

XIII ВСЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО РАДИОФИЗИКЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

**VII школа для молодых ученых
«Актуальные проблемы мощной вакуумной электроники СВЧ:
источники и приложения»**

(В рамках проекта РНФ № 19-79-30071)

24 – 28 февраля 2025 года, Нижний Новгород

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2025

Секции семинара

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

Программный комитет

Г. Г. Денисов	академик РАН, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород (<i>председатель</i>)
О. С. Моченева	к. ф.-м. н., Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород (<i>ученый секретарь</i>)
А. В. Аржанников	профессор, Новосибирский государственный университет, Новосибирск
В. Ф. Вдовин	профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
Н. А. Винокуров	чл.-корр. РАН, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск
В. И. Гавриленко	профессор, Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
Н. С. Гинзбург	чл.-корр. РАН, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
С. В. Голубев	профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
В. П. Кошелец	профессор, Институт радиотехники и электроники РАН, Москва
А. Г. Литвак	академик РАН, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
Д. Р. Хохлов	чл.-корр. РАН, МГУ, Москва
В. А. Черепенин	академик РАН, Институт радиотехники и электроники РАН, Москва
А. П. Шуринов	чл.-корр. РАН, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва
М. И. Яландин	академик РАН, Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Ответственный за выпуск О. С. Моченева

ОРГАНИЗАТОРЫ СЕМИНАРА



Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН



Международный центр – фонд перспективных исследований
в Нижнем Новгороде

МЦФПИН

СПОНСОРЫ СЕМИНАРА

MWave

ООО «МВЭЙВ»

РНФ

Российский научный фонд

ДИПОЛЬ

АО НПФ «Диполь»

Америт

ООО «Америт»

СОДЕРЖАНИЕ

Источники мощного микроволнового излучения

<i>Денисов Г.Г.</i> Разработка гироприборов в России. Недавние результаты и перспективы	10
<i>Зубарев Н.М., Лобанов Л.Н., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И.</i> Эксперименты по каскадному ускорению ультракоротких электронных пучков высоковольтными импульсами в вакууме и газе	11
<i>Красильников А.В., Кащук Ю.А., Коновалов С.В.</i> Реакторные технологии, создаваемые российскими научными центрами для термоядерных проектов ITER, TRT, и перспективы сотрудничества с BEST	12
<i>Аржанников А.В., Логачёв П.В., Синецкий С.Л., Старостенко Д.А., Бак П.А., Сквородин Д.И., Самцов Д.А., Сандалов Е.С.</i> Комплекс пучково-плазменных генераторов мультимегаваттного потока излучения на интервал частот 0,1–1 ТГц	13
<i>Коломенцева Д.А., Магоммедов Э.Ш., Щербаков В.И., Мойзых М.Е.</i> Высокополевые ВТСП-магниты для применения в источниках миллиметрового диапазона частот	14
<i>Ростов В.В., Яландин М.И.</i> Прогресс в разработке источников мощных СВЧ-импульсов черенковского излучения в диапазоне частот от 3 до 73 ГГц	15
<i>Рыскин Н.М., Ростунцова А.А., Рожнев А.Г., Торгашов Р.А., Ножкин Д.А., Колесниченко Е.Е.</i> Исследование замедляющих систем W-диапазона для миниатюрных ламп бегущей волны с двухлучевым ленточным электронным пучком	16
<i>Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Заславский В.Ю., Малкин А.М., Барышев В.Р.</i> Генерация мощного пространственно-когерентного излучения на основе концепции двумерной распределенной обратной связи: достижения и перспективы	17
<i>Глявин М., Сабчевский С.</i> «Ex ungue leonem»	18
<i>Вихарев А.А., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Федотов А.Э., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И.</i> Перспективы использования релятивистских СВЧ-генераторов для ускорения электронов	19
<i>Адилова А.Б., Торгашов Р.А., Абрамов О.А., Стародубов А.В., Ожогин И.С., Титов В.Н., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М.</i> Разработка приборов О-типа W-диапазона с замедляющими системами типа гребенки	20
<i>Запезалов В.Е., Попов Л.Г., Бакулин М.И.</i> Проблемы коллекторных систем современных гиротронов высокой мощности	21
<i>Корниенко В.Н., Кулагин В.В.</i> Структура поля излучения кратковременно ускоренной заряженной частицы	22
<i>Глявин М.Ю., Железнов И.В., Заславский В.Ю., Зотова И.В., Крупин Д.С., Сергеев А.С., Мануилов В.Н.</i> Двухлучевые магнетронно-инжекторные пушки для двухчастотных гиротронов.....	23
<i>Мясин Е.А., Ильин А.Ю., Максимов Н.А.</i> Об особенностях измерения выходной мощности оротронов с двухрядной периодической структурой с помощью волноводной детекторной секции $1,6 \times 0,8 \text{ мм}^2$	24
<i>Новожилова Ю.В., Назаровский А.В., Богдашов А.А., Фокин А.П., Глявин М.Ю., Денисов Г.Г.</i> Стабилизация частоты двух гиротронов общим резонансным отражателем.....	25
<i>Песков Н.Ю., Заславский В.Ю., Абубакиров Э.Б., Гинзбург Н.С., Денисенко А.Н., Малкин А.М., Палицин А.В., Панин А.Н., Прохвин М.Д., Родин Ю.В., Сергеев А.С.</i> Мощные сверхразмерные генераторы поверхностной волны с двумерно-периодическими замедляющими структурами, работающие от W- до G-диапазона частот	26
<i>Калынов Ю.К., Лазарев Д.В., Ошарин И.В., Савилов А.В., Семенов Е.С.</i> Статус работ на установках «универсальный непрерывный ГБО» и «импульсный ГБО» в ИПФ РАН	27
<i>Самсонов С.В., Богдашов А.А., Гачев И.Г., Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Железнов И.В., Зотова И.В.</i> Экспериментальное исследование гиротронного выпрямителя.....	28
<i>Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Зотова И.В., Самсонов С.В., Сергеев А.С., Розенталь Р.М., Ростунцова А.А., Рыскин Н.М., Федотов А.Э., Юровский Л.А.</i> Модулятор стационарного излучения на основе резонансного взаимодействия со встречным прямолинейным электронным пучком	29
<i>Заславский В.Ю., Родин Ю.В., Палицин А.В., Песков Н.Ю., Громов А.В., Гойхман М.Б., Гульовский Д.Р., Панин А.Н., Гинзбург Н.С.</i> Планарные релятивистские генераторы поверхностной волны субтерагерцового и терагерцового диапазонов на основе двумерно-периодических замедляющих структур	30
<i>Богдашов А.А., Самсонов С.В., Зотова И.В., Вилков М.Н.</i> Микроволновая система генератора ультракоротких импульсов Ка-диапазона с пассивной синхронизацией мод	31
<i>Богдашов А.А.</i> Восстановление фазы квазиоптического волнового пучка с помощью алгоритма PSO	32
<i>Галдецкий А.В., Савин А.Н., Богомолова Е.А., Бакунин Г.В., Коломийцева Н.М.</i> Энергетические характеристики выводов энергии W-диапазона	33

<i>Гойхман М.Б., Родин Ю.В., Заславский В.Ю., Палицин А.В., Проявин М.Д., Соболев Д.И., Гульовский Д.Р., Котов А.В.</i> Широкополосные фильтры нижних частот для систем диагностики ЭЦР-плазмы и исследования спектрального состава выходного излучения релятивистских генераторов поверхностной волны.....	34
<i>Палицин А.В., Громов А.В., Ковригин М.И.</i> Метод решения задач прохождения и отражения векторных волновых пучков при падении на плоско-слоистые среды.....	35
<i>Егорова Е.Д., Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Малкин А.М., Заславский В.Ю., Сергеев А.С., Федотов А.Э.</i> Использование замедляющих систем с мультипериодической гофрировкой для поперечного вывода энергии в пространственно-развитых генераторах поверхностной волны планарной геометрии.....	36
<i>Запезалов В.Е., Зуев А.С., Планкин О.П., Семенов Е.С.</i> Компактный гиротрон с приосевым электронным пучком	37
<i>Запезалов В.Е., Зуев А.С., Проявин М.Д., Скворцова Н.Н.</i> Проект гиротрона для плазмохимических исследований на базе магнито-экранированной системы.....	38
<i>Сидоров Д.А., Иванов А.А., Розенталь Р.М.</i> Экспериментальные исследования нестационарных режимов генерации в ЛБВ W-диапазона.....	39
<i>Крупин Д.С., Розенталь Р.М.</i> Методика измерения величины резонансного магнитного поля в импульсных релятивистских гиротронах миллиметрового диапазона.....	40
<i>Леонтьев А.Н., Абубакиров Э.Б., Гинзбург Н.С., Денисенко А.Н., Зотова И.В., Розенталь Р.М., Сергеев А.С.</i> Экспериментальные исследования многочастотных режимов генерации в сильноточном релятивистском гиротроне с удлиненным пространством взаимодействия.....	41
<i>Леонтьев А.Н., Планкин О.П., Розенталь Р.М., Семенов Е.С.</i> Проект 35 МВт 94 ГГц релятивистского гиротрона для ускорительных приложений.....	42
<i>Новак Е.М., Савилов А.В., Самсонов С.В.</i> Пространственно-временная теория гиро-ЛОВ с одноволновой и двухволновой зигзагообразными электродинамическими системами.....	43
<i>Палицин А.В., Денисов Г.Г., Соболев Д.И., Громов А.В.</i> Компрессор микроволновых импульсов на основе квазиоптического резонатора с фазоуправляемым переключением режимов накопления и вывода (высвечивания) излучения.....	45
<i>Песков Н.Ю., Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Калинин П.В., Сандалов Е.С., Сергеев А.С., Сеницкий С.Л., Степанов В.Д.</i> Планарный черенковский мазер W-диапазона с 2D-периодической замедляющей системой на базе ускорителя ЭЛМИ: расчетные параметры и первые эксперименты.....	46
<i>Адилова А.Б., Власов С.Н., Запезалов В.Е., Рожнев А.Г.</i> Полное электромагнитное моделирование свойств эшелетного резонатора гиротрона.....	47
<i>Галдецкий А.В., Савин А.Н., Богомолова Е.А., Бакунин Г.В., Коломийцева Н.М.</i> Электродинамические характеристики выводов энергии W-диапазона.....	48
<i>Самцов Д.А., Аржанников А.В., Сеницкий С.Л., Калинин П.В., Сандалов Е.С., Куклин К.Н.</i> Первые результаты по генерации миллиметрового излучения в тонком плазменном шнуре на установке ГОЛ-ПЭТ.	49
<i>Сандалов Е.С., Аржанников А.В., Сеницкий С.Л., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Песков Н.Ю., Калинин П.В., Сергеев А.С., Степанов В.Д., Самцов Д.А.</i> Эксперименты на установке ЭЛМИ по генерации излучения W-диапазона килоамперным ленточным РЭП в условиях планарной геометрии с 2D-синусоидальной решёткой	50
<i>Котова Д.А., Седов А.С.</i> Теоретическое и экспериментальное исследование шероховатости резонаторов гиротрона и ее влияние на электродинамические характеристики.....	51
<i>Сидоров Д.А., Суховерхий А.В., Розенталь Р.М.</i> Исследование стационарных и нестационарных процессов в усилителе М-типа W-диапазона.....	52
<i>Старостенко Д.А., Аржанников А.В., Бак П.А., Батраков А.М., Котов Е.С., Крылов А.А., Куленко Я.В., Логачев П.В., Мачерет Я.М., Никифоров Д.А., Петренко А.В., Павлов О.А., Павленко А.В., Самцов Д.А., Сеницкий С.Л., Щегольков Н.С.</i> Первые эксперименты с килоамперным электронным пучком на установке ЛИУ-ПЭТ.....	53
<i>Лобанов Л.Н., Ростов В.В., Шунайлов С.А., Яландин М.И.</i> О возможности генерации цуга субнаносекундных микроволновых пиков Ка-диапазона в режиме модуляции тока пучка в релятивистской ЛОВ.....	54
<i>Денисов Г.Г., Соболев Д.И., Заславский В.Ю., Фокин А.П., Паршин В.В., Серов Е.А.</i> Квазиоптические гиротроны терагерцового диапазона с двухзеркальными многослойными резонаторами брегговского типа на основе алмазных дисков.....	55
<i>Гаштури А.П., Денисов Г.Г., Соболев Д.И.</i> Проектирование излучателей гиротрона с помощью интегральных уравнений для поверхностного тока.....	56
<i>Глявин М.Ю., Каменский М.В., Морозкин М.В., Орловский А.А., Проявин М.Д., Солуянова Е.А., Тай Е.М., Денисов Г.Г.</i> Технологический гиротронный комплекс 95 ГГц: результаты первых экспериментов.....	57
<i>Бандуркин И.В., Вихарев А.А., Летавин И.М., Минеев К.В.</i> Разработка электронно-оптической системы фотоинжекторного ускорителя в ИПФ РАН.....	58

Источники и приемники терагерцового диапазона

<i>Муравьев В.М., Кукушкин И.В.</i> Отечественное оборудование и модули для миллиметровых и субмиллиметровых волн	60
<i>Хан Ф., Филиппенко Л., Ермаков А., Кинев Н., Кошелец В.</i> Сверхпроводниковые генераторы терагерцового диапазона.....	61
<i>Чмырь С.Н., Галеева А.В., Долженко Д.Е., Кристовский К.Г., Артамкин А.И., Иконников А.В., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Банников М.И., Хохлов Д.Р.</i> РТ-симметричная микроволновая фотопроводимость в топологической фазе пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{C}_x\text{dTe}$	62
<i>Конникова М.Р., Шкуринов А.П.</i> Субволновая импульсная терагерцовая диагностика	63
<i>Герасимов В.В., Кубарев В.В., Чесноков Е.Н., Водопьянов А.В., Пельтек С.Е., Бутикова Е.А., Попик В.М., Вебер С., Князев Б.А., Никитин А.К., Никитин П.А., Хасанов И.Ш., Жукавин Р.Х., Чопорова Ю.Ю., Павельев В.С., Иванов А.И., Антонова И.В., Камешков О.Э., Осинцева Н.Д., Кукотенко В.Д., Баздырев Н.А., Ванда В.С., Шевченко О.А., Гетманов Я.В., Горбачев Я.И., Коломеец Д.А., Щеглов М.А., Винокуров Н.А., Кулипанов Г.Н.</i> Терагерцевые исследования на станциях Новосибирского лазера на свободных электронах	64
<i>Гавриленко В.И., Курицын Д.И., Жукавин Р.Х., Ковалевский К.А., Анфертьев В.А., Вакс В.Л., Антонов А.В., Дубинов А.А., Морозов С.В., Хабибуллин Р.А., Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Малеев Н.А., Зубов Ф.И.</i> Непрерывный двухфотонный квантовый каскадный лазер терагерцового диапазона	65
<i>Андрюшкин В.В., Анфертьев В.А., Афоненко А.А., Багаев Т.А., Белов Д.А., Блохин С.А., Бобров М.А., Васильев А.П., Гавриленко В.И., Галиев Р.Р., Жукавин Р.Х., Зубов Ф.И., Иконников А.В., Кузьменков А.Г., Ладугин М.А., Максимов М.В., Малеев Н.А., Мармалюк А.А., Мартычев И.Е., Павлов А.Ю., Пономарев Д.С., Ушаков Д.В., Хабибуллин Р.А.</i> Российские квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона.....	66
<i>Лаврухин Д.В., Ячmeneв А.Э., Галиев Р.Р., Хабибуллин Р.А., Спектор И.Е., Зайцев К.И., Пономарев Д.С.</i> Многоэлементные оптоэлектронные источники импульсного терагерцового излучения повышенной мощности	67
<i>Китаева Г.Х., Новикова Т.И., Кузнецов К.А., Королев И.В., Прудковский П.А.</i> Единичные импульсы тока в составе отклика сверхпроводникового ТГц-болметра.....	68
<i>Баздырев Н.А., Герасимов В.В., Осинцева Н.Д., Тукмаков К.Н., Агафонов А.Н., Павельев В.С.</i> Отражающие аксиконы для формирования вихревых бесселевых пучков ТГц-диапазона частот	69
<i>Дубинов А.А., Афоненко А.А., Ушаков Д.В., Хабибуллин Р.А., Гавриленко В.И.</i> Квантово-каскадные лазеры с частотой генерации свыше 6 ТГц	70
<i>Кинев Н.В., Чекушкин А.М., Хан Ф.В., Рудаков К.И., Кошелец В.П.</i> Нагрев СИС-детектора под воздействием внешнего терагерцового излучения	71
<i>Морозов С.В.</i> Влияние различных механизмов рекомбинации и разогрева носителей на лазерную генерацию в гетероструктурах с КЯ HgTe/CdHgTe	72
<i>Оладышкин И.В.</i> Сверхбыстрые процессы в проводниках, облучаемых интенсивными оптическими и терагерцовыми импульсами	73
<i>Осинцева Н.Д., Герасимов В.В., Павельев В.С.</i> Возбуждение мультиплексных терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов с орбитальным угловым моментом на осесимметричном проводнике	74
<i>Селиверстов С.В., Святодух С.С., Кожуховский А.К., Фудин Д.Г., Гольцман Г.Н.</i> Терагерцовые интегральные полностью диэлектрические безоболочечные волноводы для систем связи нового поколения	75
<i>Ивашенцева И.В., Каурова Н.С., Гольцман Г.Н., Воронов Б.М., Третьяков И.В.</i> Чувствительность и быстродействие смесителя на основе ультратонких пленок NbN на частоте гетеродина 2,52 ТГц	76
<i>Ванда В.С., Герасимов В.В., Никитин А.К., Оладышкин И.В.</i> Механизмы потерь поверхностных плазмон-поляритонов на гладкой металлической поверхности в терагерцевом диапазоне.....	77
<i>Веселовский А.В., Новикова Т.И., Кузнецов К.А., Китаева Г.Х.</i> Исследование свойств нелинейно-оптических кристаллов в ТГц-области методом спонтанного параметрического рассеяния света	78
<i>Жмудь Б.А., Соболев А.С., Иконников А.В., Павлов А.Ю., Хабибуллин Р.А.</i> Распределение интенсивности излучения в области дальнего поля терагерцового квантово-каскадного лазера с двойным металлическим волноводом: моделирование и экспериментальное исследование.....	79
<i>Кукотенко В.Д., Герасимов В.В., Ванда В.С., Лемзяков А.Г., Азаров И.А.</i> Измерение оптических констант металлических поверхностей с использованием терагерцевых поверхностных плазмон-поляритонов.....	80
<i>Курников М.А., Шугуров А.И., Бодров С.Б., Бакунов М.И.</i> Эффективный преобразователь импульсов фемтосекундного оптического осциллятора в коллимированное терагерцовое излучение	81
<i>Пушкарев С.С., Майтама М.В., Зуев А.В., Хабибуллин Р.А.</i> Исследование проникновения микроволнового сигнала в резонатор ТГц квантово-каскадных лазеров	82

Приемники микроволнового излучения, спектроскопия и метрология

<i>Зинченко И.И.</i> Актуальные задачи и перспективы миллиметровой и субмиллиметровой астрономии	84
<i>Вдовин В.Ф., Куприянов З.П., Куприянов П.В., Петров С.А., Терешкин Е.В., Тимофеев С.А.</i> Современные средства микроволновой коммуникации и новые вызовы.....	85
<i>Лапинов А.В.</i> Анализ вспышечной активности мазеров H ₂ O	86
<i>Шитов С.В., Чичков В.И., Соломатов Л.С., Меренков А.В., Руденко Н.Ю.</i> RFTES-детекторы для радиоастрономии и квантовых цепей	87
<i>Шиховцев А.Ю., Ковадло П.Г., Кириченко К.Е., Хайкин В.Б., Миронов А.П., Леженин А.А., Градов В.С.</i> Натурные и численные исследования атмосферных условий в приложении к миллиметровым телескопам наземного базирования	88
<i>Балега Ю.Ю., Баранов С.А., Вдовин В.Ф., Ефимова М.В., Капустин С.А., Леснов И.В., Мансфельд М.А., Марухно А.С., Минеев К.В., Столяров В.А.</i> Техническое задание на антенну для радиоастрономических исследований в субтерагерцовом диапазоне частот.....	89
<i>Королёв С.А., Зайцев А.В.</i> Квазиоптический матричный радиолокатор миллиметрового диапазона.....	90
<i>Кошелев М.А., Галанина Т.А., Серов Е.А., Королева А.О., Амерханов И.С., Секачева А.Ю., Третьяков М.Ю., Чистиков Д.Н., Финенко А.А., Вигасин А.А.</i> Неэмпирическое моделирование континуума неполярных молекул для задач распространения мм-субмм-излучения	91
<i>Секачева А.Ю., Серов Е.А., Галанина Т.А., Кошелев М.А., Королева А.О., Амерханов И.С., Третьяков М.Ю., Чистиков Д.Н., Финенко А.А., Вигасин А.А.</i> О применимости полуклассических траекторных расчётов для описания формы дальних крыльев молекулярных линий.....	92
<i>Королева А.О., Галанина Т.А., Кошелев М.А., Третьяков М.Ю.</i> Физика межмолекулярных взаимодействий для атмосферных приложений	93
<i>Третьяков М.Ю., Галанина Т.А., Королева А.О., Макаров Д.С., Чистиков Д.Н., Финенко А.А., Вигасин А.А.</i> Физически обоснованное моделирование континуального поглощения водяного пара в субТГц-диапазоне частот для атмосферных приложений	94
<i>Панкратов А.Л., Ладейнов Д.А., Гордеева А.В., Чигинев А.В., Ревин Л.С., Сафонова В.Ю., Пиманов Д.А., Благодаткин А.В.</i> Приемники для поиска темной материи и исследования свойств нейтрино	95
<i>Бирюков В.В., Воробьев И.А., Малахов В.А., Раевская Ю.В., Раевский А.С., Щербаков В.В.</i> Проектирование антенны кассегрена диапазона 118 ГГц с предельно достижимыми характеристиками	96
<i>Резник А.Н.</i> Импедансная спектроскопия на базе микроволновой зондовой станции в задачах диагностики полупроводниковых материалов и структур	97
<i>Серов Е.А., Паришин В.В., Минеев К.В., Голубев Е.С., Рудковский Д.М., Фоменко В.В., Лаухин М.А., Чернятина А.А.</i> Отражающая способность образцов антенны космического радиотелескопа при температурах 5–300 К	98
<i>Ревин Л.С., Пиманов Д.А., Панкратов А.Л., Благодаткин А.В., Матрозова Е.А., Чигинев А.В., Гордеева А.В.</i> Болометры на холодных электронах в качестве электромагнитных и тепловых сенсоров.....	99
<i>Шураков А.С., Кучерявый Е.А., Гольцман Г.Н.</i> Антенные и алгоритмические решения для реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей субтерагерцового диапазона	100
<i>Ершова М.И., Львов А.В., Приходько А.Н., Шураков А.С., Гольцман Г.Н.</i> Параметризация дифракционной модели динамики принимаемого сигнала в условиях частичного перекрытия линии субтерагерцовой передачи	101
<i>Ивашенцева И.В., Каурова Н.С., Воронов Б.М., Третьяков И.В.</i> Технология изготовления плёнок NbN для гетеродинного сверхчувствительного приёмника ТГц-диапазона.....	102
<i>Вдовин В.Ф., Землянуха П.М., Леснов И.В., Мансфельд М.А., Минеев К.В., Носов В.И., Сальков В.А.</i> Проблемы разработки модулятора субтерагерцового радиометра	103

Миллиметровое и субмиллиметровое излучение в прикладных исследованиях

<i>Черкасова О.П., Николаев Н.А.</i> Биомедицинские применения терагерцового излучения.....	105
<i>Борзосеков В.Д., Гусейн-заде Н.Г., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Малахов Д.В., Петров А.Е., Скворцова Н.Н., Соколов А.С., Степахин В.Д., Харчев Н.К.</i> Использование СВЧ-излучения гиротронного комплекса МИГ-3 для плазмохимических исследований. Текущее состояние и планы развития	106
<i>Богданов С.А., Вихарев А.Л., Глявин М.Ю., Горбачев А.М., Каменский М.В., Морозкин М.В., Орловский А.А., Проявин М.Д., Соболев Д.И., Холонцев В.В. Гаштури А.П., Солуянова Е.А., Тай Е.М., Денисов Г.Г.</i> Установка для исследования плазмохимического синтеза алмаза на основе 20-кВт-гиротрона	107

<i>Егоров С.В., Еремеев А.Г., Рыбаков К.И., Сорокин А.А., Холопцев В.В.</i> Микроволновое реакционное спекание керамических композитов $\text{Ce:YAG} + \text{Al}_2\text{O}_3$	108
<i>Скворцова Н.Н., Ахмадуллина Н.С., Борзосеков В.Д., Гусейн-заде Н.Г., Кончечков Е.М., Малахов Д.В., Образцова Е.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К., Шишилов О.Н.</i> Синтез гетерогенных катализаторов в цепных плазмохимических реакциях, инициируемых микроволновыми импульсами мощного гиротрона.....	109
<i>Белов С.П., Голубятников Г.Ю., Леонов И.И., Галанина Т.А., Третьяков М.Ю.</i> Повышение предельной чувствительности высокоселективного газового анализа полярных примесных газов атмосферы на примере молекулы CO	110
<i>Летунов А.А., Гудкова В.В., Логвиненко В.П., Воронова Е.В., Князев А.В., Борзосеков В.Д.</i> Параметры разрядов, инициируемых в порошковых смесях импульсами мощного гиротрона.....	111
<i>Богданов С.А., Вихарев А.Л., Горбачёв А.М., Радищев Д.Б., Лобаев М.А.</i> Неустойчивости СВЧ-разрядов, применяемых для синтеза алмаза.....	112
<i>Вдовин В.Ф., Ефимова М.В., Минеев К.В.</i> Сравнительный анализ перспективных площадок Северной Евразии для радиоастрономических наблюдений на субТГц-частотах.....	113
<i>Минеев К.В., Сальков В.А.</i> Субтерагерцовый неохлаждаемый радиометр для исследования астроклимата....	114
<i>Вдовин В.Ф., Гладышев В.О., Глотов А.Н., Кауц В.Л., Каютенко А.В., Леснов И.В., Литвинов Д.А., Марухно А.С., Минеев К.В., Николаев П.П., Шарандин Е.А.</i> Сравнительный анализ яркостной температуры неба в горах Кабардино-Балкарии и Карачаево-Черкесии в трехмиллиметровом диапазоне длин волн.....	115
<i>Шепелев А.В.</i> Об измерении параметра группировки микроволнового излучения.....	116
<i>Бутикова Е.А., Басов Н.В., Рогачев А.Д., Гайслер Е.В., Разумов И.А., Соловьева О.И., Коломеец Д.А., Каныгин В.В., Попик В.М., Шевченко О.А., Винокуров Н.А., Покровский А.Г.</i> Исследование изменений нуклеотидного метаболизма в клетках меланомы под воздействием терагерцового излучения.....	117
<i>Немова Е.Ф., Черкасова О.П., Николаев Н.А.</i> Влияние терагерцового излучения на взаимодействие альбумина с ионами кальция.....	118
<i>Гордеев С.К., Корчагина С.Б., Моисеев Е.Н., Запевалов В.Е., Паршин В.В., Серов Е.А., Пестов А.Е., Лопатин А.Я., Палашиов О.В., Кузнецов И.И., Глявин М.Ю.</i> Алмазокарбидкремниевый композит «Скелетон» для электроники, микроволновой техники и фотоники.....	119
<i>Паршин В.В., Серов Е.А., Запевалов В.Е.</i> Высокотемпературное поглощение в широкозонных полупроводниках.....	120
<i>Паршин В.В., Минеев К.В., Родин Ю.В., Заславский В.Ю., Розенталь Р.М., Аристов В.Ф., Вихров И.А., Ерёмин А.А.</i> Полимерные композитные материалы для субтерагерцового диапазона.....	121
<i>Паршин В.В., Серов Е.А., Запевалов В.Е., Трубин Д.А., Гордеев С.К.</i> Перспективные композитные материалы для ТГц-диапазона длин волн.....	122
<i>Сафронов А.Н., Байкин А.В., Маркарян Д.А.</i> Практические результаты создания измерительного СВЧ-оборудования в диапазоне частот до 40 ГГц.....	123
<i>Бондаренко А.С., Боровков А.С., Малай И.М., Михайлов П.Д., Семёнов В.А.</i> Создание системы обеспечения единства измерений комплексных коэффициентов отражения и передачи в волноводных трактах.....	124
<i>Бондаренко А.С., Малай И.М., Михайлов П.Д., Пивак А.В., Раков А.В., Смотрова Д.А.</i> Особенности проектирования эталонной калибровочной пластины в диапазоне частот до 110 ГГц.....	125
<i>Бобова В.Д., Муравьев В.М., Кукушкин И.В.</i> Разработка ГИС датчика мощности.....	126
<i>Боровков А.С., Малай И.М., Михайлов П.Д., Пивак А.В., Раков А.В., Семёнов В.А.</i> Исследование влияния параметров измерительного зонда на погрешность измерений S-параметров микроволновых структур на пластине.....	127
<i>Малай И.М., Саргсян М.В., Маркова М.С., Фартушин М.И., Коровяев К.М.</i> Разработка и изготовление эталонных низкотемпературных генераторов шума (НГШ) в миллиметровом диапазоне частот от 78,33 до 300 ГГц, разработанных в рамках ОКР «Мощность».....	128
<i>Бондаренко А.С., Боровков А.С., Малай И.М., Михайлов П.Д., Пивак А.В., Раков А.В., Семёнов В.А., Смотрова Д.А., Чирков И.П.</i> Определение волнового сопротивления копланарной линии эталонной калибровочной пластины.....	129
<i>Титенко А.А., Бобова В.Д., Зарезин А.М., Синогин М.В., Заостровных С.А., Кукушкин И.В., Муравьев В.М.</i> Модули расширения частотного диапазона 50–178 ГГц для векторных анализаторов цепей.....	130
<i>Максимов Н.А., Мясин Е.А.</i> Вынужденные колебания в нелинейном СВЧ-контуре. Резонансы и спектры вплоть до 5 мм.....	131
<i>Авторский указатель</i>	132

**ИСТОЧНИКИ
МОЩНОГО МИКРОВОЛНОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Разработка giroприборов в России. Недавние результаты и перспективы

Г.Г. Денисов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
den@ipfran.ru

Существуют различные разновидности мазеров на циклотронном резонансе – источников мощного когерентного электромагнитного излучения в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн, использующих мазерный эффект вынужденного электронного излучения в постоянном магнитном поле, связанный с группировкой электронов по фазам вращения из-за релятивистской зависимости циклотронной частоты от энергии частиц. Электродинамическая система генераторов может значительно превосходить в поперечных размерах (например, в 30 раз) длину волны излучения при сохранении режима одномодовой одночастотной генерации, что позволяет получить высокий уровень мощности на очень высоких частотах вплоть до терагерцового диапазона.

Основные принципы и первые успешные эксперименты с giroприборами были представлены в середине прошлого века, однако настоящий ренессанс они пережили в последнее десятилетие, когда были продемонстрированы:

- генерация излучения мегаваттной мощности с КПД более 50% на частоте 170 ГГц;
- стабилизация частоты гиротрона посредством ФАПЧ до 1 Гц;
- возможность захвата внешним сигналом частоты мегаваттных гиротронов;
- непрерывная перестройка частоты более октавы в диапазоне 90–190 ГГц;
- мощные широкополосные усилители;
- успехи в разработке терагерцовых гиротронов.

Есть обоснованный оптимизм, что последующие десять лет также принесут важные и интересные результаты, в частности, будут реализованы:

- гиротроны непрерывной мегаваттной мощности диапазона 200–300 ГГц для токамаков следующего поколения – ДЕМО, ТРТ;
- многочастотные гиротроны мегаваттного уровня мощности;
- непрерывно перестраиваемые источники диапазона 150–300 ГГц;
- терагерцовые гиротроны с непрерывной мощностью в десятки киловатт;
- и другие.

В докладе обсуждаются подходы для достижения этих результатов.

Эксперименты по каскадному ускорению ультракоротких электронных пучков высоковольтными импульсами в вакууме и газе

Н.М. Зубарев^{1,2}, Л.Н. Лобанов¹, К.А. Шарыпов¹, В.Г. Шпак¹, С.А. Шунайлов¹, М.И. Яландин^{1,2}

¹ Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
yalandin@iep.uran.ru

Представлены эксперименты по каскадному ускорению до энергий в сотни килоэлектронвольт субнаносекундных взрывоэмиссионных электронных пучков (ВЭП) в вакууме и пикосекундных сгустков убегающих электронов (УЭ) в воздухе. Решалось несколько задач.

1. Повышение стабильности эмиссии УЭ на фронте питающего катод импульса напряжения с амплитудой $|U_{in}|^{max}$, и обеспечение набора ими энергии $\geq 2e|U_{in}|^{max}$ (e – элементарный заряд). Множитель 2 определяется малым током УЭ и «предэмиссионным» холостым ходом, который с помощью деления электродного промежутка на две секции (рис. 1) обеспечивается вплоть до достижения напряжением амплитудного значения.

2. В коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией (КДМИ) возможна дискриминация функций эмиссии и ускорения ВЭП в последовательных промежутках, разделенных электродом под плавающим потенциалом с окном для электронов. В результате мер, обеспечивающих задержку подачи импульса питания на промежуток с катодом, ускорение во втором промежутке происходит при амплитудном напряжении до энергии ≈ 400 кэВ. При этом относительный разброс энергий на фронте субнаносекундного пучка сокращается (в нашем случае с 40 до 15%), что близко к данным расчетов.

3. Ускорение с 250 до 500 кэВ ВЭП с током примерно 1 кА после КДМИ получено в схеме с дрейфовой трубкой, в основе которой лежит идея линейного ускорителя тяжелых частиц Изинга – Видероз. В случае электронов для питания КДМИ и второго промежутка мы применяем ускоряющие импульсы с длительностью 1 и 0,5 нс. Это различие определяется точностью их синхронизации ± 200 пс, которая обеспечена при отрицательной полярности на выходе двух драйверов РАДАН-303. Униполярность питания диктует специфику конструкции, представленной на рис. 2. С увеличением точности синхронизации количество таких каскадов может быть увеличено для кратного повышения энергии ускорения.

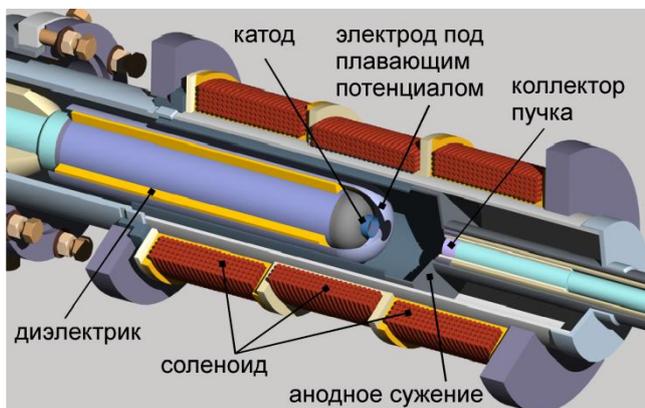


Рис. 1. Схема с трехэлектродным диодом

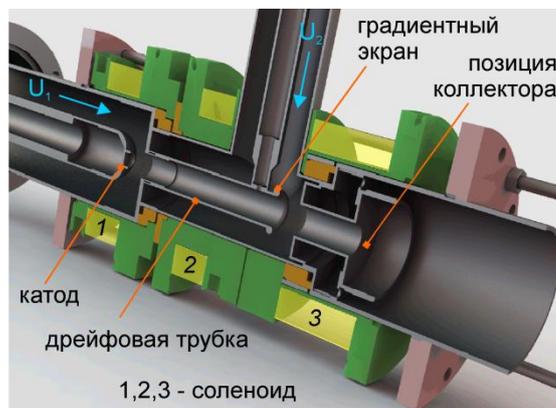


Рис. 2. Схема с дрейфовой трубкой

4. Та же схема (рис. 2) применима для ускорения сгустка УЭ, имеющего после КДМИ энергию порядка 250 кэВ, и поэтому теряющего при 8-см дрейфе в воздухе менее 5% энергии. Электрическая прочность воздушной изоляции атмосферного давления ограничивает амплитуду и длительность импульса, питающего второй промежуток, по сравнению с вакуумом. В случае дискриминированной изоляции питающего тракта газом SF₆ амплитуда на втором промежутке достигла –230 кВ, и тогда энергия УЭ на выходе составила около 480 кэВ.

По задаче № 3 работа финансировалась РНФ (грант № 24-19-00407, <https://rscf.ru/project/24-19-00407/>).

Реакторные технологии, создаваемые российскими научными центрами для термоядерных проектов ITER, TRT, и перспективы сотрудничества с BEST

А.В. Красильников, Ю.А. Кашук, С.В. Коновалов

«Проектный центр ИТЭР» – частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», Москва
a.krasilnikov@iterrf.ru

Ряд научных центров ГК «Росатом» и Российской академии наук, государственных и частных технологических предприятий демонстрируют начало формирования термоядерной кооперации, уже глубоко вовлеченной в разрешение ключевых научных и технологических проблем в рамках выполнения российских обязательств в международном проекте ITER. Предприятия созданной кооперации активно участвуют в разработке и проектировании токамака с реакторными технологиями (TRT) в России и начали научное и технологическое сотрудничество на китайских токамаках EAST и BEST. ITER и BEST будут квазистационарными токамаками с электромагнитной системой (ЭМС) из низкотемпературных сверхпроводников (LTS, Nb₃Sn и Nb-Ti), с дейтерий-третиевой плазмой и термоядерной мощностью 500 ($Q = 10$) и 200 МВт ($Q = 5$) соответственно. TRT проектируется как квазистационарный токамак с ЭМС из высокотемпературных сверхпроводников (HTS, REBCO), высоким магнитным полем (8 Тл), дейтериевой плазмой с добавлением небольшого количества трития. Все три машины будут полномасштабными плазменными и инженерными прототипами будущих чистого термоядерного и гибридного (синтез-деление) реакторов. Вместе их технологические платформы составят основу для создания будущего термоядерного реактора.

Для сооружения термоядерного реактора необходимо решить ряд проблем: экспериментальная демонстрация квазистационарного термоядерного горения (создание стационарных профилей тока, температуры, плотности основной плазмы, создание и поддержание оптимальных профилей параметров плазмы на её периферии для снижения взаимодействия плазма-стенка, включая подавление неустойчивостей на границе плазмы, оптимизация работы дивертора, разработка методов подавления срывов плазмы); генерация неиндуктивного квазистационарного тока; разработка плазменных технологий и материалов первой стенки и дивертора; разработка новых методов диагностики плазмы и управления.

Ключевыми компонентами и технологиями, которые необходимо разработать и создать для сооружения термоядерного реактора, являются: ЭМС из высокотемпературных сверхпроводников, вакуумная камера (двуслойная, охлаждаемая), первая стенка и дивертор (W, В₄C, Li ...), системы дополнительного нагрева и генерации тока (0,5 МэВ D НИ, 230 ГГц ЭЦН, 60–80 МГц ИЦН, ~1 ГГц геликоны для генерации тока), бридерные и гибридные модули blankets, совместимые с реактором системы диагностики и интегрального управления.

Некоторые результаты работ по разрешению основных проблем в создании термоядерного реактора, разработке его ключевых компонентов и технологий и соответствующий вклад кооперации российских научных и технологических центров представлен в докладе на базе их участия в проектах ITER и TRT и, потенциально, в китайском проекте BEST. Возглавляемая ГК «Росатом» термоядерная кооперация включает Проектный центр ИТЭР, НИИЭФА, НИКИЭТ, ТВЭЛ, НИЦ «Курчатовский институт», ГНЦ РФ ТРИНИТИ, ФТИ РАН, ИЯФ СО РАН, ИПФ РАН, МИФИ, ВНИИКП, ГКМП, УТС-Центр и др. Ряд технологий BEST/CRAFT (ASIPP, Китай) (HTS и LTS сверхпроводники, криогеника, системы питания, ИЦН, роботы и др.) могут быть эффективно применены на TRT.

Работа выполнена в рамках работ по государственным контрактам с ГК «Росатом» от 20.03.2024 № Н.4а.241.19.24.1024 и от 17 апреля 2023 № Н.4к.241.09.23.1060.

Комплекс пучково-плазменных генераторов мультимегаваттного потока излучения на интервал частот 0,1–1 ТГц

А.В. Аржанников, П.В. Логачёв, С.Л. Сеницкий, Д.А. Старостенко, П.А. Бак,
Д.И. Сквородин, Д.А. Самцов, Е.С. Сандалов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Arzhannikov48@yandex.ru

Потоки терагерцового (ТГц) излучения обладают способностью проникать глубоко в различные материалы, которые непрозрачны в оптическом и инфракрасном диапазонах, что позволяет возбуждать ими энергетические уровни супрамолекулярных образований в этих материалах. В этих условиях можно использовать мощные потоки ТГц-излучения для воздействия на супрамолекулярные структуры материалов с целью трансформации их структуры и модификации физико-химических свойств. Для такого воздействия целесообразно использовать потоки излучения в области частот 0,2–2 ТГц с мегаваттным уровнем мощности. Генерация таких потоков излучения реализуется в процессе интенсивного взаимодействия килоамперного пучка релятивистских электронов с замагниченным плазменным столбом [1]. Используя этот физический механизм генерации излучения, на установке ГОЛ-ПЭТ уже получен направленный поток излучения с мультимегаваттным уровнем мощности в области частот 0,2–0,3 ТГц. Этим потоком уже осуществлена трансформация полимерных материалов [2].

Генерация в указанной области частот осуществляется при релаксации килоамперного пучка МэВ-ных электронов в плазме с плотностью $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Для дальнейшего продвижения в исследованиях по воздействию ТГц-излучением на материалы необходима его генерация области частот 0,5–1 ТГц. Для решения этой задачи в ИЯФ создаётся установка ЛИУ-ПЭТ [3]. В этом генераторе излучения для накачки плазменных колебаний будет использоваться сжатый по сечению килоамперный пучок, поступающий из линейного индукционного ускорителя. Пучок на выходе этого ускорителя имеет следующие параметры: энергия частиц – до 1 МэВ, ток пучка – до 1 кА, длительность импульса – 0,1 нс. Диаметр этого пучка, генерируемого в отсутствие внешнего магнитного поля, около 100 мм. При сжатии сечения пучка в нарастающем до 2 Тл магнитном поле его плотность тока превысит уровень 10 кА/см^2 , что обеспечит эффективную генерацию излучения при плотности плазмы $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, при которой частота излучения в генерируемом потоке будет занимать интервал 0,5–1 ТГц. Таким образом, комплекс из двух описанных пучково-плазменных генераторов обеспечит покрытие необходимой мощностью интервала частот 0,1–1 ТГц.

1. Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L., Popov S.S., et al. Energy Content and Spectral Composition of a Submillimeter Radiation Flux Generated by a High-Current Electron Beam in a Plasma Column With Density Gradients // IEEE Transactions on Plasma Science. 2022. Vol. 50, no. 8. P. 2348–2363. doi: 10.1109/TPS.2022.3183629.

2. Аржанников А.В., Сеницкий С.Л., Самцов Д.А. и др. Изменение спектральных характеристик некоторых полимерных материалов в интервале частот от 0,2 до 2 ТГц в результате воздействия мегаваттным потоком субмм-излучения микросекундной длительности // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2024 (принята к печати).

3. Аржанников А.В., Сеницкий С.Л., Старостенко Д.А. и др. Пучково-плазменный генератор ТГц-излучения на основе индукционного ускорителя (проект ЛИУ-ПЭТ) // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 1. С. 28–42.

Высокополевые ВТСП-магниты для применения в источниках миллиметрового диапазона частот

Д.А. Коломенцева, Э.Ш. Магоммедов, В.И. Щербаков, М.Е. Мойzych

ЗАО «СуперОкс», Москва
d.gorbunova@superox.ru

Высокополевые магниты (10 Тл и более) с большой апертурой (более 100 мм) находят применение в исследованиях физики плазмы, спектрометрическом оборудовании, источниках излучения миллиметрового диапазона (в частности, гиротроны). Применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) открывает новые возможности для создания таких магнитов: по сравнению с низкотемпературными сверхпроводниками ВТСП отличается высокая плотность тока в магнитных полях от 10 Тл (на порядки выше НТСП) и возможность работы в большем диапазоне температур (до 77 К против 4 К). Высокая плотность тока позволяет сделать оборудование более компактным, а повышенная рабочая температура – в ряде случаев позволяет отказаться от гелиевой инфраструктуры благодаря использованию так называемого сухого (контактного) охлаждения. В то же время использование ВТСП требует применения новых подходов к созданию магнитов, связанных с особенностями этого материала, в частности, геометрии профиля провода, полевых зависимостей, особенностей распространения нормальной зоны.

В 2023 году был спроектирован ВТСП-магнит 10 Тл для гиротрона для Института прикладной физики РАН. Ключевой задачей проектирования была реализация специального профиля магнитного поля (например, однородность магнитного поля максимальной интенсивности не менее 0,1% на расстоянии 6 мм от центра и не менее 1% на расстоянии 18 мм от центра) при заданных габаритах магнита (теплое отверстие магнита не менее 170 мм, высота магнита, включая криостат, не более 430 мм). Серийное производство магнитов указанных характеристик отсутствует.

В настоящем докладе будет рассказано о результатах проектирования магнита: расчетах геометрии обмоток магнита для обеспечения целевого профиля магнитного поля, разработке технологических решений по его изготовлению, экспериментальной апробации элементов магнита для обеспечения работоспособности в различных режимах работы (в том числе режимов с переходом магнита в нормальное состояние), что позволило сформировать рабочую конструкторскую документацию для последующего изготовления магнита.

Прогресс в разработке источников мощных СВЧ-импульсов черенковского излучения в диапазоне частот от 3 до 73 ГГц

В.В. Ростов¹, М.И. Яландин²

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

² Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
rostov@lfe.hcei.tsc.ru

Сообщается о результатах численных и экспериментальных исследований по генерации мощных СВЧ-импульсов излучения в обновленных схемах черенковского излучения сильноточных электронных пучков, как в (1) режимах квазистационарной генерации встречной волны, так и в случаях (2) возбуждения сверхкоротких СВЧ-импульсов с длительностью, задаваемой инкрементом неустойчивости (абсолютной и конвективной).

Для источников (1) показано, что совершенствование известных методов повышения КПД позволяет в численном эксперименте для гибридной схемы с преимущественной обратной связью ЛОВ-типа получать КПД генерации до 60%, а в эксперименте на уровне $45 \pm 15\%$. Среди таких методов: оптимизация поля высокочастотного пространственного заряда и степени модуляции электронного пучка на входе, снижение роли циклотронного взаимодействия, а также акцентирование вклада попутной волны в условиях благоприятных углов пролёта на полной длине. Демонстрируются примеры создаваемых макетов источников в диапазонах несущей частоты 3 ГГц, 5,8 ГГц, 9,4 ГГц, а также на 10 ГГц, 36 ГГц и 73 ГГц (электродинамические системы с повышенным уровнем сверхразмерности $D/\lambda \approx 2,5$).

В задачах (2) развиты режимы сверхизлучения электронных сгустков в протяженных замедляющих структурах со встречной волной, в том числе для исследований взаимодействия коротких микроволновых импульсов с плазмой (на 28 ГГц). Результаты аналитического рассмотрения и моделирования возбуждения конвективной неустойчивости с высокой конверсией мощности ($\gg 1$) указывают на возможность создания источника с пиковой мощностью более 10^{10} Вт.

Исследование замедляющих систем W-диапазона для миниатюрных ламп бегущей волны с двухлучевым ленточным электронным пучком

Н.М. Рыскин, А.А. Ростунцова, А.Г. Рожнев, Р.А. Торгашов, Д.А. Ножкин,
Е.Е. Колесниченко

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов
ryskinm@gmail.com

Разработка и исследование миниатюрных электронных приборов коротковолновой части миллиметрового диапазона, или так называемого субТГц-диапазона (0,1–0,3 ТГц), в настоящее время привлекает широкое внимание. Широкополосные усилители типа лампы бегущей волны (ЛБВ) представляют интерес для многочисленных приложений, прежде всего, для беспроводных систем высокоскоростной передачи данных. Успешно продемонстрированы субТГц ЛБВ на основе замедляющих систем (ЗС) типа петляющего волновода или двойной гребенки с мощностью порядка 100 Вт. Тем не менее имеется потребность в дальнейшей миниатюризации подобных приборов, для чего требуются новые конструкции ЗС и, соответственно, новые технологии их изготовления. Также важной задачей является снижение питающих напряжений, для чего требуются ЗС с высоким замедлением.

В настоящей работе представлены результаты разработки ЛБВ W-диапазона с ЗС, которые представляют собой модификации лестничных и меандровых ЗС. Они представляют собой пластину со щелями определенной формы, помещенную в волновод. В такой конфигурации возможно взаимодействие с пучком, состоящим из двух лучей, которые распространяются сверху и снизу от пластины. Рассмотрены лестничная ЗС в волноводе, нагруженном продольными пазами, лестничная ЗС со щелями гантелеобразной формы, а также ЗС в виде меандра с боковыми опорами. Представлены результаты моделирования электродинамических параметров ЗС, обсуждаются особенности их дисперсионных характеристик. В частности, в определенном диапазоне частот они проявляют свойства «дважды отрицательного» метаматериала. Основная пространственная гармоника в этом случае является обратной, а на прямой +1-й гармонике можно реализовать широкополосное усиление. Проведено трехмерное РИС-моделирование режимов усиления в ЛБВ с рассматриваемыми ЗС. Обсуждается их изготовление с помощью технологии лазерной микрообработки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-12-00181.

Генерация мощного пространственно-когерентного излучения на основе концепции двумерной распределенной обратной связи: достижения и перспективы

Н.С. Гинзбург, Н.Ю. Песков, А.С. Сергеев, В.Ю. Заславский,
А.М. Малкин, В.Р. Барышев

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
ginzburg@ipfran.ru

Двумерная распределенная обратная связь, реализуемая на основе двумерно-периодических брэгговских структур, является достаточно универсальным методом генерации пространственно-когерентного излучения от активных сред различной физической природы, включая мощные электронные пучки, а также лазерные полупроводниковые среды. В докладе представлен обзор теоретических и экспериментальных исследований в рамках указанной проблематики.

На первом этапе на основе двумерной РОС реализованы мазеры на свободных электронах миллиметрового диапазона планарной (совместно с ИЯФ СО РАН) и цилиндрической (совместно с University of Strathclyde) геометрии.

В ряде теоретических работ показана возможность применения концепции двумерной РОС в релятивистских черенковских генераторах поверхностной волны, в которых используются прямолинейные электронные пучки, а двумерные брэгговские структуры одновременно выполняют роль резонатора и замедляющей системы. При возбуждении поверхностных волн в подобной зам. системе в ИЭФ УрО РАН получена генерация импульсов сверхизлучения в коротковолновой части миллиметрового диапазона с рекордной пиковой мощностью до 150 МВт. В последнее время в ИПФ РАН на основе сильноточных ускорителей СИНУС и СИНУКИ реализованы черенковские генераторы поверхностной волны с трубчатыми и ленточными релятивистскими электронными пучками в диапазонах 150–170 ГГц.

Значительные перспективы связаны с использованием концепции двумерной РОС для синхронизации излучения в гетеролазерах с пространственно-развитыми активными средами. В таком случае двумерный брэгговский резонатор представляет собой планарный диэлектрический волновод с двумерно-периодической модуляцией глубины. Работоспособность и селективность таких резонаторов продемонстрирована в модельных экспериментах с диэлектрическими структурами, проведенных в миллиметровом диапазоне.

«Ex ungue leonem»

М. Глявин¹, С. Сабчевский²

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

² Институт электроники Болгарской академии наук, София, Болгария
glyavin@ipfran.ru

В последние годы заметно сократились возможности получения информации о результатах зарубежных исследований, так что название доклада отсылает к античной поговорке, используемой в значении «дорисовать, воссоздать льва по одной детали». На основе доступных данных из статей и докладов в области gyroприборов, представленных ведущими зарубежными научными центрами, делается попытка представить, на каких направлениях сконцентрированы усилия разработчиков gyroприборов, какие успехи достигнуты и какие существуют проблемы. Акцент делается на разработку гиротронов мегаваттного уровня мощности, методы селекции мод, направленные на повышение рабочей частоты колебаний, и поиск новых приложений мощного микроволнового излучения.

Перспективы использования релятивистских СВЧ-генераторов для ускорения электронов

А.А. Вихарев^{1,2}, Н.С. Гинзбург¹, И.В. Зотова^{1,2}, А.Э. Федотов¹,
К.А. Шарыпов², В.Г. Шпак², С.А. Шунайлов², М.И. Яландин²

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

² Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
zotova@ipfran.ru

Сильноточная вакуумная СВЧ-электроника последние десятилетия испытывает отчетливый недостаток гражданских приложений. Вместе с тем за это время было получено много важных результатов, среди которых достижение рекордных уровней мощности (от нескольких гигаватт в X-диапазоне до десятков мегаватт на коротких миллиметрах), значительное повышение КПД генерации, увеличение длительности импульсов до десятков и даже сотен наносекунд, генерация субнаносекундных импульсов сверхизлучения с пиковой мощностью, превышающей мощность в электронном пучке, и, наконец, создание усилителей субгигаваттного уровня мощности. По нашему мнению, все эти достижения могут быть востребованы в недавно возникшем, новом тренде ускорительной физики – высокоградиентном ускорении частиц короткими СВЧ-импульсами.

Уменьшение длительности воздействия сильных СВЧ-полей на стенки ускоряющей структуры снижает вероятность развития пробоя и тем самым дает возможность увеличить величину электрического поля в структуре и ускорительный градиент. При длительности СВЧ-импульсов от единиц до долей наносекунд величины полей могут составлять сотни МВ/м, что значительно выше, чем в традиционных ускорителях. Экспериментальная демонстрация высокоградиентного ускорения электронов была проведена в Институте электрофизики УрО РАН на ускорителе «РАДАН» в комбинированной схеме «генератор-ускоритель» с двумя коаксиальными электронными пучками [1]. Внешний трубчатый пучок (300 кэВ / 2,3 кА) возбуждал импульс сверхизлучения (38 ГГц / 200 МВт / 0,2 нс) в замедляющей структуре лампы обратной волны (ЛОВ), который затем накачивал низкодобротный резонатор типа «pill-box» длиной 4 мм, расположенный между катодом и замедляющей структурой. Электроны внутреннего приосевого пучка (250 кэВ / 150 А) при пролете через резонатор ускорялись в полях, превышающих 500 МВ/м, до энергии более 1,25 МэВ. Более высокий набор энергии (до 20 МэВ и выше) может быть получен в длинных структурах на бегущей волне, запитываемых СВЧ-импульсами Ka- или X-диапазонов наносекундной длительности, генерируемыми ЛОВ на основе ускорителей типа «РАДАН» или «СИНУС».

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 24-19-00407.

1. *Ginzburg N.S., et al.* Demonstration of high-gradient electron acceleration driven by subnanosecond pulses of Ka-band superradiance // *Physical Review–Accel. Beams.* 2023. Vol. 26, 060401.

Разработка приборов О-типа W-диапазона с замедляющими системами типа гребенки

А.Б. Адилова^{1,2}, Р.А. Торгашов^{1,2}, О.А. Абрамов^{1,2}, А.В. Стародубов¹,
И.С. Ожогин^{1,2}, В.Н. Титов^{1,2}, А.Г. Рожнев^{1,2}, Н.М. Рыскин^{1,2}

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал, Саратов

² Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов
AdilovaAB@gmail.com

Разработка компактных мощных источников излучения, работающих в терагерцовом диапазоне частот, имеет большое значение для современных высокоскоростных беспроводных систем связи, радиолокации, спектроскопии и других приложений. Одними из наиболее перспективных являются миниатюрные вакуумные приборы О-типа, такие как лампы бегущей волны (ЛБВ) и лампы обратной волны (ЛОВ).

В настоящей работе представлены результаты исследований ЛОВ и ЛБВ W-диапазона с замедляющими системами (ЗС) типа гребенки. Разработаны конструкции ЗС типа сдвоенной гребенки для широкополосного ЛБВ усилителя, проведена оптимизация согласующих устройств ввода-вывода, позволившая получить коэффициент отражения менее -30 дБ. Проведено численное моделирование режимов усиления для секционированной конструкции ЛБВ с разрывом для предотвращения самовозбуждения. Рассмотрены варианты как с ленточным, так и с цилиндрическим электронным пучком. В результате оптимизации параметров получен коэффициент линейного усиления свыше 30 дБ в полосе шириной 17 ГГц. Выходная мощность в режиме насыщения превышает 50 Вт при входной мощности порядка 100 мВт.

Представлены результаты измерения S-параметров макетов ЗС, изготовленных с помощью микрофрезерования. Обсуждается сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

Также разработана конструкция ЗС типа одиночной гребенки для ЛОВ-генератора W-диапазона с напряжением $10-15$ кВ. Для изготовления прототипа такой ЗС отработана технология стереолитографической 3D-печати с последующей металлизацией магнетронным напылением. Погрешность изготовления не превышает 3% . Проведены экспериментальные измерения S-параметров ЗС. Измеренные потери на передачу составляют около $-7,5$ дБ, потери на отражение не хуже -10 дБ в диапазоне $80-100$ ГГц.

Проблемы коллекторных систем современных гиротронов высокой мощности

В.Е. Запевалов¹, Л.Г. Попов², М.И. Бакулин²

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

² ЗАО НПП «Гиком», Нижний Новгород
zapev@ipfran.ru

В современных установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) в настоящее время используются гиротроны мегаваттного класса для электронного циклотронного нагрева и управления током. Высокий уровень энергии отработанного электронного пучка на коллекторе после генерации микроволнового излучения остается серьезной проблемой этих гиротронов. Очевидно, что надежная работа мощной вакуумной лампы может быть реализована, если ее термонагруженные узлы обладают достаточной прочностью. Дан краткий обзор вариантов коллекторных систем, используемых в настоящее время.

В большинстве мощных гиротронов используются коллекторы с продольным сканированием электронного пучка. Коллектор нагружен электронами с остаточной мощностью до 1,5 МВт и работает в импульсном режиме благодаря сканированию электронным пучком. Типичные импульсные и средние нагрузки составляют ≈ 1 кВт/см² и 0,3 кВт/см². Для гиротрона 1 МВт/1000 с прогнозируемым сроком службы 5000 ч потребовались новые конструкции коллектора. Без применения специальных мероприятий по увеличению площади токооседания плотность мощности на коллекторе оказывается избыточной и приводит к его быстрому выходу из строя. Использование коллекторов с рекуперацией (СРД – collector potential depression) несколько улучшает ситуацию. Помимо заметного увеличения КПД, использование СРД значительно снижает мощность, рассеиваемую на коллекторе. Коллектор – самая массивная и весьма дорогая подсистема мощных гиротронов – до настоящего времени остается одной из часто повреждаемых частей. Термомеханические расчеты позволяют разрабатывать конструкции этих узлов с требуемым ресурсом, имеющие следующие температурные характеристики: импульсный подъем и средняя температура внутренней поверхности стенки коллектора составляют ≈ 30 –40 и 130–140 °С. При расчетах ресурса учитывались как процессы усталости, так и ползучести. Обратная величина общего прогнозируемого обратного ресурса определялась как сумма обратных величин ресурсов каждого механизма.

Другим подходом является использование поперечного или комбинированного сканирования, что позволяет существенно повысить частоту перемещения электронного пучка по поверхности коллектора и равномерность токооседания. Однако при этом требуется наличие участка с низкой проводимостью перед коллектором, где размещается магнитная система, создающая переменное магнитное поле для поперечного смещения электронного пучка.

Описаны новые варианты перспективных конструктивных решений, способствующие повышению надежности и срока службы. Рассмотрен коллектор в виде изолированной одно- или многозаходной спирали, выполненной из трубы, по которой течет охлаждающая жидкость. В другом варианте коллектора для токооседания используется внешняя поверхность тела вращения. В этом случае корпус электронного устройства может быть изготовлен из материала с низкой электропроводностью, и экранирование существенно ослаблено.

Предложенные варианты конструкции коллекторов могут способствовать повышению мощности гиротронов и срока их службы. Указанные технические решения могут представлять интерес и для других электронных приборов высокой мощности пролетного типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ИПФ РАН № FFUF-2022-0007.

Структура поля излучения коротковременно ускоренной заряженной частицы

В.Н. Корниенко¹, В.В. Кулагин^{1,2}

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

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва
korn@cplire.ru

В представляемой работе рассмотрена классическая задача о характере электромагнитного поля, формируемого в пространстве исходно покоящейся заряженной частицей, на которую некоторое непродолжительное время действует ускоряющая сила. Эта задача описана еще в [1] и детально разобрана в [2, 3]. В этих работах основное внимание было уделено поведению силовых линий увлекаемого электрического поля. Мы же провели исследования пространственно-временной структуры именно поля излучения.

Разделить увлекаемое поле и поле излучения произвольно движущейся частицы можно при помощи соотношения, получаемого на основе потенциалов Лиенара – Вихерта [4]:

$$\vec{E} = q \frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{(R - \vec{v} \vec{R}/c)^3} (\vec{R} - \vec{v} R/c) + \frac{q}{c^2 (R - \vec{v} \vec{R}/c)^3} [\vec{R} [(\vec{R} - \vec{v} R/c) \dot{\vec{v}}]],$$

где c – скорость света в вакууме, q – заряд частицы. Её координаты \vec{r}_p , скорость \vec{v} и ускорение $\dot{\vec{v}}$, стоящие в правой части уравнения, берутся в запаздывающий момент времени. Радиус-вектор \vec{R} направлен от частицы в точку наблюдения. Первое слагаемое, убывающее с расстоянием $\sim 1/R^2$, соответствует увлекаемому полю, т. е. полю, силовые линии которого имеют начало в точке текущего положения частицы. Второе слагаемое описывает поле излучения.

Проведенное численное моделирование показало, что в результате коротковременного ускорения частица излучает в свободное пространство монополярный электромагнитный импульс, характеристики которого зависят от времени действия ускоряющей силы и ее величины.

1. Парселл Э. Электричество и магнетизм. Москва : Наука, 1971.
2. Болотовский Б.М., Давыдов В.А., Рок В.Е. // УФН. 1978. Т. 126, вып 2. С. 311.
3. Болотовский Б.М., Серов А.М. // УФН. 2009. Т. 179, № 5. С. 517.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика : учебное пособие в 10 томах. Том II. Теория поля. Москва : Наука, 1988.

Двухлучевые магнетронно-инжекторные пушки для двухчастотных гиротронов

М.Ю. Глявин, И.В. Железнов, В.Ю. Заславский, И.В. Зотова, Д.С. Крупин,
А.С. Сергеев, В.Н. Мануилов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
mavnik1@yandex.ru

Двухлучевые аксиально-симметричные магнетронно-инжекторные пушки (МИП), формирующие два соосных винтовых электронных пучка (ВЭП) в настоящее время успешно применяются для электронной селекции типов колебаний в традиционных гиротронах как сантиметрового, так и миллиметрового диапазонов, работающих на первой или второй гармониках гирочастоты. Однако расширение практических приложений СВЧ-излучения мм-диапазона требует разработки двухчастотных гиротронов, излучающих одновременно на первой и второй или второй и третьей гармониках. Такие источники, в частности, востребованы в экспериментах по генерации многозарядных ионов, использующих инициированный СВЧ-излучением локализованный разряд газа, где необходим уровень мощности порядка нескольких киловатт на каждой частоте в частотном диапазоне 15–30 ГГц, а также ряде других технических приложений.

В докладе изложены особенности построения соответствующих двухлучевых МИП для формирования двух парциальных ВЭП с близкими (порядка 1.3-1.5) питч-факторами при токах пучков около 1 А и ускоряющем напряжении 30 кВ для пар частот 14 и 28 ГГц и 19 и 28 ГГц. Проведена оптимизация формы электродов электронно-оптической системы и найдена геометрия МИП, обеспечивающая приемлемые параметры каждого парциального винтового электронного пучка.

Работа выполнена при поддержке гранта № FFUF-2022-0007.

Об особенностях измерения выходной мощности оротронов с двухрядной периодической структурой с помощью волноводной детекторной секции $1,6 \times 0,8$ мм

Е.А. Мясин, А.Ю. Ильин, Н.А. Максимов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал),
пл. Введенского, 1, Фрязино, Московская обл., 141190
eam168@ms.ire.rssi.ru

Проведено рассмотрение возможности коррекции измеренных значений величины выходной мощности оротронов с двухрядной периодической структурой (ДРПС) с помощью детекторной секции, выполненной в прямоугольном волноводе $1,6 \times 0,8$ мм без учёта расположения детектора на середине его широкой стенки, в диапазоне 100,1 ГГц – 400 ГГц.

В предположении, что в прямоугольном волноводе $1,6 \times 0,8$ мм распространяется волна типа H_{10} , диапазон 100,1 ГГц – 400 ГГц измерения величины выходной мощности оротронов с ДРПС можно разделить на следующие участки [1].

Участок 1 с одной волноводной полуволной (одним максимумом) на длине широкой стенки волновода 100,1 – 150 ГГц ($\approx 2,997 - 1,435$ мм).

Участок 2 с двумя волноводными полуволнами (максимумами) на длине широкой стенки волновода и с нулевым значением на её середине (от 187, 5 ГГц до 1,6 мм и короче).

Участок 3 с тремя волноводными полуволнами (тремя максимумами) с максимумом на её середине (230,77 – 385,8 ГГц) (1,3 – 0,7776114 мм). Граничная длина волны в свободном пространстве $\lambda_0 \approx 0,7776114$ мм, а частота $f = 385,7968$ ГГц $\approx 385,8$ ГГц.

Участок 4 с четырьмя волноводными полуволнами (четырьмя максимумами), т. е. с нулевым значением на её середине (386 – 400 ГГц).

1. Показано, что такую коррекцию можно осуществить путём введения **специальной функции F**, определяющей как возможное максимальное значение измеряемой величины, при совпадении её с координатой середины широкой стенки волновода, т. е. местом расположения детектора, так и при несовпадении. В последнем случае истинное значение измеряемой величины будет определяться умножением её на величину, обратную **F**, т. е. на **корректирующую функцию $1/F$** [1].

2. Выведена формула для **специальной функции F** в 2-мм-диапазоне длин волн: $F = |\sin[(\pi/a)\lambda v/4]|$. Показано, что её можно использовать вплоть до $\lambda_0 = 1,45$ мм или $f = 206,89655 \approx 206,9$ ГГц, так как $\lambda v \approx 1,626$ мм $\lambda v/2 = 0,813$ мм $> 0,8$ мм. $\lambda_0 = 1,4$ мм, $\lambda v \approx 1,5573$ мм, $\lambda v/2 = 0,7786$ мм $< 0,8$ мм. Это означает, что для волн короче $\lambda_0 = 1,4$ мм возможно возбуждение наряду с волной типа H_{10} и типа H_{20} , так как критическая длина волны для $H_{20} - \lambda v = 1,6$ мм и $\lambda_0 = 1,43$ мм, $f = 209,79$ ГГц.

3. Выведена формула для **специальной функции F** в 1-мм- и субмм-диапазонах: $F = |\sin[(3\pi/a)(3\lambda v/4)]|$ и вычислены её значения для ряда длин волн в этих диапазонах. Установлено, что без учёта коррекции измеренная мощность в этих диапазонах занижена относительно истинного её значения в 3 раза. Поэтому **коррекция, т. е. $1/F$, для этого диапазона должна быть увеличена в 3 раза и равна $3/F$** .

4. Установлена высокочастотная граница в 385,8 ГГц для проведения измерений с помощью волноводной детекторной секции с волноводом $1,6 \times 0,8$ мм.

Работа выполнена в рамках государственного задания в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

1. Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю. Методика оценки величины генерируемой мощности оротрона с двухрядной периодической структурой в диапазоне 180 ГГц–400 ГГц // Приборы и техника эксперимента. 2023. № 2. С. 58–63.

Стабилизация частоты двух гиротронов общим резонансным отражателем

Ю.В. Новожилова, А.В. Назаровский, А.А. Богдашов, А.П. Фокин,
М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
river@ipfran.ru

Для создания в перспективе комплекса когерентно излучающих гиротронов [1] представляет интерес исследование возможности когерентного сложения колебаний нескольких источников с общим резонансным отражателем [2, 3]. Экспериментальные исследования [4] показали эффективность стабилизации частоты одного гиротрона при помощи резонансного отражателя. Недавние публикации [3] продемонстрировали возможность стабилизации частоты и фазы двух гиротронов, работающих на общий резонансный отражатель. В данном докладе исследованы режимы генерации двух гиротронов с общим резонансным отражателем при различных значениях взаимной расстройки собственных частот гиротронов. Актуальность этой задачи обусловлена возможной неидентичностью гиротронов из-за погрешностей изготовления их резонаторов. Моделирование проведено на примере 170-ГГц-гиротронов с мегаваттным уровнем мощности, разработанных в ИПФ в качестве прототипа для ИТЕР. В качестве резонансного отражателя, как и в эксперименте [4], рассматривается внешний высокодобротный двухзеркальный резонатор с добротностью около 40000 и коэффициентом отражения по мощности 10%. Показано, что стационарная когерентная генерация возможна при отстройке собственных частот резонаторов гиротронов на величину, существенно превышающую ширину полосы стабилизации частоты одного гиротрона отраженной волной. При выходе из полосы одночастотной генерации в обоих гиротронах наблюдаются биения, частота которых равна разности частот автономных колебаний гиротронов.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 19-79-30071.

1. Fukunari M., et al. // Journal of Energy and Power Engineering. 2017. Vol. 11, no. 6. P. 363-371.
2. Kondratiev N.M., et al. // Front. Phys. 2023. Vol. 18, no. 2. 21305, doi: 10.1007/s11467-022-1245-3.
3. Novozhilova Y., Bogdashov A.A., Fokin A.P. et al. // J. Infrared Milli Terahz Waves. 2025. Vol. 46, no. 3, doi:10.1007/s10762-024-01018-4.
4. Fokin A.P., et al. // IEEE Electron Device Letters. 2021. Vol. 42, no. 7. P. 1077–1080.

Мощные сверхразмерные генераторы поверхностной волны с двумерно-периодическими замедляющими структурами, работающие от W- до G-диапазона частот

Н.Ю. Песков, В.Ю. Заславский, Э.Б. Абубакиров, Н.С. Гинзбург, А.Н. Денисенко, А.М. Малкин, А.В. Палицин, А.Н. Панин, М.Д. Проявин, Ю.В. Родин, А.С. Сергеев

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

Генераторы черенковского типа на основе сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) обеспечивают в настоящее время рекордный уровень импульсной мощности в сантиметровом диапазоне и длинной части миллиметрового диапазона длин волн. Однако дальнейшее увеличение частоты и мощности излучения неизбежно приводит к необходимости увеличения сверхразмерности этих приборов. Таким образом, одной из ключевых проблем в их создании становится обеспечение одномодового режима генерации в условиях существенной сверхразмерности.

Эффективным методом решения проблемы селекции мод в сверхразмерных релятивистских мазерах является использование двумерной распределенной обратной связи (РОС), которая реализуется в двумерно-периодических (2D) структурах брэгговского типа. Проведенные к настоящему времени теоретические и экспериментальные исследования продемонстрировали высокий потенциал использования механизма двумерной РОС для получения мощного узкополосного излучения в различных типах генераторов, поперечные размеры которых на порядок и более превышают длину волны излучения. В генераторах черенковского типа механизм двумерной РОС реализуется при использовании 2D замедляющих структур, которые в данном случае совмещают в себе свойства замедляющей системы, создающей условия эффективного взаимодействия с сильноточным прямолинейным РЭП, и высокодобротного резонатора, в котором происходит синхронизация излучения по «широкой» поперечной (азимутальной в случае цилиндрической геометрии) координате из-за возникновения поперечных волновых потоков.

Проекты мощных сверхразмерных черенковских генераторов поверхностной волны (ГПВ) на основе 2D замедляющих структур цилиндрической геометрии разрабатываются в настоящее время в ИПФ РАН. Экспериментальной базой для данных проектов служит ускорительный комплекс «Синус-6» 0,5 МэВ / 5 кА / 25 нс, формирующий трубчатый РЭП диаметром около 40 мм. В настоящее время при использовании данного пучка реализованы ГПВ в W-диапазоне (рабочая частота около 73 ГГц) и G-диапазоне (частота ~ 145 ГГц) при сверхразмерности (диаметре), составляющем около 10 и 20 длин волн соответственно. Длительность импульсов излучения составляла до 10 нс, мощность излучения достигала 150 МВт в W-диапазоне и до 50 МВт в G-диапазоне, что является рекордным уровнем на указанных частотах. Ширина спектра излучения была близка к теоретическому пределу, определяемому полученной длительностью импульсов. Азимутально-симметричная структура поля выходного излучения, согласно моделированию, соответствовала возбуждению основной моды двумерно-периодической замедляющей структуры.

В докладе представлены результаты моделирования и экспериментального исследования реализованных генераторов. Обсуждаются перспективы их дальнейшего продвижения в более высокочастотные диапазоны вплоть до терагерцового.

Работа проводится в рамках госзадания ИПФ РАН, проект № FFUF-2022-0007.

Статус работ на установках «универсальный непрерывный ГБО» и «импульсный ГБО» в ИПФ РАН

Ю.К. Калынов, Д.В. Лазарев, И.В. Ошарин, А.В. Савилов, Е.С. Семенов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
savilov@ipfran.ru

Ведутся работы по подготовке эксперимента по реализации на установке «универсальный непрерывный ГБО» 30 кВ/0,5 А гиротрона на основном циклотронном резонансе с широкополосной частотной перестройкой, основанного на использовании удаленного внешнего рефлектора, фиксирующего частоту генерации. Расчеты предсказывают селективную генерацию с эффективностью выходной волны 40–10% в полосе частот порядка 10% (125–137 ГГц). На основе специально разработанного кода, основанного на уравнениях двухволновой модели, проведено исследование конкуренции продольных мод. Моделирование показало, что частота генерации в такой системе действительно определяется рабочей частотой внешнего отражателя во всем диапазоне частотной перестройки. Разработана и изготовлена механически-перестраиваемая система внешнего отражения для частотно-перестраиваемого гиротрона на основном циклотронном резонансе, которая представляет собой систему зеркал, расположенную на механическом устройстве, которое может менять как положение системы относительно выходного окна гиротрона, так и угол поворота фокусирующего зеркала. Варьируя эти параметры, оказывается возможным изменение рабочей частоты рефлекторной системы в частотном диапазоне 125–137 ГГц при сохранении частотной узкополосного отражения на заданной частоте. Кроме того, проведены предварительные расчеты, иллюстрирующие возможности реализации аналогичных частотно-перестраиваемых гиротронов, работающих на второй и третьей гармониках циклотронной частоты.

В экспериментах, проведенных на установке «импульсный ГБО» в 2023 г., использование резонатора с селективирующим элементом дало возможность увеличить мощность генерации 80 кВ/0,7 А гиротрона, работающего на частоте 1 ТГц на третьей циклотронной гармонике, с 400 Вт до 1,3 кВт. В 2024 г. этот результат был повторен при увеличении длительности импульса генерации с 10 до 20–30 мкс. Кроме того, в этом относительно длинноимпульсном эксперименте наблюдались сложные импульсы мощности выходного излучения (в частности, соответствующие режиму перехода с одной продольной моды на другую), которые были воспроизведены в численном моделировании. Кроме того, обсуждается возможность достижения уровня мощности в несколько кВт в этом гиротроне путем повышения тока и ускоряющего напряжения рабочего электронного пучка.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН № FFUF-2022-0007.

Экспериментальное исследование гиротронного выпрямителя

С.В. Самсонов, А.А. Богдашов, И.Г. Гачев, М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов,
И.В. Железнов, И.В. Зотова

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
samsonov@ipfran.ru

В докладе будут представлены первые результаты экспериментальных исследований гиротронного выпрямителя, предназначенного для преобразования мощности СВЧ-излучения, падающего на устройство в виде направленного гауссова пучка, в мощность постоянного тока. Данный прибор представляется перспективным для использования в составе т. н. ректенны системы беспроводной передачи энергии. Исследуемый вариант прибора (рис. 1, 2) так же как и известные разновидности электронно-циклотронного выпрямителя [1, 2], основан на взаимодействии тонкого сплошного прямолинейного пучка с поперечно-электрической модой резонатора вблизи циклотронного резонанса. Однако, в отличие от последних, СВЧ-мощность поступает не через коаксиал или стандартный волновод, а через окно большого диаметра на коллекторном конце системы. Кроме того, используется не квазиплоский двухпластинчатый резонатор, а резонатор в виде отрезка волновода круглого сечения на вращающейся моде $TE_{1,1}$. В эксперименте планируется продемонстрировать преобразование СВЧ-излучения на частоте около 34 ГГц с мощностью 10–15 кВт в мощность постоянного (длительностью импульса до 100 мкс) тока с КПД на уровне 80–90% при использовании электронного пучка 10 кВ/0,5 А в магнитном поле около 1,3 Тл [3].

Дальнейшее развитие такого гиротронного выпрямителя предполагает переход на трубчатый электронный пучок большого диаметра, высокую моду круглого волновода и ввод СВЧ-пучка с помощью двунаправленного квазиоптического преобразователя, что позволит реализовывать такие системы на мегаваттном уровне непрерывной мощности в миллиметровом диапазоне длин волн [4].

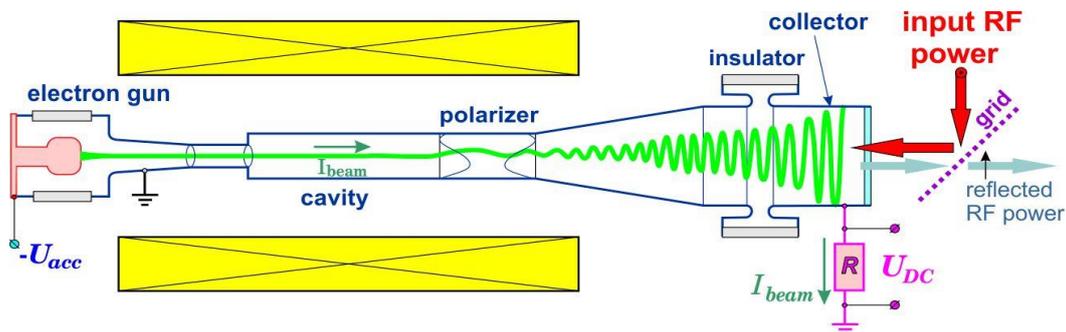


Рис. 1. Общая схема эксперимента по исследованию ЭЦР-ректенны (гиротронного выпрямителя) с тонким сплошным пучком и резонатором на моде $TE_{1,1}$ круглого волновода

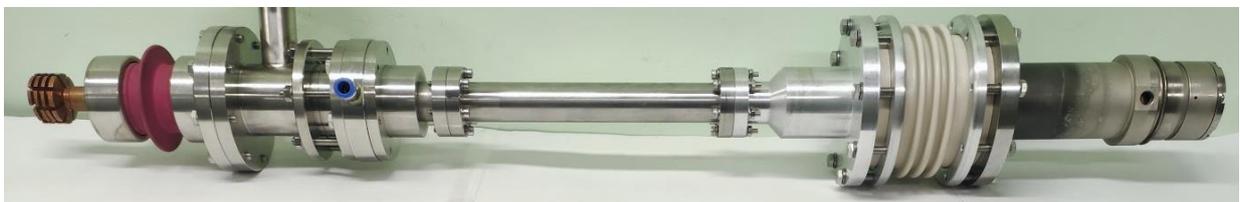


Рис. 2. Фотография изготовленного экспериментального образца (длина 835 мм)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-30071).

1. Vanke V.A., Matsumoto H., Shinohara N., Kita A. // J. of Radioelectronics. 1999, no. 9.
2. Zhao X., Tuo X., Ge Q., and Peng Y. // Phys. Plasmas. 2017. Vol. 24. P. 073117. doi: 10.1063/1.4994074.
3. Samsonov S.V., Denisov G.G., Glyavin M.Y., Zheleznov I.V., Zotova I.V., J. IR Milli // Terahertz Waves. 2025. Vol. 46, no. 9. doi: 10.1007/s10762-024-01026-4.
4. Denisov G.G. et al. // Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Chengdu. China, 2024. P. 1–4, doi: 10.1109/PIERS62282.2024.10618455.

Модулятор стационарного излучения на основе резонансного взаимодействия со встречным прямолинейным электронным пучком

Н.С. Гинзбург¹, В.Ю. Заславский¹, И.В. Зотова¹, С.В. Самсонов¹, А.С. Сергеев¹, Р.М. Розенталь¹,
А.А. Ростунцова^{1,2}, Н.М. Рыскин², А.Э. Федотов¹, Л.А. Юровский¹

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

² Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
fedotov@ipfran.ru

Преобразование непрерывного СВЧ-излучения в когерентную последовательность ультракоротких импульсов (УКИ) с широким спектром актуально для ряда приложений, включая диагностику плазмы, радиолокацию, спектроскопию и т. д. В частности, в [1] для этих целей использовались управляемые лазером полупроводниковые коммутаторы, что, однако, ограничивает мощность и частоту следования УКИ. В то же время существует альтернативная возможность, основанная на циклотронно-резонансном взаимодействии излучения с прямолинейным электронным пучком, являющимся аналогом неинвертированной среды, вообще говоря, поглощающей стационарное излучения. Как показано в [2, 3], в этом случае начиная с некоторых значений мощности сигнала и длины пространства взаимодействия развивается модуляционная неустойчивость (МН) монохроматической волны с периодическим образованием когерентных СВЧ-солитонов самоиндуцированной прозрачности (СИП). Образование СИП солитонов хорошо известно в оптике при распространении короткого (в масштабе времен релаксации) светового импульса в неинвертированных средах, однако МН стационарных оптических сигналов подавляется из-за быстрой фазовой релаксации. В электронике фазовая релаксация, как правило, не влияет на процессы взаимодействия, что приводит к возникновению МН. Преимуществом такого подхода для модуляции СВЧ-сигналов является высокая (суб-ГГц) частота повторения, а также возможность достижения пиковой мощности, превышающей мощность электронных пучков (за счет нелинейной самокомпрессии). В докладе обсуждаются особенности указанного процесса, а также подготовка экспериментов по его наблюдению в миллиметровом диапазоне длин волн.

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 23-12-00291.

1. Vikharev A.A., Denisov G.G., Kocharovskiy V.I., et al. // Tech. Phys. Lett. 2007. **33**, 735.
2. Zotova I.V., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., et al. // Phys. Rev. Lett. 2014. **113**. 143901.
3. Rostuntsova A.A., Ryskin N.M., Zotova I.V., and Ginzburg N.S. // Phys. Rev. E. 2022. **106**. 014214.

Планарные релятивистские генераторы поверхностной волны субтерагерцового и терагерцового диапазонов на основе двумерно-периодических замедляющих структур

В.Ю. Заславский, Ю.В. Родин, А.В. Палицин, Н.Ю. Песков, А.В. Громов, М.Б. Гойхман, Д.Р. Гульовский, А.Н. Панин, Н.С. Гинзбург

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

В настоящее время мощные источники импульсного излучения субтерагерцового и терагерцового диапазонов востребованы различными научными и практическими приложениями, включая системы локации с высоким разрешением, современные беспроводные телекоммуникационные системы и др. Отдельным направлением, активно развивающимся в настоящее время, является разработка высокоградиентных ускорительных систем, для которых требуются соответствующие приборы с необходимым уровнем мощности. Задача освоения указанных диапазонов с требуемыми параметрами неизбежно сопряжена с использованием релятивистских электронных пучков (РЭП) и увеличением сверхразмерности пространства взаимодействия генераторов, что в свою очередь требует разработки новых методов обеспечения пространственной и временной когерентности излучения (селекции мод по поперечному индексу).

В качестве источников излучения субтерагерцового и терагерцового диапазонов, направленных на вышеуказанные приложения, предлагаются релятивистские генераторы поверхностной волны (ГПВ) с планарной конфигурацией пространства взаимодействия, запитываемые ленточными РЭП. Преимуществом такой геометрии является возможность использования открытых с торцов планарных волноводов, что обеспечивает дополнительный механизм селекции по соответствующей открытой широкой поперечной координате, позволяя тем самым увеличить интегральный рабочий ток генератора путем применения более широких (в масштабе длины волны) электронных пучков. В ГПВ прямолинейно движущийся РЭП взаимодействует с медленной основной гармоникой волны, распространяющейся в периодической замедляющей системе и представляющей собой поверхностную волну, прижатую к замедляющей системе.

В условиях существенной сверхразмерности (параметр Френеля $\gg 1$) для обеспечения селекции мод и устойчивого возбуждения рабочего типа колебаний предлагается использовать двумерно-периодические замедляющие структуры. Данные электродинамические системы в генераторах указанного типа сочетают функции высокоимпедансных замедляющих систем и высокоселективных резонаторов, основанных на брэгговском рассеянии волн.

В данной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования планарных ГПВ субтерагерцового и терагерцового диапазонов с двумерно-периодическими замедляющими структурами, запитываемых ленточными РЭП, формируемыми на базе ускорителя прямого действия «СИНУКИ» (ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1 кА / 600 кэВ / 17 нс) с лезвийным катодом, работающим в режиме взрывной эмиссии. В результате проведенных экспериментов получены стабильные режимы одномодовой генерации в субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах частот с выходной мощностью > 10 МВт и параметром Френеля > 7 .

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 23-72-10094.

Микроволновая система генератора ультракоротких импульсов Ka-диапазона с пассивной синхронизацией мод

А.А. Богдашов, С.В. Самсонов, И.В. Зотова, М.Н. Вилков

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
bogdash@ipfran.ru

В работе рассмотрена электродинамическая система генератора последовательности субнаносекундных импульсов Ka-диапазона с пассивной синхронизацией продольных мод. Схема включает в себя гиро-ЛБВ с винтовой гофрировкой и нелинейный циклотронный поглотитель с прямолинейным пучком [1]. Ранее в системе экспериментально была продемонстрирована генерация последовательности импульсов длительностью 0,4 нс с пиковой мощностью 100 кВт и периодом повторения 2,5 нс [2]. В работе рассмотрена модернизация системы для запуска генератора в жестком режиме при возбуждении системы внешним генератором короткого СВЧ-импульса на основе ускорителя «Радан».

Выполнены измерения коэффициентов отражения и прохождения для различных коэффициентов связи с резонатором, образованным всей цепью обратной связи. Показано, что в полосе 32–36 ГГц наблюдается около 100 продольных мод, а добротность резонатора достигает 20000 при максимальной связи. Ввод внешнего сигнала в квазиоптический резонатор осуществляется системой дополнительных зеркал. Для согласования выходной моды внешнего генератора с модой резонатора разработан преобразователь моды $TM_{0,1}$ в гауссов пучок с эффективностью более 95% в полосе частот 34–37,5 ГГц. Преобразователь моды $TM_{0,1}$ синтезирован методом роя частиц с подвижными узлами сплайн-функции, задающей ось волновода [3]. Расчет распространения входного импульсного сигнала через систему квазиоптических зеркал выполнен методами физической оптики в частотной и временной области.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-12-00291; <https://rscf.ru/project/23-12-00291>).

1. Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N., Sergeev A.S., Samsonov S.V., Malkin A.M., and Zotova I.V. Nonlinear Cyclotron Resonance Absorber for a Microwave Subnanosecond Pulse Generator Powered by a Helical-Waveguide Gyrotron Traveling-Wave Tube // *Phys. Rev. Appl.*, 13, 044033 (2020).

2. Ginzburg N.S., Samsonov S.V., Denisov G.G., Vilkov M.N., Zotova I.V., Bogdashov A.A., Gachev I.G., Sergeev A.S., Rozental R. M. // Ka-Band 100-kW Subnanosecond Pulse Generator Mode-Locked by a Nonlinear Cyclotron Resonance Absorber // *Phys. Rev. Appl.*, 16, 054045 (2021).

3. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // *Proc. of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*. USA (1995). P. 1942–1948.

Восстановление фазы квазиоптического волнового пучка с помощью алгоритма PSO

А.А. Богдашов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
bogdash@ipfran.ru

В работе представлены экспериментальные результаты по восстановлению фазы волнового пучка по измерениям амплитуды поля с потерями в нескольких поперечных сечениях. В предложенном подходе [1] волновой пучок представляется в виде суперпозиции эрмит-гауссовых (ЭГ) мод с неизвестными комплексными амплитудами. Поиск амплитуд и фаз ЭГ-мод ведётся методом многомерной оптимизации роём частиц (Particle Swarm Optimization) [2]. В случае различного рода потерь при измерениях амплитуды поля восстановление фазы с помощью итерационного алгоритма Каценеленбаума – Семенова [3] теряет свою эффективность. Потери при измерениях могут иметь различный характер. Так в случае восстановления фазы волнового пучка при визуализации СВЧ-разряда в газе на металлодиэлектрической мишени [4] зажигание разряда происходит при амплитуде поля, превышающей величину порогового пробойного поля. В случае же низкой чувствительности приемного детектора при удалении от источника происходит потеря информации зашумлением измеряемого сигнала. Рассмотрено влияние выбора параметров ЭГ-мод на результаты восстановления фазы. В работе обсуждается проблема совмещения поперечных сечений при восстановлении фазы волнового пучка с потерями.

Предложенный подход использован для восстановления фазы волнового пучка на частоте 28 ГГц при измерениях амплитудного распределения поля в поперечных сечениях на выходе преобразователя мод TE_{10} – TE_{02} на мВт-уровне мощности. Для восстановления фазы пучка использовано 20×20 ЭГ-мод. В рассматриваемом случае удается восстановить фазовое распределение поля с эффективностью более 95%.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта FFUF-2022-0007.

1. *Богдашов А.А.* Восстановление фазы квазиоптического волнового пучка с потерями // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»: сб. докл. / СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург, 2023. С. 556–560.
2. *Kennedy J., Eberhart R.* Particle Swarm Optimization // Proc. of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. USA. 1995. P. 1942–1948.
3. *Chirkov A.V., Denisov G.G., Aleksandrov N.L.* 3D wavebeam field reconstruction from intensity measurements in a few cross sections // Optics Communication. 1995. Vol. 115, no. 5-6. P. 449–452.
4. *Gitlin M.S., Bulanova S.A., Fokin A.P., Glyavin M.Yu, et al.* Imaging of a High-Power Millimeter Wave Beam Using a Millimeter Wave-Induced Gas Breakdown Initiated by a Metal-Dielectric Screen // IEEE Transactions on Plasma Science. 2022. Vol. 50, no. 2. P. 267–274.

Энергетические характеристики выводов энергии W-диапазона

А.В. Галдецкий, А.Н. Савин, Е.А. Богомолова, Г.В. Бакунин, Н.М. Коломийцева

АО НПП «Исток» им. Шокина
yaea89@inbox.ru

Приведены результаты исследования теплового режима керамики из Al_2O_3 , BeO , BN и поликристаллического алмаза в составе вакуумно-плотного вывода СВЧ-энергии для ЛБВ мм-диапазона. Проведено сравнение теплорассеивающей способности различных конструкций вакуумно-плотных выводов энергии при использовании различных диэлектриков. По результатам анализа определен материал диэлектрика, сочетающий необходимые электродинамические и теплорассеивающие свойства, доступность и технологичность.

Широкополосные фильтры нижних частот для систем диагностики ЭЦР-плазмы и исследования спектрального состава выходного излучения релятивистских генераторов поверхностной волны

М.Б. Гойхман, Ю.В. Родин, В.Ю. Заславский, А.В. Палицин,
М.Д. Проявин, Д.И. Соболев, Д.Р. Гульовский, А.В. Котов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
goihman@ipfran.ru

Для систем радиометрии электромагнитного излучения в установках УТС предложены волноводные фильтры нижних частот (ФНЧ) U - и V -диапазонов, обеспечивающие защиту высокочувствительной измерительной аппаратуры от перегрузки излучением гиротронов системы ЭЦР-нагрева. В качестве примера была выбрана установка ТОКАМАК Т-15МД, где используются гиротроны, работающие на частоте 82,6 ГГц, что выше диапазона частот, в которых возможно распространение только фундаментальной моды TE_{10} приемного тракта измерительной аппаратуры. Конструктивно фильтры содержат две секции. Первая секция обеспечивает прохождение (с ослаблением не более 1 дБ) сигнала в рабочем диапазоне 40–58 ГГц для фильтра U -диапазона и 54–75 ГГц для фильтра V -диапазона и подавление не менее 40 дБ на частоте 82,6 ГГц при подаче на вход фильтров моды TE_{10} . Вторая секция выступает в качестве заградительного фильтра на частоте 82,6 ГГц при подаче на вход фильтров высших мод прямоугольного волновода.

Для исследования спектрального состава выходного излучения генераторов поверхностной волны (ГПВ) миллиметрового диапазона длин волн был разработан и изготовлен ФНЧ на основе прямоугольного волновода с глубокой гофрировкой. Фильтр был изготовлен методом 3d-печати с последующей металлизацией. Фильтр предназначен для экспериментальной проверки отсутствия генерации в ГПВ на первой пространственной гармонике. Проведенное численное моделирование показало: в диапазоне частот 33–41,3 ГГц, где возможно излучение на первой пространственной гармонике ГПВ, величина коэффициента ослабления не превышает 0,2 дБ; в частотных диапазонах 48–106,5 ГГц, 109–131 ГГц, 136,5–156,7 ГГц, в которые попадает излучение на высших пространственных гармониках ГПВ, подавление фильтра составляет не менее 40 дБ. Проведено измерение частотных характеристик фильтра с помощью векторного анализатора цепей Ceuear 3672В.

Работа выполнена в рамках госзадания (№ FFUF-2022-0007) и при поддержке гранта РФФИ № 23-72-10094.

Метод решения задач прохождения и отражения векторных волновых пучков при падении на плоскостойкие среды

А.В. Палицин, А.В. Громов, М.И. Ковригин

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
gromov@ipfran.ru

Методы решения прикладных задач электродинамики на основе прямого расчета уравнений Максвелла, реализованные в коммерческих пакетах CST Studio, Ansys HFSS и др., позволяют получать при численном моделировании достоверные результаты и широко применяются на практике. С освоением субТГц-диапазона частот размеры проектируемых СВЧ-устройств становятся сверхразмерными относительно длины волны и решение таких задач данными методами нередко становится невозможным из-за ограниченности аппаратных вычислительных ресурсов и самих программ. В этих условиях актуальны другие методы теоретических и численных исследований, например, на основе разложения по известным системам функций, решения для которых известны или находятся в результате относительно быстрых численных расчетов.

В докладе представлен комбинированный метод расчета задачи падения пространственно-ограниченных электромагнитных волновых пучков на плоскостойкие среды. Такого типа задачи возникают при конструировании выходных окон гиротронов, активных квазиоптических элементов сверхразмерных компрессоров микроволнового излучения, брэгговских зеркал, периодически гофрированных поверхностей и т. п.

Метод основан на векторном разложении исходного поля волнового пучка по плоским волнам в сочетании с матричным методом расчета для плоскостойких сред [1]. Основное отличие от известных методов решения через разложение по плоским волнам состоит в явном учете векторного характера волновых пучков без предположения их параксиальности. Получены коэффициенты разложения

$$C_{k_{\perp}}^{p,s} = \frac{\overline{E}_{k_{\perp}}^{p,s} \iint_{-\infty}^{+\infty} \overline{E}_0(\overline{r}_{\perp}) e^{-i\overline{r}_{\perp} \overline{k}_{\perp}} dx dy}{\left(\overline{E}_{k_{\perp}}^{p,s}\right)^2 (2\pi)^2} \quad (1)$$

произвольного векторного волнового пучка

$$\overline{E}(\overline{r}_{\perp}, z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \left(C_{k_{\perp}}^s \overline{E}_{k_{\perp}}^s + C_{k_{\perp}}^p \overline{E}_{k_{\perp}}^p \right) e^{i\overline{r}_{\perp} \overline{k}_{\perp} + ik_z z} dk_x dk_y, \quad (2)$$

по плоским волнам s - и p -поляризации. В формулах (1) и (2) $\overline{E}_{k_{\perp}}^{p,s}$ и $\overline{E}_0(\overline{r}_{\perp})$ – электрические поля плоских волн и исходного волнового пучка соответственно.

Такой способ разложения исходного поля удобен для реализации численного алгоритма с использованием быстрого преобразования Фурье и хорошо сочетается с матричным методом расчета для плоскостойких сред, в котором задача прохождения и отражения плоской волны сводится к последовательному перемножению матриц прохождения для каждого слоя.

Работа выполнена в рамках госзадания, темы № FFUF-2024-0027 и № FFUF-2022-0007.

1. Bethune D.S. Optical harmonic generation and mixing in multilayermedia: analysis using optical transfer matrix techniques // J. Opt. Soc. Am. B. 1989. Vol. 6, no. 5. P. 910–916.

Использование замедляющих систем с мультипериодической гофрировкой для поперечного вывода энергии в пространственно-развитых генераторах поверхностной волны планарной геометрии

Е.Д. Егорова^{1,2}, Н.С. Гинзбург¹, Н.Ю. Песков^{1,2}, А.М. Малкин¹,
В.Ю. Заславский^{1,2}, А.С. Сергеев¹, А.Э. Федотов¹

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
egorovaed@ipfran.ru

Генераторы поверхностной волны (ГПВ) на основе сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) привлекают в настоящее время значительное внимание как один из перспективных видов источников мощного узкополосного излучения, работающих вплоть до субтерагерцового и терагерцового диапазонов частот. В этих приборах используется резонансное взаимодействие прямолинейного РЭП с медленной основной гармоникой ВЧ-поля в замедляющей системе (так называемый режим π -вида), что обеспечивает высокий импеданс электронно-волновой связи. Это открывает возможность увеличения сверхразмерности данных генераторов и, в итоге, выходной мощности по сравнению с другими типами черенковских приборов (ЛОВ и ЛБВ).

Поверхностную волну можно рассматривать как «супермоду», которая представляет собой набор нескольких волноводных мод с коррелированными фазами, прижатых к поверхности замедляющей системы. Это решает проблему пространственной когерентности излучения в направлении по нормали к поверхности (радиальном в случае цилиндрической геометрии) при произвольных поперечных размерах системы. Использование двумерных (двумерно-периодических) замедляющих структур, реализующих двумерную распределенную обратную связь, позволяет решить проблему селекции по «широкой» поперечной (азимутальной) координате и обеспечить реализацию одномодового режима генерации в ГПВ при поперечных размерах, составляющих до десятков и сотен длин волн. При этом выходная мощность субТГц/ТГц-излучения может достигать субГВт-уровня.

Однако структура поля прижатой к поверхности замедленной волны затрудняет вывод генерируемого излучения как в случае одномерной (1D), так и двумерной (2D) замедляющих систем. В данной работе предлагаются модификации 1D и 2D электродинамических систем ГПВ планарной геометрии, которые позволяют реализовать вывод излучения в поперечном направлении по отношению к плоскости движения ленточного РЭП. Для этого предлагается использовать дополнительную гармонику гофрировки в замедляющей системе, которая будет обеспечивать рассеяние поверхностных волн в волновые потоки, распространяющиеся в поперечном направлении. При оптимальной геометрии гофрировки может быть обеспечено высокое «гауссово» содержание излучения, выводимого данным способом, и, таким образом, его эффективный вывод из генератора и дальнейшая транспортировка.

Проекты мощных планарных ГПВ, работающих в W- (рабочая частота ~ 75 ГГц) и G- (частота ~ 150 ГГц) диапазонах, разрабатываются в настоящее время в сотрудничестве ИЯФ СО РАН и ИПФ РАН на базе ускорительного комплекса ЭЛМИ 1 МэВ / 7 кА / 3 мкс, формирующего ленточные РЭП с поперечным размером $l_x \approx 17$ см, что в указанных диапазонах составляет около 50λ и 100λ соответственно. Для верификации предложенного подхода проведено трехмерное моделирование с использованием кода CST Microwave Studio. В докладе обсуждаются конструктивные элементы, расчетные параметры и результаты моделирования данных проектов.

Работа проводится при частичной поддержке Российского научного фонда (грант № 23-19-00370).

Компактный гиротрон с приосевым электронным пучком

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

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
andrey.zuev@ipfran.ru

Одним из направлений развития гиротронов является разработка источников излучения субтерагерцового и терагерцового диапазонов с умеренным уровнем мощности. Такие источники востребованы в спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР-спектроскопии) для динамической поляризации ядер (ДПЯ), в медико-биологических приложениях, в «теравидении» (получение контрастных изображений в ТГц-излучении) и в других приложениях [1, 2]. Для большинства приложений достаточно мощности излучения на уровне десятка ватт, что превышает возможности приборов классической вакуумной электроники. При этом канонический гиротрон по уровню мощности превосходит эти потребности на несколько порядков, сложен в эксплуатации и стоит очень дорого. В этой связи усиливается интерес к разработке новых приборов промежуточного уровня мощности, снижению их стоимости и уменьшению габаритов установки, включая источники питания, магнитную систему, системы управления, охлаждения и др.

В работе представлен новый вариант гиротрона с приосевым пучком. В нём, в отличие от обычного варианта гиротрона с большой орбитой (ГБО), не требуются неадиабатические эффекты для формирования приосевого винтового электронного пучка и может быть использован обычный типовой магнит с квазидипольным распределением. Как известно, в аксиально-симметричной электронно-оптической системе (ЭОС) невозможно формирование приосевого винтового электронного пучка без использования неадиабатических эффектов (например, реверса магнитного поля). Отличительной особенностью конструкции предложенного гиротрона является отказ от азимутальной симметрии ЭОС при сохранении адиабатичности.

Данная модификация гиротрона может привести к существенному снижению стоимости и габаритов установки путем использования компактных магнитных систем с существенно меньшим диаметром проходного отверстия. При этом мощность выходного излучения предложенного варианта «компактного» гиротрона с приосевым пучком достаточна для многих приложений гиротронов. Приведен пример расчета конкретного варианта такого гиротрона с частотой излучения 395 ГГц. С целью гибкого управления параметрами пучка рассматривалась триодная схема с ускоряющим напряжением 12 кВ и анодным напряжением 10 кВ. При токе пучка 70 мА и питч-факторе 1,4 мощность выходного излучения составила более 30 Вт.

Работа выполнена по теме № FFUF-2022-0007.

1. Глявин М.Ю. и др. Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред // УФН. 2016. Т. 186, № 6. С. 667–677.
2. Sabchevski S., Glyavin M. Development and Application of THz Gyrotrons for Advanced Spectroscopic Methods // Photonics. 2023. Vol. 10, no. 2. P. 189.

Проект гиротрона для плазмохимических исследований на базе магнитоэкранированной системы

В.Е. Запевалов¹, А.С. Зуев¹, М.Д. Проявин¹, Н.Н. Скворцова²

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

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

andrey.zuev@ipfran.ru

В настоящее время большой интерес представляет разработка мощных импульсных гиротронных комплексов для инициирования плазмохимических реакций в экспериментах по синтезу новых перспективных материалов [1]. Для этой цели требуется гиротрон с параметрами излучения, позволяющими создать в синтез-камере плазмохимического реактора разряд с плотностью электронов до 10^{14} см⁻³. Требуемая частота СВЧ-излучения составляет от 70 ГГц и выше, при этом длительность импульса микроволнового излучения должна составлять от 1 до 10 мс с минимальным интервалом между импульсами 30 с. Для этой цели рассматривается возможность разработки гиротрона с частотой излучения 75 ГГц, работающего не с криомагнитом, а с использованием магнитоэкранированной системы (МЭС) с жидкостным охлаждением [2]. Рассматривается два варианта гиротронов, отличающихся номером рабочей циклотронной гармоники.

В первом варианте проекта гиротрона с работой на основном циклотронном резонансе требуется МЭС с полем до 3 Тл. Заметим, что планируется работа прибора практически в режиме одиночных импульсов, что существенно снижает энергопотребление и упрощает охлаждение магнитной системы. Расчётная мощность выходного излучения в этом варианте превышает 400 кВт.

Другим перспективным вариантом является работа гиротрона на второй гармонике гирочастоты, при этом требуемое магнитное поле снижается вдвое. Для тестирования этого гиротрона может быть использована уже разработанная МЭС [2]. В этом варианте мощность выходного излучения значительно ограничена процессами конкуренции со стороны мод, синхронных с первой циклотронной гармоникой. На современном этапе расчётный уровень мощности после оптимизации электродинамической системы составил около 200 кВт. Поиски вариантов более перспективных в плане селекции мод продолжаются.

Работа выполнена в рамках проекта ИПФ РАН FFUF-2022-0007.

1. Соколов А.С. и др. Плазмохимический комплекс синтеза микро- и наночастиц с контролируемыми составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении // Изв. вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65, № 11. С. 927–942.

2. Проявин М.Д. и др. Магнитобронированная система на основе теплых соленоидов для гироприборов К-диапазона // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 1. С. 106–109.

Экспериментальные исследования нестационарных режимов генерации в ЛБВ W-диапазона

Д.А. Сидоров¹, А.А. Иванов^{2,3}, Р.М. Розенталь^{2,3}

¹ АО НПП «Салют», Нижний Новгород

² Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
a.ivanov@ipfran.ru

Впервые выполнены экспериментальные исследования лампы бегущей волны (ЛБВ) W-диапазона с замедляющей системой типа «петляющий волновод», в которой организована цепь обратной связи. ЛБВ возбуждалась прямолинейным электронным пучком с энергией 12 кэВ и током 100 мА. В стационарном режиме получен коэффициент усиления до 29 дБ при максимальной выходной мощности 12 Вт в импульсном режиме с длиной импульса 100 мкс и скважностью 10. Ширина полосы усиления составляла около 10 ГГц.

Для формирования цепи обратной связи часть выходного сигнала через регулируемый аттенюатор и одномодовый диэлектрический волновод подавалась на вход ЛБВ. При последовательном увеличении глубины обратной связи наблюдалось самовозбуждение ЛБВ и переход к режиму периодической автомодуляции с глубиной около 10%. Дальнейшее увеличение обратной связи приводило к увеличению глубины модуляции, величина которой достигала 70%.

Методика измерения величины резонансного магнитного поля в импульсных релятивистских гиротронах миллиметрового диапазона

Д.С. Крупин, Р.М. Розенталь

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
d.krupin@ipfran.ru

В настоящее время ведутся исследования возможностей генерации мощного излучения миллиметрового диапазона в импульсных релятивистских гиротронах. В таких приборах в качестве источника магнитного поля используются соленоиды, запитываемые импульсами электрического тока с характерной длительностью в десятки миллисекунд, возникающие при разрядке емкостных накопителей энергии. Для оценки полей с точностью в несколько процентов используется величина зарядного напряжения, однако такой подход обладает недостаточной точностью, особенно в случае исследования таких процессов как генерация на гармониках в режиме умножения частоты.

Увеличение точности измерений может быть достигнуто путем включения в цепь соленоида балластной катушки, внутрь которой помещается индуктивный датчик, подключенный к RC-интегратору, сигнал с которого регистрируется цифровым осциллографом. Однако при этом остается проблема наличия в измерительном сигнале импульсных наводок, например, связанных со срабатыванием высоковольтных цепей коммутации для инжекции релятивистского электронного потока.

В представленной работе предлагается методика обработки результатов измерений, в соответствии с которой предполагается, что в случае отсутствия наводок измеренный сигнал представляет собой затухающий синусоидальный сигнал. Для определения параметров этого сигнала (амплитуды, периода, времени спада) применяется аппроксимация с использованием данных, полученных с осциллографа. Результирующее значение магнитного поля рассчитывается на основе значения аппроксимирующей функции в момент встрела электронного потока.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что такой подход позволяет обеспечить существенно повысить точность измерений магнитного поля.

**Экспериментальные исследования
многочастотных режимов генерации
в сильноточном релятивистском гиротроне
с удлиненным пространством взаимодействия**

А.Н. Леонтьев, Э.Б. Абубакиров, Н.С. Гинзбург, А.Н. Денисенко, И.В. Зотова,
Р.М. Розенталь, А.С. Сергеев

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
leontiev@ipfran.ru

Представлены результаты исследований многочастотных режимов работы сильноточного релятивистского гиротрона с расширенным пространством взаимодействия. Приведены результаты моделирования на основе системы усредненных нестационарных самосогласованных уравнений для сильноточного гиротрона Ка-диапазона с энергией электронного пучка 500 кэВ и полным током 2 кА. По сравнению с вариантом, предназначенным для одночастотной генерации, длина однородного участка резонатора увеличена в пять раз с 20 мм (~2 длины волны) до 100 мм (~10 длин волн). Для рассматриваемой системы прогнозируется возможность получения излучения мощностью более 100 МВт и шириной полосы более 4 ГГц.

Представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных на ускорителе «СИНУС-6». В экспериментах винтовой электронный пучок с током 2 кА и питч-фактором около 1,0 формировался путем накачки прямолинейного потока электронов в магнитном поле короткого кикера. Наблюдались нестационарные режимы генерации в широком диапазоне магнитных полей. Максимальная суммарная энергия импульса достигала 1,4 Дж, что соответствует средней мощности 70 МВт. Хорошее согласие теоретических и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что реальная ширина полосы спектра превышает 2 ГГц.

Доклад подготовлен по итогам исследований, проведенных в рамках государственного задания FFUF-2024-0027 – «Теоретическое и экспериментальное исследование перспективных электровакуумных генераторов и усилителей, работающих от сантиметрового до терагерцового диапазона».

Проект 35 МВт 94 ГГц релятивистского гиротрона для ускорительных приложений

А.Н. Леонтьев, О.П. Планкин, Р.М. Розенталь, Е.С. Семенов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
leontiev@ipfran.ru

На основе максимальных энергетических возможностей существующей трехэлектродной термоэмиссионной магнетронно-инжекторной пушки ускорителя электронов «Сатурн-Ф» выполнен расчет электронно-оптической системы гиротрона. Анализ проведен программным пакетом ANGEL (ANalyzer of a Gyrating ELectrons), основанным на традиционных алгоритмах анализа электронно-оптических систем методами токовых трубок и дискретных источников. В результате спрогнозирована возможность формирования винтового электронного пучка с энергией 500 кВ, током 200 А и питч-фактором (отношением поперечной и продольной скоростей в пучке) 1,3 при среднем радиусе ведущих центров 6,5 мм, что соответствует максимальному коэффициенту связи с модой $TE_{12,2}$ на частоте 94 ГГц.

Расчет электронно-волнового взаимодействия проводился на основе самосогласованной системы уравнений стационарного одномодового гиротрона. Максимальная выходная мощность для полученных параметров электронного пучка составила более 35 МВт, что соответствует КПД более 35%. На основе анализа стартовых токов проведен расчет стартового сценария гиротрона с учетом неадиабатических эффектов в электронно-оптической системе. Продемонстрирована возможность одномодовой генерации на рабочей моде $TE_{12,2}$ с параметрами, соответствующими максимальному КПД.

Доклад подготовлен по итогам исследований, проведенных в рамках государственного задания FFUF-2022-0007.

Пространственно-временная теория giro-ЛОВ с одноволновой и двухволновой зигзагообразными электродинамическими системами

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

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
novak@ipfran.ru

В настоящее время рядом научных групп ведется интенсивная работа, направленная на разработку альтернативных схем субтерагерцовых гирогенераторов, обладающих относительно широкими полосами непрерывной (или квазинепрерывной) перестройки частоты. В частности, недавно была предложена микроволновая система в виде квазиоптической линии передачи в качестве схемы взаимодействия для некоторых разновидностей мазера на циклотронном резонансе, включая гиротронный генератор обратной волны (гино-ЛОВ) [1]. Схема состоит из фокусирующих зеркал, которые периодически разнесены вдоль продольной оси z и обеспечивают перемещение пучка гауссовой волны по зигзагообразной траектории (рис. 1). Пучок электронов направляется статическим магнитным полем вдоль оси z таким образом, что электронный пучок периодически пересекает волновой пучок. Электронно-волновое взаимодействие происходит в областях, где волна, как в гиротроне, распространяется строго поперек электронного пучка, что приводит к взаимодействию с минимальной чувствительностью к разбросу скоростей частиц. Трехмерное PIC-моделирование демонстрирует привлекательность этого «зигзагообразного» мазера на циклотронном резонансе для реализации систем, работающих в субтерагерцовом диапазоне частот с уникальной возможностью перестройки частоты [1].

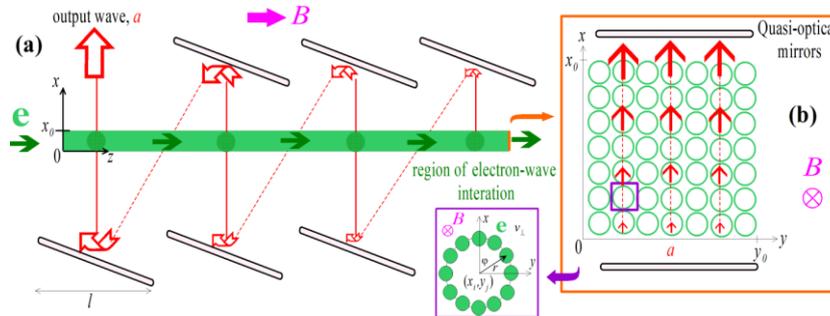


Рис. 1. 2D-модель giro-ЛОВ с зигзагообразной траекторией рабочей волны (а) и поперечное сечение электронного пучка (б)

В нашей работе [2, 3] мы предложили квазианалитическую двумерную модель зигзагообразной giro-ЛОВ для описания линейной стадии возбуждения этого автогенератора в стационарном одночастотном режиме. По сути, giro-ЛОВ с зигзагообразной системой представляет собой систему, которая принципиально отличается от «более классических» версий электронных радиочастотных генераторов. Основной целью данной статьи является не столько разработка нестационарной пространственно-временной теории зигзагообразной giro-ЛОВ, сколько описание богатых возможностей довольно простого подхода, позволяющего разработать такую теорию. Фактически, простая квазианалитическая 2D-модель описывает большое количество эффектов, характерных для данного устройства, включая (i) дискретный кусочный характер зависимости частоты генерации от магнитного поля $f(B_0)$, (ii) установление стационарных режимов генерации в процессе конкуренции между различными режимами, (iii) переключение на режимы автомодуляции с увеличением рабочего тока (нормализованная длина системы), (iv) возможность реализации в данном устройстве сверхизлучающих режимов формирования коротких мощных волновых импульсов, (v) увеличение мощности генерации при использовании внешней обратной связи в системе и (vi) явление гистерезиса с плавно изменяющейся расстройкой синхронизма во времени в режиме непрерывной генерации.

Кроме того, исследуется пространственно-временная теория трехмерной зигзагообразной схемы giroЛОВ, состоящей также из 4 секций усиления электронно-волнового взаимодействия, но в которой существуют две ортогональные волны, распространяющиеся в перпендикулярных направлениях

(вдоль осей x и y) (рис. 2). Был решен важный вопрос о конкуренции этих двух волн в системе, при которой обеспечивается стабильная одночастотная генерация одной из этих волн [4].

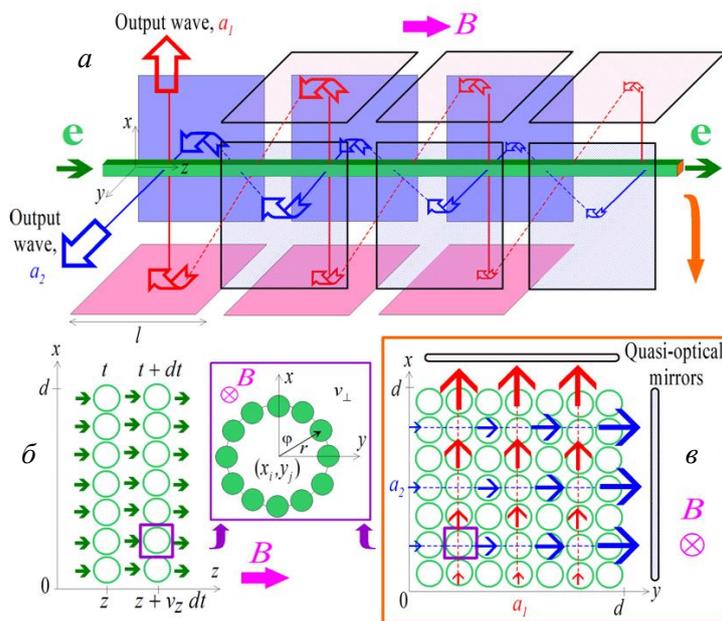


Рис. 2. 3D-модель gyro-ЛЮВ с двумя ортогональными волновыми пучками (a); электронный пучок в виде набора микроансамблей (b); поперечное сечение электронного пучка (c)

Работа выполнена в рамках государственного задания Института прикладной физики РАН № FFUF-2022-0007.

1. Samsonov S.V., Denisov G.G., Bogdashov A.A., and Gachev I.G. // Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). 2021. P. 2790–2799.
2. Novak E.M., Samsonov S.V. and Savilov A.V. // IEEE Trans. Electron Devices. 2022. Vol. 69. P. 5199.
3. Novak E.M., Samsonov S.V. and Savilov A.V. // Phys. Plasmas. 2023. Vol. 30. P. 043101.
4. Novak E.M., Samsonov S.V. and Savilov A.V. // IEEE Trans. Electron Devices. 2024. Vol. 71. P. 7849.

Компрессор микроволновых импульсов на основе квазиоптического резонатора с фазоуправляемым переключением режимов накопления и вывода (высвечивания) излучения

А.В. Палицин, Г.Г. Денисов, Д.И. Соболев, А.В. Громов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
pal@ipfran.ru

Представлены результаты теоретических исследований и численного моделирования квазиоптического компрессора микроволновых импульсов с активным элементом в виде полупроводниковой пластины, выполняющей роль фазовращателя, управляемого пикосекундными лазерными импульсами. Резонатор состоит из трех зеркал – параболического, гофрированного и плоского, на котором располагается полупроводниковая пластина. Собственное колебание резонатора может быть представлено в виде двух встречных волновых пучков, каждый из которых при отражении от гофрированного зеркала имеет три дифракционных максимума ($n = 0, -1, -2$). Связь двух встречных волновых пучков на гофрированном зеркале осуществляется через $n = 0$ (зеркальный луч) и $n = -2$ дифракционные максимумы, а направления минус первых ($n = -1$) дифракционных максимумов совпадают. В режиме накопления энергии фазы встречных пучков подобраны таким образом, что происходит полная взаимная компенсация их излучений в $n = -1$ дифракционные максимумы. При активации фазовращателя пикосекундным лазерным импульсом фаза одного из пучков меняется на π , деструктивная интерференция минус первых дифракционных максимумов сменяется на конструктивную. Найдены условия, при которых осуществляется практически полное суммирование двух встречных пучков при дифракции на гофрированном зеркале, т. е. условия высвечивания всей накопленной в резонаторе энергии в направлении $n = -1$ дифракционного максимума.

В целях упрощения конструкции и минимизации количества элементов (зеркал) резонатора связь его с входным волновым пучком может быть реализована на том же гофрированном зеркале, которое в этом случае становится двумерно-периодическим. В этом случае количество дифракционных максимумов возрастает, но ключевая идея интерференционной компенсации потерь в дифракционные максимумы двух встречных пучков сохраняется. Реализуется также и фазоуправляемое переключение режимов накопления и высвечивания излучения.

Основным преимуществом представленной схемы компрессора является использование фазовращателя, который представляет собой тонкую полупроводниковую пластину, расположенную на плоском металлическом зеркале, что обеспечивает на порядки лучший теплоотвод и значительно меньшие диэлектрические потери по сравнению со схемами компрессоров на основе резонансно-пропускающих полупроводниковых пластин. Диэлектрические потери и нагрев полупроводника являются двумя основными факторами, ограничивающими коэффициент компрессии и мощность компрессированных импульсов. В докладе представлен проект компрессора, в котором влияние этих двух факторов в значительной степени минимизировано.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-79-30071.

Планарный черенковский мазер W-диапазона с 2D-периодической замедляющей системой на базе ускорителя ЭЛМИ: расчетные параметры и первые эксперименты

Н.Ю. Песков^{1,2}, А.В. Аржанников¹, Н.С. Гинзбург², В.Ю. Заславский^{1,2}, П.В. Калинин¹,
Е.С. Сандалов¹, А.С. Сергеев², С.Л. Сеницкий¹, В.Д. Степанов¹

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

² Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
peskov@ipfran.ru

Создание мощных узкополосных релятивистских генераторов успешно ведется на протяжении ряда лет в сотрудничестве ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Нижний Новгород) на основе ускорительного комплекса ЭЛМИ 1 МэВ / 5–7 кА / 3 мкс, формирующего релятивистский электронный пучок (РЭП) ленточной конфигурации с поперечным сечением 0,4 см × 17 см. Особенностью этих генераторов является планарная геометрия пространства взаимодействия, которая позволяет наращивать полную мощность излучения путем увеличения одного из его поперечных размеров при сохранении умеренных плотностей тока и напряженностей электромагнитных полей. При этом пространственно-временная когерентность генерируемого излучения достигается путем использования механизма двумерной распределенной обратной связи (РОС), которая реализуется в двумерных (2D-периодических) брэгговских структурах из-за возникновения дополнительных поперечных волновых потоков, обеспечивающих синхронизацию излучения пространственно-развитых ленточных РЭП [1]. Работоспособность нового механизма обратной связи подтверждена в экспериментах на ускорительном комплексе ЭЛМИ, в которых реализован узкополосный планарный МСЭ-генератор W-диапазона частот с поперечным размером, составляющим до 50 длин волн излучения λ , и уровнем выходной мощности ~ 100 МВт [2].

На данном этапе исследований в рамках сотрудничества ИЯФ – ИПФ на базе ускорителя ЭЛМИ разрабатывается проект мощного планарного черенковского лазера с двумерной РОС W-диапазона. Черенковский механизм электронно-волнового взаимодействия, основанный на использовании прямолинейных электронных пучков, значительно упрощает электронно-оптическую систему их формирования и транспортировки, а также существенно снижает требования к разбросу параметров РЭП. Это позволяет увеличить электронный КПД генератора по сравнению с МСЭ и, таким образом, обеспечить дальнейшее повышение выходной мощности. Моделирование показывает, что в разрабатываемом черенковском лазере при полном токе пучка 3–5 кА и КПД 7–10% может быть получена рекордная для данного диапазона выходная мощность излучения ~200–300 МВт. При этом использование планарных замедляющих структур с 2D-периодической гофрировкой, реализующих механизм двумерной РОС, позволяет сохранить высокие когерентные свойства излучения и устойчивость одноименного режима генерации при поперечных размерах (ширине) системы $L/\lambda \sim 50$, реализуемых на установке ЭЛМИ.

В настоящее время на базе комплекса ЭЛМИ проведена серия начальных экспериментов, по исследованию процесса генерации в планарном черенковском лазере с двумерной РОС. Зарегистрированы мощные импульсы излучения длительностью ~ 100 нс. Ширина спектра излучения, измеренная с использованием гетеродинной методики, близка к теоретическому пределу для реализованной длительности импульсов. Проводится оптимизация условий эксперимента с целью повышения эффективности электронно-волнового взаимодействия и выход на расчетный уровень мощности.

Работа проводится при частичной поддержке РФФИ (грант № 23-19-00370).

1. Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Заславский В.Ю., Аржанников А.В., Сеницкий С.Л. Двумерная распределенная обратная связь как метод генерации мощного когерентного излучения от пространственно-развитых релятивистских электронных пучков // Известия вузов: Прикладная нелинейная динамика. 2020. Т. 28, № 6. С. 575–632.

2. Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Калинин П.В., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Сеницкий С.Л., Степанов В.Д., Тумм М. Генерация мощного узкополосного излучения в 75 ГГц лазере на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, № 18. С. 8–16.

Полное электромагнитное моделирование свойств эшелеттного резонатора гиротрона

А.Б. Адилова^{1,2}, С.Н. Власов³, В.Е. Запевалов³, А.Г. Рожнев^{1,2}

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал, Саратов

³ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
rozhnevag@gmail.com

В современных гиротронах в субтерагерцевом и терагерцевом диапазонах частот обычно используется режим работы на высших гармониках циклотронной частоты, что позволяет избежать экстремально высоких значений магнитного поля. При этом, однако, возникает ряд проблем, в частности, обостряются вопросы конкуренции и селекции мод, так как условия самовозбуждения моды на основной циклотронной гармонике более благоприятные. Преодоление таких ограничений возможно при использовании резонаторов с выходным излучением в виде многих мод выходного волновода. Примером такой структуры является эшелеттный резонатор (ЭР), который обладает высокими селективными свойствами. При этом дифракционная добротность рабочей моды в них может быть существенно понижена. Обычно для расчета ЭР используется квазиоптический подход, однако в таком случае сложно оценить точность получаемых результатов. Поэтому нами для моделирования использовался подход, основанный на полном электродинамическом моделировании с применением метода конечных элементов.

В настоящей работе развивается метод расчёта аксиально-симметричных резонаторов в двумерной (2D) постановке с использованием скалярных лагранжевых элементов и метода штрафа (penalty method) для исключения нефизических мод, возникающих при численных расчетах. Для моделирования излучения через участки однородных волноводов, подсоединенных к обоим концам ЭР, применяется метод идеально согласующих слоев (PML). Развитый подход позволяет рассчитывать комплексные моды в аксиально-симметричных резонаторах гиротронов с учетом дифракционных и омических потерь. Была разработана программа моделирования электромагнитных полей в таких резонаторах, которая позволяет находить частоты, добротности колебаний, распределения полей комплексных мод с произвольной зависимостью радиуса, образующего резонатор неоднородного волновода, от осевой координаты (в том числе в ЭР).

Исследованы свойства аксиально-симметричных квазисобственных мод ЭР (азимутальный индекс $m = 0$) и гибридных мод (азимутальный индекс $m = 2$). Проведено моделирование $TE_{0,q}$ типов колебаний (q – продольный индекс моды) в аксиально-симметричном эшелеттном резонаторе и исследованы зависимости амплитуд радиальных мод круглого волновода сравнения, формирующих поля продольных мод ЭР от аксиальной координаты. Из-за значительного изменения радиуса резонатора вдоль его оси колебаний с четко выраженным значением одного радиального индекса в таком резонаторе не существует. Вместо этого, как следует из расчётов, поля продольных мод представляют собой суперпозицию большого числа мод с разными радиальными индексами, каждая из которых локализована в области, примыкающей к небольшому отрезку оси резонатора. Проведены расчеты добротностей мод в эшелеттном резонаторе при изменении расстояния от оси системы до образующей стенок резонатора. Показано, что существует оптимальное значение расстояния от оси до стенок, при котором добротность первой продольной моды максимальна.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-72-00128.

Электродинамические характеристики выводов энергии W-диапазона

А.В. Галдецкий, А.Н. Савин, Е.А. Богомолова, Г.В. Бакунин, Н.М. Коломийцева

АО НПП «Исток» им. Шокина
savinan01@yandex.ru

Приведены результаты теоретического исследования электродинамических характеристик вакуумно плотных выводов энергии СВЧ-энергии для ЛБВ мм-диапазона баночного типа и в виде брестерского окна с керамическими перегородками из Al_2O_3 , BeO , BN и поликристаллического алмаза. Проведено сравнение рабочей полосы частот и потерь рассматриваемых конструкций вакуумно-плотных выводов СВЧ-энергии при использовании различных диэлектриков.

Первые результаты по генерации миллиметрового излучения в тонком плазменном шнуре на установке ГОЛ-ПЭТ

Д.А. Самцов, А.В. Аржанников, С.Л. Синецкий, П.В. Калинин, Е.С. Сандалов, К.Н. Куклин

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
D.A.Samtsov@inp.nsk.su

Один из подходов к генерации мультимегаваттных направленных потоков электромагнитного излучения в области частот 0,1–1 ТГц заключается в использовании процессов трансформации плазменных волн в электромагнитные при высоком уровне колебаний, накачиваемых релятивистским электронным пучком (РЭП) в плазме [1]. Исследования, проводимые на установке ГОЛ-ПЭТ, продемонстрировали генерацию в такой пучково-плазменной системе потоков излучения в области частот 0,2–0,3 ТГц с мощностью ~10 МВт и энергосодержанием около 10 Дж при микросекундной длительности импульса [2]. Достигнутые результаты позволили сформулировать проект установки ЛИУ-ПЭТ по генерации в пучково-плазменной системе потоков излучения с более высокой частотой на основе использования пучка, формируемого в линейном индукционном ускорителе [3].

В представляемом докладе описано развитие экспериментальных исследований на установке ГОЛ-ПЭТ применительно к моделированию конфигурации экспериментов на строящейся установке ЛИУ-ПЭТ. В данной серии экспериментов осуществлено сжатие пучка электронов, поступающих от ускорителя У-2 до диаметра 2 см, что обеспечило плотность тока, инжектируемого в плазму пучка на уровне 2–3 кА/см². Инженерно-физические решения по созданию плазменного шнура, заложенные в проекте генератора ЛИУ-ПЭТ, отработаны на установке ГОЛ-ПЭТ с новой системой высоковольтного разряда с временем нарастания тока 3 мкс [4]. Плазменный шнур имеет длину 40 см при диаметре 4 см. В докладе приведены результаты регистрации динамики прохождения пучка по плазменному шнуру, эволюции плотности плазмы в плазменном шнуре и спектрального состава генерируемого терагерцового излучения. Измерения проведены при варьировании условий формирования плазменного шнура и момента инжекции РЭП.

1. Аржанников А.В., Бурдаков А.В., Калинин П.В. и др. Генерация субтерагерцового излучения сильной ленгмюровской турбулентностью при двухпоточковой неустойчивости сильноточного 1-МЭВ РЭП // Вестник НГУ. Серия Физика. 2010. Т. 5, № 4. С. 44–49. DOI: 10.54362/1818-7919-2010-5-4-44-49.

2. Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L., Popov S.S., et al. Energy Content and Spectral Composition of a Submillimeter Radiation Flux Generated by a High-Current Electron Beam in a Plasma Column With Density Gradients // IEEE Transactions on Plasma Science. 2022. Vol. 50, № 8. P. 2348–2363. DOI: 10.1109/TPS.2022.3183629.

3. Аржанников А.В., Синецкий С.Л., Старостенко Д.А. и др. Пучково-плазменный генератор ТГц-излучения на основе индукционного ускорителя (проект ЛИУ-ПЭТ) // Сибирский физический журнал. 2023; 18(1):28-42. <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2023-18-1-28-42>.

4. Samtsov D.A., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L., et al. GOL-PET facility upgrade to realize generation plasma system of megawatt power radiation fluxes of mm wavelength // Book of abstract. VIII international conference Frontiers of Nonlinear Physics (FNP). 2024. P. 151.

Эксперименты на установке ЭЛМИ по генерации излучения W-диапазона килоамперным ленточным РЭП в условиях планарной геометрии с 2D-синусоидальной решёткой

Е.С. Сандалов¹, А.В. Аржанников¹, С.Л. Сеницкий¹, Н.С. Гинзбург², В.Ю. Заславский^{1,2},
Н.Ю. Песков^{1,2}, П.В. Калинин¹, А.С. Сергеев², В.Д. Степанов¹, Д.А. Самцов¹

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

² Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
E.S.Sandalov@inp.nsk.su

Исследования по генерации излучения в планарных лазерах W-диапазона проводятся совместно сотрудниками ИЯФ СО РАН и ИПФ РАН. Характерная особенность этих исследований состоит в использовании планарных брэгговских структур для реализации двумерной распределенной обратной связи (РОС), которая обеспечивает высокую пространственную и временную когерентность излучения даже при параметре сверхразмерности $b/\lambda \sim 50$ (b – наибольший поперечный размер щелевого канала, λ – длина волны излучения). В таких условиях на установке «ЭЛМИ» по схеме лазера на свободных электронах (МСЭ) уже осуществлена генерация потоков когерентного излучения на длине волны 4 мм в электродинамической системе с шириной 18 см с мощностью до 40 МВт при длительности импульса ~ 100 нс [1]. В настоящее время двумерная РОС используется на установке «ЭЛМИ» в серии экспериментов по генерации излучения в W-диапазоне в условиях, когда ленточный электронный пучок движется вблизи поверхности двумерной брэгговской решётки в отсутствие ондуляторного магнитного поля. Результаты моделирования (см. [2]) свидетельствуют о том, что при такой конфигурации эксперимента значительный электронный КПД может достигаться при приемлемых требованиях к параметрам ленточного пучка.

В проведенной серии экспериментов использовался электронный пучок 0,8 МэВ / 5 кА / 5 мкс с поперечным сечением $0,4 \times 17$ см, который транспортировался в вакуумном щелевом канале сечением $0,95 \times 17,6$ см и длиной около 1,5 м в условиях однородного магнитного поля с варьируемой индукцией до 1,5 Тл. Небольшая часть одной из боковых стенок канала, расположенная на расстоянии 3 см от места входа пучка, имеет на поверхности двумерную синусоидальную гофрировку на ширине канала 17,6 см и протяжённость 20 см. Пространственный период гофрировки в обоих направлениях – 3,76 мм, а ее глубина – 1,42 мм. Распространяющееся в направлении движения пучка электромагнитное излучение отражалось от поверхности коллектора пучка, наклонённой под углом 45° по отношению к оси канала, и выводилось в атмосферу через окно, сделанное из тефлона.

При проведении экспериментов варьировались следующие параметры: расстояние между границей пучка и поверхностью решетки, величина ведущего магнитного поля, а также плотность тока ленточного пучка. По результатам проведенных опытов в определенной области параметров эксперимента наблюдалась узкополосная генерация потока мм-излучения в виде нескольких пиков длительностью до ~ 100 нс с мегаваттным уровнем мощности. Ширина спектра излучения, измеренная с помощью гетеродинной диагностики, оказалась близка к естественной ширине линии, определяемой длительностью импульса. Эксперименты проводятся в направлении увеличения электронного к. п. д. и достижения высокого уровня выходной мощности излучения при микросекундной длительности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-19-00370).

1. Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Kalinin P.V. et al. Using two dimensional distributed feedback for synchronization of radiation from two parallel-sheet beams in free electron maser // Phys. Rev Lett. 2016. Vol. 117. P. 114801; doi:10.1103/PhysRevLett.117114801

2. Песков Н.Ю., Вихарев А.А., Гинзбург Н.С. и др. Мощный планарный черенковский мазер W-диапазона с двумерной распределённой обратной связью: конструктивные элементы и результаты моделирования // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 5/6. С. 499–508.

Теоретическое и экспериментальное исследование шероховатости резонаторов гиротрона и ее влияние на электродинамические характеристики

Д.А. Котова^{1,2}, А.С. Седов^{1,3}

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

³ ЗАО НПП «ГИКОМ», Нижний Новгород
sedov@ipfran.ru

В работе приведены результаты анализа некоторых аналитических моделей, которые учитывают влияние шероховатости резонатора на его электродинамические характеристики, в том числе на омическую добротность. Такое уточнение может быть важным при проектировании гиротронов мегаваттного уровня мощности, где абсолютные значения омических потерь в резонаторе могут достигать десятков киловатт. Также уточнение важно при проектировании относительно маломощных гиротронов терагерцового диапазона, где ошибочная оценка омической добротности может существенно влиять на режим работы прибора и возможность его генерации. Полученные теоретические результаты были сравнены с экспериментальными данными, полученными при сканировании поверхности резонатора с помощью интерферометра белого света Zygo NewView™ 7300.

Исследование стационарных и нестационарных процессов в усилителе М-типа W-диапазона

Д.А. Сидоров^{1,2}, А.В. Суховерхий¹, Р.М. Розенталь²

¹ АО НПП «Салют», Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
daniil_sidorov@mail.ru

Представлены результаты разработки усилителя со скрещенными полями W-диапазона. Выбрана оптимальная геометрия двухрезонаторной замедляющей системы типа «гребёнка» и рассчитаны ее дисперсионные характеристики. Выполнено трехмерное моделирование методом крупных частиц, в рамках которого продемонстрирован коэффициент усиления до 15 дБ и максимальный уровень выходной мощности более 1 кВт.

Рассмотрены режимы двухчастотного самовозбуждения на усилителе М-типа с трехступенчатой замедляющей системы типа «гребёнка», в котором генерируемые частоты соответствуют краям полос пропускания системы. Показано, что при подаче внешнего сигнала на частоте, равной среднему значению между генерируемыми частотами, могут быть получены режимы генерации последовательностей ультракоротких импульсов с длительностью порядка 20 пс, периодом следования около 100 пс и пиковой мгновенной мощностью более 1 кВт.

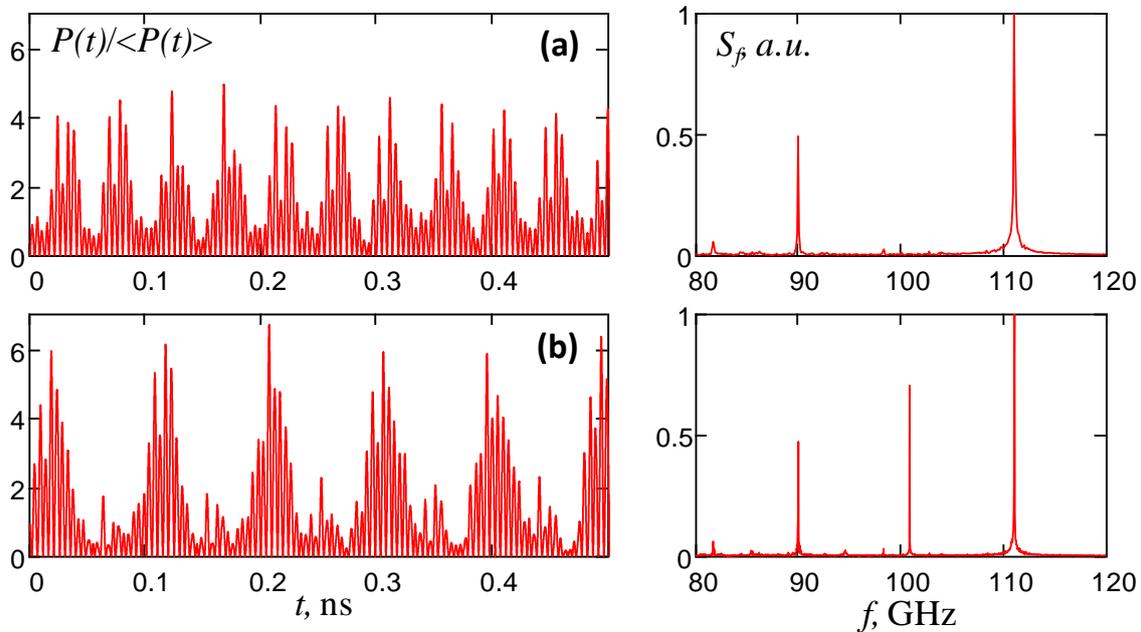


Рис. 1. Зависимость относительной интенсивности и спектр выходного излучения в режиме самовозбуждения (a) и в режиме подачи внешнего сигнала (b)

Первые эксперименты с килоамперным электронным пучком на установке ЛИУ-ПЭТ

Д.А. Старостенко*, А.В. Аржанников, П.А. Бак, А.М. Батраков, Е.С. Котов, А.А. Крылов, Я.В. Куленко, П.В. Логачев, Я.М. Мачерет, Д.А. Никифоров, А.В. Петренко, О.А. Павлов, А.В. Павленко, Д.А. Самцов, С.Л. Сеницкий, Н.С. Щегольков

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
*d.a.starostenko@inp.nsk.su

Важным направлением в исследованиях модификации веществ и материалов, имеющих сложную супрамолекулярную структуру, является воздействие мощным потоком терагерцового излучения в области частот 0,2–1,5 ТГц. Эксперименты по такому воздействию на частотах до 0,5 ТГц уже проводятся на установке ГОЛ-ПЭТ [1]. Генерация излучения осуществляется через накачку релятивистским электронным пучком (РЭП) плазменных колебаний и трансформацию их в поток излучения на частоте, соответствующей этим колебаниям. Данные эксперименты проводились на пучке с плотностью тока до 2 кА/см², что ограничивает отмеченную верхнюю границу генерируемых частот. Для продвижения в более высокие частоты при генерации излучения в данной пучково-плазменной системе требуется подъём плотности тока выше, чем 10 кА/см², что достигается сжатием сечения килоамперного пучка, имеющего предельно малую угловую расходимость скорости электронов. Столь уникальные параметры генерируемого электронного пучка достигаются при использовании линейного индукционного ускорителя (ЛИУ), созданного в ИЯФ СО РАН [2].

Этот ЛИУ представляет собой импульсный высоковольтный трансформатор индукторного типа, состоящий из двух симметрично сконфигурированных блоков, вырабатывающих мегавольтное напряжение путем суммирования напряжения на последовательности из индукторов. Первый блок обеспечивает генерацию напряжения на ускорительном диоде, а второй обеспечивает доускорение электронов в ускорительной трубке. Таким образом, на выходе ускорителя формируется электронный пучок в отсутствие внешнего магнитного поля диаметром около 100 мм со следующими параметрами: энергия частиц – до 1 МэВ, ток пучка – до 1 кА, длительность импульса – до 0,1 мкс. Малая угловая расходимость электронов в пучке позволила продемонстрировать необходимое сжатие сечения пучка [3], что позволило представить проект пучково-плазменного генератора ЛИУ-ПЭТ.

В докладе изложено описание структуры и параметров установки ЛИУ-ПЭТ и приведены результаты первой серии экспериментов по формированию килоамперного РЭП на выходе линейного индукционного ускорителя, который предназначен для инъекции пучка в плазменный шнур на этой установке. Приведены результаты измерений параметров пучка на входе в плазменную секцию и дано обсуждение возможности использования пучка для накачки плазменных колебаний.

1. Аржанников А.В., Сеницкий С.Л., Самцов Д.А. и др. Изменение спектральных характеристик некоторых полимерных материалов в интервале частот от 0,2 до 2 ТГц в результате воздействия мегаваттным потоком субмм-излучения микросекундной длительности // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2024 (принята к публикации).

2. Starostenko D., et al. Beam Dynamics of Linear Induction Accelerator LIA-2 // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2022. Vol. 19, № 4. P. 393–396.

3. Никифоров Д.А., Блинов М.Ф., Федоров В.В. и др. Транспортировка сильноточного электронного пучка в линейном индукционном ускорителе ЛИУ-5 // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2020. Т. 17, № 2. С. 158–167.

4. Аржанников А.В., Сеницкий С.Л., Старостенко Д.А. и др. Пучково-плазменный генератор ТГц-излучения на основе индукционного ускорителя (проект ЛИУ-ПЭТ) // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 1. С. 28–42.

О возможности генерации цуга субнаносекундных микроволновых пиков Ка-диапазона в режиме модуляции тока пучка в релятивистской ЛОВ

Л.Н. Лобанов¹, В.В. Ростов², С.А. Шунайлов¹, М.И. Яландин^{1,3}

¹ Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

² Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

³ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
yalandin@iep.uran.ru

Представлены результаты численного моделирования методом крупных частиц (код КАРАТ) задачи по формированию с помощью релятивистской ЛОВ цуга субгигаваттных импульсов сверхизлучения (СИ) Ка-диапазона с конверсией мощности пучка $0,5 \div 1$. В отличие от известных подходов к формированию последовательностей мощных субнаносекундных СВЧ-пиков [1–5], мы используем «инжекционный» метод задания тока. Анализируются два варианта.

В первом случае на катод вакуумного диода подаются дуплеты ускоряющих трапецеидальных импульсов. В эксперименте это можно реализовать путем синхронизации двух драйверов РАДАН-303, подключаемых по Т-образной схеме к передающей линии, питающей взрывоэмиссионный катод. В общем случае, при длительности импульсов, достаточной для замыкания кольца «обратной связи» ЛОВ, условия возбуждения последующего пика СИ должны повторяться. Однако это не так при относительно малой задержке между ними, поскольку после вывода из пространства взаимодействия лидирующего электромагнитного пакета СИ здесь остается большое количество медленных электронов, а часть из них возвращается в вакуумный диод. То есть меняются условия эмиссии последующего пучка в диоде, а также кинематическое обострение и шумы на фронте тока, с которым связан затравочный сигнал, возбуждающий СИ ЛОВ. В численной модели роль отмеченных факторов можно снизить, увеличив интервал между импульсами на катоде, и тогда второй пик СИ близок к первому по амплитуде. Однако в эксперименте это осуществить сложно.

Альтернативный способ 100% модуляции тока – это периодический сброс пучка на стенку в коаксиальной щели, через которую трубчатый пучок проходит из диода в замедляющую систему (ЗС). В данной модели ЛОВ взамен резонансного рефлектора перед ЗС используется цилиндрическая вставка, которая, как в эксперименте [6], может подвешиваться на фольговых ламелях. Импульс СИ в процессе отражения порождает в щели ТЕМ-волну с сильными радиальными полями, отклоняющими электроны. В отличие от модуляции напряжения на катоде, принципиальный момент формирования цуга импульсов СИ при такой автомодуляции пучка состоит в том, что очередной импульс тока на фронте имеет электроны максимальной энергии. Поэтому фронт пучка «менее чувствителен» к остатку пучка от предыдущего цикла генерации, и амплитуду последующих пиков удастся выдержать с небольшими отклонениями, что и продемонстрировано в расчетах.

Судя по результатам эксперимента [6], последний вариант с автомодуляцией пучка имеет шанс на экспериментальную реализацию даже в комбинации с задачей высокоградиентного ускорения параксиального пучка от системы соосных катодов.

Работа финансировалась РФФ (грант № 24-19-00407, <https://rscf.ru/project/24-19-00407/>).

1. Zotova I. V., et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 143901 (2014).
2. Rostuntsova A.A., et al., Phys. Rev. E **106**, 014214 (2022)
3. Ginzburg N.S., et al., Phys. Rev. Applied **13**, 044033 (2020)
4. Totmeninov E.M. and Rostov V.V., Tech. Phys. Lett., **47**(1), 46 (2021).
5. Totmeninov E.M., et al., JETP Lett. **116**, 762 (2022).
6. Ginzburg N.S., et al., Phys. Rev. Accel. Beams **26**, 060401 (2023).

Квазиоптические гиротроны терагерцового диапазона с двухзеркальными многослойными резонаторами брэгговского типа на основе алмазных дисков

Г.Г. Денисов, Д.И. Соболев, В.Ю. Заславский, А.П. Фокин, В.В. Паршин, Е.А. Серов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
sobolev@ipfran.ru

Создание мощных непрерывных источников когерентного электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн является актуальной задачей вакуумной электроники. Одними из наиболее эффективных приборов являются гиротроны, тем не менее для увеличения мощности и частоты требуется решение ряда проблем, в первую очередь селективного возбуждения рабочего типа колебаний и обеспечения малого уровня омических потерь.

В работе предлагается схема гиротрона с электродинамической системой в виде квазиоптического двухзеркального резонатора с многослойными брэгговскими зеркалами. Слои диэлектрика представляют собой диски из поликристаллического синтетического алмаза. Одно из зеркал обеспечивает практически полное отражение, а вывод излучения осуществляется через второе частично прозрачное зеркало сразу в виде гауссова пучка. Сочетание высокого показателя преломления и крайне низких диэлектрических потерь в алмазе позволяет в субмиллиметровом диапазоне достигнуть добротности 10^6 и более, недостижимой для резонаторов с металлическими зеркалами. Таким образом, предлагаемая схема генератора обладает рядом достоинств, присущих двухзеркальным гиротронам [1, 2] в сочетании с низким уровнем омических потерь, а также более удобной схемой вывода излучения.

Проведено исследование электродинамических характеристик двухзеркального многослойного резонатора брэгговского типа, показывающее эффективную селекцию мод. В качестве электронно-оптической системы (ЭОС) генератора предложено использование магнетронно-инжекторной пушки, разработанной ранее [3]. Указанная ЭОС позволяет формировать винтовые электронные пучки трубчатой конфигурации с током до 1 А, энергией частиц 20 кэВ и питч-фактором 1.2. В теоретическом анализе и трёхмерном *particle-in-cell* моделировании продемонстрирована возможность узкополосной одномодовой генерации на первой циклотронной гармонике мощностью несколько киловатт на частоте 395 ГГц. Предложенный тип электродинамической системы также перспективен для генерации на высоких циклотронных гармониках.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 19-79-30071.

1. *Hu W., Shapiro M.A., Kriescher K.E. and Temkin R.J.* 140-GHz gyrotron experiments based on a confocal cavity // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1998. Vol. 26 (3). P. 366–374.
2. *Nusinovich G.S.* To the theory of gyrotrons with confocal resonators // *Physics of Plasmas*. 2019. Vol. 26. P. 053107.
3. *Bandurkin I., Fedotov A., Glyavin M., Idehara T., Malkin A., Manuilov V., Sergeev A., Tsvetkov A., Zaslavsky V., Zotova I.* Development of Third-Harmonic 1.2-THz Gyrotron With Intentionally Increased Velocity Spread of Electrons // *IEEE Trans. Electron Dev.* 2020. Vol. 67 (10). P. 4432–4436.

Проектирование излучателей гиротрона с помощью интегральных уравнений для поверхностного тока

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

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
gashturik@ipfran.ru

Представлена процедура синтеза поверхности гиротронного излучателя гиротрона, включающая в себя различные вариации интегральных уравнений для поверхностного тока. Ключевая функция итерационной процедуры, определяющая поправку для профиля, выражается через произведения компонент электромагнитного поля на поверхности, которые однозначно связаны с электрическим током на поверхности устройства. Показана эффективность и универсальность процедуры синтеза с интегральным уравнением электрического поля, с помощью которой спроектирован уникальный излучатель 28-ГГц-гиротрона меняющий угловой спектр рабочей моды. Для широкого класса практических задач может быть использована комбинация процедуры синтеза и интегрального уравнения итерационной физической оптики. Уравнения электрического поля и итерационной физической оптики решаются с помощью метода моментов и многоуровневого алгоритма мультипольного разложения, что позволяет получать решение задачи распространения излучения в сверхразмерных системах (размеры системы порядка сотен длин волн) за несколько минут на персональном компьютере. Для излучателей, несильно меняющих угловой спектр излучения, может быть использован вариант итерационной физической оптики с заменой реального профиля поверхности на фазовую коррекцию, вносимую профилем. Такой подход позволяет избежать переопределения геометрии на каждой итерации синтеза, что сильно уменьшает затраты времени для метода моментов. Но основное преимущество данного подхода в том, что векторное уравнение итерационной физической оптики может быть приведено к системе скалярных интегральных уравнений для продольной и поперечной компоненты электрического тока, а в полярной системе для регулярного волновода круглого сечения интегралы в уравнениях представляют собой свертки функций тока и ядер уравнений. Взятие подобных интегралов, используемое в решении уравнения итерационной физической оптики, может быть осуществлено с помощью быстрого преобразования Фурье, что на несколько порядков быстрее решения методом моментов.

Технологический гиротронный комплекс 95 ГГц: результаты первых экспериментов

М.Ю. Глявин¹, М.В. Каменский¹, М.В. Морозкин¹, А.А. Орловский^{1,2}, М.Д. Проявин¹,
Е.А. Солуянова^{1,3}, Е.М. Тай^{1,3}, Г.Г. Денисов¹

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

² Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород

³ ЗАО НПП «Гиком»

mkamenskiy@ipfran.ru

Технологические гиротронные комплексы, или комплексы, работающие на средних частотах и мощностях, применяются во многих областях науки: выращивание CVD алмазных дисков, спекание керамики, получение нанопорошков, ЭЦР-источники ионов, бор-нейтронозахватная терапия и т. д. Большинство этих приложений используют гиротроны, работающие на второй гармонике гирочастоты, что позволяет использовать обычные «тёплые» соленоиды с относительно низкими значениями магнитных полей. Однако в процессе длительного (недели, месяцы) рабочего цикла в работе прибора могут наблюдаться нестабильности и срывы генерации со второго на основной циклотронный резонанс. Это может приводить к остановке работы СВЧ-комплекса и всех связанных с ним длительных и дорогостоящих технологических процессов. Кроме того, как правило, КПД генерации гиротронов на второй гармонике в лучшем случае достигает 30%, что при необходимости большей мощности СВЧ-излучения вынуждает работать на больших значениях тока и напряжения. Это негативно сказывается как на стоимости источников питания, так и на ресурсе узлов гиротрона. В связи с этим целесообразным является осуществление работы гиротрона на первой гармонике, что позволило бы достичь более высокого КПД (при условии сохранения мощности потребления магнита) и большей стабильности одномодовой генерации.

В данной работе исследовался технологический гиротронный комплекс, работающий на частотах 28, 35, 45, 95 ГГц. Особенностью данного комплекса является использование магнитоэкранированной системы (МЭС), что позволяет работать на основном циклотронном резонансе на частотах до 45 ГГц, используя обычные теплые соленоиды. Однако из-за малых полей рассеяния работа с МЭС требует специальной электронно-оптической системы (ЭОС) и использования экранированной катодной катушки и трёх коллекторных катушек. Правильный подбор токов в коллекторных катушках позволяет высадить электронный пучок в нужном месте на коллекторе с требуемым распределением плотности мощности, что очень важно для безопасной работы гиротрона.

Разработанный гиротрон рассчитан для работы на всех рассматриваемых частотах с одной и той же МЭС. Для работы на частоте 95 ГГц требовалось магнитное поле в центре соленоида, равное 1,75 Тл (ток ≈ 202 А), а энергопотребление магнитной системы составляло порядка 50 кВт. Экспериментальные результаты измерения магнитного поля с хорошей точностью совпали с расчетами.

В режиме работы на частоте 28 ГГц была получена мощность до 23 кВт и КПД до 55 %. Для работы на частоте 95 ГГц была проведена замена выходного вакуумного окна на окно требуемой толщины. Для обеспечения расчетного электронно-волнового взаимодействия был оптимизирован профиль магнитного поля для ЭОС, обеспечивающий радиус пучка в резонаторе равный 2 мм. В качестве рабочей была выбрана мода на второй гармонике циклотронного резонанса $TE_{1,6}$, спектр мод вблизи которой достаточно редок, что увеличивает шансы на устойчивую одномодовую генерацию. Также перед началом работы в стенд была установлена новая система управления, позволяющая измерять поглощенную мощность во всех контурах гиротронного комплекса.

В ходе исследований была получена «карта» режимов работы гиротрона для разных токов электронного пучка (1–2,4 А) при ускоряющем напряжении 24 кВ. Для режима с током электронного пучка 2,4 А и ускоряющим напряжением 24 кВ была получена мощность 9 кВт при КПД порядка 16 %. Мощность, поглощаемая в контуре резонатора, была около 5 кВт, что связано с не оптимальной для такого режима длиной и большими омическими потерями.

Использование технологических гиротронных комплексов с МЭС позволит существенно расширить область применения данных систем путем получения относительно высокой мощности излучения на частотах вплоть до 95 ГГц при высоком КПД без использования криомагнитных систем.

Работа выполнена в рамках госзадания FFUF-2022-0007.

Разработка электронно-оптической системы фотоинжекторного ускорителя в ИПФ РАН

И.В. Бандуркин, А.А. Вихарев, И.М. Летавин, К.В. Минеев

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
i.letavin@ipfran.ru

В Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН ведутся работы по реализации проекта двухкаскадного фотоинжекторного ускорителя электронов [1, 2]. Первый каскад (фотопушка) выполнен на основе полутораячеечной ускоряющей СВЧ-структуры с фотокатодом на торцевой стенке половинной ячейки и рассчитан на ускорение частиц до средней энергии 3,5 МэВ при запитке 5 МВт клистроном на частоте 2450 МГц. Второй каскад представляет собой бипериодическую структуру длиной 1,4 м, включающую 22 ускоряющие ячейки, работающую на $\pi/2$ -моду также на частоте 2450 МГц, и обеспечивающую повышение средней энергии частиц до 20 МэВ [3].

Для компенсации поперечного кулоновского расталкивания формируемых в ускорителе плотных электронных сгустков и стабилизации поперечного эмиттанса пучка разработана магнитная система, состоящая из основного фокусирующего соленоида постоянного тока и дополнительной катушки, экранирующей магнитное поле на поверхности фотокатода. Данная система позволяет фокусировать электронный пучок на расстоянии до 1 м от катода и до размера, не превосходящего его первоначальный размер. При этом, согласно результатам моделирования, размещение начала второй секции ускорения вблизи кроссовера приводит к дальнейшей фокусировке пучка во втором каскаде даже в отсутствие дополнительных фокусирующих систем.

Трёхмерное моделирование динамики частиц в ускорителе проводилось как специализированным кодом ASTRA, так и более общими PIC-кодами. Оценивались зависимости положения кроссовера, а также величин поперечного размера и эмиттанса пучка от величины фокусирующего поля и начальных параметров частиц. Для снижения потребляемой мощности основного соленоида разработана конструкция с магнитной изоляцией, предусматривающая также возможность жидкостного охлаждения системы. В настоящее время ведется изготовление элементов фокусирующей системы и пусконаладочные работы основного каскада ускорителя.

Работа выполнена частично в рамках госзадания ИПФ РАН (программа FFUF-2024-0027).

1. Вихарев А.А., Вихарев А.Л., Гачева Е.И. и др. Разработка фотоинжекторного ускорительного комплекса в ИПФ РАН: состояние исследований и перспективы // Известия вузов. Радиофизика. 2020. №5–6. С. 477–487.
2. Афанасьев А.В., Бандуркин И.В., Вихарев А.А. и др. Фотоинжекторный комплекс в ИПФ РАН: текущие задачи // Известия Российской академии наук. 2022. № 5. С. 220–224.
3. Ашанин И.А., Бандуркин И.В., Былинский Н.Ю. и др. Расчёт и тестирование резонатора фотопушки и бипериодической ускоряющей структуры с бегущей волной для фотоинжектора в ИПФ РАН // Известия вузов. Радиофизика. 2023. № 7–8. С. 555–565.

**ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА**

Отечественное оборудование и модули для миллиметровых и субмиллиметровых волн

В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин

ООО «МВЭЙВ», Черноголовка
muravev_vm@mail.ru

Освоение отечественного производства электроники миллиметрового частотного диапазона (0,1–1 ТГц) в настоящий момент является одной из важнейших государственных задач. Успешное решение этой сложной задачи приведёт к прорыву во многих отраслях гражданской и оборонной промышленности. При этом следует отметить, что в России с производством аппаратуры миллиметрового частотного диапазона есть серьёзные проблемы. Например, в настоящее время отечественные векторные анализаторы цепей (ВАЦ) (АО «НПФ «Микран» и ООО «ПЛАНАР») покрывают частотный диапазон до 44 ГГц, а с модулями расширения частоты – до 54 ГГц. Частотный диапазон выше 54 ГГц в России в смысле средств измерения и модулей остаётся слабо освоенным, а поставки зарубежной аппаратуры находятся под строжайшим запретом и контролем зарубежных правительств. Имеющееся западное оборудование в перспективе следующих 10 лет будет выходить из строя без возможности ремонта, поскольку сервисные центры международных компаний Rohde & Schwarz и Keysight (Agilent) расформированы.

В текущих суровых условиях команда инженеров компании ООО «МВЭЙВ» освоила серийных выпуск следующих наименований приборов и модулей миллиметрового диапазона [1]:

- перестраиваемые генераторы 50–500 ГГц (см. таблицку);
- генераторы ЛПД и Ганна;
- активные и пассивные умножители на частотный диапазон 50–500 ГГц;
- балансные и гармонические смесители до частоты 330 ГГц;
- фарадеевские изоляторы до частоты 330 ГГц;
- волноводные ответвители до частоты 170 ГГц;
- малошумящие и мощные усилители от 1 до 170 ГГц;
- согласованные волноводные нагрузки до частоты 170 ГГц;
- волноводные секции, адаптеры и рупорные антенны до частоты 1100 ГГц.

Отдельно заметим, что в конце 2024 г. во ФГУП «ВНИИФТРИ» состоялась регистрация как отечественных средств измерений модулей расширения частотного диапазона МВЭЙВ: ВЕКТОР 50–75 ГГц, 75–110 ГГц и 110–170 ГГц для векторных анализаторов цепей от фирм ПЛАНАР, Микран, Rohde & Schwarz и Keysight (Agilent). Таким образом, разработчикам компании МВЭЙВ удалось закрыть терагерцовую брешь в векторных измерениях.

Характеристики перестраиваемых генераторов

	Частота	Мощность	Коэффициент умножения	Выходной порт	Опция "Фарадеевский изолятор"	Опция "Рупор"
Генератор 50-75 ГГц	50-75 ГГц	+15 дБм	х4	WR15 (UG387)	✓	✓
Генератор 75-110 ГГц	75-110 ГГц	+13 дБм	х6	WR10 (UG387)	✓	✓
Генератор 110-170 ГГц	110-170 ГГц	+3 дБм +10 дБм	х12	WR6 (UG387)	✓	✓
Генератор 170-260 ГГц	170-260 ГГц	+6 дБм	х16	WR4.3 (UG387)	–	✓
Генератор 180-230 ГГц 190-220 ГГц	180-230 ГГц 190-220 ГГц	+5 дБм +10 дБм	х12	WR4.3 (UG387)	–	✓
Генератор 220-330 ГГц	220-330 ГГц	+4 дБм	х18	WR3 (UG387)	–	✓
Генератор 330-500 ГГц	330-500 ГГц	-3 дБм	х36	WR2.2 (UG387)	–	✓

1. Сайт компании <https://emwave.ru/>

Сверхпроводниковые генераторы терагерцового диапазона

Ф. Хан, Л. Филиппенко, А. Ермаков, Н. Кинев, В. Кошелец*

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
*valery@hitech.cplire.ru

Для большинства практических приложений требуется реализовать в одном устройстве как терагерцовую генерацию с возможностью перестройки частоты в широком диапазоне, так и узкую линию излучения. До настоящего времени этого удалось достичь только для систем на основе распределенных джозефсоновских переходов. В докладе будет дан краткий анализ основных достижений в области создания сверхпроводниковых интегральных генераторов ТГц-диапазона и представлены результаты разработки нового типа генераторов на основе массивов джозефсоновских переходов, включенных в сверхпроводящую копланарную линию. Реализация нового типа включения джозефсоновских переходов позволила создать генератор с рабочими частотами до 700 ГГц, ограниченными только энергетической щелью ниобия. Были проведены исследования сверхпроводниковых генераторов с интегральными детекторами излучения, использование которых позволило не только определить частотный диапазон работы генератора и оценить его мощность, но и измерить ширину линии излучения такого генератора. Использование сверхпроводникового гармонического смесителя на основе туннельного СИС-перехода позволило измерить спектр излучения сверхпроводникового генератора на частотах до 700 ГГц в режиме частотной стабилизации и реализовать режим фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Обсуждаются дальнейшие перспективы в области разработки сверхпроводниковых генераторов терагерцового диапазона и создания интегральных приемных систем для наземных и космических радиотелескопов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-538).

РТ-симметричная микроволновая фотопроводимость в топологической фазе пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{C}_x\text{dTe}$

С.Н. Чмырь¹, А.В. Галеева¹, Д.Е. Долженко¹, К.Г. Кристовский¹, А.И. Артамкин¹, А.В. Иконников¹,
Н.Н. Михайлов², С.А. Дворецкий², М.И. Банников³, Д.Р. Хохлов^{1,3}

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

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

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

khokhlov@mig.phys.msu.ru

Ранее в гетероструктурах на основе толстых пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{C}_x\text{dTe}$ с $x < 0,16$, в которых реализуется инверсный электронный спектр, был обнаружен ряд нетривиальных фотоэлектрических эффектов под воздействием терагерцового излучения. Наиболее интригующим из таких эффектов является положительная фотопроводимость под воздействием импульсов лазерного терагерцового излучения при температуре $T = 4,2$ К. Амплитуда фотопроводимости не является симметричной функцией магнитного поля, приложенного в геометрии Фарадея (отсутствие T -симметрии), а также несимметрична для эквивалентных пар потенциальных контактов, расположенных на противоположных сторонах холловского мостика (отсутствие P -симметрии). В то же время, при одновременной инверсии направления магнитного поля и замене пары потенциальных контактов на зеркально расположенную относительно линии тока пару контактов в холловском мостике амплитуда фотопроводимости не меняется, проявляя свойство РТ-симметрии.

В работе показано, что наблюдаемая особенность фотопроводимости присутствует и при возбуждении микроволновым излучением с энергией кванта излучения приблизительно на порядок величины ниже, чем в предыдущих экспериментах. Важно отметить, что само появление рассматриваемого эффекта противоречит видимой симметрии эксперимента. Кроме того, амплитуда асимметрии эффекта при возбуждении микроволновым излучением оказалась существенно ниже, чем при фото-возбуждении терагерцовым излучением. Таким образом, за появление эффекта РТ-симметричной фотопроводимости отвечает действие некоего внешнего фактора, природа которого до настоящего момента неясна.

С целью проверки одной из гипотез о происхождении эффекта нами была разработана новая установка, которая позволяет проводить фотоэлектрические измерения при воздействии микроволнового излучения. Установка обладает следующими параметрами: температура образца может варьироваться от 4,2 до 300 К, возможно приложение «теплого» магнитного поля до 0,5 Тл, микроволновое излучение на образец мощностью до 10 мВт подается от диода Ганна с частотой от 30 до 50 ГГц. Излучение может подаваться как в геометрии Фарадея, так и в геометрии Фогта. Особенно важным свойством установки является возможность вращения образца *in situ* на 360 градусов как вокруг вертикальной, так и вокруг горизонтальной оси. Учитывая, что выходное излучение является линейно поляризованным, это свойство установки позволяет исследовать поляризационные зависимости фотоэлектрических эффектов.

Отметим, что установка позволяет проводить измерения фотоэлектрических эффектов под воздействием микроволнового излучения не только в структурах на основе HgCdTe , но и в других полупроводниковых материалах с малой шириной запрещенной зоны.

Предполагается, что будут представлены первые полученные на данной установке результаты.

Субволновая импульсная терагерцовая диагностика

М.Р. Конникова, А.П. Шкуринов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва
ashkurinov@physics.msu.ru

Импульсная терагерцовая спектроскопия (ТГц-TDS) широко используется в настоящее время для определения электромагнитных параметров, а именно показателя преломления и коэффициента поглощения различных материалов в широком диапазоне в дальнем инфракрасном диапазоне, обычно от 0,1 ТГц до 10 ТГц. К настоящему времени изучены почти все виды материалов, такие как кристаллы диэлектриков, полупроводники, жидкости, аморфные материалы, газы, биологические материалы и т. д. Кроме того, интенсивное исследование было проведено и с искусственно созданными материалами, такими как метаматериалы и фотонные кристаллы. Большинство экспериментальных исследований были выполнены в геометрии «на пропускание» электромагнитного излучения через образец, но геометрия «на отражение» и ТГц-эллипсометрия также могут эффективно использоваться, когда образцы непрозрачны или когда реальные исследования при пропускании излучения невозможны.

Определение характеристик тонких пленок, толщина которых составляет порядка 1 мкм или меньше, является сложной задачей, поскольку такая толщина намного меньше длин волны ТГц-излучения. Отметим, что в настоящее время не существует универсального определения того, что такое «тонкая пленка»; по крайней мере, для ТГц-волн существует несколько определений «тонкая пленка». Основное требование заключается в том, что длина волны излучения должна превышать определенное количество межатомных или межмолекулярных расстояний. В этом смысле чем длиннее длина волны, тем лучше выполняется это требование.

В нашем сообщении мы будем рассказывать о постановке задачи диагностики сверхтонких диэлектрических пленок, о новых экспериментальных подходах для решения таких задач и интерпретации экспериментальных результатов.

Терагерцовые исследования на станциях Новосибирского лазера на свободных электронах

В.В. Герасимов^{1,12}, В.В. Кубарев¹, Е.Н. Чесноков², А.В. Водопьянов³, С.Е. Пельтек⁴,
Е.А. Бутикова¹², В.М. Попик¹, С. Вебер⁴, Б.А. Князев, А.К. Никитин⁶, П.А. Никитин⁶,
И.Ш. Хасанов⁶, Р.Х. Жукавин⁷, Ю.Ю. Чопорова¹, В.С. Павельев⁸, А.И. Иванов⁹,
И.В. Антонова⁹, О.Э. Камешков¹⁰, Н.Д. Осинцева¹, В.Д. Кукотенко¹, Н.А. Баздырев^{1,11},
В.С. Ванда^{1,12}, О.А. Шевченко¹, Я.В. Гетманов¹, Я.И. Горбачев¹,
Д.А. Коломеец¹, М.А. Щеглов¹, Н.А. Винокуров^{1,12}, Г.Н. Кулипанов¹

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

²Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

³Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

⁴Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск

⁵Международный томографический центр, Новосибирск

⁶Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

⁷Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

⁸Самарский университет им. академика С.П. Королёва, Самара

⁹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

¹⁰Австралийский национальный университет, Канберра, Австралия

¹¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

¹²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

v.v.gerasimov@inp.nsk.su

На уникальной установке «Новосибирский лазер на свободных электронах» (НЛСЭ) Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения уже в течение 20 лет ведутся фундаментальные исследования пользователями из разных областей науки. Сочетание таких уникальных характеристик импульсного излучения НЛСЭ [1], как высокая спектральная мощность, монохроматичность, возможность перестройки длины волны в широком диапазоне длин волн 8–400 мкм (0,8–38 ТГц), пространственная и временная когерентность, позволяет решать научные задачи, недоступные при использовании традиционных терагерцовых (ТГц) источников [2]. Среди текущих работ, выполняемых на станциях НЛСЭ, можно выделить несколько основных направлений: плазмоника, вихревые бesselовы пучки, дифракционная оптика, ТГц-детекторы и источники, материаловедение, акустооптика, сверхбыстрая времязрешенная спектроскопия молекул, оптический разряд в газах, ТГц-ЭПР-спектроскопия молекулярных магнитов и парамагнитных соединений, изучение воздействия ТГц-излучения на биологические объекты. Будут представлены наиболее значимые результаты исследований, достигнутые на новосибирском источнике за последние годы.

Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» на базе уникальной научной установки «Новосибирский лазер на свободных электронах» в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

1. *Shevchenko O., Vinokurov N., et al.* Novosibirsk free-electron laser facility // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. Vol. 83. P. 228–231.

2. *Kulipanov G., et al.* Novosibirsk Free Electron Laser Facility: Description and Recent Experiments // IEEE Trans. on THz science and technology. 2015. Vol. 5, no. 5. P. 798–809.

Непрерывный двухфотонный квантовый каскадный лазер терагерцового диапазона

В.И. Гавриленко¹, Д.И. Курицын¹, Р.Х. Жукавин¹, К.А. Ковалевский¹, В.А. Анфертьев¹,
В.Л. Вакс¹, А.В. Антонов¹, А.А. Дубинов¹, С.В. Морозов¹, Р.А. Хабибуллин², Д.В. Ушаков³,
А.А. Афоненко³, Н.А. Малеев⁴, Ф.И. Зубов⁵

¹Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

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

³Белорусский государственный университет, Минск

⁴Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

⁵Академический университет им. Ж.И. Алферова РАН, Санкт-Петербург
gavr@ipmras.ru

Создан первый в мире двухфотонный терагерцовый (ТГц) квантовый каскадный лазер (ККЛ) с рекордно низкой пороговой плотностью тока $<100 \text{ A/cm}^2$. Продемонстрирована широкополосная лазерная генерация в диапазоне 3,1–3,9 ТГц ($104\text{--}130 \text{ cm}^{-1}$) в непрерывном режиме вплоть до температуры 90 К [1].

На основе классической для ТГц-ККЛ-схемы зонной структуры с 4-квантовыми ямами GaAs/Al_{0,15}Ga_{0,85}As в периоде с резонансной инжекцией электронов на верхний лазерный уровень u с уровня инжектора i и быстрым опустошением нижнего лазерного уровня l путем резонансного туннелирования на уровень экстрактора $l \rightarrow e$ и резонансного испускания оптического фонона $\hbar\omega_0$ $e \rightarrow i'$ сконструирован двухфотонный ККЛ с промежуточным уровнем m , где в каждом периоде происходит два излучательных перехода с разной частотой $u \rightarrow m$ и $m \rightarrow l$, что обеспечивает широкую полосу усиления и генерации (рис. 1). Низкая пороговая плотность тока и возможность работы в непрерывном режиме (рис. 2) обеспечивается рекордно большой толщиной инжекционного ($i \rightarrow u$) барьера 7,34 нм. Структура ККЛ выращивалась методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs(001), далее формировались лазерные полоски шириной 30 мкм и длиной 2,9 мм с волноводом металл-металл с резонатором Фабри – Перо на сколах.

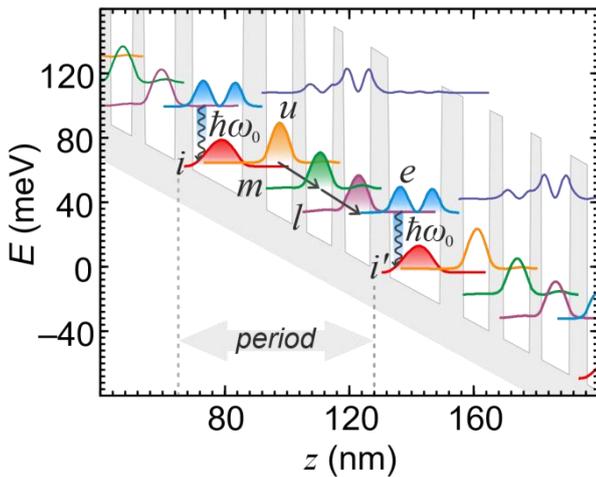


Рис. 1

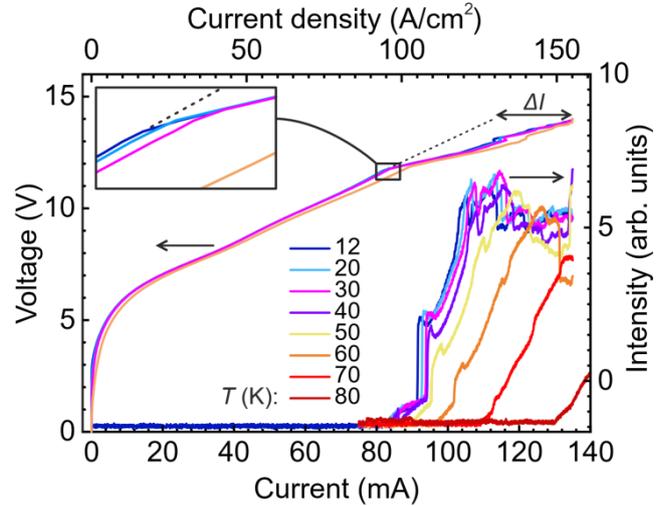


Рис. 2

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 23-19-00436. Рост гетероструктуры ККЛ выполнен в рамках проекта РНФ № 21-72-30020.

1. Khabibullin R.A., et al. // J. Appl. Phys. 2024. Vol. 136. P. 194504.

Российские квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона

В.В. Андриюшкин¹, В.А. Анфертьев², А.А. Афоненко³, Т.А. Багаев⁴, Д.А. Белов⁵, С.А. Блохин⁶,
М.А. Бобров⁶, А.П. Васильев⁶, В.И. Гавриленко², Р.Р. Галиев⁷, Р.Х. Жукавин², Ф.И. Зубов⁸,
А.В. Иконников⁵, А.Г. Кузьменков⁶, М.А. Ладугин⁴, М.В. Максимов⁶, Н.А. Малеев⁶,
А.А. Мармалюк⁴, И.Е. Мартычев⁴, А.Ю. Павлов⁷, Д.С. Пономарев⁷, Д.В. Ушаков³, Р.А. Хабибуллин^{7,9}

¹ ООО «Коннектор оптикс», Санкт-Петербург

² Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

³ Белорусский государственный университет, Минск

⁴ АО НИИ «Полос» им. М.Ф. Стельмаха», Москва

⁵ Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

⁶ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

⁷ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва

⁸ Академический университет им. Ж.И. Алферова РАН, Санкт-Петербург

⁹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный

antikon@physics.msu.ru

В докладе приводится краткий обзор истории развития и текущего состояния разработок отечественных квантово-каскадных лазеров, работающих в диапазоне 2–5 ТГц.

Многоэлементные оптоэлектронные источники импульсного терагерцового излучения повышенной мощности

Д.В. Лаврухин¹, А.Э. Ячменев¹, Р.Р. Галиев¹, Р.А. Хабибуллин¹, И.Е. Спектор², К.И. Зайцев²,
Д.С. Пономарев¹

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

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
denis_lavruhin@mail.ru

В системах импульсной терагерцовой (ТГц) спектроскопии в качестве надежных источников излучения используются оптоэлектронные генераторы, возбуждаемые фемтосекундными лазерными импульсами. Несмотря на активный поиск оригинальных методов оптимизации топологии единичных (элементарных) оптоэлектронных источников [1–3], повысить эффективность их работы мешают явления насыщения, связанные с высокой плотностью мощности лазерной накачки в микроскопическом фотопроводящем зазоре (~5–10 мкм). Наиболее перспективным решением указанной проблемы является переход к многоэлементным источникам, в которых лазерная накачка распределена по большой площади. Ранее нами впервые была предложена [3] и реализована [4] концепция многоэлементного оптоэлектронного излучателя (МОИ) с массивом сапфировых микролинз для ближнепольной локализации энергии лазерной накачки вблизи электродов. Измерения показали увеличение интегральной мощности генерации до 100 мкВт в полосе частот ~3 ТГц и полное отсутствие насыщения при мощности лазерной накачки вплоть до 120 мВт. В настоящей работе исследован вопрос о зависимости диаграммы направленности и регистрируемого спектра ТГц-излучения от периода и пространственного профиля мощности лазерной накачки в МОИ (рис. 1). Впервые предложена и экспериментально реализована концепция МОИ с выравниванием мощностей ТГц-генерации отдельных излучателей путем вариации их геометрических параметров. Полученные результаты открывают возможности для создания оригинальных оптоэлектронных генераторов импульсного ТГц-излучения повышенной мощности.

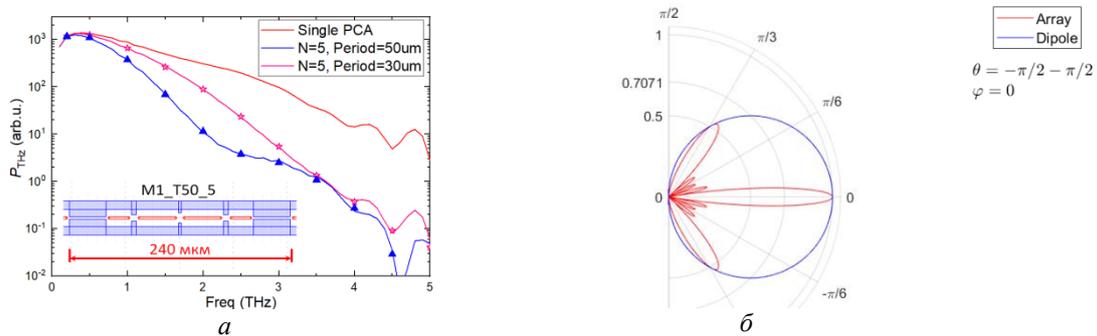


Рис. 1. Моделирование диаграммы направленности и спектральных характеристик для многоэлементного оптоэлектронного источника

1. Li X., et al. // Light: Sci. Appl. 2023. Vol. 12. P. 233.
2. Ponomarev D.S., et al. // Phys. Usp. 2024. Vol. 67. P. 3.
3. Ponomarev D.S., et al. // Opt. Lett. 2022. Vol. 47, no. 7. P. 1899.
4. Zenchenko N.V., et al. // Appl. Phys. Lett. 2024. Vol. 124, no. 12. P. 121107.

Единичные импульсы тока в составе отклика сверхпроводникового ТГц-болометра

Г.Х. Китаева*, Т.И. Новикова, К.А. Кузнецов, И.В. Королев, П.А. Прудковский
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва
gkitaeva@physics.msu.ru

Исследованы статистические распределения показаний терагерцового (ТГц) детектора (Hot Electron Bolometer, НЕВ [1]) при регистрации коротких маломощных импульсов излучения частоты 1 ТГц. Импульсы генерировались в двух различных режимах, с длительностями около 30 пикосекунд или 10 наносекунд, при параметрическом рассеянии пикосекундной или наносекундной лазерной накачки в нелинейном кристалле, охлаждаемом вместе с НЕВ до 4,8 К в общем криостате [2, 3]. Обнаружены существенные различия между двумя режимами в характере поведения статистических распределений при изменении числа падающих фотонов. Путем численной аппроксимации гистограмм показано, что при наносекундном облучении распределения могут быть представлены в виде сумм дискретных вкладов с пуассоновской статистикой числа и гауссовым распределением величин отдельных вкладов в суммарный отклик НЕВ. При ТГц-облучении в течение пикосекундных интервалов времени, меньших времени заявленного быстродействия детектора, линейность отклика сохраняется, но дискретная структура гистограмм исчезает. Моделирование наносекундных гистограмм позволило определить средние числа элементарных фотооткликов, рождающихся под действием фотонов в сверхпроводящей полоске NbN, и исследовать средние вклады этих элементарных событий в общий выходной ток детектора. Впервые обнаружен эффект зависимости заряда, формируемого в сверхпроводящей пленке при возникновении элементарного импульса, от величины потока фотонов ТГц-излучения. Сравнение с результатами деконволюции гистограмм оптических приемников на основе ФЭУ показывает, что взаимодействие сверхпроводящих фоточувствительных элементов НЕВ с ТГц-излучением имеет ряд существенных отличий от процессов, происходящих при фотовозбуждении носителей в оптических детекторах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-12-00055.

1. *Seliverstov S., Maslennikov S., Ryabchun S., Finkel M., Klapwijk T.M., Kaurova N., Vachtomin Yu., Smirnov K., Voronov B., and Goltsman G.* Fast and sensitive terahertz direct detector based on superconducting antenna-coupled hot electron bolometer // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2015. Vol. 25, no. 2300304.
2. *Prudkovskii P., Leontyev A., Kuznetsov K., and Kitaeva G.* Towards measuring terahertz photon statistics by a superconducting bolometer // *Sensors.* 2021. Vol. 21. P. 4964.
3. *Novikova T.I., Kuznetsov K.A., Korolev I.V., Pentin I.V., Prudkovskii P.A., Kitaeva G.Kh.* Statistical features of the response of a superconducting hot-electron bolometer to extremely weak terahertz pulses of picosecond and nanosecond duration // *Applied Physics Letters.* 2024. Vol. 125. P. 124004.

Отражающие аксиконы для формирования вихревых бесселевых пучков ТГц-диапазона частот

Н.А. Баздырев^{1,2}, В.В. Герасимов^{1,3}, Н.Д. Осинцева¹, К.Н. Тукмаков⁴,
А.Н. Агафонов⁴, В.С. Павельев⁴

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

² Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

³ Новосибирский государственный университет

⁴ Самарский университет

N.A.Bazdyrev@inp.nsk.su

С развитием связи 6G [1] требуется создание новых методов для увеличения объема, скорости и области передачи информации. Одним из таких методов является использование вихревых бесселевых пучков [2] в терагерцевом (ТГц) диапазоне частот. К преимуществам данного метода можно отнести устойчивость к различным оптическим флуктуациям среды, так как бесселева мода пучка обладает свойствами «бездифракционности» и «самовосстановления» [3]. При использовании вихревых пучков можно применять мультиплексирование [4] (передавать несколько сигналов на одной частоте), что приведет к повышению плотности каналов передачи данных. ТГц-диапазон по сравнению с микроволновым имеет преимущества, которые заключаются в увеличении скорости передачи информации и пропускной способности каналов связи.

В докладе представлены результаты по формированию бесселевых пучков с $l=3$ и $l=9$, полученных с помощью бинарных фазовых аксиконов, работающих на отражение. Аксиконы с периодами $p = 2$ и 3 мм были изготовлены двумя методами: фемтосекундной лазерной абляцией и реактивно-ионным травлением. Использовалось ТГц-излучение на длине волны 141 мкм и 203 мкм Новосибирского лазера на свободных электронах [5]. Экспериментально определены зоны формирования вихревых бесселевых пучков, которые согласуются с численными расчетами в рамках скалярной теории дифракции. При увеличении периода аксиконов (с 2 до 3 мм), границы зоны «бездифракционности» бесселевой моды увеличиваются, что, в свою очередь, согласуется с аналитическими оценками. Получены абсолютные энергетические дифракционные эффективности отражающих аксиконов, значения которых зависят от качества изготовления элементов.

В работе использовалось оборудование центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения» на базе уникальных научных установок «Новосибирский лазер на свободных электронах» в ИЯФ СО РАН.

1. Harter T., et al. Wireless THz link with optoelectronic transmitter and receiver // Optica. 2019. Vol. 6, no. 8. P. 1063–1070.

2. Durnin J., Miceli Jr J. J., Eberly J. H. Diffraction-free beams // Physical review letters. 1987. Vol. 58, no. 15. P. 1499.

3. Bouchal Z., Wagner J., Chlup M. Self-reconstruction of a distorted nondiffracting beam // Optics communications. 1998. Vol. 151, no. 4-6. P. 207–211.

4. Gatto A., et al. Free-space orbital angular momentum division multiplexing with Bessel beams // Journal of Optics. 2011. Vol. 13, no. 6. P. 064018.

5. Shevchenko O.A., et al. The Novosibirsk free-electron laser facility // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2019. Vol. 83. P. 228–231.

Квантово-каскадные лазеры с частотой генерации свыше 6 ТГц

А.А. Дубинов¹, А.А. Афоненко², Д.В. Ушаков², Р.А. Хабибуллин³, В.И. Гавриленко¹

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

² Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

³ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва
sanya@ipmras.ru

За два десятка лет своего существования квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона частот (ТГц ККЛ) прошли значительный путь от криогенных приборов с относительно невысокими значениями выходной мощности до мощных ТГц-источников с термоэлектрическим охлаждением на элементах Пельтье [1]. Однако существует диапазон частот (6–10,5 ТГц), где ККЛ не работают из-за сильного фононного поглощения в гетероструктурах на основе арсенидов (AlInGaAs), из которых они сделаны.

Гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) GaInP/AlGaInP являются перспективной активной средой для решения задачи создания ККЛ с рабочим диапазоном частот 6–7 ТГц, вследствие их более высоких энергий оптических фононов по сравнению с арсенидами. Впервые были рассчитаны температурные зависимости усиления и поглощения на частотах 6,3–6,9 ТГц для ККЛ на основе GaInP/AlGaInP с 2 КЯ в каскаде и двойным металлическим волноводом. Показано, что максимальная рабочая температура такого ККЛ может достигать 108 К [2].

Кроме того, была исследована возможность создания такого дизайна ККЛ на основе GaAs/AlGaAs, который благодаря подавлению безызлучательной рекомбинации обеспечивает генерацию с частотой больше 6 ТГц при температурах выше 77 К в лазере с двойным металлическим волноводом. Для этого был предложен зонный дизайн ККЛ с активной областью на основе 4 КЯ GaAs/Al_{0,14}Ga_{0,86}As [3].

Результаты данных исследований открывают путь к созданию ККЛ для работы в значительной части области фононной полосы поглощения GaAs, недоступной для существующих ККЛ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 23-19-00436).

1. *Khalatpour A., et al.* High-power portable terahertz laser sistem // *Nat. Photonics*. 2021. Vol. 15, no. 1. P. 16–20.
2. *Ushakov D.V., et al.* Phosphides-based terahertz quantum-cascade laser // *Phys. Stat. Solidi RRL*. 2024. Vol. 18. 2300392.
3. *Ushakov D.V., et al.* Feasibility of GaAs/AlGaAs quantum cascade laser operating above 6 THz // *J. Appl. Phys.* 2024. Vol. 135, iss. 13. 133108.

Нагрев СИС-детектора под воздействием внешнего терагерцового излучения

Н.В. Кинев¹, А.М. Чекушкин¹, Ф.В. Хан¹, К.И. Рудаков^{1,2}, В.П. Кошелец¹

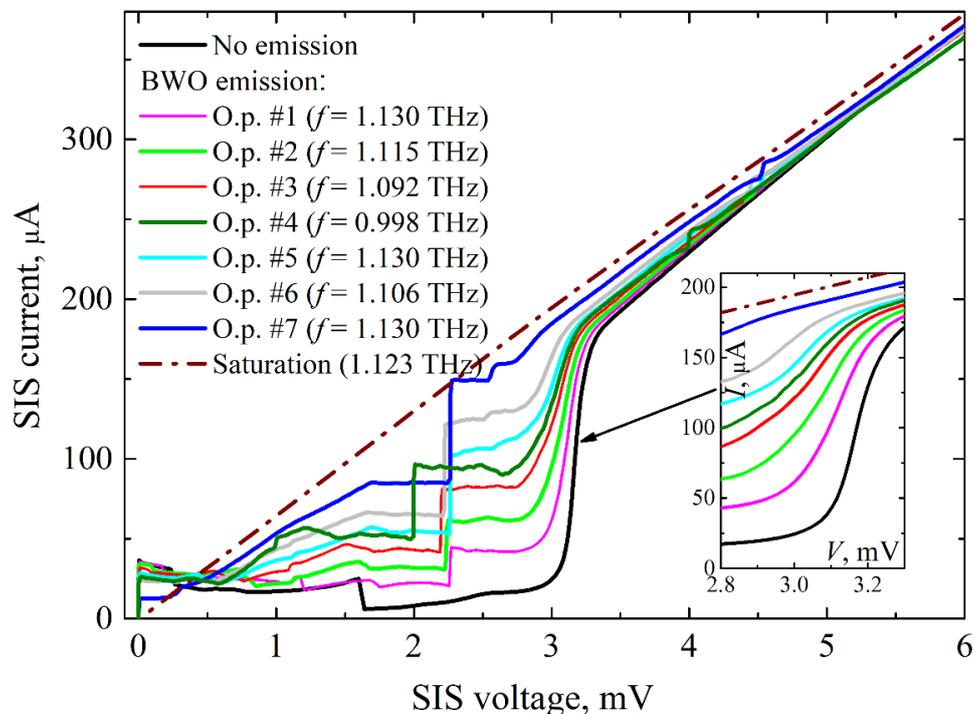
¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

²Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

В терагерцовых (ТГц) приемных системах на основе детекторов вида «сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник» (СИС), работающих при температуре около 4 К, наиболее часто используются линии передачи на основе ниобия. Они обладают максимальной рабочей частотой около 750 ГГц, выше которой значительно возрастают потери в пленках в связи с фундаментальным ограничением, обусловленным энергетической щелью сверхпроводника Δ . В системах, работающих на частотах до 1 ТГц и выше, необходимо использование более высокочастотных линий передачи из материалов с более высоким значением Δ .

В данной работе разработана, изготовлена и экспериментально исследована схема на основе СИС-перехода в качестве детектора ТГц-излучения, включенного в линии передачи с электродами на основе NbTiN и Al. Схема включает в себя два детектора, каждый из которых выполнен в виде двойного СИС-перехода Nb-AlN-NbN площадью по 1 $\mu\text{м}^2$ каждый, включенных в секции микрополосковой линии передачи NbTiN-SiO₂-Al различной длины, а также приемную щелевую антенну, работающую в ТГц-диапазоне. При помощи разработанной схемы проведена регистрация сигнала лампы обратной волны (ЛОВ) в диапазоне 1–1,1 ТГц. Показано, что накачка СИС-детектора сигналом на частоте выше 1 ТГц приводит к значительному уменьшению «щелевого» напряжения перехода V_g (см. рис.), что не наблюдалось ранее при частотах накачки до ~ 750 ГГц. Показано, что уменьшение V_g имеет качественно такое же поведение, как при увеличении физической температуры перехода.

Предложена модель теплового эффекта, вызванного квазичастичным туннелированием через барьер под воздействием внешнего излучения. Согласно предложенной модели, значительный вклад в изменение функции распределения электронов в сверхпроводящих электродах СИС-перехода возникает вследствие разрушения куперовских пар, которое становится возможным при частотах выше 2Δ , составляющее для ниобия около 700 ГГц.



Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-538).

Влияние различных механизмов рекомбинации и разогрева носителей на лазерную генерацию в гетероструктурах с КЯ HgTe/CdHgTe

С.В. Морозов

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
more@ipmras.ru

Безызлучательные оже-процессы имеют энергетический порог, определяемый законами сохранения энергии-импульса, и это может позволить за счет «подбора» электронной зонной структуры материала в заметной степени подавить безызлучательные процессы. Подобный подход был продемонстрирован в относительно длинноволновых волноводных структурах с квантовыми ямами (КЯ) HgCdTe/CdHgTe, где получено стимулированное излучение на межзонных переходах вплоть до 31 мкм [1, 2], за длинноволновой границей, доступной сегодня для квантово-каскадных лазеров. Благодаря оптимизации электродинамической системы с гетероструктурами HgCdTe снижена пороговая плотность мощности накачки до 1 Вт/см² и продемонстрирован режим квазинепрерывной генерации стимулированного излучения в диапазоне длин волн 14–24 мкм. Такие низкие пороги генерации при оптической накачке в пересчете на токи показывают перспективу создания инжекционных лазеров в таких структурах, несмотря на невысокий уровень возможностей *p*-легирования в данных материалах. Обсуждается роль беспороговой оже-рекомбинации и разогрев носителей в относительно широкозонных КЯ HgTe/CdHgTe, излучающих в практически значимом диапазоне длин волн 3–5 мкм [4]. В работе на основании измерений температурной зависимости интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) сделаны выводы о темпах межзонных процессов в интервале $T = 10–320$ К. Проведен анализ получаемых данных в рамках конкуренции излучательных и оже-процессов, оценены соответствующие оже-коэффициенты, обсуждаются возможности оптимизации параметров КЯ для снижения порогов генерации и повышения рабочих температур HgCdTe-лазеров. Проведены исследования температурного гашения ФЛ лазерных гетероструктур с КЯ HgTe/CdHgTe, излучающих в диапазоне длин волн 3–4 мкм и определены характерные темпы основных межзонных процессов рекомбинации. Установлено, что доминирующую роль в динамике неравновесных носителей заряда в таких структурах могут играть «беспороговые» (резонансные) оже-процессы, проходящие с выбросом третьей частицы в высоколежащие возбужденные состояния в КЯ либо надбарьерные состояния непрерывного спектра [3]. Обсуждается достигнутая лазерная генерация с оптической накачкой в микрорезонаторах с квантовыми ямами на HgCdTe.

Высокое качество квантовых ям с низкой фоновой концентрацией носителей в гетероструктурах HgCdTe делает этот материал перспективным для создания длинноволновых источников излучения вплоть до 50 мкм, с характеристиками, превосходящими достигнутые в инжекционных лазерах на халькогенидах свинца-олова.

1. Morozov S.V., Romyantsev V.V., Zholudev M.S., et al. // ACS Photonics. 2021. Vol. 8. P. 3256.
2. Romyantsev V.V., Mazhukina K.A., Utochkin V.V., et al. // Applied Physics Letters. 2024. Vol. 124, iss. 16, 161111-1-161111-6.
3. Kudryavtsev K.E., Yantser A.A., Fadeev M.A., et al. // Appl. Phys. Lett. 2023. Vol. 123. P. 182102.
4. Kudryavtsev K.E., Romyantsev V.V., Dubinov A.A., et al. // Appl. Phys. Lett. 2024. Vol. 125. P. 223505.

Сверхбыстрые процессы в проводниках, облучаемых интенсивными оптическими и терагерцовыми импульсами

И.В. Оладышкин

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
oladyshkin@ipfran.ru

Воздействие сверхкоротких электромагнитных импульсов на твёрдое тело приводит к возникновению неравновесного состояния среды, в котором динамика горячих электронов, поглощающих энергию излучения, развивается на фоне относительно холодной кристаллической решётки. Ключевые процессы, определяющие электродинамический отклик среды в этих условиях, – рассеяние, термализация, обмен теплом между электронами и кристаллической решёткой, развитие неустойчивостей – имеют временные масштабы от нескольких фемтосекунд до нескольких пикосекунд и попадают преимущественно в терагерцовый (ТГц) диапазон частот. По этой причине использование ТГц-импульсов для накачки и зондирования различных материалов – один из основных инструментов в исследовании кинетики электронов в твёрдом теле. Не менее ценную информацию о поведении твёрдого тела в неравновесном состоянии может принести детектирование ТГц-излучения, генерируемого в результате воздействия фемтосекундных лазерных импульсов.

В докладе будет приведён обзор ряда нелинейных электродинамических и кинетических эффектов, проявляющихся на субпикосекундных временных масштабах при облучении проводников интенсивными оптическими и терагерцовыми импульсами. В частности, будут представлены результаты теоретического и экспериментального исследования электродинамики графена в интенсивном ТГц-поле. Воздействие на графен электрических полей амплитудой порядка сотен кВ/см является принципиально нетепловым, так как приводит к рождению электронно-дырочных пар, возникновению нетермализованного состояния электронов и неравновесной люминесценции.

Облучение металлов фемтосекундными лазерными импульсами также тесно связано с генерацией ТГц-полей и развитием неустойчивостей на субпикосекундных временных масштабах. Во-первых, при достаточной интенсивности оптического излучения может развиваться распад накачки на поверхностные плазмон-поляритоны, приводящий к пространственно-периодическому нагреву и повреждению поверхности. Во-вторых, неоднородный нагрев и дополнительная внутренняя ионизация металла становится источником вихревых электронных токов, которые генерируют сильные внутренние магнитные поля и поля излучения ТГц-диапазона.

Другим проявлением нелинейности твёрдого тела в ТГц-диапазоне является структурирование полупроводников мощными ТГц-импульсами, которое неоднократно наблюдалось экспериментально, но не имеет на данный момент однозначной теоретической интерпретации. Воздействие на полупроводники пикосекундных импульсов с частотами порядка единиц и десятков ТГц (генерируемых ЛСЭ- или CO₂-лазером) приводит к пространственно-периодическому повреждению поверхности с периодом много меньшим длины волны падающего излучения (до 1/25). Это может свидетельствовать о распаде излучения накачки на новые электромагнитные моды с повышением частоты.

Описанные эффекты существенно влияют на динамику поглощения оптического и ТГц-излучения в проводниках, а также на их нелинейный электродинамический отклик.

Возбуждение мультиплексных терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов с орбитальным угловым моментом на осесимметричном проводнике

Н.Д. Осинцева¹, В.В. Герасимов^{1,2}, В.С. Павельев³

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

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³ Самарский университет, Самара
natalyaosintseva@gmail.com

На сегодняшний день наблюдается растущая потребность в повышении объема передаваемых данных в информационных системах связи. Благодаря повышению частоты передаваемого излучения, т. е. переходу от микроволнового диапазона к терагерцовым (ТГц) частотам, становится возможным рост пропускной способности каналов данных. Для области проводных систем в ТГц-диапазоне активно развивается волноводный подход для передачи данных в миниатюрных интегральных устройствах. Однако существует альтернативное решение, основанное на возбуждении волн на поверхности проводника. Одной из разновидностей таких волн являются поверхностные плазмон-поляритоны (ППП), которые представляют собой комплекс поверхностной электромагнитной волны и волны свободных зарядов на поверхности проводника, распространяющиеся вдоль границы раздела сред между металлом и диэлектриком. Генерация ППП позволит обеспечить увеличение скорости обработки и передачи информации в микросхемах, биосенсорах и т. д. Отдельный интерес представляет генерация ППП на аксиально-симметричной поверхности. Возбуждение ППП с помощью оптических вихрей, обладающих орбитальным угловым моментом (ОУМ), позволит обеспечить мультиплексирование [1] – передачу нескольких сигналов по одному каналу связи.

Ранее нами были продемонстрированы результаты по возбуждению ТГц ППП с ОУМ с использованием мощного излучения Новосибирского лазера на свободных электронах [2]. ППП возбуждались на аксиально-симметричной поверхности металлического проводника, диаметр которого много больше длины волны излучения, покрытого 1 мкм слоем диэлектрика ZnS. В аналогичной схеме были получены мультиплексные вихревые ППП. Пучок, представляющий собой суперпозицию бесселевых пучков с ОУМ 3 и 9, фокусировался на входной торец проводника. Комбинирование пучков осуществлялось в оптической схеме Маха – Цендера с использованием бинарных фазовых дифракционных оптических элементов, аналогичных описанным в [3]. Определены характеристики, позволяющие идентифицировать мультиплексные ППП, что необходимо для задач декодирования переданных сигналов в приложениях, связанных с передачей данных.

Авторы выражают глубокую благодарность Б.А. Князеву за идейное вдохновение, ценные советы и научно-методическое руководство. В работе использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» на базе уникальной установки «Новосибирский ЛСЭ» в ИЯФ СО РАН.

1. Fickler R., Campbell G., Buchler B., Lam P.K., Zeilinger A. Quantum entanglement of angular momentum states with quantum numbers up to 10,010 // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2016. Vol. 113, № 48. P. 13642–13647.

2. Gerasimov V.V., Kameshkov O.E., Knyazev B.A., Osintseva N.D., Pavelyev V.S. Vortex surface plasmon polaritons on a cylindrical waveguide: generation, propagation, and diffraction // J. Opt. 2021. Vol. 23, № 10. P. 10LT01.

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

Терагерцовые интегральные полностью диэлектрические безоболочечные волноводы для систем связи нового поколения

С.В. Селиверстов^{1,4}, С.С. Святодух¹, А.К. Кожуховский¹, Д.Г. Фудин¹, Г.Н. Гольцман^{2,3}

¹ Московский педагогический государственный университет, Москва

² НИУ «Высшая школа экономики», Москва

³ Российский квантовый центр, Москва

⁴ Университет науки и технологий МИСИС, Лаборатория фотонных газовых сенсоров, Москва
seliverstovsv@mail.ru

Субтерагерцовый диапазон с новой силой привлёк внимание научно-технического сообщества всего мира. Причина кроется в том, что этот диапазон наиболее подходит для целей создания систем связи нового поколения со сверхвысокой скоростью беспроводной передачи данных (6G). Эта проблема неразрывно связана с созданием соответствующих волноводных структур с малым поглощением. Традиционные полые металлические волноводы малопригодны для этой задачи. В данной работе представлены безоболочечные полностью диэлектрические волноводы, интегрированные с подложкой из высокоомного кремния (Si), рассчитанные на частотный диапазон 126,5–145,5 ГГц. Ядро волновода вытравливалось из Si-подложки в Bosch-процессе, после которого оказывалось подвешенным на штырях толщиной 100 мкм к Si-остову. Фото изготовленного образца волновода представлено на вставке к рис. 1. Были измерены спектры пропускания изготовленных волноводов с двумя различными длинами подвешивающих штырей. Экспериментальные результаты представлены на рис. 1. Из графиков видно, что для обоих типов используемых волноводов коэффициент пропускания увеличивается с ростом частоты, но для волноводов с короткими подвешивающими штырями наблюдается близкое к нулю пропускание на низких частотах, тогда как для волноводов с длинными штырями на тех же частотах это значение заметно больше нуля. На самой высокой частоте пропускание обоих типов волноводов становится примерно одинаковым. Мы связываем это с тем, что с ростом частоты мода излучения, распространяющегося по волноводу, становится более локализованной в его сердцевине. Поэтому эванесцентная мода перестает перетекать в кремниевые «берега», как это происходит на низких частотах в волноводах с короткими штырями, где эти «берега» находятся близко к сердцевине волновода. Основная доля потерь в волноводах на высоких частотах возникает в тейперах, с помощью которых согласуются вход и выход диэлектрического волновода с прямоугольными металлическими. Полученные результаты подтверждают перспективность использования предложенных волноводов для практических приложений, связанных с новыми беспроводными системами передачи данных, а также аппаратной реализацией искусственных терагерцовых нейронных сетей.

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSME-2025-0002).

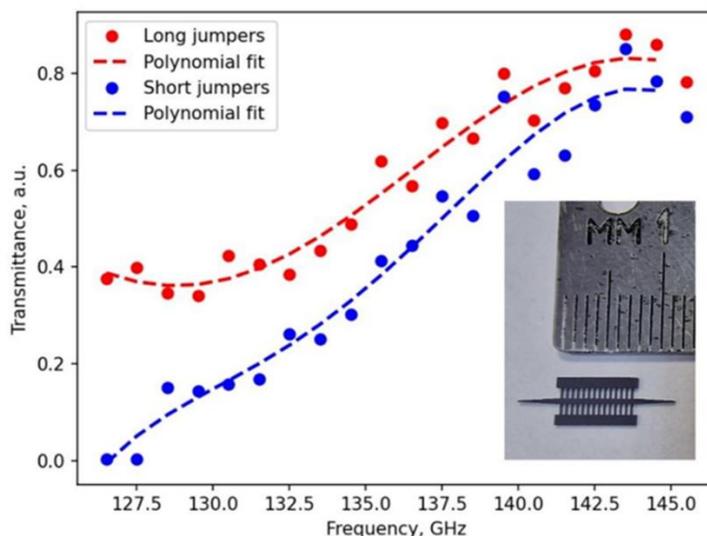


Рис. 1. Спектр пропускания интегральных Si-безоболочечных волноводов в диапазоне 126,5–145,5 ГГц

Чувствительность и быстродействие смесителя на основе ультратонких пленок NbN на частоте гетеродина 2,52 ТГц

И.В. Ивашенцева¹, Н.С. Каурова¹, Г.Н. Гольцман¹, Б.М. Воронов¹, И.В. Третьяков²

¹ Московский педагогический государственный университет

² Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
ivantritykov@mail.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию влияния параметров процесса магнетронного осаждения тонкой 4–5 нм сверхпроводящей пленки нитрида ниобия NbN и технологии изготовления NbN НЕВ смесителей на разброс их основных параметров для минимизации в дальнейшем этого разброса. Основными параметрами NbN НЕВ смесителя является нормальное сопротивление R_{300} , критическая температура T_c , ширина сверхпроводящего перехода ΔT_c , шумовая температура T_n , полоса преобразования $\Delta\nu$. Исследования $\Delta\nu$ и вольтамперных характеристик NbN НЕВ смесителей проводились при различных температурах Si-подложки, при T вблизи T_c и T много ниже T_c , это позволяло выделить отдельные интерфейсы в смесителе из-за их разной T_c и изучить их влияние. Однородность параметров изготовленных NbN НЕВ смесителей, кроме оптимизации процесса осаждения NbN-пленки, достигалась путем подготовки поверхности Si-подложки, а также благодаря использованию осажденного *in situ* с пленкой NbN-слоя Au-контакта с планарной ТГц-антенной. Изготовленные по оптимизированному маршруту NbN НЕВ смесители имели практически идентичные $R(T)$ характеристики с разбросом T_c и нормального сопротивления R_{300} не более 0,15 К и 2 Ом соответственно. Шумовая температура на частоте гетеродина 2,52 ТГц составляла 800 К с разбросом 150 К от образца к образцу. Шумовая полоса смесителей при $T = 4,5$ К составляла в среднем 7 ГГц. Оптимизированная технология изготовления позволит создать многопиксельные гетеродинные матрицы из NbN НЕВ смесителей с высокой однородностью параметров пикселей, составляющих матрицу.

Механизмы потерь поверхностных плазмон-поляритонов на гладкой металлической поверхности в терагерцовом диапазоне

В.С. Ванда^{1,2}, В.В. Герасимов^{1,2}, А.К. Никитин³, И.В. Оладышкин⁴

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

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³ Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

⁴ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
v.s.vanda@inp.nsk.su

В терагерцовом (ТГц) диапазоне потери поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) значительно превышают оценки омических потерь, использующих модель Друде для проводимости металлов. Данная проблема наблюдалась во многих экспериментальных работах более 40 лет [1, 2], причинами могут являться следующие эффекты: радиационные и омические потери, аномальный скин-эффект, повышение омических потерь и увеличение частоты столкновений из-за шероховатости металлического покрытия, вязкое трение электронов. Наибольший вклад в потери ППП в ТГц-диапазоне вносят радиационные потери, которые возникают из-за переизлучения ППП на оптических неоднородностях его поверхности [3], и могут превышать омические потери в десятки раз. Шероховатость металлического напыления приводит к появлению эффективного слоя, увеличивающего омические потери [4]; также возникают дополнительные столкновения электронов с границами зерен [5]. Кроме того, из-за экспоненциального затухания ППП электроны в металле колеблются с разной скоростью при удалении от границы, что приводит к вязкому трению электронов в скин-слое металла [6]. При ТГц-частотах толщина скин-слоя становится сравнимой с длиной свободного пробега, что свидетельствует о наличии слабого аномального скин-эффекта. В докладе будут подробно рассмотрены перечисленные выше механизмы потерь на плёнках золота с диэлектрическим покрытием из сульфида цинка. Теоретический анализ проводится в диапазоне длин волн от 130 до 358 мкм (0,8–2,3 ТГц) и сравнивается с экспериментальными данными, полученными на ТГц-излучении Новосибирского лазера на свободных электронах.

В работе использовалось оборудование центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» на базе уникальных научных установок «Новосибирский лазер на свободных электронах» в ИЯФ СО РАН.

1. Pandey S., et al. Non-Drude like behaviour of metal in the terahertz spectral range // *Advances in Physics: X*. 2016. Vol. 1, no. 2. P. 176–193.
2. Gerasimov V.V., et al. Obtaining the Effective Dielectric Permittivity of a Conducting Surface in the Terahertz Range via the Characteristics of Surface Plasmon Polaritons // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 13. P. 7898.
3. Gerasimov V.V., et al. Growth of terahertz surface plasmon propagation length due to thin-layer dielectric coating // *JOSA B*. 2016. Vol. 33, no. 11. P. 2196–2203.
4. Sambles J.R. Grain-boundary scattering and surface plasmon attenuation in noble metal films // *Solid state communications*. 1984. Vol. 49, no. 4. P. 343–345.
5. Vanda V.S., et al. Study of the effective optical characteristics of metal surfaces using terahertz surface plasmon interferometry // *Proceedings of 21st International Conference Laser Optics (ICLO)*. 2024. P. 67.
6. Forcella D., et al. Electromagnetic properties of viscous charged fluids // *Physical Review B*. 2014. Vol. 90, no. 3. P. 035143.

Исследование свойств нелинейно-оптических кристаллов в ТГц-области методом спонтанного параметрического рассеяния света

А.В. Веселовский, Т.И. Новикова, К.А. Кузнецов, Г.Х. Китаева

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва
veselovskii.av21@physics.msu.ru

В работе исследуются дисперсионные свойства нелинейных кристаллов ниобата и йодата лития в области терагерцовых частот путем регистрации оптической части спектров спонтанного параметрического рассеяния. Проанализировано влияние близости фоновых резонансов на величину поглощения кристаллов при комнатной температуре. Полученные результаты могут быть полезны для расширения частотного диапазона генерации квантово-коррелированных пар оптических и терагерцовых фотонов и определения оптимальных условий их генерации [1].

Спонтанное параметрическое рассеяние (СПР) представляет собой процесс распада в квадратично-нелинейной среде фотонов накачки (с частотой ω_p) на пары фотонов, называемых сигнальными и холостыми, с соответствующими частотами ω_s и ω_i , удовлетворяющими условию сохранения энергии $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ [2]. Если частота холостого фотона попадает в область решеточного поглощения среды, то СПР носит характер рассеяния света на фоновых поляритонах. СПР широко используется в современной квантовой оптике и информатике в качестве источника квантово-коррелированных пар фотонов (бифотонов) [1]. Продвижение квантовых технологий в терагерцовый диапазон имеет большие перспективы. В рамках исследования проводились эксперименты по регистрации частотно-угловых спектров сигнального излучения СПР в сильно частотно-невырожденном режиме, когда $\omega_i \ll \omega_s$ и холостые фотоны рождаются в терагерцовом диапазоне частот (0–30 ТГц).

Эксперименты проводились при комнатной температуре с использованием одномодового аргонного лазера непрерывного действия с длиной волны генерации 514,5 нм для накачки процессов СПР. В качестве нелинейной среды исследовались кристаллы легированного Mg ниобата лития и йодата лития. Частотно-угловые распределения сигнальных фотонов регистрировались ПЗС-камерой.

На условиях пространственного синхронизма, с использованием известных данных [3, 4] о значениях показателей преломления в видимом диапазоне, по частотно-угловым спектрам видимого сигнального излучения были определены значения показателей преломления кристаллов на терагерцовых частотах. Также путем анализа экспериментальных спектров были определены величины коэффициента поглощения в различных областях ТГц-диапазона.

1. Novikova T.I., Kuznetsov K.A., Leontyev A.A., Kitaeva G.Kh. Study of SPDC spectra to reveal temperature dependences for optical-terahertz biphotons // Applied Physics Letters. 2020. Vol. 116, iss. 26. 264003-1-264003-5.
2. Клышко Д.Н. Фотоны и нелинейная оптика. М : «Наука», 1980.
3. Kulevsky L., Polivanov Y.N., Poluektov S.N. Light scattering by polaritons in LiIO₃ // Journal of Raman Spectroscopy. 1975. Vol. 3. P. 239–254.
4. Китаева Г.Х., Кузнецов К.А., Наумова И.И., Пенин А.Н. Влияние дефектов структуры на оптические свойства монокристаллов LiNbO₃:Mg // Квантовая электроника. 2000. Т. 30.

Распределение интенсивности излучения в области дальнего поля терагерцового квантово-каскадного лазера с двойным металлическим волноводом: моделирование и экспериментальное исследование

Б.А. Жмудь^{1,2}, А.С. Соболев², А.В. Иконников³, А.Ю. Павлов¹, Р.А. Хабибуллин^{1,2}

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

² Московский физико-технический институт, Москва

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

zhmud.ba@phystech.edu

Нами было экспериментально измерено и численно смоделировано распределение интенсивности дальнего поля ТГц-квантово-каскадного лазера (ККЛ) с двойным металлическим волноводом, частота излучения которых находится в диапазоне $\sim 2\text{--}5$ ТГц. Были изготовлены экспериментальные образцы ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом, излучающие на частоте, приблизительно равной 3,2 ТГц, с различными значениями параметра ширины волновода w (включая значения, соответствующие случаю проволочного лазера, такие как $w = 20\text{--}30$ мкм, при которых поперечные размеры волновода гораздо меньше длины волны генерируемого излучения).

Среди особенностей предлагаемого подхода к моделированию резонаторных мод ТГц ККЛ следует отметить, что граничные условия при численных расчетах учитывали наличие сильнолегированной подложки и теплоотвода, расположенных под активной областью ККЛ и лежащих в одной плоскости с торцом ККЛ. Также для более точной оценки диэлектрической проницаемости гетероструктуры ККЛ было использовано приближение эффективной среды, в котором проницаемость каждого слоя материала рассчитывается согласно модели Друде – Лоренца [1]. Результат расчета амплитуды напряженности в области дальнего поля на основе численного моделирования собственных мод резонатора ККЛ представлен на рис. 1. Измерения интенсивности в области дальнего поля проводились при помощи оптико-акустического детектора «ячейки Голея», сканирующего плоскость в области дальнего поля ККЛ с помощью двух линейных трансляторов. Результат измерений приведен на рис. 2.

Работы выполнены при финансовой поддержке гранта ФСИ № 25ГУПКЭС18/91733.

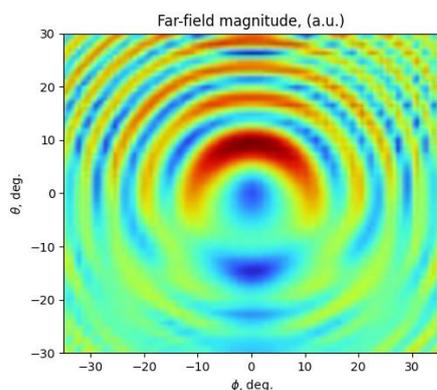


Рис. 1. Расчетная амплитуда напряженности поля в дальней зоне для резонатора ККЛ шириной 30 мкм на частоте 3,2 ТГц

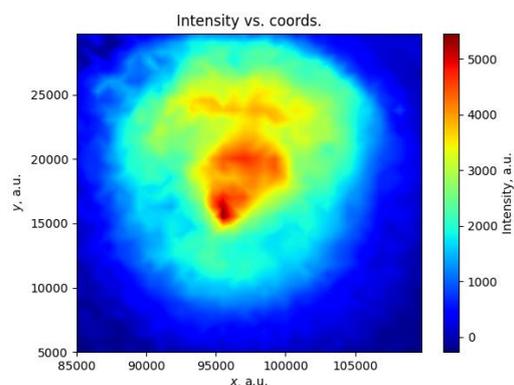


Рис. 2. Измеренная интенсивность дальнего поля ТГц ККЛ шириной 30 мкм, при частоте генерации 3,2 ТГц

1. *Blakemore J. S.* Semiconducting and other major properties of gallium arsenide // *J. Appl. Phys.* 1982. Vol. 53, iss. 10. R123-R181.

Измерение оптических констант металлических поверхностей с использованием терагерцевых поверхностных плазмон-поляритонов

В.Д. Кукотенко¹, В.В. Герасимов^{1,2}, В.С. Ванда^{1,2}, А.Г. Лемзяков^{1,3}, И.А. Азаров^{2,4}

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

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

⁴ Синхротронный источник «СКИФ», Кольцово, Новосибирская обл.

⁵ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск
v.d.kukotenko@inp.nsk.su

В настоящее время активно ведётся разработка плазмонных интегральных планарных схем для беспроводных коммуникационных устройств. Переход к терагерцевому (ТГц) диапазону частот открывает новые горизонты для увеличения скорости передачи и обработки данных [1]. При создании плазмонных интегральных схем, использующих поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) в качестве переносчиков информации, необходимо учитывать оптические свойства используемых поверхностей, однако существующие в ТГц-диапазоне классические методы оказываются недостаточно чувствительными к переходным слоям металлических поверхностей и тонким пленкам, размеры которых значительно меньше длины волны оптического излучения.

В данной работе будут представлены результаты для эффективных оптических констант поверхностей металлических пленок, нанесенных на плоские подложки с разной шероховатостью, определенные по измеренным значениям длины пробега и глубины проникновения ППП на длине волны 197 мкм. Для измерения длины пробега использовался ТГц плазмонный интерферометр [2], а для глубины проникновения – метод «экранирования» [3]. В качестве тестовых образцов использовались стеклянные подложки с нанесенным слоем золота с дополнительным напылением из сульфида цинка (ZnS) разной толщины. Источником ТГц-излучения служил Новосибирский лазер на свободных электронах.

В работе использовалось оборудование центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения» на базе уникальных научных установок «Новосибирский лазер на свободных электронах» в ИЯФ СО РАН.

1. Zhang H.C., Zhang L.P., He P.H., Xu J., Qian C., Garcia-Vidal F.J., Cui T.J. A Plasmonic Route for the Integrated Wireless Communication of Subdiffraction-Limited Signals // *Light Sci Appl*. 2020. Vol. 9, no. 113. doi:10.1038/s41377-020-00355-y.

2. Герасимов В.В., Никитин А.К., Лемзяков А.Г. Планарный интерферометр Майкельсона на поверхностных плазмонах терагерцевого диапазона // *Приборы и техника эксперимента*. 2023. № 3. С. 67–79.

3. Kukotenko V.D. Gerasimov V.V. Approaches to the Study of the Evanescent Field of Terahertz Surface Plasmon Polaritons at the Novosibirsk Free Electron Laser // *Proceedings of the Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies X*; E., Y., Tani, M., Zhang, C., Eds.; SPIE: Beijing, China. 2023. November 26. P. 6.

Эффективный преобразователь импульсов фемтосекундного оптического осциллятора в коллимированное терагерцовое излучение

М.А. Курников¹, А.И. Шугуров¹, С.Б. Бодров^{1,2}, М.И. Бакунов¹

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

² Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
kurnikov.michail@yandex.ru

В настоящее время активно развиваются методы нелинейного преобразования импульсов фемтосекундных оптических усилителей (с энергией >1 мДж и частотой повторения ~ 1 кГц) в терагерцовые поля высокой (>1 МВ/см) напряженности. Между тем для достижения высоких значений отношения сигнал/шум в таких приложениях, как терагерцовая спектроскопия во временной области (THz-TDS) и терагерцовая сканирующая туннельная микроскопия (THz-STM), предпочтительным является преобразование импульсов оптических осцилляторов с меньшей (в несколько нДж) энергией, но более высокой (~ 100 МГц) частотой повторения.

В работе экспериментально продемонстрирован оптико-терагерцовый преобразователь, обеспечивающий не только рекордную эффективность преобразования импульсов оптического осциллятора ($\sim 0,06\%$ при энергии импульса накачки в 7 нДж), но и генерацию на выходе удобного для практического использования коллимированного терагерцового пучка. При этом ширина генерируемого спектра достигала ~ 6 ТГц.

Преобразователь состоит из слоя кристалла LiNbO_3 толщиной 20 микрон, расположенного между подложкой из плавленого кварца и кремниевым полуконусом. Распространяющийся в слое LiNbO_3 лазерный импульс испытывает оптическое выпрямление и излучает черенковский конус терагерцовых волн в кремниевый полуконус, который является принципиальной особенностью дизайна конвертора и служит для коллимации терагерцового излучения и его вывода в свободное пространство. Коллимация обеспечивается вследствие полного внутреннего отражения терагерцовых волн от боковой поверхности полуконуса в направлении его основания, через которое излучение и выводится.

Преобразователь на два порядка превосходит по эффективности стандартную коллинеарную схему преобразования в кристалле ZnTe и на порядок – преобразователи с выводом излучения через согласующую кремниевую призму [1, 2].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (FSWR-2020-0035).

1. *Bakunov M.I., et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101, no. 15. Art. 151102.*

2. *Kurnikov M.A., et al. // Photonics. 2024. Vol. 11, no. 1. P. 62.*

Исследование проникновения микроволнового сигнала в резонатор ТГц квантово-каскадных лазеров

С.С. Пушкарёв^{1,2}, М.В. Майтама¹, А.В. Зуев², Р.А. Хабибуллин^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный

² Институт СВЧ полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва
serp456207@gmail.com

Для систем визуализации, спектроскопии и беспроводной связи терагерцового (ТГц) диапазона необходимы эффективные источники *модулированного* (подчеркнём это слово) ТГц-излучения. Лазеры с синхронизацией мод являются наиболее мощными генераторами ультракоротких импульсов света и используются для множества применений. Для синхронизации мод нужно создать внутри лазера такие условия, чтобы фазы различных мод были связаны друг с другом некоторым постоянным во времени соотношением [1]. Впервые активная синхронизация мод в ТГц квантово-каскадных лазерах (ККЛ) благодаря модуляции тока, протекающего через ККЛ, с частотой полного обхода резонатора импульсом ТГц-излучения была получена в работе [2].

Модуляция тока эквивалентна модуляции усиления активной среды, при этом значение тока должно быть близко к току отсечки. Частота обхода резонатора определяется длиной резонатора, скоростью распространения электромагнитных волн в активной среде ККЛ и составляет десятки гигагерц.

С помощью векторного анализатора, связанного с зондовой станцией, в диапазоне частот $0 < f < 67$ ГГц был измерен комплексный коэффициент отражения (по напряжению) от входа волновода ТГц ККЛ (S_{11} параметр) для набора ТГц ККЛ AlGaAs/GaAs с двойным металлическим волноводом, с резонатором Фабри – Перо на торцевых сколах, с длинами полосков в диапазоне 0,5–3,0 мм.

В дальнейшем сигналом на частоте f мы будем называть значение $1 - |S_{11}(f)|^2$ [3]. Показано, что проникновение микроволнового сигнала в резонатор ТГц ККЛ максимально при совпадении частоты подаваемого сигнала с собственными частотами резонатора, вследствие чего график $1 - |S_{11}(f)|^2$ имеет вид постепенно затухающих эквидистантных осцилляций. Собственные частоты резонатора кратны друг другу и обратно пропорциональны длине резонатора L ; точки на графике f от $1/L$ ложатся на прямую, проходящую через начало координат. Обнаружено, что глубина осцилляций (разность сигнала между максимумом и следующим за ним минимумом) коррелирует со средним значением сигнала: большему среднему значению сигнала соответствует большая глубина осцилляций. Также обнаружено, что глубина осцилляций коррелирует с длиной полоска: более глубокие осцилляции наблюдаются для более коротких полосков. Максимальное значение сигнала в среднем убывает с ростом длины полоска (хотя корреляция не настолько же явно выражена, как в предыдущем случае).

Проще модулировать ККЛ с длинными резонаторами, так как они обладают более низкими собственными частотами, однако СВЧ-мощность проникает в них хуже. Представляется оптимальным для модуляции выбрать ККЛ с резонатором длиной 1,8–2,0 мм, модулируя подаваемое на них напряжение с частотой в диапазоне 22,4–24,8 ГГц.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-49- 10004, <https://rscf.ru/project/24-49-10004/>.

1. *Орацио Звелто*. Принципы лазеров / пер. под науч. ред. Т.А. Шмаонова ; 4-е изд. Санкт-Петербург : Издательство «Лань», 2008. 720 с.
2. *Barbieri S., et al.* // Nat. Photonics. 2011. Vol. 5, no. 5. P. 306–313. DOI: 10.1038/nphoton.2011.49.
3. *Maineult W., et al.* // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 96. P. 021108. DOI: 10.1063/1.3284518.

**ПРИЕМНИКИ
МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,
СПЕКТРОСКОПИЯ И МЕТРОЛОГИЯ**

Актуальные задачи и перспективы миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

И.И. Зинченко

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
zin@ipfran.ru

В последнее время активизировалось обсуждение возможностей развития миллиметровой радиоастрономии в РФ. Ведутся работы по использованию БТА для наблюдений в этом диапазоне. Идет подготовка космического телескопа «Миллиметрон». Обсуждаются другие проекты. В данном обзоре кратко описываются актуальные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии и перспективы ее развития, в том числе в РФ, включая выбор мест возможного размещения инструментов этого диапазона.

Поддержано грантом РНФ № 24-12-00153.

Современные средства микроволновой коммуникации и новые вызовы

В.Ф. Вдовин¹, З.П. Куприянов², П.В. Куприянов³, С.А. Петров², Е.В. Терешкин³, С.А. Тимофеев²

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

² АО НПК «ТРИСТАН», Москва

³ АО НПП «Исток» им. Шокина, Фрязино

kupriyanov64@mail.ru

Абонентские терминалы (АТ) системы спутниковой связи «Starlink» благодаря своим высоким потребительским качествам стали одной из основных составляющих зарубежной инфраструктуры связи и управления в самых различных областях применения. Они обеспечивают устойчивую связь с космическими аппаратами системы глобального широкополосного доступа компании «Space-X» со скоростью передачи информации порядка 150 Мбит/с по нисходящей и 30 Мбит/с по восходящей линии связи.

Целью настоящей публикации является исследование различных технических аспектов обнаружения и пеленгации восходящей линии связи мобильных АТ «Starlink» средствами радиомониторинга.

Некоторые зарубежные источники утверждают, что по результатам нескольких независимых исследований возможности обнаружения излучения используемых в терминалах «Starlink» АФАР ограничены дистанциями, не превышающими 300 м. Под этим утверждением есть определенные основания, так как наблюдение сигнала восходящей линии связи возможно осуществить практически только по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны.

Понимание реальных возможностей существующей отечественной аппаратуры по обнаружению, идентификации и пеленгации требует максимально полной информации о радиотехнической структуре сигнала восходящей линии связи АТ «Starlink». Для решения этой задачи был проведен натурный радиотехнический эксперимент по исследованию сигнатуры сигнала подключенного терминала в рабочем режиме при передаче данных на спутник.

Основные результаты эксперимента приведены в сообщении. Предварительные оценки показывают возможность достижения дальности обнаружения АТ «Starlink» от 10 до 20 километров.

Анализ вспышечной активности мазеров H_2O

А.В. Лапинов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
lapinov@ipfran.ru

Приведены результаты мониторинга мазеров H_2O , выполнявшегося при помощи РТ-22 Пушинской радиоастрономической обсерватории на частоте 22,235 ГГц в 2023–2024 гг. Измерения проводились в линейной поляризации в направлении нескольких десятков областей, связанных с формированием звёзд большой массы. Особое внимание уделяется точности калибровки, коррекции наблюдений на поглощение в атмосфере, измерению параметров радиотелескопа.

Используя квантово-механический формализм в приложении к лабораторным измерениям сверхтонко-расщеплённого перехода $J_{\text{Ka,Kc}} = 6_{1,6} - 5_{2,3}$, получены уточнённые значения частот, а также констант спин-вращательного и спин-спинового взаимодействия. Несмотря на более чем 50-летние наблюдения мазеров H_2O , впервые как теоретически, так и экспериментально показано, что при большой отрицательной оптической толщине мы можем не просто не видеть никаких признаков сверхтонкого расщепления, но наблюдать лишь единственную сверхтонкую компоненту $F = 7-6$, даже если она относительно мало превышает по интенсивности остальные компоненты в тепловом случае. Приведены сравнения результатов выполненных расчетов с наблюдениями наиболее узких профилей мазерных линий H_2O .

Излагается подробный анализ оценок магнитных полей в областях звездообразования на основе эффекта Зеемана по линиям H_2O , наблюдавшимся в правой и левой круговых поляризациях при помощи 32-метровых радиотелескопов Института прикладной астрономии РАН.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-12-00153, <https://rscf.ru/project/24-12-00153/>).

RF TES-детекторы для радиоастрономии и квантовых цепей

С.В. Шитов, В.И. Чичков, Л.С. Соломатов, А.В. Меренков, Н.Ю. Руденко

НИТУ МИСИС, Москва
sergey3e@gmail.com

Новая полностью отечественная технология RF TES (Radio Frequency Transition Edge Sensor) основана на нелинейном отклике импеданса сверхпроводниковой пленки вблизи ее критической температуры (T_c). Результаты исследований, проведенных в широком диапазоне частот 1,4–750 ГГц при температурах 50 мК–5 К, позволяют позиционировать ее как интересную опцию для радиоастрономических приемников, использующих системы охлаждения замкнутого цикла, в том числе на борту перспективных космических обсерваторий, а также в качестве детекторов для дисперсионного считывания состояния сверхпроводящих кубитов. Нелинейность сверхпроводящего мостика вблизи T_c управляет добротностью сверхпроводящего микрорезонатора СВЧ. Однослойная планарная структура включает микромостик, включенный одновременно в цепь тока резонатора $\sim 1,5$ ГГц и в цепь приемной антенны 550–750 ГГц, помещенной в фокус диэлектрической иммерсионной линзы. Использование RF TES-детекторов для матрицы по методу FDM проще, чем для MKID, так как резонаторы не меняют свою частоту и менее чувствительны к нестабильности опорного генератора. Такие матрицы могут быть изображающими или многочастотными в зависимости от того, как настроены планарные антенны каждого пикселя. Полоса приема антенн определяет полосу пикселя и может быть скорректирована с помощью дополнительных фильтров. Авторы проекта не видят принципиальных ограничений при использовании RF TES-технологии в традиционных волноводных системах, а также при интеграции в схемы с кубитами.

Технология RF TES прошла этап испытания экспериментальных образцов, для которых в качестве материала электронного поглотителя использовались тонкие (~ 50 нм) пленки гафния с критической температурой в диапазоне 200–400 мК; мостики из такого материала технологически совместимы с копланарными резонаторами из ниобия $Q \sim 10\,000$, проявляя нелинейность, аналогичную сверхпроводящему переходу. При этом роль постоянного тока берет на себя амплитуда СВЧ-накачки. Измерения методом чернотельного излучателя позволили определить оптическую чувствительность $NEP \sim 10^{-17}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и коэффициент передачи мощности более +3 дБ соответственно [DOI: 10.21883/FTT.2022.10.53081.50HH], что практически совпало с теоретическими предсказаниями. Недавние эксперименты при температуре 60–80 мК позволяют оценить $NEP < 10^{-18}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ для образцов изготовленных с применением оптической литографии. При переходе к электронно-лучевой литографии ожидается $NEP \sim 10^{-20}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что позволит в перспективе перейти к линейному детектированию одиночных ТГц-фотонов, а также распознавать одновременное поглощение одного или нескольких фотонов, что затруднительно для пороговых счетчиков фотонов.

Перспективными устройствами на основе RF TES-технологии являются термодинамические излучатели, а также новые интегральные устройства: дифференциальный детектор [патент RU 2 801 920 C1] и активный ТГц-детектор с встроенным параметрическим усилителем [DOI: 10.21883/JTF.2023.07. 55758.116-23], [патент RU 2 801 961 C1], а также тепловой детектор для считывания квантовых состояний сверхпроводящих кубитов [патентная заявка в процессе подготовки]. Исследование выполнялось при помощи гранта Российского научного фонда № 24-29-20298, <https://rscf.ru/project/24-29-20298/>.

Натурные и численные исследования атмосферных условий в приложении к миллиметровым телескопам наземного базирования

А.Ю. Шиховцев¹, П.Г. Ковадло¹, К.Е. Кириченко¹, В.Б. Хайкин², А.П. Миронов³, А.А. Леженин⁴,
В.С. Градов⁴

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

² Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

⁴ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск
ashikhovtsev@mail.iszf.irk.ru

Настоящая работа посвящена изучению атмосферных условий в приложении к выбору новых астроплощадок под миллиметровые телескопы наземного базирования. В основе лежат данные измерений, выполненные с помощью ГНСС станций, атмосферного радиозондирования, полуэмпирические данные реанализа последнего поколения ERA-5 и реанализа UERRA. Для различных пунктов на территории РФ приводятся сравнительные графики между данными различных источников (различных средств измерений). Обсуждаются амплитуды завышения значений осажденного водяного пара в реанализе ERA-5 для горных вершин, наиболее благоприятных для установки миллиметровых телескопов. Предлагается модификация метода коррекции значений осажденного водяного пара для условий низкой оптической толщи атмосферы. По результатам обработки данных реанализа ERA-5 получено пространственное распределение осажденного водяного пара, релевантное с точки зрения выбора астроплощадок под миллиметровые телескопы наземного базирования. Для различных длин волн (частот) приводятся оценки оптических толщин в выбранных пунктах.

Показано, что пространственные распределения осажденного водяного пара, как и поле приземного ветра, могут быть детализированы с применением мезомасштабной модели WRF. Особенностью настройки мезомасштабной модели WRF для диагностики и прогноза метеорологических полей является корректный выбор схем параметризаций наиболее близко описывающих выделенные физические процессы в рамках некоторых наблюдающихся атмосферных условий.

Исследование выполнено при помощи гранта Российского научного фонда № 24-72-10043, <https://rscf.ru/project/24-72-10043/>.

Техническое задание на антенну для радиоастрономических исследований в субтерагерцовом диапазоне частот

Ю.Ю. Балег¹, С.А. Баранов², В.Ф. Вдовин^{1,3}, М.В. Ефимова³, С.А. Капустин^{3,4}, И.В. Леснов^{3,4},
М.А. Мансфельд^{1,3}, А.С. Марухно^{1,3}, К.В. Минеев^{3,4}, В.А. Столяров¹

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз

² Муромский машиностроительный завод, Муром

³ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

⁴ Нижегородский технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород
vdovin_iap@mail.ru

В начале 2024 г. Специальная астрофизическая обсерватория (САО) РАН и ИПФ РАН совместно с Муромским машиностроительным заводом (ММЗ) [1] объявили о начале разработки первого в России радиотелескопа для субтерагерцовой (суб-ТГц) астрономии и иных приложений диаметром до 15 м. Мотивацией этой разработки стало полное отсутствие радиотелескопов подобного класса на территории России и сопредельных государств, что не только лишает страну возможности работать в этом перспективном диапазоне, но и является серьезным тормозом развития мировых РСДБ сетей, поскольку столь огромное пространство, не заполненное элементами мировой сети, делает покрытие UV-плоскости довольно плохим. Для ММЗ участие и готовность вложиться в казалось бы проблемный в экономическом плане проект состоит в понимании неизбежной востребованности уже в ближайшие годы субТГц-антенн для задач телекоммуникаций и радиолокации и незаполненность этого сегмента рынка в России. К осени 2024 г. был сформулирован основной перечень возможных научных задач для такого инструмента [2], сформулированы исходные данные для составления технического задания [3] на субТГц-антенную систему диаметром до 15 м с СКО не хуже 20 мкм, а также начата реализация проекта РНФ по созданию и отработке прототипа субТГц-рефлекторной антенны на базе оптического телескопа БТА САО РАН [4].

В докладе приведено разработанное в рамках сотрудничества техническое задание на антенну, включая базовый комплект криоэлектронных и сверхпроводниковых приемников субТГц-диапазона с системами глубокого (субкельвинного уровня – до 0,3 К) криогенного охлаждения. В качестве условий эксплуатации техническое задание подразумевает самые жесткие климатические условия, характерные для оптимальных мест размещения высокоэффективного субТГц-радиотелескопа – локации с чрезвычайно низкими температурами, высокогорье, высокая сейсмичность и т. п. Возможности применения антенны помимо радиоастрономии для задач радиолокации, в частности космического мусора, предъявляют особые требования к характеристикам антенно-поворотного устройства, скоростям и точностям сопровождения.

1. Балег Ю.Ю., Столяров В.А., Баранов С.А. О некоторых подходах к реализации субтерагерцового радиотелескопа на территории Российской Федерации – Всероссийские открытые Армандовские чтения. Муром : МИ ВлГУ, 2024. С. 49–58.

2. Столяров В.А., Балег Ю.Ю., Мингалиев М.Г. и др. Перспективы развития миллиметровой астрономии в САО РАН // Астрофизический бюллетень, 2024. Т. 79, № 2. С. 331–349. DOI 10.1134/s199034132460046711

3. Balega Yu., Bubnov G., Chekushkin A., et al. Microwave Receiving System Based on Cryogenic Sensors for the Optical Big Telescope Alt-Azimuth // Sensors, 2024. Vol. 24. P. 359. <https://doi.org/10.3390/s24020359>

4. Balega Y., Baranov S., Stolyarov V., et al. Development of a ground-based sub-THz radio telescopes - IEEE access 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC) - 979-8-3315-4094-4/24/\$31.00 ©2024 IEEE

Квазиоптический матричный радиолокатор миллиметрового диапазона

С.А. Королёв, А.В. Зайцев

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
pesh@ipm.sci-nnov.ru

Для формирования картины окружающего пространства в автономных транспортных средствах, как показывает опыт, должны быть использованы устройства, работающие в различных диапазонах электромагнитного спектра, что обеспечивает полноту и надёжность получаемой информации. Список необходимых устройств включает в себя видеокамеру, сканирующий лазерный локатор (лидар) и матричный радиолокатор. В современных транспортных средствах с элементами автономного управления для получения радиолокационных данных используется метод ММО (multiple input multiple output), ключевую роль в котором играет цифровая обработка сигнала. Это накладывает ограничения на число элементов в приёмно-передающей матрице радиолокатора и, как следствие, на разрешение получаемого изображения.

В данной работе исследуется альтернативный подход к созданию матричного радиолокатора миллиметрового диапазона, в основе которого лежит аналоговый метод формирования изображения. Предлагаемый подход базируется 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. В описываемой системе формирование изображения вдоль угловых координат осуществляется благодаря квазиоптическому объективу, а определение расстояния до объектов – при использовании метода радиолокации непрерывным излучением с частотной модуляцией.

В рамках проведённого исследования были разработаны и изучены характеристики двух радиолокаторов диапазона 94 ГГц с разрешением матрицы 8×8 пикселей, отличающихся типами квазиоптических объективов.

Был разработан макет матричного радиолокатора с зеркальным объективом в виде параболической рефлекторной антенны, широко используемой в спутниковой радиосвязи. Продемонстрировано, что при мощности излучаемого сигнала 4 мВт, ширине луча засветки 10° и диаметре объектива 60 см система позволяет обнаружить объект с эффективной площадью рассеяния 1 м^2 на расстоянии до 50 м.

Был разработан макет матричного радиолокатора с квазиоптическим объективом на основе диэлектрической линзы. Теоретически и экспериментально исследовано влияние формы и искажений модулирующего сигнала на чувствительность радиолокатора. Оптимальный выбор формы и параметров модулирующего сигнала позволяет на порядок увеличить дальность действия радиолокатора. Продемонстрировано, что при мощности излучаемого сигнала 15 мВт, ширине луча засветки 30° – 34° и диаметре объектива 10 см система позволяет обнаружить объект с эффективной площадью рассеяния 1 м^2 на расстоянии до 100 м.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00129). В работе использовано оборудование ЦКП ИФМ РАН «Физика и технология микро- и наноструктур».

Неэмпирическое моделирование континуума неполярных молекул для задач распространения мм-субмм-излучения

М.А. Кошелев¹, Т.А. Галанина¹, Е.А. Серов¹, А.О. Королева¹, И.С. Амерханов¹,
А.Ю. Секачева¹, М.Ю. Третьяков¹, Д.Н. Чистиков², А.А. Финенко², А.А. Вигасин²

¹ Институт прикладной физики РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, ИПФ РАН

i.amer@mail.ru

Моделирование радиационных и климатических свойств атмосфер планет требует высокой точности теоретического описания спектров атмосферных молекул. До настоящего времени значительные трудности представляет описание континуального поглощения, модели которого содержат эмпирически определяемые параметры. Механизмы возникновения континуального поглощения являются общими для всех газовых смесей, поэтому изучение континуума неполярных молекул представляется перспективным шагом на пути к его неэмпирическому описанию.

Известно, что природа континуального поглощения обусловлена столкновительным межмолекулярным взаимодействием и при не очень высоких давлениях полностью определяется образованием молекулярных пар [1]. Одним из наиболее эффективных методов исследования столкновительных взаимодействий считается метод классических траекторий [2], но практическое применение его результатов требует предварительной экспериментальной верификации в максимально доступном диапазоне частот и температур. Данная работа посвящена детальной проверке результатов траекторных расчетов бимолекулярного поглощения в системе N_2-N_2 сопоставлением с лабораторными данными.

В традиционном для радиометрии мм-субмм-диапазоне длин волн у газообразного азота отсутствует электродипольный резонансный спектр, и все наблюдаемое в эксперименте поглощение является континуальным. Отметим, что знание континуального спектра поглощения азота необходимо для точного описания распространения излучения в верхних слоях земной атмосферы.

Поглощение в чистом N_2 измерено в диапазоне частот от 70 до 360 ГГц и температур в интервале от 265 до 310 К с помощью резонаторного спектрометра [3]. Результаты эксперимента согласуются с предыдущими наблюдениями [4, 5] и с расчетом бимолекулярного поглощения методом классических траекторий [2]. На основе численных результатов траекторных расчетов разработана неэмпирическая модель поглощения излучения в чистом азоте в диапазоне частот от 0 до 1,2 ТГц и температур от 70 до 330 К. Новая модель может быть непосредственно использована при радиометрии атмосферы Титана и с учетом коррекции для земной атмосферы.

1. *Vigasin A.A. Molecular Complexes in Earth's, Planetary Cometary and Interstellar Atmospheres* / A.A. Vigasin and Z. Slanina, eds. World Scientific, 1998. P. 177–193.
2. *Chistikov D.N., et al. // J. Chem. Phys., 151, 194106 (2019).*
3. *Koshelev M.A., et al. // IEEE Trans. Terahertz. Sci. Technol. 2018. Vol. 8, no. 6. P. 773.*
4. *Serov E.A., et al. // J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans. 2020. 242, 106774.*
5. *Meshkov A.I., De Lucia F.C. // J. Quant Spectrosc. Rad. Trans., 2007. Vol. 108, no. 2. P. 256–276.*

О применимости полуклассических траекторных расчётов для описания формы дальних крыльев молекулярных линий

А.Ю. Секачева¹, Е.А. Серов¹, Т.А. Галанина¹, М.А. Кошелёв¹, А.О. Королева¹, И.С. Амерханов¹, М.Ю. Третьяков¹, Д.Н. Чистиков², А.А. Финенко², А.А. Вигасин²

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

a.sekacheva@ipfran.ru

Природа континуального поглощения атмосферных газов, несомненно, обусловлена межмолекулярным взаимодействием. Однако теоретическая трактовка этой взаимосвязи до сих пор является неполной и даже противоречивой. На протяжении длительного времени считалось, что формирование континуума связано с кумулятивным эффектом далеких крыльев резонансных линий индивидуальных молекул – мономеров. Продолжительное существование этой гипотезы обусловлено тем, что до настоящего времени не удалось построить неэмпирическую теорию формы спектральных линий в области далеких крыльев. Альтернативная гипотеза исходит из того, что формирование континуума связано с различными типами молекулярных пар – от свободных пар, в которых принимают участие два несвязанных мономера, до стабильных ван-дер-ваальсовских димеров [1]. Вносят ли эти молекулярные пары свой вклад в далекие крылья резонансных линий мономеров – до сих пор не ясно. Очевидно, впрочем, что поглощение в крыльях линий связано с более сложным, чем в ударном приближении, процессом межмолекулярного возмущения.

Полуклассический метод траекторных расчетов [2, 3] предоставляет возможность детального рассмотрения влияния парных межмолекулярных взаимодействий на поглощательную способность газов. До настоящего времени работоспособность этого метода была продемонстрирована на примере неэмпирических расчетов континуального поглощения в различных газах и газовых смесях, мономеров которых не имеют постоянного дипольного момента. Одним из примеров может служить система CO₂-Ar, для которой были проведены широкие сопоставления теоретических и лабораторных спектров [4]. Представляет интерес обобщить траекторную методику на случай дипольных молекул. Настоящая работа посвящена обсуждению некоторых проблем, связанных с таким обобщением, а также изложению первых результатов применения траекторной методики для построения спектров CO-Ar в микроволновой области.

1. *Vigasin A.A.* Bimolecular absorption in atmospheric gases // *Weakly Interacting Molecular Pairs: Unconventional Absorbers of Radiation in the Atmosphere*. 2003. P. 23–48.
2. *Serov E.A., et al.* // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2017. Vol. 193. P. 1–12.
3. *Chistikov D.N., et al.* // *J. Chem. Phys.* 2019. Vol. 151. P. 194106.
4. *Galanina T.A., et al.* // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2024. Vol. 26. P. 15032–15043.

Физика межмолекулярных взаимодействий для атмосферных приложений

А.О. Королева, Т.А. Галанина, М.А. Кошелев, М.Ю. Третьяков

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
koral@ipfran.ru

Для построения физически обоснованной модели атмосферного поглощения можно представить его как сумму моно- и бимолекулярного поглощения (спектров одиночных молекул-мономеров, двигающихся в поле потенциала парного взаимодействия, и молекулярных пар, которые поглощают излучение как один объект). Взаимосвязь носителей этих эффектов (поглощающих объектов) делает строгое теоретическое разделение общего поглощения сложной задачей, для решения которой требуется детальный анализ процессов, происходящих при столкновениях.

Современные высокоточные спектроскопические измерения выявили эффект уменьшения измеряемой интегральной интенсивности молекулярных резонансных линий с ростом давления [1, 2], сопровождающийся одновременным (и в точности соответствующим этому уменьшению) ростом интегральной интенсивности континуума под резонансными линиями [2]. Авторы [1, 2] интерпретируют наблюдаемый эффект как проявление «суперлоренцевых» крыльев линий мономеров, несмотря на (а) возможность альтернативной интерпретации как бимолекулярного поглощения [3, 4], и (б) на принципиальную невозможность описания таким способом спектральных особенностей, связанных с димерами, которые образуются в результате столкновений.

Опираясь на данные о втором вириальном коэффициенте (который связан с количеством образующихся димеров), мы смоделировали переход интенсивности резонансного поглощения в бимолекулярный спектр. Полученный результат количественно согласуется как с результатами работ [1, 2], так и с результатами наших измерений спектра CO-Ar, в дальнем ИК-диапазоне с помощью техники фурье-спектроскопии с синхротронным источником излучения. Согласие наблюдаемого континуума с расчётным бимолекулярным спектром не оставляет места для суперлоренцева поведения крыльев линий мономеров и соответствует их физически обоснованному сублоренцеву поведению [5]. Представленные результаты демонстрируют возможность разделения поглощения в газах на моно- и бимолекулярное.

1. Reed Z. D., Tran H., Ngo H.N., Hartmann J.-M., Hodges J.T. // Phys. Rev. Lett. 2023. Vol. 130. P. 143001.
2. Birk M., Röske C., Wagner G. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2024. Vol. 324. P. 109055.
3. Kouzov A.P., Tokhadze K.G., Utkina S.S. // Eur. Phys. J. D. 2000. Vol. 12. P. 153.
4. Vigin A.A., Ivanov S.V. // Chem. Phys. 2006. Vol. 325 (no. 2/3). P. 404.
5. Serov E.A., Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu., Semenov V.E. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2017. Vol. 193. P. 1–12.

Физически обоснованное моделирование континуального поглощения водяного пара в субТГц-диапазоне частот для атмосферных приложений

М.Ю. Третьяков¹, Т.А. Галанина¹, А.О. Королева¹, Д.С. Макаров¹, Д.Н. Чистиков²,
А.А. Финенко², А.А. Вигасин²

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва
dmak@ipfran.ru

Нерезонансную составляющую поглощения атмосферных молекул – континуальное поглощение или континуум – не удается представить в виде суммы отдельных спектральных линий молекул. Причина состоит в том, что континуум по своей природе связан со слабыми взаимодействиями ван-дер-ваальсовского типа в ансамбле молекул, составляющих газовую атмосферу. Несмотря на продолжающиеся почти сто лет теоретические и экспериментальные исследования природы континуума, его учет в практических приложениях опирается по-прежнему на применение эмпирических и полуэмпирических моделей, таких, как, например, МРМ (millimeter-wave propagation model) [1]. Основываясь на накопленной к настоящему времени экспериментальной и теоретической информации о континууме водяного пара (см. [2, 3] и ссылки там), мы предлагаем физически обоснованную модель континуума для практического применения в субтерагерцовом диапазоне частот (0-1 ТГц).

Континуум водяного пара складывается из линейной (сторонний континуум) и квадратичной (собственный континуум) по давлению H_2O составляющих. Собственный континуум H_2O возникает, главным образом, из-за парных взаимодействий между молекулами воды. В предлагаемой модели он включает в себя сумму спектров связанных и квазисвязанных димеров, которые оцениваются с использованием данных о втором вириальном коэффициенте водяного пара и результатов расчета *ab initio* спектра поглощения димерами воды [4]. Вклад, вносимый дальними крыльями резонансных линий мономера H_2O , учтен с помощью простой аналитической функции, аппроксимирующей доступные эмпирические данные [3]. Сторонний континуум водяного пара возникает из-за взаимодействия молекул воды с молекулами других газов, в атмосферном воздухе – преимущественно азота и кислорода. В модели он учитывается в стандартной эмпирической форме из-за отсутствия информации для проведения такого же анализа, как для собственного континуума. Значения коэффициентов этой аппроксимации были обновлены для достижения лучшего согласия с результатами лабораторных измерений в диапазоне ниже одного ТГц. Полученная при этом температурная зависимость собственного и стороннего модельного континуума согласуется с ее теоретическими оценками на основе закона о равномерном распределении энергии между степенями свободы [4].

Представленная модель в целом хорошо согласуется с современными версиями моделей распространения в атмосфере. Однако яркостная температура атмосферы, рассчитанная с использованием новой модели, систематически отличается от результатов, полученных с помощью модели МРМ. Отклонение составляет до нескольких градусов Кельвина в микроокнах между резонансными линиями воды.

Работа поддержана проектом РНФ № 22-72-10118 (rscf.ru/project/22-72-10118/).

1. *Rosenkranz P.W.* // *RadioScience*. 1998. Vol. 33, no. 4. P. 919.
2. *Odintsova T.A., et al.* // *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transf.* 2019. Vol. 227. P. 190.
3. *Serov E. A., et al.* // *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transf.* 2017. Vol. 193. P. 1.
4. *Scribano Y., Leforestier C.* // *J. Chem. Phys.* 2007. Vol. 126. P. 234301.
5. *Vigasin A.A.* // *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transf.* 2000. Vol. 64. P. 25–40.

Приемники для поиска темной материи и исследования свойств нейтрино

А.Л. Панкратов, Д.А. Ладейнов, А.В. Гордеева, А.В. Чигинев, Л.С. Ревин,
В.Ю. Сафонова, Д.А. Пиманов, А.В. Благодаткин

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
alp@ipmras.ru

Будет изложен текущий прогресс в области микроволновых детекторов одиночных фотонов диапазона частот 5–15 ГГц для поиска реликтовых аксионов [1, 2]. Разработан, изготовлен и изучен прототип счётчика одиночных микроволновых фотонов на основе алюминиевого СИС-перехода. Исследованы как большие, так и малые джозефсоновские контакты с критическими токами от десятков нА до единиц мкА [3]. Достигнутые скорости темнового счета оказались намного ниже, чем ожидалось из существовавших ранее теорий, по причине работы СИС-перехода в режиме фазовой диффузии [1–3]. В качестве источников микроволновых фотонов используются классические источники – синтезаторы, дающие пуассоновскую статистику фотонов и СВЧ-резонаторы, являющиеся источниками тепловых фотонов. Показано, что эффективность детектирования тепловых фотонов достигает 45%, при этом наблюдается супер-Пуассоновская статистика, подтверждающая их природу [2].

Будет изложен текущий прогресс в создании детекторов на основе сенсоров на краю сверхпроводящего перехода, а также туннельных контактов сверхпроводник / изолятор / нормальный металл (СИН). Такие детекторы могут быть использованы как в качестве микрокалориметров с чувствительностями до 0,03 эВ [4], так и болометров для приема сигналов ТГц-диапазона частот. Оба типа детекторов являются перспективными для использования совместно с поглотителями на основе кремния и тулиевого граната для исследования электромагнитных свойств нейтрино и поиска солнечных аксионов.

Работа поддержана проектом 8 направления НЦФМ, а также грантом РФФ № 21-79-20227.

1. *Pankratov A.L., Revin L.S., Gordeeva A.V., Yablokov A.A., Kuzmin L.S., Il'ichev E.* // *Quantum Inf.* 2022. Vol. 8. P. 61. <https://doi.org/10.1038/s41534-022-00569-5>.
2. *Pankratov A.L., et. al.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.10434>.
3. *Pankratov A.L., Ladeynov D.A., Revin L.S., Gordeeva A.V., Il'ichev E.V.* // *Chaos, Solitons & Fractals.* 2024. Vol. 184. P. 114990. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.114990>.
4. *Safonova V.Yu., Gordeeva A.V., Blagodatkina A.V., Pimanov D.A., Yablokov A.A., Pankratov A.L., Beilstein J.* // *Nanotechnol.* 2024. Vol. 15. P. 1353. <https://doi.org/10.3762/bjnano.15.108>.

Проектирование антенны Кассегрена диапазона 118 ГГц с предельно достижимыми характеристиками

В.В. Бирюков, И.А. Воробьев, В.А. Малахов, Ю.В. Раевская,
А.С. Раевский, В.В. Щербаков

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева, Нижний Новгород
raevsky_as@mail.ru

Двухзеркальные антенны, построенные по схеме телескопа Кассегрена, находят широкое применение в различных областях техники – в радиолокации, радиоастрономии и радиорелейных линиях связи. Двухзеркальные антенны обладают рядом преимуществ по сравнению с однозеркальными. Так как в двухзеркальной антенне облучатель можно расположить близко к основному зеркалу, упрощается подвод мощности к облучателю, уменьшается длина линии его питания и облегчается крепление этой линии и облучателя. Укорочение линии питания ведет к уменьшению потерь в ней.

В докладе рассказывается о разработке антенны Кассегрена на рабочую частоту 118 ГГц с коэффициентом усиления (КУ) не менее 55 дБ. Реализация этих характеристик требует обоснованного выбора принципа построения антенны. В связи с этим авторами были проанализированы известные варианты антенны Кассегрена, их достоинства и недостатки. Особое внимание уделено облучателям антенны – рупорам, так как от их конструкции зависят характеристики антенны.

Строгий электродинамический расчет антенны Кассегрена ввиду ее конструктивной сложности произвести затруднительно. Поэтому для проектирования антенны был выбран подход, заключающийся в приближенном определении ее геометрических параметров методом геометрической оптики (лучевым методом) и дальнейшем математическом моделировании антенны в САПР, оптимизации ее геометрии с целью достижения заданных электрических характеристик.

Произведено исследование влияния неточности изготовления антенны Кассегрена на коэффициент усиления для разработанной конструкции: влияния положения субрефлектора относительно основного зеркала, фокального параметра, точности изготовления поверхности субрефлектора. Выполнен расчет ослабления сигнала в антенне от ее входа до свободного пространства с учетом потерь энергии волны в металле элементов фидерного тракта антенны, а также зеркал (основного и субрефлектора). Произведена оценка влияния на потери в антенне качества обработки (шероховатости) металлических поверхностей элементов антенны.

Основной объем исследований при выполнении поставленной задачи – это математическое моделирование антенны, которое производилось с использованием лицензионного пакета программ CST Microwave Studio на компьютере с высокой производительностью. При моделировании были рассмотрены два вида облучателей антенны – пирамидальный рупор и конический гофрированный рупор. Проведенные исследования позволили выбрать окончательную конструкцию антенны, для которой путем параметрической оптимизации были определены геометрические размеры, обеспечившие достижение заданных электрических характеристик.

Импедансная спектроскопия на базе микроволновой зондовой станции в задачах диагностики полупроводниковых материалов и структур

А.Н. Резник

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
reznik@ipmras.ru

Современная микроэлектроника требует проведения тестовых измерений непосредственно на полупроводниковой пластине. Принципиальным является диагностика элементов интегральных схем микронных латеральных размеров в микроволновом диапазоне. Решение указанных задач достигается путем применения зондовых станций (ЗС) [1, 2]. В наших работах [3–6] продемонстрирована перспективность применения ЗС в материаловедении, в частности показана возможность определения электрофизических параметров полупроводниковых материалов и структур с латеральным разрешением до 10 мкм. С этой целью на поверхности пластины формируется система концентрических металлических микроконтактов, образующих в полупроводнике обедненный слой с барьером Шоттки. Искомые параметры восстанавливаются из измерений спектра импеданса образца $Z(f,U)$, где U – постоянное напряжение, приложенное к контакту. В данной работе (см. также [7]) показано, что применение общепринятой методики ЗС-измерений приводит к катастрофическим ошибкам в спектре $Z(f,U)$. Экспериментально и теоретически установлено, что причина ошибок заключена в неидеальных характеристиках калибровочных нагрузок, которыми снабжена коммерческая ЗС. Предложен новый способ калибровки, не использующий эталонные нагрузки и устраняющий ошибки. Зонд станции моделируется отрезком двухпроводной линии, электродинамические параметры которой определяются в бесконтактном режиме. Разработанная методика апробирована в исследованиях однородной полупроводниковой пластины Si и пленочной структуры GaAs. По измерениям спектра $Z(f,U)$ в диапазоне частот 0,01–67 ГГц на двух контактах диаметром 20, 50 мкм определены электрофизические параметры образцов – концентрация, подвижность и тип свободных носителей заряда, удельная электропроводность. Полученные характеристики хорошо соответствуют данным независимых холловских измерений. В обоих образцах обнаружено избыточное сопротивление, которое не описывается общепринятой эквивалентной схемой контакта Шоттки и на 1–2 порядка превышает сопротивление невозмущенной области полупроводника. Эффект объясняется джоулевыми потерями на остаточных носителях заряда в обедненном слое. Предложена двухмасштабная модель импеданса $Z(f,U)$, хорошо описывающая экспериментальные спектры во всем рассматриваемом частотном интервале при адекватном выборе параметров. Дано физическое обоснование модели. Два характерных временных масштаба модели составили: низкочастотный $\tau_l = (0,5-1) \cdot 10^{-9}$ с, высокочастотный $\tau_h = (3-4) \cdot 10^{-11}$ с.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FFUF-2024-0042).

1. Rumiantsev A., Doerner R. // IEEE Microwave Magazine. 2013. V. 14, № 7. P. 46–58.
2. Rumiantsev A. On-Wafer Calibration Techniques Enabling Accurate Characterization of High-Performance Silicon Devices at the mm-Wave Range and Beyond. Denmark: River Publishers, 2019. 247 p.
3. Резник А.Н., Вдовичева Н.К. // ЖТФ. 2019. Т. 89, № 11. С. 1813–1818.
4. Резник А.Н., Востоков Н.В., Вдовичева Н.К., Шапкин В.И. // ЖТФ. 2020. Т. 90, № 11. С. 1944–1949.
5. Резник А.Н., Востоков Н.В. // ЖТФ. 2022. Т. 92, № 3. С. 492–502.
6. Резник А.Н., Востоков Н.В. // ФТП. 2023. Т. 57, № 3. С. 169–180.
7. Резник А.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2024. Т. 67, № 7. С. 607–619.

Отражающая способность образцов антенны космического радиотелескопа при температурах 5–300 К

Е.А. Серов¹, В.В. Паршин¹, К.В. Минеев¹, Е.С. Голубев², Д.М. Рудковский², В.В. Фоменко²,
М.А. Лаухин³, А.А. Чернятина⁴

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

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

³ ООО «АРЕС», Москва

⁴ АО «Решетнев», Красноярск

serov@ipfran.ru

Представлены результаты серии испытаний по экспериментальному определению коэффициента отражения электромагнитного излучения от рабочей поверхности образцов-свидетелей углепластиковых панелей с металлизированным покрытием, предназначенных для главного зеркала космической обсерватории «Миллиметрон» (Спектр-М) и эксплуатируемых в диапазоне температур от 4,5 до 300 К. Коэффициент отражения измерялся при нормальном падении для двух ориентаций поля **E** относительно ориентации волокон в поверхностном монослое углепластика. Исследованы три образца в диапазоне частот от 100 до 350 ГГц. Испытания проводились на резонаторном спектрометре ИПФ РАН.

При комнатной температуре потери на отражение у всех исследованных образцов приблизительно в 1,5 раза выше, чем у зеркала из высокочистого «толстого» алюминия (Al 99,99%). Потери для «параллельной» поляризации на 10–20% ниже, чем для «перпендикулярной».

Показано, что потери во всех исследованных образцах слабо изменяются при уменьшении температуры. На частоте 150 ГГц относительное уменьшение потерь при охлаждении от комнатной температуры до 5 К составляет лишь около 20%, в то время как для реального зеркала из «толстого» высокочистого алюминия потери уменьшаются примерно в 3,4 раза, а теоретический расчёт с учётом аномального скин-эффекта предсказывает уменьшение потерь в 5,5 раз. Такой результат может объясняться, например, влиянием шероховатости поверхности образцов, либо наличием примесей.

Несмотря на вышеописанные особенности, образцы успешно выдержали несколько циклов охлаждения-нагрева без ухудшения отражательной способности. Наблюдаемый уровень потерь при отражении при температурах ниже 20 К (не более $1,7 \times 10^{-3}$ на частоте 107 ГГц и не более $2,9 \times 10^{-3}$ на частоте 342 ГГц) значительно ниже значений, установленных в технических требованиях (не более 0,02) и является допустимым для работы главного зеркала обсерватории «Миллиметрон».

Болометры на холодных электронах в качестве электромагнитных и тепловых сенсоров

Л.С. Ревин^{1,2}, Д.А. Пиманов¹, А.Л. Панкратов^{1,2}, А.В. Благодаткин^{1,2}, Е.А. Матрозова^{1,2},
А.В. Чигинев^{1,2}, А.В. Гордеева¹

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород

² Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

chig@ipmras.ru

Болометры на холодных электронах (БХЭ), представляющие собой двойные контакты сверхпроводник/изолятор/сверхпроводник (СИН), могут быть использованы как для приема электромагнитного излучения, так и в качестве тепловых сенсоров для исследования свойств нейтрино, темной материи, а также для контроля температуры подложки приемника при поступлении на него интенсивного излучения. Изготовление таких структур требует электронной литографии и технологии теневого напыления. В данном докладе рассказывается об освоении такой технологии нижегородскими организациями, ИФМ РАН и НГТУ, и об исследовании различных образцов с СИН-контактами.

В частности, спроектирован, изготовлен и испытан приемник на основе метаматериалов для приема электромагнитного излучения ТГц-диапазона частот [1]. Он состоит из 19 кольцевых планарных структур, расположенных на кремниевой подложке в пределах шестиугольника и образующих правильную треугольную решетку. Приемник предназначен для использования с линзой. В качестве датчиков излучения используются болометры на холодных электронах. Малые размеры БХЭ позволяют встраивать их непосредственно в антенные элементы, таким образом устраняется необходимость в длинных подводящих волноведущих линиях. Проведено численное моделирование отклика приемной системы на внешнее излучение. Рассчитаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) приемной системы. Образцы приемника на основе метаматериала с БХЭ изготовлены совместно ИФМ РАН (оптическая и электронная литография) и НГТУ (напыление). При этом минимальный размер поглотителя БХЭ составляет 100 нм. Проведены измерения АЧХ приемной структуры с использованием генератора на джозефсоновском переходе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO), изготовленного в ИФМ РАН по оригинальному методу задающей маски. Продемонстрировано, что приемник на основе метаматериала с БХЭ имеет широкополосный отклик, приближающийся к 400 ГГц, в двух частотных диапазонах: 0,15–0,55 и 0,9–1,3 ТГц. Показано хорошее соответствие экспериментальной АЧХ результату численного моделирования на низкочастотном участке. Кроме того, показано, что собственный шум данного приемника с БХЭ при температуре 0,3 К становится меньше шума принимаемого сигнала (фотонного шума) для уровня мощности более 3 пВт.

1. *Revin L.S., et al. // Phys. Rev. Appl. 22, 064040 (2024).*

Антенные и алгоритмические решения для реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей субтерагерцового диапазона

А.С. Шураков^{1,2}, Е.А. Кучерявый², Г.Н. Гольцман^{1,2,3}

¹ Московский педагогический государственный университет, Москва

² НИУ «Высшая школа экономики», Москва

³ Российский квантовый центр, Сколково, Москва
alexander@rplab.ru

Субтерагерцовый спектральный диапазон представляет предметный интерес для разработчиков систем беспроводной связи нового поколения. Согласно Международному союзу электросвязи, точечное внедрение технологии радиодоступа с несущими частотами выше 92 ГГц возможно уже в сетях 2030 [1]. Для расширения сферы применений и возможности повсеместного использования технологий субтерагерцового радиодоступа необходимо дальнейшее развитие радиоэлектронных средств связи. При этом одним из ключевых направлений является разработка умной антенной среды на базе реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (RIS, англ. reconfigurable intelligent surface) [2]. В данном докладе будут рассмотрены технологичные антенные устройства [3] и энергоэффективные алгоритмы управления пучком (в том числе с использованием методов машинного обучения) [4] для модулей RIS, предназначенных для борьбы с эффектами динамической блокировки радиосигнала и микромобильности пользователя [5] в каналах беспроводной связи с несущими частотами 140–150 ГГц.

Исследование выполнено при помощи гранта Российского научного фонда № 22-79-10279, <https://rscf.ru/project/22-79-10279/>.

1. ITU Radiocommunication Sector: Recommendation ITU-R M.2160-0 Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond // ITU Publications. 2023.

2. ITU Radiocommunication Sector: Report ITU-R M.2541-0 Technical feasibility of IMT in bands above 100 GHz // ITU Publications. 2024.

3. *Shurakov A., et al.* Compact Log-Periodic Single-Port Planar Antennas for D-band Monolithic RIS Panels // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2024 (Early Access, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2024.3484756>).

4. *Shurakov A., et al.* Remote Detection of Applications for Improved Beam Tracking in mmWave/sub-THz 5G/6G Systems //arXiv preprint arXiv:2410.18637. 2024.

5. *Shurakov A. S., et al.* The recent progress in terahertz channel characterization and system design // Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science. 2024. Vol. 32, no. 2. P. 181–201.

Параметризация дифракционной модели динамики принимаемого сигнала в условиях частичного перекрытия линии субтерагерцовой передачи

М.И. Ершова^{1,2}, А.В. Львов^{1,2}, А.Н. Приходько^{1,2,3}, А.С. Шураков^{1,2}, Г.Н. Гольцман^{1,2,3}

¹ Московский педагогический государственный университет, Москва

² НИУ «Высшая школа экономики», Москва

³ Российский квантовый центр, Сколково, Москва
mi.ershova@mpgu.su

На сегодняшний день развитие технологий аналоговой и цифровой электроники в мире достигло уровня, достаточного для внедрения практических систем субтерагерцовой (100–300 ГГц, суб-ТГц) связи широкого применения. Когерентная связь субТГц-диапазона может быть эффективно реализована на базе как классических приёмных схем прямого преобразования, так и радиофотонных схем с использованием сверхбыстрых устройств фазовой и амплитудной модуляции [1, 2]. При этом текущий уровень технологии программируемых логических интегральных схем обеспечивает возможность эффективного использования частоты передачи символа до 25–30 ГГц [3]. Однако на несущих частотах выше 100 ГГц типичная мощность передающих модулей достигает не более нескольких сотен милливатт. Это приводит к необходимости сверхнаправленной приёмопередачи, уязвимой к перекрытию линии прямой видимости в условиях большого числа пользователей и объектов окружения. Использование умной антенной среды в сочетании с эффективными методами управления пучком позволит решить эту проблему. В данном докладе мы сообщаем о параметризации дифракционной модели динамики принимаемого сигнала в условиях частичного перекрытия линии субТГц-передачи. Использование среды позволит идентифицировать блокировку до её фактического наступления, что обеспечит своевременное предотвращение сбоев в канале и повысит надежность передачи данных.

Согласно спецификациям ETSI [4], на сегодняшний день существует несколько работ по моделированию каналов с несущей частотой до 100 ГГц, которые разрабатываются группами и проектами METIS, MiWEBA, ITU-RM, NYU WIRELESS и др. Стандартными подходами к моделированию каналов связи на системном уровне согласно 3GPP выбраны детерминированные подходы с трассировкой лучей, объединенные с эмуляцией определенных стохастических компонент. На основе существующих методов предложены дифракционные модели перекрытия канала передачи человеком [5, 6]. В настоящей работе представлены результаты измерений для различных сценариев блокировки канала с несущей частотой 150 ГГц и скоростью передачи 2 Гбит/с. На их основе сформулированы уточнения к спирали Корню, обеспечивающие выигрыш в точности описания дифракционной сигнатуры блокировки в координатной и временной плоскостях. Полученные результаты проанализированы с точки зрения приёмопередачи субТГц-сигналов в ближнем и дальнем полях для каналов прямой видимости и с поддержкой отражений.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-79-10279, <https://rscf.ru/project/22-79-10279/>.

1. Du Preez J., Sinha S., Sengupta K. SiGe and CMOS technology for state-of-the-art millimeter-wave transceivers // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 55596–55617.
2. Jia S., et al. Integrated dual-laser photonic chip for high-purity carrier generation enabling ultrafast terahertz wireless communications // Nature communications. 2022. Vol. 13, № 1. P. 1388.
3. Song H. J. et al. 50-Gb/s direct conversion QPSK modulator and demodulator MMICs for terahertz communications at 300 GHz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2014. Vol. 62, № 3. P. 600–609.
4. ETSI, Technical Report. 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (ETSI TR 138 901 V18.0.0). European Telecommunications Standards Institute. 2024.
5. MacCartney G. R., et al. Millimeter-wave human blockage at 73 GHz with a simple double knife-edge diffraction model and extension for directional antennas // 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). IEEE, 2016. P. 1–6.
6. Qi W., et al. Measurements and modeling of human blockage effects for multiple millimeter wave bands // 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). //IEEE, 2017. P. 1604–1609.

Технология изготовления плёнок NbN для гетеродинного сверхчувствительного приёмника ТГц-диапазона

И.В. Ивашенцева^{1,2}, Н.С. Каурова¹, Б.М. Воронов¹, И.В. Третьяков³

¹ Московский педагогический государственный университет, Москва

² НИУ «Высшая школа экономики», Москва

³ Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
irinivas22@yandex.ru

Свойства плёнок NbN в последние годы вызывают большой интерес, изучение технологии изготовления и ее дальнейшее совершенствование позволяет в будущем изготовить приемники на основе многопиксельной матрицы из NbN НЭВ, работающей на частоте выше 1,3 ТГц. Технология изготовления пленок NbN в данном исследовании основывается на магнетронном распылении, позволяющем строго контролировать параметры готовых пленок, однако требующем длительного изучения.

На сегодня удалось отстроить процесс напыления пленок NbN с температурой сверхпроводящего перехода 9,5 К, поверхностным сопротивлением 500 Ом/квadrat, толщиной 8–9 нм. Параметры технологии изготовления для данных пленок: давление вакуумной камеры $1,6\text{--}2,3 \cdot 10^{-6}$ мбар, температура подложкодержателя 400–420° К, давление инертного газа Ar $(9,5\text{--}10) \cdot 10^{-3}$ мбар и реактивного газа N₂ $2,5 \cdot 10^{-4}$ мбар, ток $I = 500$ мА и суммарное напряжение аномального тлеющего разряда 295–297 В, время напыления 10 с.

Дальнейшим развитием исследования будет увеличение температуры подложкодержателя и уменьшение толщины пленок с целью повышения чувствительности конечных приборов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 2312-00187, <https://www.rscf.ru/project/23-12-00187/>.

Проблемы разработки модулятора субтерагерцового радиометра

В.Ф. Вдовин, П.М. Землянуха, И.В. Леснов, М.А. Мансфельд, К.В. Минеев,
В.И. Носов, В.А. Сальков

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
mineevkv@ipfran.ru

Пассивные радиометры широко представлены на рынке в виде серийно выпускаемых единых модулей, построенных по схеме УВЧ – детектор – ФНЧ – УПТ. В диапазоне от 75 до 110 ГГц их коэффициент шума составляет всего 4 дБ, но на частотах более 200 ГГц трудно получить коэффициент шума менее 9 дБ, что на грани их применимости для атмосферных исследований. Несмотря на низкую кратковременную нестабильность параметров входных усилителей, обусловленную тепловыми шумами, длительные мультипликативные флуктуации коэффициента усиления (фликкер-эффект) приводят к снижению чувствительности радиометрических наблюдений. Флуктуационный порог модуляционной схемы в пределе в $\sqrt{2}$ раз хуже схемы полной мощности, но модуляционная схема снижает паразитное влияние флуктуаций коэффициента усиления, что в длительных измерениях оказывается наиболее предпочтительным решением.

Основной проблемой организации модуляционного режима является невозможность использования электронных модуляторов-калибраторов [1] непосредственно в приемном тракте: 1–1,5 дБ прямых потерь эквивалентны радиоcontrastному объекту в 100 К. На фоне яркостной температуры ясного неба в 10 К, характерной для местности с хорошим астроклиматом, фоновые 100 К и 9 дБ собственных шумов выглядят катастрофически. Дополнительные каскады предусиления позволяют выиграть не более 2 дБ при использовании передовых образцов МШУ. Использование механического обтюлятора внутри квазиоптической линии [2] также нецелесообразно ввиду соизмеримых с электронными переключателями потерь на частотах более 200 ГГц.

Оптимальный вариант – вынесение механического модулятора за пределы приемного тракта. Диск с секториальными вырезами, расположенный под углом к антенне и согласованной нагрузке [3], потребует большого диаметра (более 30 см), и благодаря вертикальной ориентации даст большие нагрузки на вал. Для стационарного исполнения это не критично, но переносная версия, предназначенная для горных экспедиций, должна иметь предельно малый вес. Другим его недостатком являются большие времена, когда антенна частично перекрыта. Корректировка возможна, но при условии наличия сигнала, повторяющего аддитивную добавку к антенной температуре. Получить такой сигнал трудно за счет того, что модулятор размещается в ближней зоне антенны, поэтому на практике переходные состояния часто исключают, повышая отношение времени обзора ко времени переходного процесса за счет увеличения диаметра диска модулятора.

В докладе предлагается альтернативный способ организации механического модулятора для охлаждаемого субтерагерцового радиометра, где в качестве эталонной согласованной нагрузки используется поглотитель, изготовленный методом 3D-печати из композитного полимера с высокой удельной электрической проводимостью.

Работа выполняется в рамках гранта Российского научного фонда № 23-79-00006.

1. Красильников А.А., Куликов М.Ю., Рыскин В.Г. и др. Система калибровки микроволновых радиометров на основе модулятора-калибратора // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 5. С. 96–99.
2. Большаков О.С., Бубнов Г.М., Вдовин А.В. и др. Мобильный полноповоротный радиометрический комплекс для астрономических и атмосферных исследований // Приборы и техника эксперимента. 2023. № 1. С. 112–119.
3. Носов В.И. Модулятор спектрометрического миллиметрового диапазона волн // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 3. С. 158–159.

**МИЛЛИМЕТРОВОЕ
И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
В ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

Биомедицинские применения терагерцового излучения

О.П. Черкасова, Н.А. Николаев

Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

o.p.cherkasova@gmail.com

С момента открытия терагерцового (ТГц) излучения и первых опытов его применения в биологии и медицине прошло уже более века [1, 2]. Однако биомедицинские применения ТГц-излучения до сих пор остаются активно развивающейся областью знаний. В докладе будет представлен обзор известных данных, включая собственные исследования, по спектроскопии крови для диагностики диабета [3, 4], глиомы [5, 6], онкологических заболеваний щитовидной железы [7] и печени [8]. Будет рассмотрено применение методов машинного обучения для обработки данных ТГц- спектроскопии, которое приближает внедрение метода в клиническую практику [9, 10]. Будут затронуты уникальные возможности терагерцовой визуализации биологических тканей в диагностике злокачественных новообразований [2, 11], диабетической стопы [12] и в офтальмологии [13]. Будет уделено внимание проблеме определения безопасных доз ТГц-излучения [14, 15]. Дальнейшее развитие биомедицинских применений ТГц-излучения невозможно без создания удобных и доступных приборов, оптических систем с высоким разрешением и волноводов. В заключение будут отмечены наиболее перспективные направления развития ТГц-приложений в биологии и медицине.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАиЭ СО РАН и ИЛФ СО РАН.

1. Терагерцовая фотоника и оптоэлектроника / под ред. ак. В.Я. Панченко, ред.-сост. чл.-корр. РАН А.П. Шкуринов. Москва : РАН, 2024. 764 с.
2. Smolyanskaya O.A., et al. // Progress in Quantum Electronics. 2018. **62**. 1–77.
3. Cherkasova O.P., et al. // Optics and Spectroscopy. 2016. **120** (1). 50–57.
4. Lykina A.A., et al. // J. Biomed. Opt. 2021. **26** (4). 04300.
5. Cherkasova O., et al. // Appl. Sci. 2023. **13**. 5434.
6. Cherkasova O.P., et al. // JBPE. 2023. **9** (3). 030308.
7. Konnikova M.R., et al. // Biomed. Opt. Express. 2021. **12** (2). 1020–1035.
8. Nazarov M.M., et al. // Optics and Spectroscopy. 2019. **126** (6). 721–729.
9. Vrazhnov D., et al. // Appl. Sci. 2022. **12**. 10533.
10. Vrazhnov D., et al. // Appl. Sci. 2024. **14**. 2872.
11. Chernomyrdin N.V., et al. // Opto-Electronic Advances. 2023. **6**. 220071.
12. Hernandez-Cardoso G.G., et al. // Sci. Rep. 2017. **7**. 42124.
13. Ozheredov I., et al. // Laser Phys. Lett. 2018. **15** (5). 055601.
14. Cherkasova O.P., et al. // Journal of Biomedical Optics. 2021. **26** (9). 090902.
15. Serdyukov D.S., et al. // Biomed. Opt. Express. 2020. **11** (9). 5258.

Использование СВЧ-излучения гиротронного комплекса МИГ-3 для плазмохимических исследований. Текущее состояние и планы развития

В.Д. Борзосеков, Н.Г. Гусейн-заде, Л.В. Колик, Е.М. Кончечков, Д.В. Малахов, А.Е. Петров,
Н.Н. Скворцова, А.С. Соколов, В.Д. Степахин, Н.К. Харчев

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
khar@fpl.gpi.ru

В отделе физики плазмы Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН проводятся работы по созданию новых материалов из порошковых смесей при воздействии микроволнового разряда в плазмохимическом реакторе, по очистке катализаторов при воздействии микроволнового разряда, очистке воздуха в синтез-камере от вредных примесей.

Изначально гиротронный комплекс МИГ-3 предназначался для электронно-циклотронного нагрева плазмы стелларатора ЛИВЕНЬ-2М мощным СВЧ-излучением с частотой 75 ГГц. Для передачи СВЧ-излучения используется квазиоптическая линия передачи. Для проведения плазмохимических исследований потребовалось перенаправить СВЧ-излучение гиротрона в плазмохимический реактор или синтез-камеру. Для минимизации затрат было принято решение вписать плазмохимический реактор в габариты существующей квазиоптической линии передачи. В такой конфигурации экспериментального оборудования эксперименты проводились более 5 лет. В настоящее время в связи с расширением номенклатуры исследуемых образцов и необходимости увеличения количества синтезируемых микро- и наноматериалов требуется увеличение размеров плазмохимического реактора. Необходимость оптимизации плазмохимических процессов требует увеличения количества диагностик (микроволновых, оптических, видео), а также свободного пространства вокруг установки.

Для удовлетворения растущих потребностей проведения экспериментов по синтезу предлагается два пути решения.

1. Вынести плазмохимический реактор из габаритов квазиоптической линии передачи и изготовить дополнительный каскад квазиоптической линии для передачи СВЧ-излучения к новому месту расположения плазмохимического реактора.
 2. Создать новый гиротронный комплекс с гиротроном без криомагнита.
- В настоящее время рассматривается возможность реализации данных предложений.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (ГЗ БВ10-2025) в рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2025 года» (НИР 2021–2025 гг.), тема «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении»).

1. *Kharchev N., Batanov G., et al.* Recent ECRH experiments in the L-2M stellarator with the use of a new highpower gyrotron // *Plasma and Fusion Research*. 2011. Vol. 6. P. 2402142–2402142.
2. *Kharchev N.K., Batanov G.M., et al.* Optimization of operation of a three-electrode gyrotron with the use of a flow-type calorimeter // *Review of Scientific Instruments*. 2013. Vol. 84, no. 1. P. 013507.
3. *Сарксян К.А., Петров А.Е. и др.* Микроволновые технологии для УТС: учебное пособие. Вологда ; Москва: Инфра-Инженерия, 2024. С. 84.
4. *Соколов А.С., Скворцова Н.Н., Степахин В.Д. и др.* Плазмохимический комплекс синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении // *Известия вузов. Радиофизика*. 2022. Т. 65, № 11. С. 927–942. DOI: 10.52452/00213462_2022_65_11_927

Установка для исследования плазмохимического синтеза алмаза на основе 20-кВт-гиротрона

С.А. Богданов¹, А.Л. Вихарев¹, М.Ю. Глявин¹, А.М. Горбачев¹, М.В. Каменский¹, М.В. Морозкин¹,
А.А. Орловский¹, М.Д. Проявин¹, Д.И. Соболев¹, В.В. Холопцев¹, А.П.Гаштури¹, Е.А.Солуянова^{1,2},
Е.М.Тай^{1,2}, Г.Г.Денисов¹

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

²ЗАО НПП «Гиком»

gorb@appl.sci-nnov.ru

Алмаз обладает уникальными свойствами, что делает его привлекательным для целого ряда приложений. Одним из распространенных методов получения синтетических алмазов является метод осаждения из газовой фазы (CVD). В большинстве плазменных CVD-реакторах газовый разряд поддерживается в смеси водорода и метана излучением магнетрона на частоте 2,45 ГГц. Одной из основных проблем таких реакторов является невысокая скорость роста алмаза. В ИПФ РАН был предложен и реализован новый тип плазмохимического CVD-реактора, в котором используется излучение гиротрона на частоте 28 ГГц. Переход к коротковолновому излучению позволил значительно увеличить плотность плазмы и величину микроволновой мощности, поглощаемой в единице объема. Это привело к заметному увеличению скорости роста алмаза. В то же время, при мощности технологического гиротрона 10 кВт плазма поддерживалась только в смесях аргон-водород-метан. Наличие аргона приводило к существенному ухудшению качества алмаза. Для перехода к традиционным смесям водород-метан необходим гиротрон большей мощности. В установку был смонтирован новый гиротрон, который работает на первом (а не втором) резонансе циклотронной частоты. Это позволило существенно увеличить КПД гиротрона и его мощность без заметных переделок существующей установки. В докладе представлены результаты модернизации установки, измерения её параметров и первых экспериментов с 20-кВт-гиротроном.

Работа выполнена при поддержке проекта ИПФ РАН FFUF-2022-0007.

Микроволновое реакционное спекание керамических композитов Ce:YAG + Al₂O₃

С.В. Егоров, А.Г. Еремеев, К.И. Рыбаков, А.А. Сорокин, В.В. Холопцев

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
rybakov@ipfran.ru

Материалы на основе иттрий-алюминиевого граната (Y₃Al₅O₁₂, YAG), легированного редкоземельными металлами, в частности, церием, представляют значительный интерес для создания люминофоров, используемых в твердотельных источниках белого света, сцинтилляционных детекторах и т. п. При применении в источниках белого света данные материалы поглощают синий свет, излучаемый светодиодами или лазерами, и эффективно переизлучают его в широком спектральном диапазоне видимого света. Создание керамических композитов на основе YAG и оксида алюминия Al₂O₃ позволяет решить проблемы старения и отвода значительной тепловой мощности, а также улучшить цветовые характеристики источников света.

В работе использовались образцы из смеси Al₂O₃ и оксида иттрия, легированного церием, Ce:Y₂O₃, приготовленные в ИХВВ РАН. Синтез Ce:YAG осуществлялся в результате последовательности твердофазных химических реакций между оксидами. Эксперименты по микроволновому спеканию проводились на специализированных гиротронных комплексах с максимальной мощностью 6 кВт, работающих на частоте 24 ГГц. Мощность гиротрона регулировалась автоматически в соответствии с заданным температурно-временным режимом нагрева. Начальную скорость нагрева выбирали в интервале 10–50 °С/мин, максимальная температура нагрева составляла 1650–1725 °С, продолжительность изотермической выдержки 15 мин. В отдельных экспериментах производилась оптическая дилатометрия с помощью системы на основе инфракрасной камеры.

В результате выполненных исследований получены образцы композиционных материалов Ce:YAG + Al₂O₃, обладающих люминесцентными свойствами, с плотностью более 97 % от теоретического значения. Показано, что в процессе микроволнового нагрева зависимость скорости уплотнения от температуры имеет два максимума, первый из которых связан с протеканием фазовых превращений в материале. Получены оценки плотности микроволновой мощности, поглощаемой в объеме образцов. Определена величина удельной мощности объемного тепловыделения, соответствующая порогу развития тепловой неустойчивости. Для предотвращения неконтролируемого развития тепловой неустойчивости разработаны режимы микроволновой обработки с постепенным уменьшением скорости нагрева.

Установлено, что при микроволновом нагреве температура фазовых превращений в системе Y – Al – O и в оксиде алюминия уменьшается по сравнению с традиционным нагревом. При этом в случае микроволнового нагрева температура фазовых превращений снижается тем сильнее, чем выше напряженность микроволнового электромагнитного поля (которую варьировали путем использования теплоизоляционных сборок с различными диэлектрическими свойствами). Данные результаты свидетельствуют о существенном влиянии микроволнового электромагнитного поля на процессы диффузионного переноса и зародышеобразования при твердофазных химических реакциях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00363).

Синтез гетерогенных катализаторов в цепных плазмохимических реакциях, инициируемых микроволновыми импульсами мощного гиротрона

Н.Н. Скворцова^{1,5}, Н.С. Ахмадуллина^{1,2}, В.Д. Борзосекон^{1,3}, Н.Г. Гусейн-заде¹, Е.М. Кончков¹,
Д.В. Малахов¹, Е.А. Образцова^{1,4}, В.Д. Степахин¹, Н.К. Харчев¹, О.Н. Шишилов^{1,5}

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

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

³ Российский университет дружбы народов, Москва

⁴ Московский физико-технический институт, Долгопрудный

⁵ Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, Москва

mukudori@mail.ru

В Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН разработаны способы нанесения наночастиц металлов на поверхность керамических носителей (создания гетерогенных катализаторов для химической промышленности) с использованием микроволнового разряда [1]. Эксперименты проводятся при помощи специально разработанного плазмохимического комплекса [2] методом облучения смеси порошков металлов и диэлектриков микро- и наноразмеров с открытой поверхностью импульсным излучением мощного гиротрона, вызывающим микроволновый разряд с последующей инициализацией плазмохимических экзотермических реакций. На этом комплексе продемонстрировали, что в определенных условиях в реакторе в смесях металлических и диэлектрических порошков могут быть инициированы цепные реакции синтеза микродисперсных материалов с контролируемыми физическими и химическими свойствами [3]. Данный метод уникален тем, что позволяет наносить частицы катализатора на носитель в рамках единого процесса, а не многоступенчато, как в традиционном методе химического синтеза.

Получаемые материалы отличаются высокой степенью однородности по форме, составу, они также равномерно распределены по размерам. Это микрочастицы оксидных, нитридных и оксинитридных диэлектриков с нанесенными наночастицами металлов (серебро, медь, платина и др.) [4,5]. Приведены примеры их использования в реакциях дегидрирования метилциклогексана и окисления олефинов, а также сравнение с каталитической активностью катализаторов, приготовленных традиционными химическими методами.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (ГЗ БВ10-2025) в рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2025 года (НИР 2021–2025 гг.); «Изучение инновационного синтеза микро- и нано-частиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении»).

1. Гусейн-заде Н.Г., Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., и др. Способ нанесения наночастиц металлов на поверхность керамических носителей с использованием микроволнового разряда. Патент на изобретение № 2772704. 2022 г.

2. Sokolov A.S., Akhmadullina N.S., Borzosekov V.D., et al. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2023. Vol. 65, no. 11. P. 840–854. DOI: 10.1007/s11141-023-10261-z.

3. Skvortsova N.N., Shishilov O.N., Akhmadullina N.S., et al. // Ceramics International. 2021. Vol. 47, no. 3. P. 3978–3987. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.262>.

4. Соколов А.С., Борзосекон В.Д., Воронова Е.В., и др. // Доклады Академии наук. Физика, техн. науки. 2022. Т. 504. С.19–25. DOI: 10.31857/S2686740022030130.

5. Skvortsova N.N., Akhmadullina N.S., Vafin I.Yu., et al. // International Journal of Molecular Sciences. 2024. V. 25. P. 5326. DOI: /10.3390/ijms2510532.

Повышение предельной чувствительности высокоселективного газового анализа полярных примесных газов атмосферы на примере молекулы CO

С.П. Белов, Г.Ю. Голубятников, И.И. Леонов, Т.А. Галанина, М.Ю. Третьяков

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
belov@ipfran.ru

В настоящее время для высокочувствительного селективного газового анализа разработано много различных методов и приборов. Наиболее успешным из них по чувствительности и селективности оказался метод анализа пробы, основанный на совместном последовательном применении газового хроматографа (ГХ) и специализированного масс-спектрометра (МС). С его помощью в выдыхаемом воздухе, например, удалось обнаружить более 870 различных веществ в концентрациях до одной молекулы на миллиард других, т. е. с чувствительностью до 1 ppb, а для некоторых молекул даже до долей 1 ppb. Тем не менее для поиска наркотиков и обнаружения взрывчатых веществ до сих пор используются собаки, а не инструментальные методы. Это говорит об актуальности проблемы повышения чувствительности и селективности методов газового анализа.

Цель данного доклада показать на примере молекулы угарного газа (CO) возможность повышения предельной чувствительности высокоселективного газового анализа полярных примесных газов атмосферы с помощью методов микроволновой (МВ) спектроскопии. Следует отметить, что в диапазон частот МВ-спектроскопии до 1 ТГц попадают вращательные спектры всех полярных молекул (кроме молекулы HF). Вращательные спектры образно называют «отпечатками пальцев», настолько однозначно они характеризуют молекулы, их изотопологи и конформеры. Теоретически, а для некоторых молекул практически, методы МВ-спектроскопии позволяют достичь такой же чувствительности по концентрации, что и ГХ+МС, а их селективность на 3 и более порядков выше. Выдающиеся перспективы МВ-спектроскопии в области селективного газового анализа были очевидны с самого начала. Тем не менее прогнозы на широкое применение МВ-спектроскопии для газового анализа до сих пор не оправдались.

В докладе будут представлены результаты экспериментов по обнаружению микропримеси CO в сертифицированной газовой смеси, в выдыхаемом воздухе и в лаборатории с помощью микроволнового видеоспектрометра, чувствительность которого в 1000 раз ниже порога обнаружения. С помощью home made прекоцентрактора, добавленного к спектрометру, чувствительность по концентрации повышена на 5 порядков путём эффективного отделения неполярных молекул воздуха от полярных и вымораживания молекул воды [1]. После доработки прекоцентрактор может быть использован для повышения чувствительности любых газоанализаторов полярных примесных газов атмосферы и выдыхаемого воздуха, созданных на базе методов инфракрасной и оптической спектроскопии, газовой хроматографии, масс-спектрометрии и др. [2].

1. Белов С.П., Голубятников Г.Ю., Леонов И.И., Галанина Т.А., Третьяков М.Ю. Повышение чувствительности высокоселективного газоанализа на примере молекулы CO // Известия вузов. Радиофизика. 2024. Т. 67, № 7. С. 595–606.

2. Степанов Е.В. Методы высокочувствительного газового анализа молекул-биомаркеров в исследованиях выдыхаемого воздуха // Труды ИОФАН. 2005. Т. 61. С. 5–47.

Параметры разрядов, инициируемых в порошковых смесях импульсами мощного гиротрона

А.А. Летунов¹, В.В. Гудкова^{1,2}, В.П. Логвиненко^{1,2}, Е.В. Воронова¹, А.В. Князев¹, В.Д. Борзосексов^{1,2}

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

² Российский университет дружбы народов, Москва

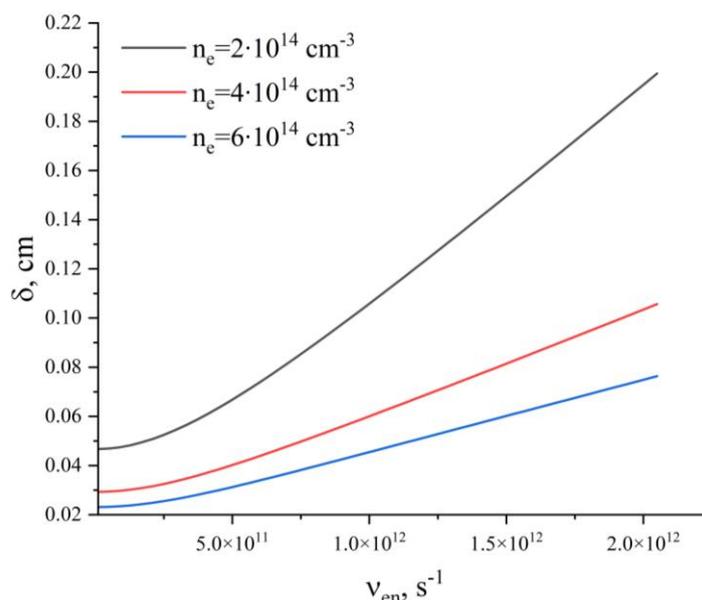
let@fpl.gpi.ru

Представлены результаты спектральной диагностики микроволновых разрядов в смесях порошков, инициируемых излучением мощного импульсного гиротрона с длиной волны 4 мм, изготовления ГИКОМ, в режимах с параметрами (200 ÷ 500 кВт, 2 ÷ 10 мс). Исследуется получение образцов оксидных и нитридных материалов микро- и наноразмеров для получения каталитических сред с максимально развитой поверхностью и перспективных люминофоров и т. д. Параметры плазмы – электронная плотность и температура – оценивались из эмиссионных спектров УФ-видимого диапазона.

Электронная температура определялась по соотношениям интенсивностей атомных линий Ti, Pt в предположении частичного локального термодинамического равновесия (ЛТР), выполнение которого для атомных линий, исходящих с уровней со значениями ГКЧ ≥ 3 , подкреплялось полученными значениями электронной плотности. Получены значения в диапазоне 2500 ÷ 6500 К.

Электронная плотность плазмы определена по штарковскому уширению линии H_{α} водорода, как из основного состава порошка, так и примесного при разрядах в разных газах – воздухе, аргоне, гелии и азоте с разным составом порошковых смесей. Измерения велись на двойном монохроматоре М833 со спектральным разрешением 0,01 ÷ 0,02 нм. Получены значения в диапазоне $2 \times 10^{14} \div 6 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, в несколько раз превышающие критическое значение плотности для частоты гиротрона – 75 ГГц: $7 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Возможность проникновения излучения в плазму с плотностью выше критической связана с высокой частотой электрон-нейтральных соударений в низкотемпературной плазме.

Исходя из соотношений между глубиной проникновения δ , электронной плотностью, частотой микроволн и частотой электрон-нейтральных соударений [1, 2] рассчитаны δ для значений плотности 2, 4 и $6 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, приведенные на графике.



При плотности газа $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $T_e = 2500 \text{ К}$ частота соударений составляет $\sim 2 \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Увеличение плотности газа в 1,5 раза приведет к тем же значениям глубин проникновения для частоты 50 ГГц, что могло бы привести к возможности менее затратных экспериментов.

1. Vikharev A., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018.

2. Хилд М., Уортон С. Микроволновая диагностика плазмы. Обнинск : Атомиздат, 1968.

Неустойчивости СВЧ-разрядов, применяемых для синтеза алмаза

С.А. Богданов, А.Л. Вихарев, А.М. Горбачёв, Д.Б. Радищев, М.А. Лобаев

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
bogser@appl.sci-nnov.ru

CVD (Chemical Vapor Deposition) алмаз благодаря своим уникальным свойствам является привлекательным для целого ряда приложений. Однако многие потенциальные применения ограничиваются невысокой скоростью роста CVD-алмаза. Для её повышения необходимо увеличение концентрации электронов и удельной СВЧ-мощности, поглощаемой в плазме (удельного энерговклада). Однако при этом возможно возникновение неустойчивостей, приводящих к резкой неоднородности в пространственном распределении плазмы. Одним из методов повышения удельного энерговклада является увеличение давления рабочей смеси в традиционных реакторах, в которых плазма создается излучением на частоте 2,45 ГГц. В докладе представлены результаты исследования контракции разряда высокого давления, при которой наблюдается скачкообразный переход разряда из однородной формы в контрагированную с ярким тонким филаментом в центре разряда.

Другой подход к увеличению скорости роста, предложенный в ИПФ РАН, связан с переходом к реактору нового типа – СВЧ-реактору, в котором плазма создаётся с помощью коротковолнового излучения гиротрона. Однако в этом случае, когда частота столкновений электронов с молекулами порядка круговой частоты электромагнитной волны, в разряде возможно развитие плазменно-резонансной неустойчивости. В докладе приведены параметры плазмы газового разряда, поддерживаемого в волновых пучках излучением гиротрона на частоте 28 ГГц, и обсуждаются условия возникновения неустойчивостей.

Сравнительный анализ перспективных площадок Северной Евразии для радиоастрономических наблюдений на субТГц-частотах

В.Ф. Вдовин, М.В. Ефимова, К.В. Минеев

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
m.efimova@ipfran.ru

В докладе представлены результаты многостороннего анализа астроклиматических условий некоторых площадок Северной Евразии, перспективных для строительства субТГц-радиотелескопов, включая оценки пика Хулугайша в Восточных Саянах, села Ташанта Республики Алтай, а также плато Суффа в Узбекистане и района Али Тибета.

На основе спутниковых данных базы SOP30 составлены карты местности с разрешением в 1 угловую секунду дуги, для которых проведен анализ осаждаемого водяного пара (PWV – precipitable water vapor) как наиболее критически важного параметра, влияющего на прозрачность атмосферы для электромагнитных волн субТГц-участка спектра. В отличие от составляющей, связанной с поглощением в атмосферных газах, концентрация которых определяется, прежде всего, высотой, величина PWV испытывает значительные сезонные вариации.

Был проведен сравнительный анализ наземных измерений PWV, выполненных нашими коллегами с помощью микроволнового измерителя атмосферного поглощения МИАП-2 [1], с данными дистанционного зондирования MERRA-2 и AIRS [2, 3]. Спутниковое зондирование обеспечивает обширную зону покрытия, но имеет ограничения, связанные с низким разрешением, в результате чего происходит интегральное усреднение данных на крупных (до 50 км) пространственных масштабах, исключая ландшафтные особенности. Это приводит к значительным погрешностям в оценках PWV, особенно в горных районах с неровным рельефом, где распределение водяного пара может значительно варьироваться. Перерасчет прямых измерений позволяет скорректировать спутниковые оценки и улучшить наше представление об атмосферных условиях, что критично важно при выборе площадки для радиоастрономических наблюдений.

В заключение отметим, что в России немало мест с хорошим микроволновым астроклиматом [4], но прежде чем сделать окончательный выбор в пользу того или иного места для постройки будущего субТГц-телескопа, необходимо проведение дополнительных исследований в наиболее актуальных частотных полосах вблизи 1,3 и 0,8 мм окон прозрачности атмосферы [5]. Также очевидно, что не только астроклимат определяет площадку, а есть еще целый ряд факторов, которые необходимо учитывать при выборе: от транспортной доступности и имеющейся энергетики до наличия квалифицированного персонала, способного построить и эксплуатировать обсерваторию.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант №23-79-00006).

1. Носов В.И. Двухволновый измеритель радиопрозрачности атмосферы миллиметрового диапазона / В.И. Носов, О.С. Большаков, Г.М. Бубнов и др. // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 3. С. 49–56.
2. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
3. <https://disc.gsfc.nasa.gov/>
4. Балегга Ю.Ю. Прямые измерения атмосферного поглощения излучения субтерагерцового диапазона волн на Северном Кавказе / Ю.Ю. Балегга, Д.К. С. Батаев, Г.М. Бубнов и др. // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 502, № 1. С. 5–9.
5. Вдовин В. Ф. Техническая реализация субТГц-радиометра для исследования астроклимата / В.Ф. Вдовин, П.М. Землянуха, А.В. Котов и др. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2024. № 1. С. 72–76.

Субтерагерцовый неохлаждаемый радиометр для исследования астроклимата

К.В. Минеев, В.А. Сальков

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
v.salkov@ipfran.ru

К текущему моменту в нашем распоряжении имеется большой массив данных астроклиматических исследований, накопленный в течение 12 лет измерений с помощью двух измерителей атмосферного поглощения МИАП-2 [1] и одного сканирующего радиометра [2]. На основе имеющихся данных можно сделать предварительный вывод о наличии на территории Российской Федерации потенциальных мест для строительства современной отечественной субТГц-обсерватории, работающей в 1,3-мм окне прозрачности атмосферы, в том числе и в составе РСДБ интерферометра Телескопа Горизонта Событий [3]. Перспективными выглядят горы Кавказа в районах Северной Осетии и Дагестана и площадки Сибири: гора Мус-Хая (2959 м) в Якутии и пик Хулугайша (3015 м) в Саянах, где в мае 2024 г. завершился полугодовой цикл измерений, показавший, что атмосферное поглощение в лучшие дни находится на уровне около 0,05 Нп/км в 3-мм окне прозрачности. Благодаря большому числу ясных дней и низкому уровню осадков интересен даже склон горы Маяк (2350 м) в Дагестане в окрестностях селения Гуниб, где в 2022 году был проведен полугодовой непрерывный цикл измерений [4].

К сожалению, большинство измерительных сессий имеют кратковременный характер и не позволяют в полной мере оценить суточные и сезонные вариации астроклимата. К тому же косвенные пересчеты в коротковолновую область (на 1,3 и 0,8 мм) через рефракционные модели сопровождаются неконтролируемыми ошибками экстраполяции. Наиболее достоверные оценки можно получить лишь в случае прямых измерений непосредственно в самом 1,3-мм окне прозрачности атмосферы.

В докладе представлены первые технические результаты и конструкционные решения разрабатываемого в ИПФ РАН субТГц-неохлаждаемого радиометра для исследования астроклимата в окне прозрачности атмосферы 1,3 мм, пригодного для проведения длительного цикла измерений в экспедиционных условиях. Актуальность разработки обоснована потребностью российского астрономического сообщества в передовых субТГц-радиотелескопах, строительство которых на просторах РФ возможно исключительно в местах с самым благоприятным астроклиматом.

Работа выполняется в рамках проекта РНФ №23-79-00006.

1. Носов В. И., Большаков О. С., Бубнов Г. М. и др. Двухволновый измеритель радиопрозрачности атмосферы миллиметрового диапазона // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 3. С. 49–56.
2. Большаков О. С., Бубнов Г. М., Вдовин А. В. и др. Мобильный полноповоротный радиометрический комплекс для астрономических и атмосферных исследований // Приборы и техника эксперимента. 2023. № 1. С. 112–119.
3. Farah J. et al. Selective Dynamical Imaging of Interferometric Data // The Astrophysical Journal Letters. 2022. Vol. 930, no. 2.
4. Вдовин В. Ф., Марухно А. С. Перспективы строительства субтерагерцового радиотелескопа на Северном Кавказе // Сборник научных трудов XI Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (пос. Нижний Архыз, Россия). 2022. С. 381–383.
5. Bubnov G. M. et al. Search for New Sites for THz Observations in Eurasia // The 25th International Symposium on Space Terahertz Technology, Moscow, Russia. 2014. P. 76.

Сравнительный анализ яркостной температуры неба в горах Кабардино-Балкарии и Карачаево-Черкесии в трехмиллиметровом диапазоне длин волн

В.Ф. Вдовин¹, В.О. Гладышев², А.Н. Глотов², В.Л. Кауц², А.В. Каютенко², И.В. Леснов¹,
Д.А. Литвинов^{2,3}, А.С. Марухно¹, К.В. Минеев¹, П.П. Николаев², Е.А. Шарандин²

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

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

³ Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
shartmp@yandex.ru

В конце 2021 г. в ИПФ РАН для МГТУ им Н.Э. Баумана была завершена разработка мобильного радиометрического комплекса трехмиллиметрового диапазона длин волн, предназначенного для астрономических и атмосферных исследований [1]. Комплекс представляет собой пассивный модуляционный радиометр, размещенный на двухкоординатном опорно-поворотном устройстве, позволяющем проводить наблюдения в выделенной области небесной сферы в полном диапазоне зенитных углов (от 0° до 90°). Для создания узконаправленного сканирующего луча в радиометре используется антенная система Кассегрена с шириной диаграммы направленности 1° по уровню –3 дБ. Время развертывания комплекса на любой местности не превышает 30 минут.

В период с осени 2021 г. до весны 2024 г. радиометрический комплекс стационарно размещался на крыше одного из учебных корпусов МГТУ им. Н.Э. Баумана и использовался в качестве учебно-демонстрационного прибора при проведении лабораторных работ студентов факультета «Фундаментальные науки». За это время были апробированы методики измерений, устранены технические недостатки, выявленные при эксплуатации, а также разработано новое программное обеспечение для автоматизации измерений с привязкой к галактической системе координат.

В июне 2024 г. состоялась экспедиция в республику Кабардино-Балкария, где проводились наблюдения на склоне горы Эльбрус на высоте 3900 м и на учебно-спортивной базе «Джан-Туган» на высоте 2160 м. В октябре 2024 г. состоялась экспедиция в республику Карачаево-Черкесия, где проводились наблюдения на территории Специальной астрофизической обсерватории РАН на высоте 2100 м.

Во время экспедиции в Кабардино-Балкарию при наблюдениях в зенит наименьшее зарегистрированное значение яркостной температуры имело величину (49±4) К. После данной экспедиции был изменен режим работы опорного канала радиометра, что позволило увеличить его стабильность и уменьшить погрешность измерений яркостной температуры. В последующей экспедиции в Карачаево-Черкесию были получены существенно лучшие результаты измерений яркостной температуры – (20,0±0,8) К.

Более подробный сравнительный анализ в указанных местностях представлен в докладе, где также приводится сопоставление более ранних измерений яркостной температуры, выполненных с помощью альтернативного радиометра МИАП-2 [2–3].

1. *Большаков О.С.* Мобильный полноповоротный радиометрический комплекс для астрономических и атмосферных исследований / О.С. Большаков, Г.М. Бубнов, А.В. Вдовин и др. // Приборы и техника эксперимента. 2023. № 1. С. 112–119.

2. *Balega Y.* Atmospheric Propagation Studies and Development of New Instrumentation for Astronomy, Radar, and Telecommunication Applications in the Subterahertz Frequency Range / Y. Balega, A. Marukhno, G. Bubnov, et al. // Applied Sciences (Switzerland). 2022. Vol. 12, no. 11.

3. *Marukhno A.S.* Analysis of the Millimeter-Band Astroclimate at the Caucasus Mountain Observatory / A.S. Marukhno, G.M. Bubnov, V.F. Vdovin, et al. // Ground-based astronomy in Russia. 21st century : Proceedings of the All-Russian Conference, Nizhnii Arkhyz, 21–25 sept. 2020. Nizhnii Arkhyz : SAO RAS, 2020. P. 184–188.

Об измерении параметра группировки микроволнового излучения

А.В. Шепелев

РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина
shepelev@rambler.ru

Методы, основанные на анализе статистических параметров излучения, с успехом развиваются в последние годы в оптическом диапазоне. Такие понятия, как сжатые состояния света, когерентность второго и более высоких порядков, группировка и антигруппировка, применяются при проведении и анализе измерений. Однако в более низкочастотном диапазоне (от терагерцового и ниже) лишь единичные работы опираются на использование идей и понятий квантово-статистической теории.

Особенности микроволнового диапазона дают ряд преимуществ для подобных исследований. Одним из них является не такой большой разрыв между частотой несущей и временным разрешением приемников излучения, как в видимом и ИК-диапазонах. Это, в частности, позволяет определить параметр группировки фотонов по измерению интенсивности сигнала, что дает возможность установить, является ли излучение хаотическим, вынужденным или двухфотонным. Необходимым условием возможности этого является проведение измерений в пределах одной моды излучения, что накладывает ограничения на временное разрешение приема и размеры приемника.

В докладе рассматриваются понятия когерентности первого и второго порядков, фактора вырождения излучения, параметра группировки. Анализируются возможные схемы проведения измерений и достижимая точность.

Исследование изменений нуклеотидного метаболизма в клетках меланомы под воздействием терагерцового излучения

Е.А. Бутикова^{1,5}, Н.В. Басов^{1,2}, А.Д. Рогачев^{1,2}, Е.В. Гайслер¹, И.А. Разумов^{1,3,4},
О.И. Соловьева^{1,3,4}, Д.А. Коломеец³, В.В. Каныгин^{1,3}, В.М. Попик³, О.А. Шевченко³,
Н.А. Винокуров³, А.Г. Покровский¹

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск

²Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск

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

⁴Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск

⁵НИИКЭЛ-филиал ИЦиГ СО РАН, Новосибирск

katabutikova@gmail.com

В последние десятилетия терагерцовое излучение (ТГц) нашло применение в науке и технологиях, включая визуализацию, системы безопасности, фармацевтику и связь 6G [1, 2]. Высокая поглощаемость ТГц-излучения атмосферой минимизирует его природное воздействие на живые организмы, что делает изучение биологических эффектов важным для безопасного использования. Метаболомика, как метод количественного анализа малых молекул, позволяет выявлять тонкие биохимические изменения, вызванные ТГц-излучением.

В исследовании использовались клетки меланомы SK-MEL-28, облучённые на Новосибирском лазере на свободных электронах [3] (2,3 ТГц, 0,056 Вт/см², время экспозиции 10 и 45 мин). Анализ методом ВЭЖХ-МС/МС [4] выявил 407 метаболитов, из которых 40 показали значимые изменения ($p < 0,05$). В пуриновом обмене зафиксировано снижение АТФ, АДФ, АМФ и увеличение продуктов их деградации (ксантин, гипоксантин). В пиримидиновом метаболизме отмечено повышение уридина и урацила.

Полученные данные демонстрируют, что ТГц-излучение вызывает нарушения энергетического метаболизма в клетках меланомы, влияя на пути пуринового и пиримидинового обмена. Метаболомный подход подтвердил свою эффективность в изучении клеточных эффектов ТГц-излучения и может способствовать разработке безопасных технологий его применения.

Метаболомика показала свою эффективность в изучении механизмов воздействия излучения на клеточном уровне, а полученные данные могут быть полезны для понимания биологических эффектов ТГц-излучения и разработки безопасных подходов к его применению.

Работа выполнена на уникальной установке «Новосибирский лазер на свободных электронах» на базе ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» при поддержке гранта РНФ (проект № 19-72-202).

1. Ghann W., Uddin J. Terahertz (THz) spectroscopy: a cutting-edge technology // J. Uddin. USA: Coppin State University. 2017. Vol. 1. P. 3–20.
2. Siegel, P.H. Terahertz technology in biology and medicine // IEEE Trans Microw. Theory. Tech. 2004. Vol. 52. P. 2438–2447.
3. Kulipanov G.N. et al. Novosibirsk Free Electron Laser-Facility Description and Recent Experiments. IEEE Trans Terahertz Sci Technol. 2015. Vol. 5, no. 5. P. 798–809.
4. Basov N.V., Rogachev A.D. et al. Global LC-MS/MS targeted metabolomics using a combination of HILIC and RP LC separation modes on an organic monolithic column based on 1-vinyl-1, 2, 4-triazole // Talanta. 2024. Vol. 267. P. 125168.

Влияние терагерцового излучения на взаимодействие альбумина с ионами кальция

Е.Ф. Немова¹, О.П. Черкасова^{1,2}, Н.А. Николаев^{1,2}

¹ Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

² Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
o.p.cherkasova@gmail.com

Взаимодействие терагерцового (ТГц) излучения с белками, которые выполняют регуляторные функции и представлены в значительных количествах в клетках и тканях организма, может привести к изменению их активности и, как результат, к изменению функций клеток и организма в целом [1–3]. Альбумины выполняют в организме важные функции: стабилизируют внеклеточную жидкость, отвечают за транспортировку различных биологических молекул, в том числе гормонов, ферментов, а также ионов металлов [4]. Альбумин – основной белок сыворотки крови. Его третичная структура, определяемая взаимодействиями между фрагментами и отдельными функциональными группами полипептидной цепи, чувствительна к облучению ТГц-излучением, приводящему к конформационному переходу [4]. В работе исследовано влияние предварительного облучения пленочных препаратов бычьего сывороточного альбумина (БСА) на способность этого белка к агрегации в водном растворе и на связывание с ионами кальция. Для выявления этих эффектов была разработана хроматографическая методика определения функциональных групп молекул БСА, участвующих в агрегации и в связывании с ионами кальция. С её применением выявлены фрагменты структуры БСА, участвующие в конформационном переходе под действием терагерцового излучения.

В результате исследования обнаружено изменение степени связывания для облученных препаратов БСА с ионами кальция при их биологически значимой концентрации (2–4 ммоль/л). Показано, что связывание является процессом, конкурирующим с агрегацией молекул белка, а предварительное облучение терагерцовым излучением приводит к уменьшению агрегации БСА в присутствии ионов кальция.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Высокора разрешающая спектроскопия газов и конденсированных сред» ИАиЭ СО РАН.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАиЭ СО РАН и ИЛФ СО РАН.

1. Черкасова О.П., и др. // *Опт. и спектр.* 2020. **128** (6). 852–864.
2. Cherkasova O.P., et al. // *J. Biomed. Opt.* 2021. **26** (9). 090902.
3. Fedorov V.I., et al. // *J. Opt. Technol.* 2017. **84** (8). 509–514.
4. Nemova E.F., et al. // *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2024. **18** (1). 95–100.

Алмазкарбидкремниевый композит «Скелетон» для электроники, микроволновой техники и фотоники

С.К. Гордеев¹, С.Б. Корчагина¹, Е.Н. Моисеев¹, В.Е. Запевалов², В.В. Паршин², Е.А. Серов²,
А.Е. Пестов², А.Я. Лопатин², О.В. Палашов², И.И. Кузнецов², М.Ю. Глявин²

¹Центральный научно-исследовательский институт материалов им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
gordeevsk@mail.ru

Алмазкарбидкремниевый композит «Скелетон» является композиционным материалом, в котором зерна алмаза связаны матрицей, состоящей из карбида кремния и кремния. Соотношение фаз может быть изменено в процессе изготовления. Содержание алмаза варьируется в диапазоне 40–70% об., кремния – 4–15% об., карбида кремния – 25–50% об. Большое содержание алмаза в материале придает ему высокие механические и теплофизические свойства. АКК «Скелетон» обладает высокой твердостью, хорошими конструкционными свойствами (прочность, жесткость), высокими теплопроводностью и температуропроводностью. Материал устойчив при высоких температурах. Безусадочная технология изготовления, основанная на процессах реакционного спекания, позволяет изготавливать изделия сложных форм и больших размеров с высокой точностью.

АКК «Скелетон» используется для изготовления оптических деталей, теплоотводящих и износостойких деталей, элементов высокой жесткости. Обсуждаются его теплофизические и диэлектрические параметры для использования в качестве основы для высокотеплопроводящих подложек для силовой микроэлектроники, для создания основных элементов конструкции поглощающих рассеянное микроволновое излучение в гиротронах мегаваттного уровня мощности.

Обсуждаются перспективы применения материала АКК «Скелетон» для изготовления подложек водоохлаждаемых рентгеновских зеркал, работающих под мощными пучками, а также теплоотводящих элементов дисковых лазеров.

Высокотемпературное поглощение в широкозонных полупроводниках

В.В. Паршин, Е.А. Серов, В.Е. Запевалов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
parsh@ipfran.ru

К широкозонным полупроводникам относятся такие популярные материалы, как алмаз, карбид кремния, а также структуры, образованные элементами из третьего и пятого столбца таблицы Менделеева ($A^{III}-B^V$) – BN, AlN, GaN, GaAs, InP. Такие полупроводники уже нашли широкое применение в мм- и субмм-диапазонах длин волн. Например, зеркала из таких материалов предлагается использовать для управления потоками микроволнового излучения МВт-уровня мощности; для удвоения частоты излучения субтерагерцовых гиротронов. Важнейшей областью применения является использование широкозонных полупроводников (алмаз, карбид кремния, нитрид бора) в качестве окон вывода энергии мощных генераторов – гиротронов. Первейшей информацией для расчёта взаимодействия образцов с электромагнитным излучением является зависимость диэлектрических параметров (показателя преломления и поглощения) материалов от частоты и температуры.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования показателя преломления и $\text{tg } \delta$ в стандартных пластинах высокочистого нелегированного монокристаллического GaAs, компенсированного кристалла InP:Fe, монокристаллического карбида кремния (6H-SiC), «оконных» пластин CVD-алмазов и нитрида бора (BN). Исследования проведены в диапазоне частот 80-300 ГГц и в интервале температур от 100 К до ~ 870 К. Определена энергия активации глубоких примесей. Обсуждаются механизмы поглощения.

Показано, что при высоких температурах поглощение определяется несобственной проводимостью, генерируемой различного рода примесями и дефектами решётки с энергией активации значительно меньше собственной.

Единственным реальным исключением является нитрид бора, в котором потери увеличиваются незначительно вплоть до температур ~ 1000 °С.

Исследования выполнены на резонаторном спектрометре на основе высокочастотного резонатора Фабри – Перо.

Работа выполнена при поддержке госзадания FFUF-2022-0007.

Полимерные композитные материалы для субтерагерцового диапазона

В.В. Паршин¹, К.В. Минеев¹, Родин Ю.В.¹ Заславский В.Ю.¹ Р.М. Розенталь¹,
В.Ф. Аристов², И.А. Вихров², А.А. Ерёмин²

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород

² Научно-исследовательский институт космических и авиационных материалов, Переславль-Залесский
alexejswt@gmail.com

В докладе представлены результаты исследования ряда образцов высокотехнологичных композитных материалов Аристар и Аристид, отличающихся высокими показателями прочности (в т. ч. ударной), термостойкости, трещиностойкости (в т. ч. при термоциклировании и термоударах), стойкостью к климатическим условиям (низкое влагопоглощение), высокой химической и радиационной стойкостью, низкой токсичностью, пожаробезопасностью и низким газовыделением. Эти свойства обеспечиваются органическими связующими (матрицами) собственной разработки НИИКАМ, армированными непрерывными волокнистыми материалами и/или дисперсными частицами.

Аристар – семейство, наполненное непрерывными армирующими материалами (жгуты и ткани на основе углеродных, стеклянных, кварцевых, арамидных, полиэтиленовых (СВМПЭ) и любых других волокон в заданных комбинациях и пропорциях): Аристар-Е для изделий с максимальной прочностью и лёгкостью, Аристар-С для радиопрозрачных и электроизоляционных изделий, Аристар-В для максимально жёстких размеростабильных конструкций.

Аристид – семейство материалов с дисперсными наполнителями: Аристид-В с наполнением высокопрочными сферопластиками плотностью от 0,4 до 0,7 г/см³, Аристид-Т и Аристид-М с легковесными наполнителями плотностью от 0,05 до 0,15 г/см³.

На резонаторном спектрометре УНУ ЦКП-7 по разработанной в ИПФ РАН методике были проведены измерения показателя преломления n и величины угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ образцов серии Аристид-ВС/0,7 и ВП/0,5 и образца препрега стеклопластика Аристар-СТП. Результаты измерений приведены в таблице.

Результаты измерений преломления n и величины потерь $\text{tg}\delta$ образцов НИИКАМ

Образец	Частота [ГГц]	n	$\text{tg}\delta$ [10^{-3}]	Плотность
Аристид ВС/0,7	6–22 (измерения НИИКАМ)	1,45	3–11	0,71 г/см ³
	124	1,401 ± 0,001	10	
	145		10,5	
	166		11,5	
	186		12	
Аристид ВП/0,5	6–22 (измерения НИИКАМ)		1–8	0,52 г/см ³
	122,5	1,312 ± 0,001	9	
	147		10	
	171		11	
	196,5		12	
Аристар СТП	115,5	1,951	19,2	
	134,7	1,950	21,1	
	154,2	1,948	22,4	
	173,4	1,951	24	

Согласно анализу технологов НИИКАМ, данные материалы могут обладать лучшими диэлектрическими характеристиками при отдельном подборе режима отверждения.

Перспективные композитные материалы для ТГц-диапазона длин волн

В.В. Паршин¹, Е.А. Серов¹, В.Е. Запевалов¹, Д.А. Трубин², С.К. Гордеев²

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

² Центральный научно-исследовательский институт материалов им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург
parsh@ipfran.ru

Развитие современной электроники базируется на широком использовании разнообразных материалов, от свойств которых зависят предельные возможности электронных приборов и радиотехнических устройств.

Проведены исследования диэлектрических параметров – показателя преломления, $\text{tg}d$, а также коэффициента отражения современных композитных материалов и формованного терморасширенного графита в мм-диапазоне длин волн.

Представленные уникальные металлодиэлектрические конструкционные материалы открывают широкие возможности для создания различного рода устройств, находящихся во взаимодействии с электромагнитной волной. Например, для создания различного рода вакуумноплотных малоотражающих поглотителей с большой теплопроводностью, позволяющих отводить большие тепловые потоки (рассеянное излучение) и при этом работать до высоких температур при минимальном тепловом расширении, а также для создания высокомоощных калориметров или безэховых камер, для создания балластных окон средней мощности и т. д.

Ряд композитных диэлектриков с огромным диапазоном диэлектрических и тепломеханических свойств позволяет создавать недоступные ранее конструкции для применения в мм- и субТГц-диапазонах. Например, сверхпрочные жаростойкие или суперлёгкие обтекатели антенн и т. п.

Исследовались: каркасный композит молибден/медь МД-50, алмазокарбидокремниевый композит АКК «Скелетон», композиты на основе гексагонального нитрида бора БГП-10, БНГТ-95, формованный терморасширенный графит.

Работа выполнена в рамках госзадания FFUF-2022-0007.

Практические результаты создания измерительного СВЧ-оборудования в диапазоне частот до 40 ГГц

А.Н. Сафронов, А.В. Байкин, Д.А. Маркарян

ООО «Миг Трейдинг»
a.baykin@mig-trading.ru

При исследованиях, разработке и производстве перспективных радиоэлектронных систем частотный диапазон до 40 ГГц является наиболее востребованным. Прогресс по таким направлениям, как радиолокация, радионавигация, системы связи, спутниковые системы, медицина, биология, автомобильные системы помощи водителю, малые радиолокационные станции (РЛС) беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) тесно связан с использованием миллиметровых длин волн применяемых сигналов.

Освоение частотного диапазона до 40 ГГц требует наличия современного парка отечественного измерительного оборудования, в том числе высококачественных источников СВЧ-сигналов для измерительных трактов.

Компания «Миг Трейдинг» решает поставленную задачу двумя способами. Бюджетный – разработано СВЧ-устройство, применяемое совместно с генератором до 20 ГГц, для расширения его частотного диапазона до 40 ГГц. Бескомпромиссный – разрабатывается СВЧ-генератор с частотным диапазоном 100 кГц – 40 ГГц.

Результатом работы по первому направлению является создание и внесение в Госреестр СИ Модуля расширения частоты и уровня сигналов СВЧ-генераторов EMG-40 (рабочий диапазон 100 МГц–40 ГГц). По второму, в качестве промежуточного этапа, – создание и внесение в Госреестр СИ Генератора СВЧ-сигналов MBG100 с рабочим диапазоном 100 кГц – 20 ГГц. По текущим результатам получено 2 патента на изобретение, 1 патент на промышленный образец, 1 патент на полезную модель, подана заявка на патент на изобретение.

Таким образом, компания «Миг Трейдинг» реализовала и предлагает готовое решение по получению высококачественного источника СВЧ сигнала в диапазоне до 40 ГГц, позволяющее существенно снизить финансовые затраты. А также имеет все наработки для завершения создания отечественного аналогового СВЧ-генератора с частотным диапазоном 100 кГц – 40 ГГц с высокими параметрами.

Создание системы обеспечения единства измерений комплексных коэффициентов отражения и передачи в волноводных трактах

А.С. Бондаренко¹, А.С. Боровков^{1,2}, И.М. Малай^{1,2}, П.Д. Михайлов¹, В.А. Семёнов¹

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

² Московский институт электронной техники, Москва, Зеленоград
borovkov@vniiftri.ru

Комплексные коэффициенты отражения (ККО) и комплексные коэффициенты передачи (ККП) характеризуют качество согласования приёмопередающих трактов в диапазоне сверхвысоких частот. Измерение данных параметров в волноводных трактах при разработке, производстве, испытаниях и эксплуатации радиотехнических устройств и узлов обосновано необходимостью учёта их значений при измерении других физических величин, таких как мощность, спектральная плотность мощности шума, ослабление, коэффициент усиления антенны и др. [1]. Требования к техническим характеристикам современных систем связи и радиолокации напрямую связаны с показателями точности измерений ККО и ККП в волноводных трактах. Это наиболее актуально в микроэлектронике и при производстве электронной компонентной базы.

До недавнего времени в государственной системе обеспечения единства измерений отсутствовал Государственный первичный эталон единиц ККО и ККП в волноводных трактах (ГПЭ), а прослеживаемость единиц данных параметров к основным величинам системы СИ обеспечивалась с помощью рабочих эталонов 1980-х гг. Их диапазоны рабочих частот и значений, а также уровень автоматизации не удовлетворяют современным требованиям. Средства измерений из их состава устарели и выработали ресурс. Эталоны не позволяли решать современные измерительные задачи. Увеличение парка средств измерений единиц ККО и ККП требует применения эталонов, которые имеют высокое быстродействие и работают в диапазоне частот до сотен гигагерц.

Исходя из вышеизложенного, актуальной задачей является построение системы, в основе которой будет находиться ГПЭ. Система должна включать единые, научно обоснованные методы воспроизведения и передачи единиц ККО и ККП в волноводных трактах, а также методики измерений, позволяющие проследить результат измерений к ГПЭ.

С целью обеспечения единства данного вида измерений в 2024 году разработаны и утверждены ГПЭ в диапазоне частот от 2,14 до 178,4 ГГц (ГЭТ 219-2024) [2] и Государственная поверочная схема для средств измерений ККО и ККП в волноводных трактах. В рамках работы по созданию эталона в ФГУП «ВНИИФТРИ» налажено производство наборов волноводных мер и нагрузок.

ГПЭ обеспечивает воспроизведение, хранение и передачу единиц комплексного коэффициента отражения и комплексного коэффициента передачи в 16 отечественных и 22 зарубежных волноводных трактах прямоугольного сечения [3]. В данной работе приведены структурная схема, технические и метрологические характеристики эталона. Результаты исследований подтвердили, что ГЭТ 219-2024 имеет сопоставимые метрологические характеристики с эталонами национальных метрологических институтов других стран (NPL, PTB, NIST, METAS и др.).

1. Семёнов В.А., Коудельный А.В., Перепёлкин В.А., Чирков И.П. Перспективы развития эталонов в области измерений мощности СВЧ в радиочастотных трактах // Альманах современной метрологии. 2019. Т. 2, № 18. С. 46–64 <https://elibrary.ru/yoftug>

2. Бондаренко А.С., Боровков А.С., Малай И.М., Семёнов В.А. Государственный первичный эталон единиц комплексного коэффициента отражения и комплексного коэффициента передачи в волноводных трактах в диапазоне частот от 2,14 до 178,4 ГГц ГЭТ 219-2024 // Измерительная техника. 2024. Т. 73, № 7. С. 4–13 <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-7-4-13>.

3. Бондаренко А.С., Боровков А.С., Малай И.М., Семёнов В.А. Методика определения погрешности воспроизведения единицы комплексного коэффициента отражения в волноводных трактах // Измерительная техника. 2021. № 11. С. 55–59. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-11-55-59>.

Особенности проектирования эталонной калибровочной пластины в диапазоне частот до 110 ГГц

А.С. Бондаренко¹, И.М. Малай^{1,2}, П.Д. Михайлов¹, А.В. Пивак¹, А.В. Раков¹, Д.А. Смотров¹

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

² Московский институт электронной техники, Москва, Зеленоград
rakov@vniiftri.ru

Ядром современных радиоэлектронных устройств являются функциональные микроэлектронные аналоговые и цифровые блоки, выполненные в интегральном исполнении. В рамках интегральной технологии полупроводниковая подложка с многократно растрированными микроэлектронными структурами разделяется на идентичные кристаллы, которые, в свою очередь, помещаются в корпуса микросхем. В данном производственном маршруте важным этапом является проверка функциональных характеристик микроэлектронных структур на кристаллической подложке перед их корпусированием.

Требуемые измерения проводятся при помощи зондовой станции и векторного анализатора цепей. При этом измеряются комплексные коэффициенты отражения и передачи, совместно называемые S-параметрами. Для того чтобы соединить кабель измерительного прибора и контактную площадку в микроэлектронном исполнении на полупроводниковой пластине, используются измерительные зонды. Для градуировки измерительной установки применяются калибровочные подложки. При этом S-параметры мер на калибровочной подложке непосредственно влияют на способность калибровочной процедуры измерительного прибора исключить влияние кабелей и самих измерительных зондов из результатов измерений микроэлектронной структуры на пластине.

Аппаратура для такого рода измерений в основном производится за рубежом. С некоторых пор поставки иностранных измерительных систем в Российскую Федерацию стали резко ограничены. Отечественная микроэлектроника оказалась в положении, при котором остро не хватает калибровочных подложек и при этом отсутствует единое метрологическое обеспечение.

С целью решения данной проблемы во ФГУП «ВНИИФТРИ» ведётся разработка специального эталона единиц комплексного коэффициента отражения и комплексного коэффициента передачи микроэлектронных структур на пластине в диапазоне частот до 110 ГГц [1].

В настоящей работе произведен анализ требований к характеристикам мер в составе калибровочных наборов, реализованных на калибровочной подложке [2, 3]. На основе проанализированных требований произведена разработка топологий калибровочных подложек в диапазоне частот до 110 ГГц с учетом особенностей доступных отечественных технологий. Произведены исследования характеристик изготовленных калибровочных мер и выполнена оценка погрешности измерений.

1. Малай И.М. Этапы создания и перспективные направления развития метрологического обеспечения в области радиоэлектронных измерений// Альманах современной метрологии: науч.-технич. журн. 2020. № 1. С. 65–82.

2. Marco Spirito, Uwe Arz, etc. Guidelines for the design of calibration substates, including the suppression of parasitic modes for frequencies up to and including 325 GHz. EMPiR 14IND02 – PlanarCal. 2018.

3. Uwe Arz, Thorsten Probst, etc. Best Practice Guide for Planar S-Parameter Measurements using Vector Network Analysers. EMPiR - 14IND02 PlanarCal. 2019.

Разработка ГИС датчика мощности

В.Д. Бобова, В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин

Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна, Черноголовка
vasilina.bobova@bk.ru

Развитие измерительного оборудования СВЧ требует появления новых отечественных приборов, поскольку доступные на российском рынке датчики мощности часто не соответствуют необходимым требованиям. Уход ведущих иностранных производителей, таких как Keysight и Rohde & Schwarz, усилил необходимость разработки собственных ГИС датчиков мощности, что обеспечит независимость отечественной промышленности и удовлетворит спрос на современные измерительные системы.

Современные ваттметры, основанные на диодных детекторах, в основном изготавливаются с использованием гибридных или монокристаллических интегральных схем [1, 2]. Применение именно диодных детекторов обосновано, прежде всего, быстрым временем реакции, а также точностью и возможностью работы с широким диапазоном частот [3]. Более того, они предоставляют возможность частотно-селективных измерений и работы с низкими уровнями сигналов [4].

На текущем этапе наша команда разработала и провела предварительное моделирование в среде ANSYS HFSS датчика мощности ГИС на базе низковольтных диодов (рис. 1), оптимизируя его конструкцию для измерения мощности в заданном диапазоне (до 40 ГГц). Проведены испытания макета устройства на подтверждение его функциональности и соответствие расчетным характеристикам.

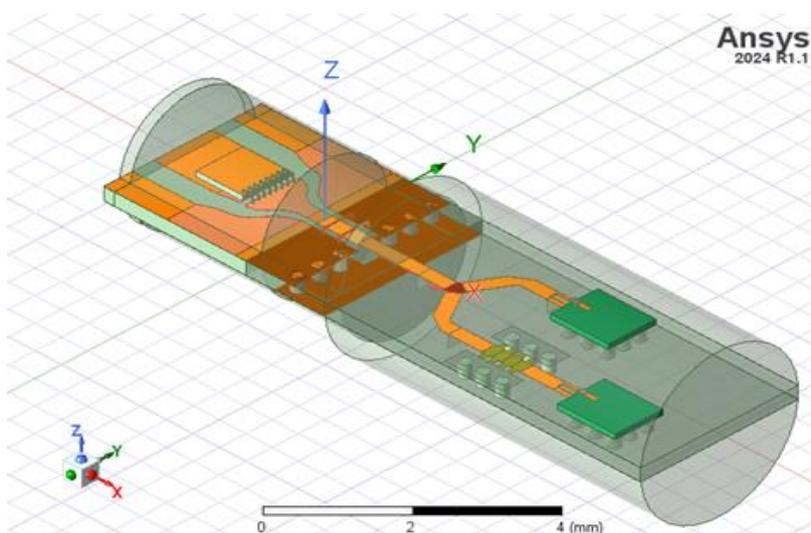


Рис. 1. Модель ГИС датчика мощности в программе проектирования

1. Старцев А.В. Современные измерители мощности СВЧ // Вестник метролога. 2011. С. 24–25.
2. Agilent Power Meters and Power Sensors. High performance solutions for peak and average power measurements [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.home.agilent.com>.
3. Билько М.И., Томашевский А.К., Шаров П.П. Измерение мощности на СВЧ. Москва : Советское радио, 1976. С. 14.
4. Agilent Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements. Application Note 1449-1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.home.agilent.com>.

Исследование влияния параметров измерительного зонда на погрешность измерений S-параметров микроэлектронных структур на пластине

А.С. Боровков^{1,2}, И.М. Малай^{1,2}, П.Д. Михайлов¹, А.В. Пивак¹, А.В. Раков¹, В.А. Семёнов¹

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

² Московский институт электронной техники, Москва, Зеленоград
worldquest1116@mail.ru

Интегральные схемы, работающие в диапазоне сверхвысоких частот, широко используются для создания средств радиосвязи, радиолокации и радионавигации. Измерения на пластине являются одной из операций контроля характеристик микроэлектронных устройств при их разработке и серийном производстве. В настоящее время метрологическая прослеживаемость единиц комплексных коэффициентов отражения и передачи к государственным эталонам не определена, поэтому результаты измерений характеристик производимых изделий на различных измерительных установках могут отличаться. С целью решения данной проблемы в ФГУП «ВНИИФТРИ» ведётся разработка специального эталона единиц комплексного коэффициента отражения и комплексного коэффициента передачи микроэлектронных структур на пластине в диапазоне частот до 110 ГГц с целью обеспечения единства данного вида измерений [1].

В рамках опытно-конструкторской работы по созданию эталона разрабатываются измерительные зонды. Они представляют собой специальную оснастку, которая обеспечивает возможность подключения средств измерений, имеющих стандартные коаксиальные или волноводные соединители к контактными площадкам микроэлектронных структур на пластине. Характеристики зондов напрямую влияют на погрешность измерений S-параметров измеряемых устройств. Для проведения измерений данных параметров разработана методика по определению их S-параметров на основе метода сравнения калибровок [2].

В настоящей работе представлены варианты решения задачи оценки характеристик широкополосных измерительных зондов. Описан принцип и процедура определения основных характеристик измерительного зонда, которые определяют степень согласования зонда как четырехполосника и, соответственно, погрешности результатов измерений S-параметров микроэлектронных структур на пластине. Проведен сравнительный анализ результатов исследований, полученных после применения различных методик измерений S-параметров измерительных зондов. Показана целесообразность применения выбранного подхода при разработке, исследовании и испытании измерительных зондов. Установлено, что данный метод позволяет более точно исследовать разработанный зонд по сравнению с другими методами.

Параметры измерительных зондов являются одним из источников составляющей систематической погрешности в данном виде измерений. Влияние степени рассогласования измерительных зондов как источника погрешности на результат измерений исследовалось в настоящей работе. В результате экспериментов установлено, что из-за рассогласования зонда не в полной мере исключаются составляющие систематической погрешности измерений S-параметров микроэлектронных структур, реализованных на пластине.

1. Малай И.М. Этапы создания и перспективные направления развития метрологического обеспечения в области радиоэлектронных измерений // Альманах современной метрологии: науч.-технич. журн. 2020. № 1. С. 65–82.

2. Боровков А.С., Раков А.В., Беспалова Д.А., Михайлов П.Д. Разработка методики обработки сигналов в частотной области для определения характеристик измерительных зондов // цифровая обработка сигналов и её применение. DSPA-2024. Доклады XXVI Международной конференции. Москва, 2024. С. 258–263.

**Разработка и изготовление
эталонных низкотемпературных генераторов шума (НГШ)
в миллиметровом диапазоне частот от 78,33 до 300 ГГц,
разработанных в рамках ОКР «Мощность»**

И.М. Малай, М.В. Саргсян, М.С. Маркова, М.И. Фартушин, К.М. Короваев

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
Солнечногорск, р. п. Менделеево, Московская обл.
mcrmi121@vniiftri.ru

Представлен обзор работы, целью которой является обеспечение единства измерений радиотехнических величин в интересах повышения конкурентоспособности экономики, высокого уровня точности измерений, сохранения метрологического суверенитета Российской Федерации путем создания низкотемпературных генераторов шума (НГШ) в диапазоне частот от 78,33 до 300 ГГц для модернизации государственного первичного эталона единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения ГЭТ21-2021.

Результаты расчетов и измерений показали, что после заливки жидким азотом криостата НГШ происходит охлаждение НГШ и стабилизация уровня азота через 30 минут. Криостат в ходе работы не замерзает и находится при комнатной температуре. Нестабильность уровня спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения НГШ составляет не более 0,2 К в час. Уровень эквивалентной шумовой температуры в диапазоне частот от 78,33 до 300 ГГц находится в пределах от 91,61 до 119,44 К.

Определение волнового сопротивления копланарной линии эталонной калибровочной пластины

А.С. Бондаренко¹, А.С. Боровков^{1,2}, И.М. Малай^{1,2}, П.Д. Михайлов¹, А.В. Пивак¹, А.В. Раков¹,
В.А. Семёнов¹, Д.А. Смотрова¹, И.П. Чирков¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Солнечногорск

² Московский институт электронной техники, Москва, Зеленоград

bespalovadaryi2015@yandex.ru

Измерения S-параметров микроэлектронных структур, реализованных на пластине, проводятся при производстве и эксплуатации изделий микроэлектроники. Чтобы обеспечить единство данного вида измерений в РФ, ФГУП «ВНИИФТРИ» проводит работу по созданию специального эталона комплексных коэффициентов отражения и передачи микроэлектронных структур на пластине в диапазоне частот до 110 ГГц [1]. В рамках данной работы в кооперации с технологическими партнерами налаживается производство отечественных калибровочных пластин. Каждая пластина содержит набор мер волнового сопротивления в виде копланарных линий передачи. Определение действительного значения волнового сопротивления копланарной линии с обеспечением прослеживаемости к основным единицам системы СИ является важнейшей задачей разработки специального эталона [2]. Она осложнена отсутствием стандартизации геометрических размеров сечений копланарных линий, материала подложек, а также различием технологических процессов производства. В данной работе описаны исследования копланарных линий макета эталонной калибровочной пластины.

Известны несколько методов определения волнового сопротивления копланарной линии передачи, часть из которых рекомендована европейским консорциумом PlanarCal: аналитическое моделирование копланарной линии; оценка волнового сопротивления квазистатическим методом на основе модели линии передачи, описываемой параметрами эквивалентной схемы; электродинамическое моделирование в 2,5D или 3D САПР. Первые два метода основаны на комбинации аналитического моделирования и измерений, третий – расчётный метод. В данной работе с целью повышения достоверности и точности определения волнового сопротивления линии передачи исследования проводились с использованием трёх представленных методов. Оценки разброса волнового сопротивления для разных мер на пластине проводилась косвенным методом, который основан на вычислении постоянной распространения для группы отрезков копланарных линий передачи с помощью процедуры градуировки измерительной установки mTRL в соответствии с алгоритмом, разработанным в NIST. Для аналитического моделирования использовались номинальные значения электрофизических параметров копланарной линии.

По результатам исследований, полученным тремя методами, значения волнового сопротивления отличаются друг от друга не более, чем на 0,35 Ом при номинальном значении 50 Ом (т. е. 0,7%). Размах волнового сопротивления по группе мер не превышает 0,5% в диапазоне частот до 50 ГГц. Таким образом, при дополнительных исследованиях, применении статистической обработки и улучшении технологического процесса производства пластин потенциально достижимая погрешность определения волнового сопротивления не будет превышать 0,3–0,5% в диапазоне частот до 50 ГГц. Представленный метод определения волнового сопротивления копланарной линии передачи достаточно трудоёмкий, и поэтому его целесообразно применять только при исследовании эталонных калибровочных пластин, а единицы волнового сопротивления передавать от них рабочим мерам с использованием более простых средств и методов.

1. Бондаренко А.С., Боровков А.С., Малай И.М., Семёнов В.А. Эталон единиц комплексных коэффициентов отражения и передачи микроэлектронных структур на пластине // Наноиндустрия. 2021. Спецвыпуск 7s. Т. 14. С. 450–453. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.450.454.

2. Малай И.М. Этапы создания и перспективные направления развития метрологического обеспечения в области радиоэлектронных измерений // Альманах современной метрологии : науч.-технич. журн. 2020. № 1. С. 65–82.

Модули расширения частотного диапазона 50–178 ГГц для векторных анализаторов цепей

А.А. Титенко^{1,2}, В.Д. Бобова^{1,2}, А.М. Зарезин^{1,2}, М.В. Синогин³, С.А. Заостровных³,
И.В. Кукушкин^{1,2}, В.М. Муравьев^{1,2}

¹ ООО «МВЭЙВ», Черноголовка

² Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка

³ ООО «ПЛАНАР», Челябинск

toliatitenko@gmail.com

Одной из ключевых и наиболее перспективных задач по развитию электронной промышленности Российской Федерации является создание отечественного измерительного оборудования, а также элементной базы для работы в миллиметровом диапазоне длин волн. Особую роль в разработке рабочих устройств в терагерцовом диапазоне частот играют векторные анализаторы цепей (ВАЦ). Они используются при измерении комплексных коэффициентов передачи и отражения (элементов матрицы рассеяния) многополюсников на стадии научных исследований и разработок, а также при проведении испытаний в промышленном производстве аппаратуры, в том числе в составе автоматизированных измерительных стендов. Подключение к анализатору цепей модулей расширения частотного диапазона объединяет их в единую измерительную систему, обеспечивая смещение верхней границы диапазона рабочих частот ВАЦ вплоть до 1,1 ТГц.

Компания «МВЭЙВ» успешно разработала и запустила в серийное производство линейку модулей расширения «ВЕКТОР» [1] на частотные диапазоны 50–75 ГГц, 75–110 ГГц и 110–170 ГГц для векторных анализаторов цепей. Исследование характеристик приборов показало, что модуль 50–75 ГГц имеет типичную выходную мощность 15 дБм и рабочий динамический диапазон 125 дБ; конверторный модуль 75–110 ГГц демонстрирует типичную выходную мощность 11 дБм и динамический диапазон 120 дБ; модуль на частотный диапазон 110–170 ГГц имеет типичную выходную мощность 1 дБм и динамический диапазон 110 дБ. Разработанные модули расширения совместимы как с отечественными векторными анализаторами цепей ПЛАНАР, так и с зарубежными от Rohde & Schwarz и Keysight. Сравнительный анализ МРЧД показал, что по выходной мощности и динамическому диапазону измерений разработанные устройства не уступают зарубежным аналогам фирм Virginia Diodes и Seyear. При разработке приборов был «с нуля» отработан ряд уникальных технологий, которые позволили добиться высоких технических характеристик измерительной схемы МРЧД. Отдельно стоит упомянуть, что в разработанных приборах перестройка мощности осуществляется с помощью широкополосных электрически управляемых аттенуаторов.



Рис. 1. Конверторный модуль «ВЕКТОР 75-110»

1. Отечественные модули расширения 50–75 ГГц и 75–110 ГГц для векторных анализаторов цепей / В. Муравьев, А. Зарезин, А. Титенко и др. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2023. № 6(227). С. 110–115. DOI 10.22184/1992-4178.2023.227.6.110.114.

Вынужденные колебания в нелинейном СВЧ-контуре. Резонансы и спектры вплоть до 5 мм

Н.А. Максимов, Е.А. Мясин

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал),
пл. Введенского, 1, Фрязино, Московская обл., 141190
maksna49@mail.ru

Рассматривается гармоническое воздействие на нелинейную систему в зависимости от частоты и амплитуды внешнего сигнала. Нелинейная система представляет собой колебательный СВЧ-контур, состоящий из линейной индуктивности и нелинейной емкости, роль которой выполняет один из р-п-переходов Si-Ge транзистора BFP620F с граничной частотой ~ 65 ГГц (рис. 1).

Показано, что в результате такого воздействия в системе могут образовываться резонансы как на частотах, определяемых величиной индуктивности и постоянной составляющей нелинейной емкости р-п-перехода при нулевом смещении на нём, так и на частотах, определяемых этой же индуктивностью и высшими гармониками нелинейной ёмкости, рис. 2(1). На рис. 2(2) для сравнения приведена резонансная характеристика линейного контура с такой же индуктивностью и линейной ёмкостью ~ 1 пФ.

Обнаружено, что наличие таких резонансов формирует амплитудно-частотную характеристику контура и позволяет управлять спектральной характеристикой колебаний, возбуждаемых в системе во всем диапазоне работы транзистора.

Данное исследование было проведено на основе схемотехнического моделирования с использованием пакета программ ADS.

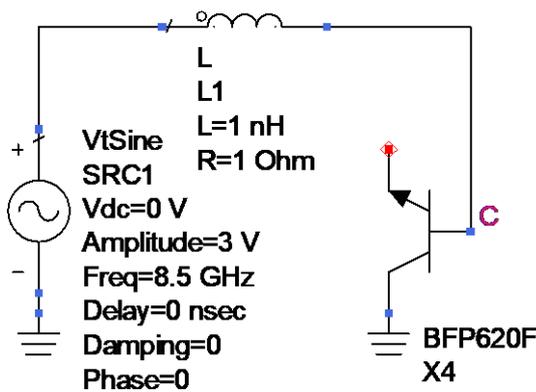


Рис. 1

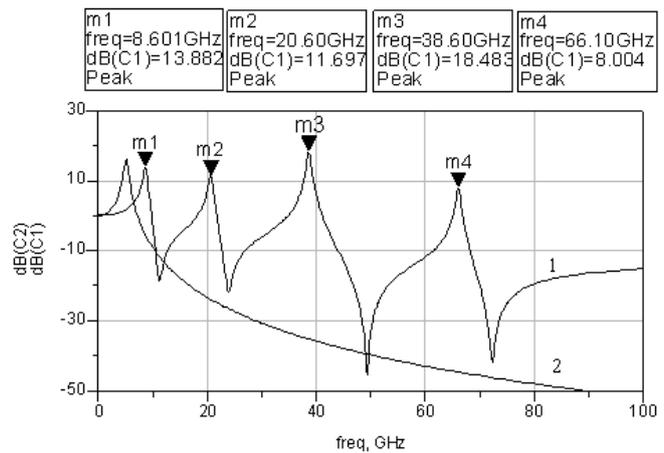


Рис. 2

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А		
Абрамов О.А.	20	
Абубакиров Э.Б.	26, 41	
Агафонов А.Н.	69	
Адилова А.Б.	20, 47	
Азаров И.А.	80	
Амерханов И.С.	91, 92	
Андрюшкин В.В.	66	
Антонов А.В.	65	
Антонова И.В.	64	
Анфертьев В.А.	65, 66	
Аржанников А.В.	13, 46, 49, 50, 53	
Аристов В.Ф.	121	
Артакин А.И.	62	
Афоненко А.А.	65, 66, 70	
Ахмадуллина Н.С.	109	
Б		
Багаев Т.А.	66	
Баздырев Н.А.	64, 69	
Байкин А.В.	123	
Бак П.А.	13, 53	
Бакулин М.И.	21	
Бакунин Г.В.	33, 48	
Бакунов М.И.	81	
Балега Ю.Ю.	89	
Бандуркин И.В.	58	
Банников М.И.	62	
Баранов С.А.	89	
Барышев В.Р.	17	
Басов Н.В.	117	
Батраков А.М.	53	
Белов Д.А.	66	
Белов С.П.	110	
Бирюков В.В.	96	
Благодаткин А.В.	95, 99	
Блохин С.А.	66	
Бобова В.Д.	126, 130	
Бобров М.А.	66	
Богданов С.А.	107, 112	
Богдашов А.А.	25, 28, 31, 32	
Богомолова Е.А.	33, 48	
Бодров С.Б.	81	
Бондаренко А.С.	124, 125, 129	
Борзосеков В.Д.	106, 109, 111	
Боровков А.С.	124, 127, 129	
Бутикова Е.А.	64, 117	
В		
Вакс В.Л.	65	
Ванда В.С.	64, 77, 80	
Васильев А.П.	66	
Вдовин В.Ф.	85, 89, 103, 113, 115	
Вебер С.	64	
Веселовский А.В.	78	
Вигасин А.А.	91, 92, 94	
Вилков М.Н.	31	
Винокуров Н.А.	64, 117	
Вихарев А.А.	19, 58	
Вихарев А.Л.	107, 112	
Вихров И.А.	121	
Власов С.Н.	47	
Водопьянов А.В.	64	
Воробьев И.А.	96	
Воронов Б.М.	76, 102	
Воронова Е.В.	111	
Г		
Гавриленко В.И.	65, 66, 70	
Гайслер Е.В.	117	
Галанина Т.А.	91, 92, 93, 94, 110	
Галдецкий А.В.	33, 48	
Галеева А.В.	62	
Галиев Р.Р.	66, 67	
Гачев И.Г.	28	
Гаштури А.П.	56, 107	
Герасимов В.В.	64, 69, 74, 77, 80	
Гетманов Я.В.	64	
Гинзбург Н.С.	17, 19, 26, 29, 30, 36, 41, 46, 50	
Гладышев В.О.	115	
Глотов А.Н.	115	
Глявин М.Ю.	18, 23, 25, 28, 57, 107, 119	
Гойхман М.Б.	30, 34	
Голубев Е.С.	98	
Голубятников Г.Ю.	110	
Гольцман Г.Н.	75, 76, 100, 101,	
Горбачев А.М.	107, 112	
Горбачев Я.И.	64	
Гордеев С.К.	119, 122	
Гордеева А.В.	95, 99	
Градов В.С.	88	
Громов А.В.	30, 35, 45	
Гудкова В.В.	111	
Гульовский Д.Р.	30, 34	
Гусейн-заде Н.Г.	106, 109	
Д		
Дворецкий С.А.	62	
Денисенко А.Н.	26, 41	
Денисов Г.Г.	10, 25, 28, 45, 55, 56, 57, 107	
Долженко Д.Е.	62	
Дубинов А.А.	65, 70	
Е		
Егоров С.В.	108	
Егорова Е.Д.	36	
Еремеев А.Г.	108	
Еремин А.А.	121	
Ермаков А.	61	
Ершова М.И.	101	
Ефимова М.В.	89, 113	
Ж		
Железнов И.В.	23, 28	
Жмудь Б.А.	79	
Жукавин Р.Х.	64, 65, 66	
З		
Зайцев А.В.	90	
Зайцев К.И.	67	
Заостровных С.А.	130	
Запевалов В.Е.	21, 37, 38, 47, 119, 120, 122	
Зарезин А.М.	130	
Заславский В.Ю.	17, 23, 26, 29, 30, 34, 36, 46, 50, 55, 121	
Землянуха П.М.	103	
Зинченко И.И.	84	
Зотова И.В.	19, 23, 28, 29, 31, 41	
Зубарев Н.М.	11	
Зубов Ф.И.	65, 66	
Зуев А.В.	82	
Зуев А.С.	37, 38	
И		
Иванов А.А.	39	
Иванов А.И.	64	
Ивашенцева И.В.	76, 102	
Иконников А.В.	62, 66, 79	
Ильин А.Ю.	24	
К		
Калинин П.В.	46, 49, 50	
Калынов Ю.К.	27	
Каменский М.В.	57, 107	
Камешков О.Э.	64	
Каныгин В.В.	117	
Капустин С.А.	89	
Каурова Н.С.	76, 102	
Кауц В.Л.	115	
Кашук Ю.А.	12	
Каютенко А.В.	115	
Кинев Н.В.	61, 71	
Кириченко К.Е.	88	
Китаева Г.Х.	68, 78	
Князев А.В.	111	
Князев Б.А.	64	
Ковадло П.Г.	88	
Ковалевский К.А.	65	
Ковригин М.И.	35	
Кожуховский А.К.	75	
Колесниченко Е.Е.	16	
Колик Л.В.	106	
Коломеец Д.А.	64, 117	
Коломенцева Д.А.	14	
Коломийцева Н.М.	33, 48	
Конникова М.Р.	63	
Коновалов С.В.	12	
Кончевков Е.М.	106, 109	
Корниенко В.Н.	22	
Короваев К.М.	128	

Королев И.В.	68	Мансфельд М.А.	89, 103	Петров С.А.	85
Королев С.А.	90	Маңуилов В.Н.	23	Пивак А.В.	125, 127, 129
Королева А.О.	91, 92, 93, 94	Маркарян Д.А.	123	Пиманов Д.А.	95, 99
Корчагина С.Б.	119	Маркова М.С.	128	Планкин О.П.	37, 42
Котов А.В.	34	Мармалюк А.А.	66	Покровский А.Г.	117
Котов Е.С.	53	Мартычев И.Е.	66	Пономарев Д.С.	66, 67
Котова Д.А.	51	Марухно А.С.	89, 115	Попик В.М.	64, 117
Кошелев М.А.	91, 92, 93	Матрозова Е.А.	99	Попов Л.Г.	21
Кошелец В.П.	61, 71	Мачерет Я.М.	53	Приходько А.Н.	101
Красильников А.В.	12	Меренков А.В.	87	Проявин М.Д.	26, 34, 38, 57, 107
Кристовский К.Г.	62	Минеев К.В.	58, 89, 98, 103, 113, 114, 115, 121	Прудковский П.А.	68
Крупин Д.С.	23, 40	Миронов А.П.	88	Пушкарев С.С.	82
Крылов А.А.	53	Михайлов Н.Н.	62	Р	
Кубарев В.В.	64	Михайлов П.Д.	124, 125, 127, 129	Радищев Д.Б.	112
Кузнецов И.И.	119	Мойзых М.Е.	14	Раевская Ю.В.	96
Кузнецов К.А.	68, 78	Моисеев Е.Н.	119	Раевский А.С.	96
Кузьменков А.Г.	66	Морозкин М.В.	57, 107	Разумов И.А.	117
Куклин К.Н.	49	Морозов С.В.	65, 72	Раков А.В.	125, 127, 129
Кукотенко В.Д.	64, 80	Муравьев В.М.	60, 126, 130	Ревин Л.С.	95, 99
Кукушкин И.В.	60, 126, 130	Мясин Е.А.	24, 131	Резник А.Н.	97
Кулагин В.В.	22	Н		Рогачев А.Д.	117
Куленко Я.В.	53	Назаровский А.В.	25	Родин Ю.В.	26, 30, 34, 121
Кулипанов Г.Н.	64	Немова Е.Ф.	118	Рожнев А.Г.	16, 20, 47
Куприянов З.П.	85	Никитин А.К.	64, 77	Розенталь Р.М.	29, 39, 40, 41, 42, 52, 121
Куприянов П.В.	85	Никитин П.А.	64	Ростов В.В.	15, 54
Курицын Д.И.	65	Никифоров Д.А.	53	Ростунцова А.А.	16, 29
Курников М.А.	81	Николаев Н.А.	105, 118	Рудаков К.И.	71
Кучерявый Е.А.	100	Николаев П.П.	115	Руденко Н.Ю.	87
Л		Новак Е.М.	43	Рудковский Д.М.	98
Лаврухин Д.В.	67	Новикова Т.И.	68, 78	Рыбаков К.И.	108
Ладейнов Д.А.	95	Новожилова Ю.В.	25	Рыскин Н.М.	16, 20, 29
Ладугин М.А.	66	Ножкин Д.А.	16	С	
Лазарев Д.В.	27	Носов В.И.	103	Сабчевский С.	18
Лапинов А.В.	86	О		Савилов А.В.	27, 43
Лаухин М.А.	98	Образцова Е.А.	109	Савин А.Н.	33, 48
Леженин А.А.	88	Ожогин И.С.	20	Сальков В.А.	103, 114
Лемзяков А.Г.	80	Оладышкин И.В.	73	Самсонов С.В.	28, 29, 31, 43
Леонов И.И.	110	Орловский А.А.	57, 107	Самцов Д.А.	13, 49, 50, 53
Леонтьев А.Н.	41, 42	Осинцева Н.Д.	64, 69, 74	Сандалов Е.С.	13, 46, 49, 50
Леснов И.В.	89, 103, 115	Ошарин И.В.	27	Саргсян М.В.	128
Летавин И.М.	58	П		Сафонова В.Ю.	95
Летунов А.А.	111	Павельев В.С.	64, 69, 74	Сафронов А.Н.	123
Литвинов Д.А.	115	Павленко А.В.	53	Святодух С.С.	75
Лобаев М.А.	112	Павлов А.Ю.	66, 79	Седов А.С.	51
Лобанов Л.Н.	11, 54	Павлов О.А.	53	Секачева А.Ю.	91, 92
Логачев П.В.	13, 53	Палашов О.В.	119	Селиверстов С.В.	75
Логвиненко В.П.	111	Палицин А.В.	26, 30, 34, 35, 45	Семенов В.А.	124, 127, 129
Лопатин А.Я.	119	Панин А.Н.	26, 30	Семенов Е.С.	27, 37, 42
Львов А.В.	101	Панкратов А.Л.	95, 99	Сергеев А.С.	23, 17, 26, 29, 36, 41, 46, 50
М		Паршин В.В.	55, 98, 119, 120, 121, 122	Серов Е.А.	55, 91, 92, 98, 119, 120, 122
Магоммедов Э.Ш.	14	Пельтек С.Е.	64	Сидоров Д.А.	39, 52
Майтама М.В.	82	Песков Н.Ю.	17, 26, 30, 36, 46, 50	Синицкий С.Л.	13, 46, 49, 50, 53
Макаров Д.С.	94	Пестов А.Е.	119	Синогин М.В.	130
Максимов М.В.	66	Петренко А.В.	53	Скворцова Н.Н.	38, 106, 109,
Максимов Н.А.	24, 131	Петров А.Е.	106	Сковородин Д.И.	13
Малай И.М.	124, 125, 127, 128, 129			Смотрова Д.А.	125, 129
Малахов В.А.	96			Соболев А.С.	79
Малахов Д.В.	106, 109				
Малеев Н.А.	65, 66				
Малкин А.М.	17, 26, 36				

Соболев Д.И.	34, 45, 55, 56, 107		Чмырь С.Н.	62
Соколов А.С.	106	Ф	Чопорова Ю.Ю.	64
Соловьева О.И.	117	Фартушин М.И.		
Соломатов Л.С.	87	Федотов А.Э.	128	Ш
Солуянова Е.А.	57, 107	Филиппенко Л.	19, 29, 36	Шарандин Е.А.
Сорокин А.А.	108	Финенко А.А.	61	Шарыпов К.А.
Спектор И.Е.	67	Фокин А.П.	91, 92, 94	Шевченко О.А.
Стародубов А.В.	20	Фоменко В.В.	25, 55	Шепелев А.В.
Старостенко Д.А.	13, 53	Фудин Д.Г.	98	Шитов С.В.
Степанов В.Д.	46, 50		75	Шиховцев А.Ю.
Степахин В.Д.	106, 109	Х		Шишилов О.Н.
Столяров В.А.	89	Хабибуллин Р.А.	65, 66, 67, 70, 79, 82	Шкуринов А.П.
Суховерхий А.В.	52	Хайкин В.Б.	88	Шпак В.Г.
		Хан Ф.В.	61, 71	Шугуров А.И.
Т		Харчев Н.К.	106, 109	Шунайлов С.А.
Тай Е.М.	57, 107	Хасанов И.Ш.	64	Шураков А.С.
Терешкин Е.В.	85	Холопцев В.В.	107, 108	
Тимофеев С.А.	85	Хохлов Д.Р.	62	Щ
Титенко А.А.	130			Щеглов М.А.
Титов В.Н.	20	Ч		Щегольков Н.С.
Торгашов Р.А.	16, 20	Чекушкин А.М.	71	Щербаков В.В.
Третьяков И.В.	76, 102	Черкасова О.П.	105, 118	Щербаков В.И.
Третьяков М.Ю.	91, 92, 93, 94, 110	Чернятина А.А.	98	
		Чесноков Е.Н.	64	Ю
Трубин Д.А.	122	Чигинев А.В.	95, 99	Юровский Л.А.
Тукмаков К.Н.	69	Чирков И.П.	129	
		Чистиков Д.Н.	91, 92, 94	Я
У		Чичков В.И.	87	Яландин М.И.
Ушаков Д.В.	65, 66, 70			Ячменев А.Э.
				67

XIII ВСЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО РАДИОФИЗИКЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Тезисы докладов

Электронный ресурс

8,6 уч.-изд. л., 2025 г.

Подготовлено редакционно-издательским сектором ИПФ РАН,
Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46