Н.С., Денисенко А.Н., Заславский В.Ю., Малкин А.М., Проявин М.Д.</i> Субгигаваттные черенковские генераторы Ка- и W-диапазона с двумерно-периодическими замедляющими структурами	18
<i>Самсонов С.В., Денисов Г.Г., Богдашов А.А., Гачев И.Г., Каменский М.В., Лецева К.А., Новак Е.М., Савилов А.В.</i> Проект широкополосной гироЛЮВ на основе квазиоптической зигзагообразной зеркальной линии	20
<i>Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Розенталь Р.М., Сергеев А.С., Тай Е.М., Фокин А.П.</i> Использование 2,5-мерного PIC-кода для моделирования гиротронов с несимметричными рабочими модами	21
<i>Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Стародубов А.В., Торгашов Р.А., Навроцкий И.А.</i> Исследование миниатюрных ламп бегущей волны миллиметрового диапазона с многолучевыми ленточными электронными пучками	22
<i>Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Тарадаев Е.П.</i> Электронные потоки, формируемые электронно-оптическими системами с полевым эмиттером	23
<i>Аржанников А.В., Синуцкий С.Л., Попов С.С., Калинин П.В., Самцов Д.А., Сандалов Е.С., Степанов В.Д., Атлуханов М.Г., Макаров М.А., Куклин К.Н., Ровенских А.Ф.</i> Генерация мультимегаваттного потока субмиллиметрового излучения при пучково-плазменном взаимодействии: состояние решения проблемы, перспективы дальнейшего продвижения.....	24
<i>Гинзбург Н.С., Вилков М.Н., Самсонов С.В., Денисов Г.Г., Зотова И.В., Сергеев А.С., Кочаровская Е.Р., Богдашов А.А., Гачев И.Г., Розенталь Р.М.</i> Теоретические и экспериментальные исследования генерации последовательностей ультракоротких микроволновых импульсов на основе пассивной синхронизации мод	25
<i>Малкин А.М., Заславский В.Ю., Федотов А.Э., Сергеев А.С., Гинзбург Н.С.</i> Релятивистские генераторы и усилители поверхностной волны со сложнопериодическими замедляющими системами	26
<i>Царев В.А., Онищенко А.П.</i> Трехствольный двухполосный многолучевой усилительный клистрон Ки-диапазона	28
<i>Шалаев П.Д.</i> Волноводная замедляющая система для многолучевой ЛБВ.....	29
<i>Богдашов А.А., Самсонов С.В., Гачев И.Г.</i> Система ввода-вывода излучения десятиствольной гироЛБВ W-диапазона на винтовых волноводах	30

<i>Запелалов В.Е., Зуев А.С., Планкин О.П., Семенов Е.С.</i> Перспективы использования многоствольного гиротрона для освоения терагерцового диапазона	31
<i>Григорьева Н.В., Рыскин Н.М.</i> Исследование синхронизации гиротрона внешним сигналом на основе модифицированной квазилинейной модели	32
<i>Гаштури А.П., Соболев Д.И.</i> Анализ сверхразмерных электродинамических систем комбинированным методом на основе принципа физической оптики и метода мультипольного разложения	34
<i>Мануилов В.Н., Лихтерова П.Д., Иляков И.В., Кулагин И.С., Заславский В.Ю.</i> Влияние токов Фуко на возмущение магнитного поля и динамику формирования винтового пучка релятивистского импульсного гиротрона	35
<i>Юровский Л.А., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С., Назаровский А.В.</i> Развитие методов формирования и усиления коротких микроволновых импульсов	36
<i>Абубакиров Э.Б., Данилов Ю.Ю., Денисенко А.Н., Леонтьев А.Н., Ошарин И.В., Розенталь Р.М., Федотов А.Э.</i> Разработка сильноточного релятивистского гиротрона Ка-диапазона с рабочей модой ТМ-типа	36
<i>Заславский В.Ю., Мануилов В.Н., Куфтин А.Н., Лецева К.А., Климов А.В., Соболев Д.И., Зотова И.В., Гинзбург Н.С.</i> Прогресс в разработке мощных планарных гиротронов с поперечным дифракционным выводом излучения	38
<i>Денисов Г.Г., Зотова И.В., Малкин А.М., Сергеев А.С., Розенталь Р.М., Фокин А.П., Белоусов В.И., Шмелев М.Ю., Чирков А.В., Цветков А.И., Бандуркин И.В., Глявин М.Ю.</i> Эффективное возбуждение гиротрона на пятой циклотронной гармонике в режиме умножения частоты: теория и эксперимент	39
<i>Денисов Г.Г., Куфтин А.Н., Мануилов В.Н., Чирков А.В., Попов Л.Г., Запелалов В.Е., Зуев А.С., Седов А.С., Железнов И.В., Глявин М.Ю.</i> Концепция 230 ГГц мощного непрерывного гиротрона для проекта DEMO	40
<i>Морозкин М.В., Мануилов В.Н., Лихтерова П.Д.</i> Анализ вторичной эмиссии электронов в коллекторных системах современных гироприборов	41
<i>Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Зуев А.С., Куфтин А.Н., Новожилова Ю.В., Семенов Е.С.</i> Влияние конкуренции мод на режим генерации гиротрона мегаваттного уровня мощности с отраженной волной	42
<i>Зуев А.С., Фокин А.П., Ананичев А.А., Семенов Е.С., Планкин О.П., Куфтин А.Н., Запелалов В.Е., Глявин М.Ю.</i> Реализация дискретной перестройки частоты в диапазоне 133–250 ГГц в мощном гиротроне для перспективных плазменных приложений	43
<i>Вилков М.Н., Иванов А.А., Розенталь Р.М.</i> Теоретическое и экспериментальное исследование импульсной и хаотической динамики в ЛБВ с запаздывающей обратной связью	44
<i>Корниченко В.Н., Кулагин В.В.</i> Особенности дифракции монополярного электромагнитного импульса на простейших объектах	45
<i>Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.</i> Измерение мощности импульсного излучения, генерируемого оротронами с двухрядной периодической структурой, в диапазоне 100–400 ГГц	46
<i>Паршин В.В., Серов Е.А., Запелалов В.Е., Гордеев С.К., Корчагина С.Б.</i> Алмазкарбидкремниевый композит для микроэлектроники и электроники больших мощностей	47

<i>Соболев Д.И., Проявин М.Д., Заславский В.Ю.</i> Широкополосные возбудители моды TE_{01} круглого волновода, изготовленные методом 3D-печати.....	49
<i>Проявин М.Д., Морозкин М.В., Котомина В.Е., Соболев Д.И., Орловский А.А.</i> Результаты новой аддитивной технологии CMPS изготовления элементов вакуумных электронных устройств	50
<i>Белоусов В.И., Калынова Г.И., Щегольков Д.Ю., Харчев Н.К.</i> Универсальный квазиоптический поляризатор.....	51
<i>Песков Н.Ю., Аржанников А.В., Белоусов В.И., Гинзбург Н.С., Опарина Ю.С., Савилов А.В., Сандалов Е.С., Синицкий С.Л., Соболев Д.И., Заславский В.Ю.</i> Мощный длинноимпульсный ЛСЭ-генератор субтерагерцового/терагерцового диапазона: разработка и тестирование электродинамической системы	52
<i>Данилов Ю.Ю., Леонтьев А.Н., Малкин А.М., Розенталь Р.М., Щегольков Д.Ю.</i> Новые типы продольно-шелевых резонаторов для сильноточных гиротронов миллиметрового диапазона.....	54
<i>Богдашов А.А., Гачев И.Г., Гинзбург Н.С., Гузнов Ю.М., Зотова И.В., Леонтьев А.Н., Розенталь Р.М., Самсонов С.В., Сергеев А.С.</i> Источники мощного многочастотного излучения для плазменных приложений	55
<i>Власов С.Н., Копосова Е.В.</i> Геометрооптическая теория трансформатора право- и левовращающихся волн волновода кругового сечения в волновые пучки.....	56
<i>Власов С.Н., Копосова Е.В.</i> Коэффициент передачи волновых пучков при дифракции на решетке	57
<i>Заславский В.Ю., Глявин М.Ю., Зотова И.В., Соболев Д.И.</i> Субтерагерцовые гиротроны с многозеркальными резонаторами конфокального типа	58
<i>Вихарев А.А., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Кузиков С.В., Яландин М.И.</i> Ускорение электронов ультракороткими импульсами микроволнового сверхизлучения.....	59
<i>Вилков М.Н., Гинзбург Н.С., Фильченков С.Е.</i> Активная синхронизация мод в электронных генераторах с высокодобротными резонаторами.....	60
<i>Рябов А.В., Соболев Д.И.</i> Просветление пластины раффона в диапазоне 120–140 ГГц методом засверливания поверхности.....	61
<i>Зуев А.С., Петелин М.И., Седов А.С., Семенов Е.С.</i> Анализ специфики терагерцовых гиротронов с выводом излучения в сторону катода	62
<i>Зайцева И.Е., Запезалов В.Е., Зуев А.С., Колосов С.В., Семенов Е.С.</i> Возможности реализации широкополосной плавной перестройки частоты в гиротронах с конусообразными резонаторами	63
<i>Каменский М.В., Морозкин М.В., Орловский А.А., Проявин М.Д.</i> Усовершенствование системы автоматизации гиротронных комплексов на основе компонентов современной микроэлектроники	64
<i>Ананичев А.А., Каменский М.В., Лучинин А.Г., Морозкин М.В., Проявин М.Д.</i> Исследование технологического гиротрона для плазменных приложений, оптимизированного для работы на частотах 18–30 ГГц	65
<i>Новак Е.М., Савилов А.В., Самсонов С.В.</i> Квазианалитическая теория гироЛЮВ с зигзагообразной электродинамической системой.....	66

<i>Ананичев А.А., Федотов А.Э., Фокин А.П., Богдашов А.А., Бандуркин И.В.</i> Исследование метода селекции мод за счет резонансных рассеивающих элементов в квазиоптическом резонаторе	67
<i>Ананичев А.А., Орловский А.А., Седов А.С., Цветков А.И., Чекмарев Н.В.</i> Стабилизация мощности гиروتронов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов при перестройке частоты за счет согласованного управления несколькими параметрами	69

Источники и приемники излучения терагерцового диапазона

<i>Муравьев В.М., Кукушкин И.В.</i> Системы генерации и матричного приема терагерцового излучения	73
<i>Герасимов В.В., Князев Б.А., Никитин А.К., Хитров О.В., Лемзяков А.Г., Камешиков О.Э., Осинцева Н.Д., Павельев В.С.</i> Эксперименты по терагерцовой плазмоники на Новосибирском лазере на свободных электронах	74
<i>Галеева А.В., Казаков А.С., Артамкин А.И., Рябова Л.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Банников М.И., Данилов С.Н., Хохлов Д.Р.</i> РТ-симметричная и киральная нелокальная терагерцовая фотопроводимость в структурах на основе топологической фазы $Hg_{1-x}Cd_xTe$	75
<i>Павельев В.С., Тужмаков К.Н., Решетников А.С., Агафонов А.Н., Сойфер В.А., Князев Б.А., Осинцева Н.Д., Чопорова Ю.Ю., Колленок М.С., Кононенко Т.В., Конов В.И., Кулипанов Г.Н., Винокуров Н.А.</i> Технологии пропускающей и отражающей силовой дифракционной оптики терагерцового диапазона	76
<i>Пономарев Д.С., Лаврухин Д.В., Хабибуллин Р.А., Зайцев К.И., Спектор И.Е., Скоробогатый М.</i> Терагерцовые фотопроводящие детекторы для систем многопиксельной визуализации	77
<i>Хабибуллин Р.А., Пономарев Д.С., Ушаков Д.В., Афоненко А.А.</i> Эффективные зонные дизайны квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона	79
<i>Морозов С.В.</i> Лазерное и стимулированное излучение в диапазоне 10–31 мкм в гетероструктурах с квантовыми ямами $HgTe/CdHgTe$ с квазирелятивистским законом дисперсии носителей	80
<i>Кинев Н.В., Рудаков К.И., Филиппенко Л.В., Кошелец В.П.</i> Измерение излучения сверхпроводникового генератора в открытом пространстве и исследование гармоник джозефсоновской генерации	81
<i>Николаев Н.А., Кузнецов С.А., Veruete M.</i> Эффективные тонкопленочные сенсоры на основе терагерцовых метаповерхностей	83
<i>Гавриленко В.И., Маремьянин К.В., Гавриленко Л.В., Хабибуллин Р.А., Багаев Т.А., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Ушаков Д.В., Афоненко А.А.</i> Квантовые каскадные лазеры терагерцового диапазона, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии	84
<i>Хабибуллин Р.А., Пушкарёв С.С., Галиев Р.Р., Дюжиков И.Н., Павловский В.В., Волков О.Ю.</i> Управление модовым составом излучения 3,3 ТГц квантово-каскадного лазера	85

<i>Румянцев В.В., Разова А.А., Алешкин В.Я., Гавриленко В.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Морозов С.В.</i> Исследования процессов рекомбинации носителей заряда в структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe для создания излучателей терагерцового диапазона на межзонных переходах.....	87
<i>Камешков О.Э., Герасимов В.В., Князев Б.А.</i> Исследование дифракционных и субволновых решеток в терагерцовом диапазоне для задач сенсорики	88
<i>Ожередов И.А., Синько А.С., Шкуринов А.П., Волошин А.Э.</i> Некритический синхронизм в молекулярных кристаллах в терагерцовом диапазоне частот.....	89
<i>Черкасова О.П., Конникова М.Р., Вражнов Д.А., Князькова А., Кистенев Ю.В., Шкуринов А.П.</i> Применение терагерцовой импульсной спектроскопии крови для диагностики онкологических заболеваний.....	90
<i>Конникова М.Р., Черкасова О.П., Дизер Е.С., Гейнц Т.А., Васильевский И.С., Бутылин А.А., Кистенев Ю.В., Тучин В.В., Шкуринов А.П.</i> Применение терагерцовых метаматериалов для изучения адсорбции RBD-домена спайкового белка вируса SARS-CoV-2	91
<i>Муравьев В.М., Кукушкин И.В.</i> Плазмоника для систем терагерцовой электроники.....	91
<i>Оладышкин И.В., Сергеев Ю.А., Бодров С.Б., Корытин А.И., Коржиманов А.В., Токман М.Д., Степанов А.Н.</i> Применение мощных терагерцовых импульсов для исследования субпикосекундной кинетики электронов в графене.....	93
<i>Гинзбург Н.С., Кочаровская Е.Р., Сергеев А.С., Фильченков С.Е.</i> Широкополосное терагерцовое излучение длинноимпульсных ЛСЭ в кинетическом режиме генерации	94
<i>Сандалов Е.С., Никифоров Д.А., Синецкий С.Л., Аржанников А.В., Сквородин Д.И., Бак П.А., Логачев П.В., Петренко А.В., Живанков К.И., Батраков А.М., Павленко А.В., Павлюченко В.А., Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю.</i> Теоретические и экспериментальные исследования компрессии и транспортировки интенсивного электронного пучка линейного индукционного ускорителя в канале субмиллиметрового ЛСЭ	94
<i>Никифоров Д.А., Синецкий С.Л., Сандалов Е.С., Петренко А.В., Аржанников А.В., Сквородин Д.И., Бак П.А., Логачев П.В., Живанков К.И., Батраков А.М., Павленко А.В., Павлюченко В.А., Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю.</i> Исследование динамики сильноточного РЭП, генерируемого в ЛИУ, для применения в качестве драйвера в терагерцовом ЛСЭ.....	96
<i>Осинцева Н.Д., Герасимов В.В., Князев Б.А., Павельев В.С., Комленок М.С., Чопорова Ю.Ю., Яблоков Д.Е.</i> Детектирование бесселевой моды с заданным топологическим зарядом в терагерцовом пучке	97
<i>Вихарев А.А., Опарина Ю.С., Песков Н.Ю., Савилов А.В.</i> Терагерцевый лазер на свободных электронах с электродинамической системой, основанной на возбуждении супермод Талбот-типа	98
<i>Бандуркин И.В., Калынов Ю.К., Ошарин И.В., Савилов А.В., Щегольков Д.Ю.</i> Азимутально-асимметричные резонаторы для терагерцовых гиротронов на высоких циклотронных гармониках	100
<i>Крыгина Д.Д., Опарина Ю.С., Песков Н.Ю., Савилов А.В.</i> Умножение частоты в мощном терагерцовом мазере на свободных электронах.....	101

<i>Кукотенко В.Д., Чопорова Ю.Ю., Жукавин Р.Х., Бушуйкин П.А., Осинцева Н.Д., Ковалевский К.А., Князев Б.А.</i> Терагерцовая система «накачка – зондирование» на Новосибирском ЛСЭ для измерения временной динамики релаксации в германии, допированном мышьяком	102
<i>Самцов Д.А., Аржанников А.В., Синицкий С.Л., Сандалов Е.С., Попов С.С., Калинин П.В., Атлуханов М.Г., Макаров М.А., Куклин К.Н., Ровенских А.Ф.</i> Измерения спектрального состава потока излучения в интервале частот 0,1–0,6 ТГц в различных условиях генерации на установке ГОЛ-ПЭТ.....	103

Приемники микроволнового излучения, спектроскопия и метрология

<i>Худченко А.В., Смирнов А.В., Барышев А.М., Турыгин С.Ю., Голубев Е., Черный Р.А., Андрианов А.С., Андрианов М.Н., Озолин А.А., Костенко В.И., Третьяков И.В., Кошелец В.П., Хеспер Р., Рудницкий А., Лихачев С.Ф.</i> Основные характеристики и требования к приемникам миллиметрового диапазона космического телескопа «Миллиметрон», предназначенных для РСДБ-наблюдений.....	107
<i>Голубятников Г.Ю.</i> Гиротроны как источники интенсивного излучения для задач молекулярной спектроскопии.....	108
<i>Лапинов А.В., Лапинова С.А., Хабарова Т.А., Петров Л.Ю., Ундалова И.С., Чалова А.В., Латин Н.И., Киселев А.К.</i> Исследования астроклимата и концепции развития наземной радиоастрономии в России	109
<i>Кошелец В., Рудаков К., Худченко А., Филиппенко Л., Хеспер Р., Барышев А.</i> Сверхпроводниковые приемники субТГц-диапазона для космической и наземной радиоастрономии: отечественный опыт и технологии	110
<i>Артеменко Ю.В., Бубнов Г.М., Вдовин В.Ф., Данилевский Д.В., Домбек Е.И., Землянуха П.М., Лагервей Г., Леснов И.В., Минеев К.В., Шанин Г.И., Этнаер А.</i> Исследования атмосферного поглощения микроволнового излучения в Узбекистане и новый этап развития проекта «Суффа»	111
<i>Гаврилов М.М., Зорина А.А., Куприянов З.П., Куприянов П.В.</i> Роль и место квадратурной модуляции в технологии активных фазированных антенных решеток	112
<i>Резник А.Н., Востоков Н.В.</i> Микроволновая вольт-импедансная спектроскопия полупроводников с микронным пространственным разрешением	114
<i>Большаков О.С., Бубнов Г.М., Вдовин А.В., Гунбина А.А., Дубрович В.К., Землянуха П.М., Кауц В.Л., Красильников А.М., Леснов И.В., Мансфельд М.А., Минеев К.В., Шарандин Е.А., Вдовин В.Ф.</i> Приемник 3 мм-диапазона длин волн классической структуры для астрономических и атмосферных исследований с малозумящим неохлаждаемым УВЧ	115
<i>Хабарова Т.А., Лапинов А.В., Алексеев Р.А., Шубняков И.С., Голубятников Г.Ю., Торгованов А.И., Авдеев Ю.Ф., Дитятев А.А., Данилов А.С.</i> Лабораторная спектроскопия межзвездных молекул.....	117
<i>Панкратов А.Л., Ревин Л.С., Гордеева А.В., Яблоков А.А., Кузьмин Л.С., Ильичев Е.В.</i> Счетчик одиночных фотонов микроволнового диапазона частот.....	118

<i>Благodatкин А.В., Зброжек В.О., Пиманов Д.А., Матрозова Е.А., Гордеева А.В., Чигинев А.В., Панкратов А.Л., Кузьмин Л.С.</i> Двухчастотные приемные системы с болометрами на холодных электродах для задач радиоастрономии	119
<i>Королёв С.А., Шиков А.П., Горюнов А.В., Шашкин В.И., Паришин В.В., Землянуха П.М., Илларионов И.А.</i> Система радиовидения на основе матричного приёмника прямого преобразования	120
<i>Матвеев А.И.</i> Многозондовые ваттметры оконечного типа с регулируемым коэффициентом отражения входа	122
<i>Гунбина А.А., Серов Е.А., Минеев К.В., Паришин В.В., Вдовин В.Ф., Чекушкин А.М., Хан Ф.В., Кошелев В.П.</i> Экспериментальное исследование отражательной способности сверхпроводящих плёнок на основе ниобия в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн	123
<i>Аржанников А.В., Кузнецов С.А., Швец В.А., Федоринин В.Н., Гельфанд А.В.</i> Эллипсометрия миллиметрового диапазона для регистрации структуры и свойств композиционных материалов	124
<i>Сорокин Д.А., Землянуха П.М., Домбек Е.М.</i> Селективное осаждение меди с помощью лазера	125
<i>Молчанов С.Ю., Бахтеев И.Ш., Муравьев В.М., Гусихин П.А., Ушаков Н.М., Стародубов А.В.</i> Разработка анизотропной поверхности для преобразования линейной поляризации в круговую в диапазоне КВЧ	127
<i>Домбек Е.М., Землянуха П.М., Паришин В.В., Алексеев Р.А.</i> Разработка поглотителей и черных тел на основе аддитивных технологий с использованием полимерных материалов	127
<i>Бондаренко А.С., Боровков А.С., Семёнов В.А., Губа В.Г.</i> Методика определения погрешности измерений комплексных коэффициентов отражения и передачи с использованием векторных анализаторов цепей в волноводных трактах	128
<i>Чирков И.П., Малай И.М.</i> Широкополосный микрокалориметр в частотном диапазоне от 75 до 118 ГГц	129
<i>Алексеев Р.А., Лапкин И.В., Хабарова Т.А., Лапинов А.В.</i> Квазиоптическая система субдольперовского спектрометра миллиметрового и субмиллиметрового диапазона	130

Миллиметровое и субмиллиметровое излучение в прикладных исследованиях

<i>Горбачев А.М.</i> Выращивание легированного CVD-алмаза в плазме СВЧ-разряда и его применения	133
<i>Заклецкий З.А., Ахмадуллина Н.С., Борзосеков В.Д., Воронова Е.В., Гусейн-заде Н.Г., Качмар В.В., Князев А.В., Козак А.К., Колик Л.В., Кончиков Е.М., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Малахов Д.В., Образцова Е.А., Петров А.Е., Скворцова Н.Н., Соколов А.С., Степахин В.Д., Харчев Н.К., Шишилов О.Н.</i> Синтез платиновых катализаторов в плазмохимических процессах, инициируемых СВЧ-импульсами мощного гиротрона	134

<i>Соколов А.С., Ахмадуллина Н.С., Борзосеков В.Д., Воронова Е.В., Гусейн-заде Н.Г., Заклецкий З.А., Козак А.К., Малахов Д.В., Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., Шишилов О.Н.</i> Лабораторный комплекс синтеза материалов микро- и наноразмеров на основе смесей порошков в разрядах, инициируемых СВЧ-импульсами мощного гиротрона	135
<i>Можаровский А.В., Масленников Р.О.</i> Перспективы развития коммерческих систем связи миллиметрового диапазона длин волн	136
<i>Бирюков В.В., Вакс В.Л., Малахов В.А., Панин А.Н., Приползин С.И., Раевская Ю.В., Раевский А.С., Чиликов А.А., Щербаков В.В., Щитов А.М., Андреев М.В., Лискович А.П.</i> Варианты построения беспроводной линии связи субтерагерцового диапазона	137
<i>Бубукин И.Т., Ракуть И.В., Агафонов М.И., Яблоков А.А., Панкратов А.Л., Горбунова Т.Ю., Горбунов Р.В.</i> Годовой цикл измерения влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков в юго-восточном Крыму комбинированным одноволновым радиометрическим методом в миллиметровом диапазоне	139
<i>Балега Ю.Ю., Батаев Д.К.-С., Бубнов Г.М., Вдовин В.Ф., Домбек Е.И., Землянуха П.М., Лолаев А.Б., Леснов И.В., Марухно А.С., Марухно Н.А., Муртазаев А.К., Хайкин В.С., Худченко А.В.</i> Экспедиционные исследования микроволнового астроклимата на Северном Кавказе 2021 года и результаты обработки полученных данных	140
<i>Егоров С.В., Еремеев А.Г., Холопцев В.В., Плотников И.В., Рыбаков К.И., Сорокин А.А., Быков Ю.В.</i> Высокоскоростное микроволновое спекание электрокерамических материалов на основе титанатов бария и стронция	142
<i>Буланова С.А., Вихарев А.А., Зеленцов С.В., Крапивницкая Т.О., Песков Н.Ю., Глявин М.Ю., Денисенко А.Н.</i> Синтез торфоминерального сорбента методом микроволнового пиролиза	143
<i>Кузнецов С.А., Гельфанд А.В., Федоринин В.Н., Аржанников А.В., Лазорский П.А., Николаев Н.А., Мамрашев А.А., Генцелев А.Н., Бессмельцев В.П.</i> Функциональные оптические элементы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на основе метаструктур	144
Авторский указатель	146

**ИСТОЧНИКИ
МОЩНОГО МИКРОВОЛНОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СВЕРХМОЩНЫХ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ КОМПЛЕКСОВ *

Г.Г. Денисов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Существует ряд актуальных масштабных научных задач, в которых подразумевается использование комплексов, состоящих из большого числа (от десятков до тысяч) синхронизированных высокочастотных (0,1–1 ТГц) мощных источников электромагнитного излучения. Среди таких задач можно отметить разработку комплексов гиротронов для будущих установок УТС, создание систем высокоградиентного ускорения электронов терагерцевыми волнами, передачу энергии с помощью узконаправленных потоков микроволнового излучения. Создание сверхмощных гиротронных комплексов является целью проекта РНФ, выполняемого ИПФ РАН в рамках программы «Проведение исследований научными лабораториями мирового уровня в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации».

В 2021 году исполнителями проекта получен ряд важных результатов, среди которых особо можно выделить следующие:

1. *Разработка гиротрона с частотой 230 ГГц.* Проведены успешные испытания магнита с интенсивностью магнитного поля до 10 Тл при диаметре проходного отверстия 150 мм. Магнитная система была совместно рассчитана ИПФ РАН и японской фирмой JASTEC, Inc., которая в 2021 году успешно изготовила магнит. Данный магнит уникален для России и позволяет реализовать гиротроны мегаваттного уровня с рабочими частотами 230–250 ГГц. Подготовлена конструкторская документация гиротрона с рабочей частотой 230 ГГц и мощностью до 1 МВт и изготовлены его ключевые узлы.

2. *Эксперименты по захвату частоты мегаваттного 170 ГГц гиротрона.* Для эксперимента по захвату частоты изготовлены все необходимые компоненты, включая элементы линии передачи излучения от гиротрона-драйвера к мегаваттному гиротрону, квазиоптические устройства ввода и вывода излучения для линии передачи, подготовлена аппаратура для измерения частоты и мощности излучения драйвера и мегаваттного гиротрона. Частоты гиротрона-драйвера и мегаваттного гиротрона совмещены с относительной точностью $3 \cdot 10^{-5}$. Частота гиротрона драйвера может перестраиваться в относительном диапазоне 10^{-4} и стабилизироваться с точностью до 2 Гц.

* Здесь и далее знаком * отмечены доклады, входящие в программу IV школы для молодых ученых «Актуальные проблемы мощной вакуумной электроники СВЧ: источники и приложения».

3. *Схема деления сигнала с мощностью 100 кВт на несколько каналов.* Рассмотрены способы деления мощности волновых пучков с целью получения от мастер-генератора (гиротрона-драйвера), работающего на частоте 170 ГГц, необходимого числа синфазных сигналов: использование дифракционной решетки, поляризационной решетки с помощью синтезированных зеркал и в результате многомодовой интерференции в прямоугольном волноводе (эффект Тальбота).

4. *Расчеты атмосферного поглощения на избранных площадках в РФ.*

5. *Разработка компрессора импульсов мощного гиротрона.* Предложена концепция и разработан активный квазиоптический компрессор с активным ключом на основе арсенида галлия, отражающая способность которого иницируется пикосекундными импульсами оптического излучения. Пластина из арсенида галлия диаметром 150 мм установлена под углом Брюстера. Расчетный коэффициент усиления компрессора составляет примерно 60. Нагруженная добротность разработанного резонатора при полной его длине 700 мм (сумма длин трех плеч резонатора) составляет около 63 000, что соответствует точности настройки длины резонатора (положению зеркал) не хуже 0,01 мм. Для компрессора выбран и испытан пикосекундный лазер с длиной волны излучения 532 нм, энергией в импульсе до 50 мДж и длительностью импульса около 100 пс. На малом уровне мощности показано, что при облучении лазером полупроводниковой пластины формируется отраженный ($R = 0,7 \dots 0,8$) микроволновый импульс с длительностью 0,5–1,5 нс в зависимости от плотности мощности оптического излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-30071).

УЛЬТРАКОРОТКИЕ ЗАМАГНИЧЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ, ФОРМИРУЕМЫЕ В ПОГРАНИЧНОМ ДИАПАЗОНЕ ВАКУУМ – ГАЗ*

М.И. Яландин¹, Н.С. Гинзбург², И.В. Зотова², Н.М. Зубарев¹, В.В. Ростов³, К.А. Шарыпов¹, В.Г. Шнак¹, С.А. Шунайлов¹

¹ Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

³ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

Рассматриваются особенности эмиссии холодных катодов и формирование ультракоротких сильноточных электронных пучков в коаксиальных диодах с магнитной изоляцией (КДМИ). В пределе длительностей в единицы – доли наносекунды эти пучки нужны для генерации импульсов микроволнового сверхизлучения (СИ) с пиковой мощностью 10^8 – 10^9 Вт и более.

Перспектива перехода источников СИ в коротковолновую часть миллиметрового диапазона и к субтерагерцам с сохранением высоких мощностей требует однородности пучка (обычно трубчатого) при увеличении диаметра и росте тока. Также для генерации затравочного электромагнитного сигнала с воспроизводимым спектром и достаточной мощностью фронт пучка должен быть стабильным и коротким.

Одной из задач стало изучение однородности первоисточника взрывной электронной эмиссии катода (ВЭЭ) – автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) при однократном «срабатывании» АЭЭ-центров. Мы использовали тот факт, что АЭЭ предшествует не только стадии ВЭЭ в вакууме, но и появлению убегающих электронов (УЭ) в газе, в том числе атмосферного давления. В сильном надкритическом электрическом поле у кромки катода первичные автоэмиссионные электроны и вторичные из плазменных микро-образований, примыкающих к АЭЭ-центрам, набирают энергию быстрее, чем теряют при ударной ионизации молекул. Расширение области ионизации за единицы пикосекунд снижает искажение поля, поток УЭ прекращается, а экранировка эмиттеров пространственным зарядом препятствует его повторному появлению, т. е. сгустки УЭ, ускоряемые в магнитном поле до анода, несут информацию о структуре одиножды активированных АЭЭ-центров. Их азимутальная дискретность, определяемая экранировкой эмиссионной кромки в магнитном поле, наблюдалась на люминесцентном экране.

Стабильность активации АЭЭ-центров от импульса к импульсу изучалась с помощью коллекторного датчика с переходной характеристикой не хуже 15 пс, регистрировавшего сегментную фракцию трубчатого потока УЭ. Девиация фронта тока таких сгустков имела стандартное отклонение не меньше 3 пс. Очевидно, что переход к эмиссии пучка в вакуумном режиме ВЭЭ будет иметь аналогичный разброс. Датчик с коллектором большим, чем диаметр катода, позволял измерять полный ток вакуумного электронного пучка, который больше чем в 100 раз превышал ток УЭ в атмосфере. Выяснено, что ток УЭ возникает в момент, когда переход к ВЭЭ в вакууме только начинается. При повышении давления остаточного газа в КДМИ от технического вакуума был определен диапазон (доли торр), где ионизация молекул взрывоэмиссионными электронами приводит к «газовому» усилению тока пучка. Затем, при давлении около 5 Торр, токовый импульс сокращается до $\sim 10^{-10}$ с, оставаясь, между тем, килоамперным. На этом интервале пробой в КДМИ с радиальным и осевым зазорами ~ 1 см еще не развит, коллапса напряжения на катоде нет, и поэтому такой пучок, состоящий практически полностью из убегающих электронов, в принципе годится для генерации СВЧ. В докладе будут приведены предварительные данные о работе 8 мм генератора СИ с миниатюрным КДМИ при вариации давления остаточного газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 21-19-00260).

УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ: ЧТО, ГДЕ, КОГДА, КАК И КТО*

М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов

Институт прикладной физики, Нижний Новгород

В 2021 году опубликован первый обзор работ компаний, работающих в области управляемого термоядерного синтеза (УТС), выполненный Ассоциацией термоядерной промышленности и Управлением по атомной энергии Великобритании. Ключевым моментом этого обзора является констатация взрывного роста числа коммерческих компаний, ориентированных на получение термоядерной энергии к 2025–2030 году. Одновременно с этим 2021 год ознаменовался и увеличением числа запросов на мощные (МВт) гиротроны как со стороны представителей хорошо известных гиротронному сообществу крупных термоядерных установок (ITER, KSTAR, EAST...), так и от целого ряда новых проектов (F4E, T15-МД, ТРТ, MAST-U...).

Целью настоящего обзора является представление наиболее ярких результатов международного сообщества, которые могут оказать влияние на решение проблемы УТС, демонстрация наиболее ярких достижений ИПФ РАН – ЗАО НПП ГИКОМ, представление части проблем, решение которых требуется в ближайшее время.

Среди упомянутых проблем особо следует отметить следующие:

- создание прототипа гиротрона мегаваттного уровня мощности для токамаков DEMO и ТРТ, имеющего рабочую частоту 230–250 ГГц при длительности импульса порядка 100 мкс;
- разработка гиротронов диапазона 25–40 ГГц для сферических токамаков, способных генерировать мегаваттные мощности на значительно разнесенных частотах;
- разработка схем широкополосного вывода СВЧ-излучения;
- повышение КПД гиротронов за счет перехода к многоступенчатым схемам рекуперации остаточной энергии электронного пучка;
- разработка гиротронных комплексов для новых приложений – бурение скважин для добычи геотермальной энергии, беспроводной передачи энергии и др.

С 2021 года разработка российских гиротронов для установок УТС поддерживается комплексной программой «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в РФ на период до 2024 года» в рамках проекта «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР-диапазона» [1].

1. Научно-технический отчет «Создание мощных источников электромагнитного излучения» / ИПФ РАН. Н. Новгород, 2021. Пер. № 121042100116-7.

ПОВЫШЕНИЕ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ГИРОТРОНОВ*

В.Е. Запелалов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Во второй половине прошлого века был разработан целый ряд гирорезонансных приборов, принцип действия которых основан на синхронном взаимодействии криволинейного электронного пучка и электромагнитной волны [1–7]. Для эффективного взаимодействия должно удовлетворяться условие синхронизма электронных осцилляторов с электромагнитной волной на гирочастоте или ее гармониках.

$$\omega \approx n\omega_h + hv_{//}, \quad (1)$$

где ω_h и $v_{//}$ – циклотронная частота и дрейфовая скорость электронов, n – номер циклотронной гармоники. Поскольку взаимодействие электронного пучка происходит с быстрой волной, распространяющейся практически поперек поступательного движения электронов ($h \approx 0$), отсутствует необходимость в мелкомасштабных элементах замедляющих систем, необходимых для классических приборов вакуумной электроники, обеспечивается слабая чувствительность к скоростному разбросу электронов. Для реализации условия (1) в ТГц-диапазоне частот гиротроны должны работать либо в очень сильных магнитных полях, либо на гармониках циклотронной частоты электронов.

За минувшие годы созданы мощные высокоэффективные гиротроны от см- до субмм-диапазонов [2–8] и сформировался ряд фундаментальных научных направлений, успешное развитие которых обусловлено наличием этих источников. Для некоторых приложений нужны повышение частоты и мощности гиротронов, но сложность задачи обостряется техническими возможностями современных магнитных систем [8], проблемой конкуренции мод и высоким уровнем омических потерь, особенно в гиротронах, работающих на гармониках циклотронной частоты в субмм-диапазоне [3–7]. Рассмотрены варианты магнитных систем для дальнейшего повышения поля и связанные с этим возможности повышения частоты гиротронов. Обсуждаются проблемы, возникающие при повышении частоты гиротронов со стационарным и импульсным магнитным полем. Проведен обзор физических факторов и особенностей основных подсистем, ограничивающих мощность и эффективность гиротронов с ростом частоты. Рассмотрены перспективы гиротронов с точки зрения дальнейшего повышения их частоты и мощности для разных приложений.

Работа выполнена при поддержке госзадания № 0030-2021-0001.

1. Прибор для генерации электромагнитных колебаний в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн: А.С. 223931 (СССР) / Гапонов А.В., Гольденберг А.Л., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Заявл. 24.03.67, опубл. 25.03.76.

2. *Nusinovich G.S., Thumm M., Petelin M.I.* The Gyrotron at 50: Historical Overview // *J. Infrared Mm THz Waves*. 2014. V. 35. P. 325–381.

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

4. *Nusinovich G.S.* Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore : The Johns Hopkins University Press, 2004.

5. *Tsimring Sh.E.* Electron beams and microwave vacuum electronics. Hoboken : John Wiley and Sons, Inc., 2007.

6. *Kartikyan M.V., Borie E., Thumm M.K.A.* Gyrotrons—high power microwave and millimeter wave technology. Berlin : Springer, 2004.

7. *Thumm M.* State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. KIT Scientific Publishing, 2018.

8. *Montgomery D.B.* Solenoid magnet design: the magnetic and mechanical aspects of resistive and superconducting systems. New York : Wiley : Interscience, 1969.

СУБГИГАВАТТНЫЕ ЧЕРЕНКОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ Ka- И W-ДИАПАЗОНА С ДВУМЕРНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ЗАМЕДЛЯЮЩИМИ СТРУКТУРАМИ*

*Н.Ю. Песков, Э.Б. Абубакиров, А.А. Вихарев, Н.С. Гинзбург,
А.Н. Денисенко, В.Ю. Заславский, А.М. Малкин, М.Д. Проявин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Оригинальная концепция мощных импульсных пространственно-развитых черенковских генераторов развивается в ИПФ РАН (Н.Новгород). Отличительной чертой проводимых исследований является использование высокоэнергетических релятивистских электронных пучков (РЭП) трубчатой геометрии, которая позволяет наращивать полную мощность генератора путем увеличения одного из его поперечных размеров при сохранении умеренных плотностей тока и напряженностей электромагнитных полей. В условиях существенной сверхразмерности пространственная когерентность излучения достигается путем использования двумерной распределенной обратной связи (РОС). Для реализации последней используются двумерные (двумерно-периодические) брэгговские структуры, в которых возникают поперечные волновые потоки, синхронизирующие излучение трубчатых РЭП.

Пространственно-развитый генератор поверхностной волны черенковского типа, работающий в Ka-диапазоне, разрабатывается на основе высокоэнергетического взрывоэмиссионного ускорителя «Синус-6» 0,5 МэВ / 5 кА / 25 нс

(ИПФ РАН), формирующего широкий трубчатый электронный пучок диаметром около 40 мм. Генераторы данного типа характеризуются замедлением основной волны и обеспечивают высокий импеданс электронно-волновой связи. Для работы в указанном диапазоне спроектирована двумерная замедляющая структура цилиндрической геометрии со средним диаметром $\varnothing = 44,3$ мм (периметр около 16 длин волн) и длиной около 16 см, имеющая двумерную синусоидальную гофрировку с периодом 7,75 мм, глубиной 3,5 мм и 16 азимутальными вариациями (заходами гофрировки). Моделирование генератора проводилось с использованием трехмерного PIC-кода CST Studio Suite при параметрах, близких к условиям экспериментов. Результаты моделирования демонстрируют установление режима узкополосных колебаний с выходной мощностью 0,4–0,5 ГВт и электронным КПД $\sim 25\%$ при оптимальных параметрах. Структура поля рабочей замедленной волны имеет азимутально-симметричное распределение и представляет собой набор мод $TM_{0,n}$ -типа круглого волновода. В начальных экспериментах в расчетной области параметров зарегистрировано узкополосное излучение на рабочей частоте около 32 ГГц с выходной мощностью на уровне $\sim 0,2\text{--}0,3$ ГВт. Диаграмма направленности выходного излучения, которая анализировалась с помощью панели неоновых ламп, устанавливаемой на разных расстояниях от генератора, характеризовалась ярко выраженным минимумом на оси, что соответствовало возбуждению расчетного набора мод $TM_{0,n}$ -типа. В настоящее время проводятся эксперименты по оптимизации геометрии пространства взаимодействия для достижения расчетной мощности.

Для работы в W-диапазоне (рабочая частота ~ 75 ГГц) генератор поверхностной волны был разработан на основе того же электронного пучка, формируемого ускорителем «Синус-6». Для данного генератора двумерная замедляющая структура цилиндрической геометрии была сконструирована с параметром сверхразмерности $\varnothing/\lambda \sim 10$ (периметр системы ~ 30 длин волн), периодом гофрировки 3,59 мм, азимутальным числом вариаций 32, глубиной гофрировки ~ 1 мм и общей длиной около 10 см. Моделирование продемонстрировало установление стабильного узкополосного режима генерации с селективным возбуждением рабочей азимутально-симметричной волны при расчетных параметрах. Согласно моделированию электронный КПД генератора составляет $\sim 15\text{--}20\%$, а ожидаемый уровень выходной мощности достигает $\sim 0,3\text{--}0,35$ МВт. В настоящее время изготовлена двумерно-периодическая замедляющая структура W-диапазона с описанной геометрией и завершена сборка генератора. В начальных экспериментах в расчетной области параметров зарегистрировано узкополосное излучение с уровнем мощности $\sim 0,2$ ГВт. Экспериментальные исследования данного генератора продолжаются.

Работа частично поддержана государственным заданием ИПФ РАН № 0030-2021-0027.

ПРОЕКТ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ГИРОЛОВ НА ОСНОВЕ КВАЗИОПТИЧЕСКОЙ ЗИГЗАГООБРАЗНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ ЛИНИИ*

*С.В. Самсонов, Г.Г. Денисов, А.А. Богдашов, И.Г. Гачев,
М.В. Каменский, К.А. Лещева, Е.М. Новак, А.В. Савилов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Гиротронная лампа обратной волны (гироЛОВ) является разновидностью мазера на циклотронном резонансе (МЦР), отличающейся от гиротрона (наиболее развитого варианта МЦР) потенциальной возможностью существенно более широкополосной плавной перестройки частоты генерации. В обычных гиरोЛОВ на основе отрезка гладкого волновода перестройка частоты, как правило, является кусочно-непрерывной с сильными вариациями мощности и пространственной структуры выходного излучения.

Сравнительно недавно в ИПФ РАН предложена концепция этого прибора, основанная на использовании в качестве электродинамической системы отрезка открытой квазиоптической зеркальной линии передачи, в которой гауссов волновой пучок направляется зеркалами по зигзагообразной траектории, так что его периодические пересечения с электронным потоком происходят под прямым углом [1]. Как показывают расчеты, такая конфигурация позволяет в значительной степени преодолеть недостатки обычных гиरोЛОВ и реализовать генератор с плавной перестройкой частоты магнитным полем в диапазоне более одной октавы и выходом в виде гауссова волнового пучка.

В докладе будут представлены 3-мерные и упрощенные компьютерные модели таких гиरोЛОВ, а также результаты расчета некоторых вариантов, перспективных для приложений. Будет представлен также проект прибора, разрабатываемого для экспериментальной проверки основных теоретических выводов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-19-00443 (<https://rscf.ru/project/21-19-00443/>).

1. *Samsonov S.V.* Cyclotron resonance maser with zigzag quasi-optical transmission line: concept and modeling / *S.V. Samsonov, G.G. Denisov, A.A. Bogdashov, I.G. Gachev* // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2021. V. 68, № 11. P. 5846–5850 ; doi: 10.1109/ted.2021.3114141.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 2,5-МЕРНОГО PIC-КОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИРОТРОНОВ С НЕСИММЕТРИЧНЫМИ РАБОЧИМИ МОДАМИ*

*Н.С. Гинзбург¹, И.В. Зотова¹, Р.М. Розенталь¹, А.С. Сергеев¹,
Е.М. Тай², А.П. Фокин¹*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² ЗАО НПП «Гиком», Нижний Новгород

В настоящее время гиротроны, как наиболее мощные источники излучения в миллиметровом и субмиллиметровых диапазонах, имеют множество областей применения [1]. В этой связи возникает задача их адекватного моделирования. Наиболее полное представление о физических процессах может быть получено с использованием трехмерного моделирования методом *particle-in-cells* (PIC). Стремительное увеличение вычислительной мощности современных компьютеров делает этот метод все более и более доступным, позволяя, к примеру, осуществлять разработку гиротронов в частотном диапазоне более 1 ТГц [2]. Однако подобные расчеты требуют ощутимых временных затрат. Например, в работе [3] при моделировании гиротрона диапазона 110 ГГц на моде TE_{22,6} требовалось 48 часов для расчета одной реализации длительностью 100 нс и компьютерная система с 256 ядрами. При этом существует категория задач, которые требуют расчетов на гораздо больших временах, но при этом не требуют анализа многомодового взаимодействия. Например, захват внешним сигналом, стабилизация частоты за счет отражений от нагрузки, синхронизация связанных гиротронов.

В настоящей работе показано, что при определенных допущениях задача трехмерного PIC-моделирования гиротрона с рабочей модой несимметричного типа может быть сведена к 2,5-мерной, что позволяет значительно увеличить скорость расчетов. В качестве примера рассмотрен гиротрон диапазона 170 ГГц с рабочей модой TE_{28,12}, для которого исследовано влияние внешнего сигнала на спектр излучения при наличии случайных флуктуаций начальной энергии электронов.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0030-2021-0027 (программа «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года»).

1. *Sabchevski S.* Novel and emerging applications of the gyrotrons worldwide: current status and prospects / S. Sabchevski, M. Glyavin, S. Mitsudo, Y. Tatematsu, T. Idehara // *J. IR MM THz waves.* 2021. V. 42, № 7. P. 715–721 ; doi: 10.1007/s10762-021-00804-8.

2. *I. Bandurkin et al.* Development of third-harmonic 1.2-THz gyrotron with intentionally increased velocity spread of electrons // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 2020. V. 67, № 10. P. 4432–4436 ; doi: 10.1109/TED.2020.3012524.

3. Lin M., Smithe D.N. Study on beam wave interaction and mode competition in a fusion gyrotron using 3-D EM PIC simulation // 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2019. P. 1–2 ; doi: 10.1109/IVEC.2019.8745190.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИНИАТЮРНЫХ ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С МНОГОЛУЧЕВЫМИ ЛЕНТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ*

*Н.М. Рыскин, А.Г. Рожнев, А.В. Стародубов, Р.А. Торгашов,
И.А. Навроцкий*

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Одной из ключевых задач современной вакуумной электроники является разработка миниатюрных электровакуумных приборов короткой части миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцевого) диапазона. Они представляют большой интерес для применения в современных системах высокоскоростной беспроводной передачи данных, в радиолокационных системах, в спектроскопии и т.д. В частности, большое внимание уделяется лампам бегущей волны (ЛБВ), которые могут обеспечить как высокую мощность в непрерывном режиме, так и широкую полосу усиливаемых частот. Основной проблемой, как известно, является уменьшение поперечных размеров устройств и, соответственно, электронных пучков (ЭП) с ростом рабочих частот. Для обеспечения приемлемого уровня выходной мощности привлекательны приборы с пространственно-развитыми или сверхразмерными замедляющими системами (ЗС), где используются ЭП с большим поперечным сечением, например ленточные или многолучевые [1–4].

В докладе изложены результаты исследований двух вариантов миниатюрных ЛБВ с многолучевыми ленточными электронными пучками. Первая из них представляет собой объемную меандровую линию с несколькими каналами для электронных пучков, помещенную в прямоугольный волновод [5]. По бокам данная структура поддерживается диэлектрическими опорами. Была разработана ЗС V-диапазона (50–70 ГГц) для ЛБВ с каналами для четырех ленточных электронных пучков. Представлена конструкция трёхсекционной ЛБВ, в которой коэффициент усиления превышает 25 дБ, а мощность насыщения около 400 Вт. Также рассматривается ЛБВ диапазона 0,2 ТГц с трёхлучевым ленточным ЭП, взаимодействующим с высшей поперечной модой ЗС в виде сдвоенной гребенки [6]. В такой конструкции мощность насыщения составляет около 200 Вт.

Обсуждаются технологии изготовления ЗС, представлены результаты измерений их электродинамических характеристик. Также предложена конструкция электронно-оптической системы с высокой компрессией (16 единиц по площади) многолучевого ленточного ЭП, описана технология изготовления электронной пушки и результаты измерений вольт-амперных характеристик.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 17-12-01160.

1. *Shin Y.-M.* // Phys. Plasmas. 2012. V. 19, № 6. Art. 063115.
2. *Ruan C. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. V. 43, № 7. P. 2132.
3. *Shu G., Liu G., Qian Z., He W.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2021. V. 68, № 6. P. 3021.
4. *Lu Z. et al.* // IEEE Electron Device Lett. 2020. V. 41, № 2. P. 284.
5. *Torgashov G.V. et al.* // IEEE Electron Device Lett. 2019. V. 40, № 12. P. 1980.
6. *Плоских А.Э., Рыскин Н.М.* // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, № 2. С. 113.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПОТОКИ, ФОРМИРУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ С ПОЛЕВЫМ ЭМИТТЕРОМ*

Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Е.П. Тарадаев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Традиционно для формирования электронных потоков в СВЧ-приборах субтерагерцового диапазона используют термоэмиссионные катоды. В последнее время делаются попытки создания субтерагерцовых диагностических и спектроскопических гиротронов с холодными полевыми эмиттерами. Такая замена кажется вполне оправданной, поскольку позволяет упростить эксплуатацию и обеспечивает безынерционные запуск, а также включение этих миниатюрных, но высоковольтных приборов. В лаборатории сильноточной и СВЧ электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого разработаны полевые эмиттеры, которые могут быть, как нам кажется, использованы в спектроскопических гиротронах умеренной мощности (10–100 Вт). В данном докладе сообщается о результатах выполненного авторами исследования закономерностей формирования кольцевых в сечении электронных потоков электронно-оптическими системами с многоострийными и многослойными полевыми эмиттерами нового типа. Основное внимание будет уделено описанию токовых характеристик эмиттеров, а также пространственных характеристик потоков и разбросу электронов по скоростям в потоках.

ГЕНЕРАЦИЯ МУЛЬТИМЕГАВАТТНОГО ПОТОКА СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ: СОСТОЯНИЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРОДВИЖЕНИЯ

*А.В. Аржанников^{1,2}, С.Л. Синицкий^{1,2}, С.С. Попов^{1,2}, П.В. Калинин^{1,2},
Д.А. Самцов¹, Е.С. Сандалов^{1,2}, В.Д. Степанов^{1,2}, М.Г. Атлуханов¹,
М.А. Макаров¹, К.Н. Куклин¹, А.Ф. Ровенских¹*

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

² Новосибирский государственный университет

В докладе представлен обзор экспериментальных и теоретических исследований в ИЯФ СО РАН по генерации электромагнитного излучения на частотах электронных колебаний замагниченной плазмы при интенсивном взаимодействии с ней пучка релятивистских электронов с энергией в области 1 МэВ.

Описаны эксперименты по прохождению пучка с плотностью тока 1–2 кА/см² в плазме с плотностью $\sim 10^{14}$ – 10^{15} см⁻³, в процессе которого генерируется излучение со спектром длин волн от 2 до 0,5 мм.

Представлены спектры излучения, выходящего из плазменного столба при различных условиях эксперимента, и функция распределения электронов пучка после его взаимодействия с плазмой. В рамках теоретических моделей дано представление о физических механизмах генерации этого излучения в условиях высокого уровня плазменных колебаний, накачиваемых электронным пучком.

Сообщается о планах дальнейшего развития исследований по обсуждаемой тематике пучково-плазменного взаимодействия.

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда (проект 19-12-00250).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ УЛЬТРАКОРОТКИХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД

*Н.С. Гинзбург, М.Н. Вилков, С.В. Самсонов, Г.Г. Денисов,
И.В. Зотова, А.С. Сергеев, Е.Р. Кочаровская, А.А. Богдашов,
И.Г. Гачев, Р.М. Розенталь*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В физике лазеров получил широкое применение механизм генерации ультракоротких импульсов (УКИ), основанный на эффекте пассивной синхронизации мод [1], который реализуется при установке в резонатор нелинейного элемента, поглощающего излучение малой амплитуды и прозрачного для излучения большой интенсивности. В результате возникает синхронизация мод резонатора, при которой излучение лазера представляет собой периодическую последовательность ультракоротких импульсов, которые можно интерпретировать как диссипативные солитоны [2].

Указанный метод генерации УКИ может быть перенесен в СВЧ-электронику [3–7] и реализован на базе двухсекционной схемы, состоящей из усилителя и насыщающегося поглотителя в цепи обратной связи. Для реализации нелинейного абсорбера было предложено использовать либо эффект компфнеровского подавления, который имеет место при определенных расстройках электронно-волнового синхронизма в различных типах электронных приборов, либо эффект циклотронного поглощения при взаимодействии излучения с первоначально прямолинейным электронным пучком.

На базе проведенных теоретических исследований в ИПФ РАН был реализован УКИ генератор 8 мм диапазона, в котором в качестве усилителя используется винтовая гиролБВ, а в качестве нелинейного элемента – циклотронно-резонансный поглотитель [7]. Экспериментально продемонстрирована генерация периодической последовательности субнаносекундных (0,4 нс) импульсов с пиковой мощностью до 100 кВт и частотой повторения 400 МГц. Показана высокая степень корреляции генерируемой последовательности импульсов.

В перспективе в зависимости от мощности и диапазона микроволновые УКИ могут быть использованы для различных приложений, включая локацию и ЯМР-спектроскопию.

Работа выполнена в рамках госпрограммы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» (проект № 0030-2021-0027).

1. *Крюков П.Г.* // Квантовая электроника. 2001. Т. 31, № 2. С. 95–119.

2. *Розанов Н.Н.* // УФН. 2000. Т. 170, № 4. С. 462–465.

3. Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Вилков М.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, № 17. С. 44–51.
4. Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Абубакиров Э.Б. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 8/9. С. 1–19.
5. Гинзбург Н.С., Кочаровская Е.Р., Вилков М.Н., Сергеев А.С. // ЖЭТФ. 2017. Т. 151, № 1. С. 50–58.
6. Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N. et al. // Phys. Rev. Appl. 2020. V. 13, № 4. Art. 044033.
7. Ginzburg N.S., Samsonov S.V., Denisov G.G. et al. // Phys. Rev. Appl. 2021. V. 16. Art. 054045.

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ СО СЛОЖНОПЕРИОДИЧЕСКИМИ ЗАМЕДЛЯЮЩИМИ СИСТЕМАМИ

*А.М. Малкин, В.Ю. Заславский, А.Э. Федотов, А.С. Сергеев,
Н.С. Гинзбург*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Генераторы и усилители поверхностной волны, основанные на черенковском излучении прямолинейных релятивистских электронных пучков вблизи верхней границы зоны прозрачности периодических замедляющих систем (ЗС), являются перспективными источниками как для генерации импульсного излучения гигаваттного уровня мощности в сантиметровом диапазоне, так и для освоения субмиллиметрового диапазона на мультимегаваттном уровне мощности. Механизмы генерации и усиления излучения в таких источниках могут быть описаны в рамках квазиоптического приближения [1], которое позволяет не только построить адекватную линейную и нелинейную теорию в случае традиционных однопериодических ЗС, но и предложить методы синтеза новых сложнопериодических систем. В качестве подобных систем в докладе анализируются двумерно-периодические ЗС, которые обеспечивают существенное улучшение селективных характеристик генераторов поверхностной волны при большой сверхразмерности [2]. Другим примером является предложение по использованию для связи с внешними электродинамическими трактами дополнительной решетки с периодом вдвое большим, чем период основной ЗС, формирующей поверхностную волну [3]. Подобные сложнопериодические решетки могут быть эффективны как для вывода излучения в поперечном направлении (по нормали к плоскости планарной решетки), так и для ввода излучения и возбуждения поверхностных волн. При разделении областей ввода и вывода излучения

областью дрейфа возможна реализация усилителей поверхностной волны, которые могут классифицироваться как клистроны с распределенным взаимодействием (КРВ) [4]. В таких устройствах в субмм-диапазоне может быть получен коэффициент усиления до 30 дБ при уровне выходной мощности в десятки мегаватт.

В докладе наряду с обзором теоретических работ приводится сопоставление с экспериментальными исследованиями, включающими реализацию генераторов поверхностной волны с двумерно-периодическими ЗС в диапазонах 8 и 4 мм [5], а также генерацию субнаносекундных импульсов сверхизлучения рекордной пиковой мощности 150 МВт в диапазоне 2 мм [6].

1. *Ginzburg N.S., Malkin A.M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99, № 12. Art. 121505.*

2. *Ginzburg N.S., Malkin A.M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100, № 14. Art. 143510.*

3. *Malkin A.M., Fedotov A.E., Zaslavsky V.Yu. et al. // IEEE Electron Device Lett. 2021. V. 42, № 5. P. 751–754.*

4. *Ginzburg N.S., Malkin A.M., Zaslavsky V.Yu. et al. // IEEE Trans on Electron Devices. 2021. V. 68, № 3. P. 1267–1270.*

5. *Ginzburg N.S., Ilyakov E.V., Kulagin I.S. et al. // Phys. Rev. Accelerators and Beams. 2018. V. 21, № 8. Art. 080701.*

6. *Ginzburg N.S., Zaslavsky V.Yu., Malkin A.M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 117, № 18. Art. 183505.*

ТРЕХСТВОЛЬНЫЙ ДВУХПОЛОСНЫЙ МНОГОЛУЧЕВОЙ УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КЛИСТРОН КУ-ДИАПАЗОНА

В.А. Царев, А.П. Онищенко

АО «НПП «Алмаз»

Многолучевые усилительные клистроны (МЛК) являются основой передатчиков современных перспективных бортовых, морских и наземных радиоэлектронных систем Ку-диапазона [1].

МЛК с числом лучей $N = 18-19$ позволяют уменьшить питающие напряжения в 2–3 раза, массу прибора – в 4 раза, и тем самым уменьшить габариты радиопередающих устройств. Для мощных МЛК этот переход к высоким частотам Ку-диапазона может быть осуществлен путем создания многоствольных конструкций клистронов с активными двухззорными резонаторами, работающими одновременно на двух видах колебаний. Причем одна из рабочих частот активного резонатора соответствует синфазному возбуждению двойного зазора резонатора, а другая рабочая частота соответствует противофазному возбуждению.

Эта особенность двухззорных резонаторов позволяет создать мощные МЛК, работающие одновременно на двух частотах в Ку-диапазоне (12–18 ГГц). Такие устройства могут применяться для повышения разрешающей способности радиолокационных систем судового и авиационного базирования, например в двухчастотных радиолокаторах, предназначенных для обнаружения искусственных воздушных объектов, а также в двухчастотных метеорадарах [2]. Для создания в этом диапазоне частот низковольтного МЛК с выходной мощностью не менее 1 кВт в каждой полосе при ускоряющем напряжении, не превышающем 6 кВ, и плотности тока не более 8 А/см² требуется переход к трехствольной конструкции МЛК с плотной упаковкой пролетных каналов в каждом стволе. Основу рассмотренной конструкции клистрона составляет резонаторная система из 6 двухззорных резонаторов. Они построены на основе 6-гранного ребристого коаксиального волновода, между ребрами которого введены 3 полуволновых резонансных элемента с пролетными трубами длиной 1,76 мм, содержащими 19 пролетных каналов с диаметром 0,6 мм. Резонаторы имеют симметричные ВЧ-зазоры длиной 0,58 мм.

Показано, что в такой конструкции резонансной системы можно независимо от частоты противофазного вида перестраивать в широком диапазоне частоту синфазного вида колебаний за счет изменения длины поперечных ребер. При оптимальной длине ребер и величине ускоряющего напряжения 5,4 кВ резонаторы возбуждаются одновременно на двух частотах: 12,5 ГГц и 18 ГГц, соответствующих противофазному (π) и синфазному (2π) видам. Приведены зависимости электронных и электродинамических параметров от относительной длины ребер, подтверждающие отсутствие самовозбуждения

МЛК при работе на этих частотах. Найдены оптимальные размеры коаксиального вывода энергии и отверстий связи активного резонатора, при которых КСВН полученного выходного резонатора на 2 рабочих частотах не превышает 1,2.

1. Борисов Л.М. Мощные многолучевые электровакуумные усилители СВЧ / Л.М. Борисов, Э.А. Гельвич, Е.В. Жарый, А.Д. Закурдаев, Ю.А. Ковалев, Е.А. Котюргин, Г.В. Курилов, М.И. Лопин, А.С. Победоносцев, В.И. Пугнин, Б.В. Сазонов // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. 1993. Вып. 1(455).

2. Sangster A.J., Grant J. Dual-mode quadruple ridge waveguide feed for broadband satellite communications // International Journal of Electronics. 2013. V. 100, № 6. P. 793–802 ; doi: 10.1080/00207217.2012.720954.

ВОЛНОВОДНАЯ ЗАМЕДЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МНОГОЛУЧЕВОЙ ЛЬВ

П.Д. Шалаев

АО «НПП «Алмаз»

Представлена замедляющая система (ЗС) на прямоугольном изогнутом (петляющем) волноводе, развитом в поперечном направлении относительно продольной оси ЗС [1]. От известных аналогов ЗС отличается тем, что длина каждого прямолинейного участка волновода между его изгибами больше длины этих участков в известных аналогах (больше четверти длины рабочей электромагнитной волны в волноводе) и равна одному и тому же целому числу n длин волн электромагнитной волны в волноводе на средней частоте рабочего диапазона частот (f_{cp}) при $(w/\lambda_w) \geq n \geq 2$, где n – целое число, количество длин волн электромагнитной волны в волноводе на f_{cp} ; λ_w – длина электромагнитной волны на f_{cp} в волноводе, м; w – длина каждого плоского участка широкой стороны волновода, м. Имеющиеся в плоских участках широких сторон волновода отверстия образуют для прохождения электронных потоков $k = n \cdot m$ пролётных каналов, где m – целое число, количество пролётных каналов на длине волновода, равной одной длине электромагнитной волны на f_{cp} в волноводе.

Для обеспечения синхронизма движения в ЗС электромагнитной волны на f_{cp} и электронных потоков изгибы волновода, принадлежащие каждому периоду ЗС, имеют длину между центрами ближайших к ним отверстий для пролётных каналов $S_{изг}$, равную $n_{и} \cdot \lambda_w$, где $n_{и}$ – целое число, $n_{и} \geq 1$. При этом период ЗС должен удовлетворять условию на f_{cp} : $P_{ЗС} = 2qT_p \cdot 5,932 \times 10^5 \cdot (U_{ЗС})^{0,5}$, где $P_{ЗС}$ – период ЗС, м; T_p – период колебаний электромагнитной волны в волноводе на f_{cp} , с; $U_{ЗС}$ – напряжение ЗС относительно катода

ЛБВ О-типа, V ; q – параметр, определяющий длину участков модуляции электронных потоков по плотности, выбираемый в интервале значений $0,5 \leq q \leq 3$, причём для ЗС с постоянным периодом q имеет постоянное значение на всей длине ЗС, а для ЗС с переменным периодом q имеет переменное значение на всей длине ЗС или на любой её части.

Применение ЗС на прямоугольном изогнутом (петляющем) волноводе, развитом в поперечном направлении относительно продольной оси, возможно в сантиметровом и в миллиметровом диапазонах длин волн.

Дано описание принципа работы ЛБВ с такой ЗС и её преимуществ перед известными аналогами. Проанализированы особенности её проектирования, конструирования и разработки технологии производства.

1. Пат. 2726906 Российская Федерация, МПК H01J 23/24 : Волноводная замедляющая система ЛБВ О-типа / П.Д. Шалаев ; заявитель и патентообладатель АО «НПП «Алмаз». № 2019131788; заявл. 08.10.2019; опубл. 16.07.2020. Бюл. № 20. С. 1–13.

СИСТЕМА ВВОДА-ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЕСЯТИСТВОЛЬНОЙ ГИРОЛБВ W-ДИАПАЗОНА НА ВИНТОВЫХ ВОЛНОВОДАХ

А.А. Богдашов, С.В. Самсонов, И.Г. Гачев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Гиротронная лампа бегущей волны (гироЛБВ) является широкополосным усилителем, наиболее перспективным для освоения миллиметрового диапазона длин волн на высоком уровне средней или непрерывной мощности. Вслед за многочисленными вариантами многолучевых и многоствольных клистронов на прямолинейных пучках в работе [1] была исследована возможность реализации аналогичного подхода к гиросЛБВ на основе волновода с винтовой гофрировкой поверхности. В частности, был достаточно подробно проанализирован вариант 10-ствольной системы, в которой 10 параллельных «стандартных» винтовых структур пронизываются десятью электронными пучками, формируемыми пушкой с одним катодом, на котором 10 эмиссионных «пятен» соответствующей конфигурации пространственно разнесены друг от друга. Такая многоствольная гиросЛБВ по меньшей мере позволяет эффективнее использовать объем, занимаемый статическим магнитным полем, а при той же суммарной выходной мощности позволяет существенно снизить пробойные и тепловые нагрузки на элементы микроволновой системы. Однако при этом заметно осложняется пробле-

ма ввода и вывода излучения, один из вариантов решения которой рассматривается в данной работе.

Для гироЛБВ W-диапазона с импульсной мощностью 300–400 кВт разработан вариант системы ввода-вывода излучения с поляризационным разделением сигналов через единственное сверхразмерное окно. Ключевым элементом данной системы является волноводный преобразователь, трансформирующий $TE_{1,1}$ моды, выходящие из каждого ствола, в единый линейно-поляризованный квазиоптический волновой пучок, представляющий собой смесь $LP_{5,n}$ мод гофрированного волновода. Пространственное разделение электронного пучка и СВЧ-излучения происходит на волноводном разрыве депресс-коллектора. Излучение вводится (выводится) через сверхразмерное широкополосное окно гироЛБВ. Пространственное разделение входного и выходного сигналов по поляризации осуществляется на решетке из линейных проводников. С помощью системы внешних квазиоптических зеркал можно обеспечить преобразование излучения в виде моды $LP_{5,1}$ в моду внешней линии передачи (моду $HE_{1,1}$ гофрированного волновода или моду TEM_{00} зеркальной линии) с минимальным уровнем дифракционных потерь и кросс-поляризационной компоненты поля.

Работа выполнена в рамках проекта ИПФ РАН № 0030-2021-0027 «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР-диапазона» комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» (КП РГТН).

1. Samsonov S.V., Leshcheva K.A., Manuilov V.N. Multitube helical-waveguide gyrotron traveling-wave amplifier: device concept and electron-optical system modeling // IEEE Transactions on Electron Devices. 2020. V. 67, № 8. P. 3385–3390; doi: 10.1109/TED.2020.3001491.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГСТВОЛЬНОГО ГИРОТРОНА ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

В.Е. Запелалов, А.С. Зуев, О.П. Планкин, Е.С. Семенов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Перспективным источником в субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах является гиротрон. Несмотря на свои преимущества гиротрон является достаточно дорогостоящим прибором, поэтому всё больший интерес приобретают неканонические варианты гиротронов с возможностью одновременной генерации излучения на нескольких частотах при использовании

одной магнитной системы. Такие возможности имеет многоствольный гиротрон [1, 2]. Простейшая схема многоствольного гиротрона включает магнетронно-инжекторную пушку с секционированной эмиссией, формирующую несколько тонких винтовых электронных пучков; резонаторную систему, содержащую несколько расположенных параллельно друг другу резонаторов (стволов), количество которых равно количеству областей эмиссии и каждый из которых расположен соосно электронному пучку; и многоканальную систему вывода излучения. Примечательно, что электронно-волновое взаимодействие в резонаторах гиротрона осуществляется в поле одной магнитной системы. Такой подход позволяет существенно снизить стоимость установки относительно набора отдельных гиротронов с аналогичными выходными характеристиками.

Схема многоствольного гиротрона с приосевым пучком позволяет использовать преимущества гиротронов с большой орбитой для возбуждения мод на высоких циклотронных гармониках. Вместе с этим «многоствольный подход» делает возможным осуществить одновременную многочастотную генерацию на близких или кратных друг другу частотах. В работе рассматриваются особенности реализации многоствольной системы с одновременной генерацией на частотах 263 ГГц, 395 ГГц и 527 ГГц при работе гиротрона на второй, третьей и четвёртой гармониках соответственно. Указанные частоты являются востребованными, например, в ДПЯ/ЯМР спектроскопии высокого разрешения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-30071).

1. Патент / Запевалов Владимир Евгеньевич, Зуев Андрей Сергеевич. Многоствольный гиротрон. Россия. 2755826. 22.09.2021. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН) (RU).

2. Запевалов В.Е., Зуев А.С., Куфтин А.Н. Многоствольные гиротроны // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 2. С. 105–114.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ ГИРОТРОНА ВНЕШНИМ СИГНАЛОМ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КВАЗИЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ

Н.В. Григорьева^{1,2}, Н.М. Рыскин^{1,2}

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

² Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Гиротроны, как известно, являются наиболее мощными источниками излучения в коротковолновой части миллиметрового и в субмиллимет-

ровом (терагерцевом) диапазонах длин волн. Для многих приложений гиротронов крайне важными являются такие вопросы, как обеспечение одномодовой генерации с высоким КПД и стабилизация частоты излучения. В связи с этим активно развиваются исследования в области синхронизации гиротрона внешним сигналом [1]. Хотя подобные исследования были начаты еще в 1970–1980-х годах (см., например, [2]), в последние годы появилось большое число работ, в которых влияние внешнего сигнала на режимы генерации мощного гиротрона исследуется как при помощи компьютерного моделирования [3–5], так и экспериментально [6]. Поэтому исследование фундаментальных закономерностей синхронизации гиротрона при помощи методов теории колебаний и нелинейной динамики представляет очевидный интерес.

Теоретическое исследование процессов синхронизации гиротронов путем вычислительного эксперимента на основе тех или иных традиционных моделей сверхвысокочастотной электроники не дает полного описания картины синхронизации. Поэтому в данной работе анализ проводится на основе модели, в которой функция электронной восприимчивости рассчитывается численно по стационарной теории гиротрона с фиксированной гауссовой структурой поля, а затем с помощью интерполяции рассчитанных зависимостей выражается как функция амплитуды поля и расстройки циклотронного резонанса. Развита модель позволяет провести детальный теоретический анализ режимов синхронизации, а также определить значения важных с практической точки зрения количественных параметров, таких как КПД и ширина полосы синхронизации, проанализировать условия самовозбуждения паразитных мод и т.д. Полученные результаты полностью согласуются с результатами численного моделирования на основе уравнений нестационарной теории гиротрона с фиксированной структурой ВЧ-поля.

1. Новожилова Ю.В. и др. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 1. С. 4–11.

2. Ермаков В.С., Мусеев М.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 1. С. 120–131.

3. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, № 9. С. 41–47.

4. Григорьева Н.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 5. С. 422–433.

5. Bakunin V.L., Denisov G.G., Novozhilova Y.V. // IEEE Electron Device Lett. 2020. V. 41, № 5. P. 777–780.

6. Бакунин В.Л., Гузнов Ю.А., Денисов Г.Г., Зайцев Н.И. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, № 11. С. 38–45.

АНАЛИЗ СВЕРХРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ И МЕТОДА МУЛЬТИПОЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

А.П. Гаутури, Д.И. Соболев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Алгоритм мультипольного разложения (Multilevel Fast Multipole Algorithm) широко используется для ускорения решения интегральных уравнений метода граничных элементов (EFIE, MFIE или CFIE). Решением этих уравнений является распределение плотности поверхностного тока на металле, которое, в свою очередь, определяет все поля рассеяния на объекте. Посредством метода моментов интегральное уравнение сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которое решается итерационно. Скорость расчета данным методом определяется как $O(N_{\text{iter}}M\log N)$, где N – размерность СЛАУ, а N_{iter} – число итераций. Метод позволяет рассчитывать системы с 10^7 числом неизвестных (характерные размеры системы – сотни длин волн) на персональном компьютере за разумное время (до десятков часов).

В данной работе демонстрируется иное использование MLFMA – расчет распространения СВЧ-излучения в зеркальных линиях передачи по принципу физической оптики. В определенных условиях возможен расчет распределения плотности тока на зеркале напрямую – через распределение на поверхности зеркала магнитного поля падающего на него излучения. В данном случае не требуется решать сложное интегральное уравнение, а нужно лишь осуществлять последовательный пересчет поля с зеркала на зеркало, что во много раз быстрее. Скорость одного пересчета полей определяется уже $O(M\log N)$, где N – число элементарных частей поверхности двух зеркал, участвующих в одном пересчете. Таким образом, время расчета линии передач с характерными суммарными размерами зеркал в сотни длин волн сокращается до нескольких минут. При этом расчет позволяет получить полную информацию об излучении (все компоненты полей, кросс-поляризация и т.д.). Метод может работать так же, как дополнение к решению интегрального уравнения. В таком случае получается значительно ускорить расчет полей в сверхразмерных линиях передачи, включающих как волноводы, так и зеркала, без потери точности.

ВЛИЯНИЕ ТОКОВ ФУКО НА ВОЗМУЩЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ДИНАМИКУ ФОРМИРОВАНИЯ ВИНТОВОГО ПУЧКА РЕЛЯТИВИСТСКОГО ИМПУЛЬСНОГО ГИРОТРОНА

*В.Н. Мануилов^{1,2}, П.Д. Лихтерова^{1,2}, И.В. Иляков¹, И.С. Кулагин¹,
В.Ю. Заславский^{1,2}*

¹ Институт прикладной физики, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Преимуществом импульсных магнитных систем является их относительная дешевизна, простота и возможность создавать в импульсном режиме существенно большие магнитные поля, чем в теплых соленоидах с постоянным током. Последнее обстоятельство позволяет достаточно просто реализовать генерацию на значительно большей частоте, чем в системах с постоянным магнитным полем, и удешевляет многие предварительные эксперименты по отработке методов генерации СВЧ-излучения на гармониках гирочастоты, методов селекции паразитных типов колебаний в условиях густого спектра мод, экспериментальной отработки новых электродинамических систем. В то же время в магнитных системах с импульсным током возникают и свои, присущие только этим системам, сложности. Наиболее важной из них является инициация переменным во времени магнитным полем токов Фуко в находящихся в непосредственной близости от соленоидов металлических частях конструкции гиротрона. В результате возникающие в них наведенные токи, в свою очередь, инициируют магнитные поля, возмущающие поле, создаваемое магнитной системой гиротрона.

В докладе развита методика расчета импульсного магнитного поля в сложной системе соленоидов, запитываемых сдвинутыми во времени импульсами тока, и на этой основе проанализирована временная динамика изменения магнитного поля как в резонаторе релятивистского (280 кВ, 50 А) гиротрона, так и в области формирования винтового электронного пучка, являющегося источником энергии для СВЧ-излучения. Показано, что в зависимости от текущего момента времени степень неоднородности поля в рабочем пространстве гиротрона может достигать 20 %. Найден интервалы времени, в течение которых магнитное поле в резонаторе остается однородным. Проведено сравнение расчетных распределений магнитного поля с экспериментально измеренными. Показано, что в зависимости от момента включения импульса высокого напряжения возможны режимы, когда значительная часть пучка отражается от магнитного зеркала, либо, наоборот, имеет слишком низкую долю колебательной энергии в резонаторе. Найден временной интервал, в течение которого формируется электронный пучок с приемлемыми для генерации параметрами и проведено вычисление скоростного распределения в электронном пучке для этого режима.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 20-02-00274).

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ И УСИЛЕНИЯ КОРОТКИХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

*Л.А. Юровский, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев,
А.В. Назаровский*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Исследованы новые возможности формирования и усиления мощных коротких микроволновых импульсов. Наиболее универсальным является перенос в СВЧ-электронику широко используемого в лазерной физике СРА-метода усиления chirпированных импульсов, основанного на предварительном растяжении начального импульса в стретчере, последовательного усиления спектральных компонент и восстановления изначальной формы в линии с отрицательной дисперсией (компрессоре). Показана эффективность использования в миллиметровом диапазоне частот в качестве стретчера и компрессора спирально-гофрированных волноводов. В качестве широкополосных усилителей перспективно использование винтовых гиРОЛБВ и релятивистских черенковских ЛБВ.

Предложен метод преобразования стационарных сигналов гиротронов в периодическую последовательность коротких импульсов путем chirпирования частоты при рассеянии излучения на электронном пучке с переменной энергией и последующей компрессии. Пиковая мощность импульсов может более чем в 50 раз превосходить мощность исходного сигнала.

1. *Yurovskiy L.A., Zotova I.V., Ginzburg N.S. et al.* Production of multi-gigawatt subnanosecond microwave pulses by the method of chirped-pulse-amplification // IEEE Electron Device Letters. 2021. V. 42, № 3. P. 426.

2. *Yurovskiy L.A., Nazarovskiy A.V., Ginzburg N.S.* Generation of short microwave pulses by compression of chirped signals obtained by Raman backscattering on electron beam with variable energy // IEEE Electron Device Letters. 2021. V. 42, № 10. P. 1548.

РАЗРАБОТКА СИЛЬНОТОЧНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ГИРОТРОНА Ка-ДИАПАЗОНА С РАБОЧЕЙ МОДОЙ ТМ-ТИПА

*Э.Б. Абубакиров, Ю.Ю. Данилов, А.Н. Денисенко, А.Н. Леонтьев,
И.В. Ошарин, Р.М. Розенталь, А.Э. Федотов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В настоящее время ведутся активные исследования в области создания СВЧ-источников миллиметрового диапазона с субгигаваттным уровнем

выходной мощности [1–3]. Использование для этой цели гиротронов представляет определенный интерес, поскольку при циклотронном взаимодействии отсутствует необходимость транспортировки электронного потока вблизи поверхности электродинамической системы. Для достижения субгигаваттного уровня мощности для запитки гиротронов необходимо использовать релятивистские винтовые электронные потоки, формируемые взрывоэмиссионными катодами. При этом существенной проблемой является селективное возбуждение рабочего колебания на временах в десятки наносекунд, соответствующих характерной длительности электронного пучка.

В данной работе представлены результаты разработки и первых экспериментальных исследований сильноточного гиротрона диапазона 30 ГГц с новым типом продольно-щелевого резонатора пластинчатого типа. Такой резонатор обеспечивает существенное разрежение спектра мод за счет существенного снижения добротности мод ТЕ-типа при сохранении добротности мод ТМ-типа. В результате в гиротроне становится возможным работа на одной из ТМ-мод.

Представлены результаты экспериментальных исследований электроно-оптической системы на основе кикера, формирующей пучок с энергией 500 кэВ, током до 2 кА и питч-фактором около 1,0. Для исключения паразитного самовозбуждения на участке формирования винтового пучка предложена модифицированная схема гиротрона, в которой начальный участок резонатора сформирован из втрое меньшего числа пластин по сравнению с рабочим участком пластинчатого резонатора, а катушка кикера располагается непосредственно в торце резонатора. Таким образом, в области кикера обеспечивается эффективное подавление паразитного самовозбуждения при сохранении возможности раскочки и транспортировки сильноточного электронного пучка.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0030-2021-0027 (программа «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года»).

1. *Deng B.* Preliminary research of a V-band coaxial relativistic transit-time oscillator with traveling wave output structure / B. Deng, J. He, J. Ling, L. Song, L. Wang // *Phys. Plasmas*. 2021. V. 28. Art. 103103 ; doi: 10.1063/5.0060186.

2. *Malkin A.M.* Relativistic sub-THz surface-wave oscillators with transverse Gaussian-like radiation output / A.M. Malkin, A.E. Fedotov, V.Yu. Zaslavsky, S.E. Fil'chenkov, A.S. Sergeev, E.D. Egorova, and N.S. Ginzburg // *IEEE Electron Dev. Lett.* 2021. V. 42. P. 751 ; doi: 10.1109/LED.2021.3067170.

3. *Palitsin A.V.* Design of W-band relativistic surface-wave oscillator with sheet electron beam / A.V. Palitsin, A.E. Fedotov, A.M. Malkin, V.Yu. Zaslavsky, M.B. Goykhman, A.V. Gromov, Yu.M. Guznov, A.N. Panin, Yu.V. Rodin, and N.S. Ginzburg // *IRMMW-THz* 2021 ; doi: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567091.

ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ МОЩНЫХ ПЛАНАРНЫХ ГИРОТРОНОВ С ПОПЕРЕЧНЫМ ДИФРАКЦИОННЫМ ВЫВОДОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

*В.Ю. Заславский, В.Н. Мануилов, А.Н. Куфтин, К.А. Лещева,
А.В. Климов, Д.И. Соболев, И.В. Зотова, Н.С. Гинзбург*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В течение последних лет в ИПФ РАН ведется разработка 140 ГГц планарного гиротрона на первой гармонике циклотронной частоты с поперечным дифракционным выводом излучения. С этой целью разработана и экспериментально протестирована планарная магнетронно-инжекторная пушка (МИП). Теоретический анализ планарной МИП проводился с учётом трёхмерной конфигурации и влияния шероховатости эмиссионной поверхности на параметры и режим работы [1, 2]. Продемонстрирована возможность формирования при ускоряющем напряжении 100 кВ ленточного винтового электронного пучка (ВЭП) шириной 2 см, током 30 А и питч-фактором 1,2. Измерения характеристик ленточного ВЭП проводились с помощью специально разработанного анализатора, основанного на методе тормозящего электрического поля. Использовались моделирующие режимы, при которых магнитное поле, напряжение и ток уменьшались по сравнению с рабочими в соответствии с соотношениями подобия, обеспечивающими неизменность формы траекторий (коэффициент подобия 0,1). Экспериментально зарегистрированные позиционный и скоростной разбросы электронов в ленточном ВЭП близки к значениям, характерным для традиционных аксиально-симметричных МИП.

Проведено трёхмерное PIC (particle-in-cell) моделирование электронно-волнового взаимодействия в планарном гиротроне с учётом полученных экспериментально параметров ленточного ВЭП, которое демонстрирует возможность эффективной генерации на основной гармонике гирочастоты с мощностью до 1 МВт, а также высоких (второй и третьей) циклотронных гармониках. Другим перспективным направлением исследований планарных гиротронов, резонаторы которых обладают эквидистантным модовым спектром, является использование эффектов умножения с одновременной генерацией на нескольких кратных частотах [3].

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 19-79-30071).

1. *Manuilov V.N.* Electron-optical systems for planar gyrotrons / V.N. Manuilov, V.Yu. Zaslavsky, N.S. Ginzburg, M.Yu. Glyavin, A.N. Kuftin and I.V. Zotova // *Physics of Plasmas*. 2014. V. 21. P. 023106.

2. *Мануилов В.Н.* Оптимизация магнетронно-инжекторной пушки для мощного планарного гиротрона миллиметрового диапазона длин волн / В.Н. Мануилов, В.Ю. Заславский, А.Н. Куфтин, К.А. Лещева // *Известия вузов. Радиофизика*. 2021. Т. 64, № 4. С. 253–264.

3. *Zaslavsky V.Yu.* Frequency multiplication in planar gyrotrons as a method for production of high-power multi-THz radiation / V.Yu. Zaslavsky, I.V. Zheleznov, N.S. Ginzburg, I.V. Zotova, A.M. Malkin, A.S. Sergeev // IEEE Transactions on Electron Devices. 2021. V. 68, iss. 3. P. 1267–1270.

ЭФФЕКТИВНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ГИРОТРОНА НА ПЯТОЙ ЦИКЛОТРОННОЙ ГАРМОНИКЕ В РЕЖИМЕ УМНОЖЕНИЯ ЧАСТОТЫ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

*Г.Г. Денисов, И.В. Зотова, А.М. Малкин, А.С. Сергеев,
Р.М. Розенталь, А.П. Фокин, В.И. Белоусов, М.Ю. Шмелев,
А.В. Чирков, А.И. Цветков, И.В. Бандуркин, М.Ю. Глявин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

На основе анализа корней производной функции Бесселя, определяющих критические частоты поперечно-электрических мод цилиндрического волновода, показана возможность эффективного возбуждения гиротрона на высоких ($s = 4n + 1$, $n = 1, 2, 3...$) циклотронных гармониках в режиме умножения частоты. Результаты теоретического анализа подтверждены экспериментом с непрерывным гиротроном, разработанным для генерации на основном циклотронном резонансе на частоте 45 ГГц. Без изменения конфигурации электродинамической системы гиротрона в режиме возбуждения пятой циклотронной гармоники на частоте 220 ГГц получено излучение с мощностью 100 мВт. При этом коэффициент нелинейной конверсии как минимум на порядок превосходит значения, наблюдавшиеся ранее для случая возбуждения третьей гармоники гирочастоты. Сделанные оценки показывают, что с учетом возможностей современных субтерагерцовых гиротронов на основном циклотронном резонансе использование обнаруженного эффекта позволит обеспечить генерацию излучения в наименее освоенной части «терагерцового провала» 1–3 ТГц.

Работа выполнена в рамках госпрограммы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» (проект 0030-2021-0027).

КОНЦЕПЦИЯ 230 ГГЦ МОЩНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ГИРОТРОНА ДЛЯ ПРОЕКТА DEMO

*Г.Г. Денисов¹, А.Н. Куфтин¹, В.Н. Мануилов^{1,2}, А.В. Чирков¹,
Л.Г. Попов³, В.Е. Запелов¹, А.С. Зуев¹, А.С. Седов¹,
И.В. Железнов¹, М.Ю. Глявин¹*

¹ Институт прикладной физики, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³ ЗАО НПП «Гиком», Нижний Новгород

Одним из ключевых элементов будущих термоядерных реакторов является микроволновая система нагрева плазмы на основе мощных (около 1 МВт на прибор и более) гиротронов. В настоящее время успешно реализован гиротрон мощностью 1 МВт с рабочей частотой 170 ГГц для экспериментального реактора ИТЭР. Наиболее многообещающий способ дальнейшего повышения мощности и частоты колебаний – это использование синхронизации частоты с помощью внешнего высокостабильного источника (так называемого задающего генератора с относительно низкой выходной мощностью, порядка нескольких процентов от основного генератора). Недавние теоретические исследования подтвердили реальную возможность высокоэффективной реализации указанной схемы для проекта ИТЭР. Следующим шагом в развитии установок управляемого термоядерного синтеза (УТС) является опытно-промышленный реактор DEMO.

В докладе описаны особенности основных компонентов нового мощного (230 ГГц / 80 кВ / 40 А) гиротрона, предназначенного для использования в будущей установке DEMO. Конструкция гиротрона обеспечивает стабильную генерацию выходной мощности более 1 МВт с использованием сверхпроводящего магнита с теплым отверстием умеренного размера. Представлены результаты оптимизации геометрии и режима работы триодной электронной пушки. Найден профиль резонатора, обеспечивающий одномодовое возбуждение моды $TE_{33,13}$. Разработан новый оригинальный квазиоптический преобразователь, обеспечивающий работу гиротрона в трех возможных режимах: два режима свободных колебаний с генерацией моды $TE_{33,13}$ или моды встречного вращения $TE_{-33,13}$ и режим с синхронизацией частоты стабильным входным сигналом, подающимся через тот же преобразователь внутрь резонатора гиротрона. Во всех трех случаях преобразователь обеспечивает преобразование выходного излучения в гауссов волновой пучок с коэффициентом преобразования 98 %.

АНАЛИЗ ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ В КОЛЛЕКТОРНЫХ СИСТЕМАХ СОВРЕМЕННЫХ ГИРОПРИБОРОВ

М.В. Морозкин, В.Н. Мануилов, П.Д. Лихтерова

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Разработана физическая модель и алгоритм расчета удельной плотности мощности, рассеиваемой в коллекторе giroприборов с учетом вторичной эмиссии электронов с поверхности коллектора. Учитываются особенности энергетического и углового распределения вторичных частиц при наклонном падении электронного пучка на поверхность.

Траектории электронов и соответствующие распределения плотности мощности были найдены для коллекторных систем giroприборов различных классов: релятивистского импульсного мощного giroклистрона, giroтрона 170 ГГц / 1 МВт для проекта ИТЭР, giroтрона 28 ГГц / 10 кВт для технологических приложений и giroтрона 263 ГГц / 1 кВт для спектроскопических приложений.

Расчеты проводились с использованием трехмерного кода на основе библиотеки IBSimu [1]. Переход к трехмерным методам расчета актуален для расчета аксиально-асимметричных спиральных электронных пучков, например в giroтронах с квазиоптическими многозеркальными резонаторами, а также в планарных giroтронах.

Обобщенные результаты расчетов показывают, что переотражения электронов существенно расширяют мгновенный след электронного пучка. Это требует значительного удлинения как всего коллектора, так и его зоны охлаждения. При этом изменяется распределение плотности мощности осаждаемого пучка, сопровождающееся значительным уменьшением ее пикового значения, что открывает возможность использования коллекторов меньшего диаметра в мощных giroприборах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 21-19-00884).

1. *Kalvas T. et al.* IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics // *Rev. Sci. Instrum.* 2010. V. 81. Art. 02B703.

ВЛИЯНИЕ КОНКУРЕНЦИИ МОД НА РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ ГИРОТРОНА МЕГАВАТТНОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ С ОТРАЖЕННОЙ ВОЛНОЙ

*В.Л. Бакунин, Г.Г. Денисов, А.С. Зуев, А.Н. Куфтин,
Ю.В. Новожилова, Е.С. Семенов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Исследовано воздействие отраженной волны на гиротрон мегаваттного уровня мощности в условиях конкуренции мод. Численное моделирование проводилось на примере разработанного в ИПФ РАН гиротрона мегаваттного уровня мощности с частотой 170 ГГц, рабочей модой $TE_{28,12}$ [1]. Предполагалось, что выходное излучение на частоте рабочей моды отражается от выходного окна с коэффициентом отражения по амплитуде 0,35, время запаздывания составляет около 9 нс, и на частотах соседних мод $TE_{29,12}$, $TE_{27,12}$ отражения нет. Ввод-вывод в резонатор гиротрона осуществляется через синтезированный преобразователь [1]. В приближении фиксированной продольной структуры поля исследовано взаимодействие рабочей моды с соседними модами $TE_{29,12}$, $TE_{27,12}$. Показано, что орбитальный КПД возрастает на 15 %, частота излучения на рабочей моде стабилизируется и при изменении ведущего магнитного поля меняется в интервале в 6–8 раз меньшем по сравнению с гиротроном без отражений. При изменении ведущего магнитного поля происходят переходы между продольными модами длинной линии и соответствующие им скачки частоты между стабильными значениями. Смещение отражателя в пределах длины волны приводит к небольшому сдвигу частот стабильных состояний и значений магнитного поля, при которых происходят переходы между этими состояниями. Такие изменения частоты излучения в зависимости от магнитного поля и от расстояния до отражателя, характерные для достаточно больших значений времени запаздывания и коэффициента отражения, находятся в согласии с развитой ранее теорией [2].

Работа выполнена в рамках темы госзадания ИПФ РАН № 0030-2021-0001.

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

2. *Глявин М.Ю.* Стабилизация частоты гиротрона слабой отраженной волной / М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов, М.Л. Кулыгин, М.М. Мельникова, Ю.В. Новожилова, Н.М. Рыскин // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2015. Т. 58, № 9. С. 747–758.

РЕАЛИЗАЦИЯ ДИСКРЕТНОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В ДИАПАЗОНЕ 133–250 ГГц В МОЩНОМ ГИРОТРОНЕ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

*А.С. Зуев, А.П. Фокин, А.А. Ананичев, Е.С. Семенов, О.П. Планкин,
А.Н. Куфтин, В.Е. Запезалов, М.Ю. Глявин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Для ряда перспективных плазменных приложений, таких как установки УТС нового поколения, необходимы мощные источники излучения в субтерагерцовом диапазоне частот, обладающие возможностями широкополосной перестройки частоты [1]. Такими источниками могут стать новые гиротроны, основанные на использовании последовательности мод цилиндрического резонатора [2]. Это особенно актуально в случае мощных гиротронов со сверхразмерными резонаторами и высокими поперечными индексами рабочих мод. В этом случае гиротрон имеет плотный спектр мод, что позволяет лучше освоить рабочий диапазон частот за счет возбуждения большего числа мод.

В данной работе представлены результаты теоретических расчетов и экспериментов по реализации дискретной перестройки частоты в имеющемся в ИПФ РАН гиротронном комплексе с частотой генерации 250 ГГц и мощностью выходного излучения до 330 кВт [3], предназначенном для нагрева плазмы и исследования томсоновского рассеяния в перспективных установках управляемого термоядерного синтеза.

Рассмотрены ограничения, налагаемые электронно-оптической системой и системой вывода излучения, исследованы возможности управления параметрами электронного пучка за счет дополнительной катушки в области катода гиротрона. Определены рабочие моды и соответствующие им параметры электронно-оптической и магнитной систем гиротронного комплекса, выполнено численное моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия. В экспериментах с дополнительной катушкой с максимальным полем 0,03 Тл продемонстрировано возбуждение 10 мод в диапазоне 133–250 ГГц с мощностью от 35 до 200 кВт. Полученные экспериментальные данные согласуются с выполненными теоретическими оценками.

Работа выполнена при поддержке гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (проект № МК-3413.2021.1.2).

1. *Jelonnek J. et al.* Design considerations for future DEMO gyrotrons: a review on related gyrotron activities within EUROfusion // Fusion Eng. Des. 2017. V. 123. P. 241–246 ; doi: 10.1016/j.fusengdes.2017.01.047.

2. *Zapevalov V.E. et al.* Development of a prototype of a 1-MW 105-156-GHz multifrequency gyrotron // Radiophys. Quantum Electron. 2004. V. 47, № 5/6. P. 396–404 ; doi: 10.1023/B:RAQE.0000046313.84364.3c.

3. *Denisov G.G. et al.* First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics // *Rev. Sci. Instrum.* 2018. V. 89, № 8. P. 084702 ; doi: 10.1063/1.5040242.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ И ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ В ЛБВ С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

М.Н. Вилков, А.А. Иванов, Р.М. Розенталь

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В настоящее время активно исследуются процессы многочастотного СВЧ-нагрева плазмы, которые требуют непрерывного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов с киловаттным уровнем выходной мощности. При этом для подобных задач представляет интерес как излучение с дискретным набором спектральных линий [1], так и шумоподобное излучение со сплошным спектром [2].

С точки зрения получения больших мощностей привлекательной выглядит схема, в которой задающий генератор ваттной мощности генерирует многочастотный сигнал, который поступает на вход широкополосного усилителя с коэффициентом усиления порядка 30 дБ. В качестве подобных усилителей, к примеру, могут быть использованы гирорезонансные ЛБВ на основе винтовых гофрированных волноводов [3]. В свою очередь, одним из вариантов построения многочастотных задающих СВЧ-генераторов является использование ЛБВ черенковского типа с запаздывающей обратной связью.

В работе выполнены теоретические исследования ЛБВ в рамках нестационарной распределенной модели. Показано существование режимов хаотической генерации с малой неравномерностью спектра и режимов генерации последовательностей импульсов (самосинхронизации мод). Выводы теории подтверждены результатами экспериментальных исследований спиральной ЛБВ сантиметрового диапазона. Также обсуждаются перспективы получения многочастотных режимов генерации в ЛБВ миллиметрового диапазона [4].

Работа выполнена в рамках государственного задания (договор 0030-2021-0001).

1. *Skalyga V. et al.* Suppression of cyclotron instability in electron cyclotron resonance ion sources by two-frequency heating // *Phys. Plasmas.* 2015. V. 22. P. 083509.

2. *Tarvainen O. et al.* Electron heating with broadband microwave radiation: a new method for improving the performances of conventional B-minimum electron cyclotron resonance ion sources // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sect. B. 2007. V. 261, № 1/2. P. 1044–1047.

3. *Самсонов С.В. и др.* Исследования гиротронной лампы бегущей волны со спирально гофрированными волноводами в ИПФ РАН: результаты и перспективы // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 7. С. 508–521.

4. *Ivanov A.A. et al.* W-band pulsed TWT family with different output power // 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2019.

ОСОБЕННОСТИ ДИФРАКЦИИ МОНОПОЛЯРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА НА ПРОСТЕЙШИХ ОБЪЕКТАХ

В.Н. Корниенко¹, В.В. Кулагин^{1,2}

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

² Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва

В ряде работ, опубликованных в последнее время, говорится о возможности генерации и излучения в свободное пространство монополярных (униполярных) электромагнитных импульсов (МЭМИ). Рассматриваются возможные механизмы получения МЭМИ, например генерация МЭМИ при прохождении плоского короткого сгустка релятивистских электронов сквозь наклонно установленную проводящую фольгу, использование электрического разряда для формирования в свободном пространстве пары уединенных МЭМИ противоположной полярности и др.

Отдельно стоит проблема управления распространением МЭМИ: его фокусировка, изменение направления распространения. Для решения этой задачи необходимо, в частности, рассмотреть структуру поля, формируемого при прохождении МЭМИ через область пространства, содержащего неоднородности простой геометрической формы.

В данном докладе представлены результаты, полученные в серии вычислительных экспериментов, целью которых было выявление особенностей пространственно-временного распределения поля дифракции короткого МЭМИ с плоским фронтом на идеально проводящих бесконечном цилиндре и ленте конечной ширины.

Показано, что при дифракции на цилиндре для ТЕ-поляризованного импульса поле дифракции также имеет монополярную структуру. В других рассмотренных случаях в свободном пространстве формируется биполярное поле, характеристики которого зависят от временного профиля МЭМИ.

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО ОРОТРОНАМИ С ДВУХРЯДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ, В ДИАПАЗОНЕ 100–400 ГГц

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

Фрязинский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл.

Задача измерения выходной мощности оротрона с двухрядной периодической структурой (ДРПС) 3-миллиметрового диапазона волн, работающего в импульсном режиме, была решена нами ещё в 1987 году. Результаты измерения мощности этих приборов представлены в таблице из работы [1].

ГГц	$P_{из}$, кВт	КПД _ц , %	Q_n	U_0 , кВ	I_0 , А	j , А/см ²	Дата
10	53	35	800	13	11,6	50	1 кв. 1984 г.
37,5	40	17	2000	19	12	90	4 кв. 1985 г.
90	1,2	6	5000	20	1	100	3 кв. 1987 г.

Следует отметить, что все они работали в импульсном режиме с большой скважностью. Поэтому в 3-мм диапазоне волн был использован метод измерения мощности с помощью детектора, работающего в квадратичном режиме, который предварительно был градуирован, т.е. измерена его чувствительность в пределах от 80 до 100 ГГц. Поэтому весь процесс измерения выходной мощности по диапазону сводился к измерению потерь элементов СВЧ-тракта между выходным фланцем оротрона и детекторной секцией (ДС). Для этой цели был модернизирован измеритель КСВН Р2-69, в котором была заменена ЛОВ. В результате прибор стал работать в диапазоне 78–120 ГГц и позволил провести измерение мощности в 3-мм диапазоне волн.

Точно такой же метод измерения генерируемой мощности был применен нами в диапазоне 100–400 ГГц. Однако, если в 3-мм диапазоне была использована ЛОВ этого диапазона, пакетированная в магнитную систему, то в диапазоне 100–170 ГГц у нас такой ЛОВ не было, и за помощью пришлось обращаться в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Градуировку чувствительности детектора вместе с ДС в этом диапазоне нам любезно предоставил один из разработчиков ЛОВ А.А. Негирев. Однако в диапазоне от 170 до 400 ГГц такой градуировки не было, и получить ее было неоткуда. Тогда мы продолжили линейную экстраполяцию градуировки чувствительности ДС диапазона 100–170 ГГц до 400 ГГц, исходя из того, что по мере увеличения частоты чувствительность детектора уменьшается, поэтому его амплитудная характеристика остается квадратичной при больших амплитудах воздейст-

вующего на него сигнала. Именно такая градуировка ДС была использована нами при расчете мощности потерь в СВЧ-тракте между выходным фланцем оротрона и ДС. Источником излучения при этих измерениях в диапазоне от 170 до 400 ГГц были две ЛОВ ОВ-66 (180–260 ГГц) и ОВ-65 (260–360 ГГц), не пакегированных в твердотельную магнитную систему. Поэтому для проведения измерений с их использованием был создан стенд с электромагнитом, в зазоре которого эти ЛОВ размещались с помощью юстировочного устройства, обеспечивающего максимальное прохождение электронного потока на коллектор. Кроме того, вся измерительная система была выстроена таким образом, чтобы замена деталей СВЧ-тракта при измерениях не нарушала этой юстировки ЛОВ. Для этого вся система размещалась на оптической скамье, и генерируемое ЛОВ излучение с помощью рупорной антенны предавалось к измерительной части через такую же приемную антенну. Кроме того, для снижения тепловой нагрузки на замедляющую систему ЛОВ обе они работали в импульсном режиме. Таким образом, была проведена градуировка нескольких участков СВЧ-тракта от выходного фланца оротрона до ДС. Общая ошибка в измерениях величины генерируемой мощности по используемой методике составила величину порядка 33 %.

1. *Мясин Е.А.* Оротрон – мощный резонансный генератор О-типа сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн // Радиотехника. 2004. № 2. С. 22.

АЛМАЗОКАРБИДКРЕМНИЕВЫЙ КОМПОЗИТ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ БОЛЬШИХ МОЩНОСТЕЙ

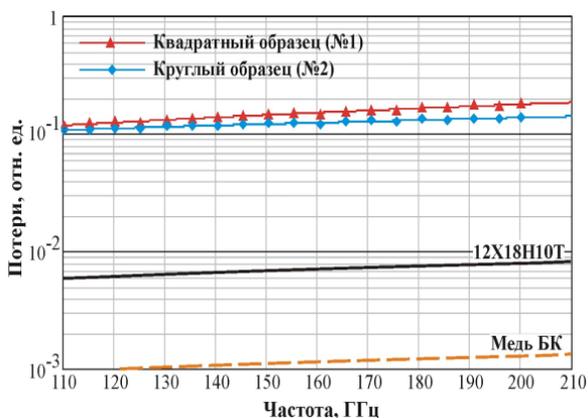
*В.В. Паршин¹, Е.А. Серов¹, В.Е. Запелов¹, С.К. Гордеев²,
С.Б. Корчагина²*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Центральный научно-исследовательский институт материалов, Санкт-Петербург

Для ММ и СубММ-диапазонов представляется алмазкарбидкремниевый композит – АКК «Скелетон» – как новый конструкционный материал для применения в широком диапазоне частот и температур. Обсуждаются его теплофизические и диэлектрические параметры для использования его в качестве основы для высокотеплопроводящих подложек для силовой микроэлектроники, для создания основных элементов конструкции, поглощающих рассеянное излучение в гиротронах мегаваттного уровня мощности, а также зеркал для оптических и радиотелескопов наземного и космического базирования [1]. Исследование диэлектрических параметров выполнены в ИПФ РАН [2].

АКК «Скелетон» является композитным материалом [3], в котором зерна алмаза связаны матрицей, состоящей из карбида кремния и кремния. Содержание фаз может быть изменено в процессе изготовления. Чаще всего содержание алмаза лежит в диапазоне 40–70 % об., содержание кремния – 4–15 % об., а содержание карбида кремния – 25–50 % об. Конкретные значения контролируются изготовителями. Повышение содержания алмаза ожидается увеличивает значения характеристик, связанных с его присутствием – жесткость, твердость, теплопроводность (до 650 Вт/(м×К)) и др. Высокая твердость материала существенно затрудняет его механическую обработку, поэтому технология изготовления изделий построена так, что могут быть изготовлены изделия сложных форм и нужных размеров без обработки конечных деталей. Допуски по размерам составляют, как правило, 0,1 мм и меньше. Разработанное покрытие «Скелетона» тонким слоем кремния позволяет изготавливать зеркала оптического качества с сохранением всех свойств, присущих этому материалу.



В таблице приведены некоторые его теплофизические параметры в сравнении с CVD-алмазом, а на рисунке – результаты измерения потерь при отражении в сравнении с БК-медью и нержавеющей сталью 12Х18Н10Т.

Материал	Плотность ρ , г/см ³	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Теплоемкость c , Дж/(кг·К)	Температуропроводность a , см ² /с	TKLP·10 ⁶ , 1/К
CVD-алмаз	3,51	1800–2000	550	9–10	1,5
АКК «Скелетон»	3,40	500–650	620	2,5–3,0	2,0

Работа выполнена в ИПФ РАН в рамках госзадания № 0030 2021 0001.

1. *Шаболдо О.П.* Материалы и технологии разработки АО «ЦНИИМ» для изделий авиационной и космической техники / О.П. Шаболдо, С.К. Гордеев, В.Б. Вихман, Д.А. Трубин // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции (Москва, 2021 г.). М. : ВИАМ, 2021. С. 8–22.

2. *Паршин В.В.* Криовакуумный резонаторный комплекс / Паршин В.В., Серов Е.А., Бубнов Г.М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. LVI, № 8/9. С. 614–621.

3. *Гордеев С.К.* Композиты алмаз-карбид кремния – новые сверхтвердые конструкционные материалы для машиностроения // Вопросы материаловедения. 2001. № 3. С. 31–40.

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ВОЗБУДИТЕЛИ МОДЫ TE_{01} КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

Д.И. Соболев, М.Д. Проявин, В.Ю. Заславский

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Развитие технологий 3D-печати имеет большой потенциал для СВЧ- и ТГц-приложений. Фотополимерные принтеры обеспечивают печать компонентов сложной формы с погрешностью порядка десятков микрон. Поверхность компонентов может быть покрыта металлом при помощи химического и гальванического осаждения, что позволяет изготавливать таким образом компоненты волноводных линий передачи [1, 2].

Для исследования характеристик получаемого металлического покрытия были напечатаны из фотополимера и покрыты медью отрезки одномодового волновода. Затухание основной моды было измерено на частотах до 110 ГГц и проведено исследование влияния дефектов покрытия на характеристики волновода. Затем тем же методом были изготовлены прототипы широкополосных возбуждателей моды TE_{01} круглого волновода, расчетная эффективность которых превышает 95 % в диапазоне частот 34–40 ГГц. Поскольку основные паразитные моды имеют различные поляризации, для испытаний на малой мощности фланцы возбуждателей были сделаны таким образом, чтобы обеспечивать различные варианты соединения с шагом 45°. По результатам измерений чистота выходной моды соответствует расчетным данным. Омические потери превышают расчетную величину для гладкой медной поверхности, что вызвано как ступенчатой поверхностью напечатанных компонентов, так и неровностями, возникшими в результате металлизации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-19-00877.

1. Sun J., Hu F. Three-dimensional printing technologies for terahertz applications: a review // Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng. 2020. V. 30. Art. e21983. URL: <https://doi.org/10.1002/mmce.21983>.

2. Tomassoni C., Bozzi M. Microwave components realized by additive manufacturing techniques // Radioengineering. 2020. V. 29, № 1. P. 1–9.

РЕЗУЛЬТАТЫ НОВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ CMPS ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

*М.Д. Проявин, М.В. Морозкин, В.Е. Котомина, Д.И. Соболев,
А.А. Орловский*

Институт прикладной физики, Нижний Новгород

Вакуумная электроника движется в сторону уменьшения масштаба электродинамических элементов в процессе перехода к более высоким частотам. Сложность многих изделий не позволяет или сильно усложняет их изготовление, из-за чего многие идеи остаются теоретическими. Современные технологии 3D-печати способны решить эту проблему, так как по сравнению с современными станками обладают большими возможностями по точности, производительности и стоимости. Однако это касается только диэлектрических изделий, так как 3D-принтеры по металлу в настоящее время значительно уступают ЧПУ-станкам по всем параметрам. В данной работе предлагается метод многоступенчатой химической металлизации фотополимерных структур (CMPS), напечатанных с использованием технологий стереолитографии. Экспериментальные испытания различных элементов вакуумных устройств, изготовленных по разработанной технологии, демонстрируют большие перспективы такого подхода.

Фотополимерные изделия плохо поддаются металлизации. Ее можно осуществить относительно просто магнетронным напылением, но для этого метода характерна только планарная конфигурация объекта. Химическую металлизацию фотополимера можно провести путем многоступенчатой промки реагентов в области рабочей поверхности элемента прибора. При этом возможна металлизация сложных поверхностей и каналов.

Свойства металлизированной поверхности исследовались разными способами. Испытания на отражение показали, что параметры зеркал с медным химическим покрытием незначительно отличаются от их традиционных аналогов на частотах до 500 ГГц. Образцы, напечатанные на 3D-принтере и металлизированные, успешно прошли испытания на вакуумную стойкость.

Эксперименты по измерению диэлектрических свойств показали, что электрическая прочность одного из фотополимеров составляет более 30 кВ/мм.

В качестве первого испытания был изготовлен режекторный фильтр с резонатором пирамидальной формы с толщиной медного слоя около 10 мкм. Затухание 27 дБ было достигнуто на расчетной частоте 240 ГГц, что делает фильтр перспективным в системах диагностики плазмы. Помимо элементов с тонким медным покрытием, мы создали электродинамические элементы, способные выдерживать пиковые нагрузки СВЧ-мощности в несколько сотен мегаватт.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 21-19-00884.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ ПОЛЯРИЗАТОР

В.И. Белоусов¹, Г.И. Калынова¹, Д.Ю. Щегольков¹, Н.К. Харчев²

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

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

Универсальный поляризатор, предложенный в [1], нашёл достаточно широкое применение в установках управляемого термоядерного синтеза, использующих для генерации токов увлечения в плазме мощные гиротроны миллиметрового диапазона длин волн [2, 3]. Такой поляризатор является одним из основных элементов линии передачи мощного излучения и позволяет существенно повысить эффективность взаимодействия СВЧ-излучения с плазмой.

Принцип действия такого устройства основан на том, что при отражении СВЧ-излучения от гофрированного зеркала появляется сдвиг фаз δ между двумя нормальными по отношению к решётке волнами E и H , по которым может быть разложен узконаправленный волновой пучок с любыми параметрами поляризации. При этом коэффициенты этого разложения будут зависеть от угла поворота направления рёбер решётки относительно плоскости падения волны.

Использование комбинации из двух таких зеркал (при определённом подборе параметров гофрировки), имеющих возможность независимого вращения каждого вокруг осей, перпендикулярных поверхностям зеркал, позволяет получить поляризацию волнового пучка, прошедшего через это устройство, с любыми необходимыми для дальнейшего использования поляризационными параметрами.

1. *Belousov V.I. Auxiliary elements of high power quasi-optical transmission lines / V.I. Belousov, E.V. Koposova, I.M. Orlova, N.Yu. Peskov, M.I. Petelin // Coll. Pap. "Gyrotron" / ed. V.A. Fljagin, Inst. Appl. Phys. Gorky, 1989.*

2. *Thumm M.K.A., Denisov G.G., Sakamoto K., Tran M.Q. // Nuclear Fusion. 2019. V. 59. P. 073001. URL: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2005>.*

3. *Денисов Г.Г., Малыгин В.И., Цветков А.И. и др. Микроволновый комплекс мегаваттного уровня мощности для системы электронно-циклотронного резонансного нагрева плазмы и поддержания тока в Токамаке Т-15МД // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. LXIII, № 5/6. С. 369–382.*

МОЩНЫЙ ДЛИННОИМПУЛЬСНЫЙ ЛСЭ-ГЕНЕРАТОР СУБТЕРАГЕРЦОВОГО/ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА: РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ*

*Н.Ю. Песков^{1,2}, А.В. Аржанников², В.И. Белоусов¹, Н.С. Гинзбург^{1,2},
Ю.С. Опарина^{1,2}, А.В. Савилов¹, Е.С. Сандалов², С.Л. Сеницкий²,
Д.И. Соболев¹, В.Ю. Заславский¹*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

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

Создание мощного длинноимпульсного ЛСЭ, работающего от субтерагерцового до терагерцового диапазона, инициировано в сотрудничестве ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Нижний Новгород) на базе нового поколения линейных индукционных ускорителей «ЛИУ» 5–20 МэВ / 2 кА / 200 нс. Целью проекта является достижение в указанных диапазонах рекордного субгигаваттного уровня мощности и энергосодержания в импульсах излучения до 10–100 Дж. Одной из ключевых проблем при реализации данного ЛСЭ является разработка электродинамической системы, способной обеспечить стабильную узкополосную генерацию в условиях существенной сверхразмерности.

Для проводки интенсивного электронного пучка, формируемого ЛИУ, через пространство взаимодействия ЛСЭ диаметр системы должен быть $\varnothing \geq 20$ мм, что на порядки превышает длину волны излучения в обсуждаемых диапазонах. Для решения проблемы селекции мод в данных условиях исследованы два основных типа электродинамических систем: 1) модифицированные брэгговские резонаторы и 2) квазиоптические резонаторы тальбо-типа.

Отличительной особенностью модифицированных брэгговских резонаторов является включение в цепь обратной связи квазикритических волн,

что позволяет существенно улучшить их селективные свойства по сравнению с «традиционными» аналогами. Для работы в диапазоне 0,7 ТГц структуры данного типа были разработаны с диаметром $\varnothing \approx 20$ мм ($\varnothing/\lambda \sim 45$) и длиной около 5 см, осесимметричная гофрировка с периодом 0,43 мм и глубиной 0,15 мм обеспечивала цикл обратной связи $TE_{1,1} \leftrightarrow TE_{1,45} \leftrightarrow TE_{1,1}$. Трехмерное моделирование с использованием кода CST Microwave Studio показывает, что даже при таких больших поперечных размерах модифицированные брэгговские структуры позволяют осуществить селективное отражение рабочей волны с эффективностью ~ 80 – 90% по мощности. Проведенные «холодные» электродинамические тесты подтверждают результаты моделирования и демонстрируют наличие эффективного узкополосного отражения в расчетной области частот.

Для проведения «холодных» тестов макет резонатора тальбо-типа был изготовлен с диаметром 36 мм ($\varnothing/\lambda \sim 40$) и длиной около 80 см для работы в диапазоне частот около 0,3 ТГц. Расположенные по краям зеркала (шайбы) имели ширину 4 мм, на выходном зеркале было выполнено отверстие связи диаметром 2 мм (положение отверстия соответствовало положению расчетного максимума поля). Возбуждение резонатора осуществлялось с входной стороны резонатора волной $TE_{1,1}$ -типа. Согласно проведенному моделированию эта волна эффективно трансформируется в волну $TE_{1,7}$, максимально представленную в супермоду на рабочей частоте. Детектирование выходного сигнала проводилось через указанное отверстие связи.

Моделирование показывает, что на частоте, соответствующей искомой супермоду, должен наблюдаться пик мощности в отверстии связи. В соответствии с результатами моделирования в проведенных «холодных» тестах наблюдался хорошо различимый пик детектируемой выходной мощности на расчетных частотах, что, таким образом, подтверждало работоспособность резонатора данного типа.

Работа проводится при частичной поддержке РФФИ (грант 19-12-00212).

НОВЫЕ ТИПЫ ПРОДОЛЬНО-ЩЕЛЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ГИРОТРОНОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

*Ю.Ю. Данилов, А.Н. Леонтьев, А.М. Малкин, Р.М. Розенталь,
Д.Ю. Щегольков*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В настоящее время ведутся интенсивные исследования возможностей генерации мощного СВЧ-излучения в коротковолновой части миллиметрового диапазона. К примеру, ведутся разработки генераторов на поверхностной волне диапазонов 75 и 150 ГГц с выходной мощностью около 100 МВт [1, 2] и диапазона 330 ГГц с выходной мощностью около 40 МВт [3]. Вместе с тем значительный интерес представляет использование для этой цели гиротронов, поскольку при циклотронном взаимодействии отсутствует необходимость транспортировки электронного потока вблизи поверхности электродинамической системы. Однако существенной проблемой при этом является селективное возбуждение рабочего колебания.

В данной работе предложен новый тип высокоселективных резонаторов для сильноточных гиротронов, основанных на связи мод с кратными азимутальными индексами и близкими значениями собственных чисел. На основе аналитического подхода и численного моделирования показано, что в сверхразмерном цилиндрическом резонаторе с M продольно-щелевыми разрезами связь парциальных мод регулярного волновода с M и $2M$ азимутальными индексами может приводить к формированию высокодобротных мод с малыми радиальными потерями на квазикритических частотах. Это обеспечивает возможность селективного возбуждения подобных мод винтовыми электронными пучками в релятивистских гиротронах миллиметрового диапазона.

Показаны возможности использования данных резонаторов для создания гиротронов диапазона 60 ГГц с максимальной выходной мощностью более 200 МВт и относительной перестройкой частоты более 10 %, диапазона 95 ГГц с мощностью около 100 МВт и перестройкой частоты около 3 %, диапазона 300 ГГц с мощностью около 80 МВт и перестройкой частоты около 1 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0030-2021-0027 (программа «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года»).

1. *Malkin A.M. et al.* Relativistic sub-THz surface-wave oscillators with transverse gaussian-like radiation output // IEEE Electron Device Letters. 2021. V. 42, № 5. P. 751–754.

2. *Palitsin A.V. et al.* Design of W-band relativistic surface-wave oscillator with sheet electron beam // 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2021.

3. *Li S. et al.* Relativistic surface wave oscillator in Y-band with large oversized structures modulated by dual reflectors // Sci. Reports. 2020. V. 10. Art. 336.

ИСТОЧНИКИ МОЩНОГО МНОГОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

*А.А. Богдашов, И.Г. Гачев, Н.С. Гинзбург, Ю.М. Гузнов, И.В. Зотова,
А.Н. Леонтьев, Р.М. Розенталь, С.В. Самсонов, А.С. Сергеев*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Успешные эксперименты по созданию источников многозарядных ионов на основе электронно-циклотронного нагрева плазмы двухчастотным излучением сантиметрового диапазона [1, 2] имеют естественное продолжение и развитие при использовании более коротковолнового излучения, что позволяет поднять плотность плазмы и соответственно интенсивность ионных пучков. В традиционном одночастотном варианте это достигается при использовании гироприборов миллиметрового диапазона [3]. Естественно, что двухчастотные колебания могут быть получены в комплексе, состоящем из двух гиротронов, работающих на общую нагрузку. Однако такое решение является достаточно дорогостоящим. Значительно более технологичной представляется возможность получения многочастотной генерации в одном гироприборе.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований непрерывных многочастотных источников киловаттного уровня мощности К-диапазона на основе гирорезонансных ламп бегущей и обратной волны со спирально-гофрированным волноводом. Переход к многочастотным режимам осуществлялся за счет создания отражений выходного сигнала широкополосным отражателем брэгговского типа. Получены режимы с дискретной перестройкой расстояния между спектральными компонентами, соответствующие одновременному возбуждению нескольких продольных мод совокупной электродинамической системы. Обсуждается проблема перегрева вакуумного окна при работе в условиях сильных отражений выходного излучения. Предложена модифицированная конструкция отражателя, существенно снижающая риски термического повреждения окна.

Рассмотрены возможности создания источников с непрерывной независимой перестройкой расстояния между спектральными компонентами на основе гироклистрона, работающего в режиме самовозбуждения и управляемого входным сигналом.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0030-2021-0027 (программа «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года»).

1. *Skalyga V. et al.* Suppression of cyclotron instability in Electron Cyclotron Resonance ion sources by two-frequency heating // *Phys. Plasmas*. 2015. V. 22. P. 083509.

2. *Naselli E. et al.* Impact of two-close-frequency heating on ECR ion source plasma radio emission and stability // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2019. V. 28, № 8. Art. 085021 ; doi: 10.1088/1361-6595/ab32f9.

3. *Скалыга В.А. и др.* Сильноточные импульсные ЭЦР-источники ионов // *Прикладная физика*. 2019. № 1. С. 17.

ГЕОМЕТРООПТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ПРАВО- И ЛЕВОВРАЩАЮЩИХСЯ ВОЛН ВОЛНОВОДА КРУГОВОГО СЕЧЕНИЯ В ВОЛНОВЫЕ ПУЧКИ

С.Н. Власов, Е.В. Копосова

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В гиротронах [1] широко применяются квазиоптические трансформаторы волн, преобразующие волны волновода кругового сечения в узконаправленные волновые пучки. Геометрооптическая теория таких трансформаторов для волн определенного направления вращения была развита в [2, 3]. Многочисленные последующие работы посвящены усовершенствованию теории с учетом дифракции с целью повышения эффективности. В [4] приведены результаты исследований, показывающие, что трансформаторы такого типа могут эффективно работать одновременно как для мод одного направления вращения, так и для мод противоположного направления вращения без указания подробных сведений о методах расчета трансформатора. В данной работе строится теория в геометрооптическом приближении, в которой изучаются условия возможности построения трансформатора, работающего с модами обоих направлений вращения.

Работа выполнена в рамках проекта ИПФ РАН «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР-диапазона» КП РГТН (тема 0030-2021-0027).

1. *Запезалов В.Е.* Эволюция гиротронов // *Известия вузов. Радиофизика*. 2011. Т. 54, № 8/9. P. 559–572.

2. *Власов С.Н., Орлова И.М., Петелин М.И.* Квазиоптическая трансформация собственных волн волноводов кругового сечения посредством аксиально-симметричных рефлекторов // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1972. Т. 15, № 12. С. 1913–1918.

3. Власов С.Н., Ликин К.М. Геометрооптическая теория трансформаторов типов волн в свехразмерных волноводах // Гиротроны ; сб. научных трудов / под ред. В.А. Флягина. Горький : ИПФ АН СССР, 1980. С. 125–138.

4. Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N. Perspective gyrotrons with mode converter for co- and counter-rotation operating modes // Applied Physics Letters. 2015. V. 106. Art. 263501.

КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ ПРИ ДИФРАКЦИИ НА РЕШЕТКЕ

С.Н. Власов, Е.В. Копосова

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Определение эффективности передачи с одной апертуры на другую является одной из важных задач распространения волн [1, 2]. Она представляет интерес для физики миллиметрового и оптического диапазонов длин волн. В частности, актуальна задача об экстремальных свойствах отражательной решетки. В работе определена структура поля волнового пучка, при котором достигается максимум коэффициента передачи в один из дифракционных максимумов при рассеянии на решетке в конструкции, предложенной в качестве мультиплексера в [2].

Исследование ведется в квазиоптическом скалярном приближении, когда сечения волнового пучка, дифрагирующего на решетке, существенно превышают длину волны, и в случае отсутствия зависимости полей от координаты, перпендикулярной ребрам решетки. В этом случае поля можно описывать одной компонентой электрического или магнитного полей, направленных вдоль ребер решетки. Для определения коэффициента передачи используется точное решение дифракции плоской волны на решетке. Найдены структуры волновых пучков, реализующих максимальный коэффициент передачи в один из дифракционных максимумов. Определяются также структуры полей в других дифракционных максимумах.

Вследствие конечных размеров апертуры передача энергии сопровождается дифракционными потерями, которые могут быть небольшими в квазиоптическом приближении при малых значениях волнового параметра $\sqrt{\lambda L}/a_{\text{in,out}}$, λ – длина волны передаваемого излучения, L – расстояние, на которое осуществляется передача, $2a_{\text{out}}$ и $2a_{\text{in}}$ – размеры соответственно передающих и приемных апертур. Потери будут минимальны в том случае, если волновой пучок обеспечивает максимальную концентрацию поля на апертуре приемника. Определяются оптимальные конфигурации волнового пучка, обеспечивающие максимум коэффициента передачи.

Работа выполнена в рамках субсидии на выполнение госзадания ИПФ РАН (тема 003-2021-0001).

1. *Таланов В.И.* О синтезе антенн в многомодовых волноводах // Известия вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 7. С. 872–879.

2. *Belousov V.I., Denisov G.G., Peskov N.Yu.* Quasi-optical multiplexer base on reflecting diffraction grating // Int. J. Infr. Millimeter Waves. 1991. V. 12, № 9. P. 1035–1043.

3. *Бондаренко Н.Г., Таланов В.И.* Некоторые вопросы теории квазиоптических систем // Изв. вузов. Радиофизика. 1964. Т. 7, № 2. С. 313–327.

СУБТЕРАГЕРЦОВЫЕ ГИРОТРОНЫ С МНОГОЗЕРКАЛЬНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ КОНФОКАЛЬНОГО ТИПА

В.Ю. Заславский, М.Ю. Глявин, И.В. Зотова, Д.И. Соболев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Создание непрерывных источников когерентного электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн с уровнем мощности больше 100 Вт является актуальной задачей современной спектроскопии, диагностики и мониторинга различных сред и др. Перспективными приборами для решения указанных задач являются гиротроны. Основная проблема при реализации указанного класса источников в коротковолновых диапазонах связана с селективным возбуждением рабочей моды, особенно на гармониках циклотронной частоты.

Для решения этой задачи в работе предлагается использование многозеркальных «открытых» резонаторов в качестве электродинамической системы генератора. В частности, рассмотрен шестизеркальный конфокальный резонатор гиротронного типа. Достоинством предлагаемой схемы является эффективная электродинамическая селекция мод по двум координатам (продольной и поперечной).

В рамках комбинированного подхода, основанного на аналитических оценках и трёхмерном моделировании, продемонстрирована работоспособность указанной электродинамической системы генератора в диапазонах частот вблизи 200, 400 и 600 ГГц, в том числе с учётом влияния перекосов зеркал различного типа. Проведено трёхмерное PIC (particle-in-cell) моделирование 200 ГГц гиротрона на первой гармонике гирочастоты с разработанным шестизеркальным конфокальным резонатором. Показана возможность получения мощной (~ 10 кВт) узкополосной одномодовой генерации с плавной перестройкой частоты излучения ~ 5 %.

Работа выполнена в рамках госпрограммы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» (проект 0030-2021-0027).

УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ИМПУЛЬСАМИ МИКРОВОЛНОВОГО СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ

*А.А. Вихарев¹, Н.С. Гинзбург¹, И.В. Зотова¹, С.В. Кузиков¹,
М.И. Яландин²*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Для высокоградиентного ускорения электронов предлагается использовать новый класс импульсных релятивистских СВЧ-генераторов на основе черенковского сверхизлучения (СИ) сильноточных протяженных электронных сгустков. В настоящее время генераторы СИ обеспечивают рекордный уровень мощности в миллиметровом диапазоне длин волн до 2 ГВт в ультракоротких импульсах с длительностью 250–300 пс. Проведенные исследования показывают возможность как дальнейшего увеличения пиковой мощности импульсов СИ в 8-мм диапазоне длин волн (благодаря когерентному суммированию таких импульсов), так и продвижения генераторов СИ в коротковолновую часть миллиметрового диапазона с уровнем мощности 100–150 МВт. Ожидается, что вследствие ультракороткой длительности высокочастотных импульсов СИ удастся существенно снизить пробойные напряжения в несверхпроводящих металлических структурах.

На основе PIC-моделирования исследовано ускорение электронов импульсами СИ в различных типах ускоряющих структур. Для случая начальной энергии электронов 300 кэВ рассматривалось ускорение 38 ГГц /0,5 ГВт/0,3 нс импульсами в структуре типа pill-box. Согласно расчетам максимальный градиент ускорения достигает 550 МВ/м с поверхностными полями до 650 МВ/м. Максимальный прирост энергии при указанных параметрах будет более 1 МэВ. При реализации описанной схемы на более высокой частоте 140 ГГц и параметрах импульса СИ 200 пс/50 МВт, полученных в экспериментах, градиент ускорения может быть увеличен более чем в два раза. Для случая большой начальной энергии на уровне 3 МэВ рассматривались системы ячеек с запиткой сбоку. Лучшие результаты с полным набором энергии 7 МэВ получены для 90 ГГц/150 МВт/1 нс импульса СИ в ускоряющих ячейках на ri-моде.

Работа была поддержана Российским научным фондом (грант 21-19-00260).

АКТИВНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД В ЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ С ВЫСОКОДОБРОТНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

М.Н. Вилков, Н.С. Гинзбург, С.Е. Фильченков

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В физике лазеров хорошо известен механизм генерации ультракоротких импульсов (УКИ), основанный на активной синхронизации мод рабочего резонатора в процессе периодической модуляции его добротности с периодом, кратным полному времени прохождения светового импульса по резонатору [1, 2]. Указанный метод УКИ-генерации был реализован экспериментально [3, 4] в схеме ЛСЭ с PIN-диодом в цепи обратной связи, на который подавалось периодически меняющееся напряжение. В работе проведено моделирование указанного эксперимента в предположении о высокой добротности рабочего резонатора. Приводится сопоставление с результатами моделирования [5] активной синхронизации мод в лампе обратной волны с дополнительным отражателем в виде полупроводниковой пластины, проводимость которой модулируется излучением лазера.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания по теме 0035-2019-0001 и проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-08-00308 А.

1. *Haus A.* // IEEE J. of Select. Topics in Quant. Electron. 2000. V. 6, № 6. P. 1173.
2. *Крюков П.Г.* // Квантовая электроника. 2001. Т. 31, № 2. С. 95–119.
3. *Jerby E., Bekefi G., Hara T.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. 1992. V. 318, № 1/3. P. 114–116.
4. *Jerby E., Bekefi G.* // IEEE J. Quantum Electron. 1993. V. 29, № 11. P. 2845–2851.
5. *Denisov G., Kuzikov S., Savilov A.* // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. Art. 103102.

ПРОСВЕТЛЕНИЕ ПЛАСТИНЫ РАФЛОНА В ДИАПАЗОНЕ 120–140 ГГЦ МЕТОДОМ ЗАСВЕРЛИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

А.В. Рябов, Д.И. Соболев

Институт прикладной физики, Нижний Новгород

В настоящее время активно развивается вакуумная СВЧ-электроника, в частности ведется поиск новых методов для оптимизации окон выхода микроволнового излучения. Одним из востребованных направлений является минимизация коэффициента отражения в широкой полосе частот.

Данное направление тесно связано с поиском новых материалов и способов их обработки.

Радиационно-модифицированный фторопласт (*рафлон*) обладает низким показателем диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 2,1-2,2$) и высокими прочностными характеристиками, это позволяет использовать его в приложениях СВЧ-электроники. Просветляющие слои на поверхности пластины из рафлона могут быть созданы с помощью механической выборки части материала. В простейшем случае можно получить четвертьволновой слой с помощью засверливания отверстиями с высокой плотностью.

В данной работе экспериментально исследовано СВЧ-окно из рафлона с цилиндрическими неоднородностями с шестиугольным сотовым замощением на поверхности диэлектрика. Отверстия создавались с помощью сверления фрезой диаметром $D = 0,4$ мм на глубину $H = 0,5$ мм. Отмечена эффективность в диапазоне частот 120–140 ГГц. Для работы в диапазоне частот до 140 ГГц метод засверливания может быть оправдан как один из самых простых и доступных способов просветления диэлектриков. Показано, что экспериментальные результаты согласуются с теоретическим расчетом в рамках плоскостоего приближения.

Работа выполнена в рамках госзадания (тема 0030-2021-0001).

АНАЛИЗ СПЕЦИФИКИ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ГИРОТРОНОВ С ВЫВОДОМ ИЗЛУЧЕНИЯ В СТОРОНУ КАТОДА

А.С. Зуев, М.И. Петелин, А.С. Седов, Е.С. Семенов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

На сегодняшний день популярным направлением развития гиротронов является повышение частоты излучения. Из-за высоких требований к магнитным системам при повышении рабочей частоты приходится работать на модах, синхронных с высокими циклотронными гармониками. Разработка терагерцовых гиротронов на высоких гармониках осложняется высокой конкуренцией со стороны мод, работающих на более низких циклотронных гармониках. Вместе с тем по мере роста рабочей частоты неизбежно растет влияние омических потерь на режим работы гиротрона (см., например, [1]). Доля омических потерь в терагерцовых гиротронах может составлять более 90 % от всей энергии, отобранной у электронного пучка. Это приводит к существенному падению КПД и мощности выходного излучения.

Одним из способов улучшения выходных характеристик терагерцовых гиротронов является переход к работе на высоких продольных модах. В этом случае гиротрон работает в так называемом ЛОВ-режиме, т.е. элек-

тронный пучок взаимодействует с модами, распространяющимися навстречу ему. Вывод излучения в сторону коллектора (канонический вывод излучения) становится менее эффективным, поскольку в такой системе излучение дважды проходит весь резонатор. Альтернативным вариантом является вывод излучения в противоположную сторону (в сторону катода). Переход к выводу излучения в сторону катода позволяет в два раза снизить длину прохода и соответственно снизить уровень омических потерь. Режим работы гиротрона с выходным расширением резонатора со стороны электронной пушки впервые предложен в [2].

В работе исследуется перспективность работы терагерцовых гиротронов на высоких продольных модах с катодным выводом излучения. Для сравнения рассматриваются два варианта гиротрона на частоте 0,78 ТГц с различным профилем резонатора: гиротрон с электродинамической системой, обеспечивающей «канонический» вывод излучения в сторону коллектора, и гиротрон с выводом излучения в сторону катода.

Работа выполнена в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации до 2024 года» (проект 0030-2021-0027).

1. Запевалов В.Е., Зуев А.С., Паришин В.В., Семенов Е.С., Серов Е.А. // Известия вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 4. С. 265–275.

2. Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С. // Известия вузов. ПНД. 2012. Т. 20, № 3. С. 70–80.

ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ПЛАВНОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В ГИРОТРОНАХ С КОНУСООБРАЗНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

*И.Е. Зайцева², В.Е. Запелов¹, А.С. Зуев¹, С.В. Колосов²,
Е.С. Семенов¹*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск

Гиротрон – перспективный прибор вакуумной электроники, основанный на магнитотормозном излучении. Одним из недостатков гиротронов является узкополосность генерируемого излучения. Полоса непрерывной перестройки частоты при работе на одной из собственных мод резонатора гиротрона, как правило, не превышает доли процента от средней рабочей частоты. Широкополосная непрерывная перестройка частоты в гиротроне может быть реализована при помощи последовательного возбуждения серии мод с разным продольным индексом (см., например, [1, 2]). При этом перестройка частоты осуществляется посредством изменения ведущего магнитного поля и/или управления потенциалами электронно-оптической системы.

В работе исследуется возможность реализации широкополосной перестройки частоты в гиротронах с конусообразными резонаторами. Рассматриваются проекты гиротрона, работающие в разных частотных диапазонах с «каноническим» выводом излучения в сторону коллектора и с выводом излучения в сторону электронной пушки, предложенным в [3]. Расчеты проведены с учетом неоднородного распределения ведущего магнитного поля, при этом рассматривались достаточно длинные резонаторы (длина конического участка резонатора превышала типичную длину однородного участка магнитного поля). Проведено сопоставление расчетных данных, полученных при помощи программных комплексов Angel и КЕДР. Показано, что неоднородность магнитного поля приводит к значительному росту уровня мощности выходного излучения практически во всей полосе и увеличению диапазона перестройки за счет локализации электронно-волновой взаимодействия. Показано, что диапазон перестройки в гиротронах с конусообразными резонаторами может превышать 7 % от средней рабочей частоты.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-30071).

1. *Torrezan A.C., Han S.-T., Mastovsky I. et al.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. V. 38, № 6. P. 1150–1159.

2. *Fedotov A.E., Rozental R.M., Zotova I.V. et al.* // J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2018. V. 39, № 10. P. 975–983.

3. *Завольский Н.А., Запелов В.Е., Мусеев М.А., Седов А.С.* // Известия вузов. ПНД. 2012. Т. 20, № 3. С. 70–80.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ГИРОТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ КОМПОНЕНТОВ СОВРЕМЕННОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

М.В. Каменский, М.В. Морозкин, А.А. Орловский, М.Д. Проявин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Современные гиротронные комплексы невозможно представить без автоматизированной системы сбора данных, управления и блокировок. Автоматизация позволяет расширить область применения этих установок, делает их более привлекательными для широкого круга приложений.

Автоматизированные системы, применяемые в настоящее время в гиротронных комплексах ИПФ РАН, имеют ряд недостатков, таких как низкая скорость обработки данных, слабая защита от высоковольтных наводок и т.д. Для решения этих проблем разрабатывается новая система управления, основанная на компонентах современной микроэлектроники: микроконтроллерах, датчиках температуры и протока, цифровых изоляторах и др. Целью разработки является создание системы управления, обладающей низкой стоимостью при высоких показателях быстродействия и точности.

Одним из важных компонентов комплекса является измеритель мощности выходного излучения – калориметр. Для снижения инерционности и погрешностей измерений калориметр был существенно усовершенствован. Была разработана СВЧ-нагрузка из пластика с низкой теплоемкостью и теплопроводностью, изготовленная с использованием технологий 3D-печати. Высокоточные датчики температуры были интегрированы непосредственно в корпус калориметра, а использование точного расходомера и отдельной платы для сбора и обработки данных позволило достичь высокой чувствительности и малой инерционности измерений. Наиболее актуальна данная доработка для маломощных гиротронов, работающих в субтерагерцовом диапазоне частот.

При работе гиротронного комплекса, особенно в импульсном режиме, есть риск возникновения электрического пробоя или появления наводок на проводах устройств, что может вывести из строя систему управления, привести к получению некорректных данных и даже к выходу гиротрона из строя. С целью минимизации подобных рисков была реализована электрическая схема, имеющая защиту от наводок. Передача данных с датчиков на главный контроллер происходила через цифровой повторитель сигналов, что позволяло использовать независимые линии питания измерительной аппаратуры и платы управления. Цепи питания были также гальванически развязаны с остальным стендом. Данный подход был распространен на все части системы автоматизации комплекса.

В каждый канал системы охлаждения были интегрированы датчики температуры и расхода воды, что позволило реализовать в системе управления контроль поглощаемой мощности во всех элементах гиротрона: в резонаторе, выходном окне, аноде, коллекторе и др. Такой подход позволяет рассчитывать мощность излучения гиротрона в реальном времени из баланса мощностей без использования калориметра, например при работе комплекса на полезную нагрузку.

Для гиротронов со сложной топологией магнитного поля, требующих корректировки поля основного соленоида с помощью набора дополнительных катушек в катодной и коллекторной областях, была реализована система контроля токов и напряжений этих катушек. Данная блокировка позволяет контролировать заданный профиль магнитного поля и препятствует попаданию высокоэнергетического потока электронов на элементы гиротрона вне расчетных областей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 21-19-00884).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГИРОТРОНА ДЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ, ОПТИМИЗИРОВАННОГО ДЛЯ РАБОТЫ НА ЧАСТОТАХ 18–30 ГГц

*А.А. Ананичев, М.В. Каменский, А.Г. Лучинин, М.В. Морозкин,
М.Д. Проявин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Гиротрон – один из наиболее перспективных источников мощного ЭМ-излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне. Спектр приложений гиротрона довольно широк: спекание керамических и композитных материалов, ЭЦР-нагрев в источниках ионов и установках УТС, спектроскопия, диагностика различных сред и т.д.

В ряде приложений, в том числе ЭЦР-нагреве плазмы и спектроскопии, возникает необходимость в сильном изменении частоты излучения. Так как использование нескольких гиротронных комплексов требует больших временных и финансовых затрат, целесообразно использовать один гиротрон, способный работать на разных частотах с достаточно высоким КПД.

В данной работе проведены исследования технологического гиротрона, работающего в двух режимах с частотами 30 ГГц (мода TE_{02} на второй циклотронной гармонике) и 18 ГГц (мода TE_{31} на основном циклотронном резонансе). Для каждого режима генерации с помощью катодной катушки

подбирался оптимальный режим работы магнетронно-инжекторной пушки. Также были проведены эксперименты с коррекцией продольного распределения магнитного поля в области резонатора с помощью трех последовательно расположенных независимых катушек, намотанных непосредственно на корпус прибора.

При токе пучка 1,4 А и ускоряющем напряжении $U = 20$ кВ в режиме работы 30 ГГц была экспериментально получена мощность 9,8 кВт с КПД 35 %.

Изначально выходное окно гиротрона было согласовано только на частоте 30 ГГц. Для мощной генерации с частотой 18 ГГц была рассчитана и изготовлена дополнительная пластина из нитрида бора, которая закреплялась вплотную к основному окну для согласования на этой частоте.

В режиме 18 ГГц при токе пучка 1 А и ускоряющем напряжении $U = 23$ кВ была получена мощность 8 кВт при КПД 35 %. Эксперименты с большим значением тока электронного пучка не проводились из-за риска повреждения крепления дополнительного окна.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение научных исследований по теме 0030-2021-0027.

КВАЗИАНАЛИТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГИРОЛОВ С ЗИГЗАГООБРАЗНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Е.М. Новак, А.В. Савилов, С.В. Самсонов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Недавно для электронных циклотронных источников коротковолнового когерентного электромагнитного излучения была предложена микроволновая система в виде квазиоптической линии передачи [1]. Система состоит из фокусирующих зеркал, которые периодически расположены вдоль продольной оси координат и обеспечивают транспортировку гауссова волнового пучка по зигзагообразной траектории. Рабочий пучок электронов распространяется вдоль той же оси, так что электронный пучок периодически пересекает волновой пучок. Электронно-волновое циклотронное взаимодействие происходит в областях, где волна распространяется строго поперек электронного пучка, что приводит к электронно-волновому взаимодействию гиротронного типа с минимальной чувствительностью к скоростному разбросу частиц в пучке. Трехмерное PIC-моделирование демонстрирует привлекательность этого «зигзагообразного» циклотронного мазера для

реализации генераторов обратной волны (ЛОВ), работающих в субТГц-диапазоне частот с октавной полосой перестройки частоты.

В данной работе мы развиваем квазианалитическую линейную теорию такой гироЛОВ. Эта теория объясняет особенности изменения рабочей частоты и мощности выходного сигнала в процессе широкополосной перестройки частоты за счет изменения рабочего магнитного поля. В частности, объясняется сложный дискретоподобный характер зависимости частоты возбуждаемой волны от циклотронной частоты с периодически возникающими «перескоками» частоты, а также различные сценарии изменения выходной мощности и частоты генерации при изменении внешнего магнитного поля или начальной энергии частиц.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 21-19-00443).

1. *Samsonov S.V. Cyclotron resonance maser with zigzag quasi-optical transmission line: concept and modeling / S.V. Samsonov, G.G. Denisov, A.A. Bogdashov, I.G. Gachev // IEEE Trans. Electron Dev. 2021. V. 68, № 11. P. 5846–5850.*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СЕЛЕКЦИИ МОД ЗА СЧЕТ РЕЗОНАНСНЫХ РАССЕИВАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КВАЗИОПТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

*А.А. Ананичев, А.Э. Федотов, А.П. Фокин, А.А. Богдашов,
И.В. Бандуркин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Селекция колебаний – одна из основных задач при разработке современных высокочастотных источников излучения – гиротронов [1]. Так как частота излучения гиротрона близка к циклотронной частоте электронов, их продвижение в субтерагерцовый и терагерцовый диапазоны частот ограничивается параметрами магнитных систем. Возможным решением проблемы является переход к работе на гармониках циклотронной частоты, однако при этом усиливается проблема конкуренции мод, связанная с повышением плотности спектра мод и заметным снижением связи электронного пучка с модами на более высоких гармониках. Поэтому возникает необходимость в использовании различных методов селекции колебаний [2].

В данной работе рассмотрен метод, основанный на использовании в резонаторе резонансного рассеивающего элемента, собственная частота которого совпадает с частотой рабочей моды на гармонике [3]. В качестве рассеивателя была рассмотрена канавка прямоугольного сечения, расположенная на зеркале квазиоптического резонатора. Такой элемент влияет на колебания в резонаторе, практически не изменяя добротность рабочей моды с

выбранной частотой, при этом заметно снижая добротность остальных мод-конкурентов. Подобное уменьшение добротности паразитных колебаний увеличивает их стартовые токи, что должно позволить возбудить моды на высоких гармониках.

Вследствие сложности возбуждения высоких мод цилиндрического резонатора, традиционно применяемого в гиротронах, в данной работе рассмотрена модельная задача: исследование влияния параметров прямоугольной канавки на добротность собственных колебаний квазиоптического полуконфокального резонатора. Канавка размещается вдоль диаметра плоского зеркала, что упрощает аналитические оценки. Для проверки эффективности данного метода сначала была проведена теоретическая оценка влияния размеров канавки на добротность различных собственных колебаний резонатора и выполнено моделирование отражения плоской ЭМ-волны от зеркала с канавкой в программе CST STUDIO. На основе этих расчетов были выбраны несколько вариантов рассеивателей для дальнейших исследований. Для них было проведено численное моделирование возбуждения полного двухзеркального резонатора. Далее были изготовлены плоские зеркала с выбранными канавками и проведены эксперименты по измерению добротности реального резонатора на малом уровне мощности. Полученные в эксперименте результаты согласуются с теоретическими оценками.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-72-10127).

1. *Flyagin V.A.* The Gyrotron / V.A. Flyagin, A.V. Gaponov, I. Petelin, and V.K. Yulpatov // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1977. V. 25, № 6. P. 514–521 ; doi: 10.1109/TMTT.1977.1129149.

2. *Belousov V.I. et al.* Studies of a gyrotron with the echelette cavity // Radiophys. Quantum Electron. 2014. V. 57, № 6. P. 446–454 ; doi: 10.1007/s11141-014-9527-4.

3. *Bandurkin I.V.* Method of providing the high cyclotron harmonic operation selectivity in a gyrotron with a spatially developed operating mode / I.V. Bandurkin, M.Y. Glyavin, S.V. Kuzikov, P.B. Makhalov, I.V. Osharin, and A.V. Savilov // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. V. 64, № 9. P. 3893–3897 ; doi: 10.1109/TED.2017.2731982.

СТАБИЛИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ ГИРОТРОНОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ ПРИ ПЕРЕСТРОЙКЕ ЧАСТОТЫ ЗА СЧЕТ СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕСКОЛЬКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

*А.А. Ананичев¹, А.А. Орловский^{1,2}, А.С. Седов¹, А.И. Цветков^{1,2},
Н.В. Чекмарев¹*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород

Гиротроны заслуженно считаются наиболее перспективными источниками мощного электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Спектр приложений современных гиротронов достаточно широк: спекание керамических и композитных материалов, ЭЦР-нагрев плазмы в термоядерных установках и источниках многозарядных ионов, спектроскопия и диагностика различных сред. Для целого ряда приложений, особенно спектроскопических, важно обеспечить возможность плавной перестройки частоты генерации при стабильном уровне мощности генерируемого излучения.

В работе исследуется возможность стабилизации мощности излучения гиротрона с частотой 0,26 ТГц при перестройке частоты путем одновременного изменения двух управляющих параметров, выбор которых зависит как от технических характеристик гиротронного комплекса (параметров источников питания), так и от специфики решаемой прикладной задачи.

Исходя из анализа полученных экспериментальных данных и специфики применения гиротронов для задач молекулярной спектроскопии высокого разрешения были выбраны два способа стабилизации мощности:

- 1) изменение температуры охлаждающей жидкости резонатора и индукции ведущего магнитного поля;
- 2) изменение температуры охлаждающей жидкости резонатора и ускоряющего напряжения.

Оба предложенных способа обеспечивают стабилизацию выходной мощности на уровне 400 Вт с точностью не хуже погрешности измерения использованной в экспериментах калориметрической нагрузки (10 Вт), т.е. вариации мощности составляют менее 2,5 %. Однако исходя из характеристик, используемых в гиротронном комплексе источников питания, более перспективным выглядит второй из предложенных вариантов, поскольку чувствительность при изменении напряжения составляет 0,02 Вт/В при минимальном изменении напряжения на 100 В – управление мощностью с шагом 2 Вт, а при изменении индукции магнитного поля (силы тока в криомагните) – около 1000 Вт/А с минимально возможным шагом 10 мА, т.е. около 10 Вт.

Предложенный подход представляется перспективным для задач молекулярной спектроскопии высокого разрешения, требующих долговременной стабильности мощности излучения при относительно широкополосном изменении частоты генерации для измерения характерных спектральных линий исследуемых веществ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение научных исследований по теме 0030-2021-0001.

**ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ
ИЗЛУЧЕНИЯ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА**

СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ И МАТРИЧНОГО ПРИЕМА ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ*

В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин

ООО «МВЭЙВ», Черноголовка

Создание компактных и дешевых электронных устройств, работающих в терагерцовом (ТГц) частотном диапазоне (0,1–1 ТГц) является одним из наиболее перспективных направлений развития современной электроники. Любой замкнутый терагерцовый аппаратный комплекс должен включать две компоненты: детектор излучения и генератор. Компания «МВЭЙВ» разработала и серийно выпускает линейку матричных приемников ТГц-излучения.

Детекторы 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 выпрямлением переменного потенциала в высококачественном двумерном слое на базе GaAs- или Si-гетероструктур [1–3].



Рис. 1. Генератор на основе ЛПД 100 ГГц (1 Вт) с камерой на 1024 детектора TERA-1024

200 мВт (200 ГГц), 60 мВт (300 ГГц) и 10 мВт (600 ГГц). Перестраиваемые генераторы покрывают частотные диапазоны 70–105 ГГц, 140–210 ГГц и 280–340 ГГц с рекордными для рынка параметрами по мощности. Перестраиваемые генераторы могут работать от внешнего задающего модуля синтезатора с частотой 7–15 ГГц.

На основании анализа клиентской базы, накопленной за 10 лет, делаются прогнозы развития мирового рынка терагерцовых устройств.

1. *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.

2. *Tsydynzhapov G., Gusikhin P., Muravev V. et al.* New real-time sub-terahertz security body scanner // *J. Infrared Millim. Terahertz Waves.* 2020. V. 41. P. 632–641.

3. *Schepetilnikov A.V., Gusikhin P.A., Muravev V.M. et al.* New ultra-fast sub-terahertz linear scanner for postal security screening // *J. Infrared Millim. Terahertz Waves.* 2020. V. 41. P. 655–664.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ТЕРАГЕРЦОВОЙ ПЛАЗМОНИКЕ НА НОВОСИБИРСКОМ ЛАЗЕРЕ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ*

*В.В. Герасимов^{1,2}, Б.А. Князев^{1,2}, А.К. Никитин^{2,3}, О.В. Хитров³,
А.Г. Лемзяков^{1,2}, О.Э. Камешков^{1,2}, Н.Д. Осинцева^{1,2}, В.С. Павельев⁴*

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

² Новосибирский государственный университет

³ Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

⁴ Самарский национальный исследовательский университет

В докладе представлен обзор экспериментов по исследованию терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), распространяющихся по плоским, изогнутым и цилиндрическим проводящим поверхностям, которые выполнялись на Новосибирском лазере на свободных электронах (НЛСЭ) в последние годы.

Было показано, что эффективность захвата ТГц поверхностных электромагнитных волн методом дифракции на краю составляет десятки процентов, а длины пробега ППП на плоской металл-диэлектрической поверхности достаточно большие (порядка десятка сантиметров) по сравнению с видимым и ИК-диапазонами. Продемонстрировано, что ТГц поверхностными волнами можно эффективно управлять с использованием плоских зеркал и диэлектрических делителей, а также направлять по изогнутым поверхностям. Все это позволяет реализовать различные оптические схемы макроскопических масштабов с использованием ТГц ППП. Например, впервые продемонстрирована возможность локации объектов, скрытых за линией горизонта на проводящей искривленной поверхности. С использованием НЛСЭ реализована интерферометрия поверхности с использованием ППП, позволяющая исследовать диэлектрические свойства металлических поверхностей и пленок толщиной до 100 нм, нанесенных на эти поверхности.

Впервые продемонстрировано возбуждение плазмонов с орбитальным угловым моментом на осесимметричных односвязных передающих линиях при дифракции на входном торце вихревых радиально поляризованных пучков. Показано, что эти плазмоны распространяются на расстояние до 150 мм по винтовым траекториям, дифрагируют на конце линии и преобразуются в объемные волны с орбитальным угловым моментом, имеющие тот же топологический заряд, который имел возбуждавший плазмоны пучок. Мы полагаем, что, используя комбинации вихревых пучков на входе, можно создать плазмонные мультиплексные коммуникационные линии.

**РТ-СИММЕТРИЧНАЯ И КИРАЛЬНАЯ НЕЛОКАЛЬНАЯ
ТЕРАГЕРЦОВАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ
В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ
ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФАЗЫ $Hg_{1-x}Cd_xTe$**

*А.В. Галеева¹, А.С. Казаков¹, А.И. Артамкин¹, Л.И. Рябова¹,
С.А. Дворецкий², Н.Н. Михайлов², М.И. Банников³, С.Н. Данилов⁴,
Д.Р. Хохлов^{1,3}*

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

³ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

⁴ University of Regensburg, Regensburg, Germany

В работе исследована терагерцовая фотопроводимость в пленках на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с инверсной (топологическая фаза) и прямой (тривиальная фаза) структурой зонного спектра при приложении магнитного поля в фарадеевской геометрии. Показано, что в структурах на основе топологической фазы $Hg_{1-x}Cd_xTe$ сигнал фотопроводимости асимметричен по магнитному полю, что можно рассматривать как нарушение Т-симметрии. Кроме того, фотопроводимость оказывается несимметричной для двух зеркально расположенных пар потенциальных контактов, что можно трактовать как нарушение Р-симметрии. В то же время фотоотклик не изменяется при одновременной инверсии магнитного поля и замене пары потенциальных контактов на зеркально расположенную, демонстрируя РТ-инвариантность. Важно отметить, что в равновесных условиях Р- и Т-симметрии сохраняются.

Продемонстрировано, что нарушение Р- и Т-симметрии обусловлено возникновением нелокальной краевой фотопроводимости под действием импульсов терагерцового излучения. Краевые фототоки являются киральными и нечетными по магнитному полю и по приложенному напряжению.

Обсуждаются возможные механизмы эффекта.

ТЕХНОЛОГИИ ПРОПУСКАЮЩЕЙ И ОТРАЖАЮЩЕЙ СИЛОВОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

В.С. Павельев^{1,2}, К.Н. Тукмаков², А.С. Решетников², А.Н. Агафонов², В.А. Соيفер^{1,2}, Б.А. Князев^{3,4}, Н.Д. Осинцева^{3,4}, Ю.Ю. Чопорова^{3,4}, М.С. Комленок⁵, Т.В. Кононенко⁵, В.И. Конов⁵, Г.Н. Кулипанов³, Н.А. Винокуров³

¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара

² Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

³ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

⁴ Новосибирский государственный университет

⁵ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

Приведены результаты изготовления и исследования пропускающих и отражающих элементов дифракционной микрооптики, предназначенных для управления мощным излучением терагерцового диапазона – дифракционных линз [1]; фокусаторов излучения в заданные области [2]; элементов, формирующих пучки с заданным поперечно-модовым составом [3]; субволновых бинарных аксиконов с поляризующими свойствами [4]; металл-диэлектрических фотонно-кристаллических структур [5]. Созданные и исследованные алмазные и кремниевые фокусирующие дифракционные оптические элементы (ДОО) с непрерывным профилем микрорельефа продемонстрировали рекордные значения дифракционной эффективности (95 % для алмазной дифракционной линзы и 97 % для кремниевого фокусатора в квадрат). Элементы исследовались в пучке терагерцового Новосибирского лазера на свободных электронах (ИЯФ СО РАН). Численно и экспериментально исследованы субволновые терагерцовые бинарные элементы, предназначенные для формирования пучков с заданными поперечно-модовым составом и поляризационным состоянием [4]. Приведены результаты изготовления и исследования, а также анализ перспектив использования в приборостроении металл-диэлектрических фотонно-кристаллических структур терагерцового диапазона [5].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-72-20202) и с использованием оборудования ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения».

1. *Komlenok M.* Diamond diffractive lens with a continuous profile for powerful terahertz radiation / M. Komlenok, T. Kononenko, D. Sovyk, V. Pavelyev, B. Knyazev, E. Ashkinazi, A. Reshetnikov, G. Komandin, V. Pashinin, V. Ralchenko, and V. Konov // *Optics Letters*. 2021. V. 46. P. 340–343.

2. *Komlenok M.S.* Silicon diffractive optical element with piecewise continuous profile to focus high-power terahertz radiation into a square area / M.S. Komlenok, T.V. Kono-

nenko, V.I. Konov, Yu.Yu. Choporova, N.D. Osintseva, B.A. Knyazev, V.S. Pavelyev, K.N. Tukmakov, V.A. Soifer // J. Opt. Soc. Am. B. 2021. V. 38. P. B9–B13.

3. *Павельев В.С.* Экспериментальное исследование самовосстановления терагерцовых бесселевых пучков с орбитальным угловым моментом / В.С. Павельев, К.Н. Тукмаков, А.С. Решетников, В.В. Герасимов, Н.Д. Осинцева, Б.А. Князев // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 5. С. 673–677.

4. *Pavelyev V.S.* Silicon subwavelength axicons for terahertz beam polarization transformation / V.S. Pavelyev, S.A. Degtyarev, K.N. Tukmakov, A.S. Reshetnikov, B.A. Knyazev, Yu.Yu. Choporova // J. Physics: Conference Series. 2021. V. 1745, № 1. Art. 012022.

5. *Agafonov A.* The technology of manufacturing metal-dielectric photonic crystals for THz and millimeter ranges by 3D printing / A. Agafonov, A. Reshetnikov, I. Tzibizov, A. Shakhmin // J. Physics: Conference Series. 2021. V. 1745, № 1. Art. 012021.

ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ФОТОПРОВОДЯЩИЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ МНОГОПИКСЕЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

*Д.С. Пономарев^{1,2}, Д.В. Лаврухин¹, Р.А. Хабибуллин¹, К.И. Зайцев²,
И.Е. Спектор², М. Скоробогатый³*

¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
им. В.Г. Мокерова РАН, Москва

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

³ Département de Génie Physique, Polytechnique Montréal, Montreal, Canada

Нами предложены, теоретически обоснованы и исследованы сверхрешеточные гетероструктуры InGaAs/InAlAs с искусственно введенными упругими деформациями (напряжениями сжатия и растяжения), в которых фотовозбужденные носители заряда имеют сверхмалые времена жизни ~ 1,7 пс [1]. На основе выращенных структур изготовлены фотопроводящие антенны (ФПА), которые использовались в качестве детектора в импульсном ТГц-спектрометре во временной области. Экспериментально зарегистрирован сверхмалый уровень шума в ФПА-детекторе, а также квадратичный рост детектируемого сигнала при увеличении средней мощности в зондирующем пучке лазерного импульса по сравнению с ФПА-детектором на основе традиционной (не напряженной) структуры [2].

Предложена оптическая схема системы построения изображений объектов в ТГц-диапазоне на основе многоканального детектирования излучения двумерным массивом ФПА (64-пиксельный детектор, см. рис. 1), где для управления интенсивностью и фазой зондирующего лазерного импульса используется пространственный модулятор света (рис. 2) для выбора и одномоментного считывания нескольких пикселей в массиве [3].

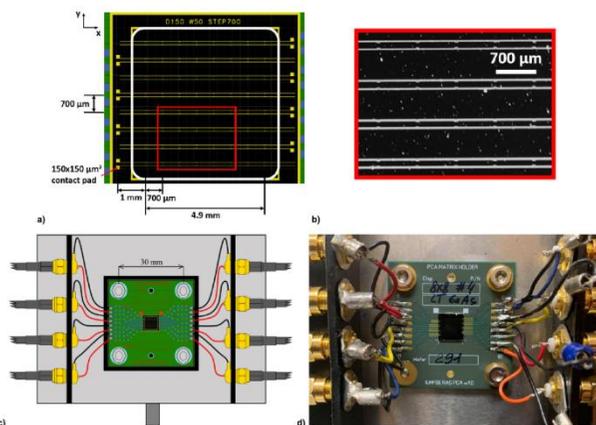


Рис. 1. Схема 64-пиксельного детектора (8 каналов \times 8 пикселей) размером 5×5 мм, в котором каждый канал питается независимо, и фото многоканального детектора в оснастке в импульсном ТГц-спектрометре

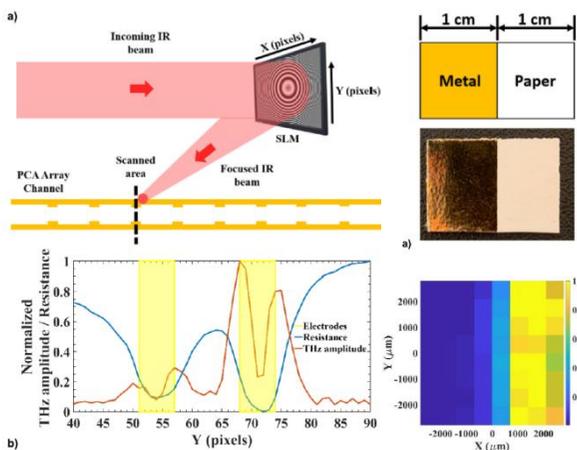


Рис. 2. Схема одномоментного считывания нескольких пикселей в массиве путем использования пространственного модулятора света и пример визуализации в ТГц-диапазоне с помощью многоканального детектора

Работы выполнены при финансовой поддержке гранта РФФ 18-79-10195.

1. Ponomarev D.S. et al. // J. Appl. Phys. 2019. V. 125, № 15. Art. 151605.
2. Henri R. et al. // IEEE Access. 2021. V. 9. Art. 117691.
3. Lavrukhin D.V. et al. // IEEE Trans. Sci. THz. Tech. 2021. V. 11, № 4. P. 417.

ЭФФЕКТИВНЫЕ ЗОННЫЕ ДИЗАЙНЫ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Р.А. Хабибуллин¹, Д.С. Пономарев¹, Д.В. Ушаков², А.А. Афоненко²

¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
им. В.Г. Мокерова РАН, Москва

² Белорусский государственный университет, Минск

Терагерцовый диапазон частот (1–10 ТГц) по-прежнему остается одним из самых интригующих областей электромагнитного спектра как с точки зрения фундаментальной науки, так и для большого числа прикладных задач. Долгое время сдерживающим фактором использования всех преимуществ ТГц-волн в спектроскопии, визуализации и удаленном зондировании оставалось отсутствие компактных твердотельных источников ТГц-излучения с мВт-уровнем средней мощности. Возможность «переноса» схемы работы квантово-каскадных лазеров (ККЛ) среднего инфракрасного (СИ) диапазона в ТГц-область позволила продемонстрировать уникальный источник ТГц-излучения, в котором за счет изменения толщин полупроводниковых слоев можно перестраивать частоту генерации от 1,2 до 5,4 ТГц без использования больших магнитных полей. Однако по сравнению с СИ ККЛ, где продемонстрированы рабочие температуры более 300 К, для работы ТГц ККЛ долгое время требовалось криогенное охлаждение. Задачи по повышению рабочих температур до пельтье-охладителей и увеличению выходной мощности ТГц ККЛ являются крайне актуальными, чтобы данные источники смогли «выйти» из лабораторий и начали широко использоваться в медицине, биологии, сельском хозяйстве, экологии, борьбе с терроризмом и беспроводной связи. Для решения данных задач необходимо создавать эффективные зонные дизайны ТГц ККЛ с оптимизированным электронным транспортом для улучшения лазерных характеристик.

Несмотря на то что работы по созданию ТГц ККЛ в России начались с 10–15-летней задержкой относительно работ зарубежных групп, на сегодняшний день уже продемонстрированы ТГц ККЛ с максимальной рабочей температурой более 120 К [1], полностью изготовленные в России, включая рост гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), постростовой процессинг и сборку на теплоотводе. В настоящей работе будут представлены разработанные оригинальные зонные дизайны ТГц ККЛ, направленные на повышение рабочей температуры (более 200 К) и увеличение выходной мощности. Помимо рассчитанных лазерных характеристик, будут продемонстрированы экспериментальные результаты по предложенным дизайнам, выращенным как традиционным МЛЭ-методом, так и методом МОС-гидридной эпитаксии.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-72-30020.

1. Хабибуллин Р.А. и др. Квантово-каскадный лазер на 3,3 ТГц на основе активного модуля из трех квантовых ям GaAs/AlGaAs с рабочей температурой >120 К // ФТП. 2021. Т. 11. С. 989.

ЛАЗЕРНОЕ И СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ДИАПАЗОНЕ 10–31 МКМ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ HgTe/CdHgTe С КВАЗИРЕЛЯТИВИСТСКИМ ЗАКОНОМ ДИСПЕРСИИ НОСИТЕЛЕЙ

С.В. Морозов

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Одной из актуальных и быстро развивающихся задач современной физики полупроводников является разработка компактных источников когерентного ТГц-излучения. Лучшие параметры генерации ТГц-излучения имеют квантово-каскадные лазеры (ККЛ). Однако существует спектральный диапазон $\lambda = 20\text{--}60$ мкм, не покрываемый ККЛ за счет полосы остаточных лучей $A_{\text{ш}}B_{\text{в}}$ полупроводников, на основе которых изготавливается подавляющее большинство ККЛ. Межзонные полупроводниковые лазеры представляют собой простую альтернативу ККЛ.

Одной из перспективных для таких источников узкозонных полупроводниковых систем являются узкозонные гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) HgTe/CdHgTe, энергия ТО фонона в которых лежит в диапазоне $\lambda = 60\text{--}90$ мкм. Современная МПЭ позволяет выращивать HgCdTe-структуры с низкой остаточной концентрацией примесей и дефектов, из-за чего каналы безызлучательной рекомбинации на примесях и дефектах насыщаются уже при умеренных интенсивностях накачки [1]. В дополнение КЯ HgTe/CdHgTe имеют сильно непараболические законы дисперсии электронов и дырок, квазисимметричные в окрестности $k = 0$, что позволяет существенно подавить безызлучательную оже-рекомбинацию и увеличить ее порог от нескольких единиц до 40–50 мэВ [2]. Несмотря на то что ранее стимулированное излучение (СИ) в материалах HgCdTe было получено лишь на длинах волн вплоть до 5,3 мкм, использование узких КЯ позволяет существенно продвинуться в длинноволновый диапазон спектра.

В данной работе в волноводных гетероструктурах с HgTe/HgCdTe КЯ, выращенных методом МПЭ на полуизолирующей GaAs (013) подложке с ZnTe- и CdTe-буферами, было получено СИ при импульсной и непрерывной оптической накачке на длинах от 10 до 31 мкм. Показано, что применение узких КЯ HgTe/CdHgTe с оптимальным составом барьеров позволяет подавить оже-рекомбинацию и продвинуться по длине волны СИ в диапазон $\lambda > 31$ мкм [3]. Для некоторых структур с оптимизированными модовыми

потерями наблюдалась генерация на длинах волн 24 мкм с пороговой плотностью мощности накачки менее 1 Вт/см². В структуре с полосковыми резонаторами при импульсном оптическом возбуждении была получена лазерная генерация в диапазоне длин волн 9 мкм с ширинами линий 0,45 см⁻¹.

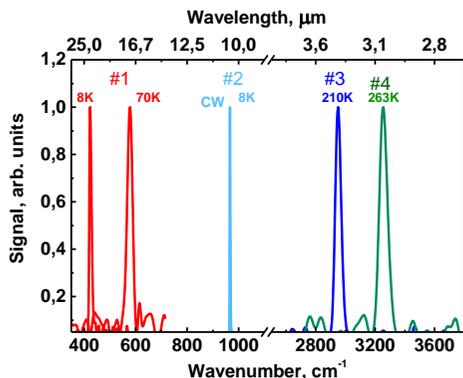


Рис. 1. Спектры СИ при различных температурах (сплошные кривые), полученные при импульсном (# 1, $\lambda_{\text{exc}} = 10,6$ мкм; образцы # 3, # 4, $\lambda_{\text{exc}} = 1,5$ мкм) и cw (# 2, $\lambda_{\text{exc}} = 0,9$ мкм) оптическом возбуждении

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект НЦМУ «Фотоника» (грант 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024)).

1. Morozov S.V. et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104, № 7. Art. 072102.
2. Morozov S.V. et al. // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 111, № 19. P. 192101.
3. Morozov S.V. et al. // ACS Photonics. 2021. V. 8. P. 3526–3535.

ИЗМЕРЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ГЕНЕРАТОРА В ОТКРЫТОЕ ПРОСТРАНСТВО И ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИК ДЖОЗЕФСОНОВСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Н.В. Кинев, К.И. Рудаков, Л.В. Филиппенко, В.П. Кошелец

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

Предложен, разработан и экспериментально исследован перестраиваемый источник терагерцового излучения в открытое пространство на основе распределенного джозефсоновского перехода (РДП), согласованного с передающей антенной (рис. 1, а). РДП выполнен на основе туннельного перехода «сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник» (СИС) из трехслойной структуры Nb/AlO_x/Nb с плотностью туннельного тока 5–10 кА/см² и имеет полосу перестройки рабочей частоты от 200 до 750 ГГц, что составля-

ет порядка 100 % от центральной частоты. Разработаны и исследованы несколько интегральных схем, рассчитанных на перестройку рабочей частоты источника в разных диапазонах: 250–410 ГГц, 330–530 ГГц и 390–700 ГГц, которые суммарно перекрывают диапазон от 0,25 до 0,7 ТГц. Для фокусировки выходного пучка дополнительно использована кремниевая полуэллиптическая линза, согласованная с щелевой антенной (рис. 1, б). Для фазовой стабилизации излучения использован гармонический смеситель (ГС) на основе СИС-перехода, накачиваемый частью выходной мощности (порядка ~10 %) излучения генератора. Исследование выходной мощности во всём диапазоне перестройки частоты генерации проводилось при помощи широкополосного криогенного болометра на основе кремния. Также было проведено исследование формы спектральной линии генерации с высоким разрешением порядка 0,1 МГц при помощи спектрометра на основе гетеродинного интегрального приемника с полосой промежуточных частот 4–8 ГГц.

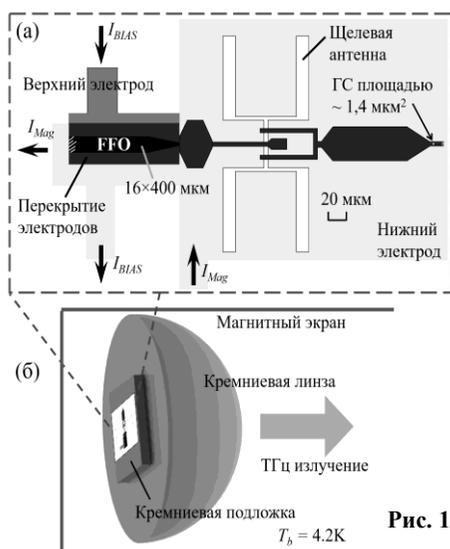


Рис. 1

Наличие гармонических компонент в нестационарном эффекте Джозефсона предсказано достаточно давно, при этом существующие экспериментальные подтверждения являются косвенными и основаны на наблюдении индуцированных пиков либо ступеней тока на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) джозефсоновского перехода на постоянном токе (либо на рабочей частоте системы считывания). В данной работе впервые продемонстрировано наличие джозефсоновских гармоник, излученных в открытом пространстве, на истинной частоте генерации в терагерцовом

диапазоне (ТГц) и субТГц-диапазонах частот. Выходной сигнал РДП на субТГц и ТГц-частотах, включающий все гармонические компоненты выходного излучения интегральной структуры, регистрировался при помощи широкополосного фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона со спектральным разрешением порядка 1 ГГц, в котором в качестве детектора использован криогенный болометр. Так, когда напряжение рабочей точки V на ВАХ генератора однозначно определяет основную частоту генерации $f = (2eV)/h$ согласно соотношению Джозефсона, наблюдается вторая ($2f$) – см. пример на рис. 2 – и в некоторых случаях третья ($3f$) гармоника на частоте

тах до 700 ГГц. На рис. 2 рабочие точки 1–5 соответствуют разному уровню мощности на основной частоте $f = 280$ ГГц. Проведена регистрация точной формы спектральной линии излучения первой и второй гармоники, для этого использован спектрометр с разрешением порядка 0,1 МГц. Полученное соотношение ширины линии второй гармоники по отношению к первой порядка 4 соответствует теоретическому значению N^2 для широкополосных флуктуаций (с постоянной в широком диапазоне частот спектральной плотностью шума напряжения).

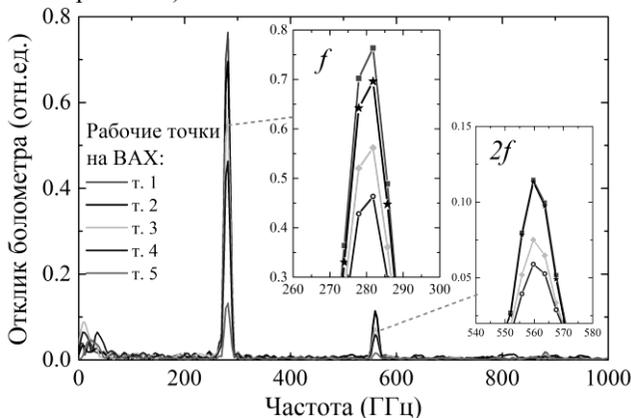


Рис. 2

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

Н.А. Николаев^{1,2}, С.А. Кузнецов^{1,3}, М. Beruete⁴

¹ Новосибирский государственный университет

² Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

³ Новосибирский филиал Института физики полупроводников
им. А.В. Ржанова СО РАН «КТИПМ»

⁴ Antennas Group-TERALAB, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, Spain

В работе рассмотрены несколько подходов, которые могут повысить чувствительность сенсоров в некоторых сценариях.

Первый подход основан на применении структуры с высокочастотным резонансом, чувствительным к углу падения излучения. Обладая близкой к линейной зависимостью положения частоты резонанса от данного угла, частотный спектр пропускания/отражения структуры может быть однозначно заменен на угловой спектр пропускания/отражения при облучении на фик-

сированной длине волны. Это устраняет необходимость проведения спектральных измерений и позволяет заменить дорогие терагерцовые спектрометры компактными полупроводниковыми одночастотными источниками.

Второй подход основан на применении аномального эффекта экстраординарного оптического пропускания структуры, являющейся массивом субволновых регулярных круглых отверстий. Принцип действия структуры базируется на резком изменении характеристик резонанса структуры при достижении анализа такой толщины, при которой происходит согласование импеданса свободного пространства со структурой. Поскольку работа сенсора происходит в окрестности порога реализации эффекта аномального экстраординарного оптического пропускания, сенсоры, построенные на данном принципе, могут обладать очень высокой чувствительностью.

Третий подход основан на применении лабиринтоподобных микроструктур, сложная форма которых приводит к сильной локализации электрического поля на поверхности структуры, что, в свою очередь, значительно повышает чувствительность сенсора и позволяет детектировать наноразмерные объекты излучением с длиной волны порядка 1 мм.

КВАНТОВЫЕ КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА, ВЫРАЩЕННЫЕ МЕТОДОМ МОС-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ

*В.И. Гавриленко¹, К.В. Маремьянин¹, Л.В. Гавриленко¹,
Р.А. Хабибуллин², Т.А. Багаев³, М.А. Ладугин³, А.А. Мармалюк³,
Д.В. Ушаков⁴, А.А. Афоненко⁴*

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

² Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва

³ АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Москва

⁴ Белорусский государственный университет, Минск

Традиционным методом роста структур квантовых каскадных лазеров (ККЛ) как среднего инфракрасного, так и терагерцового (ТГц) диапазона является молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). Альтернативой является метод газовой фазной МОС-гидридной эпитаксии (chemical vapor deposition, CVD), широко применяемый в полупроводниковой индустрии и имеющий ряд технологических преимуществ [1]. Применительно к структурам ККЛ ТГц-диапазона, состоящим из большого числа периодов (до 200) и имеющим общую толщину порядка 10 мкм, важнейшим преимуществом является возможность обеспечить постоянную скорость роста (и, соответственно, идентичность периодов структуры) в течение всего ростового цикла

длительностью 10–20 часов. Тем не менее известно лишь несколько работ, посвященных ТГц ККЛ, выращенным CVD-методом (см., например, [2]). В настоящей работе мы представляем первый российский CVD ТГц ККЛ. Для активной области ККЛ был разработан оригинальный «двухфотонный» дизайн, когда в каждом каскаде лазера происходит два излучательных перехода (рис. 1), что позволяет не только увеличить линейный коэффициент усиления, но и повысить излучаемую мощность.

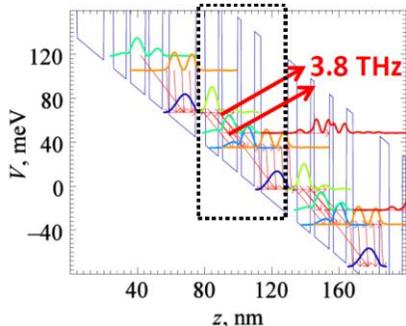


Рис. 1

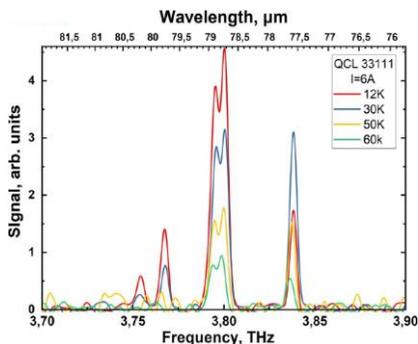


Рис. 2

На рис. 2 представлены спектры излучения ККЛ с «двухфотонным» дизайном активной области. При всех рабочих температурах видно расщепление основной моды излучения при 3,8 ТГц, обусловленное небольшой неэквидистантностью рабочих уровней лазера и свидетельствующее о реализации двух излучательных переходов в каскаде.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 21-72-30020.

1. Choa F.-S. et al. // Proc. SPIE. 2007. V. 6485. Art. 64850N.
2. Fujita K. et al. // Optics Express. 2012. V. 20. Art. 20647.

УПРАВЛЕНИЕ МОДОВЫМ СОСТАВОМ ИЗЛУЧЕНИЯ 3,3 ТГц КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА

Р.А. Хабибуллин¹, С.С. Пушкарёв¹, Р.Р. Галиев¹, И.Н. Дюжиков²,
В.В. Павловский,² О.Ю. Волков²

¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
им. В.Г. Мокерова РАН, Москва

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

Спектр импульсного ТГц квантово-каскадного лазера (ККЛ) # 21212 с резонатором Фабри – Перо длиной 2,8 мм состоит из нескольких (в общем

случае – шести) продольных мод А, В, С, D, E, F с эквидистантными частотами. Интервал между частотами немного изменяется в зависимости от режима работы лазера (температура лазера, амплитуда импульсов тока инжекции) и составляет в среднем 12,6 ГГц. При определённых режимах в спектре слева от моды F появляется мода F', не входящая в набор мод резонатора Фабри – Перо. Суммарная мощность излучения неравномерно распределена между этими модами: в частности, когда лазер излучает с максимальной суммарной мощностью, она сосредоточена главным образом в моде С с частотой 3,289–3,291 ТГц. Спектры излучения квантово-каскадного лазера были измерены методом фурье-спектроскопии на спектрометре Bruker.

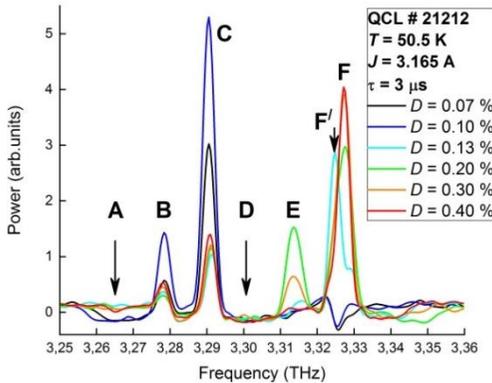


Рис. 1. Спектр излучения ККЛ

ния цикла $D = \tau/T = \text{const}$, средний ток инжекции $\langle J \rangle = \text{const}$.

2) Увеличением коэффициента заполнения цикла $D = \tau/T$ посредством уменьшения периода чередования импульсов тока T , при этом длительность импульса $\tau = \text{const}$, средний ток инжекции $\langle J \rangle$ увеличивается, следовательно, и инжектируемая в лазер мощность увеличивается.

Экспериментальные данные показывают, что при увеличении D мощность излучения перекачивается из моды С в моду F (рис. 2). Мода С доминирует при малой длительности импульса (1 мкс), мода F сравнивается с ней при средней длительности импульса (2 мкс) и превосходит её при большой длительности импульса (3 мкс). Моды В и С являются наиболее стабильными и присутствуют при всех режимах инжекции тока, поэтому также было измерено смещение частот этих мод в зависимости от τ и D .

Экспериментальные зависимости мощности и частоты различных мод от D позволяют сделать вывод о сочетании постепенного повышения температуры активной области лазера и скачкообразной перестройки электронной подсистемы, которая происходит после превышения инжектируемой в лазер электрической мощностью некоторого порогового значения (при $D = 0,13\%$).

Известно, что возбуждать более высокочастотные продольные моды можно с помощью увеличения температуры лазера в криостате и с помощью увеличения амплитуды импульсов тока инжекции. Однако более эффективно воздействовать на модовый состав излучения лазера можно ещё двумя способами.

1) Увеличением длительности импульса тока τ , при этом коэффициент заполнения

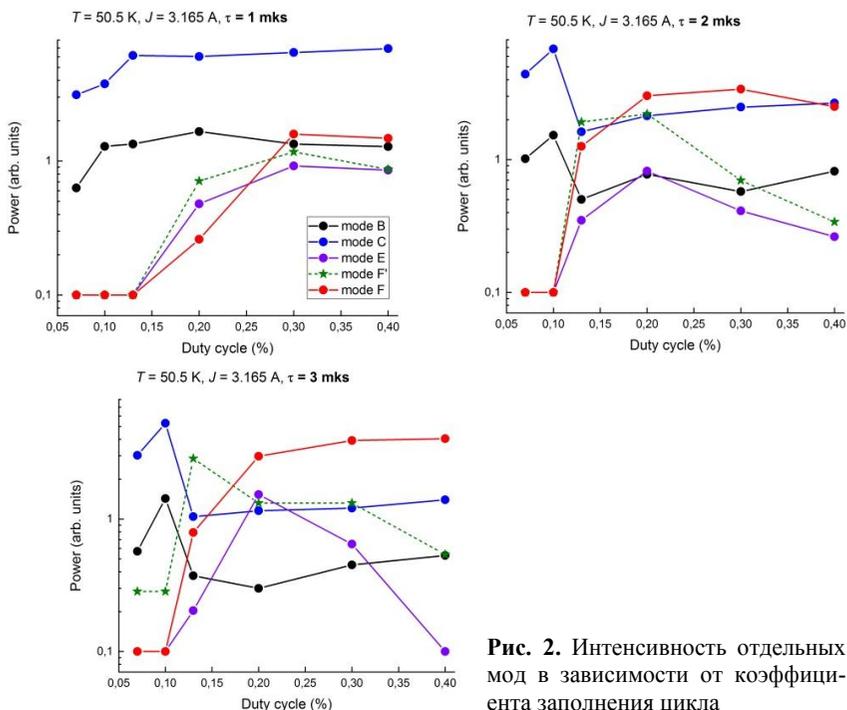


Рис. 2. Интенсивность отдельных мод в зависимости от коэффициента заполнения цикла

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕКОМБИНАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ НА ОСНОВЕ HgCdTe ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА МЕЖЗОННЫХ ПЕРЕХОДАХ

*В.В. Румянцев^{1,2}, А.А. Разова^{1,2}, В.Я. Алешкин^{1,2}, В.И. Гавриленко^{1,2},
Н.Н. Михайлов³, С.А. Дворецкий³, С.В. Морозов^{1,2}*

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³ Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

В настоящее время гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) на основе твердого раствора HgCdTe являются одной из активно исследуемых полупроводниковых систем благодаря целому ряду их уникальных свойств: наличию топологически защищенных краевых состояний, безмассовых фер-

мионов Дирака и пр. Возможность изменения ширины запрещенной зоны от несколько сотен мэВ практически до нуля [1] за счет изменения состава и толщины КЯ, а также недавно полученное стимулированное излучение (СИ) с длиной волны более 20 мкм [2] позволяют рассматривать их как материал для межзонных лазеров, работающих в диапазоне 20–60 мкм, который не полностью охвачен квантово-каскадными лазерами. В этой связи возникает задача детального исследования оптических свойств структур на основе HgCdTe и процессов рекомбинации, определяющих возможность достижения инверсии населенностей в таких материалах.

В данной работе исследования сосредоточены на КЯ HgCdTe с квазирелятивистским энергетическим спектром, который, как предполагается, подавляет безызлучательную оже-рекомбинацию. Показано, что уменьшение концентрации Cd в КЯ смещает баланс между различными механизмами рекомбинации в сторону увеличения вероятности излучательных процессов и подавления оже-рекомбинации при концентрациях носителей менее 10^{11} см^{-2} . Это связывается с изменением положения боковых максимумов первой валентной подзоны при изменении концентрации кадмия в КЯ. При увеличении концентрации влияние экранировки кулоновского взаимодействия «тяжелыми» дырками в боковых максимумах согласно расчету приводит к обратной зависимости темпов оже-рекомбинации от концентрации кадмия в КЯ. Обсуждаются пути оптимизации структур, предназначенных для длинноволновой генерации в диапазоне длин волн более 30 мкм, направленные на увеличение времени жизни носителей и соответствующее понижение порога возникновения усиления на межзонных пере-ходах.

Исследования поддержаны Министерством науки и высшего образования (грант 075-15-2020-906 «НЦМУ ФОТНИКА»).

1. *Ruffenach S. et al.* // APL Materials. 2017. V. 5, № 3. Art. 035503.
2. *Morozov S.V. et al.* // Applied Physics Letters. 2017. V. 111, № 19. Art.192101.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ И СУБВОЛНОВЫХ РЕШЕТОК В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛЯ ЗАДАЧ СЕНСОРИКИ

О.Э. Камешков^{1,2}, В.В. Герасимов^{1,2}, Б.А. Князев^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет

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

Терагерцовые (ТГц) сенсоры на основе поверхностного плазмонного резонанса (ППР) являются многообещающей технологией в биомедицине из-за возможности мониторинга биологических субстанций в режиме реального времени без маркеров и с высокой чувствительностью. Разными авто-

рами предложено множество решений и вариантов реализации ППР-сенсоров на основе 2D- и 3D-метаматериалов, графена, графеновых нанотрубок. В данной работе рассматриваются субволновые и дифракционные одномерные линейные металлические решетки в качестве сенсоров.

Использование дифракционных решеток является одним из традиционных подходов к реализации ППР-сенсоров, однако для этой задачи они все еще остаются слабо исследованными в ТГц-диапазоне частот. Мы провели моделирование с помощью COMSOL и изучили влияние параметров решетчатой структуры на чувствительность сенсора. Также нами были объяснены эффекты, возникающие при различных соотношениях ширины и глубины канавок. Было показано, что чувствительность таких сенсоров может достигать 2,26 ТГц / RIU при изменении показателя преломления исследуемой субстанции от 1 до 1,002.

Одномерные субволновые металлические решетки исследовались в схеме нарушенного полного внутреннего отражения (конфигурация Отто), которая использовалась для удовлетворения условий фазового синхронизма спуф-плазмонов. На основе численного моделирования и аналитического анализа нами были найдены оптимальные параметры структуры сенсора. Было рассмотрено его применение в задачах газового анализа с монохроматическим источником излучения со сканированием по углу падения. Чувствительность сенсоров достигала 76° / RIU при изменении показателя преломления от 1 до 1,001.

НЕКРИТИЧЕСКИЙ СИНХРОНИЗМ В МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛАХ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

И.А. Ожередов¹, А.С. Синько¹, А.П. Шкуринов¹, А.Э. Волошин²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² ФНИЦ «Кристаллография и фотоника РАН», Москва

В данной работе мы обсуждаем новый тип частотно-некритичного синхронного взаимодействия в молекулярных нелинейно-оптических кристаллах, при преобразовании фемтосекундного излучения видимого и инфракрасного излучения в терагерцовое. На примере ряда новых органических кристаллов, например CNHCO (NH₂) H₂PO₃ (GHP) мы показываем перспективы их использования при генерации разностной частоты, параметрических и электрооптических взаимодействиях в лазерных системах большой мощности, для генерации широкополосного и частотно-узкополосного излучений. Мы обсуждаем различные механизмы усиления нелинейно-оптического отклика и управления условиями фазового синхронизма при их практических применениях.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ИМПУЛЬСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ КРОВИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

*О.П. Черкасова^{1,2}, М.Р. Конникова^{2,3}, Д.А. Вражнов^{4,5},
А. Князькова^{4,5}, Ю.В. Кистенев^{5,6}, А.П. Шкуринов^{2,3}*

¹ Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

² Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

⁴ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева, Томск

⁵ Томский государственный университет

⁶ Сибирский государственный медицинский университет, Томск

Ранняя диагностика онкологических заболеваний может быть достигнута при анализе жидкостей организма, в том числе и плазмы крови, спектральными методами [1]. Ранее нами было показано применение терагерцовой (ТГц) импульсной спектроскопии для диагностики рака печени [2] и выявления злокачественных заболеваний щитовидной железы [3].

Данная работа выполнена в динамике развития экспериментальной глиобластомы человека (модель ортотопической ксенотрансплантации клеток глиобластомы человека U87 мышам иммунодефицитной линии SCID) [4]. Магнитно-резонансная спектроскопия использовалась для определения молекулярных маркеров глиомы на разных стадиях роста опухоли [5]. Показано уменьшение ТГц-поглощения плазмы крови по мере развития глиомы и увеличения размера опухоли. Методы машинного обучения были использованы для оценки разделимости контрольных групп и групп с глиобластомой разного срока, а также динамики развития опухоли.

Предложен двухэтапный ансамблевый алгоритм анализа ТГц-спектров для выделения информативных частот. Первый этап был основан на методе главных компонент для уменьшения размерности данных и уменьшении вклада шумов. Второй этап включал использование машины опорных векторов с линейным ядром для разделения групп. Для плохо разделимых данных предложена модификация метода главных компонент с ядром Орнштейна – Уленбека для разделения доброкачественных и злокачественных опухолей. Таким образом, продемонстрирована применимость ТГц-спектроскопии плазмы крови и технологии машинного обучения для диагностики онкологических заболеваний.

Работа поддержана РФФИ (грант 19-52-55004), Междисциплинарной научно-образовательной школой Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина», правительством Российской Федерации (соглашение 075-15-2021-615 от 4 июня 2021 г.).

1. *Cherkasova O. et al. // Photonics. 2021. V. 8, № 1. P. 22.*

2. *Nazarov M.M. et al. // Opt. Spectrosc. 2019. V. 126. P. 721–729.*

3. *Konnikova M.R. et al.* // Biomed. Opt. Express. 2021. V. 12. P. 1020–1035.
4. *Zavjalov E.L. et al.* // Russian Journal of Genetics: Applied Research. 2016. V. 6, № 4, P. 448.
5. *Shevelev O.B. et al.* // Phytomedicine. 2018. V. 41. Art. 1.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АДСОРБЦИИ RBD-ДОМЕНА СПАЙКОВОГО БЕЛКА ВИРУСА SARS-CoV-2

*М.Р. Конникова^{1,2}, О.П. Черкасова^{2,3,5}, Е.С. Дизер^{2,4}, Т.А. Гейнц^{1,2},
И.С. Васильевский⁴, А.А. Бутылин¹, Ю.В. Кистенев⁵, В.В. Тучин^{5,6,7},
А.П. Шкуринов^{1,2,5}*

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Институт проблем лазерных и информационных технологий – филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура

³ Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

⁵ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

⁶ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

⁷ Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов

Адгезия спайкового (S) белка вируса SARS-CoV-2 изучена методами колебательной спектроскопии с применением терагерцовых метаматериалов. Исследованы особенности поглощения метаструктуры при нанесении на нее пленок гистидина, альбумина и рецептор связывающего домена (RBD) спайкового белка S. В работе предложена методика оценки эффективности адгезии вируса на поверхностях метаматериалов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (20-04-60505), Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (075-15-2019-1950), Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина», гранта по Постановлению Правительства РФ № 220 от 9.04.2010 г. (075-15-2021-615 от 04.06.2021 г.).

ПЛАЗМОНИКА ДЛЯ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин

Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна, Черноголовка

Центральным вопросом физики низкоразмерных электронных систем является изучение одночастичных и коллективных элементарных воз-

буждений системы. Одним из основных типов коллективных возбуждений двумерной электронной системы (ДЭС) является волна зарядовой плотности – плазмон. Плазменные возбуждения в двумерных электронных системах интенсивно изучаются уже более полувека. Отчасти такой интерес связан с множеством уникальных свойств, отличающих двумерные (2D) плазмоны от их трехмерных аналогов.

Во-первых, спектр двумерных плазмонов имеет бесщелевой корневой характер. Во-вторых, заряды в двумерном слое не способны эффективно экранировать трехмерное поле падающей на ДЭС электромагнитной волны. Это приводит к сильной гибридизации света с двумерной плазмой и образованию новых элементарных возбуждений – плазмонных поляритонов. В-третьих, на свойства 2D-плазмонов оказывает значительное влияние окружение ДЭС. Это вызвано тем, что двумерные системы в большинстве случаев образуются на гетероинтерфейсе, который располагается вблизи поверхности полупроводниковой подложки.

В большинстве твердотельных полупроводниковых систем двумерный слой контактирует с множеством электродов (контакты, затворы). До недавнего времени считалось, что электроды вносят незначительное возмущение в свойства плазменных волн в ДЭС. Недавно было экспериментально и теоретически установлено, что данное предположение имеет целый ряд ограничений. Как следствие, был открыт ряд новых двумерных плазменных возбуждений – релятивистские плазмоны [1], «проксимити»-плазмоны (proximity plasmons) [2], «сверхсветовые» электромагнитные плазмоны [3]. Экспериментальное исследование этих разновидностей плазменных волн привело к разработке целого ряда новых систем терагерцовой электроники.

Естественным стимулом работ в области 2D-плазмоники являются многочисленные приложения результатов этих исследований в области терагерцовой электроники. Среди них следует выделить два направления. С одной стороны, практическое применение плазменных волн обусловлено значительно более высокими скоростями плазменных возбуждений по сравнению с дрейфовой скоростью электронов. Это может потенциально повысить быстродействие полупроводниковых устройств до частоты 10 ТГц. Вторым направлением применения 2D-плазмоники является гигантское усиление оптического отклика плазмон-поляритонными волнами. Идея подхода состоит в том, чтобы преобразовать падающую электромагнитную волну в распространяющуюся вдоль поверхности кристалла плазмон-поляритонную волну. Таким образом, электромагнитное поле локализуется вблизи поверхности на масштабах порядка длины волны плазмона. Из-за сильной локализации поля вблизи поверхности наблюдается сильное усиление локального электромагнитного поля, что может применяться для создания высокочувствительных детекторов терагерцового излучения.

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

2. *Zabolotnykh A.A., Volkov V.A.* Interaction of gated and ungated plasmons in two-dimensional electron systems // *Phys. Phys. B.* 2019. V. 99. P. 165304 ; *Muravev V.M., Gusikhin P.A. et al.* Two-dimensional plasmon induced by metal proximity // *Phys. Phys. B.* 2019. V. 99. P. 241406.

3. *Shuvaev A., Muravev V.M., Gusikhin P.A. et al.* Discovery of two-dimensional electromagnetic plasma waves // *Phys. Phys. Lett.* 2021. V. 126. P. 136801.

ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СУБПИКОСЕКУНДНОЙ КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРОНОВ В ГРАФЕНЕ

*И.В. Оладышкин, Ю.А. Сергеев, С.Б. Бодров, А.И. Корытин,
А.В. Коржиманов, М.Д. Токман, А.Н. Степанов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В докладе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования электродинамики графена (монослоя углерода) в поле мощного однопериодного ТГц-импульса. Показано, что воздействие на графен электрических полей амплитудой 100–250 кВ/см является принципиально нетепловым, в частности происходит рождение электронно-дырочных пар и образуется локальная инверсия населённостей. Экспериментально данный эффект диагностируется по спонтанному оптическому излучению графена под действием ТГц-излучения. Несмотря на спонтанный характер, фотоны во всём наблюдаемом диапазоне длин волн (400–1000 нм) оказываются поляризованными преимущественно перпендикулярно электрическому полю ТГц-импульса. Это свидетельствует о существенной вытянутости функции распределения электронов вдоль ТГц-поля (и, таким образом, её существенном отличии от равновесной функции распределения).

Было экспериментально установлено, что степень поляризации света практически не зависит от амплитуды поля накачки в диапазоне 100–250 кВ/см для графена как на стекле, так и на ПЭТ. Также были исследованы зависимости интенсивности спонтанной эмиссии в разных спектральных диапазонах от амплитуды ТГц-поля. Эти результаты в совокупности с расчётами в рамках численного моделирования позволили оценить время изотропизации функции распределения электронов в графене (порядка 30 фс) и приблизительно восстановить динамику изменения температуры электронов при увеличении ТГц-поля.

ШИРОКОПОЛОСНОЕ ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ДЛИННОИМПУЛЬСНЫХ ЛСЭ В КИНЕТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ

Н.С. Гинзбург, Е.Р. Кочаровская, А.С. Сергеев, С.Е. Фильченков

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Построена квазилинейная теория лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), в которых при использовании интенсивных электронных пучков, обладающих значительным скоростным разбросом, реализуется кинетический режим электронно-волнового взаимодействия. Найдены стационарные распределения спектральной плотности возбуждаемых резонаторных мод при различных уровнях превышения тока пучка над порогом. Проведены оценки параметров применительно к длинноимпульсным ЛСЭ, которые могут быть реализованы на базе линейных индукционных ускорителей (ЛИУ) нового поколения, разработанных в ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и формирующих релятивистские электронные пучки с энергией от 5 до 20 МэВ, килоамперным уровнем тока и длительностью до 200 нс. Показана возможность эффективного преобразования энергии таких электронных пучков с большим разбросом в широкополосное излучение терагерцового диапазона.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПРЕССИИ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ В КАНАЛЕ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ЛСЭ

*Е.С. Сандалов^{1,3}, Д.А. Никифоров^{1,3}, С.Л. Синуцкий^{1,3},
А.В. Аржанников^{1,3}, Д.И. Сквородин^{1,3}, П.А. Бак¹, П.В. Логачев¹,
А.В. Петренко¹, К.И. Живанков¹, А.М. Батраков¹, А.В. Павленко¹,
В.А. Павлюченко¹, Н.С. Гинзбург², Н.Ю. Песков²*

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

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

³ Новосибирский государственный университет

В ИЯФ СО РАН совместно с ИПФ РАН ведутся работы по созданию уникального субмиллиметрового лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на основе релятивистского электронного пучка ($E_e = 5\text{--}20$ МэВ, $I_b = 1\text{--}2$ кА, $\tau = 160$ нс), генерируемого в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ) [1]. Согласно теоретическому анализу [2], полученный в этом ЛИУ электронный пучок является подходящим драйвером для генерации субмиллиметровых импульсов когерентного ЭМ-излучения в диапазоне частот 0,3–1 ТГц.

Использование в таком ЛСЭ двумерной распределенной обратной связи, реализованной в высокоселективном двухзеркальном резонаторе на основе модифицированных брэгговских отражателей со сверхразмерностью ($\sim 20-40\lambda$) [3], обеспечит узкополосную генерацию с $\Delta\omega/\omega \sim 10^{-4}$ для указанного диапазона частот при высокой электронной эффективности 3–10 %. Для проведения экспериментов по генерации субмиллиметрового излучения необходимо прежде всего осуществить сжатие поперечного сечения пучка от начального диаметра 4 см до размера менее 20λ (20 мм для 0,3 ТГц и 6 мм для 1 ТГц), а затем обеспечить устойчивую транспортировку пучка в электродинамической системе ЛСЭ на расстояние более 2 м в магнитном поле ондулятора с периодом 10 см без потерь пучка. Возможность решения первой задачи была проверена экспериментально в условиях, когда электронный пучок с энергией 5 МэВ и током 1 кА был сжат до диаметра 10 мм и в таком виде транспортировался в однородном магнитном поле на расстояние 60 см [2]. Для решения второй задачи необходимо свести к минимуму колебания пучка на выходе из ЛИУ, которые раскачиваются в нем вследствие развития поперечной неустойчивости (BBU-instability) [4], и найти условия для устойчивой транспортировки в канале ЛСЭ. Следует отметить, что указанная поперечная неустойчивость пучка в ЛИУ, обусловленная возбуждением дипольных мод в ускорительных модулях, приводила не только к колебаниям центроида пучка, но и к уширению его поперечного сечения и частичному выпадению на стенки канала. Применением эффективных способов подавления этой неустойчивости удалось существенно уменьшить амплитуду колебаний пучка до 1 мм и в результате этого получить пучок с малым нормализованным эмиттансом $\sim 1000 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, пригодный для генерации субмиллиметрового излучения в ЛСЭ. В докладе будут представлены результаты экспериментов по компрессии и проводке пучка в вакуумном канале ЛСЭ, а также результаты моделирования транспортировки пучка в магнитном поле ондулятора.

Раздел работы, посвященный разработке системы компрессии, выполнен за счет средств гранта РФФ 19-12-00212.

1. *Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S. et al.* Powerful long-pulse THz-band bragg FEL based on linear induction accelerator // 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2019 ; doi: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874573.

2. *Nikiforov D.A., Petrenko A.V., Sinitsky S.L. et al.* Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source // J. Instrumentation (JINST). 2021. V. 16. Art. P11024. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/P11024>.

3. *Ginzburg N.S., Peskov N.Yu. et al.* Improving selectivity of free electron maser with 1D Bragg resonator using coupling of propagating and trapped waves // Phys. Rev. ST – Accel. Beams. 2005. V. 8. P. 040705.

4. *Sandalov E.S., Sinitsky S.L., Burdakov A.V. et al.* Electrodynamic system of the linear induction accelerator module // IEEE Transactions on Plasma Science. 2021. V. 49, № 2. P. 718–728 ; doi: 10.1109/TPS.2020.3045345.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО РЭП, ГЕНЕРИРУЕМОГО В ЛИУ, ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ДРАЙВЕРА В ТЕРАГЕРЦОВОМ ЛСЭ

*Д.А. Никифоров^{1,3}, С.Л. Синицкий^{1,3}, Е.С. Сандалов^{1,3},
А.В. Петренко¹, А.В. Аржанников^{1,3}, Д.И. Сквородин^{1,3}, П.А. Бак¹,
П.В. Лозачев¹, К.И. Живанков¹, А.М. Батраков¹, А.В. Павленко¹,
В.А. Павлюченко¹, Н.С. Гинзбург², Н.Ю. Песков²*

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

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

³ Новосибирский государственный университет

В настоящее время в ИЯФ СО РАН совместно с РФЯЦ-ВНИИТФ создан линейный индукционный ускоритель (ЛИУ) релятивистского электронного пучка (РЭП) с высокой яркостью. Основные параметры пучка: энергия электронов до 5–20 МэВ, ток пучка до 2 кА, длительность импульса до 160 нс и нормализованный эмиттанс $\sim 1100 \text{ п.мм} \cdot \text{мрад}$ [1, 2]. Одним из возможных применений такого пучка является его использование в качестве драйвера для возбуждения и накачки лазера на свободных электронах (ЛСЭ) терагерцового диапазона (0,3–1 ТГц), который разрабатывается совместно ИЯФ СО РАН и ИПФ РАН [3]. Для обеспечения узкополосной генерации мощных (~ 100 МВт) импульсов ТГц-излучения в таком ЛСЭ планируется использовать двумерно-распределенную обратную связь, реализованную в двухзеркальном резонаторе со сверхразмерностью ($\sim 20\text{--}40\lambda$). По этой причине для транспортировки пучка в таком резонаторе необходимо осуществить магнитную компрессию пучка от его исходного диаметра 4 см на выходе из ЛИУ до диаметра менее 10 мм при сохранении его малого эмиттанса. Выполнение данной задачи невозможно без изучения поперечной динамики пучка в ЛИУ, разработки и калибровки его электронно-оптической модели.

В докладе представлены результаты численных физических моделей, предназначенных для описания эволюции пучка в многомодульном ЛИУ с учетом влияния пространственного заряда пучка и нелинейных электрических и магнитных полей, создаваемых ускоряющими и фокусирующими элементами ускорителя. Особое внимание уделяется инжектору электронов, геометрия и рабочие параметры которого во многом определяют характеристики пучка на выходе линейного ускорителя. Рассмотрены различные факторы, наиболее существенно влияющие на увеличение эмиттанса пучка в ускорителе. Аналитические оценки влияния этих факторов сравниваются с результатами численного моделирования и экспериментальными результатами исследования поперечной динамики пучка при его транспортировке в ЛИУ. В докладе также приведены параметры пучка, критичные для достижения эффективной генерации ТГц-излучения в таком ЛСЭ.

Раздел работы, посвященный разработке модели для расчета компрессии пучка, выполнен за счет средств гранта РФФИ 19-12-00212.

1. *Peskov N.Yu., Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S. et al.* Project of powerful long-pulse Bragg FEL of sub-THz to THz band: design, simulations and components testing // Proc. SPIE 11582, Fourth International Conference on Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection, and Applications. 2020. Art. 1158207. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2579554>.

2. *Nikiforov D.A., Blinov M.F., Fedorov V.V. et al.* High-current electron-beam transport in the LIA-5 linear induction accelerator // Phys. Part. Nuclei Lett. 2020. V. 17. P. 197–203. URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477120020156>.

3. *Sandalov E.S., Sinitsky S.L., Burdakov A.V. et al.* Electrodynamical system of the linear induction accelerator module // IEEE Transactions on Plasma Science. 2021. V. 49, № 2. P. 718–728 ; doi: 10.1109/TPS.2020.3045345.

4. *Nikiforov D.A., Petrenko A.V., Sinitsky S.L. et al.* // J. Instrumentation (JINST). 2021. V. 16. Art. P11024. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/P11024>.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ БЕССЕЛЕВОЙ МОДЫ С ЗАДАННЫМ ТОПОЛОГИЧЕСКИМ ЗАРЯДОМ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ПУЧКЕ

*Н.Д. Осинцева^{1,2}, В.В. Герасимов^{1,2}, Б.А. Князев^{1,2}, В.С. Павельев^{2,3},
М.С. Комленок⁴, Ю.Ю. Чопорова^{1,2}, Д.Е. Яблоков⁵*

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

² Новосибирский государственный университет

³ Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королёва

⁴ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

⁵ ООО «ИнтеллектСофт», Самара

Основные перспективы развития телекоммуникационной отрасли в настоящее время связаны с расширением сетей 4G и развитием новых сетей 5G. Однако вскоре и этого будет недостаточно для удовлетворения растущих потребностей пользователей новых информационных сервисов. Дальнейшие перспективы повышения пропускной способности каналов связи связывают с освоением терагерцового диапазона.

Большой интерес исследователей вызывает использование бесселевых пучков с орбитальным угловым моментом (ОУМ), или «закрученных пучков», для организации передачи информации в терагерцовом диапазоне с поперечно-модовой мультиплексацией каналов связи. Однако при передаче информации неизбежно возникают помехи, приводящие к искажению и зашумлению сигнала. Для распознавания исходного сигнала необходима пространственная фильтрация, основанная, например, на принципе корреляционного приема. Процесс такой фильтрации сводится к нахождению корреля-

лянии между неизвестным и заранее определенным сигналом, тогда на выходном изображении оптического коррелятора появится максимум интенсивности такого взаимодействия (корреляционный пик). В качестве корреляционного фильтра, согласованного с детектируемой модой, может быть использован дифракционный оптический элемент с соответствующим образом выбранной функцией комплексного пропускания.

Ранее были изготовлены и исследованы кремниевые бинарные спиральные аксиконы, преобразующие гауссов пучок Новосибирского лазера на свободных электронах в бесселев пучок с ОУМ [1–3].

В данной работе приведены результаты исследования по детектированию бесселевой моды одномодовых и многомодовых закрученных пучков с топологическими зарядами $l = -1, -2$ с помощью бинарных аксиконов с $l = \pm 1, \dots, \pm 4$, а также пучка с $l = -9$ аксиконом с непрерывным профилем дифракционного микрорельефа. Приведены результаты детектирования бесселевых мод с заданным топологическим зарядом в терагерцовом пучке, в том числе в пучке, прошедшем через неоднородную среду.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-72-20202) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения».

1. *Volodkin B., Choporova Y., Knyazev B., Kulipanov G., Pavelyev V., Soifer V., Vinokurov N.* Fabrication and characterization of diffractive phase plates for forming high-power terahertz vortex beams using free electron laser radiation // *Optical and Quantum Electronics*. 2016. V. 48, № 4. P. 48–56.

2. *Choporova Yu.Yu., Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Pavelyev V.S., Scheglov M.A., Vinokurov N.A., Volodkin B.O., Zhabin V.N.* High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range // *Physical Review A*. 2017. V. 96. Art. 023846.

3. *Pavelyev V.S., Volodkin B.O., Tukmakov K.N., Knyazev B.A., Choporova Yu.Yu.* Transmissive diffractive microoptics for high-power THz laser radiation // *AIP Conference Proceedings*. 2018. V. 1989. Art. 020025.

ТЕРАГЕРЦЕВЫЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ, ОСНОВАННОЙ НА ВОЗБУЖДЕНИИ СУПЕРМОД ТАЛБОТ-ТИПА

А.А. Вихарев, Ю.С. Опарина, Н.Ю. Песков, А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В настоящее время растет интерес к созданию источников, работающих в терагерцевом диапазоне частот с высокой мощностью излучения. Естественный путь реализации такого источника – использование излучения сильнооточного релятивистского электронного пучка. Однако существует ряд

проблем, связанных с генерацией мощного когерентного ТГц-излучения в лазерах на свободных электронах на основе релятивистских электронных пучков. Прежде всего, применение традиционного подхода (т.е. работа на одной заранее выбранной моде рабочего резонатора) к диапазону частот ТГц сталкивается с естественными трудностями. Очевидно, что рабочий резонатор в этом случае должен быть сверхразмерным; это необходимо по ряду причин, а именно: транспортировка релятивистского сильноточного пучка, проблема пробоя поля мощного излучения внутри резонатора, омический нагрев стенок резонатора мощным излучением и т.д. Однако в этой ситуации спектр поперечных мод микроволновой системы становится очень плотным, что затрудняет обеспечение селективного возбуждения одной рабочей поперечной моды. Вторая проблема заключается в трудности обеспечения селективной одномодовой обратной связи в сверхразмерной системе.

Мы описываем альтернативную концепцию селективного возбуждения рабочего колебания в электронном лазере со сверхразмерной электродинамической системой, запитываемой сильноточным релятивистским электронным пучком. Основная идея состоит в том, чтобы отказаться от возбуждения фиксированной моды резонатора в пользу возбуждения высокодобротной супермоды, формируемой фиксированным набором поперечных мод сверхразмерного волновода. Такая супермода может быть сформирована внутри относительно простого резонатора, представляющего собой отрезок волновода, заканчивающийся двумя зеркалами, в результате эффекта Талбота, а именно периодического воспроизведения поперечной структуры многомодового волнового поля в сверхразмерном волноводе.

Несмотря на сложность многомерных пространственных структур супермод резонаторов типа Талбота, к ним в некоторой степени может быть применена идеология, которая используется при описании мод обычных волноводов и резонаторов, а именно разложение по набору ортогональных мод. Хотя формирование супермод включает большое количество парциальных поперечных мод, количество супермод с высокой добротностью ограничено тем фактом, что дифракционная добротность супермоды резко падает с увеличением индекса супермоды. Благодаря этому даже в весьма сверхразмерных системах можно добиться того, чтобы в системе оставалась только одна низшая супермода. По-видимому, это дает нам повод говорить об уникальных селективных свойствах резонаторов типа Талбота.

В качестве примера применения этого подхода мы представляем расчеты лазера на свободных электронах, запитываемого электронным пучком $10 \text{ МэВ}/2 \text{ кА} / 200 \text{ нс}$ и основанного на возбуждении супермоды типа Талбота на частоте, близкой к 2 ТГц. Данная работа направлена на экспериментальную реализацию такого лазера на уникальном сильноточном ускорителе, разработанном в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера (Новосибирск, Россия). В докладе представлены результаты нашего многоволнового моделирования электронно-волнового взаимодействия в пространственно-

временном процессе формирования и усиления супермоды в сверхразмерной микроволновой системе. Расчетный электронный КПД этого лазера на уровне 5 % соответствует гигаваттному уровню выходной мощности. Прототип резонатора такого типа разработан и протестирован в холодных экспериментах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-12-00212).

АЗИМУТАЛЬНО-АСИММЕТРИЧНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ГИРОТРОНОВ НА ВЫСОКИХ ЦИКЛОТРОННЫХ ГАРМОНИКАХ

*И.В. Бандуркин, Ю.К. Калынов, И.В. Ошарин, А.В. Савилов,
Д.Ю. Щегольков*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В настоящее время гиротроны являются одними из наиболее доступных источников излучения с частотой порядка 1 ТГц. Однако при продвижении гиротронов в терагерцовый частотный диапазон из-за ограничений на доступные магнитные поля переход к работе на высоких гармониках циклотронной частоты практически неизбежен. В такой ситуации обостряется проблема селективности возбуждения рабочего колебания на высокой гармонике. Частично решает эту проблему использование конфигурации гиротрона с большой орбитой (ГБО), в которой осесимметричный резонатор возбуждается тонким приосевым пучком частиц. Такой пучок способен возбудить лишь моды резонатора с азимутальным индексом, совпадающим с номером резонансной циклотронной гармоники.

Для дальнейшего решения проблемы селекции предложен подход, основанный на отходе от азимутальной симметрии резонатора. В рамках данной схемы предлагается резонатор, поперечное сечение которого близко к осесимметричному (круглому), но обладает при этом одной или несколькими азимутальными неоднородностями, резонансными для рабочей моды, возбуждаемой на высокой циклотронной гармонике. В результате для рабочей моды сохраняются селективность, сильная связь электронов с рабочей волной на высокой циклотронной гармонике. В то же время для паразитных волн, возбуждаемых на низких циклотронных гармониках, такой резонатор перестает обладать свойством азимутальной симметрии. В результате остановка вращения, рост омических потерь и искажение поперечной структуры полей ведут к существенному росту стартовых токов паразитных волн.

На основе подхода разработан резонатор для терагерцового умеренно релятивистского ГБО на третьей гармонике (0,7 А/80 кВ). Для использова-

ния этого прибора для получения ТГц-разряда в плотной плазме для создания мощного точечного источника УФ-излучения необходим переходе к работе на более высокоэнергетичном (100 кВ, ток до 1,2 А) электронном пучке. Однако в этом случае паразитная мода $TE_{2,5}$ конкурирует с рабочей $TE_{3,7}$. В работе на основе двумерного моделирования показано, что использование резонатора с двумя протяженными по всей длине канавками решает эту проблему.

Кроме того, такая схема исследована не только с точки зрения решения проблемы селекции рабочей моды, но и для реализации гиротрона с плавной перестройкой частоты. В работе исследована схема резонатора с механически изменяемыми нерегулярностями. Найдены условия, при которых в гиротроне с такой электродинамической системой возможна плавная частотная перестройка за счет механического изменения геометрических параметров нерегулярностей.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 20-72-10116).

УМНОЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ В МОЩНОМ ТЕРАГЕРЦОВОМ МАЗЕРЕ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Д.Д. Крыгина, Ю.С. Опарина, Н.Ю. Песков, А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В настоящее время разрабатывается проект мазера на свободных электронах (МСЭ) на базе нового поколения индукционных линейных ускорителей «ЛИУ», реализованных в последние годы в ИЯФ РАН и способных формировать электронные пучки 5–20 МэВ/2 кА/200 нс. Использование таких пучков позволяет реализовать сверхмощные длинноимпульсные МСЭ, работающие в субТГц и ТГц частотных диапазонах.

Естественно, что основной проблемой при реализации автогенераторов, работающих на таких частотах в режиме наведенного когерентного излучения, является создание электродинамической системы, способной обеспечить селективную узкополосную обратную связь в сверхразмерной микроволновой системе. В качестве решения этой проблемы в случае относительно низких частот (0,3–0,6 ТГц) разработаны резонаторы в виде отрезка регулярных волноводов, ограниченных отражателями на основе так называемых перспективных брэгговских структур. На более высоких частотах (до 2 ТГц) предлагается использование квазиоптических резонаторов на основе эффекта Тальбота. Естественно, что чем выше частота рабочей волны, тем проблематичнее обеспечить для нее эффективную обратную связь. Известный

способ избежать этой проблемы и обеспечить индуцированное излучение на высоких частотах – это использование умножения частоты, когда излучение на высокой частоте обеспечивается за счет модуляции электронного луча на более низкой частоте. В данной работе исследуются возможности реализации схем двухволновых осцилляторов на основе этого режима.

В работе рассмотрены МСЭ-генераторы на основе двух схем резонаторов: резонатора брэгговского типа и квазиоптического резонаторов на эффекте Тальбота. В обоих случаях резонаторы обеспечивают обратную связь только для низкочастотной волны, возбуждаемой электронным пучком на основной гармонике ондулятора. Что касается высокочастотной волны, то она излучается электронным пучком на более высокой гармонике ондулятора. Индуцированный характер этого излучения обеспечивается за счет группировки электронного пучка первой волной, а также за счет кратности частот двух волн.

В работе исследованы обе схемы резонаторов – для высоких и низких частот. Найдена оптимальная длина резонатора, исследовано влияние волны на более высокой гармонике на КПД низкочастотной волны.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 19-12-00212).

**ТЕРАГЕРЦОВАЯ СИСТЕМА
«НАКАЧКА – ЗОНДИРОВАНИЕ»
НА НОВОСИБИРСКОМ ЛСЭ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ
В ГЕРМАНИИ ДОПИРОВАННОМ МЫШЬЯКОМ**

*В.Д. Кукотенко^{1,2}, Ю.Ю. Чопорова^{1,2}, Р.Х. Жукавин³,
П.А. Бушуйкин³, Н.Д. Осинцева^{1,2}, К.А. Ковалевский³, Б.А. Князев^{1,2}*

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

² Новосибирский государственный университет

³ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Полупроводники известны во всем мире своим широким спектром применения. Важность создания методов измерения временной динамики определяется тем, что релаксационные процессы играют ключевую роль в работе различных электронных и оптоэлектронных устройств. Например, мелкопримесные полупроводники могут применяться для создания квантового компьютера, так как время хранения состояния кубита определяется временем релаксации. Времена релаксации возбужденных состояний в германии при низких температурах лежат в терагерцовой области спектра. Источником терагерцового излучения в работе являлся Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ), который генерирует монохроматическое

излучение с перестраиваемой длиной волны в диапазоне 5–240 мкм, что соответствует возбуждению межподзонных переходов в Ge с энергией 2–10 мэВ.

В основе принципа «накачка – зондирование» лежит разделение лазерного пучка на более мощный импульс накачки, который возбуждает определенный энергетический переход в образце, и на импульс зондирования, который проходит через оптическую задержку и детектирует временную характеристику прозрачности образца. Образец был помещен в проточный гелиевый криостат и имел температуру 4 К. На время прохождения импульса ЛСЭ длительностью 100 пс образец становился прозрачным, так как носители примеси переходили в возбужденное состояние. Далее его прозрачность уменьшалась пропорционально релаксации носителей заряда.

В данной работе были получены времена релаксации в Ge:As $1s \rightarrow 3p_{\pm}$, $1s \rightarrow 3p_0$, $1s \rightarrow 2p_0$, $1s \rightarrow 2p_{\pm}$ состояний для однооснодеформированного и недеформированного образца. Зависимость сигнала «накачка – зондирование» от времени задержки аппроксимируется экспоненциальной функцией, где показатель экспоненты соответствует времени релаксации соответствующего энергетического перехода.

Выводы, полученные в ходе экспериментов, будут отражены в докладе.

В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Новосибирский ЛСЭ» в ИЯФ СО РАН, поддержанное проектом RFMEFI62119X0022. Исследование образцов поддержано грантом РФФ № 19-72-20163.

ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНТЕРВАЛЕ ЧАСТОТ 0,1–0,6 ТГц В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ГЕНЕРАЦИИ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-ПЭТ

*Д.А. Самцов¹, А.В. Аржанников^{1,2}, С.Л. Синицкий^{1,2}, Е.С. Сандалов^{1,2},
С.С. Попов^{1,2}, П.В. Калинин^{1,2}, М.Г. Аплуханов¹, М.А. Макаров¹,
К.Н. Куклин¹, А.Ф. Ровенских¹*

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

² Новосибирский государственный университет

В настоящее время продолжается развитие различных систем для генерации мощных потоков излучения в субТГц/ТГц-диапазонах частот. Один из методов генерации такого излучения состоит в использовании механизмов конверсии плазменных волн в электромагнитные. Положительные особенности такого метода заключаются в возможности использовать для

генерации релятивистский электронный пучок с током в десятки килоампер, а также быстро перестраивать частоту генерируемого излучения путем варьирования плотности плазмы. Ориентируясь на эти особенности, на установке ГОЛ-ПЭТ в ИЯФ СО РАН проводятся детальные исследования генерации субТГц-излучения при пучково-плазменном взаимодействии. В ходе этих исследований было выявлено три механизма перехода плазменных колебаний в поток электромагнитного излучения, выходящего из плазмы. Эти механизмы следующие: переход плазменных волн в электромагнитные при их рассеянии на градиентах плотности плазмы, слияние двух плазменных колебаний в одну электромагнитную волну при высоком уровне колебаний и прямая накачка ЭМ-ветви колебаний плазмы в условиях квазипериодического возмущения ее плотности [1, 2]. В последнем случае в экспериментах достигнута мощность в выведенном в атмосферу потоке субТГц-излучения на уровне 10 МВт. Варьирование плотности плазмы от выстрела к выстрелу, а также ее рост во время инжекции пучка в плазму приводят к изменениям спектрального состава излучения в этом потоке, что вызывает необходимость регистрации спектра в различных экспериментальных условиях. Для регистрации спектра использовался полихроматор с частотно-селективными каналами на основе диодов с барьером Шоттки [3]. Спектральные измерения сопровождалась регистрацией локальной плотности плазмы и функции распределения электронов пучка, прошедшего через плазму. В данном докладе будут представлены и обсуждены различные варианты распределения спектральной плотности мощности в потоке, зарегистрированном в экспериментах на установке ГОЛ-ПЭТ.

1. *Arzhannikov A.V., Ivanov I.A., Kasatov A.A., et al.* Well-directed flux of megawatt sub-mm radiation generated by a relativistic electron beam in a magnetized plasma with strong density gradients // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2020. V. 62, № 4. Art. 045002.

2. *Samtsov D.A., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L. et al.* Generation of a directed flux of megawatt THz radiation as a result of strong REB-plasma interaction in a plasma column // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2021 [in print].

3. *Arzhannikov A.V., Ivanov I.A., Kuznetsov S.A. et al.* Eight-channel polychromator for spectral measurements in the frequency band of 0.1-0.6 THz // *IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. 2021. P. 101–105 ; doi: 10.119/EDM52169.2021.9507604.

**ПРИЕМНИКИ
МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,
СПЕКТРОСКОПИЯ И МЕТРОЛОГИЯ**

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТРЕБОВАНИЯ К ПРИЕМНИКАМ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА «МИЛЛИМЕТРОН», ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РСДБ-НАБЛЮДЕНИЙ*

*А.В. Худченко¹, А.В. Смирнов¹, А.М. Барышев², С.Ю. Турыгин³,
Е. Голубев¹, Р.А. Черный¹, А.С. Андрианов¹, М.Н. Андрианов¹,
А.А. Озолин¹, В.И. Костенко¹, И.В. Третьяков, В.П. Кошелец^{1,4},
Р. Хеспер², А. Рудницкий¹, С.Ф. Лихачев¹*

¹ Астрокосмический центр ФИАН, Москва

² Астрономический институт им. Каптайна университета Гронингена, Нидерланды

³ Специальное конструкторское бюро ИРЭ РАН, Фрязино

⁴ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

Космическая обсерватория «Миллиметронтон» с раскрываемым зеркалом диаметром 10 м будет запущена в точку Лагранжа L2. На борту «Миллиметронтон» будет установлен ряд криогенных приборов для детектирования терагерцового излучения от космических объектов. Одним из приборов будет комплекс миллиметровых приемников, предназначенных для наблюдения в режиме радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) с плечом космос – Земля. Для работы интерферометра необходимо осуществлять когерентный прием исследуемого сигнала, поэтому РСДБ-прибор будет сконструирован на основе приемников гетеродинного типа.

В состав РСДБ-приемников войдут три устройства: 1) приемник диапазона 33–50 ГГц на основе НЕМТ-усилителя; 2) приемник диапазона 84–116 ГГц на основе НЕМТ-усилителя; 3) приемник диапазона 211–275 ГГц, основанный на туннельных смесителях «сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник» (СИС). Также научное сообщество проявляет особый интерес к возможности проведения РСДБ-измерений в окне прозрачности земной атмосферы диапазона 275–373 ГГц, поэтому всерьез рассматривается возможность включения такого приемника в состав прибора РСДБ. Такой приемник также будет сконструирован на основе СИС-смесителей.

РСДБ-прибор будет располагаться в криоконтейнере телескопа при температуре 20 К, при этом смесители третьего и четвертого диапазонов будут дополнительно охлаждаться до 4 К. Входной сигнал, собранный основным зеркалом телескопа и перенаправленный в криоконтейнер вторичным зеркалом подается на вход РСДБ-инструмента. Входная оптическая система будет включать в состав несколько дихроиков и зеркал для обеспечения одновременной работы всех РСДБ-приемников. Это позволит осуществлять режим многочастотного синтеза в интерферометре, а также позволит использовать метод переноса фазы с низкочастотных каналов на более высокочастотные для улучшения качества приема последних. Главным опорным генератором на борту, на основе которого будут формироваться все сигналы

гетеродинов, будет водородный мазер. Выходные ПЧ-сигналы приемников планируется распределять по четырем каналам полосой 4 ГГц для последующей оцифровки, калибровки и записи с глубиной в 2 бита в бортовую память. Планируется, что последующая передача научных данных на Землю будет осуществляться по высокочастотному радиоканалу со скоростью 1,2 Гбит/с либо альтернативным более скоростным методом.

ГИРОТРОНЫ КАК ИСТОЧНИКИ ИНТЕНСИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ*

Г.Ю. Голубятников

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В настоящей работе представлены примеры практического использования излучения гиротрона миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов для исследования молекулярных спектров [1]. Продемонстрированы возможности и преимущества методов нелинейной спектроскопии, а именно многофотонной спектроскопии [2], расширяющих круг спектроскопических исследований с применением высокой интенсивности излучения гиротронов.

Стабилизированный по частоте 263 ГГц гиротрон [3] использовался для записи спектральных линий молекул SO_2 , OCS и CH_3OH на спектрометре с радиоакустическим детектированием (РАД). Полученная в настоящих экспериментах предельная чувствительность по коэффициенту поглощения для некоторых слабых линий метана (CH_4 , CH_3D) с малым дипольным моментом оценена как $\sim 10^{-11} \text{ см}^{-1}$ [1]. Обсуждаются ограничения по использованию высокой интенсивности излучения гиротронов, связанные с эффектами насыщения спектральных линий и теплового нагрева элементов ячейки.

Показана возможность использования гармоник излучения гиротрона с целью расширения частотного диапазона вплоть до 1 ТГц. Интенсивности 2-й и 3-й гармоники по отношению к мощности на основной частоте излучения оценены как 1 % и 0,1 % соответственно.

С целью демонстрации метода двухфотонных переходов и оценки его чувствительности были проведены эксперименты на спектрометре РАД и спектрометре прямого поглощения. Для записи спектра двухфотонного поглощения были выбраны вращательные переходы молекул OCS и SO_2 , имеющие хорошо изученные спектральные линии с большим дипольным моментом.

В заключение приведены некоторые примеры возможностей использования гиротронов для фундаментальных и практических задач [4].

Работа выполнена в рамках государственного задания 0030-2021-0016.

1. *Golubiatnikov G.Yu.* Sub-terahertz high-sensitivity high-resolution molecular spectroscopy with a gyrotron / G.Yu. Golubiatnikov, M.A. Koshelev, A.I. Tsvetkov, A.P. Fokin, M.Yu. Glyavin, M.Yu. Tretyakov // IEEE Trans. on Terahertz Sci. Technol. 2020. V. 10(5). P. 502–512.

2. *Летохов В.С., Чеботаев В.П.* Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения. М. : Наука, 1990. 512 с. ; *Letokhov V.S., Chebotayev V.P.* Nonlinear Laser Spectroscopy. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 1977. (Springer Series in Optical Sciences; V. 466); *Oka T.* Infrared-microwave (radiofrequency) two-photon spectroscopy // Laser Spectroscopy / ed. Richard G. Brewer, Aram Mooradian. New York ; London : Plenum Press, 1974. V. 671. P. 413–432.

3. *Fokin A.P. et al.* High-power sub-terahertz source with a record frequency stability at up to 1 Hz // Scientific Reports. 2018. V. 8. P. 4317.

4. *Krupnov A.F., Tretyakov M.Yu.* Volume heating of a vertical air column by microwave radiation in the atmospheric absorption line // Izv. VUZov. Radiofizika. 2019. V. 62(4). P. 277–285 [in Russian] ; *Permyakova O.I., Ilisca E., Chapovsky P.L.* Theoretical model for enrichment of CH₃F nuclear-spin isomers by resonant microwave radiation // Phys. Rev. A. 2003. V. 67. Art. 033406.

ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОКЛИМАТА И КОНЦЕПЦИИ РАЗВИТИЯ НАЗЕМНОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ В РОССИИ

*А.В. Лапинов^{1,2}, С.А. Лапинова^{3,4}, Т.А. Хабарова¹, Л.Ю. Петров⁵,
И.С. Ундалова², А.В. Чалова², Н.И. Лапин², А.К. Киселев²*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Мининский университет, Нижний Новгород

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

⁴ Высшая школа экономики, Нижний Новгород

⁵ NASA GSFC, Greenbelt, USA

В настоящее время для анализа астроклимата нередко продолжают использоваться методы, получившие свое развитие во второй половине 20-го века. Одним из них является так называемый метод разрезов. В то же время благодаря значительному прогрессу в исследованиях атмосферы со спутников и росту наземных метеостанций мы сегодня располагаем значительно более подробной информацией о распределении давления, влажности и температуры и фактически можем рассчитывать прозрачность атмосферы в см – субмм диапазоне длин волн с точностью, сопоставимой с натурными измерениями. В данном докладе приводятся результаты сравнений подобных расчетов с данными, полученными на разных длинах волн как методом разрезов, так и при калибровке на радиотелескопах во время астрономических наблюдений. Благодаря большой выборке данных, охватывающей 12-летний период с шагом в 3 часа для свыше чем 40 различных мест,

включающих как существующие обсерватории мм – субмм диапазона длин волн, так и перспективные места будущих обсерваторий, составлен их рейтинг исходя из прозрачности атмосферы в диапазоне от 18 до 345 ГГц, а также с учетом облачности. Пример подобного анализа представлен нами ранее в [1–2].

Кратко дается анализ современного состояния наземной мм и субмм радиоастрономической базы за рубежом и отечественной радиоастрономии. Обсуждается перечень перспективных задач, пути развития радиоастрономии в РФ.

Работа выполнена при поддержке госпрограммы ИПФ РАН 0030-2021-0005 и гранта РНФ № 17-12-01256.

1. *Lapinov A.V.* On the benefits of the Eastern Pamirs for sub-mm astronomy / A.V. Lapinov, S.A. Lapinova, L.Yu. Petrov, D. Ferrusca // *Proceedings of SPIE* / eds. Jonas Zmuidzinas, Jian-Rong Gao. 2020. V. 11453. P. 1145320; doi: 10.1117/12.2560250.

2. *Lapinov A.V.* On the advantages of the Eastern Pamirs for sub-mm astronomy / A.V. Lapinov, S.A. Lapinova, T.A. Khabarova, L.Yu. Petrov, D. Ferrusca, A.S. Borisov // *The International Conference «Submillimeter and Millimeter Astronomy: Objectives and Instruments»*. М., 2021 [pdf of presentation in https://millimetron.ru/conference_2021/Lapinov.pdf].

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНИКИ СУБТГЦ-ДИАПАЗОНА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ И НАЗЕМНОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ: ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ И ТЕХНОЛОГИИ

*В. Кошелец^{1,2}, К. Рудаков^{1,3}, А. Худченко^{1,2}, Л. Филиппенко¹,
Р. Хеснер³, А. Барышев³*

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

² Астрокосмический центр ФИАН, Москва

³ Астрономический институт университета Гронингена, г. Гронинген, Нидерланды

В докладе представлены результаты разработок в области создания маломощных приемных систем субТГц-диапазона, выполненных в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в последние годы и направленных на создание приемников с квантовой чувствительностью для использования в радиотелескопах космического и наземного базирования. Смесители «сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник» (СИС) на основе высококачественных туннельных переходов являются ключевыми элементами наиболее чувствительных гетеродинных приемников субТГц-диапазона. В статье представлены результаты разработки СИС-приемников диапазонов 211–275 ГГц и 800–950 ГГц с шумовой температурой в двухполосном режиме (DSB) около 20 К

и 220 К соответственно. Эти разработки будут использованы при создании приемных систем для наземных телескопов APEx и LLMA, а также для космической миссии Millimetron.

ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УЗБЕКИСТАНЕ И НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ПРОЕКТА «СУФФА»

*Ю.В. Артеменко¹, Г.М. Бубнов², В.Ф. Вдовин^{1,2}, Д.В. Данилевский³,
Е.И. Домбек², П.М. Землянуха², Г. Лагервей⁴, И.В. Леснов²,
К.В. Минеев², Г.И. Шанин³, А. Этнаер⁴*

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва

² ИПФ РАН, Нижний Новгород

³ Обсерватория РТ-70 АН РУз, Ташкент, Республика Узбекистан

⁴ Vertex Antennentechnik GmbH

2021 г. привнес весомые новые результаты в развитие международного проекта строительства мультидисциплинарной международной организации Международной радиоастрономической обсерватории «Суффа» (МРАО «Суффа»). Детальное описание новых научных, технических и организационных результатов, а также планов на ближайшее время представлены в докладе.

Среди научных результатов года основные принесла экспедиция на склон вершины Акташтау (высота 3200 м), доминирующей над нагорьем Суффа (2400 м), состоявшаяся в мае – июне 2021 г. В докладе представлены результаты измерений, подтвердившие ранее высказанную идею о целесообразности дополнить проект строительства 70-метрового телескопа на базовой площадке «Суффы» малым зеркалом с более высоким качеством поверхности, установленным на большей высоте и в условиях с лучшим астроклиматом. Измерения выполнены с использованием радиометра МИАП-2 [1], обработка результатов кратковременного цикла исследований проведена на основе новых оригинальных алгоритмов нейросетевой обучающейся методики обработки результатов [2].

На основе этих результатов ведется корректировка технического проекта обсерватории, включая развитие радиоастрономической аппаратуры от антенн [3] до приемников, а также развитие аппаратуры и методов исследования особенностей распространения излучения длиной волны 1,3 и 0,8 мм.

Основными организационными итогами года в развитии проекта «Суффа» стало фактическое его включение в список перспективных инструментов Телескопа горизонта событий [4]. Детальный анализ этих возможностей представлен в докладе. Кроме того, в июне 2021 г. было дано поручение

председателя правительства РФ о подписании устава МРАО «Суффа» и дополнений в межправительственное соглашение по проекту между Россией и Узбекистаном, выполненное в рамках крупного российско-узбекского форума, включавшего встречу президентов двух стран 16–19 ноября 2021 г. Конец 2021 г. ознаменовался серией встреч и консультаций, начиная от форума ЕАЭС [5], где был представлен текущий статус и планы развития проекта и к коллаборации «Суффы» приглашены другие участники. В декабре 2021 г. на уровне министерств, академий и полномочных представителей завершена подготовка плана работ на 2022 г., который представлен в докладе.

1. A dual-wave atmosphere transparency radiometer of the millimeter wave range / Nosov V.I., Bolshakov O.S., Bubnov G.M. et al. // Instruments and Experimental Techniques. 2016. V. 59, № 3. P. 374–380.

2. Machine learning methods for precipitable water vapor estimation by radiometric data in millimetre wavelength / Grigoriy Bubnov et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2015. Art. 012024. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2015/1/012024>.

3. <https://www.vertexant.de/>.

4. Raymond A.M., Palumbo D., Paine S.N. et al. Evaluation of new submillimeter VLBI sites for the event horizon telescope // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2021. V. 253, № 1. URL: <https://doi.org/10.3847/1538-3881/abc3c3>.

5. <https://forumcosmos.ru/>.

РОЛЬ И МЕСТО КВАДРАТУРНОЙ МОДУЛЯЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

М.М. Гаврилов¹, А.А. Зорина¹, З.П. Куприянов², П.В. Куприянов¹

¹ АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина, г. Фрязино

² АО «НПК «Тристан», Москва

Технология активных фазированных антенных решеток (АФАР) является основным драйвером развития как современной радиолокации, так и радиосвязи [1]. Достоинства АФАР понятны, они давно, подробно и многократно обсуждались. Это в первую очередь все, что связано с возможностью быстрого электронного сканирования диаграммы направленности. В настоящее время как за рубежом, так и у нас в стране построена целая индустрия АФАР преимущественно для военных и специальных приложений. Широкому внедрению указанной технологии в научные, производственно-технические и прочие коммерческие проекты препятствует ее высокая стоимость. Основной вклад в стоимость АФАР вносят приемопередающие модули (ППМ) и, в частности, полупроводниковые чип-компоненты СВЧ.

Наибольшую площадь среди чип-компонентов ППМ АФАР имеют ступенчатые многозарядные аттенюаторы и фазовращатели, используемые для формирования диаграммы направленности антенны. Требуемая площадь обусловлена физикой работы приборов, основанной на коммутации отрезков линии передачи либо значительного количестве дискретных сосредоточенных элементов. К этому добавляются аспекты паразитной модуляции, монотонности и другие проблемы, связанные с многоуровневой аналоговой модуляцией на СВЧ.

Альтернативой описанного выше способа формирования в АФАР необходимого амплитудно-фазового распределения является управление вектором сигнала с помощью амплитудной квадратурной (I/Q) модуляции. I/Q – популярный в последнее время термин является аббревиатурой от «in-phase» (синфазный) и «quadrature» (квадратурный) [2, 3]. Современные I/Q-модуляторы строятся, как правило, по схеме квадратурного смесителя. Физика работы I/Q векторных модуляторов совершенно иная, и площадь кристалла таких приборов на порядок меньше рассматриваемых выше аттенюаторов и фазовращателей [4], в связи с чем может стать решением проблемы высокоэффективной модуляции современных микроволновых телекоммуникационных систем.

В данном сообщении приведены результаты сравнительного исследования основных электрических характеристик обоих типов векторных модуляторов СВЧ. В заключение делается вывод о возможности и целесообразности построения диаграммообразующих элементов ППМ АФАР на основе принципов амплитудной I/Q-модуляции.

1. *Кочемасов В.Н., Шадский В.А.* Твердотельные СВЧ-фазовращатели. Ч. 1, 2 // Электроника НТБ. 2017. № 1; № 2.

2. *Мацыкин С.В.* Использование квадратурных модуляторов в передающем тракте активной фазированной антенной решетки X-диапазона / Мацыкин С.В., Савилкин С.Б., Гуровский А.В., Фролов В.О. // Программные продукты, системы и алгоритмы. 2018. № 2.

3. *Dinc T.* X-band SiGe bi-complementary metal-oxide semiconductor transmit/receive module core chip for phased array RADAR applications / T. Dinc, E. Ozeren, C. Caliskan, H. Kayahan, Y. Gurbuz // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2015. 9, № 9.

4. *Sim S.* A four-channel bi-directional CMOS core chip for X-band phased array T/R modules / S. Sim, B. Kang, J.-G. Kim, J.-H. Chun, B. Jang, L. Jeon // Proceeding of 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon). 2015.

5. *Гугин А.Ю., Кондратенко А.В.* Монолитная интегральная схема управления амплитудой и фазой сигнала X-диапазона частот // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2017) : материалы 27-й Международной Крымской конференции. 2017.

МИКРОВОЛНОВАЯ ВОЛЬТ-ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С МИКРОНЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

А.Н. Резник, Н.В. Востоков

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

В настоящее время интенсивно изучаются возможности определения на микро- и наномасштабах электрофизических параметров полупроводников. Используются микроскопы с латеральным разрешением 50 нм – 100 мкм, обычно работающие в диапазоне $f = 1\text{--}10$ ГГц. Существуют отдельные реализации микроскопов субТГц-диапазона. Удастся с достаточной степенью точности характеризовать только простые структуры с одним определяемым параметром, в частности найти проводимость однородного материала либо слоевое сопротивление тонкой пленки с разрешением не лучше 50 мкм.

В данной работе продемонстрирована возможность определения полного набора электрических параметров (концентрации n и подвижности μ свободных носителей заряда, удельной электропроводности σ и др.) с микронным разрешением. Изложены теоретические и инструментальные основы разработанного метода вольт-импедансной (Z - V) спектроскопии [1, 2].

На поверхности полупроводниковой пластины формируется система концентрических микроантенн, образующих контакт Шоттки – обедненный приповерхностный слой над невозмущенной областью полупроводника. Измеряется микроволновый спектр импеданса $Z(f)$ системы антенна – образец, как функция постоянного напряжения V , приложенного между контактными площадками антенны. Параметры n , μ , σ находятся путем решения соответствующей обратной задачи. С этой целью используется развитая теория монополярной антенны, взаимодействующей с произвольной плоско-слоистой средой. Приведена конструкция микроволнового Z - V -спектрометра диапазона 0,01–67 ГГц с разрешением 10–60 мкм, созданного на базе коммерческой зондовой станции Cascade Microtech и векторного анализатора цепей Agilent-E836A. Экспериментальная апробация метода выполнена на однородной пластине GaAs. Полученные электрофизические параметры образца хорошо соответствовали данным независимых четырехзондовых измерений эффекта Холла. Дополнительные возможности получения информации о микроволновой проводимости контакта Шоттки не реализуются в первоначальном варианте спектрометра из-за недостаточной точности измерения спектра сопротивления $R(f) = \text{Re}(Z(f))$ на низких ($f < 500$ МГц) частотах. Проблема решена при помощи разработанного метода резонансной спектроскопии [3], реализованной на базе Z - V -спектрометра, дооборудованного системой коаксиальных резонаторов. Полученные спектры $R(f)$ демонстрируют наличие «избыточного» сопротивления, которое не объясняется

классической теорией контакта Шоттки. Обнаруженный эффект может быть связан с перезарядкой глубоких ($\sim 0,2$ эВ) электронных состояний (ловушек). Модельные расчеты спектров $R(f)$ ловушек хорошо соответствуют измеренным спектрам.

Таким образом, представлено новое направление развития микроволновой микроскопии, позволяющей с микронным разрешением количественно характеризовать полупроводниковые материалы и структуры. В нашем варианте метод диагностики является неразрушающим, но контактным. Переход к нанометровому разрешению, а также реализация бесконтактных измерений является перспективным направлением дальнейших исследований.

1. Резник А.Н., Вдовичева Н.К. // Журнал технической физики. 2019. Т. 89, № 11. С. 1813–1818.

2. Резник А.Н., Востоков Н.В., Вдовичева Н.К., Шапкин В.И. // Журнал технической физики. 2020. Т. 90, № 11. С. 1944–1949.

3. Резник А.Н., Востоков Н.В. // Журнал технической физики. 2022. Т. 92, № 3. С. 492–502.

ПРИЕМНИК 3 ММ-ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН КЛАССИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ И АТМОСФЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С МАЛОШУМЯЩИМ НЕОХЛАЖДАЕМЫМ УВЧ

*О.С. Большаков¹, Г.М. Бубнов¹, А.В. Вдовин¹, А.А. Гунбина¹,
В.К. Дубровиц², П.М. Землянуха¹, В.Л. Кауц³, А.М. Красильников¹,
И.В. Леснов¹, М.А. Мансфельд¹, К.В. Минеев¹, Е.А. Шарандин³,
В.Ф. Вдовин¹*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербургский филиал

³ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

До последних лет в силу слабого развития элементной базы субтерагерцовой (субТГц) электроники, и в первую очередь малошумящих усилителей высокой частоты (УВЧ), радиоастрономические приемники строились не по вполне классической схеме – без УВЧ на входе. Как правило, в них использовались различного рода смесители (ДБШ, СИС и т.п.) [1]. Такая структура приемника за счет потерь преобразования априори не только вносит собственные шумы, но и кратно потерям преобразования умножает шумы последующих каскадов.

Прогресс современной мировой электроники привел к появлению интегральных схем усилительных структур практически во всем субТГц-диапазоне [2], а в низкочастотной его части стали доступны комплексированные

УВЧ [3], пригодные для создания малошумящих приемных систем, радиометров, спектрометров и т.п. для широкого круга возможных приложений от астрономии и атмосферных исследований до телекоммуникационных и radarных задач.

Долгое время небесспорной была идея использования неохлаждаемых приемников для радиоастрономических наблюдений. Однако достигнутые к настоящему моменту результаты в разработке неохлаждаемых малошумящих усилителей [4] и обширные исследования атмосферного поглощения [5], играющего значимую роль в миллиметровом диапазоне длин волн, показали, что до 3 мм зачастую вклад атмосферы является доминирующим, что делает неэффективным глубокое криогенное охлаждение наземных приемников, находящихся на небольшой высоте над уровнем моря. По этому пути с недавнего времени пошли исследователи САО РАН на радиотелескопе РАТАН-600 [6], фактически исключив дорогое и сложное в обслуживании криовакуумное оборудование из арсенала инструмента при наблюдениях вплоть до 8 мм. Принимая во внимание мировые достижения субТГц-электроники, а также учитывая опыт коллег из САО РАН, авторы решили пойти по аналогичному пути и отказаться от криостатируемой части.

В докладе представлены результаты разработки программно-аппаратного радиометрического комплекса для астрономических и атмосферных исследований в 3 мм диапазоне длин волн. Радиометр собран на основе коммерчески доступного малошумящего ($T_{ш} < 500$ К) УВЧ фирмы Farran [3] по модуляционной схеме с механическим обтюратором, реализованном на сверхразмерных квазиоптических волноводах сечением 14×14 мм. В качестве антенной системы использована антенна Кассегрена диаметром 200 мм с диаграммой направленности $\pm 1^\circ$ по уровню -3 дБ. Калибровка осуществляется по встроенному генератору шума. Для наблюдений в выделенной области небесной сферы приемная часть комплекса вместе с антенной размещена на двухкоординатном (азимут, элевация) опорно-поворотном устройстве. Управление, сбор и обработка экспериментальных данных осуществляются в удаленном режиме с помощью разработанного авторами программного обеспечения.

1. *Вдовин В.Ф.* Вопросы криостатирования сверхпроводниковых и полупроводниковых приёмников излучения в диапазоне $0,1 \div 1,0$ ТГц // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10/11. С. 876–889.

2. *Deal W.R.* Solid-state amplifiers for terahertz electronics // Proc. IEEE MTT-S Int. Symp. Dig. 2010. P. 1122–1125.

3. <https://farran.com/>.

4. *Доценко В.В.* Разработки аппаратуры радиолокации, приборостроения и электронной компонентной базы СВЧ: основные результаты выполнения комплексных проектов НИИ систем электрической связи и АО «НПФ «Микран» / В.В. Доценко, Н.Д. Малютин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, № 3. С. 79–85.

5. Бубнов Г.М. Согласованное определение интегральной влажности и эффективной оптической толщины атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн с использованием широкополосных радиометров / Г.М. Бубнов, В.Ф. Григорьев, И.И. Зинченко [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 12. С. 920–931.

6. Цыбулев П.Г. Система сбора данных и управления нового поколения для проведения радиоастрономических наблюдений в континууме на радиотелескопе РАТАН-600: разработка, наблюдения, измерения // *Астрофизический бюллетень*. 2011. Т. 66, № 1. С. 118–133.

ЛАБОРАТОРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ МОЛЕКУЛ

Т.А. Хабарова¹, А.В. Лапинов¹, Р.А. Алексеев¹, И.С. Шубняков²,
Г.Ю. Голубятников¹, А.И. Торгованов³, Ю.Ф. Авдеев³,
А.А. Дитятев³, А.С. Данилов⁴

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

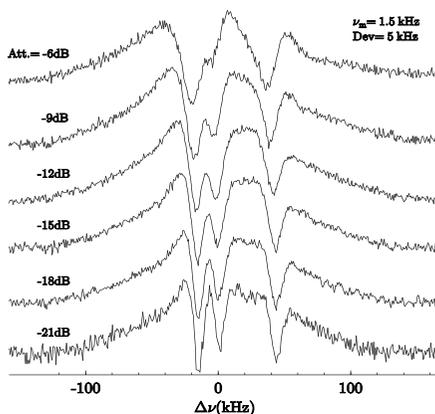
² Средняя общеобразовательная школа № 183, Нижний Новгород

³ ООО «Роде и Шварц Рус», Нижний Новгород

⁴ Кейсайт технолоджиз, Нижний Новгород

На основе прецизионных лабораторных измерений при помощи созданных в ИПФ РАН субдоплеровских спектрометров выполнены исследования сверхтонкого расщепления вращательных спектров молекул HC_3N , CH_3CN , HNCO , а также торсионно-вращательного спектра CH_3OH как в основных, так в изотопозамещенных аналогах. Найдены зависимости частот переходов и уширения наблюдаемых линий от давления и интенсивности излучения. Практически для всех переходов частоты линий измерены с рекордной на сегодня точностью в мм-диапазоне длин волн лучше 1 кГц.

Рис. 1. Пример субдоплеровских измерений с провалом Лэмба сверхтонкого расщепления вращательного перехода $J_{\text{Ka,Kc}} = 4_{0,4} - 3_{0,3}$ в молекуле HNCO на частоте 87952 МГц при давлении $\sim 0,6$ мТорр. Измерения записаны на второй гармонике частоты модуляции в 1,5 кГц с девиацией 5 кГц. Наглядно виден рост спектрального разрешения по мере ослабления мощности ЛОВ от 6 до 21 дБ за счет уменьшения уширения линий излучением



Дается сравнение полученных спектров при использовании штатного синтезатора PTS6400, а также генераторов, предоставленных для тестовых измерений компаниями Rodhe & Schwarz, KeySight и AnaPico.

Выполненные исследования представляют большой интерес для дальнейшего использования измеренных частот переходов при изучении физических условий в областях звездообразования и высокоточных исследованиях вариаций фундаментальных констант.

Работа выполнена при поддержке госпрограммы ИПФ РАН 0030-2021-0005 и гранта РФФИ № 17-12-01256.

СЧЕТЧИК ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

*А.Л. Панкратов^{1,2}, Л.С. Ревин^{1,2}, А.В. Гордеева^{1,2}, А.А. Яблоков^{1,2},
Л.С. Кузьмин^{1,3}, Е.В. Ильичев⁴*

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

² Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

³ Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

⁴ Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany

Получены убедительные экспериментальные доказательства переключения счетчика одиночных фотонов (СОФ) на основе алюминиевого джозефсоновского контакта в резистивное состояние, инициированного поглощением нескольких фотонов на частоте 10 ГГц [1]. Соответствующая энергия фотона составляет всего 7 йоктоджоулей и на 4 порядка меньше, чем у инфракрасных фотонов. Переключение СОФ осуществлялось значительно ослабленным гармоническим сигналом (представленным пуассоновским распределением фотонов) в режиме одиночных переключений (single click) при температуре 50 мК. При сравнении с пуассоновской статистикой показано, что вероятность переключения соответствует обнаружению 1, 2, 3, 4 и 5 фотонов в зависимости от величины тока смещения, регулирующего порог детектора. Максимальная мощность сигнала, поглощенного джозефсоновским контактом, оценивается по высоте квазичастичных ступеней на ВАХ с использованием теории Тьена – Гордона как 70 фВт и затем ослабляется до диапазона единиц фемтоватт и меньше. С использованием субмикронного алюминиевого туннельного перехода с критическим током 23 нА продемонстрирован прорыв в характеристиках детектора благодаря функционированию в режиме фазовой диффузии, что позволяет на порядки увеличить время между темновыми отсчетами [1]. Мы применяем ту же методологию, которая использовалась ранее в работе Г.Н. Гольцмана и др. [2] для обнаружения инфракрасных фотонов, где количество обнаруженных

фотонов получается путем сравнения с пуассоновской статистикой. В результате впервые реализован счетчик микроволновых фотонов с чрезвычайно низкой энергией фотонов, вплоть до 7 йоктоджоулей. Предлагаемый прототип счетчика одиночных фотонов может быть дополнительно оптимизирован для соответствия требованиям поиска аксионов – предполагаемых частиц темной материи.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 19-79-10170).

1. *Revin L.S. Microwave photon detection by an Al Josephson junction / L.S. Revin, A.L. Pankratov, A.V. Gordeeva, A.A. Yablokov, I.V. Rakut, V.O. Zbrozhek, and L.S. Kuzmin // Beilstein J. Nanotechnol. 2020. V. 11. P. 960. URL: <https://www.beilstein-journals.org/bjnano/articles/11/80>.*

2. *Gol'tsman G.N., Okunev O., Chulkova G., Lipatov A., Semenov A., Smirnov K., Voronov B., Dzardanov A. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 705.*

ДВУХЧАСТОТНЫЕ ПРИЕМНЫЕ СИСТЕМЫ С БОЛОМЕТРАМИ НА ХОЛОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ ДЛЯ ЗАДАЧ РАДИОАСТРОНОМИИ

*А.В. Благодаткин¹, В.О. Зброжек¹, Д.А. Пиманов¹, Е.А. Матрозова¹,
А.В. Гордеева^{1,2}, А.В. Чигинев^{1,2}, А.Л. Панкратов^{1,2}, Л.С. Кузьмин^{1,3}*

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

² Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

³ Технологический университет Чалмерса, г. Гетеборг, Швеция

В работе рассмотрены варианты приемных систем субтерагерцового диапазона, предназначенных для применения в составе разрабатываемых радиотелескопов CoRE и LSPE. В качестве чувствительного датчика принимаемого излучения в данных системах предполагается использовать болометр на холодных электронах (БХЭ). Данный тип болометра выгодно отличается от других высокой чувствительностью, широким динамическим диапазоном, а также малыми размерами. Одной из характерных особенностей БХЭ является эффективное электронное охлаждение [1] благодаря наличию абсорбера на основе S/F-структуры и ловушек из нормального металла. Это позволяет делать на его основе эффективные приемные системы с уникально высокой чувствительностью, ограниченной уровнем фотонного шума [2]. Важно также отметить, что БХЭ обладает крайне низкой чувствительностью к космическим лучам. Благодаря малым размерам БХЭ может быть использован в качестве интегрированного в приемную антенну датчика в многочастотных приемных системах.

В работе рассмотрены многочастотные приемные системы, основанные на щелевых планарных антеннах с интегрированными БХЭ для орбитально-

го радиотелескопа CoRE [3], а также на матрицах дипольных приемных антенн с интегрированными БХЭ для проектов OLIMPO [4] и LSPE. В результате численного моделирования получены диаграммы направленности и АЧХ приемных систем для проектов CoRE и LSPE. Проведены измерения АЧХ образцов приемных систем, изготовленных по рассчитанным проектам. Продемонстрировано соответствие результатов измерений и численных расчетов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что приемные системы с БХЭ являются перспективными для применения в радиотелескопах субТГц-диапазона.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 21-79-20227).

1. *Gordeeva A.V. et al.* Record electron self-cooling in cold-electron bolometers with a hybrid superconductor/ferromagnetic nanoabsorber and traps // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. P. 21961. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-78869-z>.

2. *Kuzmin L.S. et al.* Photon-noise-limited cold-electron bolometer based on strong electron self-cooling for high-performance cosmology missions // *Communications Physics*. 2019. V. 2. P. 104. URL: <https://www.nature.com/articles/s42005-019-0206-9>.

3. *Kuzmin L.S.* Multichroic seashell antenna with internal filters by resonant slots and cold-electron bolometers / L.S. Kuzmin, A.V. Blagodatkin, A.S. Mukhin, D. Pimanov, V.O. Zbrozhek, A.V. Gordeeva, A.L. Pankratov, A.V. Chiginev // *Supercond. Sci. Technol.* 2019. V. 32. Art. 035009.

4. *Matrozkova E.A.* Absorption and cross-talk in a multipixel receiving system with cold electron bolometers / E.A. Matrozkova, A.L. Pankratov, A.V. Gordeeva, A.V. Chiginev, L.S. Kuzmin // *Supercond. Sci. Technol.* 2019. V. 32, iss. 8. Art. 084001.

СИСТЕМА РАДИОВИДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО ПРИЁМНИКА ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

*С.А. Королёв¹, А.П. Шиков¹, А.В. Горюнов¹, В.И. Шашкин¹,
В.В. Паршин², П.М. Землянха², И.А. Илларионов³*

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

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

Радиовидение ставит своей целью получение сколь это возможно детального изображения объекта с помощью радиоизлучения. К настоящему времени разработано достаточно большое число методов получения радиоизображения, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Наша работа посвящена развитию систем радиовидения матричного типа, работа которых основана на использовании приёмных матриц, состоящих из большого числа ($> \sim 100$) приёмных элементов с возможно более высокой

плотностью упаковки (как правило, расстояние между элементами матрицы составляет $\sim \lambda$, где λ – длина волны излучения). При разработке матричных приёмников большой размерности к приёмным элементам предъявляются требования, которые не характерны для волноводных приёмников, такие как малые габариты, простота конструкции, невысокая стоимость, низкое энергопотребление. При этом чувствительность приёмника должна оставаться на высоком уровне.

Основным подходом к решению задачи построения матричных приёмников для систем радиовидения является использование приёмных элементов прямого детектирования, которые обладают наиболее простой конструкцией, включающей в себя в частном случае антенну, детектирующий элемент (например, диод) и усилитель низкой частоты. Такие системы, однако, рассчитаны на достаточно короткие расстояния до объектов, ограниченные несколькими метрами. При этом повышение мощности облучателя P неэффективно, так как дальность действия $R_{\max} \sim P^{1/4}$. В качестве единственного способа повышения дальности действия системы, как представляется, остаётся увеличение чувствительности приёмника.

Известно, что приёмники гетеродинного типа имеют более высокую чувствительность по сравнению с приёмниками прямого детектирования, однако супергетеродинные матричные приёмники не нашли широкого применения в задачах радиовидения в связи со сложностью и высокой стоимостью построенных на основе данного принципа матричных приёмников большой размерности.

В данной работе предложен и исследован новый подход к созданию систем радиовидения матричного типа. Подход основан на использовании в качестве элементов приёмной матрицы приёмников прямого преобразования простой конструкции: приёмный элемент состоит из модифицированной щелевой антенны, диода Шоттки с пониженной высотой барьера и малошумящего усилителя низкой (до 100 кГц) частоты. Использование приёмника прямого преобразования вместо приёмника прямого детектирования позволило не менее чем в 30 раз повысить дальность действия системы, а простота конструкции сохранила возможность изготовления матриц большой (~ 100 и более элементов) размерности. К дополнительным преимуществам предложенного подхода относится возможность получения информации о расстоянии до объекта и его скорости.

Продемонстрирована работа экспериментального макета системы радиовидения диапазона 94 ГГц с размерностью матричного приёмника 8×8 элементов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 20-79-00128). В работе использовано оборудование ЦКП ИФМ РАН «Физика и технология микро- и наноструктур».

МНОГОЗОНДОВЫЕ ВАТТМЕТРЫ ОКОНЕЧНОГО ТИПА С РЕГУЛИРУЕМЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ОТРАЖЕНИЯ ВХОДА

А.И. Матвеев

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево

Волноводные термисторные ваттметры применяются для измерений мощности и отношения мощностей электромагнитных колебаний на выходе генераторов, передатчиков, а также градуировке и настройке СВЧ-трактов. Одним из нормируемых параметров ваттметров оконечного типа является модуль коэффициента отражения входа (далее $|\Gamma|$).

Ваттметр с многозондовой структурой конструктивно включает в себя волноводный ступенчатый переход из регулярного канала в сниженный, внутри которого размещены термисторы, присоединенные через емкости к разъему, соединяющему преобразователь и автобалансный термисторный мост, за которыми установлен согласующий элемент [1]. Разработанные ваттметры способны синтезировать значения $|\Gamma|$ в диапазоне от 0,01 до 0,33.

Применение таких ваттметров возможно в двух режимах. Согласованный режим ваттметра применим в качестве эталона-переносчика [2] для передачи единицы мощности электромагнитных колебаний. Настройкой $|\Gamma|$ на минимальное значение удается снизить погрешность измерения электромагнитных колебаний. Рассогласованный режим ваттметра применяется для контроля стабильности модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходного типа.

Результаты исследований ваттметров с многозондовой структурой экспериментально подтвердили значительное улучшение технических характеристик по сравнению с прототипами. Применение многозондовой структуры в ваттметрах оконечного типа позволило уменьшить значение $|\Gamma|$ с 0,30 (для термисторных аналогов без данной системы) до 0,01 и, таким образом, уменьшить в два раза доверительные границы относительной погрешности калибровочного коэффициента.

1. Многозондовый преобразователь мощности оконечного типа : патент на полезную модель № 191197. Матвеев А.И., Перепелкин В.А., Семенов В.А., Чирков И.П. Заявка № 2019114754. Дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 29.07.2019 г.

2. *Матвеев А.И., Перепелкин В.А.* Эталон-переносчики мощности СВЧ в волноводных трактах на основе многозондовых преобразователей // Альманах современной метрологии. 2019. № 2 (18). С. 65–72.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПЛЁНОК НА ОСНОВЕ НИОБИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН

*А.А. Гунбина¹, Е.А. Серов¹, К.В. Минеев¹, В.В. Паршин¹,
В.Ф. Вдовин¹, А.М. Чекушкин², Ф.В. Хан^{2,3}, В.П. Кошелев²*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

³ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Представлены результаты исследования отражательной способности тонких плёнок Nb и NbTiN в диапазоне частот 205–255 ГГц при температурах от 5 К до комнатной. Плёнки нанесены на кремниевые подложки методом магнетронного напыления. Исследование проводилось с помощью резонаторного спектрометра, в котором исследуемый образец являлся одним из зеркал высокодобротного резонатора Фабри – Перо [1]. Выполнено сравнение полученных результатов с предыдущими работами. Такое сравнение, в частности, показывает, что потери на отражение для ниобия в сверхпроводящем состоянии в несколько раз ниже, чем для высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ [2], и ниже, чем для высокоочищенной меди [3]. Это позволяет утверждать, что сверхпроводящие плёнки на основе ниобия могут быть эффективно использованы в качестве материалов охлаждаемых антенн (как для покрытий зеркальных антенн, так и для изготовления планарных наноантенн детектирующего модуля) для обеспечения минимального уровня тепловых шумов в радиотелескопах миллиметрового/субмиллиметрового диапазонов с охлаждаемыми приёмниками.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН № 0030-2021-0005, 0030-2021-0008, 0030-2021-0001.

1. *Паршин В.В.* Криовакуумный резонаторный комплекс / В.В. Паршин, Е.А. Серов, Г.М. Бубнов, В.Ф. Вдовин, М.А. Кошелев, М.Ю. Третьяков // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8/9. С. 614–621.

2. *Parshin V.* Terahertz reflectivity of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ at cryogenic temperatures / V. Parshin, E. Serov, G. Bubnov, V. Vdovin, A. Nikolenko, I. Lesnov, A. Gunbina, A. Smirnov, V.A. Malginov, D. Dolzhenko, D. Khokhlov // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2020. V. 30, № 8. P. 1–5.

3. *Serov E.A., Parshin V.V., Bubnov G.M.* Reflectivity of metals in the millimeter wavelength range at cryogenic temperatures // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2016. V. 64, № 11. P. 3828–3838.

ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*А.В. Аржанников², С.А. Кузнецов^{1,2}, В.А. Швец¹, В.Н. Федоринин¹,
А.В. Гельфанд¹*

¹ Новосибирский филиал Института физики полупроводников
им. А.В. Ржанова СО РАН «КТИПМ»

² Новосибирский государственный университет

Развитие технологии композиционных материалов, обладающих высокими механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами [1] относится к числу приоритетных задач научно-технологического развития в РФ. Активное применение композиционных материалов наблюдается в авиастроении, что позволяет снизить массу летательных аппаратов, повысить транспортную нагрузку. Актуальной задачей является контроль на этапах производства и эксплуатации, куда входит прогнозирование механизмов формирования структуры и фазообразования связующих компонент на границах раздела и в межволоконном пространстве, выявление зарождающихся и накопленных дефектов, деградации материала в процессе его эксплуатации.

В настоящей работе рассматривается техника эллипсометрии с использованием миллиметровых волн для диагностики оптически непрозрачных композиционных материалов. Объемная структура композиционного материала рассматривается как гетерогенная среда, которая характеризуется комплексной диэлектрической функцией. В рамках однослойной физической модели рассматривается возможность регистрации расслоения в многослойной пленочной структуре композиционного материала, изготовленного на основе препрега Torayca T800.

Представлен экспериментальный образец эллипсометра, выполненный по нулевой схеме и работающий на частоте 139 ГГц (рис. 1, а). В эллипсометре применены уникальные тонкопленочные поляризационные элементы – поляризаторы и фазосдвигающие $\lambda/4$ -элементы, реализованные на основе самокомплементарных метаповерхностей с несущим диэлектрическим слоем толщиной 20 мкм [2].

Представлены результаты эллипсометрических измерений тестовых объектов, изготовленных в СибНИА им. С.А. Чапыгина. Показана возможность обнаружения фактора расслоения структуры композиционного материала на основе углеродных волокон в глубине до 0,5 мм.

(Проект 22-19-20059, РНФ-регион).

1. *Каблов Е.Н.* Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии.* 2012. № 5. С. 7.

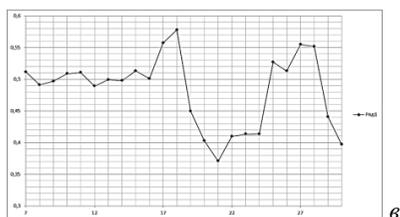
2. *Kuznetsov S.A. High-performance frequency selective surface filters for terahertz applications / S.A. Kuznetsov, A.V. Gelfand, V.N. Fedorinin, N.A. Nikolaev, P.A. Lazorskiy, A.V. Arzhannikov // Proc. 44th Int. Conf. on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019). Paris, 2019.*



a



б



в

Рис. 1. Фотографии экспериментального образца эллипсометра на 139 ГГц (*a*), фазосдвигающий элемент $\lambda/4$ (*б*), пространственное изменение фазы поляризованной волны, отраженной от тест-объекта с внутренним дефектом (*в*)

СЕЛЕКТИВНОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРА

Д.А. Сорокин, П.М. Землянуха, Е.М. Домбек

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Аддитивные технологии являются перспективным направлением при изготовлении волноводной техники и приемной аппаратуры. Существует ряд подходов к подобного рода производству – с прямым изготовлением медных деталей (спекание порошков лазером, химическое селективное осаждение), с изготовлением полимер-медного образца и последующим спеканием и осаждением меди на пластиковые оправки. Каждая из технологий имеет свои технические ограничения, связанные в первую очередь с шероховатостью поверхности и производительностью процесса.

В данной работе мы предлагаем новый подход к изготовлению объемных структур из металлов, в первую очередь из меди. Идея основывается на работах [1, 2], но имеет существенные отличия. Предлагаем также использовать гальванический процесс, однако селективно активированный нагревом лазера. Схема установки показана на рис. 1. Материалы катода и анода подбираются таким образом, чтобы электрохимический потенциал пары не запускал реакцию произвольно. Внешним источником тока создается разность

потенциалов ниже величины, необходимой для протекания реакции. Лазер используется для нагрева катода в выбранной точке, что запускает реакцию осаждения меди. Мы использовали подвижную платформу 3D-принтера Vagon V0.1 (повторяемость 15 микрон, разрешение 5 микрон, размер области построения $120 \times 120 \times 120$ мм) для крепления лазера. В качестве лазера используется диодный лазер с заявленной оптической мощностью 5,5 ватт и размером точки меньше 100 микрон. Осаждались образцы в форме квадрата размером 5×5 мм со скоростью 5 мм/с на титановую подложку. Раствор был взят аналогичный используемому в работе [3]. В качестве хелатирующего агента использовался триэтаноламин. Использование проводящей подложки позволило закрепить образцы меди, так как в противном случае осажденный металл выступает в роли анода, что ограничивает массу производимой детали. Благодаря этому возможно осаждение в несколько слоев, что и позволяет использовать технологию в качестве аддитивного производства.

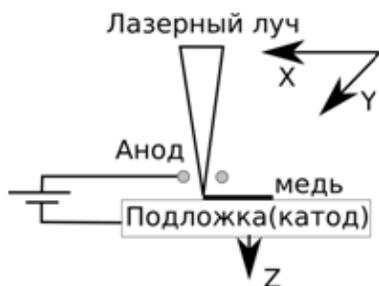


Рис. 1. Схема установки. X, Y и Z обозначают кинематические оси принтера

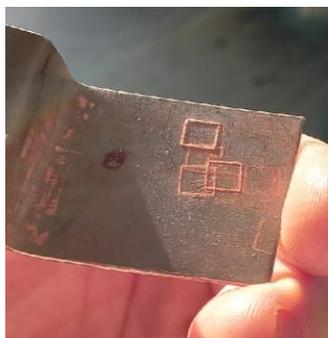


Рис. 2. Образец. Титановая подложка, селективно осажденная медь

На рис. 2 представлены образцы с осажденными дорожками меди. В зависимости от числа проходов получены образцы толщиной от 5(1) до 18(2) микрон и шириной ~ 200 –150 микрон. Скорость осаждения оценивается в $0,2(0,05)$ мкг/с по величине проходящих токов и геометрии образцов.

Данные образцы показывают перспективность применения подобного подхода. Реагенты и материалы являются на несколько порядков более дешевыми, чем при использовании других технологий. Требуются дальнейшие исследования для повышения производительности или разрешения, зернистости образцов, а также отработка технологического процесса.

1. *Chen X., Liu X., Ouyang M. et al.* Multi-metal 4D printing with a desktop electrochemical 3D printer // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. Art. 3973. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40774-5>.

2. *Wang X.C., Zheng H.Y., Lim G.C.* Laser induced copper electroless plating on polyimide with Q-switch Nd:YAG laser // *Applied Surface Science.* 2002. V. 200, iss. 1/4. P. 165–171. URL: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)00850-4](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)00850-4).

3. *Manshina A. Laser-assisted metal deposition from CuSO₄-based electrolyte solution / A. Manshina, A. Povolotskiy, T. Ivanova, A. Kurochkin, Yu. Tver'yanovich // Laser Physics Letters. 2007. V. 4. P. 163. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/lapl.200610090>.*

РАЗРАБОТКА АНИЗОТРОПНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В КРУГОВУЮ В ДИАПАЗОНЕ КВЧ

*С.Ю. Молчанов¹, И.Ш. Бахтеев¹, В.М. Муравьев¹, П.А. Гусихин¹,
Н.М. Ушаков^{2,3}, А.В. Стародубов²*

¹ Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка

² Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского

Рассмотрены особенности расчета и создания устройства для преобразования линейной поляризации в круговую в миллиметровом диапазоне. Проведены исследования формирования таких структур с помощью 3D-печати. Изучены диэлектрические характеристики материалов для 3D-печати. Выбран материал с наилучшими характеристиками для производства анизотропной поверхности. Изготовленный с помощью 3D-печати анизотропный диэлектрик, состоящий из периодически повторяющихся вырезов, предназначен для работы в диапазоне 87–110 ГГц, в котором осевое отношение (axial ratio) было ниже 3 дБ [1]. Передача мощности в рабочем диапазоне составляла не менее 90 %. Измеренные осевые отношения и прошедшая мощность хорошо согласуются с результатами моделирования.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 19-72-30003).

1. *Бахтеев И.Ш.* Искусственный анизотропный материал для преобразования линейной поляризации в круговую поляризацию в диапазоне КВЧ / *И.Ш. Бахтеев, С.Ю. Молчанов, В.М. Муравьев, П.А. Гусихин // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86, № 4. С. 491–495.*

РАЗРАБОТКА ПОГЛОТИТЕЛЕЙ И ЧЕРНЫХ ТЕЛ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.М. Домбек, П.М. Землянуха, В.В. Паришин, Р.А. Алексеев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Представлены образцы радиопоглощающих материалов, изготовленные на 3D-принтере. Образцы спроектированы на минимум коэффици-

ента отражения в диапазоне частот 100–200 ГГц. Коэффициент отражения лучших вариантов образцов составляет порядка –33...–35 дБ.

В работе были исследованы различные полимерные композиты, различающиеся по структуре и составу заполнения. На основе этих композитов были созданы поглотители с минимальным коэффициентом отражения, как классической пирамидальной структуры с характерными размерами в несколько длин волн, так и структуры типа поглощающего конуса.

Были измерены характеристики используемых материалов, на основе которых проводилось моделирование отражения волны от спроектированных структур методом конечных элементов с последующей оптимизацией.

Измерения коэффициентов отражения были выполнены по классической схеме на основе интерферометра Цандера – Маха. Потенциал установки в диапазоне измерений порядка 35–40 дБ.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ В ВОЛНОВОДНЫХ ТРАКТАХ

А.С. Бондаренко¹, А.С. Боровков^{1,2}, В.А. Семёнов¹, В.Г. Губа³

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.

² Московский институт электронной техники, Зеленоград

³ ООО «НПК ТАИР», Томск

Рассмотрены методы определения погрешности измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения радиотехнических устройств в волноводных трактах. Известно, что погрешность измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения зависит от эффективных параметров векторного анализатора цепей. Описание эффективных параметров приведено в МИ 3411. Для определения эффективных параметров исследован и применен метод сравнения калибровок.

На основе данного метода разработана методика, позволяющая определить погрешность передачи единиц комплексных коэффициентов передачи и отражения. При выполнении операций по разработанной методике необходимо использовать волноводные меры с известными метрологическими характеристиками. Набор используемых волноводных мер должен обеспечивать проведение калибровки векторного анализатора цепей по алгоритмам TRRM и TRL. Методику рекомендуется применять при испытаниях и поверке средств измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения в волноводных трактах.

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ МИКРОКАЛОРИМЕТР В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ ОТ 75 ДО 118 ГГц

И.П. Чирков, И.М. Малай

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево

Во ФГУП «ВНИИФТРИ», являющемся хранителем национальных эталонов единицы мощности СВЧ в волноводных и коаксиальных трактах, разработан микрокалориметр для определения коэффициента эффективности тепловых преобразователей мощности СВЧ в волноводных трактах $2,54 \times 1,27$ (WR10) и $2,4 \times 1,2$ мм в диапазоне частот от 75 до 118 ГГц.

Микрокалориметр содержит два идентичных канала волновода, один из которых для уменьшения влияния теплового дрейфа на результаты измерений используется в качестве опорного, а второй – непосредственно для проведения измерений. Роль опорного и рабочего канала может меняться в зависимости от входного сечения волноводного тракта испытываемого преобразователя мощности. Каналы имеют сечения волноводного тракта $2,4 \times 1,2$ и $2,54 \times 1,27$ мм (WR10) соответственно, что позволяет проводить измерения коэффициента эффективности как отечественных, так и зарубежных преобразователей мощности СВЧ, в том числе проводить международные сличения в любом из упомянутых выше трактов.

В качестве приемных преобразователей были исследованы полупроводниковые болометрические преобразователи мощности СВЧ, аналогичные используемым в составе национального эталона ГЭТ-167-2017 [1]. Преимуществами их использования являются малый вес (что позволяет сократить время измерения в микрокалориметре и, как следствие, уменьшить случайную погрешность измерений), хорошее согласование с трактом СВЧ, удобство контроля потерь на излучение и равномерные частотные характеристики коэффициента эффективности в диапазоне частот волновода [2].

1. *Перепелкин В.А.* Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 78,33 ГГц ГЭТ 167–2017 / В.А. Перепелкин, В.А. Семенов, И.П. Чирков, А.В. Павлов, М.В. Жогун, А.В. Коудельный // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 3–6.

2. *Коудельный А.В.* Болометрические полупроводниковые преобразователи мощности СВЧ миллиметрового диапазона длин волн / А.В. Коудельный, И.М. Малай, В.А. Перепелкин, И.П. Чирков // Метрология в радиоэлектронике : материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. 2021. С. 187–192.

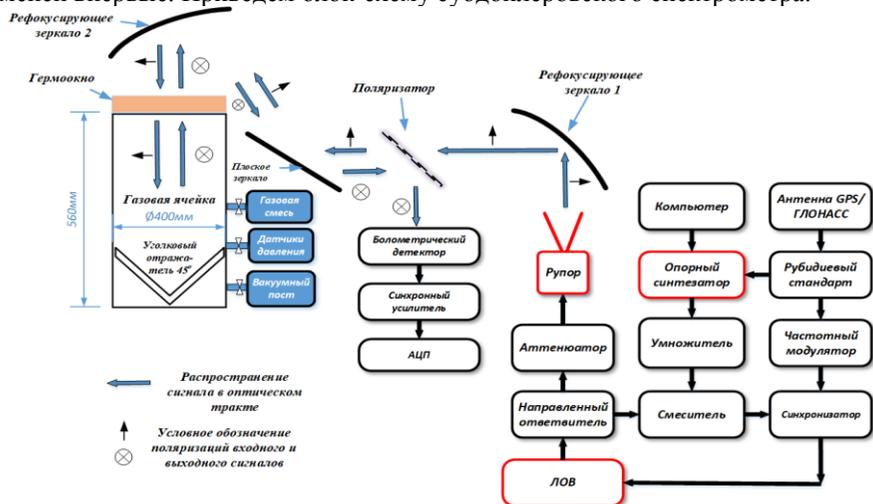
КВАЗИОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СУБДОПЛЕРОВСКОГО СПЕКТРОМЕТРА МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Р.А. Алексеев, И.В. Лапкин, Т.А. Хабарова, А.В. Лапинов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Представленный доклад посвящен модернизации субдоплеровского спектрометра, созданного ранее в ИПФ РАН [1]. Метод нелинейной спектроскопии, основанный на эффекте провала Лэмба, обладает рядом достоинств и позволяет при комнатной температуре измерить частоты линий с очень высокой точностью благодаря узким нелинейным резонансам внутри доплеровского контура. Однако проведенные ранее измерения переходов в молекулах HC_3N и OCS [2] показали искажение формы спектральных линий для ряда частот в связи с большой оптической толщиной и насыщением излучением. Также были существенны эффекты, связанные со столкновениями молекул со стенками ячейки и малым пролетным временем в поперечном сечении, перпендикулярном распространению излучения.

Для уменьшения влияния перечисленных выше эффектов был спроектирован и изготовлен спектрометр с ячейкой увеличенного диаметра. Для частотно-независимого облучения ячейки диаметром 400 мм потребовалось изготовление системы эллиптических зеркал, рассчитанных методом квазиоптики. Данный метод для создания лабораторного спектрометра был применен впервые. Приведем блок-схему субдоплеровского спектрометра.



Работа выполнена при поддержке госпрограммы ИПФ РАН № 0030-2021-0005 и гранта РНФ № 17-12-01256.

1. Голубятников Г.Ю., Белов С.П., Леонов И.И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8/9. С. 666.

2. Голубятников Г.Ю., Белов С.П., Лапинов А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 8. С. 691.

**МИЛЛИМЕТРОВОЕ
И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
В ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

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

А.М. Горбачев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В докладе представлен обзор результатов исследований процессов синтеза легированного алмаза из газовой фазы (CVD – chemical vapor deposition) в плазме СВЧ-разряда, выполненных в ИПФ РАН. Благодаря своим уникальным физическим свойствам алмаз является привлекательным для целого ряда приложений. Легирование алмаза позволяет получать материал с новыми свойствами, что еще более расширяет круг его возможных применений.

Алмаз является широкозонным проводником, его легирование акцепторной (бор) или донорной (фосфор) примесями позволяет создавать в объеме кристалла алмаза области, содержащие свободные носители заряда. Это позволяет использовать такой алмаз как основу для создания различных электронных приборов. Легирование другими примесями (азот, кремний, германий) формирует в алмазе центры окраски (как правило, в виде атом примеси – вакансии). Такие центры аналогичны по структуре энергетических уровней уединенному атому и являются перспективными для применения в целом ряде квантовых технологий (квантовые сенсоры, квантовая информация, квантовые компьютеры). Совместное легирование алмаза атомами, создающими центры окраски, и донорной или акцепторной примесью позволяет управлять зарядовыми состояниями центров окраски, что является привлекательным для ряда приложений.

Легирование алмаза осуществляется методом ионной имплантации или в процессе его синтеза. В отличие от ионной имплантации легирование в процессе CVD-роста не приводит к повреждению кристаллической решетки алмаза и позволяет создавать центры окраски на любой глубине в эпитаксиальном слое. Однако для осуществления легирования с заданной концентрацией примеси предварительно требуется исследование режимов CVD-синтеза.

В докладе представлены результаты исследований легирования алмаза в процессе CVD-роста различными примесями: бором, фосфором, азотом, кремнием, а также их комбинацией. Рост монокристаллического алмаза осуществлялся в разработанном в ИПФ РАН реакторе для синтеза легированного алмаза. Данный реактор был первоначально создан для легирования алмаза бором. Его особенностями являются быстрое переключение состава газовой смеси, подаваемой в реактор, и ламинарный газовый поток в реакторе. Это позволяет в течение нескольких секунд изменять состав газовой смеси в области разряда, что дает возможность получать тонкие легированные слои нанометровой толщины (дельта-слои). Смесь газов активируется с

помощью СВЧ-разряда в цилиндрическом резонаторе на частоте 2,45 ГГц. Использование безэлектродного разряда, не имеющего непосредственного контакта со стенками вакуумной камеры, позволяет избежать загрязнения смеси газов посторонними примесями. В докладе обсуждаются особенности режимов CVD-роста алмаза при легировании различными примесями. Приведены данные о характеристиках полученного легированного алмаза и его возможных применениях.

В части исследований легирования CVD-алмаза кремнием и изучения влияния акцепторной примеси на свойства центров окраски работа поддержана НЦМУ «Центр фотоники» при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-906).

СИНТЕЗ ПЛАТИНОВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ СВЧ-ИМПУЛЬСАМИ МОЩНОГО ГИРОТРОНА

*З.А. Заклецкий¹, Н.С. Ахмадуллина^{2,4}, В.Д. Борзосеков¹,
Е.В. Воронова¹, Н.Г. Гусейн-заде¹, В.В. Качмар¹, А.В. Князев¹,
А.К. Козак¹, Л.В. Колик¹, Е.М. Кончехов¹, А.А. Летунов¹,
В.П. Лозвиненко¹, Д.В. Малахов¹, Е.А. Образцова^{1,3}, А.Е. Петров¹,
Н.Н. Скворцова¹, А.С. Соколов¹, В.Д. Степахин¹, Н.К. Харчев¹,
О.Н. Шишилов^{1,4}*

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

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

³ Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина

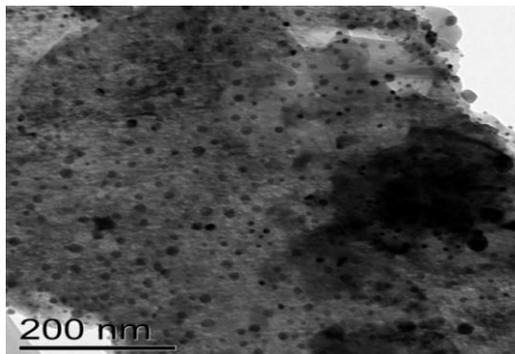
и Ю.А. Овчинникова РАН, Москва

⁴ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

В докладе будут представлены основные результаты получения катализаторов типа «оксидный носитель – платина» (рис. 1) при взаимодействии СВЧ-импульса мощного гиротрона со смесью порошков металл – диэлектрик. В рамках проделанной работы были исследованы процессы синтеза в различных химических смесях порошков оксидов (Al_2O_3 -сomm, $\gamma-Al_2O_3$, SiO_2 , TiO_2) и платины при различных массовых концентрациях: от 0,5 до 20 % от массы всей смеси.

Экспериментально определены необходимые микроволновые энергии для перехода к инициации плазмохимических реакций синтеза платиновых катализаторов. Зафиксированы характеристики процессов, проходящих в реакторе: температура газа, температура поверхности порошка, поглощение микроволновой энергии гиротрона в порошках, эволюция свечения частиц. Для всех смесей порошков получен синтез вторичных частиц микро- и наноразмеров.

Рис. 1. Изображение синтезированной частицы типа «оксидный носитель – платина», полученное на просвечивающем электронном микроскопе



ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС СИНТЕЗА МАТЕРИАЛОВ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРОВ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ПОРОШКОВ В РАЗРЯДАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ СВЧ-ИМПУЛЬСАМИ МОЩНОГО ГИРОТРОНА

*А.С. Соколов¹, Н.С. Ахмадуллина^{2,3}, В.Д. Борзосеков¹, Е.В. Воронова¹,
Н.Г. Гусейн-заде¹, З.А. Заклецкий¹, А.К. Козак¹, Д.В. Малахов¹,
Н.Н. Скворцова¹, В.Д. Степахин¹, О.Н. Шишилов^{1,3}*

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

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

³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

В докладе будет представлено описание созданного на базе ИОФ РАН (отдел физики плазмы) и МИТХТ (кафедра физической химии) лабораторного комплекса, предназначенного для плазмохимического синтеза микро- и наночастиц с использованием излучения мощного гиротрона. Лабораторный комплекс включает:

1. Плазмохимический стенд, состоящий
 - из мощного импульсного гиротрона (500 кВт, 12 мс, 73,1 ГГц),
 - из плазмохимического реактора.
2. Аппаратно-программную диагностическую часть плазмохимического стенда, в которую входят:
 - система балансных СВЧ-измерений,
 - система видеорегистрации разлета частиц в объеме реактора,
 - система оптических диагностик,
 - электронный журнал эксперимента, электронная разметка образцов и набор программного обеспечения, отвечающего за работу аппаратной части.
3. Химическую лабораторию пробоподготовки материалов и первичного анализа синтезированных веществ, разделенную на зоны:

- микроскопических исследований,
- подготовки смесей порошков,
- очистки оборудования, стекла и водоподготовки,
- физико-механической и термической обработки материалов.

4. Экспериментальную проточно-рециркуляционную установку для проверки каталитических свойств образцов «оксидный носитель – металл», приготовленных, активированных и реактивированных в экспериментах.

На данном лабораторном комплексе были проведены работы по синтезу платиновых катализаторов для реакций дегидрирования циклоалканов с выделением водорода в рамках ГЗ-БВ10-2021 «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении».

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОММЕРЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

А.В. Можаровский, Р.О. Масленников

ООО «Радио Гигабит», Нижний Новгород

Одной из основных тенденций развития современных информационных систем является применение сервисов, позволяющих осуществлять доступ и передачу информации через беспроводные локальные и мобильные сети без необходимости долговременного хранения на конечных пользовательских устройствах. К ним относятся, в частности, облачные технологии, сервисы потокового видео высокого разрешения и социальные сети. Рост объема передаваемой информации приводит к запросу на повышение пропускной способности современных систем беспроводной связи для обеспечения скорости передачи данных вплоть до единиц и даже десятков гигабит в секунду. Достижение таких скоростей возможно, в первую очередь, за счет использования более широкой полосы частот передаваемых сигналов, что является затруднительным в условиях перегруженности спектра в традиционных частотных диапазонах до 6 ГГц. Напротив, миллиметровый диапазон длин волн позволяет использовать для передачи данных ряд полос шириной вплоть до нескольких гигагерц, что значительно превышает доступные в частотных диапазонах до 6 ГГц полосы и является достаточным для достижения требуемых скоростей.

В течение длительного времени миллиметровый диапазон длин волн практически не рассматривался для широкого коммерческого применения ввиду отсутствия доступной компонентной базы, включая устройства генерации, приема и канализации СВЧ-колебаний. Однако с появлением таких устройств начался взрывной рост в развитии систем связи миллиметрового

диапазона. В настоящее время наибольший интерес среди коммерческих систем связи миллиметрового диапазона частот представляют, в частности, системы мобильной связи пятого поколения 5G с радиointерфейсом NR, предназначенные для работы в частотном диапазоне FR2 (24,5–52,6 ГГц). Основными особенностями таких систем являются использование технологии ММО с применением в составе базовых станций многоэлементных цифровых антенных решеток, а также дробление сети на малые соты с маломощными миниатюрными базовыми станциями для обеспечения требуемой пропускной способности для всех конечных пользователей в более сложных условиях (большее ослабление, худшая проникающая способность).

Также большой интерес представляют системы радиорелейной связи, работающие в частотных диапазонах 27,5–29,5 ГГц, 57–71 ГГц и 71–86 ГГц. Для таких систем характерно использование больших апертурных антенн даже для организации соединений на небольшие расстояния ввиду большого ослабления в атмосфере, особенно для диапазона около 60 ГГц, где располагается линия поглощения кислорода, обеспечивающая ослабление вплоть до 16 дБ/км.

Еще одним активно развивающимся приложением стали локальные сети Wi-Fi, работающие в миллиметровом диапазоне в соответствии со стандартами IEEE 802.11ad и IEEE 802.11ay. Развитие этой технологии стало возможным ввиду появления сравнительно недорогих приемопередающих микросхем с интегрированным блоком многоканального управления амплитудой и фазой сигнала, что позволяет напрямую подключить их к элементам антенной решетки с минимальными потерями в фидерном тракте.

ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

*В.В. Бирюков¹, В.Л. Вакс², В.А. Малахов¹, А.Н. Панин²,
С.И. Приползин², Ю.В. Раевская¹, А.С. Раевский¹, А.А. Чиликов³,
В.В. Щербakov¹, А.М. Щитов³, М.В. Андреев¹, А.П. Лискович¹*

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

² Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

³ АО НПФ «Техноякс», Нижний Новгород

Доклад посвящен описанию разработки концепции и создания макета беспроводной линии связи субтерагерцового диапазона. Вначале был произведен выбор диапазона рабочих частот и расчет характеристик канала связи для окна прозрачности 220 ГГц. Расчет позволил определить необходимую мощность сигнала передатчика при выбранном отношении сигнал/шум приемника для достоверной передачи информации по каналу связи.

Необходимая мощность источника излучения при передаче сигнала со скоростью 1 Гб/с на расстояние 1 км составила 240 мкВт. Представлено обоснование выбора способа модуляции и его применимость в процессе разработки структурной схемы приемопередатчика в частотном диапазоне 200–220 ГГц. Показано, что единственной подходящей схемой модуляции является схема с умножителями частоты, которая не позволяет передать на выход ни фазовую, ни квадратурную модуляции без искажений. Единственная модуляция, подходящая для такой схемы, – это амплитудная манипуляция ООК. Широкая полоса частот, равная 2,8 ГГц, занимаемая сигналом при скорости передачи 1 Гб/с, в указанном диапазоне частот занимает не более 1–2 % от частоты несущей. Повышенные требования к помехоустойчивости системы передачи не предъявляются по причине отсутствия помех в этом диапазоне частот. Анализ, произведенный на основе разработанных математических моделей прохождения амплитудно- и фазоманипулированного сигнала через диодные умножители частоты, входящие в состав приемопередатчика линии связи, показал невозможность восстановления на приемном конце фазоманипулированного сигнала с изменением фазы на 180 градусов при четных коэффициентах умножения. Точность восстановления амплитудно-манипулированного сигнала при любых коэффициентах умножения, а также его амплитуда зависят от наклона ВАХ диода, от угла отсечки, от полосы пропускания и частоты среза фильтров.

Расчет энергетического потенциала системы показал, что необходимо использовать антенны с коэффициентом усиления не менее 50 дБ. В конструктивном и технологическом плане наиболее подходящей оказалась антенна Кассегрена. С использованием САПР ANSYS HFSS произведены расчеты характеристик антенны в рабочем диапазоне частот, позволившие определить допуски на изготовление отдельных элементов антенны, учесть неточности при изготовлении и настройке антенны.

Были проведены испытания действующего макета приемопередающего канала связи с системами автономного питания с использованием бензиновых электрогенераторов. Определение значения BER производилось косвенным методом по калибровочной таблице через измерения отношения сигнал/шум на выходе усилителя ПЧ приемного устройства канала связи.

В АО НПФ «Техноякс» проведены некоторые экспериментальные исследования по оптимизации структурной схемы линии связи с целью максимального использования имеющегося научно-технического задела, упрощения структуры (уменьшения входящих СВЧ-узлов), обеспечения тиражируемости изделия.

ГОДОВОЙ ЦИКЛ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ВОДОЗАПАСА ОБЛАКОВ В ЮГО-ВОСТОЧНОМ КРЫМУ КОМБИНИРОВАННЫМ ОДНОВОЛНОВЫМ РАДИОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

*И.Т. Бубукин¹, И.В. Ракуть^{1,2}, М.И. Агафонов^{1,2}, А.А. Яблоков^{2,3},
А.Л. Панкратов^{1,2,3}, Т.Ю. Горбунова⁴, Р.В. Горбунов⁴*

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

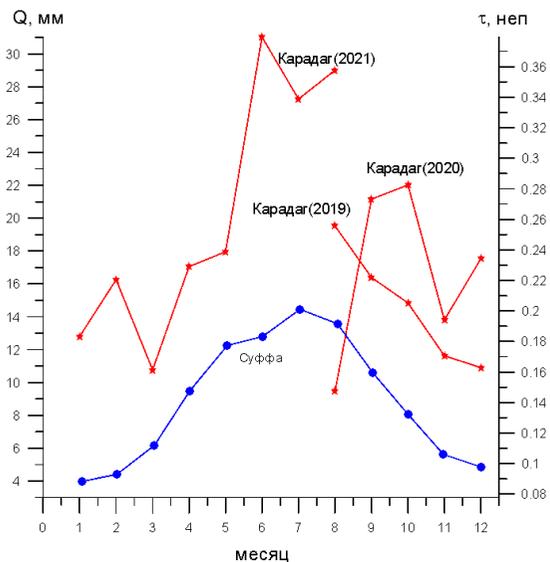
² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

³ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

⁴ Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь

Для реализации в Российской Федерации спутниковых систем связи в диапазоне ММВ необходимо создание наземной инфраструктуры, обеспечивающей прием и передачу спутниковой информации в диапазоне ММВ. С учетом основной тенденции развития систем связи и радиоастрономии в освоении миллиметровых и более коротких длин волн в последние годы в НИРФИ ННГУ проведены измерения атмосферного поглощения в окнах прозрачности ММВ и показана возможность использования полигона «Карадаг» для установки систем космической связи и измерений космических источников в диапазоне ММВ [1].

В 2020–2021 гг. проведен годовой цикл измерений атмосферного поглощения на полигоне «Карадаг» на длинах волн 3 мм и 8 мм. Измерения



двухволновой системой показали, что определение влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков по частотной зависимости сталкивается со значительными трудностями. Был предложен комбинированный метод, позволяющий разделить вклад атмосферной влаги и капельной фракции облаков по одноволновым измерениям в миллиметровом диапазоне при облачности до 2,5 балла. Метод реализован на длине волны 3 мм в ходе годового цикла измерений. Показана возможность об-

наружения и определения водности облаков в зените в реальном масштабе времени. На рисунке показан годовой ход влагосодержания атмосферы и атмосферного поглощения на длине волны 3 мм (2020–2021 и 2019 г. [1]) для полигона «Карадаг» и плато «Суффа». Подтверждаются результаты сравнительного анализа этих площадок в [1]. Данные августа 2020 и 2021 гг. иллюстрируют годовую изменчивость атмосферной ситуации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проекты в рамках базовой части государственно-го задания ННГУ 0729-2020-0057, и ИФМ РАН 0035-2014-0206, а также ФИЦ ИнБЮМ 0556-2019-0006).

1. Бубкин И.Т. и др. // *Астрономический журнал*. 2021. Т. 98, № 7. С. 581–598. DOI: 10.31857/S0004629921080016.

ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО АСТРОКЛИМАТА НА СЕВЕРНОМ КAVКАЗЕ 2021 ГОДА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

*Ю.Ю. Балега¹, Д.К.-С. Батаев², Г.М. Бубнов⁸, В.Ф. Вдовин^{3,6},
Е.И. Домбек³, П.М. Землянуха³, А.Б. Лолаев⁴, И.В. Леснов³,
А.С. Марухно^{1,3}, Н.А. Марухно³, А.К. Муртазаев⁵, В.С. Хайкин¹,
А.В. Худченко⁶*

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Зеленчукский р-н
Карачаево-Черкесской республики

² Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН,
г. Грозный

³ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

⁴ Владикавказский научный центр РАН, г. Владикавказ

⁵ Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, г. Махачкала

⁶ Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва

В докладе представлены результаты прямого натурного измерения атмосферного поглощения электромагнитных волн субтерагерцового диапазона частот – 0,1–1 ТГц, выполненного при помощи радиометра МИАП-2 [1] с целью подбора оптимального с точки зрения микроволнового астроклимата места для создания обсерватории, способной стать элементом радиоинтерферометра строящейся обсерватории Суффа [2] и в перспективе войти в коллаборацию телескопа горизонта событий [3] (ТГС). ТГС, получивший не так давно изображение тени черной дыры, на сегодня состоит из десятка антенн, расположенных по всему земному шару, и не имеет пока элементов в своей сети в северной Евразии. Выполненные исследования могут быть полезны для задач не только радиоастрономии, но и для косми-

ческих коммуникаций, радиолокации Луны, астероидов и обнаружения объектов космического мусора.

Первые результаты выполненных прямых измерений поглощения субтерагерцовых волн на выбранных площадках подтвердили исходную гипотезу экспедиции. Эта гипотеза была сформулирована на основе анализа метеоданных, а также спутниковых данных о поглощении атмосферы в других диапазонах: оптике и низкочастотном радиодиапазоне [4]. Предполагалась большая перспективность работы в субтерагерцовом диапазоне частот в восточной части Северного Кавказа по сравнению с западным Кавказом. Запад привлекателен тем, что сегодня там уже работает целый ряд обсерваторий, и установка еще одной антенны была бы реализована много проще с точки зрения необходимой инфраструктуры и квалифицированных кадров. Гипотеза о преимуществе востока получила убедительное подтверждение сопоставлением поглощения в диапазонах 2 и 3 мм на ранее обследованных площадках западного Кавказа (пик Терскол, гора Пастухова, площадки КГО, БТА, РАТАН-600 и др.) [5] с изученными в рамках прошедшей в 2021 г. экспедиции площадками на востоке региона – горах Маяк (Гуниб), Столовая и Шалбуздаг [6]. Даже измерения на самой высокой вершине не только западного Кавказа, но и Европы – горе Эльбрус, выполненные в рамках представляемой экспедиции, дали результаты хуже восточных площадок в Дагестане и Северной Осетии, подтвердив бесполезность дальнейших поисков места для эффективного субтерагерцового инструмента в западной части Северного Кавказа.

1. *Носов В.И.* Двухволновый измеритель радиопрозрачности атмосферы миллиметрового диапазона / Носов В.И., Большаков О.С., Бубнов Г.М., Вдовин В.Ф., Зинченко И.И., Марухно А.С., Никифоров П.Л., Федосеев Л.И., Швецов А.А. // Приборы и техника эксперимента. 2016. Т. 2016, № 3. С. 49–56.

2. *Artemenko Y.N. et al.* New stage of the Suffa Submm Observatory in Uzbekistan // Project. Proc. of 30th IEEE International Symposium on Space Terahertz Technology. Gothenburg, 2019. P. 124.

3. *Janssen M., Falcke H., Kadler M. et al.* Event Horizon Telescope observations of the jet launching and collimation in Centaurus A // Nat. Astron. 2021. V. 5. P. 1017–1028. URL: <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01417-w>.

4. *Duan R.* Toward Eurasian SubMillimeter Telescopes: the concept of multicolor subTHz MKID-array demo camera MUSICAM and its instrumental testing / R. Duan, V. Khaikin, M. Lebedev, V. Shmagin, G. Yakopov, V. Vdovin, G. Bubnov, X. Zhang, C. Niu, Di Li, I. Zinchenko // arXiv:2008.10154 [astro-ph.IM].

5. *Bubnov G.M.* Astroclimatic studies of the sites for forthcoming radio astronomical observatories / Grigoriy M. Bubnov, Peter M. Zemlyanukha, Valeriy F. Grigor'yev, and Vyacheslav F. Vdovin // Proc. of 30th IEEE International Symposium on Space Terahertz Technology. Gothenburg, 2019. P. 96.

6. *Балега Ю.Ю.* Прямые измерения атмосферного поглощения излучения субтерагерцового диапазона волн на Северном Кавказе / Ю.Ю. Балега, Д.К.-С. Батаев, Г.М. Бубнов, В.Ф. Вдовин, и др. // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2021. [принято к публикации].

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ МИКРОВОЛНОВОЕ СПЕКАНИЕ ЭЛЕКТРОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНАТОВ БАРИЯ И СТРОНЦИЯ

*С.В. Егоров, А.Г. Еремеев, В.В. Холопцев, И.В. Плотников,
К.И. Рыбаков, А.А. Сорокин, Ю.В. Быков*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В работе исследованы процессы высокоскоростного микроволнового спекания керамических материалов на основе титанатов бария и стронция. Эксперименты по микроволновому спеканию проводились на специализированных гиротронных комплексах с максимальной мощностью 5 кВт, работающих на частоте 24 ГГц. Образцы нагревали с заданной постоянной скоростью, выбираемой в интервале 10–300 °С/мин, до заданной максимальной температуры в интервале 1150–1400 °С без изотермической выдержки. Исследование кинетики уплотнения спекаемых образцов осуществлялось в ходе экспериментов с помощью системы оптической дилатометрии на основе инфракрасной камеры.

В результате выполненных исследований получены образцы BaTiO_3 -керамики с относительной плотностью 95–96 % от теоретического значения. Наибольшие значения плотности были получены при спекании в закрытом теплоизоляционном контейнере с использованием дополнительного SiC-поглотителя, позволяющего уменьшить неоднородность температуры и снизить требуемую мощность микроволнового излучения. Продолжительность высокотемпературной стадии спекания в исследованных процессах микроволнового нагрева сокращается более чем на порядок величины по сравнению с традиционным спеканием в печи резистивного нагрева. Наименьшая продолжительность высокотемпературной стадии спекания при скорости нагрева 300 °С/мин составила менее 2 мин. В аналогичных режимах получены образцы SrTiO_3 -керамики с относительной плотностью до 93 % от теоретического значения и образцы с композицией $\text{Ba}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{TiO}_3$ с относительной плотностью 95–96 % от теоретического значения.

Показано, что интенсивное объемное энерговыделение при непосредственном микроволновом нагреве, оценка удельной мощности которого составляет примерно 40 Вт/см³, приводит к снижению температуры начала уплотнения образцов BaTiO_3 . Величина этого снижения в сравнении с процессами, использующими гибридный нагрев с применением дополнительного поглотителя микроволнового излучения, составляет приблизительно 100 °С. Продемонстрировано, что в процессе микроволнового нагрева уплотнение материала, сопровождающееся ростом зерна, распространяется в виде фронта от центральной области образца, имеющей наиболее высокую температуру, к периферии образца.

Полученные образцы ВаTiO₃-керамики имели диэлектрическую проницаемость 1800–2450 на частоте 1 кГц. Сопоставление полученных данных с результатами исследования микроструктуры показывает, что наибольшие значения диэлектрической проницаемости наблюдаются в спеченных образцах, имеющих в составе преобладающую мелкозернистую фазу, а наименьшие – в образцах, полностью состоящих из крупнозернистой фазы, образовавшейся в результате вторичной рекристаллизации. Полученные образцы SrTiO₃-керамики характеризуются особенно низкими диэлектрическими потерями на высоких частотах (тангенс угла потерь менее 0,01 в диапазоне частот 1–3 МГц). В полученных образцах композиции Ва_{0,75}Sr_{0,25}TiO₃ достигнуты высокие значения диэлектрической проницаемости, равные примерно 4200 на частоте 1 кГц, при условии завершеного формирования твердого раствора в ходе процесса микроволнового спекания.

Данные исследования поддержаны Российским научным фондом, грант 20-19-00685.

СИНТЕЗ ТОРФОМИНЕРАЛЬНОГО СОРБЕНТА МЕТОДОМ МИКРОВОЛНОВОГО ПИРОЛИЗА

*С.А. Буланова^{1,2}, А.А. Вихарев², С.В. Зеленцов¹, Т.О. Крапивницкая²,
Н.Ю. Песков^{1,2}, М.Ю. Глявин², А.Н. Денисенко²*

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Применение сорбентов играет важную роль в ликвидации техногенных катастроф, обусловленных попаданием токсичных веществ в окружающую среду. Устранение последствий возможно при помощи сорбентов. Источником исходного сырья для поглотителей на основе углерода может быть торф. Большие запасы торфяного сырья сосредоточены на территории России – свыше 235 млрд т, что составляет 47 % от мировых [1]. Данный ценный ресурс имеет в своем составе до 60 % масс. углерода [2]. Хотя в настоящий момент его использование сосредоточено в сфере сельского хозяйства, перспективно расширять сферы его применения в других направлениях и модернизировать технологии его переработки. Для повышения эффективности нагрева перспективно применение СВЧ-излучения. Таким методом может служить микроволновый пиролиз. Однако разработанных и доступных микроволновых методов переработки торфа на данный момент не существует по ряду причин, основная из них – это сложность в проектировании и изготовлении реакторов для переработки этих видов топлива с учетом его особенностей (меняющегося коэффициента поглощения, неоднородности состава, пористости).

В данной работе рассмотрены возможности применения микроволнового излучения в процессе пиролиза для деструкции компонентов, содержащихся в сфагновом верховом торфе. Разработан лабораторный макет СВЧ-ректора для экспериментального исследования процессов высокотемпературной обработки или переработки твердых горючих ископаемых. Проведено моделирование компонентов электродинамических систем с целью увеличения эффективности передачи СВЧ-излучения с учетом переменных характеристик облучаемого объекта. Проанализированы продукты термического распада высокомолекулярных веществ под действием СВЧ-излучения. Было проведено исследование состава исходного сырья для изготовления сорбента (степени разложения, зольности, влажности, насыпной плотности при натуральной влажности, удельной теплоты сгорания, содержание серы, гуминовых и фульвовых кислот, кислотности, компонентов органической массы). Было показано, что в процессе пиролиза влажность торфа сокращается в 3 раза, массовая концентрация гуминовых кислот сокращается на 50 %, что говорит об уменьшении гидрофильности сорбента, а значит, и о потенциальной возможности применения его для ликвидаций катастроф на водной поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Нижегородской области (проект № 316-06-16-49а/21 от 10.11.2021 г.).

1. Хорошавин Л.Б., Медведев О.А., Беляков В.А., Михеева Е.В., Руднов В.С., Байтимирова Е.А. // ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). 2013. С.14–73.

2. Крапивницкая Т.О., Богдашов А.А., Ворожцов Д.Л., Глявин М.Ю., Денисенко А.Н., Песков Н.Ю., Семеньева Л.Л. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018. Т. 1. С. 314–318.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ МЕТАСТРУКТУР

*С.А. Кузнецов^{1,2}, А.В. Гельфанд¹, В.Н. Федоринин¹,
А.В. Аржанников^{2,3}, П.А. Лазорский², Н.А. Николаев^{2,4},
А.А. Мамрашев⁴, А.Н. Генцелев³, В.П. Бессмельцев⁴*

¹ Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «КТИПМ»

² Новосибирский государственный университет

³ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск

⁴ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

Освоение субтерагерцовой и терагерцовой области частот электромагнитного спектра, соответствующей области миллиметровых и субмиллиметровых волн, делает актуальными задачи создания эффективных опти-

ческих элементов для управления характеристиками пучков излучения. Планарные металлodieлектрические структуры субволновой топологии, выполненные на основе технологии частотно-избирательных поверхностей (ЧИП) или метаповерхностей (МП), в большинстве случаев позволяют реализовать необходимую функциональность и высокую эффективность оптического элемента в сочетании с его компактностью (малыми толщиной и весом), что не может быть достигнуто в рамках решений классической оптики. При этом реализация подобных мм/субмм-метаструктур на базе однослойных и многослойных ЧИП/МП оказывается возможной посредством сравнительно недорогих и хорошо отработанных литографических технологий, которые позволяют формировать качественный топологический микрорисунок ЧИП/МП с характерными размерами от нескольких единиц до сотен нанометров при диаметре рабочего поля до 80 мм.

В докладе представлен обзор полученных в Новосибирском научном центре экспериментальных результатов по разработке оптических элементов и устройств на основе ЧИП/МП-структур, которые предназначены как для автономного применения, так и для интеграции с различными метрологическими системами, работающими в области частот от 50 ГГц до 3,5 ТГц. Составляя неотъемлемую часть российской элементной базы радиофотоники, разработанные элементы в ряде случаев опережают по функциональным характеристикам отечественные и зарубежные аналоги.

Рассмотрены: 1) пассивные высококонтрастные (40–70 дБ) частотные фильтры различных видов: band-pass, low-pass, high-pass; дихроичные мультиплексоры пучков излучения; спектрометрические системы на базе полосовых фильтров; 2) широкополосные поляризаторы с малыми потерями (< 0,1 дБ) и высокой (до 80 дБ) поляризационной дискриминацией; 3) преобразователи фазы и поляризации; эллипсометрические устройства; 4) плоские фокусирующие элементы, включая голографические структуры; 5) ультратонкие резонансные поглотители и тепловые детекторы на их основе, включая многоканальные пирозлектрические линейки для спектральных и поляризационных измерений с пространственным разрешением; 6) перестраиваемые фильтры и пространственные модуляторы волнового фронта на основе жидких кристаллов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант FSUS-2020-0029) с использованием парка оборудования центров коллективного пользования «ВТАН» НГУ и «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

Авторский указатель

Veruete M.	83	Быков Ю.В.	142	Гусихин П.А.	127
А					
Абубакиров Э.Б.	18, 36	В		Д	
Авдеев Ю.Ф.	117	Вакс В.Л.	137	Данилевский Д.В.	111
Агафонов А.Н.	76	Васильевский И.С.	91	Данилов А.С.	117
Агафонов М.И.	139	Вдовин А.В.	115	Данилов С.Н.	75
Алексеев Р.А.	117, 127, 130	Вдовин В.Ф.	111, 115, 123, 140	Данилов Ю.Ю.	36, 54
Алешкин В.Я.	87	Вилков М.Н.	25, 44, 60	Дворецкий С.А.	75, 87
Ананичев А.А.	43, 65, 67, 69	Винокуров Н.А.	76	Денисенко А.Н.	18, 36, 143
Андреянов М.В.	137	Вихарев А.А.	18, 59, 98, 143	Денисов Г.Г.	13, 16, 20, 25, 39, 40, 42
Андрианов А.С.	107	Власов С.Н.	56, 57	Дизер Е.С.	91
Андрианов М.Н.	107	Волков О.Ю.	85	Дитятев А.А.	117
Аржанников А.В.	24, 52, 94, 96, 103, 124, 144	Волошин А.Э.	89	Домбек Е.И.	111, 140
Арташкин А.И.	75	Воронова Е.В.	134, 135	Домбек Е.М.	125, 127
Артеменко Ю.В.	111	Востоков Н.В.	114	Дубрович В.К.	115
Атлуханов М.Г.	103	Вражнов Д.А.	90	Дюжиков И.Н.	85
Афоненко А.А.	79, 84	Г			
Ахмадуллина Н.С.	134, 135	Гавриленко В.И.	84, 87	Е	
Б					
Багаев Т.А.	84	Гавриленко Л.В.	84	Евдокимов В.В.	46
Бак П.А.	94, 96	Гаврилов М.М.	112	Егоров С.В.	142
Бакунин В.Л.	42	Галеева А.В.	75	Еремеев А.Г.	142
Балега Ю.Ю.	140	Галиев Р.Р.	85	Ж	
Бандуркин И.В.	39, 67, 100	Гачев И.Г.	20, 25, 30, 55	Железнов И.В.	40
Банников М.И.	75	Гаштури А.П.	34	Живанков К.И.	94, 96
Барышев А.М.	107, 110	Гейнц Т.А.	91	Жукавин Р.Х.	102
Батаев Д.К.-С.	140	Гельфанд А.В.	124, 144	З	
Батраков А.М.	94, 96	Генцелев А.Н.	144	Зайцев К.И.	77
Бахтеев И.Ш.	127	Герасимов В.В.	74, 88, 97	Зайцева И.Е.	63
Белоусов В.И.	39, 51, 52	Гинзбург Н.С.	14, 18, 21, 25, 26, 36, 38, 52, 55, 59, 60, 94, 96	Заклецкий З.А.	134, 135
Бессмельцев В.П.	144	Глявин М.Ю.	16, 39, 40, 43, 58, 143	Запевалов В.Е.	17, 31, 40, 43, 47, 63
Бирюков В.В.	137	Голубев Е.	107	Заславский В.Ю.	18, 26, 35, 38, 49, 52, 58
Благодаткин А.В.	119	Голубятников Г.Ю.	108, 117	Зброжек В.О.	119
Богдашев А.А.	20, 25, 30, 55, 67	Горбачев А.М.	133	Зеленцов С.В.	143
Бодров С.Б.	93	Горбунов Р.В.	139	Землянуха П.М.	111, 115, 120, 125, 127, 140
Большаков О.С.	115	Горбунова Т.Ю.	139	Зорина А.А.	112
Бондаренко А.С.	128	Гордеев С.К.	47	Зотова И.В.	14, 21, 25, 36, 38, 39, 55, 58, 59
Борзосеков В.Д.	134, 135	Гордеева А.В.	118, 119	Зубарев Н.М.	14
Боровков А.С.	128	Горюнов А.В.	120	Зуев А.С.	31, 40, 42, 43, 62, 63
Бубнов Г.М.	111, 115, 140	Григорьева Н.В.	32	И	
Бубукин И.Т.	139	Губа В.Г.	128	Иванов А.А.	44
Буланова С.А.	143	Гузнов Ю.М.	55	Илларионов И.А.	120
Бутьлин А.А.	91	Гунбина А.А.	115, 123		
Бушуйкин П.А.	102	Гусейн-заде Н.Г.	134, 135		

Ильин А.Ю.	46	Куприянов З.П.	112	Морозов С.В.	80, 87
Ильичев Е.В.	118	Куприянов П.В.	112	Муравьев В.М.	73, 91,
Иляков И.В.	35	Куфтин А.Н.	38, 40, 42,		127
			43	Муртазаев А.К.	140
К				Мясин Е.А.	46
Казаков А.С.	75	Л		Н	
Калинин П.В.	103	Лаврухин Д.В.	77	Навроцкий И.А.	22
Кальнов Ю.К.	100	Лагервей Г.	111	Назаровский А.В.	36
Кальнова Г.И.	51	Ладугин М.А.	84	Никитин А.К.	74
Каменский М.В.	20, 64, 65	Лазорский П.А.	144	Никифоров Д.А.	94, 96
Камешков О.Э.	74, 88	Лапин Н.И.	109	Николаев Н.А.	83, 144
Кауц В.Л.	115	Лапинов А.В.	109, 117,	Новак Е.М.	20, 66
Качмар В.В.	134		130	Новожилова Ю.В.	42
Кинев Н.В.	81	Лапинова С.А.	109		
Киселев А.К.	109	Лапкин И.В.	130	О	
Кистенев Ю.В.	90, 91	Лемзяков А.Г.	74	Образцова Е.А.	134
Климов А.В.	38	Леонтьев А.Н.	36, 54, 55	Ожередов И.А.	89
Князев А.В.	134	Леснов И.В.	111, 115,	Озолин А.А.	107
Князев Б.А.	74, 76, 88,		140	Оладышкин И.В.	93
	97, 102	Летунов А.А.	134	Онищенко А.П.	28
Князькова А.	90	Лещева К.А.	20, 38	Опарина Ю.С.	52, 98,
Ковалевский К.А.	102	Лискович А.П.	137		101
Козак А.К.	134, 135	Лихачев С.Ф.	107	Орловский А.А.	50, 64, 69
Колик Л.В.	134	Лихтерова П.Д.	35, 41	Осинцева Н.Д.	74, 76, 97,
Колосов С.В.	63	Логачев П.В.	94, 96		102
Комленок М.С.	76, 97	Логвиненко В.П.	134	Ошарин И.В.	36, 100
Конникова М.Р.	90, 91	Лолаев А.Б.	140		
Конов В.И.	76	Лучинин А.Г.	65	П	
Кононенко Т.В.	76	М		Павельев В.С.	74, 76, 97
Кончков Е.М.	134	Макаров М.А.	103	Павленко А.В.	94, 96
Копосова Е.В.	56, 57	Малай И.М.	129	Павловский В.В.	85
Коржиманов А.В.	93	Малахов В.А.	137	Павлюченко В.А.	94, 96
Корниенко В.Н.	45	Малахов Д.В.	134, 135	Панин А.Н.	137
Королёв С.А.	120	Малкин А.М.	18, 26, 39,	Панкратов А.Л.	118, 119,
Корчагина С.Б.	47		54		139
Корьтин А.И.	93	Мамрашев А.А.	144	Паршин В.В.	47, 120,
Костенко В.И.	107	Мансфельд М.А.	115		123, 127
Котомина В.Е.	50	Мануилов В.Н.	35, 38, 40,	Песков Н.Ю.	18, 52, 94,
Кочаровская Е.Р.	25, 94		41		96, 98,
Кошелец В.П.	81, 107,	Маремьянин К.В.	84		101, 143
	110, 123	Мармалюк А.А.	84	Петелин М.И.	62
Крапивницкая Т.О.	143	Марухно А.С.	140	Петренко А.В.	94, 96
Красильников А.М.	115	Марухно Н.А.	140	Петров А.Е.	134
Крыгина Д.Д.	101	Масленников Р.О.	136	Петров Л.Ю.	109
Кузиков С.В.	59	Матвеев А.И.	122	Пиманов Д.А.	119
Кузнецов С.А.	83, 124,	Матрозова Е.А.	119	Планкин О.П.	31, 43
	144			Плотников И.В.	142
Кузьмин Л.С.	118, 119	Минеев К.В.	111, 115,	Пономарев Д.С.	77, 79
Куклин К.Н.	103		123	Попов Л.Г.	40
Кукотенко В.Д.	102	Михайлов Н.Н.	75, 87	Попов С.С.	103
Кукушкин И.В.	73, 91	Можаровский А.В.	136	Приползин С.И.	137
Кулагин В.В.	45	Молчанов С.Ю.	127	Проявин М.Д.	18, 49, 50,
Кулагин И.С.	35	Морозкин М.В.	41, 50, 64,		64, 65
Кулипанов Г.Н.	76		65	Пушкарёв С.С.	85

Р		Соминский Г.Г.	23	Черный Р.А.	107
Раевская Ю.В.	137	Сорокин А.А.	142	Чигинев А.В.	119
Раевский А.С.	137	Сорокин Д.А.	125	Чиликов А.А.	137
Разова А.А.	87	Спектор И.Е.	77	Чирков А.В.	39, 40
Ракуть И.В.	139	Стародубов А.В.	22, 127	Чирков И.П.	129
Ревин Л.С.	118	Степанов А.Н.	93	Чопорова Ю.Ю.	76, 97, 102
Резник А.Н.	114	Степахин В.Д.	134, 135		
Решетников А.С.	76	Т		Ш	
Ровенских А.Ф.	103	Тай Е.М.	21	Шалаев П.Д.	29
Рожнев А.Г.	22	Тарадаев Е.П.	23	Шанин Г.И.	111
Розенталь Р.М.	21, 25, 36, 39, 44, 54, 55	Токман М.Д.	93	Шарандин Е.А.	115
		Торгашов Р.А.	22	Шарыпов К.А.	14
Ростов В.В.	14	Торгованов А.И.	117	Шашкин В.И.	120
Рудаков К.И.	81, 110	Третьяков И.В.	107	Швец В.А.	124
Рудницкий А.	107	Тукмаков К.Н.	76	Шиков А.П.	120
Румянцев В.В.	87	Турыгин С.Ю.	107	Шишилов О.Н.	134, 135
Рыбаков К.И.	142	Тучин В.В.	91	Шкуринов А.П.	89, 90, 91
Рыскин Н.М.	22, 32	У		Шмелев М.Ю.	39
Рябов А.В.	61	Ундалова И.С.	109	Шпак В.Г.	14
Рябова Л.И.	75	Ушаков Д.В.	79, 84	Шубняков И.С.	117
		Ушаков Н.М.	127	Шунайлов С.А.	14
С		Ф		Щ	
Савилов А.В.	20, 52, 66, 98, 100, 101	Федоринин В.Н.	124, 144	Щегольков Д.Ю.	51, 54, 100
Самсонов С.В.	20, 25, 30, 55, 66	Федотов А.Э.	26, 36, 67	Щербачков В.В.	137
Самцов Д.А.	103	Филиппенко Л.В.	81, 110	Щитов А.М.	137
Сандалов Е.С.	52, 94, 96, 103	Фильченков С.Е.	60, 94	Э	
Седов А.С.	40, 62, 69	Фокин А.П.	21, 39, 43, 67	Этнаер А.	111
Сезонов В.Е.	23	Х		Ю	
Семёнов В.А.	128	Хабарова Т.А.	109, 117, 130	Юровский Л.А.	36
Семенов Е.С.	31, 42, 43, 62, 63	Хабибуллин Р.А.	77, 79, 84, 85	Я	
Сергеев А.С.	21, 25, 26, 36, 39, 55, 94	Хайкин В.С.	140	Яблоков А.А.	118, 139
Сергеев Ю.А.	93	Хан Ф.В.	123	Яблоков Д.Е.	97
Серов Е.А.	47, 123	Харчев Н.К.	51, 134	Яландин М.И.	14, 59
Синицкий С.Л.	52, 94, 96, 103	Хеспер Р.	107, 110		
Синько А.С.	89	Хитров О.В.	74		
Скворцова Н.Н.	134, 135	Холопцев В.В.	142		
Сковородин Д.И.	94, 96	Хохлов Д.Р.	75		
Скоробогатый М.	77	Худченко А.В.	107, 110, 140		
Смирнов А.В.	107	Ц			
Соболев Д.И.	34, 38, 49, 50, 52, 58, 61	Царев В.А.	28		
Сойфер В.А.	76	Цветков А.И.	39, 69		
Соколов А.С.	134, 135	Ч			
		Чалова А.В.	109		
		Чекмарев Н.В.	69		
		Чекушкин А.М.	123		
		Черкасова О.П.	90, 91		