

Российская академия наук
Институт прикладной физики

**IX ВСЕРОССИЙСКИЙ
СЕМИНАР
ПО РАДИОФИЗИКЕ
МИЛЛИМЕТРОВЫХ
И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ
ВОЛН**

26 февраля – 1 марта 2013 года, Нижний Новгород

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Нижний Новгород
2013

Секции

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

Программный комитет семинара

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

Ответственный за выпуск – О.С. Моченева

Организаторы семинара:

ФГБУН Институт прикладной физики РАН, ЗАО НПП «Гиком»

СОДЕРЖАНИЕ

Источники и приемники излучения терагерцового диапазона

<i>Денисов Г.Г., Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Богдашов А.А., Морозкин М.В.</i> Импульсный терагерцовый гиротрон с рекордными значениями мощности и эффективности.....	13
<i>Кузьмин Л.С., Моругин С.Л.</i> Моделирование поглощения микроволнового излучения двумерными массивами наноболометров терагерцового диапазона волн.....	14
<i>Андронов А.А., Додин Е.П., Ноздрин Ю.Н., Садофьев Ю.Г., Фефелов А.Г.</i> Нижегородские квантовые каскадные лазеры терагерцового диапазона: способ создания, параметры и исследование электродинамических систем	15
<i>Вдовин В.А., Андреев В.Г., Калынов Ю.К.</i> Регистрация мощных импульсов терагерцового диапазона с помощью термоакустического детектора.....	17
<i>Иванов И.А., Аржанников А.В., Бурдаков А.В., Бурмасов В.С., Иванцовский М.В., Кузнецов С.А., Меклер К.И., Попов С.С., Полосаткин С.В., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Сеницкий С.Л., Скляров В.Ф., Тумм М.К.А.</i> Генерация терагерцового излучения в пучково-плазменных экспериментах на установке ГОЛ-3.....	17
<i>Чопорова Ю.Ю., Агафонов А.Н., Володкин Б.О., Кавеев А.К., Князев Б.А., Кропотов Г.И., Павельев В.С., Пальчикова И.Г., Соифер В.А., Ступак М.Ф., Тукмаков К.Н., Цыганкова Е.В., Черкасский В.С.</i> Дифракционные оптические элементы для мощных пучков терагерцового излучения	18
<i>Вакс В.Л.</i> Развитие методов нестационарной газовой спектроскопии на основе квантово-каскадных лазеров	19
<i>Вдовин В.Ф., Леснов И.В., Ширяев М.В.</i> Перспективы реализации терагерцовых телекоммуникационных каналов	20
<i>Гавриленко В.И., Румянцев В.В., Жолудев М.С., Антонов А.А., Кудрявцев К.Е., Красильникова Л.В., Иконников А.В., Дубинов А.А., Морозов С.В., Алешкин В.Я., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А.</i> Генерация и детектирование терагерцового излучения в узкозонных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgTe/CdTe и эпитаксиальных слоях CdHgTe	23
<i>Клушин А.М., Галин М.А., Левичев М.Ю., Курин В.В., Семенов А.Д., Mueller F., Scheller T.</i> Источники субмиллиметрового излучения на основе джозефсоновских ниобиевых контактов	24
<i>Кошелец В.П., Ермаков А.Б., Киселев О.С., Кинев Н.В., Торгашин М.Ю., Филиппенко Л.В., Wang H.</i> Исследование спектральных характеристик генератора терагерцового излучения на основе мезоструктуры $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$	25

<i>Анцыгин В.Д., Корольков В.П., Конченко А.С., Мамрашев А.А., Николаев Н.А., Потатуркин О.И.</i> Генератор терагерцового излучения на основе поперечного фотоэффекта Дембера	26
<i>Павельев Д.Г.</i> Приемно-передающая линия терагерцового диапазона	27
<i>Иляков И.Е., Ахмеджанов Р.А., Шишкин Б.В.</i> Когерентное детектирование терагерцового излучения по модуляции пространственных характеристик фемтосекундных лазерных импульсов	28
<i>Ахмеджанов Р.А., Иляков И.Е., Миронов В.А., Суворов Е.В., Фадеев Д.А., Шишкин Б.В.</i> Генерация терагерцового излучения при взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения с металлической поверхностью	29
<i>Трухин В.Н., Самойлов Л.Л.</i> Краевая дифракция терагерцового излучения на зонде терагерцового ближнепольного микроскопа	30
<i>Аржанников А.В., Тимофеев И.В.</i> Теоретическое рассмотрение генерации излучения терагерцового диапазона в системе сильнооточный электронный пучок – плотная плазма.....	32
<i>Иляков И.Е., Ахмеджанов Р.А., Шишкин Б.В.</i> Применение комбинации кристаллов ZnTe и GaP для широкополосного когерентного детектирования терагерцового излучения	32
<i>Кинев Н.В., Филиппенко Л.В., Ожegov Р.В., Горшков К.Н., Селезнев В.А., Гольцман Г.Н., Кошелев В.П.</i> Сверхпроводниковый интегральный приемник со смесителем на эффекте электронного разогрева: первые результаты и перспективы.....	33
<i>Махалов П.Б., Федотов А.Э.</i> Субтерагерцовый черенковский умножитель частоты с трубчатым электронным пучком	34
<i>Братман В.Л., Глявин М.Ю., Голубев С.В., <u>Зорин В.Г.</u>, Изотов И.В., Калынов Ю.К., Лучинин А.Г., Морозкин М.В., Разин С.В., Семенов В.Е., Сидоров А.В., Скалыга В.А.</i> Экспериментальное исследование разряда в газовой среде, инициированного терагерцовым излучением	35

Источники микроволнового излучения

<i>Ростов В.В., Яландин М.И.</i> Двухканальный генератор 8-миллиметрового излучения с импульсами субгигаваттного уровня.....	39
<i>Аржанников А.В., Тумм М.К.А.</i> Развитие исследований в ЛПИМТИ НГУ в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн	40
<i>Гинзбург Н.С.</i> Коротковолновые релятивистские черенковские генераторы и усилители со сверхразмерными одномерно- и двумерно-периодическими замедляющими системами.....	40

<i>Завольский Н.А., Запечалов В.Е., Моисеев М.А.</i> Численное моделирование процессов в резонаторах мощных 300-ГГц гиротронов.....	41
<i>Заславский В.Ю., Гинзбург Н.С., Глявин М.Ю., Зотова И.В.</i> Трехмерное РЭС-моделирование сверхразмерных гиротронов терагерцового диапазона с цилиндрической и планарной геометрией пространства взаимодействия	42
<i>Власов С.Н., Завольский Н.А., Запечалов В.Е., Копосова Е.В., Корнишин С.Ю., Куфтин А.Н., Мануилов В.Н., Моисеев М.А., Хижняк В.И.</i> Исследование гиротрона с эшелетным резонатором	43
<i>Зайцев Н.И., Гузнов Ю.М., Запечалов С.А., Кузиков С.В., Моисеев М.А., Петелин М.И., Плоткин М.Е., Тай Е.М., Шевченко А.С.</i> Мощный импульсный гироклистрон диапазона миллиметровых волн на последовательности мод TE ₇₁₁ -TE ₇₃₁	44
<i>Кунцевич А.Д., Мануилов В.Н.</i> Динамика захвата электронов в адиабатическую ловушку гиротрона при различных токах винтового электронного пучка	45
<i>Мишакин С.В., Самсонов С.В.</i> Винтовая гиро-ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн на третьей гармонике циклотронной частоты.....	46
<i>Харчев Н.К., Батанов Г.М., Бондарь Ю.В., Колик Л.В., Малахов Д.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Петелин М.И., Новожилова Ю.В., Каппа А., Мартинез Ж., Толкачев А., Рыскин Н.М.</i> Воздействие отражений от осциллирующей удаленной нагрузки на конкуренцию мод и пространственную структуру излучения гиротрона	48
<i>Глявин М.Ю., Седов А.С., Завольский Н.А., Запечалов В.Е., Моисеев М.А., Нусинович Г.С.</i> Оптимизация параметров гиротрона для работы на низких напряжениях.....	49
<i>Корниенко В.Н., Черепенин В.А.</i> Об устойчивости возбуждения симметричных мод несимметричным электронным пучком в многоволновом черенковском генераторе	50
<i>Вихарев А.А., Кузиков С.В., Мишакин С.В.</i> Ускоряющая структура с контролируемым эмиттансом электронного пучка	51
<i>Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.</i> Оротрон 2 мм диапазона с двумя электронными потоками	52
<i>Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С.</i> Пространственно-развитая коаксиальная 30-ГГц ЛОВ с синхронизацией излучения двумерной брэгговской структурой	53
<i>Рыскин Н.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В.</i> Автомодельные режимы усиления и компрессии электромагнитных импульсов при взаимодействии с электронными потоками.....	55
<i>Кузиков С.В., Савилов А.В.</i> Электронные микроволновые генераторы с частотой и фазой, управляемой импульсно-периодическим лазерным излучением	56

<i>Аржанников А.В., Калинин П.В., Кузнецов С.А., Синецкий С.Л., Степанов В.Д., Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Заславский В.Ю., Тумм М.</i> Синхронная генерация мощных импульсов 4-миллиметрового излучения в двухканальном планарном МСЭ.....	57
<i>Федотов А.Э., Братман В.Л., Махалов П.Б., Мануилов В.Н.</i> Использование трубчатых электронных пучков в коротковолновых нерелятивистских черенковских генераторах	57
<i>Месяц Г.А., Ростов В.В., Романченко И.В., Ульмаскулов М.Р., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И.</i> Динамические пикосекундные эффекты при формировании и транспортировке сильнооточного электронного пучка	59
<i>Агапов Л.Н., Богданов С.Д., Венедиктов Н.П., Власов С.Н., Копосова Е.В., Курбатов В.И., Солуянова Е.А.</i> Перестройка частоты в гиротроне с эшелентной структурой.....	60
<i>Глявин М.Ю., Зотова И.В., Железнов И.В., Кишко С.А., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Кулеиов А.Н.</i> Разработка планарного гиротрона с поперечным выводом энергии и ленточным винтовым электронным пучком	61
<i>Завольский Н.А., Запелалов В.Е., Моисеев М.А.</i> Оптимизация резонатора сложной формы для гиротрона средней мощности на третьей гармонике гирочастоты	62
<i>Гузов Ю.М., Данилов Ю.Ю., Зайцев Н.И., Кузиков С.В., Новожилова Ю.В., Шевченко А.С., Рыскин Н.М.</i> Мощный импульсный гиротрон-гироклистрон диапазона миллиметровых волн с внешней обратной связью.....	62
<i>Белоусов В.И., Вихарев А.А., Денисов Г.Г., Корчагин В.В., Котов А.В., Кузин А.В., Кулыгин М.Л., Новиков Е.А., Хозин М.А.</i> Разработка полупроводниковых волноводных переключателей СВЧ излучения 70 и 260 ГГц.....	64
<i>Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.</i> Два режима работы оротрона с двухрядной периодической структурой в диапазонах 108–215 ГГц и 108–135 ГГц	65
<i>Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.</i> Оротроны с двухрядной периодической структурой терагерцового диапазона с широким электронным потоком.....	66
<i>Любченко В.Е., Юневич Е.О., Калинин В.И., Котов В.Д., Радченко Д.Е., Телегин С.А.</i> Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в квазиоптическом резонаторе.....	67
<i>Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Каретникова Т.А., Торгашов Г.В., Синецын Н.И., Шалаев П.Д., Бурцев А.А.</i> Исследование характеристик замедляющей системы лампы бегущей волны диапазона 0,2 ТГц	68
<i>Бандуркин И.В., Савилов А.В.</i> Циклотронный мазер с большим скоростным разбросом электронов	69

<i>Завольский Н.А., Петелин М.И., Седов А.С., Фильченков С.Е.</i> Селекция мод в гиротроне субмиллиметрового диапазона с гофрированной стенкой резонатора	70
<i>Любченко В.Е., Юневич Е.О., Калинин В.И., Котов В.Д., Радченко Д.Е., Телегин С.А.</i> Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в условиях синхронизации внешним сигналом	71
<i>Братман В.Л., Калынов Ю.К., Махалов П.Б., Федотов А.Э.</i> Источник субтерагерцового излучения для ДПЯ, работающий в магните ЯМР-спектрометра.....	72
<i>Рыскин Н.М., Усачева С.А., Чумакова М.М., Глявин М.Ю., Новожилова Ю.В.</i> Влияние отражений на процессы конкуренции мод в гиротроне	73

Приемники микроволнового излучения, спектроскопия и метрология

<i>Гольцман Г.Н., Финкель М.И., Рябчун С.А., Третьяков И.В., Петренко Д.В., Каурова Н.С., Воронов Б.М.</i> Последние достижения в разработке терагерцовых смесителей и детекторов на электронном разогреве в сверхпроводниковых пленках NbN	77
<i>Смирнов А.В., Кардашев Н.С.</i> Обсерватория «Миллиметр»	78
<i>Барышев А.М., Jellema W., Смирнов А.В., Мышенкова Н., Вдовин В.Ф., Гольцман Г.Н., Лихачев С., Кардашев Н.С., De Bernardis P.</i> Приемный комплекс обсерватории «Миллиметр»	79
<i>Турыгин С.Ю.</i> Приемники для космического телескопа «Миллиметр» диапазонов 18–26, 31–45, 84–116 ГГц	79
<i>Паришин В.В., Кошелев М.А., Серов Е.А., Третьяков М.Ю.</i> Терагерцовый резонаторный спектрометр	82
<i>Серов Е.А., Вдовин В.Ф., Паришин В.В., Бубнов Г.М.</i> Криогенный резонаторный комплекс для исследования отражательной способности металлов и покрытий в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне	83
<i>Белов С.П., Буренин А.В., Голубятников Г.Ю., Лапинов А.В.</i> О природе расщепления уровней Е-метанола	84
<i>Белов С.П., Голубятников Г.Ю., Леонов И.И., Лапинов А.В.</i> Прецизионный субдоплеровский спектрометр миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе эффекта провала Лэмба	85
<i>Голубятников Г.Ю., Белов С.П., Лапинов А.В.</i> Субдоплеровские исследования торсионно-вращательного спектра метанола	86

<i>Жукова Е.С., Прохоров А.С., Борис А.А., Борис А.В., Гориунов Б.П., Lafkioti M., Matiks Y., Benckiser E., Cristiani G., Habermeyer H.-U., Smet J. H., Keimer B.</i> Субмиллиметровая спектроскопия гетероструктур со сверхтонкими слоями $\text{LaNiO}_3/\text{LaAlO}_3$	87
<i>Бородин А.В., Манькова А.А., Брандт Н.Н., Чикишев А.Ю., Шкуринов А.П.</i> Терагерцовая спектроскопия сложных молекулярных систем.....	89
<i>Кузнецов С.А., Астафьев М.А., Аржанников А.В., Гельфанд А.В.</i> Квазиоптические частотно-селективные структуры миллиметрового и терагерцового диапазонов	91
<i>Горелик А.Г., Коломиец С.Ф., Криворучко В.И., Куприянов П.В., Петров С.А.</i> Энергетический потенциал и «потенциал» применения твердотельных радиолокационных приемопередатчиков непрерывного режима ММДВ.....	91
<i>Любченко В.Е., Брянцева Т.А., Марков И.А., Юневич Е.О.</i> Микрополосковая антенна на арсениде галлия	93
<i>Шашкин В.И., Белов Ю.И., Волков П.В., Горюнов А.В., Закамов В.Р., Илларионов И.А.</i> Характеристики приемной матрицы детекторов с размерностью 8×8 3-мм диапазона длин волн	94
<i>Жильцов А.В., Рыжов В.С.</i> Наблюдения миллиметрового радиоизлучения Солнца на радиотелескопе РТ-7,5 МГТУ	95
<i>Зинченко И.И., Носов В.И., Никифоров П.Л., Федосеев Л.И., Швецов А.А., Большаков О.С., Носова Е.В.</i> Двухволновый измеритель атмосферного поглощения «МИАП-2»: тестовые измерения в Нижнем Новгороде.....	96
<i>Розанов С.Б., Большаков О.С., Завгородний А.С., Кропоткина Е.П., Круглов С.К., Логвиненко С.В., Лукин А.Н., Никифоров П.Л., Саенко И.И., Соломонов С.В., Штанюк А.М.</i> Передвижной озонометр миллиметрового диапазона: первые результаты измерений атмосферного озона.....	97
<i>Швецов А.А., Рыскин В.Г., Кукин Л.М., Федосеев Л.И., Щитов А.М.</i> Спектрорадиометр для дистанционного зондирования окружающей среды в полосе молекулярного кислорода	98
<i>Чучупал С.В., Жукова Е.С., Породинков О.Е., Командин Г.А., Шакир Ю.А., Грибенюков А.И., Гориунов Б.П., Прохоров А.С.</i> Поглощение электромагнитных волн субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов в облученных нелинейно-оптических кристаллах ZnGeP_2	99
<i>Жукова Е.С., Чиж К.В., Сторожевых М.С., Арапкина Л.В., Чапнин В.А., Уваров О.В., Калинушкин В.П., Юрьев В.А., Прохоров А.С., Спектор И.Е., Гориунов Б.П.</i> Динамическая проводимость гетероструктур $\text{Ge/Si}(001)$ с плотными массивами квантовых точек Ge в диапазоне субмиллиметровых волн.....	101

<i>Жукова Е.С., Горишунов Б.П., Ноздрин В.С., Zapf S., Wu D., Haindl S., Lida K., Dressel M.</i> Резонансный метод исследования «подщелевого» поглощения железосодержащих сверхпроводников на субмиллиметровых волнах	102
<i>Красильников А.А., Куликов М.Ю., Кукин Л.М., Рыскин В.Г., Федосеев Л.И., Швецов А.А., Большаков О.С., Щитов А.М., Фейгин А.М.</i> Мобильный микроволновый озонметр с автоматической внутренней калибровкой	103
<i>Кузнецов С.А., Астафьев М.А., Аржанников А.В., Паулиш А.Г., Гельфанд А.В.</i> Спектрально-селективные болометрические детекторы и визуализаторы пучков излучения для диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн.....	104
<i>Голубятников Г.Ю., Вельмузов А.П., Grabov J.-U., Guarnieri A., Лапинов А.В.</i> Субдоплеровские исследования вращательного спектра изотопологов NC_3N	105
<i>Хайкин В.Б., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е., Закамов В.Р.</i> Компактные высокочувствительные радиометрические модули миллиметрового диапазона для решения различных прикладных задач.....	106

Миллиметровое и субмиллиметровое излучение в прикладных исследованиях

<i>Вакс В.Л., Гурбатов С.Н., Руденко О.В.</i> Прецизионные методы нестационарной терагерцовой спектроскопии для медицинской диагностики	109
<i>Водопьянов А.В., Голубев С.В.</i> Источник мягкого рентгеновского излучения на основе плазмы ЭЦР-разряда для проекционной литографии высокого разрешения.....	112
<i>Третьяков М.Ю., Серов Е.А., Кошелев М.А., Паршин В.В., Крупнов А.Ф.</i> Атмосферный континуум на миллиметровых волнах и димеры воды	113
<i>Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Радищев Д.Б., Чернов В.В., Козлов А.В.</i> Создание плазмы широкоапертурными пучками микроволн и осаждение нанокристаллических алмазных пленок с ее помощью	114
<i>Егоров С.В., Быков Ю.В., Еремеев А.Г.</i> Спекание лазерной керамики при нагреве излучением диапазона миллиметровых волн.....	115
<i>Каминский А.К., Баев В.Г., Вдовин В.А., Донец Д.Е., Перельштейн Э.А., Седых С.Н., Тютюнников С.И.</i> Измерение эффективности поглощения мощного импульсного СВЧ-излучения нанокластерами в жидкой среде: методы и первые эксперименты.....	116
<i>Резник А.Н., Демидов Е.В., Галин М.А.</i> Микроволновая ближнепольная диагностика полупроводниковых пленок	116

<i>Абашин Е.Б., Бубнов Г.М., Вдовин В.Ф., Дрягин С.Ю., Дубрович В.К., Никифоров П.Л., Носов В.И.</i> Исследования терагерцового астроклимата в предгорьях вершины Мус-Хая и перспективы создания научного стационара в северо-восточной Якутии	117
<i>Кропоткина Е.П., Соломонов С.В., Розанов С.Б., Игнатьев А.Н., Лукин А.Н.</i> Мониторинг озонного слоя на миллиметровых волнах в период сильного возмущения стратосферы	120
<i>Седых С.Н., Каминский А.К., Перельштейн Э.А., Скадоров В.А.</i> Оптимизация наноразмерных поглотителей СВЧ-излучения	121
<i>Зражевский А.Ю., Коротков В.А.</i> Восстановление искаженного оптической системой радиоизображения с помощью метода опорного изображения	122
<i>Титов С.В., Калмыков Ю.П.</i> Влияние параметра затухания на форму динамического магнитного гистерезиса для ансамблей однодоменных ферромагнитных наночастиц	123
<i>Федосеев Л.И., Швецов А.А.</i> Потенциальные возможности многочастотного миллиметрового радиометрического зондирования искусственных образований	125
<i>Авторский указатель</i>	126

**ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ
ИЗЛУЧЕНИЯ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА**

ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ГИРОТРОН С РЕКОРДНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ МОЩНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ

Г.Г. Денисов, М.Ю. Глявин, А.Г. Лучинин, А.А. Богдашов, М.В. Морозкин

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Разработка компактных, относительно простых и доступных источников мощного терагерцового (ТГц) излучения важна для многочисленных приложений, включающих диагностику плазмы, спектроскопию, обнаружение и визуализацию взрывчатых веществ и оружия, новые медицинские технологии, атмосферный контроль, производство материалов высокой чистоты и т.д. Одним из перспективных приложений представляется дистанционное обнаружение источников ионизирующего излучения. Суть предлагаемого метода заключается в локализации интенсивного высокочастотного поля в малой области, в которой мала вероятность обнаружения свободного электрона. Как известно, даже экранированные радиоактивные материалы вызывают проникновение гамма-лучей сквозь стены любого контейнера, и эти гамма-лучи вызывают ионизацию молекул воздуха. Инициированный свободным электроном разряд, таким образом, будет служить индикатором превышения естественного фона [1].

Разборный ТГц-гиротрон с импульсным магнитом интенсивностью до 30 Тл был разработан, изготовлен и испытан в ИПФ РАН. Соленоид намагничивался непосредственно на корпус гиротрона из тонкой нержавеющей стали, что позволило ослабить скин-эффект, а также уменьшить внутренний диаметр соленоида и, соответственно, энергетику магнитного поля. Для уменьшения омических потерь и термостабилизации соленоид охлаждался жидким азотом. Частота следования импульсов ограничивалась возможностями охлаждения соленоида и составила 1 имп. в 3 мин. Интенсивность магнитного поля позволяет реализовать режим генерации на основном циклотронном резонансе, что упрощает задачу селективной одномодовой генерации рабочего типа колебаний. Получена генерация на частоте 0,67 ТГц, соответствующей одному из окон прозрачности атмосферы с выходной мощностью, превышающей 200 кВт при длительности импульса 30 мс. Путем оптимизации электронно-оптической и электродинамической систем реализован рекордный для данного частотного диапазона КПД 20 % [2]. Разработан и изготовлен внешний квазиоптический преобразователь излучения в узконаправленный волновой пучок и получен точечный разряд при атмосферном давлении на инициаторе (металлическое острие). Результаты эксперимента позволяют рассчитывать на регистрацию источников излучения, создающих число свободных электронов, более чем в 20 раз превышающее естественный фон, с расстояния до 50 м.

1. G.S. Nusinovich, P. Sprangle, V.E. Semenov, D.S. Dorozhkina and M.Yu. Glyavin. On the sensitivity of THz gyrotron based systems for remote detection of concealed radioactive materials // Journ. of Appl. Phys., 2012, 111, 124912.
2. M.Yu. Glyavin, A.G. Luchinin, G.S. Nusinovich, J. Rodgers, D.G. Kashyn, C.A. Romero-Talamas, R. Pu. A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency // Appl. Phys. Lett., 2012, 101, 153503.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУМЕРНЫМИ МАССИВАМИ НАНОБОЛОМЕТРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

Л.С. Кузьмин, С.Л. Моругин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается задача построения 2D-массивов СЕВ (cold electron bolometr) для повышения уровня и качества поглощения падающего на них поляризованного микроволнового излучения диапазона 350 ГГц. Сопоставлены различные способы согласования пучка волн в фокальной плоскости телескопа (при диаметре пятна Эйри около 4 мм) с болометром (размеры активной области менее 1 мкм, длина полуволнового вибратора приемной антенны болометра около 125 мкм). Построена аналитическая модель поглощения микроволнового излучения в антенной решетке болометров, отклонение результатов расчета по такой модели от результатов 3D численного моделирования электромагнитных полей не превышает в среднем нескольких процентов.

Для антенных решеток СЕВ, разделяющих поглощающих излучение поляризаций по двум направлениям, исследовано влияние основных факторов, приводящих к поглощению массивом болометров волн с поляризацией ортогонального направления (кросс-поляризации). Показано, что в бесконечной периодической структуре уровень кросс-поляризации невелик (менее 55 дБ). Основные факторы, влияющие на уровень кросс-поляризации на приеме: отражение от границ и углов подложки, отклонение размеров и расположения проводников от номинальных, отклонение сопротивлений в рабочей точке различных болометров друг от друга. Рассчитаны коэффициенты влияния излучения, порождаемого неоднородностями структуры различных видов, на уровень кросс-поляризации.

Показано, что в однородной структуре по мере увеличения числа ячеек по каждой размерности массива уровень кросс-поляризации, обусловленной отражением от границ и углов, снижается до величин $-30...-35$ дБ. Согласование структуры на границах также снижает уровень кросс-поляризации.

2D-массивы СЕВ не требуют использования линз, содержат от десятков до сотен болометров на каждую приемную ячейку, не чувствительны к юстировке. Выходной сигнал ячейки интегрируется (усредняется) по всем элементам матрицы, что приводит к меньшей чувствительности к перегреву, насыщению, отклонению параметров элементов. 2D-массивы СЕВ имеют широкую и адаптивную диаграмму направленности на прием; поглощают 60–95 % мощности падающей волны; при соблюдении ряда условий (поглощение волн на краях подложки, общая симметрия и др.), позволяют получить уровень кросс-поляризации ниже $-20...-25$ дБ; могут быть выполнены в виде вибраторной, сеточной, щелевой и других типов конструкций.

НИЖЕГОРОДСКИЕ КВАНТОВЫЕ КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА: СПОСОБ СОЗДАНИЯ, ПАРАМЕТРЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.А. Андронов¹, Е.П. Додин¹, Ю.Н. Ноздрин¹, Ю.Г. Садофьев², А.Г. Фефелов³

¹ Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

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

³ ФГУП «Салют», Н. Новгород

Приводятся результаты первых в России исследований по созданию, измерению параметров, анализу квантовых каскадных лазеров (ККЛ) терагерцового диапазона с резонаторами разных типов. Чипы лазеров созданы из пластин гетероструктур GaAlAs, излучающих на длине волны около 95 мкм, на основе новой простой технологии, разработанной авторами. Технология позволяет сравнительно простыми методами создать чипы лазеров (рис. 1) с разными резонаторами на основе волноводов метал-метал, необходимых для функционирования таких лазеров, на любых подложках. Были использованы поликоровые подложки. В настоящее время эта технология патентуется.

В докладе приводятся результаты измерений импульсов излучения (длительность около 1 мс) таких лазеров (рис. 2) с резонаторами разной геометрии (измерения: 29.12.12 – полосковый лазер 3 мм × 0,3 мм и 11.01.13 – круг 1 мм – см. рис. 1) и даны простые расчеты их диаграмм излучения (рис. 3). На круговом резонаторе получено, по-видимому, самое мощное излучение таких лазеров, наблюдавшееся до сих пор. Обсуждаются перспективы создания таких лазеров с улучшенным качеством выходного пучка излучения и возможные применения.

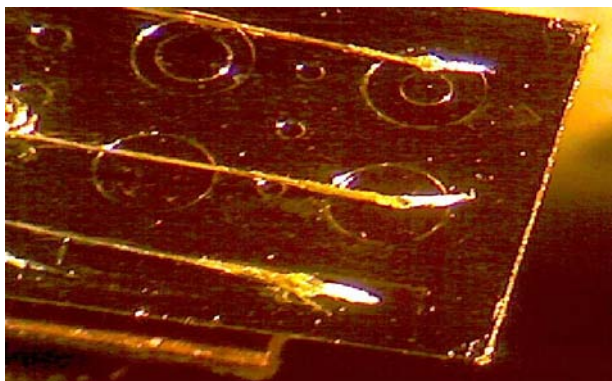


Рис. 1. Чипы ККЛ с проводами питания

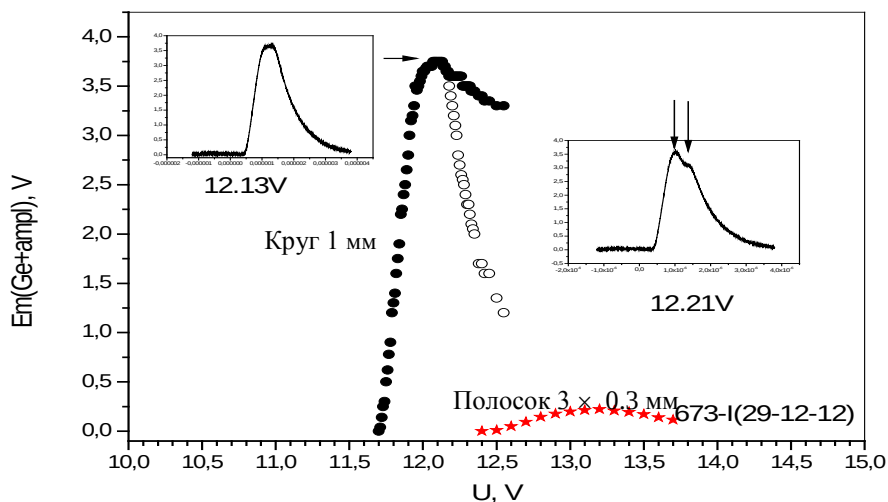


Рис. 2. Сигналы излучения кругового и полоскового ККЛов и зависимость их пиков от напряжения

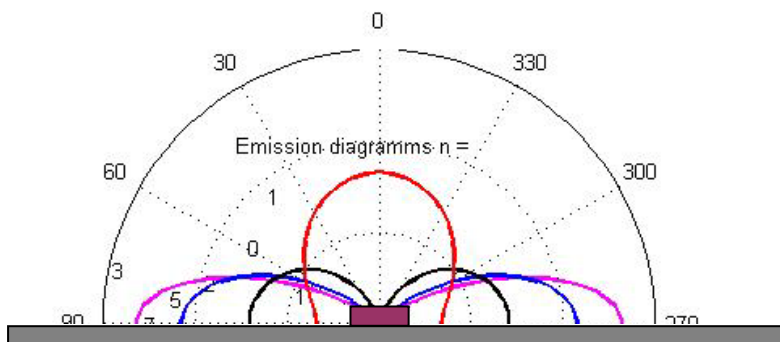


Рис. 3. Диаграммы излучения кругового резонатора с модами разных азимутальных индексов, $n = 0, 1, 5, 7$

Работа поддержана программой «Проблемы радиофизики» ОФН РАН, грантом РФФИ 11-02-12165-офи-м-2011 и грантом РФФИ 12-02-00085-а.

Авторы выражают благодарность А.Ю. Климову, В.В. Рогову и компании «Интеллектуальные системы – НН» за помощь в создании чипов, а также В.И. Позняковой за помощь в вычислении потерь и диаграмм излучения в чипах.

РЕГИСТРАЦИЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА

В.А. Вдовин¹, В.Г. Андреев², Ю.К. Калынов³

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

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

³ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Представлены результаты измерений электромагнитных импульсов длительностью 3–10 мкс на частотах 0,55–0,87 ТГц с использованием термоакустического детектора. Работа детектора основана на эффекте генерации акустических сигналов при поглощении электромагнитных импульсов в слоистой структуре: радиопрозрачная подложка – поглотитель – иммерсионная жидкость. В качестве поглотителя используется тонкая металлическая пленка нанометровой толщины, напыленная на кварцевую подложку. В пленке и граничащей с ней жидкости происходит преобразование терагерцового излучения в акустический импульс, который принимается широкополосным акустическим приемником и затем регистрируется цифровым осциллографом. Показано, что при микросекундных длительностях импульсов форма сигнала, регистрируемая термоакустическим детектором, с хорошей точностью соответствует производной от профиля терагерцового импульса. При использовании воды и этанола в качестве иммерсионной жидкости наличие дополнительного пленочного поглотителя не является обязательным, поскольку эти жидкости сами эффективно поглощают электромагнитное излучение в области 0,5–1 ТГц.

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3

*И.А. Иванов^{1,2}, А.В. Аржанников^{1,2}, А.В. Бурдаков^{1,3}, В.С. Бурмасов^{1,2},
М.В. Иванцовский^{1,2}, С.А. Кузнецов², К.И. Меклер¹, С.С. Попов^{1,2},
С.В. Полосаткин^{1,2}, В.В. Поступаев^{1,2}, А.Ф. Ровенских¹, С.Л. Сеницкий^{1,2},
В.Ф. Скляр^{1,3}, М.К.А. Тумм^{2,4}*

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

² Новосибирский государственный университет

³ Новосибирский государственный технический университет

⁴ Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований генерации электромагнитного излучения условиях сильной ленгмюровской турбулентности, возникающей в плазме в ходе ее нагрева сильноточ-

ными электронными пучками. Эксперименты проведены на установке ГОЛ-3 ИЯФ СО РАН при инжекции электронного пучка с плотностью тока $1\text{--}3\text{ кА/см}^2$ в плазму с плотностью в диапазоне от $\sim 10^{14}$ до 10^{15} см^{-3} . В условиях интенсивного нагрева плазмы сильноточным электронным пучком длительностью около 10 мкс проведены измерения спектра генерируемого электромагнитного излучения в области частот 0,1–0,5 ТГц, которая частично охватывает значения первой и второй гармоник плазменной частоты. В указанном диапазоне частот зарегистрированы два максимума интенсивности излучения, положение которых смещается в область высоких частот при увеличении плотности плазмы. Удельная мощность генерации достигает субкиловатт из кубического сантиметра плазмы. В результате при инжекции электронного пучка в плазму с плотностью $\sim 10^{15}\text{ см}^{-3}$ возможна генерация излучения до 1 ТГц.

ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ МОЩНЫХ ПУЧКОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Ю.Ю. Чопорова^{1,2}, А.Н. Агафонов⁴, Б.О. Володкин⁴, А.К. Кавеев⁵, Б.А. Князев^{1,2},
Г.И. Кропотов⁵, В.С. Павельев^{3,4}, И.Г. Пальчикова⁶, В.А. Сойфер^{3,4},
М.Ф. Ступак⁶, К.Н. Тукмаков⁴, Е.В. Цыганкова⁵, В.С. Черкасский²*

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

² Новосибирский государственный университет

³ Институт систем обработки изображений РАН, Самара

⁴ Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева

⁵ ЗАО Тидекс, С.-Петербург

⁶ Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, Новосибирск

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) давно нашли широкое применение в лазерных технологических установках и оптических приборах ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов. Применение ДОЭ позволяет создавать оптические приборы с уменьшенными массогабаритными характеристиками и широкими функциональными возможностями. Вследствие более высокого (по сравнению с видимым диапазоном) поглощения материалов, прозрачных в терагерцовом диапазоне, использование ДОЭ предпочтительнее, чем рефракционных элементов (линзы, призмы). ДОЭ практически не имеют альтернативы в случае управления излучением мощного монохроматического пучка лазера на свободных электронах (ЛСЭ). В настоящей работе описаны технологии изготовления и результаты исследования ДОЭ (полипропиленовой киноформной линзы, кремниевого бинарного делителя пучка, кремниевой бинарной линзы, а также фокусаторов терагерцового излучения) в пучке новосибирского ЛСЭ при длине вол-

ны 141 мкм. Приведены результаты исследования лучевой стойкости покрытия, которое выдержало без повреждений облучение со средней плотностью мощности излучения 4 кВт/см^2 , пиковая мощность в 100-пикосекундном импульсе при этом составляла почти 8 МВт/см^2 . Получены экспериментальные оценки дифракционной эффективности элементов с нанесенным антиотражающим покрытием, которые находятся в хорошем соответствии с теоретическими оценками. Приведены примеры использования ДОО на ЛСЭ.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ГАЗОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА ОСНОВЕ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ

В.Л. Вакс

Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

На сегодняшний день наиболее перспективными источниками ТГц-излучения являются источники на основе квантово-каскадных лазеров (ККЛ) и систем с умножением частоты. ККЛ позволяет получить достаточно высокую мощность излучения. Дизайн полупроводниковых структур позволяет изменять частоту рабочего межподзонного перехода в широких пределах терагерцового спектра – от 1,2 до 4,8 ТГц.

В данной работе исследовались спектральные характеристики импульсных ККЛ для использования в качестве источников излучения терагерцового частотного диапазона для нестационарной газовой спектроскопии.

Измерения шумовых характеристик ККЛ в ТГц-диапазоне частот проводилось (при низких температурах $T = 7\text{--}150 \text{ К}$) гетеродинным методом, предусматривающим перенос спектра свободно генерирующего ККЛ из ТГц-диапазона частот в низкочастотный диапазон. Шумы свободно генерирующего ККЛ содержат фазовые и амплитудные составляющие. Как правило, фазовые шумы преобладают над амплитудными. Для измерения спектральных характеристик шумов ККЛ был разработан стенд, на котором проведены прецизионные измерения спектров амплитудных и частотных шумов свободно-генерирующего ККЛ.

Ключевым элементом внешней цепи, определяющим фазовые и амплитудные флуктуации излучения ККЛ, является блок питания (БП). Его влияние можно условно разделить на два фактора: флуктуации тока питания ККЛ, наличие импеданса, определяющего эффективность положительной обратной связи при эмиссии фотонов в процессе генерации на разных этапах каскада ККЛ. Для проверки влияния параметров БП и выбора его оптималь-

ного варианта проведено исследование амплитудных и фазовых шумов ККЛ в зависимости от типа БП. Для сравнения были использованы традиционно применяемый блок питания и блок питания, созданный авторами проекта. Проведены исследования спектра ККЛ на частоте 3,5 ТГц для двух БП. Спектральная линия ККЛ с традиционным БП превышает по ширине линию генерации ККЛ с *home-made* БП. Кроме того, в спектре ККЛ с традиционным БП появляются флуктуации интенсивности (амплитуды) в максимуме. Очевидно, что традиционный БП увеличивает как амплитудные, так и частотные шумы ККЛ.

Исследованы спектры излучения ККЛ диапазона 3 ТГц, связанные с разогревом лазерной структуры. Измерения проводились при температурах от 10 до 120 К. Были получены также спектры излучения ККЛ при различных значениях тока через структуры и в различные моменты времени импульса излучения лазера. Выявлено, что к концу импульса излучения происходит «перекачка» интенсивности из низкочастотной в высокочастотную моду, что может быть связано с разогревом активной области в течение импульса излучения. К подобному эффекту приводит и увеличение тока через лазер.

В дальнейшем будет разработан и реализован источник ТГц-излучения на основе ККЛ для применения в спектроскопии высокого разрешения на нестационарных эффектах, для чего будет разработана система стабилизации и управления частотой (фазой) и решена проблема введения фазовой модуляции и быстрого свипирования частоты квантово-каскадного лазера.

Работа выполнена при поддержке программы ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики».

ПЕРСПЕКТИВЫ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ КАНАЛОВ

В.Ф. Вдовин^{1,2}, И.В. Леснов^{1,2}, М.В. Ширяев²

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

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

Повышение емкости телекоммуникационных каналов является основным мотивом развития коммуникационных систем. Сегодня высокоэффективные и емкие телекоммуникационные радиоканалы реализуются в дециметровых и сантиметровых волнах. В последние годы началось освоение и миллиметрового диапазона [1]. Правда, пока это в основном волны до длин 5–6 мм. Перспективы же терагерцового (в широком смысле 0,1–10 ТГц) диапазона пока ставятся под сомнение по причине значительного

атмосферного поглощения этих волн. Вместе с тем мировое сообщество уже обозначило интерес к возможностям ТГц-диапазона как телекоммуникационного ресурса [2]. Очевидно, что, несмотря на проблемы поглощения, в ТГц-диапазоне вплоть до 1 ТГц имеются окна прозрачности, и прохождение в них с лихвой искупает проигрыш от потерь в атмосфере в сравнении с сантиметровыми и дециметровыми каналами, на два-три порядка потенциально менее ёмкими. В [2] сделана оценка предельной ёмкости терагерцового коммуникационного канала для реальной существующей на сегодняшний день элементной базы, причем не охлаждаемой. Не вызывает сомнения, что приход массового потребителя, а телекоммуникации являются именно такими, дает мощнейший импульс массовым и дешевым технологиям, которые позволяют создавать системы и устройства чрезвычайно компактные, надежные и дешевые. Примером тому является стремительное развитие технологии мобильной связи в два последних десятилетия.

В [2] представлена структурная схема ТГц-канала с разбивкой на 5 поддиапазонов, совпадающих с известными окнами прозрачности атмосферы. Проведена оценка предельной ёмкости канала с учетом поглощения в атмосферных газах, гидрометеорах, наземной инфраструктуры и т.п. Она выполнена для некоего предельного уровня мощности передатчиков, размеров антенной системы и чувствительности приемника. Последний компонент, строго говоря, имеет ограничением лишь фундаментальные пределы (типа соотношения Гейзенберга) [3] или, по крайней мере, существующим на сегодня передовым уровнем разработок исследователей, уже создающим чрезвычайно высокочувствительные системы [4]. В [2] заявлено, что получен теоретический предел ёмкости каналов. При этом отношение сигнала к шуму взято на основании формулы Шеннона:

$$SNR = Prx / F k T B, \quad (1)$$

где: F – шум-фактор приемника, $T = T_o = 300$ К – стандартная температура окружения приемника, Prx – мощность передатчика, k – постоянная Больцмана, B – полосы.

При этом ёмкости каждого из пяти ТГц-каналов имеют значения от 0,1 до 1000 Гб/с. Исследование фактически доказало реализуемость каналов протяженностью до 1 км с ёмкостью до 100 Гб/с на основе беспроводной ТГц-технологии, что вполне сопоставимо с куда более подверженными помехам и потерям оптическими (включая ИК) известными каналам *Ethernet* и *OTN (optical transport network)*, с предусмотренными стандартами IEEE 802.3b и ITU-T G.709 в объеме до 100 и 112 Гб/с соответственно.

Не ставя в рамках данной работы задачу установления фундаментального предела ёмкости ТГц коммуникационного канала, попытаемся определить реальные предельные значения ТГц телекоммуникационных каналов, построенных на ныне существующих образцах приемной техники. Очевидно, что в отношении сигнал/шум при использовании современной элемент-

ной базы, близкой по шумам к фундаментальному пределу, возможно заметное повышение эффективности телекоммуникационного канала против оцененного в [2], где полагают, что шум-фактор приемников ТГц-волн составляет около 10 дБ. Лучшие приемники ТГц-волн сегодня имеют шумы практически на порядок меньше [4]. Емкость канала связана с соотношением сигнал/шум по формуле Шеннона [3]:

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR}). \quad (2)$$

Очевидно, что снижение шумов приемника на порядок приводит к увеличению емкости канала более чем в три раза, следовательно, достижимые емкости ТГц-каналов могут практически достигать 300 Гб/с.

Отметим, что в публикации [2] используется для оценки шумов приемника шум-фактор F , а не эквивалентная температура шума T_n . Последняя, как это было показано в [5], куда корректнее, поскольку не содержит в себе физической температуры окружения приемника, которая может заметно отличаться от стандартной $T_o = 300$ К, но при этом быть связанной с шум-фактором F известной формулой:

$$F = 1 + T_n / T_o. \quad (3)$$

При этом более корректный вид формулы для определения вклада чувствительности приемной системы в емкость телекоммуникационного канала при подстановке (3) в (1) будет иметь вид

$$\text{SNR} = P_{rx} / k B (T_n + T_o) \quad (4)$$

Очевидно, что это некантовое приближение, при котором просматривается некое предельное значение соотношения сигнал/шум при приближении к нулю T_n . И этот предел определяется T_o . При этом уже близки условия квантового приближения и статистики отдельных квантов. Взятые в выше приведенных оценках шумы лучших приемников ТГц-волн уже составляют единицы kT (5–6). Поэтому очевидно, что задача определения фундаментального предела ТГц-канала уже лежит в сфере определения квантовых ограничений, и их емкость будет не ниже 300 Гб/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Минобрнауки РФ по Постановлению Правительства РФ №220 (договор № 11.G34.31.0029).

1. А.А. Артеменко, А.А. Мальцев, Р.О. Масленников, А.Г. Севастьянов, В.Н. Ссорин. Известия ВУЗов Радиофизика, 2012. Т. 55, № 8. С. 565-575.
2. Thomas Schneider, Andrzej Wiatrek, Stefan Preubler, Michael Grigat, and Ralf-Peter Braun Link budget analysis for Terahertz fixed wireless links // IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology. 2012. Vol. 2, № 2. P. 250.
3. А.Г. Кисляков, А.А. Швецов // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 12. С. 1846.
4. V.F. Vdovin and I.I. Zinchenko. Modern Millimeter and Submillimeter receiver systems for Radio Astronomy // Radiophysics and Quantum Electronics. 2009. Vol. 52. No. 7. P. 461.
5. К.А. Горонина, Ю.А. Дрягин. Об измерении параметров смесительных диодов: Препринт ИПФ АН СССР № 254. Горький, 1990.

ГЕНЕРАЦИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УЗКОЗОННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ НА ОСНОВЕ HgTe/CdTe И ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ CdHgTe

В.И. Гавриленко^{1,2}, В.В. Румянцев¹, М.С. Жолудев¹, А.А. Антонов¹, К.Е. Кудрявцев¹, Л.В. Красильникова^{1,2}, А.В. Иконников^{1,2}, А.А. Дубинов^{1,2}, С.В. Морозов^{1,2}, В.Я. Алешкин^{1,2}, Н.Н. Михайлов³, С.А. Дворецкий³

¹ Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³ Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

В настоящее время твердые растворы кадмий-ртуть-теллур (КРТ) широко используются для создания детекторов и матриц фотоприемников среднего ИК-диапазона. Долгое время считалось, что «продвижению» КРТ-фотоприемников в ТГц-область препятствуют флуктуации состава твердого раствора. Современные методы молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяют проводить рост совершенных слоев КРТ и гетероструктур с квантовыми ямами (к которым в последние годы наблюдается взрыв интереса в связи с их уникальными свойствами) при низких температурах. Однако оптические свойства как квантовых ям HgTe/CdTe, так и узкозонных объемных эпитаксиальных слоев КРТ, выращенных методом МЛЭ, в ТГц-диапазоне практически не изучены.

В докладе будут представлены результаты спектроскопических исследований в ТГц-диапазоне гетероструктур с квантовыми ямами на основе HgTe/CdTe и узкозонных твердых растворов на основе соединений $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) при $0,15 < x < 0,23$, выращенных методом МЛЭ в ИФП СО РАН. Основное внимание будет уделено спектральным и кинетическим исследованиям ТГц-фотопроводимости в интервале температур 4,2–77 К и достижимым предельным характеристикам фотоприемников на основе таких структур. В коротковолновой части ТГц-диапазона (~15 ТГц) такие структуры уже используются авторами в спектроскопических исследованиях ($S_1 \sim 5$ А/Вт, $NEP \sim 10^{-11}$ см²/В·с при $T = 77$ К). Приводятся первые результаты по обнаружению ТГц-фотолюминесценции из объемных эпитаксиальных слоев КРТ, которая в настоящее время наблюдается вплоть до 11 ТГц (низкочастотная граница). В последние годы опубликован ряд работ по конструированию лазера ТГц-диапазона на основе графена (в том числе и авторами настоящей работы), и уже продемонстрировано усиление ТГц-излучения при оптической накачке. В квантовых ямах на основе HgTe/CdTe ширина запрещенной зоны может варьироваться (за счет изменения толщины слоя HgTe) от нуля (как в графене) до нескольких десятков миллиэлектрон-вольт.

В докладе приводятся результаты расчетов спектров и величин отрицательной динамической проводимости в ТГц-диапазоне в оптимизированной

структуре с квантовой ямой при различных значениях концентраций неравновесных носителей и оценки требуемых уровней оптического возбуждения. Выполнены расчеты волноводных структур (коэффициент оптического ограничения и потери волновода), содержащих в качестве активной среды несколько квантовых ям HgTe, окруженных барьерными слоями CdHgTe промежуточного состава, образующих кор волновода и ограничивающие слои CdHgTe с высокой долей кадмия, и показана возможность получения лазерного излучения в коротковолновой части ТГц-диапазона, недоступной для квантовых каскадных лазеров на основе GaAs/AlGaAs из-за сильного решеточного поглощения.

ИСТОЧНИКИ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ НИОБИЕВЫХ КОНТАКТОВ

*А.М. Клушин¹, М.А. Галин¹, М.Ю. Левичев¹, В.В. Курин¹, А.Д. Семенов²,
F. Mueller³, T. Scheller³*

¹ Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

² Institute of Planetary Research, German Aerospace Centre (DLR), Berlin, Germany

³ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany

Джозефсоновские контакты представляют собой идеальный и перестраиваемый осциллятор с электрической накачкой, который может применяться в широком диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн. Многоконтактные джозефсоновские схемы, являющиеся источниками непрерывного высокочастотного сигнала, способны обеспечить в когерентном режиме мощность, достаточную для практических применений в частотном диапазоне так называемой «терагерцовой щели» – от 0,5 до 1,5 ТГц [1]. Основной недостаток джозефсоновских генераторов связан с большим рассогласованием их импеданса с импедансом свободного пространства, что ограничивает регистрируемую при комнатной температуре мощность излучения несколькими нановаттами. Этот недостаток может быть преодолен при использовании больших массивов джозефсоновских контактов в режиме их взаимной синхронизации. Теория предсказывает, что при достижении синхронизации должно улучшиться согласование импедансов со свободным пространством и уменьшиться ширина линии генерации. Авторам доклада удалось продемонстрировать взаимную синхронизацию примерно 7000 ниобиевых джозефсоновских контактов, работающих при температуре жидкого гелия [2–4]. В настоящее время при комнатной температуре зарегистрирова-

но когерентное излучение мощностью несколько микроватт [5]. В докладе обсуждаются параметры джозефсоновского излучателя и его диаграмма направленности на частотах до 350 ГГц. Рассмотрены пути увеличения частоты и мощности джозефсоновского излучения, а также возможные практические применения.

Работа поддерживается ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, а также грантами РФФИ.

1. *M. Tonouchi* // Nat. Photonics, 2007, **1**, 97.
2. *F. Song, F. Müller, R. Behr, A.M. Klushin* // Appl. Phys. Lett., 2009 **95**, 172501.
3. *F. Song, F. Müller, R. Behr, L. Fang, A.M. Klushin* // IEEE Trans. Appl. Supercond., 2011, **21**, 315.
4. *A. Semenov, O. Cojocari, H.-W. Hübers, F. Song, A. Klushin, A.-S. Müller* // IEEE Electron Device Letters, 2010, **31**, 674.
5. *F. Song, F. Müller, Th. Scheller, A. Semenov, M. He, L. Fang, H.-W. Hübers, A.M. Klushin* // Appl. Phys. Lett., 2011, **98**, 142506.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕЗОСТРУКТУРЫ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$

*В.П. Кошелец¹, А.Б. Ермаков¹, О.С. Киселев¹, Н.В. Кинев¹, М.Ю. Торгашин¹,
Л.В. Филиппенко¹, H. Wang^{2,3}*

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

² Research Institute of Superconductor Electronics, Nanjing University, Nanjing, China

³ National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan

Генераторы на основе сверхпроводниковых высокотемпературных структур $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO) представляют собой монокристаллическую структуру, выполненную в форме мезы, естественным образом создающую систему последовательно соединенных джозефсоновских переходов количеством N порядка 500–1000. Нами были исследованы спектры излучения генераторов на основе BSCCO-мезоструктур при помощи сверхпроводникового интегрального приемника с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). На рис. 1 представлены результаты измерения спектральных характеристик одного из образцов генератора, рабочий диапазон составил 560–737 ГГц, а наилучшая линия имела ширину 7 МГц.

Измерения продемонстрировали высокую стабильность линии генерации: за 3 минуты дрейф линии составил лишь 3 МГц. Для некоторых конструкций ВТСП-генераторов мощность излучения превосходила 10 мкВт. Была продемонстрирована возможность частотной и фазовой стабилизации

излучения от ВТСП-генератора при помощи комнатной системы ФАПЧ, при этом ширина линии составляла более 10 МГц.

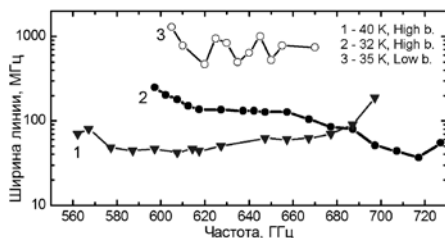


Рис. 1. Зависимость ширины линии излучения генератора от частоты при различных температурах и в различных режимах:

1 – 40 К, режим high-bias;

2 – 32 К, режим high-bias;

3 – 35 К, режим low-bias.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, Министерства образования и науки РФ и гранта Президента России для ведущих научных школ.

ГЕНЕРАТОР ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОПЕРЕЧНОГО ФОТОЭФФЕКТА ДЕМБЕРА

*В.Д. Анцыгин, В.П. Корольков, А.С. Конченко, А.А. Мамрашев,
Н.А. Николаев, О.И. Потатуркин*

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Одним из методов повышения эффективности генерации терагерцового излучения в полупроводниковых материалах является создание фототока вдоль поверхности, перпендикулярно направлению падающего лазерного излучения накали (поперечный фотоэффект Дембера) [1]. В работе реализован метод генерации, основанный на данном эффекте. Фемтосекундное лазерное излучение фокусируется при помощи оптического фазового транспаранта на края зон линейной бинарной амплитудной решетки, сформированной из непрозрачных полос золота на поверхности полупроводниковой пластины p-InAs (см. рисунок).

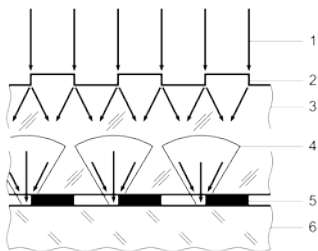


Схема генератора на основе поперечного фотоэффекта Дембера. 1 – лазерное излучение накачки, 2 – оптический фазовый транспарант в виде амплитудной бинарной решетки, 3 – кварцевая подложка, 4 – диаграмма направленности терагерцового излучения, 5 – золотые полосы, 6 – полупроводник p-InAs

Рассмотрены различные варианты конструкции фазового транспаранта в виде бинарной фазовой решетки и раstra цилиндрических микролинз. Концентрация светового поля излучения накачки за счет эффекта Тальбота в бинарной решетке или фокусировки микролинзами позволяет формировать резкую границу между освещенной и неосвещенной областями. Таким образом, создается резкий градиент концентрации фотовозбужденных носителей заряда вдоль поверхности полупроводника. Релаксация градиента за времена порядка сотен фемтосекунд приводит к эффективной генерации терагерцового излучения, максимум диаграммы направленности которого перпендикулярен поверхности полупроводника. Когерентное сложение излучения отдельных источников в многоэлементном генераторе также позволяет повысить эффективность преобразования лазерного излучения накачки.

1. Klatt G. et al. Terahertz emission from lateral photo-Dember currents // Opt. Express. 2010. Vol. 18, № 5. P. 4939–4947.

ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩАЯ ЛИНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Д.Г. Павельев

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Приемо-передающая линия состоит из источника излучения: умножителя частоты высокой кратности и приемника излучения – гармонического смесителя с накачкой от микроволновых генераторов 80–350 ГГц. Умножитель частоты и гармонический смеситель выполнены на одно- и двухдиодной схеме. Диоды представляют собой планарные диодные структуры, изготовленные на основе сильнолегированных коротких (порядка десятков периодов) сверхрешеток материальной системы GaAs/AlAs. Расчетная предельная частота диодов 10 ТГц. Исследован гармонический состав и измерена мощность отдельных линий выходного излучения умножителей частоты.

Показано, что гармонический состав выходного излучения содержит гармоники вплоть до 8 ТГц. Возможны два режима работы умножителя. Первый режим, при котором достигается высокая эффективность преобразования в 3, 5 и 7 гармониках, требующий повышенного уровня мощности накачки (порядка 10 мВт), и второй режим с меньшим уровнем мощности накачки (порядка 5 мВт), при котором наблюдается повышенный гармонический состав гармоник с номером до 54 (частота генератора накачки 160 ГГц). Уровень мощности третьей гармоники порядка сотен микроватт, пятой – десятков микроватт, седьмой – единиц микроватт. Показано эффективное применение умножителей частоты как источника высокостабильного

излучения вплоть до 3 ТГц в различных схемах спектрометров высокого разрешения.

Гармонические смесители были успешно применены в качестве приемных элементов в системах фазовой автоподстройки частоты различных источников излучения субмиллиметрового (ЛЮВ и криогенные генераторы на флюксонах) и терагерцового (криогенные полупроводниковые квантово-каскадные лазеры) диапазонов. Продемонстрирован прием излучения газовых лазеров 2,5 ТГц (мощность 2 мВт), 4,3 ТГц (мощность 0,2 мВт) и квантово-каскадного полупроводникового лазера 3,5 ТГц (мощность 0,12 мВт) с отношением сигнал / шум 65–40 дБ·мВт.

Таким образом, показана возможность применения приборов, основанных на квантовых полупроводниковых решетках, в различных радиосистемах субмиллиметрового и терагерцового диапазонов частот. В настоящее время основные усилия направлены на построение приемопередающей линии терагерцового диапазона частот, основанной на квантовых полупроводниковых сверхрешетках, и определения ее потенциала на уровне 140–70 дБ.

КОГЕРЕНТНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО МОДУЛЯЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

И.Е. Иляков, Р.А. Ахмеджанов, Б.В. Шишкин

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Одним из проявлений взаимодействия оптического и терагерцового излучений (ОИ и ТИ) в нелинейных средах является изменение пространственного распределения ОИ под действием приложенного терагерцового поля. Модуляция пространственного распределения происходит вследствие наведения пространственно неоднородным терагерцовым полем линзы в среде. На основе этого эффекта в [1] была предложена новая схема детектирования волновой формы терагерцового импульса. Достоинствами этой схемы являются возможность использования в качестве детектора двулучепреломляющих кристаллов с большими значениями электрооптического коэффициента [1] и возможность детектирования полей существенно большей величины по сравнению со стандартной схемой электрооптического стробирования [2, 3]. Для подтверждения работоспособности новой схемы детектирования авторами работы [1] было проведено сопоставление измерений модуляции интенсивности в центре лазерного пучка, полученные с использованием кристаллов DAST, с данными, полученными методом стан-

дартной электрооптической поляриметрии с использованием кристалла ZnTe. Выявленные при этом небольшие отличия временных зависимостей были отнесены к влиянию различий оптических свойств кристаллов ZnTe и DAST без достаточных, на наш взгляд, оснований.

Для исключения фактора различий сред нами были проведены измерения временных форм сигналов по модуляции интенсивности и методом электрооптической поляриметрии с использованием одного и того же кристалла ZnTe. Нами показано, что и в этом случае существуют различия в детектируемых разными методами временных формах ТИ. На основании полученных данных представлены объяснения выявленных отличий. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-02-31764.

1. Arno Schneider, Ivan Biaggio, and Peter Günter // Appl. Phys. Lett. 2004. 84, 2229-2231.
2. Yuzhen Shen, G. L. Carr, James B. Murphy, Thomas Y. Tsang, Xijie Wang, and Xi Yang // Phys. Rev. 2008. A 78, p. 043813.
3. Arno Schneider // Optics Letters 2009. Vol. 34, No. 7, p. 1054-1056.

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*Р.А. Ахмеджанов, И.Е. Иляков, В.А. Миронов, Е.В. Суворов,
Д.А. Фадеев, Б.В. Шишкин*

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В последнее время в лазерно-плазменных методах генерации терагерцового излучения (ТИ) появилось новое направление – генерация методом облучения границ раздела металл-вакуум либо диэлектрик-вакуум фемтосекундными лазерными импульсами. Большая концентрация электронов в металле позволяет надеяться на высокую эффективность данных схем. Однако в экспериментах этот метод показывает лишь на порядок большую эффективность, чем простейшая схема генерации с использованием квазимонохроматических фемтосекундных импульсов. В небольшом количестве существующих публикаций по данной теме нет полного анализа процессов происходящих при облучении металлической поверхности лазерными импульсами.

В данной работе представлены последние данные, полученные в экспериментах ИПФ РАН по генерации ТИ с поверхности металла, а также теоретическая интерпретация сопутствующих физических процессов. На основе гидродинамического описания электронного газа в металлах подробно об-

суждаются процессы формирования низкочастотного тока и процесса черенковского излучения ТГц-импульсов. В теоретической части предложены аналитические решения для задач формирования низкочастотного тока и процесса излучения ТГц, подтвержденные результатами численного моделирования. Приведено сравнение аналитических результатов с экспериментальными данными, полученными в данной работе, и данными других групп.

КРАЕВАЯ ДИФРАКЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЗОНДЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО БЛИЖНЕПОЛЬНОГО МИКРОСКОПА

В.Н. Трухин^{1,2}, Л.Л. Самойлов^{1,2}

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

² НИУ ИТМО, С.-Петербург

Из первых принципов решена задача дифракции электромагнитного излучения с гауссовым пространственным распределением на полубесконечном тонком металлическом цилиндре. Получено аналитическое выражение для электрического поля рассеянной ТГц-волны, которую можно представить в виде суммы двух сферических волн, расходящихся из двух точек: конца зонда и границы перехода от области возбуждения к тени. При угле регистрации $\pi - \theta_0$ полученное выражение преобразуется в соотношение, из которого следует, что регистрируемая в дальней зоне рассеянная ТГц-волна представляет собой расходящуюся сферическую волну со спектром, аналогичным спектру падающей волны (θ_0 – угол падения). Из полученных теоретических результатов следует, что неоднородное возбуждение приводит к процессу генерации краевых дифракционных волн, подобному тому, который происходит при рассеянии электромагнитной волны на неоднородности рассеивателя. Были выполнены экспериментальные исследования дифракции терагерцового электромагнитного излучения на конусообразном металлическом зонде и полубесконечном металлическом цилиндре, как в присутствии вблизи конца зонда отражающей поверхности, так и в отсутствие ее. Эксперименты выполнены на установке терагерцового ближнепольного микроскопа. Исследовались изменения волновых форм и соответствующих им спектров ТГц-излучения. Обнаружено, что при изменении высоты зонда, под которым нет отражающей подложки, положения экстремумов амплитуды ТГц-поля смещаются, однако данный эффект не наблюдается при наличии отражающей подложки под зондом. При внесении отражающей поверхности изменяется геометрия возбуждения рассеивающего элемента (зонда)

из-за добавления дополнительных направлений возбуждения: к обычному углу возбуждения θ_0 добавляется возбуждение после отражения от подложки $\pi - \theta_0$, а регистрация теперь включает и отражение от подложки $\pi - \theta$. Обнаружено, что амплитуда рассеянного излучения в присутствии подложки на порядок больше, чем в ее отсутствие. Это свидетельствует о том, что рассеяние при геометрии возбуждения-регистрации ($\theta_0, \pi - \theta_0$) вносит основной вклад в регистрируемый сигнал. Для свободного зонда зависимости значений максимума и минимума волновых форм от высоты положения зонда повторяют пространственное распределение ТГц-поля в вертикальном направлении (с поправкой на угол падения), а их относительное смещение происходит по линейному закону. Последний факт позволяет считать, что рассеянное электромагнитное поле в дальней зоне представляет собой сферическую электромагнитную волну, расходящуюся от конца зонда, и ее амплитуда определяется локальным полем, в котором находится конец зонда. Смещение конца зонда в пространстве приводит как к временному сдвигу экстремумов в волновых формах вследствие изменения временной задержки, так и изменению их величин в силу изменения локального поля. Временная задержка определяется изменением оптического пути ТГц-излучения до взаимодействия с зондом и изменением длины распространения рассеянного ТГц-излучения. При наличии отражающей поверхности под зондом зависимости амплитуды экстремумов волновых форм от высоты имеют другой вид. В то же самое время спектр ТГц-сигнала не меняется при изменении высоты зонда. В присутствии отражающей подложки спектр рассеянного излучения практически полностью повторяет спектральное распределение падающего излучения, в то время как в ее отсутствие он претерпевает существенные изменения, приобретая форму проинтегрированного падающего ТГц-поля с характерным спадом в высокочастотной области. Таким образом, полученные экспериментальные данные находятся в разумном согласии с теоретическими результатами, что подтверждает предложенную теоретическую модель, в которой граница возбуждения рассматривается в качестве нового центра локализации источника излучения краевых дифракционных волн.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА В СИСТЕМЕ СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК – ПЛОТНАЯ ПЛАЗМА

А.В. Аржанников^{1,2}, И.В. Тимофеев^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет

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

В докладе представлено рассмотрение генерации электромагнитного излучения на основе слияния плазменных колебаний в условиях сильной ленгмюровской турбулентности, возбуждаемой в замагниченной плазме мощным релятивистским электронным пучком. В результате компьютерных расчетов, базирующихся на теоретической модели, которая разработана применительно к пучково-плазменным экспериментам, найдены значения удельной мощности и ширины спектра генерируемого излучения в широком интервале значений плотности плазмы и уровня турбулентности. Показано, что в нынешних лабораторных экспериментах удельная мощность спонтанного излучения в терагерцовом диапазоне может достигать уровня $\sim 1 \text{ МВт/см}^3$.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНАЦИИ КРИСТАЛЛОВ ZnTe И GaP ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО КОГЕРЕНТНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И.Е. Иляков, Р.А. Ахмеджанов, Б.В. Шишкин

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Электрооптические кристаллы традиционно применяются для детектирования терагерцового излучения (ТИ) благодаря удобству в использовании и широкому спектральному диапазону. Ограничивающим фактором, не позволяющим перекрыть терагерцовый диапазон 0,1–10 ТГц при помощи электрооптических кристаллов, является наличие в них фоновых линий поглощения [1–3]. В качестве альтернативы возможно применение газоплазменных детекторов [4], основным недостатком которых является необходимость использования высоких пиковых мощностей лазерного излучения. В работе исследуется возможность расширения диапазона когерентного детектирования ТИ посредством комбинации электрооптических кристаллов ZnTe и GaP. Подобная комбинация кристаллов ранее использовалась в работе [5] в более узком частотном диапазоне (до 5 ТГц). Было показано, что преимуществом такой комбинации кристаллов в этом частотном диапазоне

при соответствующем подборе длины волны лазерного излучения является улучшение фазового согласования терагерцевых и оптических длин волн. Первый фононный резонанс у кристалла ZnTe находится на частоте 5,3 ТГц. В то же время у кристалла GaP первый фононный резонанс лежит в области 11 ТГц [6]. Однако, как показано и в [6] и видно из наших измерений, уже на 8 ТГц есть «провал» в восприимчивости детектора на основе кристалла GaP. Согласно данным [6] этот провал связан не с фононным поглощением, а с резким уменьшением величины электрооптического коэффициента, т. е. излучение на этих частотах, проходя через кристалл GaP, не испытывает сильного поглощения. Таким образом, если ТИ будет совместно с фемтосекундными лазерными импульсами проходить сначала через кристалл GaP, а затем через кристалл ZnTe, то частоты в районе 5 ТГц, соответствующие фононным резонансам ZnTe, будут детектироваться в кристалле GaP, а частоты в районе 8 ТГц, соответствующие «провалу» электрооптического коэффициента GaP – в ZnTe.

Нами проведено экспериментальное исследование возможности когерентного детектирования методом *time-domain spectroscopy* с использованием комбинации кристаллов ZnTe и GaP в широком диапазоне: 0,1–15 ТГц. В работе представлены отклики одиночных детекторов и их комбинаций для кристаллов различных толщин. Проведен анализ оптимальной величины и соотношения толщин кристаллов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-02-33087.

1. P. Y. Han and X.-C. Zhang // Appl. Phys. Lett., 1998, Vol. 73, No. 21, p. 3049.
2. Q. Wu and X.-C. Zhang // Appl. Phys. Lett., 1997, 70 (14), p. 1784.
3. M. Martin, J. Mangeney, P. Crozat, and P. Mounaix // Appl. Phys. Lett., 2010, 97, p. 111112.
4. Jianming Dai, Xu Xie, and X.-C. Zhang // PRL, 2006, 97, 103903.
5. M. M. Nazarov, S. A. Makarova, A. P. Shkurinov, and O. G. Okhotnikov // Appl. Phys. Lett. 2008, 92, 021114.
6. A. Leitenstorfer et al. // Appl. Phys. Lett., Vol. 74, No. 11, pp. 1516-1518, 1999.

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРИЕМНИК СО СМЕСИТЕЛЕМ НА ЭФФЕКТЕ ЭЛЕКТРОННОГО РАЗОГРЕВА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Н.В. Кинев¹, Л.В. Филиппенко¹, Р.В. Ожегов², К.Н. Горшков², В.А. Селезнев²,
Г.Н. Гольцман², В.П. Кошелец¹*

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

² Московский педагогический государственный университет, Москва

В работе представлена первая успешная попытка создания супергетеродинного сверхпроводникового интегрального приемника, объединяющего на одной микросхеме размером 4 × 4 мм болометр на эффекте разогрева

ва электронного газа (НЕВ) в качестве смесителя и сверхпроводниковый генератор гетеродина на основе распределенного джозефсоновского перехода. Показаны результаты комплексного исследования характеристик приемника. Сверхпроводниковый генератор на вязком потоке джозефсоновских вихрей излучает в диапазоне 400 – 700 ГГц и производит гетеродинную накачку НЕВ-смесителя, согласованного со щелевой антенной. Описана конструкция интегрального приемника, обсуждены топология и особенности некоторых элементов схемы. Исследованы характеристики квазиоптической системы приемника на частотах до 2 ТГц при помощи измерения прямого отклика при помощи фурье-спектрометра. Измерена чувствительность приемника, реализован диапазон принимаемых частот 450–620 ГГц, лучшая шумовая температура составила порядка 1000 К на частоте 600 ГГц, измерения проводились в полосе промежуточных частот 0–1 ГГц. Предложены и описаны направления дальнейшей оптимизации приемника с целью расширения рабочего диапазона (в сторону высоких частот) и улучшения его чувствительности.

СУБТЕРАГЕРЦОВЫЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ УМНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С ТРУБЧАТЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

П.Б. Махалов, А.Э. Федотов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Источники мощного микроволнового излучения с контролируемыми параметрами (мощностью, частотой, фазой и длительностью импульсов) весьма востребованы для радаров, телекоммуникаций и спектроскопических приложений, в частности для перспективной техники импульсной динамической поляризации ядер в спектроскопии ядерного магнитного резонанса. Однако в настоящее время СВЧ-усилители на частотах выше 220 ГГц практически отсутствуют. Для приборов черенковского типа продвижение в область высоких частот ограничивается, в частности, сложностью проведения тонкого электронного пучка с очень большой плотностью тока на очень близком расстоянии от стенок периодической структуры. В настоящей работе для указанных целей рассмотрен новый вариант умножителя частоты черенковского типа – клистрон с распределенным взаимодействием с трубчатым электронным пучком. Для прибора субтерагерцового диапазона использование умножителя частоты вместо усилителя делает доступными источники входного излучения со значительно большей мощностью. Трубчатая форма электронного пучка обеспечит возможность проведения вблизи по-

верхности замедляющей структуры в непрерывном режиме значительно большего тока при сохранении плотности тока и той же тепловой нагрузке на стенки по сравнению с существующими черенковскими приборами близких частотных диапазонов, в которых используются нитевидные пучки в тонких цилиндрических каналах внутри замедляющих систем.

Теоретически исследован двухрезонаторный вариант умножителя (утроителя) частоты с частотой выходного излучения 260 ГГц и выходной мощностью несколько ватт. Входная и выходная секции представляют собой отрезки круглого волновода с глубокой осесимметричной гофрировкой, работающие на квазикритических рабочих модах (86,7 ГГц и 260 ГГц соответственно). В расчётах предполагалось, что трубчатый электронный пучок с ускоряющим напряжением 15 кВ, током 0,3 А и толщиной стенки 0,1 мм может быть проведен в магнитном поле 8 кЭ на расстоянии 0,1 мм пучка до гофрированной стенки резонатора. Ширина полосы умножителя определяется добротностью выходной секции и составляет сотни мегагерц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-03-31722.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ, ИНИЦИИРОВАННОГО ТЕРАГЕРЦОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*В.Л. Братман, М.Ю. Глявин, С.В. Голубев, В.Г. Зорин, И.В. Изотов,
Ю.К. Калынов, А.Г. Лучинин, М.В. Морозкин, С.В. Разин, В.Е. Семенов,
А.В. Сидоров, В.А. Скалыга*

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Одним из перспективных приложений мощного терагерцового излучения является инициация локализованного газового разряда. До последнего времени эксперименты по СВЧ-пробою газа в пучках электромагнитных волн проводились в миллиметровом диапазоне длин волн (частота менее 0,1 ТГц) и в ИК-диапазоне (лазерная искра при частоте более 100 ТГц). Разряд в лежащем между этими значениями частот терагерцовом диапазоне представляется новым, весьма специфическим объектом физики газового разряда, а его исследование интересно как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения прикладных задач. ТГц-излучение может быть сфокусировано в достаточно малую область, в которой при киловаттном уровне мощности достигается интенсивность порядка 1 МВт/см^2 , что позволяет получить сильно неравновесную плазму с уникальным набором параметров: плотностью 10^{16} см^{-3} , температурой электронов и ионов порядка 100 эВ и 1 эВ соответственно. Такая плазма может быть использована для

создания «точечного» (характерный размер 0,5 мм) источника рентгеновского излучения для литографии с высоким разрешением.

В качестве источника ТГц-излучения в описываемых экспериментах использовался гиротрон с рабочей частотой 0,67 ТГц и мощностью до 200 кВт [1] в импульсе длительностью 10–20 мкс. В докладе представлены основные, конструктивные особенности гиротрона, результаты его экспериментального исследования в сравнении с расчетными данными и материалы, иллюстрирующие динамику газового разряда при различных условиях (давление и метод напуска газа, способ фокусировки излучения и т. д.).

1. *M.Yu. Glyavin, A.G. Luchinin, G.S. Nusinovich, J. Rodgers, D.G. Kashyn, C.A. Romero-Talamas, R. Pu. A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency // Appl. Phys. Lett., 2012, 101, 153503 (1–4).*

ИСТОЧНИКИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР 8-МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИМПУЛЬСАМИ СУБГИГАВАТТНОГО УРОВНЯ

В.В. Ростов¹, М.И. Яландин²

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

² Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Исследованы условия синфазного возбуждения двух независимых наносекундных релятивистских СВЧ-генераторов обратной волны диапазона 37 ГГц с сильноточными электронными пучками, получаемыми на основе компактных синхронизированных ускорителей РАДАН-303. Показана возможность формирования взаимно стабильных импульсов ускоряющего напряжения с управляемой длительностью и задержкой фронта одного импульса относительно другого. Обострение и задержка каждого из высоковольтных импульсов могли устанавливаться с пикосекундной точностью благодаря корректировке продольного постоянного магнитного поля в идентичных нелинейных линиях с ферритом, которые размещались в коаксиальных передающих линиях перед вакуумными диодами. Разработана модель коррекции фронта напряжения на ограниченном по длине участке нелинейной линии с насыщенным ферритом в аксиальном магнитном поле. В экспериментах получена продолжительная (более ста периодов поля) синхронизация фаз генерации, воспроизводимая от импульса к импульсу. Продемонстрировано когерентное суммирование мощности излучения субгигаваттных волновых пучков – до 100 МВт в каждом канале. В результате сложения полей сигнал микроволнового детектора, располагаемого вблизи максимума диаграммы направленности, мог увеличиваться в 4 раза. Таким образом, созданы предпосылки наращивания генерируемой мощности наносекундного микроволнового излучения, а также разработки сверхмощных излучателей типа активных решеток.

Исследования проводились в рамках интеграционного проекта ИЭФ УрО РАН и ИСЭ СО РАН в соответствии с тематикой программы президиума РАН «Фундаментальные проблемы импульсной сильноточной электроники» и при поддержке РФФИ, грант 11-02-00097а.

РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЛПИМТИ НГУ В МИЛЛИМЕТРОВОМ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН

А.В. Аржанников^{1,2}, М.К.А. Тумм^{1,3}

¹ Новосибирский государственный университет, Новосибирск

² Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск

³ Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

В докладе дается обзор исследований, которые проводятся в Лаборатории перспективных исследований по миллиметровому и терагерцовому излучению (ЛПИМТИ) Новосибирского государственного университета и Института ядерной физики СО РАН. Эти исследования охватывают широкий круг задач, которые включают: генерацию субмиллиметрового излучения в условиях пучково-плазменного взаимодействия с развитием мелко-масштабной турбулентности; генерацию колебаний 4-миллиметрового диапазона в двухканальном планарном МСЭ и получение терагерцового излучения при рассеянии этих колебаний на релятивистском пучке; создание приборов и устройств для измерения частотных и пространственных характеристик излучения и для управления этими характеристиками; применение микроволнового излучения для ЭЦР-нагрева плазмы и для воздействия на различные материалы. Приведены достигнутые результаты и обозначены пути развития указанных исследований.

КОРОТКОВОЛНОВЫЕ РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЧЕРЕНКОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ СО СВЕРХРАЗМЕРНЫМИ ОДНОМЕРНО- И ДВУМЕРНО- ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ЗАМЕДЛЯЮЩИМИ СИСТЕМАМИ

Н.С. Гинзбург

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Стимулированное черенковское излучение прямолинейных электронных потоков в периодически-гофрированных волноводах широко используется в релятивистской электронике для создания генераторов и усилителей с субгигаваттным и гигаваттным уровнем мощности, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Существующая теория таких приборов основана на теории возбуждения волноводов. Ее область применимости ограничена предположением об относительно малом числе распространяющихся волн. В этой связи подобная теория оказывается недостаточна для описания значительного числа экспериментально реализо-

ванных макетов релятивистских источников, например многоволновых черенковских генераторов (МВЧГ). В последнее время актуальность подобных исследований возросла в связи с освоением коротковолновых, в частности терагерцового, диапазонов, что неизбежно требует использования сверхразмерных электродинамических систем.

Развиваемый в работе подход основан на представлении поля в виде совокупности квазиоптических волновых пучков, связанных на гофрированной структуре и формирующих замедленные поверхностные волны, которые возбуждаются прямолинейными релятивистскими электронными потоками. На этой основе построена нелинейная самосогласованная теория усилителей и генераторов поверхностной волны с одно- и двумерно-периодическими замедляющими структурами. Показана перспективность создания в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн мощных генераторов поверхностной волны планарной и цилиндрической геометрии, в которых пространственная когерентность излучения при большой сверхразмерности области взаимодействия по двум поперечным координатам обеспечивается использованием двумерно-периодических замедляющих структур.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РЕЗОНАТОРАХ МОЩНЫХ 300-ГГЦ ГИРОТРОНОВ

Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов, М.А. Моисеев

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Для токамаков с сильным магнитным полем ТСП, Алкатор – СИ, ИГНИТОР требуются мощные источники с частотой 300 ГГц. На основе опыта разработки 170-ГГц гиротронов высокой мощности для ИТЭР [1] и 300-ГГц гиротрона средней мощности [2] рассматривается возможность создания мощных 300-ГГц гиротронов. Исходя из простых оценок и с использованием детального численного моделирования исследуется взаимодействие электронного пучка и ВЧ-поля в резонаторах непрерывных 300-ГГц гиротронов на основном циклотронном резонансе с рабочими модами $TE_{22,8}$ – $TE_{44,44}$. Рассматриваются некоторые основные факторы, ограничивающие мощность излучения. Омические потери в резонаторе, разброс скоростей электронов, потери на переизлучение рабочей моды, конкуренция мод, взаимодействие отработанного электронного пучка с попутной волной в выходном волноводе. Показана возможность достижения мощности излучения 1 МВт с КПД 30 % без рекуперации и 55 % с одноступенчатой рекуперацией.

1. V.E. Zapevalov, G.G. Denisov, V.A. Flyagin, A.Sh. Fix, A.N. Kuftin, A.G. Litvak, M.V. Agapova, V.N. Iljin, V.A. Khmara, V.E. Myasnikov, V.O. Nichiporenko, L.G. Popov, S.V. Usachev,

- V.V. Alikaev, V.I. Iljin. Development of 170GHz/1MW Russian gyrotron for ITER // Fusion Engineering and Design. Dec. 2000. Volume / issue: 53/1-4. P. 377-385.
2. В.Е. Запезалов, О.В. Малыгин, М.А. Моисеев, В.И. Хижняк, В.П. Карпов, Е.М. Тай, Т. Идехара, С. Мицудо, Е. Сайто, И. Тотемацу. Результаты разработки 300 ГГц непрерывного гиротрона киловаттного уровня мощности // Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Н. Новгород, 2009. С. 39.

ТРЕХМЕРНОЕ PIC-МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХРАЗМЕРНЫХ ГИРОТРОНОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ И ПЛАНАРНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ПРОСТРАНСТВА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В.Ю. Заславский, Н.С. Гинзбург, М.Ю. Глявин, И.В. Зотова

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Проведено трехмерное моделирование гиротронов терагерцового диапазона с цилиндрической и планарной конфигурацией пространства взаимодействия. Для традиционных гиротронов цилиндрической геометрии продемонстрировано достаточно хорошее соответствие результатов моделирования с экспериментальными данными [1], включая мощность излучения, величину омических потерь и структуру рабочей моды высокого порядка $TE_{17,4}$. Для предложенной в [2] новой планарной схемы гиротрона с поперечным дифракционным выводом энергии показана возможность увеличения мощности излучения в терагерцовом диапазоне при увеличении сверхразмерности системы путем развития пространства взаимодействия вдоль одной из поперечных координат. Кроме того, механическое изменение расстояния между пластинами резонатора позволяет осуществить эффективную настройку и перестройку частоты излучения порядка нескольких процентов.

1. M.Yu. Glyavin, A.G. Luchinin and G.Yu. Golubiatnikov // Physical Review Letters. 2008. V. 100. P. 015101.
2. N.S. Ginzburg, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, V.Yu. Zaslavsky, I.V. Zheleznov // Physical Review Letters. 2012. V. 108. P. 105101.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИРОТРОНА С ЭШЕЛЕТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

*С.Н. Власов, Н.А. Завольский, В.Е. Запезалов, Е.В. Копосова,
С.Ю. Корнишин, А.Н. Куфтин, В.Н. Мануилов, М.А. Моисеев, В.И. Хижняк*

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В гиротронах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в настоящее время наибольшие уровни выходной мощности достигаются при работе на высших типах пространственных мод резонаторов в виде отрезков сверхразмерных слабо нерегулярных цилиндрических волноводов [1, 2]. Максимальный уровень выходной мощности и КПД в значительной мере ограничиваются проблемами селекции мод в таких системах и высоким уровнем омических потерь в стенках резонатора [2]. Для укорочения рабочей длины волны при наличии ограничений на величину магнитного поля необходимо работать на гармониках гирочастоты. В этом случае указанные выше проблемы становятся особенно острыми [3]. Для решения указанных проблем представляется перспективным использование в мощных коротковолновых гиротронах эшелетных резонаторов [4]. Принцип работы эшелетного резонатора аналогичен дифракционным решеткам. При соответствующем подборе глубины и периода гофра эшелетной поверхности коэффициент отражения волны в направлении, обратном направлению падения, может быть близок к единице; кроме этого автоколлимационного максимума может существовать зеркальный лепесток, благодаря которому генерируемая мощность выводится из резонатора.

Работа является продолжением выполненных ранее экспериментальных и теоретических работ по гиротронам с эшелетными резонаторами [5–7]. Обсуждаются схемы и результаты расчета нескольких перспективных вариантов гиротронов на оптимизированных версиях таких резонаторов для случаев: частота 150 ГГц, мощность около 1 МВт (работа на первой гармонике циклотронной частоты) и 300 ГГц, 0,1 МВт (на второй гармонике). Анализируются достоинства и недостатки исследованных вариантов. Излагаются предварительные результаты экспериментов.

1. V.E. Zapevalov, G.G. Denisov, V.A. Flyagin, A.Sh. Fix, A.N. Kuftin, A.G. Litvak, M.V. Agapova, V.N. Iljin, V.A. Khmara, V.E. Myasnikov, V.O. Nichiporenko, L.G. Popov, S.V. Usachev, V.V. Alikeev, V.I. Iljin. Development of 170GHz/1MW Russian gyrotron for ITER // Fusion Engineering and Design. Dec. 2000. Volume / issue: 53/1-4. P. 377-385.
2. В.Е. Запезалов, О.В. Малыгин, М.А. Моисеев, В.И. Хижняк, В.П. Карнов, Е.М. Тай, Т. Идехара, С. Мицудо, Е. Сайто, И. Тотемацу. Результаты разработки 300-ГГц непрерывного гиротрона киловаттного уровня мощности // Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Н. Новгород, 2009. С. 39.
3. V. Bratman, M. Glyavin, T. Idehara, Yu. Kalynov, A. Luchinin, V. Manuilov, S. Mitsudo, I. Ogawa, T. Saito, Y. Tatematsu, V. Zapevalov. Review of Sub-Terahertz and Terahertz Gyrodevices at IAP RAS and FIR FU // Int. Journal IEEE Transactions on Plasma Science, (2009). Vol. 37, issue 1. P. 36-43.

4. Власов С.Н., Копосова Е.В., Павельев А.Б., Хижняк В.И. Гиротроны с эшелеттными резонаторами // Известия вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, вып. 6. С.691-699.
5. Власов С.Н., Копосова Е.В., Павельев А.Б., Пылин А.В., Хижняк В.И. Гиротрон на второй гармонике гирочастоты // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17, вып. 4. С. 8-10.
6. Власов С.Н., Копосова Е.В. Аксиально-симметричные резонаторы эшелеттного типа // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 66, вып. 7. С. 156-162.
7. Власов С.Н., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Копосова Е.В., Моисеев М.А. Аксиально-симметричные ступенчатые резонаторы // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 9. С. 716-729.

МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ГИРОКЛИСТРОН ДИАПАЗОНА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН НА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ МОД TE_{711} - TE_{731}

*Н.И. Зайцев¹, Ю.М. Гузнов¹, С.А. Запевалов¹, С.В. Кузиков¹, М.А. Моисеев¹,
М.И. Петелин¹, М.Е. Плоткин¹, Е.М. Тай², А.С. Шевченко¹*

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

² НПП ГИКОМ, Н. Новгород

В работах [1, 2] продемонстрирована перспективность импульсных гироклистронов на объемных модах высокого порядка. В предлагаемом докладе приведены результаты исследований варианта гироклистрона с двумя резонаторами на последовательности мод $TE_{7.1.1}$ и $TE_{7.3.1}$. Главной целью было увеличение до 35,4 ГГц частоты излучения и расширение диапазона рабочих напряжений. Экспериментальные исследования гироклистрона выполнены на электронном микросекундном ускорителе «Сатурн F» (400 кэВ; 200 А; 1 мкс; 0–10 Гц) [3]. Условия проведения экспериментов не отличались от приведенных в [2]. При напряжении 300 кВ получена выходная мощность до 15 МВт при КПД выше 30 %, коэффициенте усиления 30 дБ, полосе усиления 50 МГц и длительности СВЧ-импульса 0,5 мкс.

Прибор работал с высокой эффективностью и при уменьшении питающего напряжения и величины магнитного поля при соответствующем увеличении напряжения на первом аноде:

Напряжение, кВ	120	140	190	320
Ток, А	70	80	95	140
Мощность, МВт	2,5	3,8	5,7	15
КПД, %	30	34	31	33
Δf , МГц	50	50	50	50
Козфф. усил., дБ	20	24	26	30
Магнитное поле, Тл	1,465	1,552	1,638	1,892

1. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кузиков С.В. и др. Импульсный гироклистрон на объемной моде высокого порядка // Известия вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10/11. С. 830–834.

2. Гвоздев А.К., Зайцев Н.И., Запезалов С.А., Кузиков С.В., Моисеев М.А., Петелин М.И., Плоткин М.Е. Гироклистрон 30 ГГц, 15 МВт, 40 %, 0,5 мкс // Докл. 22-й международной конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии, Севастополь, 10-14 сентября 2012 г. С. 777-778.
3. Zaitsev N.I., Zapevalov S.A., Ilyakov E.V. et al. 500 keV, 200 A microsecond electron accelerator with a repetition rate of 10 Hz // Proc. of RuPAC-2008. P. 339-341.

ДИНАМИКА ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНОВ В АДИАБАТИЧЕСКУЮ ЛОВУШКУ ГИРОТРОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТОКАХ ВИНТОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

А.Д. Кунцевич, В.Н. Мануилов

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород

Гиротроны в настоящее время являются наиболее перспективными источниками мощного (от десятков киловатт до нескольких мегаватт и более) излучения в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн. Источники энергии в этих приборах служат винтовые электронные пучки, формируемые, как правило, адиабатическими магнетронно-инжекторными пушками (МИП), работающими в режиме температурного ограничения эмиссии. Известно, что предельные параметры гиротронов (мощность, КПД) достигаются, как правило, в режимах с максимально возможным pitch-фактором – отношением вращательной скорости электронов к скорости их продольного движения в области резонатора. В них электронный поток находится на границе устойчивости, определяемой долей отраженных от магнитного зеркала частиц, а параметры пучка существенно отличаются от вычисленных без учета отраженных электронов. Поэтому численное моделирование таких режимов корректно только в рамках нестационарной модели на базе метода крупных частиц [1] с учетом отражений частиц как от магнитного, так и от электростатического (область катода МИП) зеркала. Выполненные ранее в рамках этой модели расчеты проводились только для наиболее типичного для гиротронов значения тока пучка I_0 порядка 10 % от ленгмюровского тока МИП I_L . В настоящее время рабочие токи гиротронов варьируются в пределах $(0,05-0,3)I_L$, а в ряде случаев достигают даже $0,5I_L$. Поэтому представляет несомненный практический интерес исследование характеристик ВЭП, включая развитие колебательных режимов в винтовом электронном пучке и захват электронов в адиабатическую ловушку между катодом и рабочим пространством, в широком диапазоне токов и коэффициентов отражения электронов от магнитного зеркала.

В докладе на примере расчета МИП гиротронов сантиметрового диапазона длин волн исследованы основные закономерности эволюции параметров ВЭП при больших (от 0,03 до 0,4) коэффициентах отражения электронов от магнитного зеркала. Проведено сравнение величин захваченного заряда, амплитуд колебаний потенциала в различных сечениях пучка, зон бомбардировки и соответствующего тока бомбардировки катода МИП, и проходящего в резонатор тока, при вариации тока эмиссии МИП от 0,05 до $0,3I_L$. Анализ выполнен для трех наиболее часто используемых на практике типов ВЭП: регулярно пересекающегося, пограничного и ламинарного. Даны рекомендации по выбору наиболее предпочтительных режимов МИП и типа формируемого пучка, обеспечивающих пониженное влияние отраженных электронов на параметры ВЭП.

1. *P.V. Krivosheev, V.K. Lygin, V.N. Manuilov, Sh.E. Tsimring. Numerical Simulation Models of Focusing Systems of Intense Gyrotron Helical electron Beams // Int. J. of Infrared and MM waves. 2001. Vol. 22, No 8. P. 1119-1146.*

ВИНТОВАЯ ГИРО-ЛБВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН НА ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКЕ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ

С.В. Мишакин, С.В. Самсонов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Сравнительно недавно в ИПФ РАН была предложена идея использования волновода с винтовой гофрировкой поверхности в качестве электродинамической системы giro-ЛБВ. При определенных параметрах гофрировки благодаря резонансной связи двух парциальных мод круглого волновода удастся создать нормальную волну с постоянной групповой скоростью и продольным волновым числом, близким к нулю, что позволяет совместить широкополосность усилителя на бегущей волне со слабой зависимостью КПД от разброса скоростей электронного пучка, присущей гиротронам. Плодотворность идеи использования винтового волновода в качестве электродинамической системы giro-ЛБВ была убедительно продемонстрирована теоретически и в экспериментальных исследованиях, в частности, был создан ряд устройств в длинноволновой части миллиметрового диапазона, имеющих большой практический интерес. Использувавшаяся до сих пор достаточно устойчивая к самовозбуждению конфигурация giro-ЛБВ представляет собой волновод с трехзаходной винтовой гофрировкой, которая связывает квазикритическую моду $TE_{2,1}$, резонансно взаимодействующую с

приосевым электронным пучком на второй гармонике циклотронной частоты и рассеивающуюся на гофрировке в попутную пучку бегущую моду $TE_{1,1}$ противоположного вращения.

В настоящей работе проведен анализ возможности использования в винтовой giro-ЛБВ взаимодействия на третьей гармонике гирочастоты при сохранении устойчивости к самовозбуждению. Проведенный численный анализ показал, что использование селективных свойств приосевого электронного пучка (возбуждение мод только с азимутальными индексами, равными номеру циклотронной гармоники) позволяет реализовать устойчивое взаимодействие в giro-ЛБВ на третьей гармонике гирочастоты с одновременным повышением рабочей моды до $TE_{3,1}$ и соответствующим увеличением среднего диаметра волновода с 1 до 1,3 длин волн. Повышение сверхразмерности системы и существенное уменьшение величины требуемого магнитного поля способствует продвижению прибора в более коротковолновый диапазон на высоком уровне мощности.

Компьютерное моделирование giro-ЛБВ на третьей гармонике с током и напряжением пучка соответственно 10 А и 70 кВ, с оптимально подобранной геометрией пространства взаимодействия показало, что мгновенная полоса усиления (при фиксированном оптимальном магнитном поле 6,08 кЭ) составляла около 8 % по уровню – 3дБ, при значении выходной мощности 80 кВт в максимуме (на частоте 45 ГГц), что соответствовало коэффициенту усиления 22 дБ. Важно отметить, что, несмотря на невысокий уровень электронного КПД (около 10 %), обусловленный существенным ослаблением связи электронного пучка с волной при взаимодействии на высоких гармониках, этот же фактор определяет относительно небольшую величину энергетического разброса в пучке после взаимодействия. Так, в рассчитанной системе минимальная энергия электронов в «отработанном» пучке составляет 40 кэВ при энергии на входе 70 кэВ. Данное обстоятельство определяет возможность использования одноступенчатой рекуперации энергии пучка с соответствующим снижением напряжения основного источника питания до 30 кВ и повышением электронного КПД до 27 %.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-02-31884_мол_а, программы президиума РАН «Фундаментальные проблемы импульсной силовоточной электроники» и программы фундаментальных исследований ОФН РАН IV.12 «Современные проблемы радиофизики».

ВОЗДЕЙСТВИЕ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ УДАЛЕННОЙ НАГРУЗКИ НА КОНКУРЕНЦИЮ МОД И ПРОСТРАНСТВЕННУЮ СТРУКТУРУ ИЗЛУЧЕНИЯ ГИРОТРОНА

*Н.К. Харчев¹, Г.М. Батанов¹, Ю.В. Бондарь¹, Л.В. Колик¹, Д.В. Малахов¹,
А.Е. Петров¹, К.А. Сарксян¹, Н.Н. Скворцова¹, М.И. Петелин²,
Ю.В. Новожилова², А. Каппа³, Ж. Мартинез³, А. Толкачев³, Н.М. Рыскин⁴*

¹ Институт общей физики РАН, Москва

² Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

³ Научный центр СЕМАТ, Мадрид, Испания

⁴ Саратовский государственный университет, Саратов

Как известно, даже малое отражение от нагрузки может существенно повлиять на мощность и спектральные характеристики генератора, в частности гиротрона [1, 2]. В недавних экспериментах было обнаружено, что под воздействием отражения от осциллирующей удаленной нагрузки происходит изменение во времени поперечной структуры излучения гиротрона: качание волнового пучка в вертикальной плоскости, а также периодическое изменение поляризации [3].

Одно из наиболее вероятных объяснений этого эффекта – влияние отражений на характер конкуренции мод внутри резонатора гиротрона. Выходной квазиоптический преобразователь гиротрона выводит излучение на рабочей моде в виде гауссова пучка, а отраженная волна, вернувшись в гиротрон через этот преобразователь, имеет противоположное направление вращения поля относительно рабочей моды и возбуждает соответствующую моду. (Обычно гиротрон проектируют таким образом, чтобы в отсутствие отражения мода с противоположным направлением вращения не самовозбуждалась.)

Эффект возбуждения моды с противоположным азимутальным вращением поля в гиротроне под воздействием отражения исследован в данной работе на основе укороченных феноменологических уравнений для комплексных амплитуд мод внутри генератора (аналогичная задача решалась в [4] численными методами). Такие уравнения достаточно хорошо описывают произвольный автогенератор с фиксированной структурой поля. В отсутствие отражений теория дает известную картину конкуренции двух мод. Параметры в уравнениях, как и в эксперименте, были выбраны таким образом, чтобы в отсутствие отражения возбуждалась только рабочая мода. Однако даже при сколь угодно малых отражениях наряду с рабочей модой в резонаторе гиротрона на моде встречного вращения возникают вынужденные колебания. На выходе гиротрона излучение представляет собой суперпозицию двух волн: основной и вторичной (соответствующей моде встреченного вращения), причем на периферийной части гауссова пучка амплитуды этих

волн могут оказаться соизмеримыми. Поскольку модуляция удаленного отражателя приводит к изменению разности фаз этих волн, меняется интерференционная картина на периферии волнового пучка, что и наблюдалось экспериментально.

1. Г.М. Батанов, Л.В. Колик, и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71, вып. 5. С. 90-96.
2. Фернандез А., Харчев Н.К. и др. // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 159-165.
3. N.K. Kharchev, G.M. Batanov, et al. // Proc. of 8th Int. Works. "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications". IAP RAS, Nizhny Novgorod, 2011. P. 90.
4. O. Dumbrajs // Int. J. of Infr., Millim. and Terah.Waves. 2010. V. 31. P. 892-898.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГИРОТРОНА ДЛЯ РАБОТЫ НА НИЗКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

*М.Ю. Глявин¹, А.С. Седов¹, Н.А. Завольский¹, В.Е. Запечалов¹,
М.А. Мусеев¹, Г.С. Нусинович²*

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

² Университет Мэриленда, США

Долгое время основным направлением модернизации гиротронов было достижение высоких уровней мощностей и КПД. Главным образом, это было связано с решением задачи по нагреву плазмы в установках по управляемому термоядерному синтезу (УТС) и технологических приложений. Следует отметить, что круг научных и практических приложений гиротронов непрерывно расширяется, в частности для решения таких задач, как спектроскопия высокого разрешения (ДПЯ/ЯМР), диагностика плотной плазмы в установках УТС, изучение свойств и создание новых материалов (лазерная керамика), дистанционное обнаружение источников ионизирующего излучения, создание локализованных плазменных объектов и ряда других. Для части приложений актуальной является эффективная генерация микроволнового излучения при низких рабочих напряжениях, что снижает массогабаритные характеристики установки и позволяет минимизировать влияние вредных для человека факторов (рентгеновское излучение коллектора и т.д.). Спецификой оптимизации данных гиротронов является то, что в условиях ограничения тока пучка и ускоряющего напряжения сложно реализовать высокий электронный КПД. Для гиротронов терагерцового диапазона на процесс оптимизации накладываются дополнительные ограничения, связанные со значительными долями омических потерь в резонаторе.

В работе представлены результаты аналитических оценок для выбора области параметров, позволяющей при указанных ограничениях реализовать

максимально возможный КПД. В качестве иллюстрации приведены результаты численного моделирования низковольтных гиротронов на различных гармониках гирочастоты. Результаты расчетов могут быть использованы для проектирования и оптимизации гиротронов, работающих при относительно низких рабочих напряжениях.

1. V.L. Bratman, A.A. Bogdashov, G.G. Denisov, M.Yu. Glyavin, Yu.K. Kalynov, A.G. Luchinin, V.N. Manuilov, V.E. Zapevalov, N.A. Zavolsky, V.G. Zorin. Gyrotron development for high power THz technologies in IAP RAS //Int. J. IRMM&THz Waves. 2012, **33**, 7, 715-723.
2. T. Idehara, S. Sabchevsky. Development and Applications of High-Frequency Gyrotrons in FIR FU Covering the sub-THz to THz Range // Int. J. IRMM&THz Waves, 2012, **33**, 7, 667-694.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИММЕТРИЧНЫХ МОД НЕСИММЕТРИЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В МНОГОВОЛНОВОМ ЧЕРЕНКОВСКОМ ГЕНЕРАТОРЕ

В.Н. Корниенко, В.А. Черепенин

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

При теоретическом исследовании зависимости основных характеристик излучения многоволнового черенковского генератора (МВЧГ) от особенностей конструкции его электродинамической структуры (ЭС) было обнаружено, что на вид поперечной пространственной структуры формируемого на выходе ЭС электромагнитного поля существенное влияние оказывает степень согласования ЭС с катодной частью. В частности, при достаточно хорошем согласовании (отражение менее -20 дБ на частоте генерации) в рассматриваемой системе «электронный пучок – ЭС», обладающей аксиальной симметрией, в излучении преобладал вклад несимметричных мод. Если же на входе ЭС устанавливалась металлическая диафрагма, значительно снижающая степень согласования, то скорость развития генерации возрастала, а поле излучения имело в основном аксиально-симметричную структуру. Отметим, что в обоих случаях плотность кольцевого электронного пучка была равномерной.

Целью данной работы было исследование устойчивости аксиально-симметричного пространственного распределения поля излучения по отношению к азимутальной неоднородности плотности потока частиц. Была выбрана конструкция ЭС, обеспечивающая симметричное распределение поля при использовании симметричного пучка. Начальная плотность пучка модулировалась в поперечном направлении по синусоидальному закону. Амплитуда модуляции изменялась от 0,0 до 0,6.

Моделирование динамики рассматриваемой системы было проведено при помощи программы, реализующей параллельный алгоритм решения самосогласованной системы уравнений Максвелла в пространственно-временном представлении и уравнений движения заряженных частиц.

В результате выполненных вычислительных экспериментов было показано, что аксиально-симметричные моды преобладают в излучении даже при величине начальной модуляции, равной 0,2. При этом отношение амплитуд максимальной симметричной моды к максимальной несимметричной составило 3,33.

УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ЭМИТТАНСОМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

А.А. Вихарев, С.В. Кузиков, С.В. Мишакин

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Увеличение светимости пучков заряженных частиц в линейных коллайдерах во многом связано с возможностью их компактной фокусировки в точке встречи. Для этого необходимы системы охлаждения пучков. На энергиях, составляющих несколько гигаэлектрон-вольт, эффективное охлаждение осуществляется в накопительных кольцах [1]. В них из-за синхротронного излучения частиц пучка в пространственно-периодическом поле постоянных магнитов (ондуляторе) возникает радиационное затухание [2]. Затухание приводит к уменьшению эмиттанса пучка. Охлажденный таким способом пучок частиц затем вводится в ускоряющую структуру, в которой его энергия должна увеличиться до тераэлектрон-вольтного уровня. Однако нормированный эмиттанс релятивистского пучка, набирающего энергию в ускоряющей структуре, имеет тенденцию к увеличению. Главным образом это связано с негативным действием кильватерных полей, неизбежно возникающих при ускорении длинных последовательностей сгустков частиц. При этом охлаждение высокоэнергетичного пучка частиц из-за чрезмерных радиационных потерь и радиусов поворота становится возможным лишь на прямолинейных участках траектории. Использование ондуляторов на постоянных магнитах, встроенных в линейный ускоритель, привело бы к снижению среднего темпа ускорения.

Для решения проблемы предлагается использовать СВЧ-ондулятор на бегущей волне [3–5]. Ондулятор представляет собой периодическую винтовую структуру, собственная волна которой сочетает в себе свойства и уско-

рения, и периодической раскачки пучка, необходимой для охлаждения. Однозаходная винтовая гофрировка связывает две парциальные волны волновода круглого поперечного сечения – TM_{01} и TM_{11} . Соответствующая нормальная волна имеет как продольное электрическое поле, синхронное частицам, так и поперечные несинхронные поля, ответственные за синхротронное излучение и охлаждение. Оптимизация параметров структуры позволяет добиться приемлемых значений отношения ускоряющего поля к максимальному поверхностному полю ($\sim 1/3$) и импеданса структуры (~ 20 МОм/м на частоте 30 ГГц).

1. G.K. O'Neill. Storage Ring Synchrotron: Device for High Energy Physics Research // Physical Review. 1956. V. 102. P. 1418-1419.
2. J.M.J. Madey. Stimulated Emission of Radiation in Periodically Deflected Electron Beams // Journal of Applied Physics. 1971. Vol. 42.
3. T. Shintake, K. Huke, J. Tanaka, I. Sato and I. Kumabe. Development of microwave undulator // Japanese J. of Appl. Phys. 1983. V. 22. P. 844-851.
4. Hirshfield J.L., Kuzikov S.V., Marshall Th.C., Sotnikov G.V., Vikharev A.A. A Short-Period RF Undulator // Proceedings of 8th International Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications". Nizhny Novgorod, 2011. P. 93-94.
5. Kuzikov S.V., Vikharev A.A., Plotkin M.E., Hirshfield J.L., Marshall T.C., Sotnikov G.V., Peskov A.V. A Short-Period RF Undulator for a Nanometer SASE Source // Proceedings of International Particle Accelerator Conference 2011, San Sebastian, Spain. 2011. P. 3293-3295.

ОРОТРОН 2 ММ ДИАПАЗОНА С ДВУМЯ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПОТОКАМИ

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

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
г. Фрязино, Московская обл

В работе [1] были приведены результаты экспериментального исследования работы оротрона с двухрядной периодической структурой (ДПС) в диапазоне 140...300 ГГц как с одним, так и с двумя электронными потоками. Уже в этих первых экспериментах была показана возможность увеличения эффективности электронно-волнового взаимодействия (генерируемой мощности) путем введения в пространство взаимодействия второго электронного потока над вторым рядом ДПС благодаря использованию четвертьволнового резонанса в ее щелях. Этот эффект наблюдался во всем диапазоне перестройки прибора по частоте, что особенно важно для увеличения мощности на его высокочастотной границе. Однако этот вопрос требует более детального исследования, так как положительный эффект может достигаться только в том случае, когда второй дополнительный поток движется

вдоль пространства взаимодействия в одной и той же фазе ВЧ-поля с основным электронным потоком [2]. Поэтому при введении второго электронного потока необходимо учитывать кривизну волнового фронта быстрой волны в открытом резонаторе.

В докладе будут приведены результаты экспериментального исследования возможности увеличения генерируемой мощности в оротроне с двухрядной периодической структурой 2 мм диапазона с тремя различными типами открытых резонаторов благодаря введению дополнительного электронного потока в пространство взаимодействия прибора над вторым рядом структуры. Показано, что возможно увеличение мощности генерации во всей полосе (~30%) перестройки оротрона по частоте при отношении радиуса каустики на плоском зеркале к длине волны генерации $r_k/\lambda \cong 2$, и только на одной частоте при $r_k/\lambda \leq 1,5$.

Работа была выполнена при частичной поддержке программы ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики».

1. *Е.А. Мясин, В.В. Евдокимов, А.Ю. Ильин.* Оротрон с двухрядной периодической структурой диапазона 140 – 300 ГГц // РЭ. 2011. Т. 56. № 4. С. 454.
2. *Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.* Оротрон. : Патент РФ. Кл. H01J 25/00. № 115961. БИ. 2012. № 13.

ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗВИТАЯ КОАКСИАЛЬНАЯ 30-ГГЦ ЛОВ С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУМЕРНОЙ БРЭГГОВСКОЙ СТРУКТУРОЙ

*Н.С. Гинзбург, В.Ю. Заславский, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, Н.Ю. Песков,
А.С. Сергеев*

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В настоящее время рекордный (гигаваттный) уровень мощности излучения в микроволновом диапазоне достигнут в релятивистских черенковских генераторах. Дальнейшее повышение мощности в генераторах данного типа требует увеличения сверхразмерности пространства взаимодействия. Для решения проблемы обеспечения пространственной когерентности излучения в релятивистских мазерах со сверхразмерными электродинамическими системами было предложено [1] использование двумерной распределенной обратной связи (РОС), реализуемой с помощью двумерных брэгговских структур. К настоящему времени работоспособность нового механизма обратной связи подтверждена экспериментально в МСЭ планарной [2] и коак-

сиальной [3] геометрии, реализованных соответственно в ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и Стратклайдском университете (Глазго, Великобритания) при участии ИПФ РАН. Таким образом, представляется перспективным расширение сферы приложения двумерной РОС применительно к пространственно-развитым релятивистским черенковским генераторам [4].

Экспериментальные исследования коаксиальной ЛОВ проводились на основе термоэмиссионного ускорителя «Сатурн» 300 кВ / 300 А / 5 мкс (ИПФ РАН). Двумерная брэгговская структура была установлена с коллекторной стороны пространства взаимодействия на выходе замедляющей структуры. Согласно результатам моделирования, азимутальные волновые потоки, возникающие на двумерной брэгговской гофрировке, с учетом переизлучения в обратную волну обеспечивали синхронизацию излучения трубчатого РЭП большого диаметра и установление стационарного режима колебаний на основной азимутально-симметричной моде.

Проведенные эксперименты подтвердили перспективность использования двумерной РОС в черенковских генераторах. В соответствии с результатами теоретического анализа установка двумерного брэгговского синхронизатора в ЛОВ позволила реализовать стабильные узкополосные режимы генерации при поперечных размерах системы (периметре) $\sim 15\text{--}20$ длин волн в достаточно широкой области значений токов пучка. При оптимальном выборе параметров (ток пучка $\sim 70\text{--}80$ А) наблюдались устойчивые режимы узкополосной генерации с шириной спектра $\sim 5\text{--}10$ МГц и частотой генерации в районе 30,2 ГГц, лежащей в полосе отражения двумерной структуры. Мощность излучения по калориметрическим измерениям составляла до 1,5–2 МВт, что соответствовало КПД на уровне $\sim 5\%$. Возникновение многочастотных автомодуляционных режимов генерации наблюдалось при токах более 90 А.

1. Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S. // Optics Commun. 1994. V. 112. P. 151.
2. Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 87 (11). С. 715.
3. Konoplev I.V., Cross A.W., Phelps A.D.R. e.a. // Phys. Rev. E. 2007. V. 76. P. 056406.
4. Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Малкин А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36 (2). С. 77.

АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ УСИЛЕНИЯ И КОМПРЕССИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЭЛЕКТРОННЫМИ ПОТОКАМИ

Н.М. Рыскин¹, Н.С. Гинзбург², И.В. Зотова²

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

² Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В работе [1] впервые наблюдался эффект усиления ультракоротких микроволновых импульсов с одновременным укорочением их длительности при распространении вдоль квазистационарных электронных потоков. С использованием черенковского механизма усиления в 8-миллиметровом диапазоне экспериментально получены субгигаваттные импульсы уникально короткой длительности менее 100 пс. С общефизической точки зрения указанный эффект может рассматриваться в качестве классического аналога хорошо известных в оптике процессов когерентного усиления ультракоротких (в масштабе времен релаксации) лазерных импульсов при их распространении в активных (инвертированных) двухуровневых средах. При этом процесс распространения и усиления лазерных импульсов описывается хорошо известными автомоделными решениями (см., например, [2]). В настоящем докладе показано, что аналогичные автомоделные решения можно построить для случая взаимодействия ультракоротких электромагнитных импульсов со стационарными электронными потоками. Эффекты «самоподобного» усиления импульсов с одновременной компрессией носят достаточно универсальный характер и должны наблюдаться для различных механизмов индуцированного излучения (взаимодействие в условиях аномального эффекта Доплера, циклотронное, черенковское). Проводится сопоставление полученных аналитических решений с результатами численного моделирования.

1. Яландин М.И., Реутова А.Г., Ульмаскулов М.Р. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91, вып. 11. С. 620-625.
2. Лэм Дж. Введение в теорию солитонов. М. : Мир, 1983.

ЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ЧАСТОТОЙ И ФАЗОЙ, УПРАВЛЯЕМОЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

С.В. Кузиков, А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Управление частотой и фазой СВЧ-излучения является одной из основных задач вакуумной СВЧ-электроники. Один из путей ее решения основывается на использовании параметрического захвата частоты и фазы генератора СВЧ-излучения. В генераторе модулироваться может собственная частота резонатора. Модуляцию при этом предлагается осуществлять за счет эффекта индуцированной фотопроводимости при облучении полупроводника, помещенного в резонатор электронного источника, периодически лазерными импульсами. При этом происходит как быстрая модуляция потерь в резонаторе, т.е. периодическое изменение мнимой части собственной частоты резонатора, так и модуляции действительной части его частоты. Такой путь представляется наиболее перспективным применительно к уже существующим длинноимпульсным или непрерывным генераторам, таким как магнетрон, лампа обратной волны, гиротрон и другим. Модификации этих зарекомендовавших себя генераторов способны обеспечить управление фазой и частотой в пределах частотной полосы резонатора, определяемой его добротностью.

Другой путь решения проблемы состоит в модулировании тока или напряжения в антенне с активным полупроводниковым элементом, управляемым лазером, которая питает входной резонатор генератора клистронного типа. При частоте модуляции, близкой к собственной частоте входного резонатора клистрона, происходит периодическая модуляция пучка в относительно слабом поле антенны. Модуляция электронного пучка позволяет получить в выходном резонаторе клистрона более мощное излучение с управляемой в широкой полосе частотой и фазой.

СИНХРОННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ 4-МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВУХКАНАЛЬНОМ ПЛАНАРНОМ МСЭ

*А.В. Аржанников^{1,2}, П.В. Калинин^{1,2}, С.А. Кузнецов^{1,2}, С.Л. Силицкий^{1,2},
В.Д. Степанов^{1,2}, Н.С. Гинзбург³, Н.Ю. Песков³, А.С. Сергеев³,
В.Ю. Заславский³, М. Тумм⁴*

¹ Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

⁴ Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

В работе представлены результаты экспериментов по генерации мощных импульсов СВЧ-излучения в двухканальном планарном мазере на свободных электронах с двумя ленточными релятивистскими электронными пучками и резонатором, состоящим из двумерного и одномерного брэгговских рефлекторов. Благодаря двумерной распределенной обратной связи при большом поперечном сечении системы (2 канала с сечением 85×9,5 мм при длине волны 4 мм) на частоте 75 ГГц получена синхронная хорошо воспроизводимая узкополосная генерация с шириной спектра, близкой к естественной ширине, при выходной мощности около 50 МВт в импульсах с длительностью от 100 до 200 нс.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В КОРОТКОВОЛНОВЫХ НЕРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧЕРЕНКОВСКИХ ГЕНЕРАТОРАХ

А.Э. Федотов¹, В.Л. Братман¹, П.Б. Махалов¹, В.Н. Мануилов^{1,2}

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

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

Быстрое снижение непрерывной и средней мощности черенковских приборов миллиметрового диапазона при укорочении длины волны излучения вызвано в значительной степени осаждением электронного пучка на стенки замедляющей системы. Дело в том, что синхронно взаимодействующая с нерелятивистскими электронами медленная электромагнитная волна (или медленная пространственная гармоника) сильно прижата к поверхности периодической структуры, и поэтому для эффективного энергообмена электроны должны двигаться на очень малом расстоянии от ее стенки. Как правило, в приборах О-типа применяются тонкие нитевидные электронные пучки с очень большой плотностью тока, движущиеся в узких цилиндриче-

ских каналах. С увеличением частоты излучения рабочая плотность тока в пучках растет пропорционально квадрату частоты, а требуемое расстояние от границы пучка до стенки уменьшается. В результате в миллиметровом диапазоне величина ведущего магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, оказывается недостаточной для исключения осаждения электронов на замедляющую структуру, что ведет к сильному дополнительному нагреву ее тонких элементов. В данной работе рассматривается сравнительно простая возможность смягчения указанной трудности за счет использования полого тонкостенного трубчатого электронного пучка, распространяющегося в канале увеличенного сечения замедляющей системы. Трубчатые пучки широко используются в сильноточных релятивистских СВЧ-генераторах и усилителях, однако, по-видимому, не применялись или применялись недостаточно в традиционных слабoreлятивистских непрерывных приборах миллиметрового диапазона.

В развитие изложенной идеи рассмотрены возможности создания перспективных разновидностей генераторов, усилителей и умножителей частоты во всем миллиметровом диапазоне длин волн. В частности, для трехмиллиметрового диапазона детально рассчитаны и изготовлены два типа генераторов среднего уровня мощности – лампа обратной волны и оротрон – на основе трубчатого электронного пучка с ускоряющим напряжением 30 кВ и током 1 А. В качестве электродинамической системы генераторов рассматривается круглый волновод с прямоугольной или синусоидальной азимутально-симметричной гофрировкой стенок с рабочей модой TM_{01} . Для обоих типов приборов в расчетах продемонстрирована возможность получения одномодовой генерации с мощностью около 1 кВт в непрерывном режиме. На основе квази-пирсовской электронной пушки с дальнейшей компрессией электронного пучка в сходящемся магнитном поле разработана электронно-оптическая система, позволяющая сформировать необходимый электронный пучок с достаточно малым разбросом скоростей частиц и толщиной стенки 0,1 мм, который может транспортироваться в легко достижимом магнитном поле 7 кЭ на расстоянии 0,1 мм от гофрированной стенки. Подготовлен эксперимент по реализации ЛОВ и оротрона с трубчатым пучком.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 11-02-12146, 12-03-31722.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПИКОСЕКУНДНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

*Г.А. Месяц¹, В.В. Ростов², И.В. Романченко², М.Р. Ульмаскулов³,
К.А. Шарытов³, В.Г. Шпак³, С.А. Шунайлов³, М.И. Яландин³*

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

² Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

³ Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Для реализации синфазного возбуждения независимых релятивистских ЛОВ сантиметровых и миллиметровых волн токи сильноточных электронных пучков на входе пространства взаимодействия СВЧ-генераторов должны нарастать синхронно за время порядка сотен пикосекунд и менее. Для этого на катоды параллельных сильноточных электронных ускорителей нужно подавать идентичные крутые фронты ускоряющего напряжения, а стабильность развития взрывной эмиссии (ВЭЭ) должна быть пикосекундной. В докладе представлены экспериментальные данные о структурных изменениях фронта тока пучка при вариации условий инициирования ВЭЭ. Контролируемое опережающее развитие автоэлектронной эмиссии, инициирующей ВЭЭ, позволяет менять динамику нарастания фронта электронного пучка в процессе и после ускорения в вакуумном диоде. В приближении бесконечной эмиссионной способности катода дополнительное обострение фронта пучка по отношению к фронту напряжения зависит от соотношения длины ускоряющего промежутка, амплитуды ускоряющего импульса и его крутизны. При определенных условиях на фронте токового импульса возникает выделенный, лидирующий по времени пик (зарядовый сгусток), амплитуда которого увеличивается по мере транспортировки в дрейфовом пространстве, а скорость нарастания достигает не менее 10^{13} А/с. Предполагается привести сравнение экспериментальных данных с результатами численного PIC-моделирования.

Исследования проводились в рамках интеграционного проекта ИЭФ УрО РАН и ИСЭ СО РАН в соответствии с тематикой программы президиума РАН «Фундаментальные проблемы импульсной сильноточной электроники» и при поддержке РФФИ, гранты 11-02-00097а, 11-08-00176а и 12-08-00476а.

ПЕРЕСТРОЙКА ЧАСТОТЫ В ГИРОТРОНЕ С ЭШЕЛЕТНОЙ СТРУКТУРОЙ

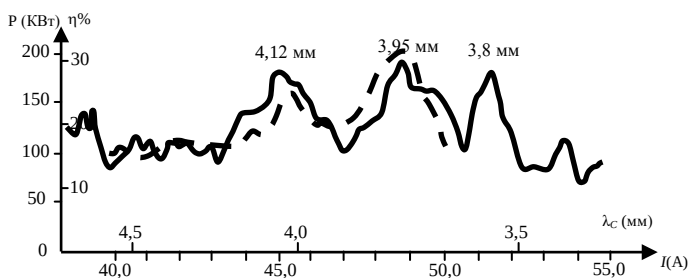
*Л.Н. Агапов, С.Д. Богданов, Н.П. Венедиктов, С.Н. Власов, Е.В. Копосова,
В.И. Курбатов, Е.А. Солдунова*

¹ ЗАО НПП ГИКОМ, Н. Новгород

² Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Гиротроны – вакуумные приборы миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн [1]. В этом сообщении обсуждаются возможности создания мощных гиротронов с электрической перестройкой частоты на основе использования эшелетных систем, обладающих не только высокими селективными свойствами, но и способностью понижать добротность мод до полного исчезновения резонансных свойств при сохранении структуры поля, обеспечивающей эффективное взаимодействие электромагнитного поля с электронным пучком.

Описывается гиротрон с эшелетным резонатором, в котором добротность рабочей моды была ниже дифракционно минимальной, и который перестраивался в широком диапазоне частот. Гиротрон исследовался в 4-мм длин волн в импульсном режиме. Зависимости мощности и КПД от величины тока $J_{\text{сол}}$ (А) (и соответствующей циклотронной длиной волны) в соленоиде, создающем магнитное поле, приведены на рисунке. Производились также измерения длины волны получаемого излучения. Полученные результаты [4,12 мм; 3,95 мм; 3,80 мм] также нанесены на график. Две кривые соответствуют двум положениям гиротрона относительно центра соленоида.



Зависимость мощности и КПД от тока соленоида
(длины волны циклотронной частоты)

Из приведенных результатов следует, что эшелетные системы обеспечивают возможность магнитной перестройки частоты гиротронов в достаточно широком диапазоне частот.

1. *Е. Запезалов.* Эволюция гиротронов // Радиофизика. 2011. Т. 54, Вып. 8/9. С. 559-572.

РАЗРАБОТКА ПЛАНАРНОГО ГИРОТРОНА С ПОПЕРЕЧНЫМ ВЫВОДОМ ЭНЕРГИИ И ЛЕНТОЧНЫМ ВИНТОВЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

*М.Ю. Глявин¹, И.В. Зотова¹, И.В. Железнов¹, С.А. Кишко², Н.С. Гинзбург¹,
В.Ю. Заславский¹, А.Н. Кулешов²*

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

² Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков, Украина

Наиболее мощными источниками электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах являются гиротроны, в которых в качестве электродинамических систем применяются цилиндрические резонаторы, имеющие дискретный набор собственных частот. Наиболее актуальными задачами развития гиротронов остаются повышение мощности и возможность плавной широкополосной перестройки частоты. Перестройка частоты может быть реализована с использованием двухзеркальных открытых резонаторов [1]. Другим вариантом, рассматриваемым в данной работе, является планарный гиротрон с ленточным электронным пучком и дифракционным выводом энергии перпендикулярно движению электронов [2]. Дополнительным преимуществом такой системы являются повышенная селективность рабочего типа колебаний, что позволяет использовать пространственно развитые системы с большим током и, соответственно, получать высокие мощности на высоких (вплоть до суб-ТГц) частотах.

В работе проведено моделирование планарного гиротрона на диапазон 70–80 ГГц. С этой целью предложена магнитная система типа соленоида с участком однородного магнитного поля длиной 60 мм. Планарная магнетронно-инжекторная пушка, формирующая ленточный винтовой электронный пучок, располагалась в адиабатически нарастающем магнитном поле на расстоянии порядка 120 мм от начала участка с однородным полем, что позволило для пучка мощностью 12 кВ·А получить пич-фактор 1,5–2. Сформированный ленточный электронный пучок с шириной 11 мм и толщиной порядка 1 мм возбуждал в планарном резонаторе длиной 50 мм одномодовую генерацию на частоте 75,4 ГГц при значении индукции магнитного поля 2,75 Тл. В результате моделирования найдены оптимальные параметры геометрии системы для проведения экспериментальных исследований параметров взаимодействия.

1. *И.И. Антаков и др.* // Электронная техника, СВЧ, 1975, 8, 20. (Серия Электроника).
2. N. Ginzburg, I. Zotova, A. Sergeev et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. **106**.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЗОНАТОРА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ГИРОТРОНА СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ НА ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКЕ ГИРОЧАСТОТЫ

Н.А. Завольский, В.Е. Запезалов, М.А. Мусеев

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Возможность работы на гармониках гирочастоты обычно представляет практический интерес при ограниченности доступной величины магнитного поля [1]. В этой связи рассматривается возможность создания гиротрона на третьей гармонике гирочастоты с магнитным полем около 1 Тл (например, для систем с постоянным магнитом) с рабочей частотой 82 ГГц и мощностью излучения 50–100 кВт для работы в непрерывном режиме. Рассматриваются различные варианты двухступенчатых и трехступенчатых резонаторов с трансформацией мод (СРТМ) [2]. Определяются возможности увеличения КПД при одноступенчатой рекуперации энергии электронного пучка. Исследуются ограничения, связанные с самовозбуждением паразитных мод. Определяется волновой состав излучения рабочей моды. Оцениваются возможности реализации (достижения) одномодового выходного излучения. Рассматривается целесообразность и возможность использования вариантов этих резонаторов при магнитных полях 5, 10, 20 Тл с соответствующим повышением рабочей частоты.

1. V. Bratman, M. Glyavin, T. Idehara, Yu. Kalynov, A. Luchinin, V. Manuilov, S. Mitsudo, I. Ogawa, T. Saito, Y. Tatematsu, V. Zapevalov. Review of Sub-Terahertz and Terahertz Gyrodevices at IAP RAS and FIR FU // Int. Journal IEEE Transactions on Plasma Science, 2009. Vol. 37, issue 1. P. 36-43.
2. Sh.E. Tsimring. Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics, Published by John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.

МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ГИРОТРОН-ГИРОКЛИСТРОН ДИАПАЗОНА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН С ВНЕШНЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

*Ю.М. Гузнов¹, Ю.Ю. Данилов¹, Н.И. Зайцев¹, С.В. Кузиков¹,
Ю.В. Новожилова¹, А.С. Шевченко¹, Рыскин Н.М.²*

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

² Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

Идея создания гироклистрона-генератора с внешней запаздывающей обратной связью (ЗОС) возникла давно [1, 2], однако практического воплощения ее до недавнего времени не было, поскольку в качестве рабочих ис-

пользовались только низшие аксиально-симметричные моды резонаторов TE_{01} и TE_{02} , сравнительно далеко отстоящие друг от друга по частоте. В гироклистроне на последовательности несимметричных мод высокого порядка [3] идея использования ЗОС становится более актуальной. Это связано, во-первых, с обострением проблемы селекции мод и, во-вторых, с перспективой создания источников излучения с быстрой перестройкой частоты при переключении с моды на моду.

В настоящей работе приведены результаты исследования двухрезонаторного гироклистрона с ЗОС на последовательности мод TE_{711} – TE_{731} . Эксперименты выполнялись на электронном микросекундном ускорителе с термокатодом «Сатурн F» (400 кэВ; 200А; 1 мкс; 0–10 Гц). Мультимегаваттное выходное излучение конвертировалось в волновой пучок с гауссовым распределением поля. Небольшая его часть (до 10 кВт) подавалась на вход гироклистрона. Селективным элементом ЗОС был ввод мощности, эффективно работавший только на модах TE_{61} ; TE_{71} и TE_{81} первого резонатора. Путем увеличения питч-фактора выходной резонатор переводился в режим автогенерации. При величине магнитного поля 1,638 Тл и выключенной ЗОС генерировалась мода TE_{54} , а включение ЗОС приводило к генерации моды TE_{73} , стартовый ток которой в отсутствие ЗОС был выше, чем для моды TE_{54} . Аналогично при магнитном поле 1,465 Тл в отсутствие ЗОС возбуждалась мода TE_{44} , а при включении ЗОС – мода TE_{73} . При настройке продольного магнитного поля на моду TE_{73} эта мода стартовала с задержкой, уменьшавшейся при увеличении глубины ЗОС.

Таким образом, экспериментально реализована идея применения ЗОС в гироклистроне, позволившая обеспечить селективное возбуждение заданной моды выходного резонатора и в перспективе пригодная для создания источников с быстрым переключением частоты.

1. *Ергаков В.С., Моисеев М.А.* Двухрезонаторный генератор с запаздывающей внешней обратной связью // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31, № 5. С. 962-967.
2. *Wu J.-Q.* Analyses of two-cavity gyroklystron with feedback // Int. J. Infrared Millim. Waves. 1987. Vol. 8, No. 8. P. 949-973.
3. *N.I. Zatsev, Yu. Yu. Danilov, A.K. Gvozdev, S.V. Kuzikov, M.A. Moiseev, M.I. Petelin, M.E. Plotkin and S.A. Zapevalov.* A Pulsed Multimegawatt Gyroklystron. Strong Microwaves in Plasmas. VIII Int. Workshop. Nizhny Novgorod, 2011. P. 140.

РАЗРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ 70 И 260 ГГц

*В.И. Белоусов, А.А. Вихарев, Г.Г. Денисов, В.В. Корчагин, А.В. Котов,
А.В. Кузин, М.Л. Кулыгин, Е.А. Новиков, М.А. Хозин*

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Одним из перспективных направлений электродинамики терагерцового диапазона частот является построение эффективных переключателей когерентного электромагнитного излучения. Современные требования по мощности, быстродействию и управляемости обуславливают регулярное появление новых переключающих устройств. Любой переключатель является нелинейным устройством, штатно работающим в весьма ограниченной области параметров питания и управления, расширение которой (грубость переключателя) представляет особую ценность. Типичный переключатель высокочастотного электромагнитного излучения представляет собой резонансную систему на основе отрезков волноводов с активным элементом из полупроводника, управляемого лазерным излучением (см. рисунок).



Внешний вид
типичного переключателя
терагерцового излучения

В недавних теоретических [1, 2] и экспериментальных [3, 4] работах была продемонстрирована возможность коммутации излучения с сохранением его когерентности, что было достигнуто управлением резонансными свойствами системы с помощью лазера.

Оптимизация и синтез геометрии переключателя осуществляется собственными программными средствами, использующими модификацию метода численного интегрирования уравнений Максвелла FDTD [5]. Создание и испытание прототипов переключателей на диапазон частот 70 и 260 ГГц производится в Институте прикладной физики РАН.

1. *Г.Г. Денисов и др.* // Изв. РАН, 2009. Т. 73, № 1. С. 98-102. (Серия Физическая).
2. *M.L. Kulygin et al.* // J. of IRMM and THz waves. 2012. Vol. 33, No. 6. P. 638-648.
3. *М.Л. Кулыгин и др.* // Письма в ЖТФ, 2011. Т. 37, № 8, С. 49-55.
4. *G.G. Denisov et al.* // J. of IRMM and THz waves. 2011. V. 32, No. 3. P. 343-357.
5. *Taflove A., Hagness S.* Comp. Electrodynamics: The FDTD method. London: AN, 2005.

ДВА РЕЖИМА РАБОТЫ ОРОТРОНА С ДВУХРЯДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ В ДИАПАЗОНАХ 108–215 ГГц И 108–135 ГГц

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

Фрязинский филиал
Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
г. Фрязино, Московская обл.

Проведены исследования возможности генерации в оротроне с двухрядной периодической структурой (ДПС) на её 2-й пространственной гармонике в диапазоне 200–250 ГГц. Задача оказалась нетривиальной. Решить её частично позволило введение фильтра верхних частот в ВЧ измерительный тракт. В результате в оротроне с ДПС, имеющей период 0,5 мм и отношение щели к периоду 0,25, получена генерация в диапазоне 108–215 ГГц при изменении напряжения от 2739 до 8418 В.

При увеличении напряжения до 9 кВ в приборе возбуждалась низкочастотная (105 ГГц) генерация на 1-й пространственной гармонике. Дальнейшее увеличение напряжения приводило к резкому росту генерируемой мощности (до 33 Вт). Исследование перестройки частоты генерации от 108 до 135 ГГц при изменении напряжения от 9150 В и выше показало, что в этом же приборе с одним электронным потоком имеет место генерация в 20 % полосе по уровню –5 дБ с выходной мощностью в десятки Ватт.

На основании полученных результатов сделаны выводы о возможных мерах по предотвращению низкочастотной (125 ГГц) генерации на 1-й пространственной гармонике и продвижению генерации на 2-й гармонике к высокочастотной границе желаемого диапазона (250 ГГц). Детали теоретических и экспериментальных исследований будут приведены в докладе.

Работа выполнена при частичной поддержке программы ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики».

ОРОТРОНЫ С ДВУХРЯДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С ШИРОКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПОТОКОМ

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

Фрязинский филиал
Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
г. Фрязино, Московская обл.

Проблема увеличения генерируемой мощности в терагерцовом диапазоне является актуальной, и один из возможных путей её решения в оротроне с двухрядной периодической структурой (ДПС), а именно, за счёт увеличения ширины плоского электронного потока до 3 и более радиусов каустики открытого резонатора (ОР), будет рассмотрен в этом докладе.

В работе [1] теоретически было показано, что в оротроне с ДПС с полусферическим открытым резонатором (ОР) сантиметрового диапазона волн ширину электронного потока (2С) можно увеличивать до 3 радиусов каустики (r_k), не уменьшая эффективности электронно-волнового взаимодействия. Но использование полусферического ОР в оротроне с ДПС в упомянутом ранее диапазоне не всегда возможно, так как приходится использовать длинные ДПС значительно больше $4r_k$. Поэтому в оротроне этого диапазона необходимо использовать ОР с фокусирующим зеркалом другой формы. Но, если распределение ВЧ-поля основного типа колебаний в ОР поперёк электронного потока имеет гауссов вид, то такое увеличение ширины электронного потока может быть возможно.

Эта возможность была впервые реализована экспериментально в оротроне диапазона 140–300 ГГц со сфероцилиндрическим фокусирующим зеркалом ОР, с образующей цилиндра, параллельной электронному потоку. Результаты экспериментов будут приведены в этом докладе.

Дальнейшее увеличение ширины электронного потока возможно только при условии, что это распределение будет иметь поперёк электронного потока достаточно длинный плоский участок. Как показано в работе [2], в качестве такого ОР может быть использован ОР с фокусирующим сфероцилиндрическим зеркалом, образующая цилиндра которого перпендикулярна направлению движения электронного потока. Но в оротроне с длинной ДПС, о которой говорилось выше, ОР с одним таким зеркалом использовать нельзя. Необходимо использовать многофокусное зеркало, образованное пересекающимися сфероцилиндрическими поверхностями со сдвигом друг относительно друга их фокальных осей [3]. Так как для длинной ДПС это зеркало выполнить с первого раза достаточно сложно, было решено остановиться на двух фокусном зеркале и короткой ДПС, для чего пришлось перенести эксперименты в 2-мм диапазон.

Результаты экспериментов будут приведены в этом докладе.

Работа выполнена при частичной поддержке программы ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики».

1. *Цейтлин М.Б., Мясин Е.А., Нутович Л.М.* Оптимизация параметров мощного оротрона сантиметрового диапазона длин волн с целью использования его для исследований плотной плазмы // *РиЭ*. 1990. Т. 35. № 11. С.2364.
2. *Русин Ф.С.* Оротрон: физические принципы, линейная теория, технический расчёт, экспериментальные исследования, конструкции и применение : Дис. ... д. ф.-м. н. 1984г. С. 29.
3. *Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю., Соловьев А.Н.* Оротрон. : патент РФ, кл. H01J 25/00. № 87830. БИ. 2009. № 29.

ГЕНЕРАЦИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫМИ АНТЕННАМИ НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ В КВАЗИОПТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

*В.Е. Любченко, Е.О. Юневич, В.И. Калинин, В.Д. Котов,
Д.Е. Радченко, С.А. Телегин*

Фрязинский филиал
Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
г. Фрязино, Московская обл.

Исследованы эффекты синхронизации микрополосковых антенн-генераторов (АГ) на полевых транзисторах электромагнитным полем, образованным в результате отражения излучения от полупрозрачного диэлектрического зеркала. Проведено компьютерное моделирование распределения интенсивности излучения и экспериментальное исследование на частотах до 20 ГГц возможности сложения в пространстве мощностей излучения АГ, расположенных на общей диэлектрической подложке в виде линейной и двумерной матрицы. Показано, что применение отражающего зеркала позволяет значительно увеличить полосу взаимной синхронизации АГ и обеспечивает возможность сложения мощностей в двумерной матрице.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДИАПАЗОНА 0,2 ТГц

*А.Г. Рожнев¹, Н.М. Рыскин¹, Т.А. Каретникова¹, Г.В. Торгашов²,
Н.И. Синицын², П.Д. Шалаев³, А.А. Бурцев³*

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

² Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН, Саратов

³ ОАО НПП «Алмаз», Саратов

В последние годы в области сверхвысокочастотной электроники особый интерес привлекает проблема освоения терагерцового (субмиллиметрового) диапазона. Исследования в этом направлении широко ведутся в США, Китае, Индии, Южной Корее, странах Европы. Различными научными коллективами были предложены миниатюрные аналоги классических приборов вакуумной электроники: ламп бегущей и обратной волны, отражательных клистронов, приборов со скрещенными полями и др. При создании подобных приборов естественным выглядит переход к пространственно развитым электродинамическим системам, которые позволяют использовать электронные пучки большой площади с реализуемыми значениями плотности тока. В частности, перспективными представляются приборы с ленточным электронным пучком и замедляющими системами (ЗС) типа плоской гребенки. В настоящем докладе приводятся результаты исследования замедляющей системы типа двоянной гребенки для усилителя диапазона 0,2 ТГц с выходной мощностью порядка 10 Вт.

На первом этапе проектирования ЛБВ разработана методика оперативного расчета параметров подобных ЗС, основанная на методе интегрального уравнения. Результаты хорошо согласуются с полученными при помощи программы трехмерного численного моделирования HFSS, основанной на методе конечных элементов. Было исследовано влияние различных факторов: периода структуры, высоты и толщины ламели, высоты канала и т.д. В итоге была определена геометрия системы, при которой она имеет ширину полосы пропускания не менее 50 ГГц при частоте отсечки 185 ГГц и сопротивление связи порядка 1 Ом на частоте 200 ГГц.

Разработаны экспериментальные макеты рассчитанной ЗС для исследования их параметров. Разработаны методики экспериментальных исследований макетов ЗС в диапазоне 0,2 ТГц с помощью анализаторов цепей в невакуумном состоянии и в составе откачанных образцов ЛБВ этого диапазона. Разработан и опробован технологический маршрут изготовления узлов ЗС. Начато экспериментальное производство и исследование технологии узлов ЗС с целью повышения механической прочности периодической структуры, точности изготовления ее элементов и снижения внутреннего затухания СВЧ-мощности в ЗС.

Предложены конструкция и технология электронно-оптической системы с ленточным пучком высокой плотности в пролетном канале малого поперечного сечения для данного прибора. Предложенная электронно-оптическая система отличается тем, что источником электронов служит катодно-сеточный узел с углеродным нанотрубным автоэмиссионным катодом. Проводятся экспериментальные исследования технологии изготовления автоэмиссионных катодов и катодно-сеточных узлов для повышения средней плотности автоэмиссионного тока с поверхности катода.

ЦИКЛОТРОННЫЙ МАЗЕР С БОЛЬШИМ СКОРОСТНЫМ РАЗБРОСОМ ЭЛЕКТРОНОВ

И.В. Бандуркин, А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Радикальным способом снижения омических потерь в коротковолновых мазерах на циклотронном резонансе является увеличение групповой скорости рабочей волны на всей длине резонатора. Как известно, возбуждение бегущих волн крайне критично к скоростному разбросу в пучке из-за связанного с ним доплеровского уширения полосы циклотронного резонанса. Однако возможна реализация нелинейного режима взаимодействия электронного пучка с двумя встречными бегущими волнами, когда происходит эффективный отбор энергии электронов в условиях комбинационного резонанса, аналогичного гиротронному, т. е. без доплеровской добавки к циклотронной частоте и, соответственно, без критичности к скоростному разбросу [1]. Более того, оказывается, что при достаточно большом разбросе, когда в пучке присутствуют электроны с очень малыми продольными скоростями (в квазимоноэнергетическом пучке такие частицы обладают еще и очень большими пичч-факторами, а значит, очень сильной связью с полем), «медленные» фракции электронного пучка могут вносить определяющий вклад в электронно-волновое взаимодействие, обеспечивая и в линейном режиме положительный инкремент даже для волн, весьма далеких от критических. При этом вследствие малой продольной скорости этих частиц доплеровская добавка близка к нулю и частота генерации совпадает с циклотронной частотой, т. е. условие циклотронного резонанса снова имеет гиротронный вид.

Важно, что электродинамическая система циклотронного мазера с большим скоростным разбросом не подразумевает наличия высокодобротного резонатора, что не только снижает роль тепловых потерь, но и позволяет осуществлять плавную перестройку частоты генерации путем изменения

магнитного поля. Вообще говоря, можно представить себе подобную систему вовсе без резонатора – в этом случае электромагнитные волны распространяются вдоль пучка и не требуют наличия направляющих стенок. Возможно, подобная система реализуется в магнитосфере Земли при циклотронном излучении частиц солнечного ветра. Известно, что это так называемое авроральное километровое излучение происходит точно на циклотронной частоте, при том что сам поток заряженных частиц имеет экстремально большой разброс по скоростям.

1. A.V. Savilov. Electron Cyclotron Maser Based on the Combination Two-Wave Resonance // Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 112, No. 9, P. 094509.

СЕЛЕКЦИЯ МОД В ГИРОТРОНЕ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ РЕЗОНАТОРА

Н.А. Завольский, М.И. Петелин, А.С. Седов, С.Е. Фильченков

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В настоящее время существует потребность в источниках когерентного излучения диапазона частот 0,2–1 ТГц с выходной мощностью порядка 10–200 Вт [1–3]. Наиболее подходящими источниками в данной области параметров сейчас являются гиротроны [4].

В связи со сложностью создания сильных постоянных магнитных полей, большинство гиротронов этого диапазона проектируются на гармониках гирочастоты. При этом из-за возрастающей конкуренции со стороны мод на первой гармонике гирочастоты приходится использовать сравнительно низкие рабочие моды. Таким образом, одной из задач, решаемых для данного класса гиротронов, является селективное возбуждение рабочей моды (на гармониках гирочастоты) при подавлении возбуждения паразитных мод на основной гирогармонике.

В данной работе предлагается принцип селекции, основанный на использовании осесимметричного гофрированного резонатора с плавно изменяющейся вдоль оси глубиной гофрировки.

Данный принцип заключается в следующем. Поверхность стенки резонатора аксиально-симметрична, а ее профиль вдоль оси гиротрона представляет периодическую структуру с медленно меняющейся амплитудой, т. е. фактически набор канавок, глубина которых медленно меняется вдоль оси резонатора. При этом ВЧ-поле проникает в канавки на некоторое расстояние, зависящее от частоты падающей на поверхность волны, причем чем

меньше частота волны, тем меньше данное расстояние. Это позволяет подобрать профиль огибающей таким образом, чтобы для рабочей моды на второй гармонике гирочастоты критическая частота не зависела от продольной координаты z , а для паразитной моды зависела. То есть если представить гофрированный резонатор в виде эквивалентного гладкого резонатора, то для рабочей моды он будет отрезком регулярного (цилиндрического) волновода, а для паразитной моды – нерегулярного волновода.

1. Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M. et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2004. V. 32, No. 1. P. 67.
2. T. Idehara, S. Mitsudo, M. Ui, I. Ogawa, M. Sato, and K. Kawahata. Development of frequency tunable gyrotrons in millimeter to submillimeter wave range for plasma diagnostics // J. Plasma Fusion Res. Series. 2000. Vol. 3. P. 407-410.
3. M.K. Hornstein; V.S. Bajaj, R.G. Griffin; and R.J. Temkin. Efficient low-voltage operation of a CW gyrotron oscillator at 233 GHz // IEEE Trans. On Plasma Science. Feb. 2007. Vol. 35 (1): P. 27-30.
4. Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore ; London : The Johns Hopkins University press. 2004.

ГЕНЕРАЦИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫМИ АНТЕННАМИ НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ В УСЛОВИЯХ СИНХРОНИЗАЦИИ ВНЕШНИМ СИГНАЛОМ

*В.Е. Любченко, Е.О. Юневич, В.И. Калинин, В.Д. Котов, Д.Е. Радченко,
С.А. Телегин*

Фрязинский филиал

Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,

г. Фрязино, Московская обл

Исследованы эффекты внешней синхронизации электромагнитным полем матрицы антенн-генераторов (АГ) на полевых транзисторах, интегрированных с логопериодической антенной. Показана возможность сложения в пространстве мощностей излучения АГ, расположенных на общей диэлектрической подложке в виде одномерной матрицы. Показано, что применение внешней синхронизации позволяет в несколько раз увеличить полосу синхронизации ансамбля независимых автогенераторов по сравнению со случаем взаимной синхронизации общим полем, распространяющимся в диэлектрической подложке.

ИСТОЧНИК СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДПЯ, РАБОТАЮЩИЙ В МАГНИТЕ ЯМР-СПЕКТРОМЕТРА

В.Л. Братман, Ю.К. Калынов, П.Б. Махалов, А.Э. Федотов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Одним из наиболее актуальных приложений для гиротронов субтерагерцового диапазона является динамическая поляризация ядер (ДПЯ) – метод повышения чувствительности спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Для современных ЯМР-спектрометров требуются стабильные источники излучения с частотой 260–650 ГГц и выходной мощностью 1–100 Вт. Для получения указанной сравнительно невысокой мощности гиротроны могут иметь небольшие напряжения и токи. Поэтому даже вместе с источниками питания они могли бы стать весьма компактными и доступными многим лабораториям приборами, если бы не необходимость использовать отдельный сверхпроводящий соленоид с сильным (9 Тл и выше) магнитным полем. В этой связи естественно попытаться использовать для работы гиротрона соленоид ЯМР-спектрометра.

Поскольку частота электронного парамагнитного резонанса, на которой осуществляется облучение образцов при ДПЯ, весьма близка к частоте циклотронного резонанса при той же величине магнитного поля, можно попробовать расположить гиротрон непосредственно в криомагните ЯМР-спектрометра, в свободном от образца и системы измерений пространстве. В данной работе рассмотрены особенности такого ультракомпактного гиротрона («гиротрино») с выходной мощностью 5–20 Вт. Проанализированы факторы, влияющие на точную подгонку частоты гиротрона к требуемой для ДПЯ частоте. Показано, что для этого резонатор гиротрона должен быть достаточно коротким (10–15 длин волн), а рабочее напряжение при этом может составлять 1–2 кВ. Для максимального приближения резонатора гиротрона к области сильного поля вблизи центра соленоида предложена конструкция гиротрона с выводом излучения с катодного конца резонатора. Альтернативным вариантом точной настройки частоты является использование дополнительной теплой катушки с величиной поля 0,2–1 % от поля соленоида, однако при этом требуется точная компенсация поля катушки в области, занимаемой исследуемым образцом. Поскольку коллектор прибора располагается в однородном магнитном поле, становится необходимой система рекуперации энергии отработанного электронного пучка. Благодаря этому КПД гиротрона оказывается сравнительно высоким, несмотря на низкие рабочее напряжение и ток и небольшую длину резонатора.

Наряду с гиротроном, рассмотрена возможность установки в криомагнит ЯМР-спектрометра прибора О-типа – лампы обратной волны (ЛОВ) с трубчатым электронным пучком. В отличие от гиротронов в черенковских генераторах магнитное поле используется только для проведения пучка, что

позволяет свободно перестраивать частоту излучения. Благодаря очень высокому ведущему полю КПД ЛОВ может быть приближен к теоретическому пределу, что обычно недостижимо для черенковских устройств субтерагерцового диапазона. Тем не менее для получения выходной мощности в несколько ватт требуется заметно бо́льшая энергия электронного пучка, чем для гиротрона, что усложняет реализацию коллектора. Рассчитана ЛОВ с выходной мощностью около 10 Вт при рабочем напряжении 15 кВ и токе 0,2 А.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 11-02-12146, 12-03-31722.

ВЛИЯНИЕ ОТРАЖЕНИЙ НА ПРОЦЕССЫ КОНКУРЕНЦИИ МОД В ГИРОТРОНЕ

*Н.М. Рыскин¹, С.А. Усачева¹, М.М. Чумакова¹, М.Ю. Глявин²,
Ю.В. Новожилова²*

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

² Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Хорошо известно, что отражение излучения от удаленной нагрузки может существенно повлиять на режимы генерации различных электронных мазеров, в частности гиротронов. Это могут быть, в частности, отражения от выходного окна или отражения от плазмы в установках электронно-циклотронного нагрева. В большинстве работ, посвященных обсуждению этого вопроса, приводятся результаты численных расчетов для какого-либо конкретного прибора. В нашей работе [1] была исследована обобщенная модель генератора с отражением от нагрузки, для которой были проанализированы условия устойчивости стационарных состояний и переходные процессы в типичных для гиротронов условиях большого запаздывания и малого коэффициента отражения. Однако, поскольку гиротроны являются приборами с пространственно развитыми многомодовыми колебательными системами, представляет интерес исследованная в данном докладе задача о конкуренции мод в гиротроне с отражениями. Используется известная квазилинейная модель двухмодового гиротрона [2]

$$\dot{A}_1 = \left(\sigma_1 - \beta_1 |A_1|^2 - \gamma_1 |A_2|^2 \right) A_1 + \rho_1 e^{-i\psi_1} A_1(t - \tau), \quad (1)$$

$$\dot{A}_2 = q \left(\sigma_2 - \beta_2 |A_2|^2 - \gamma_2 |A_1|^2 \right) A_2 + \rho_2 e^{-i\psi_2} A_2(t - \tau), \quad (2)$$

в рамках которой нелинейная комплексная восприимчивость определяется с точностью до кубических членов.

Показано, что характер конкуренции мод может меняться в зависимости от коэффициента отражения: возможны переходы от генерации одной моды к генерации другой моды или к двухмодовой генерации. Также обсуждается возбуждение моды встречного вращения при отражениях от выходного окна или нагрузки в гиротроне со встроенным козырьковым квазиоптическим преобразователем мод (см., например, [3]).

1. Новожилова Ю.В., Рыскин Н.М., Усачева С.А. Нестационарные процессы в генераторе с запаздывающим отражением от нагрузки // ЖТФ. 2011. Т. 81, № 9. С. 16.
2. Нусинович Г.С. Теория многомодового гиротрона // Гиротрон. Горький : ИПФ АН СССР, 1981. С. 146.
3. Dumbrajs O., Nusinovich G.S., Piosczyk B. Reflections in gyrotrons with radial output : Consequences for the ITER coaxial gyrotron // Phys. Plasmas. 2004. V. 11, N. 12. P. 5423.

**ПРИЕМНИКИ
МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,
СПЕКТРОСКОПИЯ И МЕТРОЛОГИЯ**

ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В РАЗРАБОТКЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ И ДЕТЕКТОРОВ НА ЭЛЕКТРОННОМ РАЗОГРЕВЕ В СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНКАХ NbN

*Г.Н. Гольцман, М.И. Финкель, С.А. Рябчун, И.В. Третьяков,
Д.В. Петренко, Н.С. Каурова, Б.М. Воронов*

Московский государственный педагогический университет, Москва

В настоящее время нами разработано новое поколение сверхпроводниковых детекторов: сверхпроводниковые терагерцовые смесители, детекторы и счетчики фотонов на эффекте электронного разогрева в тонких пленках NbN. Такие приемники уже продемонстрировали рекордные характеристики, что делает их привлекательными для многих терагерцовых и оптических применений.

Сверхпроводниковый терагерцовый смеситель (НЕВ) на эффекте электронного разогрева в пленках NbN может работать либо в режиме прямого детектирования, либо как смеситель. На частотах выше 1 ТГц NbN НЕВ-смесители превышают по своим характеристикам туннельный переход сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (SIS) и диоды Шоттки.

Новое поколение НЕВ-смесителей на основе сверхтонких пленок NbN сочетает в себе лучшую чувствительность на частотах выше 1 ТГц и более широкую полосу преобразования, в настоящее время до 6 ТГц. В докладе представлены результаты измерений шумовой температуры и полосы преобразования NbN образцов с длиной чувствительного мостика 0,12 и 0,35 мкм при разных уровнях мощности гетеродина на частоте 2,5 ТГц. Лучшее полученное значение – 600 К (5hv/k) – является рекордным. По этой причине делается выбор этих устройств в качестве основы терагерцовых приемников в инструментах для астрономических и атмосферных исследований.

НЕВ-детекторы, работающие в режиме прямого детектирования, демонстрируют время отклика порядка 50 пс и эквивалентную мощность шума (NEP) $3 \cdot 10^{-13}$ Вт·Гц^{-1/2}. НЕВ-детекторы уже перешли в стадию коммерциализации и активно используются в качестве основы терагерцовых приемников в инструментах для астрономических и атмосферных исследований, спектроскопии материалов и биологических структур, исследовании терагерцовых источников.

ОБСЕРВАТОРИЯ «МИЛЛИМЕТРОН»

А.В. Смирнов, Н.С. Кардашев

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

Многие вопросы современной астрономии и астрофизики, основным из которых является тайна происхождения и формирования Вселенной, требуют для своего решения создания уникальных по своим технологическим возможностям и требованиям астрофизических инструментов наблюдений. В конце XX и в начале XXI века было сделано существенное продвижение радиоастрономических исследований в недоступный ранее терагерцовый (ТГц) диапазон частот. Сегодня уже никто не сомневается в важности данного шага, поскольку данный диапазон представляет огромный интерес в различных аспектах астрономии и астрофизики. Несмотря на развитие технологической базы, физические и технологические ограничения, возникающие при построении антенн с большой входной апертурой, продолжают существовать и сегодня. Наиболее интересным альтернативным путем для увеличения входной апертуры является построение интерферометров как наземного (VLBA, EVLA, SMA, ALMA), так и космического базирования (VSOP, Радиоастрон), что позволяет достичь лучших угловых разрешений и чувствительности. Для регистрации предельно слабых сигналов, не наблюдаемых с поверхности Земли в силу значительного атмосферного поглощения в ТГц-диапазоне частот, антенны телескопов выносятся за пределы земной атмосферы – обсерватории космического базирования (IRAS, ISO, Spitzer, AKARI, WMAP, Herschel, Planck и др.).

Проект «Спектр-М» направлен на разработку, создание, запуск и эксплуатацию космической обсерватории «Миллиметронтрон» со сверхвысокой чувствительностью в миллиметровом, субмиллиметровом и дальнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра и беспрецедентным угловым разрешением.

ПРИЕМНЫЙ КОМПЛЕКС ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН»

*А.М. Барышев¹, W. Jellema¹, А.В. Смирнов², Н. Мышенкова², В.Ф. Вдовин³,
Г.Н. Гольцман⁴, С. Лухачев², Н.С. Кардашев², P. De Bernardis⁵*

¹ Институт космических исследований (SRON), Гронинген, Нидерланды

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

³ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

⁴ Московский педагогический государственный университет, Москва

⁵ Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma, Roma, Italy

«Миллиметрон» (Спектрум-М) – космическая обсерватория, разрабатываемая в АКЦ ФИАН для астрономических наблюдений в мм, субмм и терагерцовом диапазонах. Основой телескопа «Миллиметрон» является охлаждаемое зеркало диаметром 10 м, которое раскрывается в космосе после запуска обсерватории на орбиту. Предполагается достичь температуры основного зеркала менее 30 К. Инструментальный комплекс «Миллиметрона» порывает частотный диапазон от 18 ГГц до ~6 ТГц и позволяет решать задачи как радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) земля – космос, так и одиночных наблюдений источников сверхмалой интенсивности. Для достижения требуемой чувствительности приборы охлаждаются до 4 К и ниже машиной замкнутого цикла.

Приборный комплекс обсерватории условно можно разделить на четыре части: спектрометр высокого спектрального разрешения, спектрометр-поляриметр субмм-диапазона, спектрометр среднего разрешения ТГц-диапазона и приборы системы РСДБ.

В данном докладе будут рассмотрены предварительные характеристики дизайн и расположение приборов в криоконтейнере, а также рассчитаны предельные параметры чувствительности приемного комплекса.

ПРИЕМНИКИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА «МИЛЛИМЕТРОН» ДИАПАЗОНОВ 18–26, 31–45, 84–116 ГГц

С.Ю. Турыгин

Специальное конструкторское бюро Института радиотехники и электроники РАН,
г. Фрязино, Московская обл.

Приёмники должны работать в космическом плече интерферометра со сверхдлинной базой – до 1,2 млн. км, иметь предельно низкие шумовые температуры, минимально возможные фазовые шумы коэффициента передачи и довольно большие выходные информационные потоки. Главные це-

левые параметры приёмников примерно такие: шумовые температуры 5 К для первого диапазона, 10 К для второго и 20 К для третьего; фазовые шумы коэффициента передачи меньше одного градуса; максимальные выходные информационные потоки по 64 Гбит/с от каждого. Все приёмники одновременно принимают две линейные ортогональные поляризации входного сигнала.

Обсуждаемые здесь приёмники не все, что должны работать на телескопе, т.е. приёмников сравнительно много, поэтому предполагается унифицировать максимально возможное количество узлов. Аналогичная задача решалась при проектировании радиотелескопа ALMA в Чили, поэтому предполагается последовать их примеру.

Все приёмники будут преобразовывать входные сигналы в полосу частот 8 ГГц – от 4 до 12 ГГц (второй и третий с перестройкой гетеродинов). Одновременная работа более чем одного приёмника вряд ли возможна, поэтому общая часть для всех приёмников предполагается одна и будет выполнять следующие операции:

- Преобразование полосы частот от 4 до 12 ГГц в четыре полосы от 2 до 4 ГГц для каждой поляризации с помощью квадратурных смесителей. При одновременном использовании верхней и нижней боковых полос достаточно двух смесителей (в каждой поляризации) с гетеродинами на частотах 6 и 10 ГГц.

- Каждая из четырёх полос будет одновременно оцифровываться с помощью четырёх АЦП (в каждой поляризации), работающих со скоростью 4 Гигаотсчёта в секунду. Таким образом, всего одновременно будут работать 8 АЦП с общей синхронизацией с точностью 40 фс (джиттер). Разрядность АЦП обсуждается.

- Выходные цифровые данные будут складываться в 8 банков памяти. Объём памяти будет определён в процессе разработки.

Входные части приёмников строятся аналогично тому, как это сделано для телескопа ALMA.

Приёмник 18–26 ГГц. На входе приёмника – скалярный рупор (скорее всего, квадратного сечения для лучшей развязки между поляризациями и сложным профилем стенок вдоль оси для обеспечения независимости ширины диаграммы от частоты и для смещения координаты перетяжки в «фокус» антенной системы, зависящий от частоты), далее следует разделитель поляризаций. Выходы разделителя поляризаций подсоединяются к МШУ через волноводные направленные ответвители (калибратор), через которые на входы МШУ подаются калибровочные и тестовые сигналы. Возможно, МШУ будет разделён на две части – входную, работающую при температуре 4 К, и выходную, работающую при более высокой температуре 50–60–80 К, что может понадобиться для экономии «холода». Выходы МШУ по коаксиальным кабелям через теплоизолирующие участки (коаксиальные) подаются на преобразователи. Используя гетеродин на частоте 14 ГГц, в одно преобразование получаем выходную полосу 4–12 ГГц.

Приёмник 31–45 ГГц. Входная часть этого приёмника аналогична предыдущему: скалярный рупор, разделитель поляризаций, калибратор, МШУ при 4 К, МШУ при 60 К. Для переноса входного сигнала в полосу 4–12 ГГц применяется двухступенчатое преобразование. Входная полоса больше 8 ГГц, поэтому в первом преобразователе гетеродин переключается на частоту 25 ГГц или 31 ГГц, перенося полосу 31–39 ГГц или 37–45 ГГц в первую полосу ПЧ 6–14 ГГц. Второе преобразование смещает полосу 6–14 ГГц в полосу 4–12 ГГц с гетеродином на частоте 2 ГГц. Второе преобразование возможно при разрядности АЦП до 6 включительно (предполагаемая разрядность АЦП будет не выше).

Приёмник 84–116 ГГц. Проектируется два варианта приёмников: с SIS-смесителем на входе и МШУ на НЕМТ на входе. Входы обоих приёмников строятся одинаково: скалярный рупор, разделитель поляризаций, калибратор, а далее или смеситель на SIS или МШУ на НЕМТ.

Приёмник 84–116 ГГц с SIS-смесителем на входе. Приёмник строится по схеме с одним преобразованием и квадратурным смесителем, разделяющим верхнюю и нижнюю боковые полосы. Применение переключаемого гетеродина с частотами 92 и 108 ГГц позволяет перекрыть всю необходимую полосу частот. Один из умножителей в канале гетеродина устанавливается «в холоде» на панели с температурой 60 К.

Приёмник 84–116 ГГц с МШУ на НЕМТ на входе. Большим преимуществом транзисторных МШУ по сравнению SIS-смесителем на входе в случае космического применения, где запас «холода» быстро кончается, является то, что транзисторы работают при любой температуре. Для унификации узлов предполагается использовать тёплую часть приёмника 31–45 ГГц, а на входе использовать преобразователь. Необходимая входная полоса приёмника 32 ГГц больше двух полос приёмника 31–45 ГГц, поэтому для перекрытия всей входной полосы в преобразователе применяются три переключаемые частоты гетеродина 53, 62 и 71 ГГц.

Гетеродинная система приёмников. Плавная перестройка частот гетеродинов не требуется (и вряд ли вообще возможна), поэтому можно обойтись набором фиксированных частот. С учётом того, что фазовые шумы гетеродинов должны быть минимальными основным кандидатом на ГУН синтезаторов, предполагается генератор с дисковым диэлектрическим резонатором из монокристалла сапфира, работающим на моде «шепчущая галерея» высокого порядка. Конкретные частоты гетеродинов формируются с помощью умножителей, смесителей, фильтров и усилителей.

ТЕРАГЕРЦОВЫЙ РЕЗОНАТОРНЫЙ СПЕКТРОМЕТР

В.В. Паришин, М.А. Кошелев, Е.А. Серов, М.Ю. Третьяков

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Резонаторные (резонансные) методы исследований благодаря высочайшей чувствительности, недостижимой другими методами, широко применяются для прецизионных спектроскопических измерений во всех частотных диапазонах. Причем каждый диапазон имеет свои характерные особенности построения резонансных устройств. В мм и субмм-диапазонах для исследования газов и конденсированных сред в основном применяются варианты классического открытого резонатора Фабри – Перо с добротностью (при разумных размерах) $\sim 10^6$.

Продвижение в субмм-диапазон потребовало кардинального изменения как систем возбуждения резонатора и регистрации его сигнала, так и системы стабилизации частоты. Весь тракт передачи электромагнитной волны выполнен на квазиоптических элементах, а для регистрации сигнала применён охлаждаемый болометр, который обеспечил отношение сигнала к шуму при записи отклика резонатора ~ 1000 и более.

В системе стабилизации частоты источника излучения применён активный умножитель частоты сигнала синтезатора с выходной частотой в диапазоне 75–110 ГГц, что позволило понизить номер рабочей гармоники в смесителе-умножителе до 4–5 и обеспечить устойчивую и, что принципиально, бесподстроечную работу системы ФАПЧ во всём диапазоне от 350 до 520 ГГц.

Проведенные исследования поглощения в образцах MPCVD-алмазов подтвердили, что даже в современных «улучшенных» образцах основным механизмом поглощения в субмм-диапазоне является рассеяние излучения на внутренних дефектах структуры MPCVD-алмазов.

Анализ непрерывных широкодиапазонных записей спектров основных атмосферных газов – азота и кислорода в смеси с водяным паром при атмосферном давлении, а также спектра реальной лабораторной атмосферы наглядно продемонстрировал высокую чувствительность и аналитическую способность спектрометра.

КРИОГЕННЫЙ РЕЗОНАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОВ И ПОКРЫТИЙ В МИЛЛИМЕТРОВOM И СУБМИЛЛИМЕТРОВOM ДИАПАЗОНЕ

Е.А. Серов, В.Ф. Вдовин, В.В. Паршин, Г.М. Бубнов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Резонаторный спектрометр, разработанный в ИПФ РАН, является прецизионным инструментом для исследования отражающей способности металлов и покрытий, в том числе антенн и тепловых экранов, используемых в космических аппаратах [1–3]. До недавнего времени диапазон температур, в котором могла быть исследована отражательная способность образцов с помощью резонаторного спектрометра, был ограничен снизу температурой кипения азота. При этой температуре уже заметно отличие экспериментально измеренной отражательной способности от расчета, выполненного на основе теории нормального скин-эффекта, но нельзя достоверно определить значение коэффициента отражения при $T \rightarrow 0$ К, что необходимо, например, для расчета характеристик охлаждаемых приемников. Очевидно, что у реального образца коэффициент отражения по мощности будет меньше по сравнению с расчетным значением для идеального металла. Конкретное значение коэффициента отражения зависит от химического состава образца и характеристик его поверхности (шероховатости, наличия структуры или выделенного направления).

В 2012 г. на базе резонаторного спектрометра был создан криогенный резонаторный комплекс, что позволило исследовать отражающие свойства металлов и покрытий при температурах вплоть до нескольких градусов Кельвина. Выполнены исследования металлизированных пленок с различной толщиной металлического слоя для тепловых экранов космической обсерватории «Миллиметрон» в диапазоне температур от 8 К до комнатной. Наименьшими потерями на отражение обладают образцы с толщиной металлического слоя более 150 нм. Впервые в мм-диапазоне исследована температурная зависимость отражательной способности чистых металлов (Cu, Al) вплоть до 8 К. Полученные результаты важны для расчета характеристик охлаждаемых приемных антенн мм и субмм диапазона.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ по постановлению Правительства РФ № 220 (договор № 11.G34.31.0029).

1. *Vladimir Parshin, C.G.M. van't Klooster, E.A. Serov. Antenna Reflectors Reflectivity at 100–350 GHz and 80 K // Proceedings of 30th ESA Antenna Workshop on Antennas for Earth Observation, Science, Telecommunication and Navigation Space Missions. ESA/ESTEC Noordwijk, The Netherlands, May 27–30, 2008. P. 353–357.*

2. Vladimir Parshin, Evgeny Serov, C.G.M. van 't Klooster, Paolo Noschese. Resonator technique for reflectivity measurements. Results for measurements at high temperatures // Proc. 5th ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications & 31st ESA Antenna Workshop. ESTEC, The Netherlands, 2009. P. 593-600.
3. V.V. Parshin, E.A. Serov, C.G.M. van't Klooster. Precise Measurements of Materials and Media in the mm/sub-mm Ranges // Proc. 6th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2012), Prague, Czech Republic, 2012. CM01.9.

О ПРИРОДЕ РАСЩЕПЛЕНИЯ УРОВНЕЙ Е-МЕТАНОЛА

С.П. Белов, А.В. Буренин, Г.Ю. Голубятников, А.В. Лапинов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Хорошо известно, что в молекуле метанола CH_3OH ярко выражено торсионное движение метильного волчка CH_3 относительно плоскости CON . Это нежесткое движение связывает три энергетически эквивалентные равновесные конфигурации. В результате каждый вращательный уровень молекулы CH_3OH расщепляется на два подуровня: невырожденный (А-метанол) и дважды вырожденный (Е-метанол). Принципиально важно, что вырождение Е-типа не может быть снято никакими возмущениями, поскольку оно связано с тождественностью ядер Н, входящих в CH_3 -волчок. Исследование спектра метанола с помощью субдоплеровского микроволнового спектрометра [1] показало, что для вращательных переходов между уровнями Е-метанола наблюдаются небольшие дополнительные расщепления в виде дублетов величиной ~ 40 кГц. В то же время в А-метаноле таких дублетов не обнаружено. Естественно, возникает вопрос о природе наблюдаемых для Е-метанола дублетов.

Предварительный теоретический анализ экспериментальных данных показывает, что, скорее всего, наблюдаемые дополнительные расщепления являются следствием нового нежесткого движения в молекуле метанола, которое расщепляет инверсионные дублеты (уровни с разным поведением относительно операции пространственной инверсии). Здесь важно, что для А-метанола одна из компонент инверсионного дублета запрещена принципом Паули. Естественно, что в отличие от торсионного движения инверсионному движению в молекуле метанола отвечает достаточно большой потенциальный барьер. Поэтому связанные с ним эффекты малы и ранее не наблюдались и не обсуждались, несмотря на огромное число публикаций, посвященных исследованию вращательного спектра метанола. Существенную роль в данной интерпретации дополнительных расщеплений имеет тот факт, что построенное на основе методов цепочки групп симметрии [2] описание внутренней динамики молекулы CH_3OH с учетом торсионного и ин-

версионного движений правильно передает качественные особенности наблюдаемого спектра.

В докладе будут приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований дополнительного расщепления вращательных переходов молекулы метанола CH_3OH в основном торсионно-колебательном состоянии.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-02-00435-а и 11-02-12284-офи-м, программы ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 8421, по направлению «Физика, астрономия».

1. *Belov S.P., Golubyatnikov G.Yu., Leonov I.I., Lapinov A.V.* MM and sub-MM high resolution Lamb-dip spectrometer // 17 International Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy (HighRus), July 2-7, 2012, Zelenogorsk, Leningrad region, Russia. P1. P.121.
2. *Буренин А.В.* Симметрия квантовой внутримолекулярной динамики. 3-изд. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2012. 416 с.

ПРЕЦИЗИОННЫЙ СУБДОПЛЕРОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ПРОВАЛА ЛЭМБА

С.П. Белов, Г.Ю. Голубятников, И.И. Леонов, А.В. Лапинов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В настоящее время наиболее точные вторичные стандарты частоты для радиоастрономических измерений созданы на основе прецизионных лабораторных измерений частот вращательных переходов молекул $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ [1], $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ [2], OCS [3], сделанных с помощью метода провала Лэмба. Этот относительно простой метод нелинейной когерентной спектроскопии обладает рядом достоинств и позволяет при комнатной температуре получать узкие резонансы внутри доплеровского контура спектральных линий и измерять их частоты с высокой точностью в широком диапазоне частот.

В докладе будут представлены блок-схема недавно созданного в ИПФ РАН прецизионного субдоплеровского спектрометра мм и субмм-диапазонов длин волн, использующего эффект провала Лэмба; показаны записи провалов Лэмба на спектральных линиях астрофизически важных молекул (CO , OCS, HNC O , CH_3OH , HC_3N), а также; обсуждены параметры спектрометра, включая разрешение и точность измерений абсолютных частот молекулярных переходов. Спектрометр предназначен для обеспечения точными

экспериментальными данными исследований в области радиоастрономии и молекулярной спектроскопии, в частности работ по поиску вариации отношения массы протона к массе электрона в зависимости от времени и места во Вселенной [4, 5].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-02-00435-а и 11-02-12284-офи-м, программы ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 8421, по направлению «Физика, астрономия».

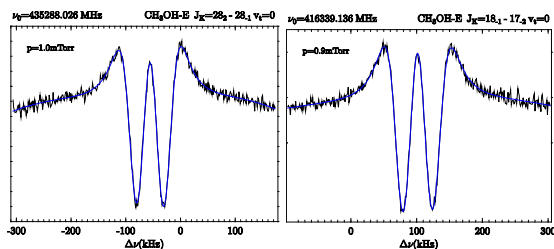
1. G. Winnewisser, S. P. Belov, Th. Klaus, R. Schieder // J. Mol. Spectrosc., 1997, **184**, 468-473.
2. G. Cazzoli, C. Puzzarini, A.V. Lapinov // Astrophys. J., 2003, **592**, L95-L98.
3. G. Yu. Golubiatnikov, A. V. Lapinov, A. Guarnieri and R. Knöchel // J. Mol. Spectrosc., 2005, **234**, 190.
4. P. Jansen, I. Kleiner, L.-H. Xu, W. Ubachs, H. L. Bethlem // Phys. Rev. A 2011, **84**, 062505-12.
5. S. A. Levshakov, M. G. Kozlov, and D. Reimers // Astrophys. J., 2011, **738**, 26.

СУБДОПЛЕРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОРСИОННО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО СПЕКТРА МЕТАНОЛА

Г.Ю. Голубятников, С.П. Белов, А.В. Лапинов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

На основе прецизионных лабораторных измерений при помощи созданного субдоплеровского спектрометра выполнены исследования торсионно-вращательного спектра метанола в диапазоне 48–510 ГГц с точностью на 1–2 порядка выше в сравнении с данными, опубликованными другими авторами. Практически все измеренные частоты получены на основе провала Лэмба и имеют характерные ошибки на уровне или меньше 1 кГц. Полученные данные включают в себя измерения свыше 500 переходов CH_3OH в основном торсионном состоянии, 200 переходов в первом возбужденном торсионном состоянии и 100 переходов во втором торсионном состоянии. Впервые измерено расщепление торсионно-вращательных переходов b-типа, связанное со снятием вырождения в Е-метаноле как в основном, так и в возбужденном состояниях, а также в А-метаноле, начиная с первого возбужденного состояния. Выполненные исследования представляют большой интерес как для понимания характера торсионно-вращательных движений в молекулах вообще, так и для дальнейшего использования измеренных частот переходов при изучении физических условий в областях звездообразования и высокоточных исследованиях вариаций фундаментальных констант [1, 2].



Примеры субдоплеровских измерений на второй гармонике частоты модуляции торсионно-вращательных переходов b-типа и их аппроксимации методом наименьших квадратов, показывающие снятие вырождения в Е-метаноле

Типичные спектры торсионно-вращательных переходов b-типа, демонстрирующие снятие вырождения для основного состояния Е-метанола, приведены на рисунке. Тот факт, что для обоих переходов центр линий смещен из нуля на величину, близкую к 100 кГц, говорит о величине ошибки частот, предсказанных на основе традиционной спектроскопии [3].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-02-00435-а и 11-02-12284-офи-м, программы ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 8421, по направлению «Физика, астрономия».

1. P. Jansen, I. Kleiner, L.-H. Xu et al. // Phys.Rev. 2011, A84, 062505.
2. S.A. Levshakov, M.G. Kozlov, and D. Reimers // ApJ 2011, 738: 26.
3. L.-H. Xu, J. Fisher, R.M. Lees et al. // J. Molec. Spectrosc. 2008, 251, 305.

СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР СО СВЕРХТОНКИМИ СЛОЯМИ $\text{LaNiO}_3/\text{LaAlO}_3$

Е.С. Жукова^{1,2}, А.С. Прохоров^{1,2}, А.А. Борис^{1,2,3}, А.В. Борис⁴,
Б.П. Горшунгов^{1,2}, М. Lafkioti⁴, Y. Matiks⁴, E. Benckiser⁴, G. Cristiani⁴,
H.-U. Habermeier⁴, J.H. Smet⁴, B. Keimer⁴

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

² Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный, Московская обл.

³ Department of Physics, Stockholm University, AlbaNova University Center, Stockholm,
Sweden

⁴ Max-Planck-Institut f"ur Festk"orperforschung, Stuttgart, Germany

Гетероструктуры на основе никелатов – уникальные объекты, физическими свойствами которых можно управлять с помощью изменения внешних воздействий и размерности электронного конденсата. Особый ин-

терес и в фундаментальном, и в прикладном отношении представляет возможность управления фазовыми переходами типа металл – диэлектрик и парамагнетик – антиферромагнетик. Реализация такой возможности в практическом отношении предоставит возможность конструирования нового поколения электронных приборов, использующих свойства не только «массивных» (bulk) полупроводников, но также и интерфейсов (наборов интерфейсов) между ними; это позволит значительно увеличить функциональность и уменьшить стоимость конечных продуктов. Такая перспектива стимулирует исследования фундаментальных свойств гетероструктур. Современные технические возможности позволяют синтезировать гетероструктуры чрезвычайно высокого качества, содержащие оксиды переходных металлов в виде *тончайших слоев с атомарно точной последовательностью*. Фазовые переходы в подобных системах могут сопровождаться особенностями, проявляющимися в электродинамическом отклике на энергиях порядка нескольких миллиэлектрон-вольт (субмиллиметровые волны). На сегодняшний день экспериментальных данных по такому низкоэнергетическому электродинамическому отклику гетероструктур на основе переходных металлов в литературе нет, чем и обусловлена актуальность настоящих исследований.

Нами выполнены первые измерения субмиллиметровых спектров динамической проводимости гетероструктур $\text{LaNiO}_3/\text{LaAlO}_3$, выращенных на монокристаллических подложках LaSrAlO_4 , в диапазоне частот от 200 до 1200 ГГц, при температурах от 5 до 300 К и в магнитных полях до 8 Тл. Гетероструктуры состояли из слоев с толщинами от двух до пяти постоянных кристаллической решетки, повторяющихся от 56 до 132 раз. В гетероструктурах с толщиной слоев LaNiO_3 в 2 постоянных решетки нами обнаружен фазовый переход металл – изолятор, происходящий при температуре 150 К и отсутствующий в гетероструктурах с более толстыми слоями LaNiO_3 . Мы предполагаем, что механизм перехода связан с локализацией носителей заряда моттовского типа либо с нестингом поверхности Ферми и соответствующей неустойчивостью типа волны зарядовой плотности. В температурных зависимостях электродинамических характеристик этих же гетероструктур обнаружена дополнительная особенность при температуре около 50 К, связанная с известным фазовым переходом в антиферромагнитную фазу. Наличие обнаруженной особенности интерпретируется нами как результат взаимосвязи транспортных свойств гетероструктуры с магнитной подсистемой.

ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СЛОЖНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ

А.В. Бородин, А.А. Манькова, Н.Н. Брандт, А.Ю. Чикишев, А.П. Шкуринов

Физический факультет и Международный лазерный центр
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва

Методы терагерцовой и оптической лазерной оптоэлектроники позволяют решать широкий круг прикладных задач в исследовании различных объектов в биологии, химии и материаловедении. Одно из интереснейших направлений исследований – терагерцовая и оптическая спектроскопия биологических молекул и диагностика их функциональной активности.

Белки – неперенные участники всех процессов жизнедеятельности. Белки-ферменты катализируют все химические, электрохимические и механохимические процессы в клетках и в живых организмах. Специализированные ферменты служат катализаторами всех метаболических реакций, также они являются и регуляторами генетических функций нуклеиновых кислот. Можно сказать, что белки являются обязательными участниками запасаания, передачи, трансформации и рецепции химических сигналов в живых системах [1].

Исследование структуры белков различными методами, в том числе и методами, свойственными ТГц-диапазону частот, является важной задачей исследования биологических молекул, так как в подавляющем большинстве случаев функциональная активность белков связана с их структурой. Молекула белка – это сложная структура с элементами периодичности, которая чрезвычайно чувствительна ко многим внешним факторам. Можно сказать, что белок – это колебательная система с запрограммированными функциями, а перемещение отдельных функциональных групп имеет направленный характер и зависит от структуры. Эти молекулярные группы имеют специфические колебания и движения в терагерцовом диапазоне частот, которые пока недостаточно изучены.

Так как белки участвуют в жизнедеятельности организмов, то естественным окружением для молекул белка является вода. Именно в водной среде белки работают, и работу их можно сравнить с динамической системой, своего рода машиной, поведение которой зависит от положения и свойств всех элементов. Известно, что 9 из 20 аминокислот гидрофобны, а остальные гидрофильны [2]. В соответствии с этим некоторые участки полипептидной цепи белка будут обладать гидрофобными, а другие гидрофильными свойствами. Одно из фундаментальных свойств белков заключается в том, что полипептидные цепи стремятся свернуться так, чтобы во внутренней части молекулы находилось как можно больше гидрофобных боковых цепей. На поверхности же расположены главным образом гидрофильные, заряженные аминокислотные остатки. Таким образом избегается

термодинамически невыгодный контакт с водой и приобретает стабильность структуры белка.

При замене водного окружения белка другим растворителем молекула попадает в менее выгодное состояние, что может повлечь за собой изменение структуры белка. Оказывается, при некоторых условиях возможны варианты, что белок продолжает работать, но уже выполняя противоположные функции. Например, если белок был катализатором расщепления связей, он может начать их синтезировать. То есть может происходить «инверсия» функций белка при помещении его в неводную среду.

Известно, что ферментативная активность белков в органических растворителях резко возрастает в присутствии краун-эфиров [3, 4, 5]. Считается, что одним из возможных механизмов этого эффекта является образование комплекса поверхностных аминогрупп белка с краун-эфиром. Из-за очень сильной полосы поглощения амид I, перекрывающейся с полосами поглощения аминогрупп белка, методы ИК- и КР-спектроскопии, наиболее часто применяемые для изучения белков, не дают возможности прямого исследования аминогрупп белка. Однако, эти методы можно применять для изучения состояния аминогрупп при взаимодействии с краун-эфирами на примере модельных систем. В качестве такого модельного соединения может быть выбран трис-(гидроксиметил)аминометан (трис) $(\text{HOCH}_2)_3\text{C-NH}_2$ [6], который имеет схожее с белками химическое строение. Краун-эфиров в природе много, они являются производными циклических углеводов. В данной работе для исследования изменений свойств модельного соединения выбран краун-эфир 18-краун-6 ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_6$).

Взаимодействие краун-эфиров с аминами приводит к образованию комплексов, в которых аминогруппа находится внутри макроцикла, аналогично соответствующим комплексам щелочных металлов [7, 8]. При этом предполагается, что комплексообразование обусловлено водородными связями аминогруппы и атомов кислорода 18-краун-6 (краун).

В данной работе мы исследовали ИК- и ТГц-спектры непротонированного триса, протонированного триса, а также определили спектральные изменения, происходящие при взаимодействии триса с крауном. Мы исследовали изменения свойств триса при различных значениях pH и комплексов трис-18-краун-6 (трис-краун) с различными молярными концентрациями веществ.

1. М.В. Волькенштейн. Биофизика. М. : Наука, 1981.
2. Березин И.В., Мартинек К. Основы физической химии ферментативного катализа. М. : Высшая школа, 1977.
3. J. Broos, M.N. Martin, I. Rouwenhorst, W. Verboom, D.N. Reinhoudt // Recl. Trav. Chim. Pays-Bas 1991, 110, 222-225.
4. J. Broos, I.K. Sakodinskaya, J.F.J. Engbersen, W. Verboom, D.N. Reinhoudt. // J. Chem. Soc., Chem. Commun. 1995, 255-256.
5. D.J. Van Unen, J.F.J. Engbersen, D.N. Reinhoudt // Biotechnol. Bioeng., 1998, 59, 553.
6. K. Griebenow, A.M. Klibanov // Biotechnol. & Bioeng., 1997, v. 53, 340.
7. K.N. Trueblood, C.K. Knober, D.S. Lawrence, R.V. Stevens // J. Am. Chem. Soc., 1982, v. 104, 1355.
8. R.M. Izatt, N.E. Izatt, B.E. Rossiter, J.J. Christensen, B.L. Haymore // Science, 1978, v. 199, 994.

КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНОВ

С.А. Кузнецов^{1,2}, М.А. Астафьев^{1,2}, А.В. Аржанников^{1,2}, А.В. Гельфанд³

¹ Новосибирский государственный университет, Новосибирск

² Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

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

В докладе представлен обзор результатов разработок квазиоптических микроструктурных элементов для управления потоками излучения миллиметрового и терагерцового диапазонов, перекрывающих область частот 0,05–2 ТГц. Квазиоптические элементы включают различные типы частотных фильтров, преобразователей фазы и поляризации, планарных фокусирующих устройств, элементов адаптивной оптики и др. В докладе освещаются аспекты, связанные с электродинамическим моделированием частотно-селективных структур, технологией их производства, спектральной характеристикой, а также приложениями в различных физико-технических экспериментах.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И «ПОТЕНЦИАЛ» ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ НЕПРЕРЫВНОГО РЕЖИМА ММДВ

*А.Г. Горелик¹, С.Ф. Коломиец¹, В.И. Криворучко², П.В. Куприянов²,
С.А. Петров³*

¹ Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный, Московская обл.

² ФГУП НПП «Исток» г. Фрязино, Московская обл.

³ ОАО НПК «Тристан», г. Москва

Существуют объективные предпосылки, обуславливающие возрастание в последние годы интереса к твердотельным радиолокационным датчикам непрерывного режима ближнего и среднего радиуса действия, работающим в миллиметровом диапазоне длин волн (ММДВ) [1]. С одной стороны, очевиден прогресс в развитии элементной базы и технологий ММДВ, что привело к появлению на рынке широкого спектра монолитных компонентов – усилителей мощности и малошумящих усилителей, смесителей, коммутаторов и т.п. С другой стороны, физические особенности твердотельных усилителей мощности не позволяют, в отличие от вакуумных, по-

лучать существенную прибавку пиковой мощности в импульсном режиме работы. Это приводит к пропорциональному падению средней мощности и, следовательно, энергетического потенциала твердотельных импульсных радиолокационных передатчиков (РЛПП) с ростом скважности.

Реализация принципиально высокого энергетического потенциала РЛПП непрерывного режима представляет собой сложную научно-техническую задачу, так как существует ряд физических факторов, препятствующих этому. Они существенно разнятся для одноантенных и двухантенных РЛПП. В докладе показано, что в простейших одноантенных РЛПП энергетический потенциал зависит почти исключительно от амплитудных шумов передатчика вблизи несущей, а в двухантенных – от фазовых шумов гетеродина приемника [2].

В докладе также приводятся некоторые интересные, на взгляд авторов, результаты применения РЛПП 8-мм диапазона длин волн в составе радиолокационных датчиков для промышленности и транспорта [3], а также для доплеровской томографии поля ветра в пограничном слое атмосферы и дистанционного зондирования импульсных газодинамических и пылевых процессов. Отмечено, что с использованием указанных технологий стали доступны измерения, открывающие широкие перспективы дальнейшего развития наших представлений в соответствующих предметных областях. В частности, измерение поля ветра в пограничном слое атмосферы является ключевой информацией к пониманию атмосферных процессов, протекающих на высоте, и существенно повышает достоверность прогноза [4, 5, 6].

Достоверные данные о распределении отражающих частиц в объемах, сравнимых с характерным радиолокационным объемом, необходимы для оценки как параметров самих осадков, так и динамических параметров атмосферы. Создание надежных радиолокационных инструментов для проведения достаточно точных измерений в аэрозолях и осадках позволит исследовать динамику турбулентного движения в области колмогоровского масштаба [7].

В области импульсной газодинамики в наших экспериментах, проведенных на полигонах МИК РФЯЦ – ВНИИЭФ совместно со специалистами НИРФИ, были использованы информационные возможности малогабаритных РЛПП непрерывного режима [8]. Эти эксперименты позволили получить первые данные об отражающих свойствах, достижимой точности измерения основных параметров и сформулировать требования к подобной аппаратуре. Была показана уникальная возможность радиолокационных средств по непрерывному наблюдению сигнала, позволяющего изучать закон движения и термодинамические характеристики как в образце, так и в атмосфере.

1. *Королев А.Н.* Работы ГНПП «Исток» в области ближней радиолокации // Электронная техника. 1998. С. 1-14. (Сер.1, Техника СВЧ).

2. Лисон, Джонсон. Кратковременная стабильность частоты доплеровских радиолокационных станций : требования измерения, методы // ТИИЭР. 1966. Т. 54, № 2. С. 157-163.
3. Париков В.А. и др. Радиолокационные датчики скорости 8-мм диапазона для транспорта. Достижения и перспективы // Электронная техника. 1998. С. 55-56. (Сер. 1, Техника СВЧ).
4. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Доплеровская томография в радиолокационной метеорологии // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26, № 1. С. 47-54.
5. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В., Желтов А.В. Ветровое зондирование пограничного слоя атмосферы методами доплеровской томографии // Научный вестник МГТУГА. 2011. № 168.
6. Зилинтинкевич С.С. Динамика пограничного слоя атмосферы / Отв. ред. проф. А.С. Монин. Л. : Гидрометеорологическое изд-во, 1970. 292 с.
7. Горелик А.Г., Коломиец С.Ф., Куприянов П.В. Форма спектра рассеянного поля как источник информации о рассеивающей среде и протекающих в ней динамических процессах // Научный вестник МГТУ ГА. Вып. 176. 2012. С. 18. (Серия "Радиофизика и электроника").
8. И.И. Кортиюков, В.В. Страбыкин, А.Н. Хорошко, С.Л. Штарев, А.Г. Горелик, С.Ф. Коломиец. Применение радиофизических средств для дистанционного контроля параметров быстротекущих процессов в ближней зоне взрыва // Труды научной конференции Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 934.

МИКРОПОЛОСКОВАЯ АНТЕННА НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

В.Е. Любченко, Т.А. Брянцева, И.А. Марков, Е.О. Юневич

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, г. Фрязино, Московская обл.

Предложена конструкция активной микрополосковой антенны, в которой в качестве подложки используется эпитаксиальная структура содержащая тонкий слой арсенида галлия п-типа на полуизолирующей подложке. Толщина этого слоя выбирается из условия обеднения приповерхностной области полупроводника свободными носителями заряда (электронами) вследствие их ухода в металл. Наличие легированного слоя п-типа улучшает адгезию пленки металла благодаря действию электростатических сил встроенного электрического поля на границе раздела металл – полупроводник, что позволяет производить осаждение металла и создание достаточно прочного металлического слоя без подогрева подложки и тем самым избежать химического взаимодействия металла с приповерхностным слоем арсенида галлия. Кроме того, возможность использования эпитаксиальных структур, предназначенных для изготовления полевых транзисторов и выпускаемых в настоящее время в промышленных масштабах, открывает возможность изготовления активных антенн СВЧ- и КВЧ-диапазона в виде монолитных интегральных схем.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЕМНОЙ МАТРИЦЫ ДЕТЕКТОРОВ С РАЗМЕРНОСТЬЮ 8×8 3-ММ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

*В.И. Шашкин, Ю.И. Белов, П.В. Волков, А.В. Горюнов, В.Р. Закамов,
И.А. Илларионов*

Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

Интенсивные исследования в области радиовидения в диапазонах миллиметровых (ММ) и субмиллиметровых (СММ) длин волн проводятся около 15 лет. Интерес к этим работам связан с широким набором приоритетных прикладных задач, в которых радиовидение является полезным инструментом. Примеры: диагностика материалов, контроль технологических процессов, противодействие терроризму, военные и специальные применения. В ряде задач к системам радиовидения предъявляются требования регистрации сигнала на расстоянии единиц – десятков метров от источника излучения. Оптимальным решением такой задачи является построение многоэлементных матричных приемников, расположенных в фокальной плоскости изображающей системы (объектива). Такой подход обладает очевидным достоинством, так как позволяет получить изображение объекта в реальном времени.

В ИФМ РАН в течении ряда лет проводится разработка и исследование оригинальных конструкций планарных антенных детекторов для систем ММ-радиовидения. В настоящем докладе представлены результаты исследования характеристик двухмерной планарной матрицы детекторов размерностью 8×8, предназначенной для 3-мм диапазона длин волн. В матрице использованы низкобарьерные диоды собственного изготовления, оптимизированные для достижения высокой чувствительности каждого канала приемника. Приведены экспериментальные результаты исследования комплекса системы радиовидения, состоящей из объектива и двухмерной планарной матрицы детекторов.

1. Приведены измеренные диаграммы (ДН) антенных элементов планарной матрицы на разных частотах в рабочем диапазоне 90-100 ГГц. Средняя ширина по уровню 3 дБ ДН, измеренных на частоте 94 ГГц, в Н-плоскости составляет 59°, в Е-плоскости – 60°. С помощью специализированного программного обеспечения проведены электродинамические расчеты ДН антенных элементов с учетом их топологии и реального конструктивного расположения. На основе экспериментальных и данных моделирования выполнен анализ эффектов взаимовлияния антенных элементов в составе планарной матрицы.

2. Определена вольт-ваттная чувствительность детекторов в составе матрицы в диапазоне частот 82–119 ГГц. В рабочем частотном диапазоне

матрицы (90–100 ГГц) средняя величина вольт-ваттной чувствительности после на выходе низкочастотных усилителей составила около $8 \cdot 10^6$ В/Вт.

3. Определена предельная чувствительность приемников – мощность, эквивалентная шумам (NEP). В рабочем диапазоне матрицы средняя величина NEP составила около $4 \cdot 10^{-12}$ Вт·Гц^{-1/2}, что находится на уровне лучших мировых результатов на текущий момент.

4. Для разработанной матрицы, при учете технологических ограничений и характеристик взаимовлияния антенных элементов, был рассчитан и изготовлен однолинзовый асферический объектив, позволивший получать изображения объектов с разрешением около 3 см при расстоянии до них 1 м. Представлены примеры изображений тестовых объектов.

Таким образом, полученные в работе и представленные в докладе результаты формируют основы и определяют перспективы построения реальных систем получения радиоизображения в ММ-диапазоне для решения различных прикладных задач.

НАБЛЮДЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РТ-7,5 МГТУ

А.В. Жильцов, В.С. Рыжов

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

На радиотелескопе РТ-7,5 МГТУ на протяжении нескольких десятилетий ведутся регулярные наблюдения миллиметрового радиоизлучения Солнца. За это время применялись различные виды приемного оборудования и оптимизировались методики сканирования Солнца диаграммой направленности антенны и сбора данных.

В последние годы для наблюдений используется двухдиапазонный приемник на длинах волн 3,2 и 2,2 мм. Расчетная диаграмма направленности антенны на этих длинах волн составляет 2,5 и 1,8. угл. мин. соответственно. Сканирование Солнца может проводиться в двух режимах: растровое сканирование с целью построения двумерной карты распределения яркостной температуры и сопровождение выделенной активной области с непрерывной записью сигнала от нее в файл трека.

В результате наблюдений были получены уникальные данные. Была измерена абсолютная яркостная температура спокойного Солнца по методу сопоставления с новой Луной. Полученные значения: $T_{bs}(3,2) = (6847 \pm 358)$ К, и $T_{bs}(2,2) = (6456 \pm 365)$ К сравнимы с данными других измерений, однако имеют невысокую точность.

При анализе треков сопровождения некоторых активных областей на Солнце было обнаружено малоизученное явление долгопериодических колебаний потока миллиметрового радиоизлучения. Применение вейвлет-анализа для обработки этих треков позволило установить характерные моды колебаний с периодами около 30 и 100 минут.

Также удалось зарегистрировать нестационарное радиоизлучение от нескольких солнечных вспышек. Наиболее качественные и информативные данные были получены для двух вспышек. Эти вспышки произошли в активной области NOAA 11515 04.07.2012 и 05.07.2012 и имели рентгеновский класс M5.3 и M6.1. Треки, полученные на радиотелескопе РТ-7,5 МГТУ, были сопоставлены с данными других наземных и космических инструментов. Совместный анализ всей совокупности экспериментальных данных позволил прояснить физическую картину наблюдавшихся явлений и сделать оценку температуры нагретой во вспышке плазмы.

ДВУХВОЛНОВЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ АТМОСФЕРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ «МИАП-2»: ТЕСТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В НИЖНЕМ НОВГОРОДЕ

*И.И. Зинченко, В.И. Носов, П.Л. Никифоров, Л.И. Федосеев, А.А. Швецов,
О.С. Большаков, Е.В. Носова*

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Мониторинг атмосферного поглощения необходим для исследования астроклимата при выборе места расположения радиотелескопов миллиметрового диапазона длин волн и для обеспечения их нормального функционирования.

Для таких исследований в ИПФ РАН был создан двухволновый измеритель атмосферного поглощения «МИАП-2», который позволяет не только получать оценку поглощения в диапазонах 2 и 3 мм, но и оценить вклад различных компонент атмосферы в общую величину поглощения, в частности количество водяного пара и водозапас облаков. Измеритель представляет собой радиометрическую систему, включающую в себя два твердотельных радиометра (в общем корпусе) на частоты 84–99 и 132–148 ГГц, опорно-поворотное устройство и систему управления, сбора и обработки данных на базе персонального компьютера и модуля USB-4716 [1, 2]. Система управления, сбора и обработки данных обеспечивает полностью автоматическую работу комплекса в режиме циклических наблюдений в заданное время.

Тестовые измерения проводились в Нижнем Новгороде в течение 2012 г. при различных погодных условиях. Использовался метод атмосферных разрезов (в двух вариантах) и метод абсолютной калибровки (яркостной температуры), все методы показали близкие результаты по оценкам поглощения.

Работа частично поддерживалась грантом РФФИ № 11-02-97064-р_поволжье_а.

1. *И. И. Зинченко, В. И. Носов, П. Л. Никифоров, Л. И. Федосеев, А. А. Швецов, О. С. Большаков* // Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» (ВРК-2011) : тезисы докладов. Санкт-Петербург : ИПА РАН, 2011. С. 108.
2. *Зинченко И.И., Носов В.И., Никифоров П.Л., Федосеев Л.И., Швецов А.А., Большаков О.С.* Двухчастотный измеритель атмосферного поглощения в миллиметровом диапазоне волн // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2012. Т. 24. С. 194-198.

ПЕРЕДВИЖНОЙ ОЗОНОМЕТР МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА

*С.Б. Розанов¹, О.С. Большаков^{2,3}, А.С. Завгородний¹, Е.П. Кропоткина¹,
С.К. Круглов⁴, С.В. Логвиненко⁵, А.Н. Лукин¹, П.Л. Никифоров²,
И.И. Саенко⁴, С.В. Соломонов¹, А.М. Штанюк^{2,3}*

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

² Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

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

⁴ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, С.-Петербург

⁵ Пушинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН,
г. Тушино, Московская обл.

Представлено описание нового передвижного автоматизированного озонметра миллиметрового диапазона для наземных измерений вертикального распределения озона в стратосфере и мезосфере. В состав прибора входят малощумящий модуляционный приемник на частоту 142,2 ГГц, анализаторы спектра (акустооптический и фильтровые) и управляющий компьютер со специальным программным обеспечением. В приемнике использованы квазиоптические входные узлы с малыми потерями, смеситель на планарном диоде Шоттки и твердотельный гетеродин на диоде Ганна. Калибровка озонметра осуществляется по внутренним чернотельным излучателям, один из которых охлаждается жидким азотом. Особенностью прибора является возможность изменения в ходе наблюдений угла места антенны и яркостной

температуры опорного излучателя. Однополосная шумовая температура озонметра составляет 1000...1250 К в рабочей полосе частот 0,5 ГГц, что соответствует уровню лучших неохлаждаемых приемников 2-миллиметрового диапазона со смесителями на диодах Шоттки.

Приведены результаты первых измерений спектральной линии излучения атмосферного озона с центральной частотой 142,175 ГГц с использованием широкополосного 1000-канального акустооптического анализатора спектра и фильтровых анализаторов спектра (узкополосного 50-канального и оптимизированного широкополосного 96-канального). Наблюдения озона проводились в Москве в дневное и ночное время в «квазиуловном» режиме, когда яркостная температура опорного излучателя была близка к средней яркостной температуре неба в рабочей полосе. Результаты измерений показали высокую чувствительность озонметра и перспективность его применения для исследований озонного слоя атмосферы Земли.

Работа поддержана программами ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и «Радиоэлектронные методы в исследовании окружающей среды и человека».

СПЕКТРОРАДИОМЕТР ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ПОЛОСЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА

А.А. Швецов¹, В.Г. Рыскин¹, Л.М. Кукин¹, Л.И. Федосеев¹, А.М. Щитов²

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

² ННИПИ «Кварц», Н. Новгород

Особенностью миллиметрового диапазона является наличие в спектре поглощения и излучения земной атмосферы сильных линий и полосы молекулярного кислорода, а также линий водяного пара. Эти спектральные особенности можно использовать как для систем зондирования атмосферы (линий O_2 для термического зондирования и линий H_2O для измерения профиля водяного пара), так и для увеличения информативности зондирования земной поверхности [1].

В ИПФ РАН разработан 8-канальный спектрорадиометр, работающий в диапазоне 50–55 ГГц, принадлежащем низкочастотному склону 5-миллиметровой полосы молекулярного кислорода. Прибор представляет собой супергетеродинный приемник с малошумящим НЕМТ-усилителем на входе. Он оснащен устройством для быстрой автоматической внутренней калиб-

ровки (модулятором-калибратором) [2], включенным между антенной и входом приемника. Спектральный анализ сигнала осуществляется в диапазоне промежуточных частот 2–7 ГГц с помощью банка полосовых фильтров. Ширина полос пропускания фильтров оптимизирована с учетом формы спектра излучения атмосферы и варьируется от 150 до 500 МГц. Антенная система представляет собой тефлоновую линзу, просветленную с помощью концентрических бороздок и конического гофрированного облучателя. Ширина диаграммы направленности антенны около 3°. Шумовая температура спектро радиометра, приведенная к апертуре антенны, составляет 1400 К. Управление работой модулятора-калибратора и сбором данных осуществляется с помощью модуля АЦП-ЦАП, сопряженного с ПК.

Спектро радиометр предполагается использовать для измерения профиля температуры тропосферы, а также для дистанционного мониторинга состояния земных покровов с использованием излучения атмосферы в качестве подсветки.

1. *А.А. Швецов, Д.В. Кортаев, Л.И. Федосеев.* Дистанционное зондирование земных покровов в линии излучения кислорода на длине волны 2,5 мм // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10/11. С. 905-916.
2. *Л.И. Федосеев, А.А. Швецов, А.П. Шкаев, В.М. Демкин, Д.А. Караитин, Л.М. Кукин, В.Г. Божков, В.А. Геннеберг, И.В. Петров, А.М. Щитов.* Радиометры миллиметрового диапазона длин волн с модуляторами-калибраторами // Материалы международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2008). Севастополь : ВЕБЕР, 2008. Т. 2. С. 878-879.

ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО И ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ В ОБЛУЧЕННЫХ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ ZnGeP_2

*С.В. Чучупал¹, Е.С. Жукова^{1,2}, О.Е. Породинков¹, Г.А. Командин¹,
Ю.А. Шакир¹, А.И. Грибенюков³, Б.П. Гориунов^{1,2}, А.С. Прохоров^{1,2}*

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

² Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный, Московская обл.

³ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

Нелинейно-оптические кристаллы ZnGeP_2 используются для преобразования лазерного излучения среднего ИК-диапазона (длина волны порядка 10 мкм) в излучение субмиллиметровой (СБММ) области спектра за счет генерации разностной частоты. Эффективность преобразования напря-

мую определяется механизмом СБММ-поглощения. В работе [1] нами было высказано предположение о влиянии статической проводимости на формирование потерь в СБММ-диапазоне. Было предложено путем облучения кристалла электронами сформировать центры захвата носителей заряда и тем самым снизить статическую проводимость. С целью определения влияния электронного облучения на поглощение в СБММ-диапазоне нами выполнены измерения на ЛОВ-спектрометре спектров комплексной диэлектрической проницаемости кристаллов ZnGeP_2 , облученных электронами с энергией 4 МэВ, флюэнс $1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Дополнительно на фурье-спектрометре измерены спектры коэффициента отражения в ИК спектральной области. В результате получены спектры действительной и мнимой ϵ'' частей диэлектрической проницаемости и динамической проводимости в частотном диапазоне 200–1000 ГГц для температур 5–300 К. Установлено, что в СБММ-области величины ϵ'' для облученных и необлученных кристаллов совпадают в пределах 10 % погрешностей эксперимента и практически не зависят от температуры в интервале от 5 до 100 К. При дальнейшем нагреве величины потерь слабо возрастают. Для обоих типов образцов СБММ динамическая проводимость возрастает с увеличением частоты, что указывает на доминирующий вклад возбуждений резонансного типа, расположенных на более высоких частотах. Обнаружено, что влияние облучения оказывается существенным в среднем ИК-диапазоне, где коэффициент пропускания облученного образца (толщина 0,8 мм) на частотах выше 2000 см^{-1} падает до величин менее 1 %. Основные результаты работы состоят в следующем: а) облучение монокристалла ZnGeP_2 электронами с энергией 4 МэВ не приводит к заметному изменению потерь в субмиллиметровом диапазоне длин волн, но вызывает резкий рост поглощения излучения на частотах выше 2000 см^{-1} ; б) наличие низкотемпературного плато (5–100 К) в температурных зависимостях СБММ потерь в образцах обоих типов указывает на предельное поглощение, обусловленное в значительной мере дефектами синтеза [2].

1. В.В. Войцеховский, А.А. Волков, Г.А. Командин, Ю.А. Шакир // ФТТ. 1995. Т. 37, № 7. С. 2199.
2. В.Н. Брудный, В.Г. Воеводин, С.Н. Гриняев // ФТТ. 1961. Т. 48, вып. 11. С. 1949.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ГЕТЕРОСТРУКТУР Ge/Si(001) С ПЛОТНЫМИ МАССИВАМИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ge В ДИАПАЗОНЕ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

*Е.С. Жукова^{1,2}, К.В. Чиж¹, М.С. Сторожевых¹, Л.В. Арапкина¹,
В.А. Чапнин¹, О.В. Уваров¹, В.П. Калинушкин¹, В.А. Юрьев¹,
А.С. Прохоров^{1,2}, И.Е. Спектор¹, Б.П. Гориунов^{1,2}*

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

² Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный, Московская обл.

Искусственные низкоразмерные нанообъекты – квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки, а также структуры на их основе являются перспективными системами с точки зрения создания принципиально новой элементной базы микро-, нано- и оптоэлектроники. Массивы из большого числа квантовых точек – многослойные гетероструктуры, в том числе упорядоченные, предоставляют возможность формировать «искусственные твёрдые тела», на свойства которых можно контролируемым образом воздействовать путём изменения характеристик составляющих их элементов («атомов» или «молекул») и окружающей эти элементы среды (твердотельной матрицы). Необходимым условием для разработки новых технологических процессов и оборудования, предназначенных для формирования наноструктур с требуемыми параметрами, является исследование их фундаментальных свойств. В этом отношении актуальным является изучение отклика таких систем на субмиллиметровых волнах, поскольку практически все основные взаимодействия в низкоразмерных наноструктурах имеют соответствующие характерные энергии – от нескольких миллиэлектрон-вольт до нескольких десятков миллиэлектрон-вольт. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии нами были приготовлены многослойные гетероструктуры «германий – кремний» с квантовыми точками германия. В интервале частот от 300 до 1200 ГГц и температур от 5 К до 300 К нами выполнены первые измерения спектров динамической проводимости гетероструктур (величины, пропорциональной коэффициенту поглощения излучения). Установлено, что эффективная динамическая проводимость двумерного массива квантовых точек германия значительно превышает проводимость исходного *неструктурированного* германия. При охлаждении эффективная динамическая проводимость уменьшается, что может указывать на кремниевую подложку как на поставщика носителей заряда в гетероструктуру. Обсуждаются возможные механизмы обнаруженного «гигантского» поглощения в массивах квантовых точек.

РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ «ПОДЩЕЛЕВОГО» ПОГЛОЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ НА СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

*Е.С. Жукова^{1,2,3}, Б.П. Горшун^{1,2,3}, В.С. Ноздрин¹, S. Zapf³, D. Wu³,
S. Haindl⁴, K. Lida⁴, M. Dressel³*

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

² Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный, Московская обл.

³ Physikalisches Institut, Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany

⁴ IFW Dresden, Institute for Metallic Materials, Dresden, Germany

Среди представителей класса высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) соединения на основе железа занимают выделенное положение в связи с тем, что в их состав не входит медь, элемент, давший название широкому классу сверхпроводящих купратов. Этот факт позволяет взглянуть на природу и механизмы явления ВТСП более широко и не рассматривать наличие меди как обязательный фактор. Кроме того, Fe-сверхпроводники оказались весьма нетривиальными соединениями ввиду того, что уровень Ферми в них пересекается с несколькими зонами, что представляет несомненную ценность в отношении теоретических моделей сверхпроводимости вообще. Несмотря на то, что Fe-СП были открыты уже около трёх лет назад, их экспериментальное изучение несколько ограничено качеством синтезируемых образцов. При этом наиболее высококачественные образцы сравнительно больших размеров получают в виде эпитаксиальных плёнок. С учётом этого факта, а также того, что фундаментальные процессы в данных материалах имеют характерные энергии порядка нескольких миллиэлектрон-вольт (энергетические щели, подщелевое поглощение, эффекты когерентности...), нами были начаты исследования данных материалов с применением методов субмиллиметровой ЛОВ-спектроскопии. В одной из наших ранних работ [1] нам впервые удалось не только напрямую наблюдать и измерить величину одной из СП-щелей в многозонном соединении $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$, но и установить наличие значительного «подщелевого» поглощения в СП-фазе. Оказалось, однако, что использовавшаяся стандартная для ЛОВ-спектрометров измерительная схема – измерение пропускания плёнки на диэлектрической подложке – не обеспечивает достаточно высокой точности измерения этого поглощения. Поскольку его величина и температурно-частотный ход должны нести информацию о механизмах сверхпроводимости, нами была разработана методика, позволяющая увеличить чувствительность ЛОВ-спектрометров к измеряемым значениям поглощения СП-плёнок на диэлектрических подложках. Принцип методики состоит в том, что плёнки на подложках монтируются через спейсер «лицом к лицу», образуя резонатор Фабри – Перо. Возраста-

ние чувствительности обеспечивается многократным взаимодействием зондирующего излучения с плёнками, т. е., фактически, возросшей добротностью резонатора. Полученные нами в такой схеме экспериментальные результаты демонстрируют значительное увеличение добротности интерференционных пиков резонатора в СП-фазе, что позволяет с большей (в разы) точностью определять абсолютные величины «подщелевого» поглощения и, таким образом, получить дополнительную информацию о механизмах сверхпроводимости в Fe-СП.

1. B. Gorshunov et al. // Physical Review B, RC. 2010. Vol. 81, 060509.

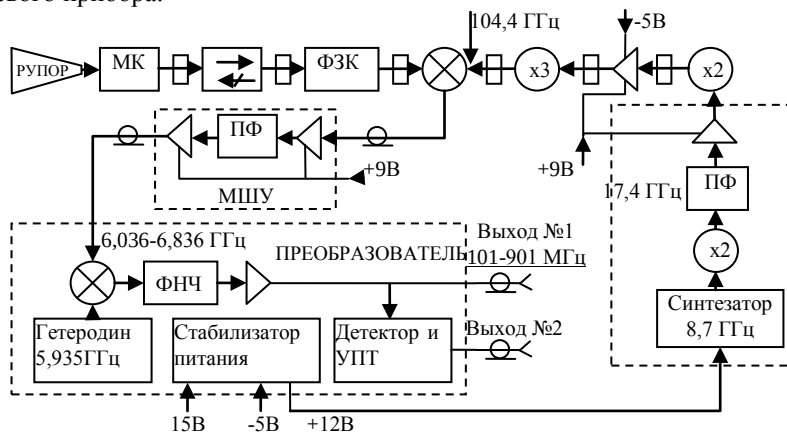
МОБИЛЬНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ ОЗОНОМЕТР С АВТОМАТИЧЕСКОЙ ВНУТРЕННЕЙ КАЛИБРОВКОЙ

А.А. Красильников¹, М.Ю. Куликов¹, Л.М. Кукин¹, В.Г. Рыскин¹,
Л.И. Федосеев¹, А.А. Швецов¹, О.С. Богдашов¹, А.М. Щитов², А.М. Фейгин¹

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

² ННИПИ «Кварц», Н. Новгород

Описывается новый малогабаритный микроволновый озонметр, осуществляющий мониторинг состояния озонового слоя с высоким пространственно-временным разрешением. Прибор включает несколько новых элементов, позволяющих рассматривать его в качестве прототипа будущего сетевого прибора.



МК – модулятор-калибратор, ФЗК – фильтр зеркального канала, ПФ – полосовой фильтр, МШУ – малошумящий усилитель, ФНЧ – фильтр низкой частоты

Функциональная схема показана на рисунке. В новом приборе значительно расширена полоса спектрального анализа, которая задается малошумящим усилителем промежуточной частоты (МПУ) и составляет 800 МГц. Периодическая калибровка осуществляется автоматически с помощью модулятора-калибратора (МК) на входе приемника. Приемник настроен на частоту 110,8 ГГц вращательного перехода излучения атмосферного озона. Спектральная обработка выходного сигнала производится цифровым анализатором спектра быстрого фурье-преобразования «ACQIRIS» с максимальным разрешением 61 КГц в полосе от 100 до 900 МГц. По полученным спектрам озона восстанавливается профиль озона на высотах от 15 до 70 км. Использование модулятора-калибратора позволило полностью автоматизировать процесс измерения спектра озона. Контроль всего измерительного комплекса может осуществляться по сети интернет.

СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ БОЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ И ВИЗУАЛИЗАТОРЫ ПУЧКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИАПАЗОНА МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

*С.А. Кузнецов^{1,2}, М.А. Астафьев^{1,2}, А.В. Аржанников^{1,2}, А.Г. Паулиш³,
А.В. Гельфанд³*

¹ Новосибирский государственный университет, Новосибирск

² Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

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

В докладе представлен обзор результатов разработок болометрических детекторов со спектральным, поляризационным и пространственным разрешением, использующих технологию ультратонких резонансных поглотителей и предназначенных для регистрации потоков мм- и субмм-излучения от субмилливаттного до киловаттного уровня мощности. Рассмотрена электродинамика ультратонких поглотителей, изложенная в контексте идеологии высокоимпедансных поверхностей и метаматериалов, позволяющая реализовать толщину на 2 порядка меньше рабочей длины волны. Представлены результаты тестирования прототипов детекторов, оптимизированных под задачи калориметрии и визуализации пучков излучения.

СУБДОПЛЕРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО СПЕКТРА ИЗОТОПОЛГОВ HC_3N

Г.Ю. Голубятников¹, А.П. Вельмузов², J.-U. Grabov³, A. Guarnieri⁴,
А.В. Лапинов¹

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

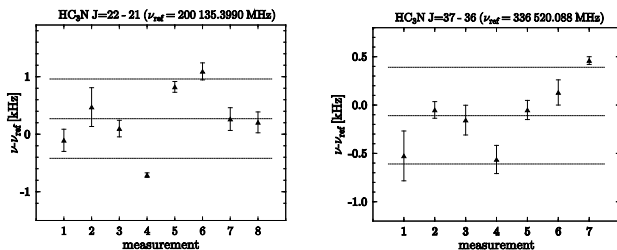
² Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН, Н. Новгород

³ Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, University of Hannover, Germany

⁴ Technical Faculty of Christian Albrecht University of Kiel, Germany

При помощи созданного субдоплеровского спектрометра выполнены высокоточные измерения спектров молекул HC_3N , H^{13}CCCN , HC^{13}CCN , HCC^{13}CN , HCCC^{15}N в диапазоне 45–510 ГГц. Лабораторный синтез изотопологов HC_3N проведен в Институте химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН. Измерения переходов HC_3N , HC^{13}CCN и HCC^{13}CN в линиях $J=1-0$ и $J=2-1$, а также H^{13}CCCN и HCCC^{15}N в линиях $J=1-0$, $J=2-1$ и $J=3-2$ на частотах ниже 27 ГГц проводились в холодной струе на спектрометре университета г. Ганновера (Германия). Обладая большим дипольным моментом в 3,7 D, изотопологи HC_3N не только являются чувствительным зондом плотных ядер в областях звездообразования, но и представляют большой интерес для поиска вариаций фундаментальных констант при совместных измерениях с инверсионными переходами аммиака [1, 2].

На рисунке приведены типичные примеры серий измерений центров линий вращательных переходов HC_3N на основе провала Лэмба. В обоих случаях измеренные значения частоты более чем на порядок точнее значений измеренных методом традиционной доплеровской спектроскопии [3, 4]. Для более редких изотопологов HC_3N ситуация еще более драматичная в силу крайне небольшого количества измеренных ранее линий.



Примеры серий измерений центров линий вращательных переходов HC_3N . Пунктирными линиями показаны средние значения частоты, вычисленные на основе измерений, а также доверительные интервалы по уровню 99 %

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-02-00435-а и 11-02-12284-офи-м, программы ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 8421, по направлению «Физика, астрономия».

1. S.A. Levshakov, A.V. Lapinov, C. Henkel et al. // Astron. Astrophys. 2010, 524, A32.
2. S.A. Levshakov, P. Molaro, A.V. Lapinov et al. // Astron. Astrophys. 2010, 512, A44.
3. R.L. de Zafra // ApJ 1971, 170, 165.
4. K.M.T. Yamada, A. Moravec, and G. Winnewisser // Z.Naturforsch. 1995, 50A, 1179.

КОМПАКТНЫЕ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДУЛИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ РЕШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

В.Б. Хайкин¹, В.Н. Радзиховский², С.Е. Кузьмин², В.Р. Закамов³

¹ Санкт-Петербургский филиал САО РАН, С.-Петербург

² НПО «Айсберг», г. Киев, Украина

³ Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

Для решения ряда актуальных прикладных задач, таких как дистанционное радиометрическое зондирование атмосферы, определение влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков, определение температурного профиля атмосферы, определение скорости и направления ветра над морской поверхностью, метеорологическое прогнозирование, климатология, мониторинг солнечной активности, радиовидение, необходимы высокостабильные компактные радиометрические модули (РМ) ММ-диапазона. Нами разработано семейство компактных РМ прямого усиления диапазона 3; 5; 8; 13,5; 18 мм. В качестве усилителей в РМ используются интегральные МШУ-чипы на подложках GaAs и InP. Приемные полосы модулей задаются полосковым или волноводным ППФ и составляют от 20 % до 0,7 %. Отличительной особенностью широкополосных РМ является высокая флуктуационная чувствительность при сниженном коэффициенте усиления на 15–20 дБ, что достигнуто применением импедансно согласованных низкобарьерных диодов с вольт-ваттной чувствительностью 5–10 В/Вт в 25 % полосе частот.

В зависимости от задачи РМ используются в режиме полной мощности или модуляции. Частота подъема аномального спектра мощности выходного шумового сигнала РМ 0,15 и 0,0015 Гц соответственно. Флуктуационная чувствительность РМ 5–50 мК/Гц^{1/2} в зависимости от диапазона и полосы. Новый РМ 8 мм диапазона для мониторинга солнечной активности реализован в многоканальном варианте (8 каналов с полосой 2,8 %). Компактные размеры РМ позволяют их матричное применение, что особенно актуально для задач радиовидения.

Приводятся характеристики РМ и результаты их применения для измерения температурного профиля атмосферы в составе профилометра (диапазон 5 мм), контроля интегрального атмосферного поглощения (8 мм), мониторинга солнечной активности (8 мм), радиовидения (8 мм, 3 мм).

**МИЛЛИМЕТРОВОЕ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЕ
ИЗЛУЧЕНИЕ
В ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

ПРЕЦИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

В.Л. Вакс, С.Н. Гурбатов, О.В. Руденко

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

В последнее время активизировались работы по созданию методов и приборов, работающих в терагерцовом (ТГц) частотном диапазоне, для решения медико-биологических задач. В ТГц-диапазоне лежат наиболее сильные линии поглощения многих веществ (например, вода, аммиак, спирты). В этот же диапазон попадают колебания функциональных групп и водородных связей многих органических веществ, представляющих интерес для биологии и медицины (белки, молекулы ДНК). Они очень сильно зависят от геометрической формы молекулы и ее окружения и играют важную роль в биохимических реакциях. ТГц-излучение не является ионизирующим и в отличие от рентгеновского излучения не представляет опасности для биологических объектов, что позволяет использовать его *in vivo*. Все эти факторы позволяют использовать ТГц-спектрометры для спектроскопических исследований, в том числе идентификации молекул, их превращений и различных конформационных состояний.

Одной из целей гранта Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования, № 11.G34.31.0066 «Биомедицинские технологии, медицинское приборостроение и акустическая диагностика (MedLab)» (ведущий ученый – академик РАН О.В. Руденко) является разработка многофункционального диагностического комплекса для решения задач медицинской диагностики. Он включает в себя несколько вариантов спектрометров для анализа выдыхаемого воздуха и биологических тканей. Суть эффекта заключается в том, что если в образце газа создается поляризация в резонансных условиях, то после вывода генератора из резонанса волна поляризации будет излучать в ту же самую моду поля, которая ее возбуждала. Экспериментально это реализуется с помощью периодического переключения фазы или частоты зондирующего излучения, резонансно взаимодействующего со средой. Спектрометры, работающие на нестационарных эффектах – свободно затухающей поляризации быстрого прохождения, обладают наилучшим приближением к теоретическому пределу чувствительности при разрешающей способности, ограниченной лишь доплер-эффектом, и могут регистрировать быстротекущие (порядка нескольких микросекунд) процессы. Наибольшей чувствительностью обладает спектрометр с фазовой манипуляцией воздействующего на газ излучения.

В ИФМ РАН разработано и реализовано семейство газовых спектрометров субТГц- и ТГц-диапазонов, в качестве источника излучения которых использованы лампы обратной волны (ЛОВ) или частотно- (или фазово-) стабилизированный твердотельный генератор миллиметрового диапазона длин волн с множителем частоты на полупроводниковых сверхрешетках (ПСР). Приемная система спектрометра на основе нестационарных эффектов работает в таком режиме, когда на вход детектора (смесителя) приходят одновременно два сигнала: сигнал свободно затухающей поляризации от исследуемых молекул и излучение от генератора, которое на резонансной частоте молекулярного поглощения взаимодействовало с молекулами. При этом от детектора (смесителя) требуется высокое быстродействие, связанное с необходимостью регистрировать процессы молекулярной релаксации, следующие с высокой частотой повторения.

В ходе выполнения проекта были проведены спектроскопические исследования выдыхаемого воздуха с применением разработанных ТГц-спектрометров для решения ряда задач неинвазивной медицинской диагностики.

Проведенные предварительные измерения продемонстрировали возможности метода для определения концентрации NO, играющего важную роль в метаболизме, в выдыхаемом воздухе. В клинических условиях были проведены исследования выдыхаемого воздуха у трех условно здоровых некурящих добровольцев и пациентов, больных раком легкого, до и после лучевой терапии. Отмечено практически полное отсутствие NO в выдыхаемом воздухе у здоровых лиц и появление данного вещества у онкологических больных.

В диапазонах 115–185 ГГц и 500–1200 ГГц производились измерения концентрации аммиака в выдыхаемом воздухе (скрининговый тест), а также в пробе воздуха, забираемой с помощью специального эндоскопического оборудования непосредственно из желудка с целью высокоточной диагностики локализации *Helicobacter*, что весьма важно для назначения лечения и прогноза заболевания. Были проведены исследования вращательных спектров поглощения ацетона, метилового и этилового спиртов в выдыхаемом воздухе у 8 предположительно здоровых людей и 9 больных диабетом (до и после приема лекарств) в диапазоне 118–178 ГГц. Исследования показали повышенное содержание ацетона в выдохе пациентов с диабетом по сравнению со здоровыми людьми. Кроме того, выявлена динамика изменения концентрации ацетона до и после приема лекарств. При этом было отмечено незначительное изменение концентрации спиртов в выдохе.

Другим направлением работ являлось изучение спектра ДНК в ТГц-диапазоне частот. Спектроскопическая информация, выявляющая особенности тех или иных молекул, может быть полезна для понимания и управления биохимическими процессами, а также для медицинской диагностики на клеточном и молекулярном уровнях. Одной из задач была разработка и реали-

зация экспериментальной установки для прецизионных спектральных измерений и изучение спектра ДНК в ТГц-диапазоне частот. Были проведены подробные исследования в диапазоне 300–375 ГГц с использованием прецизионного спектрометра на основе синтезатора частоты на ЛОВ и высокودобротного резонатора, что позволило добиться высокой стабильности сигнала и спектрального разрешения менее 10 кГц. В спектре поглощения ДНК во всем диапазоне работы синтезатора на ЛОВ, 300–375 ГГц, с шагом 3 ГГц были выявлены следующие спектральные области, характеризующиеся наиболее сильным поглощением: 306, 315, 324, 333, 348, 360 ГГц.

Спектроскопическое исследование выдыхаемого воздуха и «запахов» тканей в ТГц-диапазоне частот может стать эффективным методом неинвазивной интегральной диагностики состояния организма, воспалительных процессов и последствий терапевтического и радиационного воздействия с помощью анализа выдыхаемого воздуха и тканей. Могут быть диагностированы следующие заболевания: бронхит, пневмония, ЛОР-заболевания, ринит, синусит, заболевания желудочно-кишечного тракта, гастрит, гастродуоденит, холецистит, панкреатит, заболевания мочевыводящей системы, пиелонефрит, болезни молочной железы, доброкачественные и злокачественные опухоли, кожные опухоли, рак легкого. Развитый метод ТГц-спектроскопии, основанный на применении стабильных по частоте источников излучения и высокودобротного резонатора, позволяет изучать тонкую структуру сложных спектров биомолекул, что дает возможность практического использования полученных результатов для решения биологических задач.

Работа выполнена при поддержке программы ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и гранта Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования, № 11.G34.31.0066 «Биомедицинские технологии, медицинское приборостроение и акустическая диагностика (MedLab)».

ИСТОЧНИК МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЫ ЭЦР-РАЗРЯДА ДЛЯ ПРОЕКЦИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

А.В. Водопьянов, С.В. Голубев

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В настоящее время в мире ведутся интенсивные исследования, направленные на создание источника излучения для проекционной литографии высокого разрешения с длиной волны 13,5 нм. Такая длина волны задана в стандартах развития отрасли и отчасти, что обусловлено развитием оптических элементов для данной длины волны. В наиболее эффективных источниках излучения используется линейчатое излучение многозарядных ионов олова (более 100 линий излучения ионов олова с зарядом от +6 до +11 попадают в указанный диапазон). В основном для получения такой плазмы используются установки с мощными лазерами или с различного типа пинчами. Недостатками существующих методов являются малый ресурс работы источников, загрязнение элементов оптической системы распыляемыми веществами, бомбардировка поверхности зеркал быстрыми ионами. Поиски новых источников мягкого рентгеновского излучения остаются актуальными в настоящее время. Альтернативой существующим схемам является источник на основе ЭЦР-разряда, свободный от указанных недостатков. Предлагаемый источник основан на нагреве плазмы вакуумно-дугового разряда, инжектируемой в магнитную ловушку и дополнительно нагреваемой излучением современных гиротронов в условиях ЭЦР. Такой способ обеспечивает необходимую многократную ионизацию ионов олова, эффективную магнитную изоляцию элементов рентгеновской оптики, максимально возможный коэффициент преобразования энергии СВЧ-излучения в рентген. Экспериментально продемонстрировано, что в таком разряде эффективно образуются и возбуждаются многозарядные ионы олова со средним зарядом $6+$, их линейчатое излучение лежит в требуемом диапазоне длин волн. В экспериментах мощность излучения с длиной волны 13,5 нм в полосе $\pm 1\%$ достигала 50 Вт. Преобразование СВЧ-излучения в экстремальный ультрафиолет было на уровне 1 %. На основе проведенных исследований и расчетов предложена концепция создания перспективного точечного источника мягкого рентгеновского излучения с высокой яркостью для проекционной литографии высокого разрешения.

АТМОСФЕРНЫЙ КONTИНУУМ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ И ДИМЕРЫ ВОДЫ

М.Ю. Третьяков, Е.А. Серов, М.А. Кошелев, В.В. Паришин, А.Ф. Крупнов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В докладе представлены полученные результаты и планы дальнейших работ в области исследования физических механизмов, приводящих к возникновению континуального поглощения излучения атмосферой. Практическая важность этой деятельности связана с активно развивающимся глобальным мониторингом атмосферы и поверхности Земли на миллиметровых и субмиллиметровых волнах и возрастающими в связи с этим требованиями к точности моделей распространения излучения.

В соответствии с современными представлениями континуум возникает как результат парного взаимодействия молекул. Все возможные парные взаимодействия молекул разделяются на две группы – на взаимодействие свободных молекул и образование двойных молекул, или димеров, которые могут быть стабильными, если их полная внутренняя энергия меньше энергии диссоциации, или метастабильными, если их внутренняя энергия выше диссоциации. Все три случая парного взаимодействия приводят к дополнительному поглощению излучения. В случае свободных пар оно является результатом кратковременной дополнительной поляризации молекул при столкновениях. В случае образования метастабильного димера спектр его поглощения будет уширен временем его жизни. А в случае связанных димеров дополнительное поглощение соответствует поглощению в резонансных линиях их густого спектра. В атмосферных условиях поглощение, вызванное действием каждого из этих механизмов, имеет плавно меняющийся с частотой нерезонансный характер, а их совместное действие обуславливает весь наблюдаемый в эксперименте континуум. Определение вкладов этих механизмов является задачей, решение которой позволит создать физически обоснованную модель континуума.

Экспериментальные исследования атмосферного континуума в приземном слое показали, что его наибольшая часть обусловлена молекулами воды и что весь наблюдаемый континуум может быть разделен на линейную и квадратичную по парциальному давлению воды части, отвечающие соответственно взаимодействию молекул воды с другими атмосферными молекулами и их взаимодействию между собой.

В докладе демонстрируются результаты анализа высокоточных эмпирических термодинамических данных о состоянии водяного пара, позволяющие оценить суммарное количество двойных молекул, образующихся в водяном паре; результаты анализа высокотемпературных спектров водяного пара, свидетельствующие о присутствии в газе димеров как в связанных, так и в метастабильных состояниях; результаты анализа спектров, возникающих

в результате парного взаимодействия молекул и указывающих на то, что доминирующим механизмом формирования континуума в водяном паре при атмосферных температурах является образование стабильных димеров, и, наконец, результаты экспериментов, бесспорно доказывающих как сам факт существования связанных димеров в водяном паре при комнатной температуре, так и то, что именно ими и обусловлен наблюдаемый континуум.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований.

СОЗДАНИЕ ПЛАЗМЫ ШИРОКОАПЕРТУРНЫМИ ПУЧКАМИ МИКРОВОЛН И ОСАЖДЕНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК С ЕЕ ПОМОЩЬЮ

А.Л. Вихарев, А.М. Горбачев, Д.Б. Радищев, В.В. Чернов, А.В. Козлов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В докладе представлены результаты исследования неравновесной плазмы газового разряда в широкоапертурных пучках микроволнового излучения гиротрона на частоте 30 ГГц. Непрерывный микроволновый разряд поддерживался в области пересечения двух пучков вблизи подложки в смеси аргона, водорода и метана. Эксперименты были проведены при суммарной мощности волновых пучков в диапазоне от 5 до 12 кВт, давлениях газа от 150 до 400 Торр. Разряд имел форму плазменного слоя с диаметром порядка 8 см и толщиной около 0,5 см. Такая форма разряда позволила получить большие удельные энерговыкладки (свыше 200 Вт/см²) в плазму. Концентрация электронов, температура газа, степень диссоциации водорода были измерены методами оптической эмиссионной спектроскопии. С помощью плазмы такого разряда были выращены нанокристаллические алмазные пленки. Приведены их характеристики в зависимости от условий осаждения. Такие пленки являются перспективным материалом для создания микро-электромеханических систем, а также могут быть использованы в качестве эмиттеров в вакуумной микроэлектронике.

СПЕКАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ КЕРАМИКИ ПРИ НАГРЕВЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ ДИАПАЗОНА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

С.В. Егоров, Ю.В. Быков, А.Г. Еремеев

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В последние десятилетия широкое развитие получили исследования процесса высокотемпературного спекания керамики при нагреве материалов микроволновым излучением. Быстрый и однородный микроволновый нагрев позволяет получать керамические материалы с тонкой и однородной микроструктурой, и, как следствие, с улучшенными физико-механическими свойствами. Среди отличительных особенностей микроволнового нагрева, делающих этот метод особенно перспективным для спекания оптически прозрачной керамики, – отсутствие загрязняющих спекаемый материал нагревателей и экранов, инверсное распределение температуры в изделии, способствующее получению керамики с максимальной плотностью. Использование для спекания излучения миллиметрового диапазона (частотой ≥ 24 ГГц) дает дополнительные преимущества по сравнению с излучением традиционного микроволнового диапазона (0,915 и 2,45 ГГц), такие как эффективный нагрев слабопоглощающих материалов, однородный нагрев изделий большого размера, снижение риска возникновения тепловой неустойчивости.

В данной работе приводятся результаты исследования процесса получения оптически прозрачной керамики составов $\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$, Yb:YAG и $\text{Yb:(LaY)}_2\text{O}_3$ при спекании образцов на гиротронном стенде, работающем на частоте 24 ГГц. Образцы различного состава были приготовлены компактированием порошков, полученных различными методами: лазерным испарением мишени ($\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$), коммерческих порошков (Yb:YAG), самораспространяющимся высокотемпературным синтезом ($\text{Yb:(LaY)}_2\text{O}_3$). Температуры спекания варьировались в интервале 1700–1900 °С, время спекания от 2 до 20 часов. Лазерная генерация получена на образцах всех перечисленных составов.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОКЛАСТЕРАМИ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ: МЕТОДЫ И ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

*А.К. Каминский¹, В.Г. Баяев², В.А. Вдовин³, Д.Е. Донец¹,
Э.А. Перельштейн¹, С.Н. Седых¹, С.И. Тютюнников¹*

¹ Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл.

² Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

³ Институт радиотехники и электроники РАН, Москва

Обсуждаются возможные методы измерения эффективности поглощения импульсного СВЧ-излучения мегаваттного уровня мощности резистивными, ферромагнитными и композитными (ферромагнитное ядро и оболочка из благородных металлов) нанокластерами в жидкой среде, в том числе при реализации режима ферромагнитного резонанса. В частности, предполагается использование модифицированного датчика СВЧ-излучения, основанного на термоакустическом эффекте. Приводятся результаты первых экспериментов на базе 30-ГГц МСЭ ОИЯИ – ИПФ РАН.

МИКРОВОЛНОВАЯ БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК

А.Н. Резник, Е.В. Демидов, М.А. Галин

Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

Предложен и экспериментально апробирован метод определения сопротивления R_{sh} полупроводниковой пленки на диэлектрической подложке по данным ближнепольных (БП) микроволновых измерений. Метод базируется на разработанной ранее теории БП-микроскопии плоскостойких сред. Для определения «подгоночных» параметров теоретической модели использована универсальная система калибровочных эталонов – объемно-однородные пластины n-Si различной степени легирования. Экспериментальные исследования выполнены при помощи резонансного зонда диапазона 3 ГГц с апертурой ~1 мм. В качестве тестовых структур исследованы n-GaN пленки толщиной 0,4–2 мкм, сопротивлением 0,03–15 кОм, выращенные на сапфировой подложке. Точность метода оценена путем сравнения данных БП-диагностики с измерениями R_{sh} на постоянном токе по методу Ван-дер-Пау. Для $R_{sh} < 4$ кОм средняя точность оказалась не хуже 20 %.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО АСТРОКЛИМАТА В ПРЕДГОРЬЯХ ВЕРШИНЫ МУС-ХАЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ НАУЧНОГО СТАЦИОНАРА В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЯКУТИИ

*Е.Б. Абашин^{1,2}, Г.М. Бубнов^{1,2}, В.Ф. Вдовин^{1,2,3}, С.Ю. Дрягин^{1,2},
В.К. Дубрович^{2,3}, П.Л. Никифоров^{1,3}, В.И. Носов^{1,3}*

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

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

³ НПП ГИКОМ, Н. Новгород

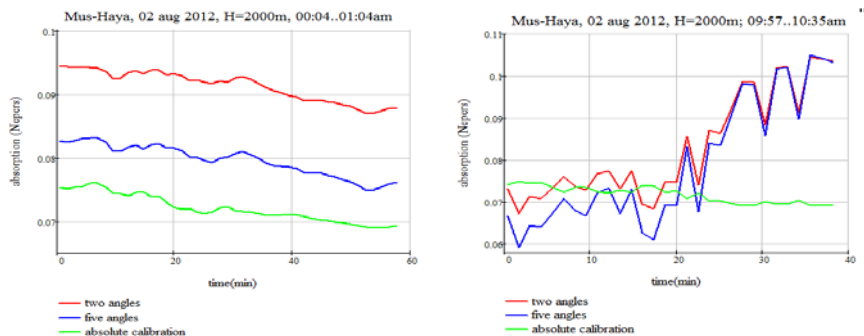
⁴ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, пос. Нижний Архыз,
Карачаево-Черкесская республика

Известно, что в инфракрасном и субмиллиметровом диапазоне длин волн (ТГц-частоты) электромагнитное излучение сильно поглощается в земной атмосфере водяным паром. В результате этот широкий и очень информативный интервал спектра оказывается малодоступным для наземных астрономических наблюдений. Оптимальным, но наиболее дорогим и, как правило, не обслуживаемым, а следовательно, и неремонтопригодным способом является выведение обсерваторий в космос, за пределы земной атмосферы. Хорошее решение представляет собой инструменты на борту высотных шаров и самолетов. Хорошее решение для ТГц-астрономии – установка инструмента в высокогорье (нагорье Атакама, Чили [1]) или на полюсе холода (Антарктика [2]). Однако известно, что в северо-восточной части Якутии в районе п. Оймякон расположен «полюс холода» Северного полушария, где температура зимой опускается ниже -60°C . Принимая во внимание наличие сравнительно высоких гор в этих окрестностях, имеются серьезные надежды найти подходящую площадку для создания в этом районе радиоастрономической ТГц-обсерватории. Для изучения влагосодержания атмосферы летом 2012 года была организована научная экспедиция в предгорья вершины Мус-Хая (высота 2995 м над уровнем моря). Ранее окрестности полюса холода не считались перспективными [3].

Для измерения влагосодержания был использован радиометр 3-мм диапазона, который позволяет методом разрезов оценить интегральное поглощение микроволнового излучения столбом атмосферы [2]. Экспедиция состоялась в июле, в самое теплое время года, когда условия для наблюдений должны быть наилучшими. Очевидно, что в более холодное время года картина будет заметно лучше.

Измерения выполнялись по ходу экспедиции. Тестовые измерения были выполнены в Нижнем Новгороде ($0,15 \pm 0,015 \text{ Нп}$) и Якутске ($0,17 \pm 0,011 \text{ Нп}$). Высота над уровнем моря 152 и 120 м соответственно. Температура воздуха на поверхности в обоих наблюдениях около $+15^{\circ}\text{C}$. Наибольший интерес представляют измерения у подножья горы Мус-Хая в 5–7 км северо-западнее вершины. Координаты лагеря: $62^{\circ}37'8,52''\text{C}$ $140^{\circ}50'9,31''\text{B}$, высота

1980 м. Наблюдения проводились дважды – ночью и утром. Результаты представлены на рисунке.



Измерение атмосферного поглощения

Имеется определенное отличие ночных и дневных результатов. В частности, несколько большее поглощение утром, чем ночью, можно объяснить тем, что вечером с ледников спускался холодный сухой воздух, тогда как утром была безветренная дымная погода (имелось определенное задымление от лесных пожаров в Якутии летом 2012 г.). С другой стороны, нарастание поглощения в утренние часы на 40–50 % можно объяснить существенным ростом температуры, а следовательно, испарением приземной влаги вблизи ледника. Ночью температура была уверенно ниже 0 °С (даже остановилось таяние ледника), а уже к 10 утра воздух разогрелся до +22 °С.

Обработка полученных результатов состояла в разделении полученного поглощения на поглощение в кислороде («сухую» часть) и на поглощение в парах воды с целью составить прогноз по поглощению в других окнах прозрачности ТГц-диапазона. Для этого использовались данные, предложенные в [4]. Количество осажденной воды W вычислялось по формуле (1).

$$\tau_{tot}(\vartheta, h, W) = \alpha(\vartheta) \cdot \exp(-h/h_0) + \beta(\vartheta) \cdot W, \quad (1)$$

где:

τ_{tot} – наблюдаемое полное поглощение (Нп),

h – высота точки наблюдения (км),

W – количество осаждённой воды (мм),

α, β – коэффициенты поглощения (Нп/мм) (см. табл. 1).

После ряда вычислений получено, что «сухая» часть составляет 0,0345 Нп, а на водяной пар ночью приходится 0,0568 Нп, а утром 0,0491 Нп. Это соответствует среднему содержанию воды в атмосфере в течении наблюдений: ночью **4,73 мм** и **4,09 мм** утром.

Таблица 1

Частота (ГГц)	Длина волны (мм)	α [$h = 0$ м] (Нп)	τ_0 [$h = 2$ км] (Нп)	β (Нп/мм)
22,2	13,5	0,013	0,009	0,0060
31,4	9,55	0,028	0,019	0,0015
90,0	3,33	0,041 (!!0.05)	0,027	0,012
115,3	2,60	0,345	0,231	0,019
150	2,00	0,008	0,005	0,033
230	1,30	0	0	0,067
345	0,870	0	0	0,20

Для таких значений осажденной влажности W можно сделать прогноз по поглощению в следующих окнах прозрачности, пользуясь табл. 1 и формулой (1). Все результирующие значения сведены в табл. 2. Погрешность представленных величин не превышает 15 %.

Таблица 2

Частота (ГГц)	Длина волны (мм)	α [$h = 1970$ м] (Нп)	τ_w (Нп) вечер/утро	τ_{tot} (Нп) вечер/утро
22,2	13,5	0,009	0,028/0,024	0,037/0,033
31,4	9,55	0,019	0,007/0,006	0,026/0,025
90,0	3,33	0,034	0,057/0,049	0,091/0,083
115,3	2,60	0,238	0,090/0,078	0,328/0,316
150	2,00	0,0055	0,156/0,134	0,162/0,140
230	1,30	0	0,317/0,274	0,317/0,274
345	0,870	0	0,946/0,818	0,946/0,818

В результате выполненных исследований получила первое подтверждение гипотеза об удовлетворительном астроклимате для наблюдений в ТГц-диапазоне в окрестностях вершины Мус-Хая (северо-восточная Якутия). Даже для условий самого теплого и влажного месяца – июля – интегральное поглощение электромагнитных волн в зените не превышало 0,1 Нп, что дает оценочное значение влагосодержания атмосферы не более 5 мм. Для уточнения перспектив наземных радиоастрономических наблюдений в этом диапазоне требуется дальнейшее детальное исследование астроклимата в режиме круглогодичного мониторинга на одной из высокогорных площадок. Дополнительной задачей экспедиции был подбор удобной для размещения радиотелескопа площадки в окрестностях вершины Мус-Хая и обзор транспортной, информационной и иной инфраструктуры. На данный момент

транспортную инфраструктуру составляют лошади, олени и вертолеты, энергетическую – портативные генераторы, а связь – спутниковые телефоны. Однако в окрестностях лагеря находятся развалины метеостанции, существовавшей там до 60-х годов прошлого века. Там же одновременно с данной экспедицией находилась совместная экспедиция климатологов из Якутского НЦ СО РАН и японского Института глобальных изменений, имеющего давний и серьезный интерес к данной площадке. Небесполезной данная приполярная точка могла бы стать и для исследования динамики стратосферного озона. Для решения всех перечисленных задач можно рассматривать перспективы создания там комплексного стационара.

Авторы благодарят сотрудников ИПФ РАН Ю.Ю. Куликова и И.В. Кузнецова за ценные советы, ЗАО ГИКОМ за беспрецедентно скорую работу по изготовлению аппаратуры, а также коллег из Якутского НЦ СО РАН и Института глобальных изменений (Япония) за содействие экспедиции.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Минобрнауки РФ по постановлению Правительства РФ №220 (договор № 11.G34.31.0029).

1. <http://www.almaobservatory.org>
2. <http://pole.uchicago.edu>
3. Н.В. Васильченко, Н.С. Кардашев, В.И. Мороз, И.К. Морозов, А.Н. Репин, Г.С. Хромов О субмиллиметровой и инфракрасной прозрачности атмосферы на полюсе холода // Астрономический журнал. 1967. № 4.
4. Двухчастотный измеритель атмосферного поглощения в миллиметровом диапазоне волн / И.И. Зинченко, В.И. Носов, П.Л. Никифоров, Л.И. Федосеев, А.А. Швецов, О.С. Большаков // Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии (ВРК-2011)», 17–21 октября 2011 г. : Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 2011. С. 108.
5. Astrophysical Letters, 1980, Vol. 21, pp. 21-28. Improved Correction for Millimeter-Wavelength Atmospheric Attenuation. B.L. Ulich, National Radio Astronomy Observatory.

МОНИТОРИНГ ОЗОННОГО СЛОЯ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ В ПЕРИОД СИЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ СТРАТОСФЕРЫ

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

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

Представлены новые результаты мониторинга вертикального распределения озона над Москвой, выполненного на частотах спектральной линии озона с центром на 142,175 ГГц в период внезапного стратосферного потепления в январе 2012 г. Спектральная аппаратура, методы наблюдений и обработки результатов наблюдений описаны в [1]. Особенностью высот-

но-временного распределения озона в 2011–2012 гг. явились большие изменения содержания озона в январе и в феврале 2012 г. В декабре 2011 г. в стратосфере зарегистрировано пониженное содержание озона, вызванное влиянием полярного вихря, воздух которого охватывал огромную часть пространства, включающего и стратосферу над Московским регионом. В отличие от атмосферной ситуации в декабре 2011 г., воздух с пониженным содержанием озона в стратосфере над Москвой в первой половине января 2012 г. был внутри вихря лишь в слоях стратосферы, расположенных ниже 35 км. В то же время воздух верхней стратосферы (выше 35 км) над Москвой находился вне вихря, но также имел пониженное содержание озона. Пониженное содержание озона в верхней стратосфере в первой половине января 2012 г. было связано с повышенными температурами на этих высотах.

Содержание озона C_{O_3} значительно возросло во второй половине января 2012 г. Так, на высоте 33 км во время этого события величина C_{O_3} изменилась от $4,4 \text{ млн}^{-1}$ 4 января 2012 г. до $7,6 \text{ млн}^{-1}$ 20 января. Анализ атмосферных процессов показал, что причиной столь большого увеличения озона стало сильное возмущение, вызванное внезапным стратосферным потеплением. Полученные в 2012 г. результаты наблюдений озона на миллиметровых волнах важны для установления связей содержания озона на разных высотных уровнях с динамикой и тепловым режимом атмосферы, что существенно для моделирования и прогнозирования изменений в ней.

Работа поддержана программами ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и «Радиоэлектронные методы в исследовании природной среды и человека».

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

ОПТИМИЗАЦИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

С.Н. Седых, А.К. Каминский, Э.А. Перельштейн, В.А. Скадоров

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл.

Выбор нанокластеров с максимальной эффективностью поглощения СВЧ-волны является одной из главных задач при разработке проекта селективного разрушения раковых клеток импульсным излучением 30-ГГц МСЭ-генератора, разработанного в сотрудничестве ОИЯИ и ИПФ РАН. Другие требования к поглотителям – нетоксичность и возможность адресной доставки к опухоли транспортными молекулами – сужают круг возможных

кандидатов. В данной работе аналитически и численным моделированием исследуется эффективность поглощения электромагнитных волн резистивными и ферромагнитными кластерами в широком диапазоне параметров излучения и поглотителей. Рассматриваются возможности повышения эффективности поглощения в резонансных режимах.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИСКАЖЕННОГО ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ОПОРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

А.Ю. Зражевский, В.А. Коротков

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, г. Фрязино, Московская обл.

В процессе формирования и получения (измерения) радиоизображения происходят неизбежные искажения, вызванные различными причинами. Эти причины могут быть обусловлены формирующими изображение (оптическими) системами. Известно [1], что оптические искажения изображения определяются аппаратной функцией (АФ) формирующей системы и производят изменения в пространственном спектре изображения. Для компенсации этих изменений применяются различные методы [1]. Одна из основных проблем, связанных с применением этих методов, вызвана требованием знания параметров всех шумов (помех), влияющих на приемный сигнал. Однако на практике ограничиваются некими «разумными» предположениями о характере и параметрах шумов.

В данной работе применяется альтернативный метод [2], не требующий знания шумов, влияющих на принимаемый сигнал. Этот метод основан на том, что пространственный спектр изображения имеет некоторые свойства, коренным образом отличающиеся от пространственных спектров шумов, искажающих полученное изображение. На примере восстановления изображения, искаженного дефокусировкой и смазыванием сдвигом, показано, что с помощью пространственного спектра «опорного» изображения возможно отфильтровать мешающие шумы.

Неизвестные характеристики шумов могут быть спектрально анизотропными. Это проявляется в виде преимущественно ориентированных «царапин», случайного муара и т.д. Применение метода [2] позволяет отфильтровать и такие шумы.

1. *Р. Гонсалес, Р. Вудс.* Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2005. 1071 с.
2. *Зражевский А.Ю., Кокошкин А.В., Новичихин Е.П., Титов С.В.* Повышение качества радиоизображений // Нелинейный Мир. 2010, № 9. С. 582-590.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА ЗАТУХАНИЯ НА ФОРМУ ДИНАМИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ АНСАМБЛЕЙ ОДНОДОМЕННЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ

С.В. Титов, Ю.П. Калмыков

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, г. Фрязино,
Московская обл.

Проведены исследования по активному воздействию радиоволн на магнитные наночастицы и магнитные суспензии, содержащие магнитные наночастицы. Влияние внешнего переменного поля на динамический магнитный гистерезис, индуцируемый этим полем в магнитных наночастицах, представляет огромный интерес с точки зрения применения этого явления в магнитодинамической гипертермии при лечении в медицине. Теория динамического магнитного гистерезиса в однодоменных магнитных изотропных частицах основана на использовании уравнения Фоккера – Планка для описания броуновского вращения вектора намагниченности во внутреннем потенциале суперпарамагнитной частицы под действием внешнего переменного воздействия.

Показано влияние параметра затухания на форму динамического магнитного гистерезиса для ансамбля суперпарамагнитных наночастиц со случайным распределением осей симметрии. Продемонстрировано, что как площадь динамического магнитного гистерезиса, так и потеря мощности зависит от параметра затухания в широком диапазоне частот (см. рис. 1–2).

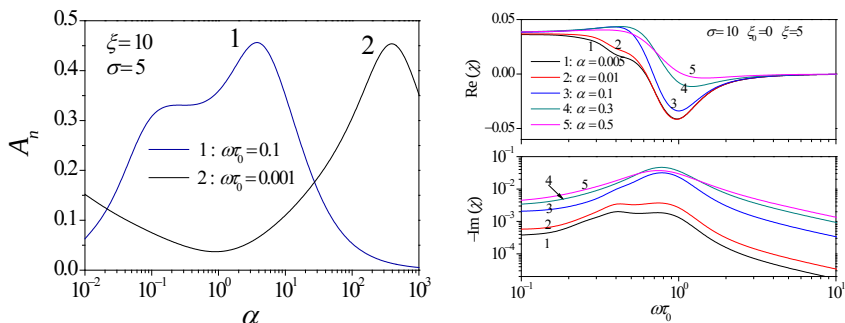


Рис. 1. Площадь кривой динамического магнитного гистерезиса (слева) в зависимости от параметра затухания α в квазистатическом режиме и реальная и мнимая части восприимчивости $\chi(\omega) = 2m_1^2 / \xi$ (справа) в зависимости от нормированной частоты $\omega\tau_0$ в режиме ферромагнитного резонанса.

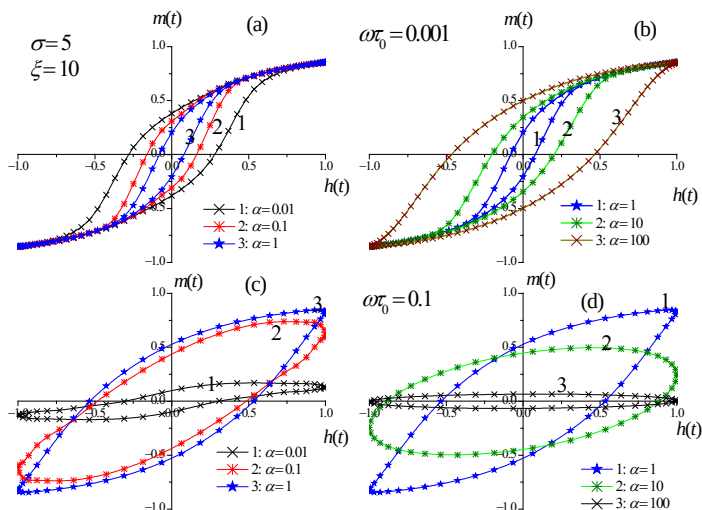


Рис. 2. Кривая динамического магнитного гистерезиса [зависимость $m(t) = M_H(t) / M_S$ от $h(t) = (\xi / 2\sigma) \cos \omega t$] в квазистатическом режиме и на небольших частотах для различных значений параметра затухания α .

В частности, резонансный динамический режим возникает на частотах, близких к ферромагнитному резонансу, при малых и средних значениях амплитуды переменного поля. Этот резонансный режим характеризуется откликом частиц диамагнитного типа и является следствием фазовой задержки (больше $\pi/2$) постоянной нелинейной намагниченности по отношению к приложенному полю. Результаты служат основой для оценки тепловых эффектов в магнитных суспензиях и опубликованы в следующих работах.

1. S.V. Titov, P.M. Déjardin, H. El Mrabti, and Yu.P. Kalmykov. Nonlinear magnetization relaxation of superparamagnetic nanoparticles in superimposed ac and dc magnetic bias fields // Phys. Rev. B 82, 100413(R) (2010).
2. H. El Mrabti, S.V. Titov, P.M. Déjardin, and Yu.P. Kalmykov. Nonlinear stationary ac response of the magnetization of uniaxial superparamagnetic nanoparticles // J. Appl. Phys. 2011. 110, 023901.
3. H. El Mrabti, P.-M. Déjardin, S.V. Titov and Yu.P. Kalmykov. Damping dependence in dynamic magnetic hysteresis of single domain ferromagnetic particles // Phys. Rev. B. 2012. V. 85. P. 094425.
4. B. Ouari, H. El Mrabti, S.V. Titov and Yu.P. Kalmykov. Nonlinear susceptibility and dynamic hysteresis loops of magnetic nanoparticles with biaxial anisotropy // J. Appl. Phys., 2013 (при- нята в печать).

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МНОГОЧАСТОТНОГО МИЛЛИМЕТРОВОГО РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Л.И. Федосеев, А.А. Швецов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Одной из наиболее тяжелых в радиолокации остается до сих пор не решенная проблема эффективного выявления и идентификации объектов. В случае радиотеплолокации кроме всего прочего она отягощена еще и сравнительно низким соотношением сигнал – шум и, как принято считать, невозможностью получения информации о дальности. Однако когда по каким-то причинам невозможно использование средств активной локации, а инфракрасные и оптические средства практически полностью отказывают, например, из-за тумана и пыледымовых помех, приходится обращаться к радиотеплолокационным средствам миллиметрового диапазона длин волн. При этом для выделения и классификации объектов может быть использован ряд признаков. Так, по знаку радиотеплового контраста, очевидно, легко различимы металлические и неметаллические объекты. При наклонном зондировании выделение металлических объектов на фоне неоднородностей местности может быть существенно улучшено с помощью двухполяризационного зондирования. Многолучевое зондирование позволяет не только выделять подвижные объекты, но и определять направление и величину поперечной составляющей скорости их движения. Наконец, в случае высокого углового разрешения антенны и достаточной чувствительности обнаружителя возможно не только прямое построение радиотеплового изображения объекта с помощью сканирующего или матричного приемника, но и выполнение задачи пассивного радиовидения со сверхразрешением.

Однако при работе по предельно удаленным объектам, угловые размеры которых заметно меньше ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны, а время, отведенное на распознавание, ограничено, обычные системы радиовидения оказываются не в состоянии сформировать образ объекта. Но и в таком случае имеется возможность различать типы объектов.

Дело в том, что величины радиотепловых контрастов объектов при прочих равных условиях определяются, прежде всего, конфигурацией этих объектов, а точнее – различным вкладом отдельных характерных частей объектов в величину контраста. Если удалось бы разделить эти вклады, то можно было бы надеяться научиться различать по этим характерным частям и некоторые типы объектов.

В докладе будет показано, что подобное разделение возможно при многочастотном радиотепловом зондировании в области спектра с сильной частотной зависимостью засветки объекта излучением неба, аналогично тому, как это делается при определении и излучательной способности, и термодинамической температуры радиоизлучающего слоя по данным о радиоизлучении подстилающей поверхности на двух частотах. Будет оценено число необходимых спектральных каналов и их ширина, а также даны рекомендации по выбору рабочего диапазона для системы многочастотного зондирования с определением дальности.

Авторский указатель

А

<i>Абашин Е.Б.</i>	117
<i>Агапов Л.Н.</i>	60
<i>Агафонов А.Н.</i>	18
<i>Алешкин В.Я.</i>	23
<i>Андреев В.Г.</i>	17
<i>Андронов А.А.</i>	15
<i>Антонов А.А.</i>	23
<i>Анцыгин В.Д.</i>	26
<i>Арапкина Л.В.</i>	101
<i>Аржанников А.В.</i>	17, 32, 40, 57, 91, 104
<i>Астафьев М.А.</i>	91, 104
<i>Ахмеджанов Р.А.</i>	28, 29, 32

Б

<i>Баев В.Г.</i>	116
<i>Бандуркин И.В.</i>	69
<i>Барышев А.М.</i>	79
<i>Батанов Г.М.</i>	48
<i>Белов С.П.</i>	84, 85, 86
<i>Белов Ю.И.</i>	94
<i>Белоусов В.И.</i>	64
<i>Богданов С.Д.</i>	60
<i>Богдашов А.А.</i>	13
<i>Большаков О.С.</i>	96, 97, 103
<i>Бондарь Ю.В.</i>	48
<i>Борис А.А.</i>	87
<i>Борис А.В.</i>	87
<i>Бородин А.В.</i>	89
<i>Брандт Н.Н.</i>	89
<i>Братман В.Л.</i>	35, 57, 72
<i>Брянцева Т.А.</i>	93
<i>Бубнов Г.М.</i>	83, 117
<i>Бурдаков А.В.</i>	17
<i>Буренин А.В.</i>	84
<i>Бурмасов В.С.</i>	17
<i>Бурцев А.А.</i>	68
<i>Быков Ю.В.</i>	115

В

<i>Вакс В.Л.</i>	19, 109
<i>Вдовин В.А.</i>	17, 116
<i>Вдовин В.Ф.</i>	20, 79, 83, 117
<i>Вельмузов А.П.</i>	105

<i>Венедиктов Н.П.</i>	60
<i>Вихарев А.А.</i>	51, 64, 114
<i>Власов С.Н.</i>	43, 60
<i>Водопьянов А.В.</i>	112
<i>Волков П.В.</i>	94
<i>Володкин Б.О.</i>	18
<i>Воронов Б.М.</i>	77

Г

<i>Гавриленко В.И.</i>	23
<i>Галин М.А.</i>	24, 116
<i>Гельфанд А.В.</i>	91, 104
<i>Гинзбург Н.С.</i>	40, 42, 53, 55, 57, 61
<i>Глявин М.Ю.</i>	13, 35, 42, 49, 61, 73
<i>Голубев С.В.</i>	35, 112
<i>Голубятников Г.Ю.</i>	84, 85, 86, 105
<i>Гольцман Г.Н.</i>	33, 77, 79
<i>Горбачев А.М.</i>	114
<i>Горелик А.Г.</i>	91
<i>Гориков К.Н.</i>	33
<i>Горицунов Б.П.</i>	87, 99, 101, 102
<i>Горюнов А.В.</i>	94
<i>Грибенюков А.И.</i>	99
<i>Гузнов Ю.М.</i>	44, 62
<i>Гурбатов С.Н.</i>	109

Д

<i>Данилов Ю.Ю.</i>	62
<i>Дворецкий С.А.</i>	23
<i>Демидов Е.В.</i>	116
<i>Денисов Г.Г.</i>	13, 64
<i>Додин Е.П.</i>	15
<i>Донец Д.Е.</i>	116
<i>Дрягин С.Ю.</i>	117
<i>Дубинов А.А.</i>	23
<i>Дубрович В.К.</i>	117

Е

<i>Евдокимов В.В.</i>	52, 65, 66
<i>Егоров С.В.</i>	115
<i>Еремеев А.Г.</i>	115
<i>Ермаков А.Б.</i>	25

Ж

Железнов И.В.	61
Жильцов А.В.	95
Жолудев М.С.	23
Жукова Е.С.	87, 99, 101, 102

З

Завгородний А.С.	97
Завольский Н.А.	41, 43, 49, 62, 70
Зайцев Н.И.	44, 62
Закамов В.Р.	94, 106
Запезалов В.Е.	41, 43, 49, 62
Запезалов С.А.	44
Заславский В.Ю.	42, 53, 57, 61
Зинченко И.И.	96
<u>Зорин В.Г.</u>	35
Зотова И.В.	42, 55, 61
Зражевский А.Ю.	122

И

Иванов И.А.	17
Иванцовский М.В.	17
Игнатьев А.Н.	120
Изотов И.В.	35
Иконников А.В.	23
Илларионов И.А.	94
Ильин А.Ю.	52, 65, 66
Иляков Е.В.	53
Иляков И.Е.	28, 29, 32

К

Кавеев А.К.	18
Калинин В.И.	67, 71
Калинин П.В.	57
Калинушкин В.П.	101
Калмыков Ю.П.	123
Калынов Ю.К.	17, 35, 72
Каминский А.К.	116, 121
Капна А.	48
Кардашев Н.С.	78, 79
Каретникова Т.А.	68
Каурова Н.С.	77
Кинев Н.В.	25, 33
Киселев О.С.	25
Кишко С.А.	61
Клушин А.М.	24
Князев Б.А.	18

Козлов А.В.	114
Колик Л.В.	48
Коломиец С.Ф.	91
Командин Г.А.	99
Конченко А.С.	26
Копосова Е.В.	43, 60
Корниенко В.Н.	50
Корнишин С.Ю.	43
Корольков В.П.	26
Коротков В.А.	122
Корчагин В.В.	64
Котов А.В.	64
Котов В.Д.	67, 71
Кошелев М.А.	82, 113
Кошелец В.П.	25, 33
Красильников А.А.	103
Красильникова Л.В.	23
Криворучко В.И.	91
Кропоткина Е.П.	97, 120
Кропотов Г.И.	18
Круглов С.К.	97
Крупнов А.Ф.	113
Кудрявцев К.Е.	23
Кузиков С.В.	44, 51, 56, 62
Кузин А.В.	64
Кузнецов С.А.	17, 57, 91, 104
Кузьмин Л.С.	14
Кузьмин С.Е.	106
Кукин Л.М.	98, 103
Кулагин И.С.	53
Кулешов А.Н.	61
Куликов М.Ю.	103
Кулыгин М.Л.	64
Кунцевич А.Д.	45
Куприянов П.В.	91
Курбатов В.И.	60
Курин В.В.	24
Куфтин А.Н.	43

Л

Латинов А.В.	84, 85, 86, 105
Левичев М.Ю.	24
Леонов И.И.	85
Леснов И.В.	20
Лихачев С.	79
Логвиненко С.В.	97
Лукин А.Н.	97, 120
Лучинин А.Г.	13, 35
Любченко В.Е.	67, 71, 93

М

Малахов Д.В.	48
Мамрашев А.А.	26
Мануилов В.Н.	43, 45, 57
Манькова А.А.	89
Марков И.А.	93
Мартинез Ж.	48
Махалов П.Б.	34, 57, 72
Меклер К.И.	17
Месяц Г.А.	57
Миронов В.А.	29
Михайлов Н.Н.	23
Мишакин С.В.	46, 51
Моисеев М.А.	41
Моисеев М.А.	43, 44, 49, 62
Морозкин М.В.	13, 35
Морозов С.В.	23
Моругин С.Л.	14
Мышенкова Н.	79
Мясин Е.А.	52, 65, 66

Н

Никифоров П.Л.	96, 97, 117
Николаев Н.А.	26
Новиков Е.А.	64
Новожилова Ю.В.	48, 62, 73
Ноздрин В.С.	102
Ноздрин Ю.Н.	15
Носов В.И.	96, 117
Носова Е.В.	96
Нусинович Г.С.	49

О

Ожегов Р.В.	33
-------------	----

П

Павельев В.С.	18
Павельев Д.Г.	27
Пальчикова И.Г.	18
Паршин В.В.	82, 83, 113
Паулиш А.Г.	104
Перельштейн Э.А.	116, 121
Песков Н.Ю.	53, 57
Петелин М.И.	44, 48, 70
Петренко Д.В.	77
Петров А.Е.	48
Петров С.А.	91

Плоткин М.Е.	44
Полосаткин С.В.	17
Попов С.С.	17
Породинков О.Е.	99
Поступаев В.В.	17
Потатуркин О.И.	26
Прохоров А.С.	87, 99, 101

Р

Радзиховский В.Н.	106
Радищев Д.Б.	114
Радченко Д.Е.	67, 71
Разин С.В.	35
Резник А.Н.	116
Ровенских А.Ф.	17
Рожнев А.Г.	68
Розанов С.Б.	97, 120
Романченко И.В.	57
Ростов В.В.	39, 57
Руденко О.В.	109
Румянцев В.В.	23
Рыжов В.С.	95
Рыскин В.Г.	98, 103
Рыскин Н.М.	48, 55, 62, 68, 73
Рябчун С.А.	77

С

Савилов А.В.	56, 69
Садофьев Ю.Г.	15
Саенко И.И.	97
Самойлов Л.Л.	30
Самсонов С.В.	46
Сарксян К.А.	48
Седов А.С.	49, 70
Седых С.Н.	116, 121
Селезнев В.А.	33
Семенов А.Д.	24
Семенов В.Е.	35
Сергеев А.С.	53, 57
Серов Е.А.	82, 83, 113
Сидоров А.В.	35
Синицкий С.Л.	17, 57
Синицын Н.И.	68
Скадоров В.А.	121
Скалыга В.А.	35
Скворцова Н.Н.	48
Скляр В.Ф.	17
Смирнов А.В.	78, 79

<i>Сойфер В.А.</i>	18
<i>Соломонов С.В.</i>	97, 120
<i>Солуянова Е.А.</i>	60
<i>Спектор И.Е.</i>	101
<i>Степанов В.Д.</i>	57
<i>Сторожевых М.С.</i>	101
<i>Ступак М.Ф.</i>	18
<i>Суворов Е.В.</i>	29

Т

<i>Тай Е.М.</i>	44
<i>Телегин С.А.</i>	67, 71
<i>Тимофеев И.В.</i>	32
<i>Титов С.В.</i>	123
<i>Толкачев А.</i>	48
<i>Торгашин М.Ю.</i>	25
<i>Торгашов Г.В.</i>	68
<i>Третьяков И.В.</i>	77
<i>Третьяков М.Ю.</i>	82, 113
<i>Трухин В.Н.</i>	30
<i>Тукмаков К.Н.</i>	18
<i>Тумм М.К.А.</i>	17, 40, 57
<i>Турыгин С.Ю.</i>	79
<i>Тютюнников С.И.</i>	116

У

<i>Уваров О.В.</i>	101
<i>Ульмаскулов М.Р.</i>	57
<i>Усачева С.А.</i>	73

Ф

<i>Фадеев Д.А.</i>	29
<i>Федосеев Л.И.</i>	96, 98, 103, 125
<i>Федотов А.Э.</i>	34, 57, 72
<i>Фейгин А.М.</i>	103
<i>Фефелов А.Г.</i>	15
<i>Филиппенко Л.В.</i>	25, 33
<i>Фильченков С.Е.</i>	70
<i>Финкель М.И.</i>	77

Х

<i>Хайкин В.Б.</i>	106
<i>Харчев Н.К.</i>	48
<i>Хижняк В.И.</i>	43
<i>Хозин М.А.</i>	64

Ц

<i>Цыганкова Е.В.</i>	18
-----------------------	----

Ч

<i>Чапнин В.А.</i>	101
<i>Черепенин В.А.</i>	50
<i>Черкасский В.С.</i>	18
<i>Чернов В.В.</i>	114
<i>Чиж К.В.</i>	101
<i>Чикишев А.Ю.</i>	89
<i>Чопорова Ю.Ю.</i>	18
<i>Чумакова М.М.</i>	73
<i>Чучупал С.В.</i>	99

Ш

<i>Шакир Ю.А.</i>	99
<i>Шалаев П.Д.</i>	68
<i>Шарыпов К.А.</i>	57
<i>Шашкин В.И.</i>	94
<i>Швецов А.А.</i>	96, 98, 103, 125
<i>Шевченко А.С.</i>	44, 62
<i>Ширяев М.В.</i>	20
<i>Шиликин Б.В.</i>	28, 29, 32
<i>Шкуринов А.П.</i>	89
<i>Шпак В.Г.</i>	57
<i>Штанюк А.М.</i>	97
<i>Шунайлов С.А.</i>	57

Щ

<i>Щитов А.М.</i>	98, 103
-------------------	---------

Ю

<i>Юневич Е.О.</i>	67, 71, 93
<i>Юрьев В.А.</i>	101

Я

<i>Яландин М.И.</i>	39, 59
---------------------	--------

В

<i>Benckiser E.</i>	87
---------------------	----

С

<i>Cristiani G.</i>	87
---------------------	----

Д

<i>De Bernardis P.</i>	79
<i>Dressel M.</i>	102

G

<i>Grabov J.-U.</i>	105
<i>Guarnieri A.</i>	105

H

<i>Habermeier H.-U.</i>	87
<i>Haindl S.</i>	102

J

<i>Jellema W.</i>	79
-------------------	----

K

<i>Keimer B.</i>	87
------------------	----

L

<i>Lafkioti M.</i>	87
<i>Lida K.</i>	102

M

<i>Matiks Y.</i>	87
<i>Mueller F.</i>	24

S

<i>Scheller T.</i>	24
<i>Smet J.H.</i>	87

W

<i>Wang H.</i>	25
<i>Wu D.</i>	102

Z

<i>Zapf S.</i>	102
----------------	-----

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научное издание

**IX ВСЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР
ПО РАДИОФИЗИКЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ
И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН**

Тезисы докладов

Оригинал-макет

подготовлен редакционно-издательской группой ИПФ РАН

Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$.

Усл. печ. л. 8,25. Уч.-изд. л. 6,8.

Тираж 150 экз. Заказ № 15(2013)

Отпечатано на ризографе в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46