



Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики РАН



Научно-производственное предприятие
ГИКОМ

XI ВСЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО РАДИОФИЗИКЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

25 – 28 февраля 2019 года, Нижний Новгород

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2019

Секции

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

Программный комитет семинара

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

Ответственный за выпуск О.С. Моченева

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

Формат $64 \times 84 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 7,25. Уч.-изд. л. 6,2.
Тираж 110 экз. Заказ № 10 (2019).

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

СОДЕРЖАНИЕ

Источники и приемники излучения терагерцового диапазона

<i>Гетманов Я.В., Винокуров Н.А., Арбузов В.С., Чернов К.Н., Давидюк И.В., Дэйчули О.И., Дементьев Е.Н., Довженко Б.А., Горбачев Я.И., Князев Б.А., Колобанов Е.И., Кондаков А.А., Козак В.Р., Козырев Е.В., Крутихин С.А., Кубарев В.В., Кулипанов Г.Н., Купер Е.А., Кулцов И.В., Куркин Г.Я., Медведев Л.Э., Мотыгин С.В., Овчар В.К., Осипов В.Н., Петров В.М., Пилан А.М., Попик В.М., Репков В.В., Саликова Т.В., Шевченко О.А., Щеглов М.А., Седяров И.К., Середняков С.С., Скринский А.Н., Тарарышкин С.В., Трибendis А.Г., Ческидов В.Г., Воблый П.Д., Волков В.Н. Новосибирский лазер на свободных электронах</i>	<i>11</i>
<i>Чопорова Ю.Ю., Азаров И.А., Вебер С.Л., Герасимов В.В., Горбачев Я.И., Жукавин Р.Х., Камешков О.Э., Гетманов Я.В., Князев Б.А., Кубарев В.В., Кулипанов Г.Н., Никитин А.К., Павельев В.С., Пельтек С.Е., Петров А.К., Попик В.М., Саликова Т.В., Щеглов М.А., Середняков С.С., Чесноков Е.Н., Шастин В.Н., Шевченко О.А., Винокуров Н.А. Обзор работ на экспериментальных станциях на Новосибирском ЛСЭ</i>	<i>12</i>
<i>Глявин М.Ю. Терагерцовые гиротроны: зарубежные достижения и российские ответы</i>	<i>13</i>
<i>Андронов А.А., Позднякова В.И. Заря терагерцовой графеновой электроники: «подзатворный» плазмонный «клизотрон»</i>	<i>14</i>
<i>Кузьмин Л.С., Благодаткин А.В., Мухин А.С., Пиманов Д.А., Зброжек В.О., Гордеева А.В., Панкратов А.Л., Чигинев А.В. Двухчастотная приемная система на основе антенны типа ракушки с резонансными слотами и болометрами на холодных электронах для космической миссии CORE</i>	<i>15</i>
<i>Гавриленко В.И. Излучатели терагерцового диапазона на основе полупроводниковых наноструктур</i>	<i>17</i>
<i>Гордеева А.В., Панкратов А.Л., Ревин Л.С., Зброжек В.О., Благодаткин А.В., Пиманов Д.А., Кузьмин Л.С. Электронное охлаждение и шумы в болометрах на холодных электронах для современных космологических миссий</i>	<i>18</i>
<i>Запезалов В.Е., Зуев А.С., Куфтин А.Н. Секционирование активной среды для перестройки и повышения рабочей частоты гиротронов (многолучевые и многоствольные схемы)</i>	<i>19</i>
<i>Лаврухин Д.В., Хабибуллин Р.А., Ячменев А.Э., Павлов А.Ю., Гончаров Ю.Г., Спектор И.Е., Зайцев К.И., Пономарев Д.С. Управление спектром генерации терагерцовой фотопроводящей антенны с помощью частотно-зависимой модуляции импеданса</i>	<i>20</i>
<i>Малкин А.М., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Сергеев А.С., Фильченков Е.В. Минимизация стартовых токов релятивистских черенковских генераторов поверхностной волны терагерцового диапазона</i>	<i>21</i>
<i>Румянцев В.В., Уточкин В.В., Куликов Н.С., Жолудев М.С., Фадеев М.А., Алешкин В.Я., Михайлов Н.Н., Гавриленко В.И., Морозов С.В. Конкуренция излучательной и оже-рекомбинации в структурах с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe для лазеров диапазона 5–15 ТГц</i>	<i>22</i>
<i>Суворов Е.В., Миронов В.А., Оладышкин И.В., Фадеев Д.А., Ахмеджанов Р.А., Иляков И.Е., Шишкин Б.В. Модели генерации терагерцовых импульсов</i>	

при наклонном падении фемтосекундных лазерных импульсов на металлические поверхности.....	23
<i>Бандуркин И.В., Опарина Ю.С., Першин Д.С., Савилов А.В.</i> Терагерцовое спонтанное излучение плотных электронных сгустков, стабилизированных по длине.....	25
<i>Павельев В.С., Агафонов А.Н., Тукмаков К.Н., Князев Б.А., Чопорова Ю.Ю.</i> Оптические элементы для управления пучками терагерцового лазера	26
<i>Ревин Л.С., Панкратов А.Л., Вопилкин Е.А., Краев С.А., Мастеров Д.В., Парафин А.Е., Павлов С.А., Яблоков А.А., Чигинев А.В., Гордеева А.В., Ракуть И.В., Зброжек В.О., Благодаткин А.В., Чурин С.А., Кузьмин Л.С., Кулаков А.Б.</i> ВТСП джозефсоновские контакты YBCO и BSCCO для генерации терагерцового излучения	27
<i>Ревин Л.С., Гордеева А.В., Панкратов А.Л., Благодаткин А.В., Зброжек В.О., Ракуть И.В., Кузьмин Л.С.</i> Детектор фотонов на десятки гигагерц на основе алюминиевого джозефсоновского контакта.....	29
<i>Румянцев В.В., Фокин А.П., Дубинов А.А., Маремьянин К.В., Морозов С.В., Глявин М.Ю.</i> Удвоение частоты излучения субтерагерцовых гиротронов за счет решеточной нелинейности в кристаллах фосфида индия.....	29
<i>Бандуркин И.В., Завольский Н.А., Калынов Ю.К., Мануилов В.Н., Ошарин И.В., Савилов А.В., Фикс А.Ш.</i> Непрерывный субтерагерцовый гиротрон на высоких циклотронных гармониках	31
<i>Трухин В.Н., Мустафин И.А., Алексеев П.А., Лебедев С.П.</i> Терагерцовый ближнепольный отклик монослоя графена и структур на его основе.....	32
<i>Суворов Е.В., Миронов В.А., Оладышкин И.В., Фадеев Д.А., Ахмеджанов Р.А., Иляция И.Е., Шишкин Б.В.</i> Генерация терагерцового излучения при оптическом пробое воздуха: теория и эксперимент	33
<i>Кузьмин Л.С., Пиманов Д.А., Чигинев А.В., Гордеева А.В., Панкратов А.Л., Ревин Л.С.</i> Массив щелевых планарных антенн на 220 и 240 ГГц с интегрированными резонансными болометрами на холодных электронах для баллонного телескопа LSPE.....	34
<i>Балакин А.В., Гордиенко В.М., Джиджоев М.С., Кузечкин П.М., Солянкин П.М., Шкуринов А.П.</i> Жидкие и «дискретные» среды в терагерцовой фотонике.....	35
<i>Камешков О.Э., Князев Б.А., Котельников И.А.</i> Дифракция пучков с орбитальным угловым моментом на периодических решетках в терагерцовом диапазоне	36
<i>Князев Б.А., Осинцева Н.Д., Павельев В.С., Тукмаков К.Н., Чопорова Ю.Ю.</i> Управление модовым составом терагерцового излучения Новосибирского лазера на свободных электронах с помощью дифракционных оптических элементов.....	37
<i>Вихарев А.А., Кузиков С.В., Савилов А.В.</i> Лазер на свободных электронах на основе секционированной системы СВЧ-ондуляторов	39
<i>Сафроненков Д.А., Воробьева Е.Д., Кузнецов К.А., Леонтьев А.А., Китаева Г.Х.</i> Терагерцовая спектроскопия кристалла гипотиофосфата олова вблизи температуры сегнетоэлектрического фазового перехода	40
<i>Глявин М.Ю., Морозкин М.В., Проявин М.Д., Фокин А.П., Цветков А.И.</i> Экспериментальное исследование субтерагерцовых гиротронов	42

<i>Фролов А.Д., Кузнецов К.А., Кузнецов П.И., Якушева Г.Г., Китаева Г.Х.</i> Терагерцовая спектроскопия островковых пленок топологических изоляторов $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$	43
---	----

Источники мощного микроволнового излучения

<i>Яландин М.И., Гинзбург Н.С., Голованов А.А., Зотова И.В., Ростов В.В., Шарыпов К.А., Шунайлов С.А.</i> Развитие концепции мощных многоканальных микроволновых генераторов: состояние и перспективы	47
<i>Денисов Г.Г.</i> Мегаваттные гиротроны	48
<i>Гинзбург Н.С.</i> Релятивистские генераторы поверхностной волны с одномерно- и двумерно-периодическими замедляющими системами: теория и эксперимент	49
<i>Голубятников Г.Ю.</i> Перспективы использования гиротронов средней и малой мощности миллиметрового диапазона в молекулярной спектроскопии	49
<i>Ильичев А.В., Быкадоров А.А., Шалацкий А.В.</i> Реализация передатчиков Ка-диапазона на базе миниатюрного трехваттного усилителя мощности	50
<i>Запелалов В.Е.</i> Канонические гиротроны: достижения, проблемы, перспективы	51
<i>Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Куфтин А.Н., Мануилов В.Н., Глявин М.Ю., Железнов И.В., Сергеев А.С., Зотова И.В.</i> Планарные гиротроны на основной и второй гармониках с поперечным дифракционным выводом излучения	52
<i>Иванов А.А.</i> ЛБВ W-диапазона: результаты разработки и возможные пути развития	53
<i>Леонтьев А.Н., Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Ошарин И.В., Розенталь Р.М., Федотов А.Э.</i> Сильноточный релятивистский гиротрон Ка-диапазона длин волн: моделирование и экспериментальное исследование	54
<i>Мясин Е.А.</i> Оротрон с двухрядной периодической структурой диапазона 185...245 ГГц	55
<i>Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В.</i> Захват частоты многомодового гиротрона квазимонохроматическим внешним сигналом	56
<i>Песков Н.Ю., Абубакиров Э.Б., Вихарев А.А., Гинзбург Н.С., Денисенко А.Н., Заславский В.Ю., Кузиков С.В., Савилов А.В.</i> Системы накачки комптоновских ЛСЭ: источники и СВЧ-ондуляторы	57
<i>Петелин М.И.</i> Волновые трансформаторы на основе периодических структур	58
<i>Проявин М.Д., Глявин М.Ю., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Соболев Д.И.</i> Разработка высокоэффективного мощного непрерывного технологического гиротронного комплекса с рабочей частотой 28 ГГц	59
<i>Самсонов С.В., Богдашов А.А., Гачев И.Г., Денисов Г.Г.</i> Исследования гироЛБВ со спирально-гофрированными волноводами в ИПФ РАН: результаты и перспективы	60
<i>Логачев П.В., Бак П.А., Живанков К.И., Кенжебулатов Е.К., Сандалов Е.С., Синицкий С.Л., Сквородин Д.И.</i> Исследование возбуждения собственных электромагнитных колебаний в ускорительных модулях линейного индукционного ускорителя	60
<i>Соболев Д.И., Заславский В.Ю., Гинзбург Н.С., Куфтин А.Н.</i> Система вывода излучения планарного гиротрона	61
<i>Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Павлов А.М., Галушка В.В., Синев И.В., Бахтеев И.Ш., Молчанов С.Ю., Рожнев А.Г., Торгаилов Г.В., Торгаилов Р.А.,</i>	

<i>Рыскин Н.М.</i> Разработка, изготовление и исследование планарных замедляющих структур для устройств вакуумной микроэлектроники миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн	63
<i>Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Тарадаев Е.П., Тумарева Т.А., Тарадаев С.П., Рукавицина А.А., Гиваргизов М.Е., Степанова А.Н.</i> Полевые эмиттеры для высоковольтных миниатюрных электронных устройств, работающих в техническом вакууме.....	64
<i>Федотов А.Э., Белоусов В.И., Махалов П.Б., Мишакин С.В., Проявин М.Д., Соболев Д.И.</i> Волноводные преобразователи мод, изготавливаемые методом 3D-печати из диэлектрика.....	65
<i>Цыганков Р.В., Ростов В.В., Куркан И.К., Яландин М.И., Шарылов К.А., Шпак В.Г., Ульмаскулов М.Р., Шунайлов С.А.</i> Черенковские генераторы миллиметровых волн на основе компактных сильноточных ускорителей с наносекундной длительностью импульса.....	66
<i>Гинзбург Н.С., Вилков М.Н., Зотова И.В., Сергеев А.С., Самсонов С.В.</i> Разработка генератора ультракоротких импульсов на основе винтовой гиролБВ и насыщающегося абсорбера, основанного на циклотронном поглощении излучения прямолинейным электронным пучком	67
<i>Власов С.Н., Запезалов В.Е., Зуев А.С., Куфтин А.Н., Копосова Е.В., Павельев А.Б.</i> Исследование электронной перестройки частоты в гиротроне с эшелетным резонатором.....	67
<i>Гачев И.Г., Гузнов Ю.М., Луковников Д.А., Фильченков С.Е.</i> Вариант коаксиального ввода сигнала в гиротристон на моде шепчущей галереи	68
<i>Махалов П.Б.</i> Алгоритм синтеза диэлектрических волноводных преобразователей.....	69
<i>Железнов И.В., Зуев А.С., Ошарин И.В.</i> Особенности перестройки частоты в гиротронах с секционированными резонаторами	70
<i>Запезалов В.Е., Зуев А.С., Паришин В.В., Серов Е.А.</i> Уменьшение омических потерь в резонаторах субгерцеровых гиротронов малой мощности.....	71
<i>Песков Н.Ю., Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Калинин П.В., Сандалов Е.С., Сергеев А.С., Синицкий С.Л., Степанов В.Д.</i> Разработка мощного генератора поверхностной волны на основе сильноточного ленточного релятивистского электронного пучка	72
<i>Планкин О.П., Запезалов В.Е., Семенов Е.С.</i> Некоторые методы снижения тепловой нагрузки на коллектор гиротрона	74
<i>Проявин М.Д., Соболев Д.И., Песков Н.Ю., Заславский В.Ю., Паришин В.В.</i> Теоретическое и экспериментальное исследование 3D-печатных диэлектрических структур для СВЧ-приложений	75
<i>Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Розенталь Р.М., Сергеев А.С., Федотов А.Э.</i> Импульсная динамика гиротронов с большой надкритичностью	76
<i>Аржанников А.В., Анненков В.В., Иванов И.А., Касатов А.А., Кузнецов С.А., Макаров М.А., Меклер К.И., Полосаткин С.В., Ровенских А.Ф., Самцов Д.А., Синицкий С.Л., Степанов В.Д., Тимофеев И.В.</i> Спектральный состав мегаваттного потока субмиллиметрового излучения, выходящего вдоль оси замагниченного плазменного столба при релаксации в нем килоамперного РЭП.....	77
<i>Семенов Е.С.</i> Исследование технологического гиротрона 28 ГГц новыми инструментами комплекса программ ANGEL	78

<i>Федотов А.Э., Бандуркин И.В., Глявин М.Ю., Зотова И.В., Лучинин А.Г., Морозкин М.В., Розенталь Р.М., Проявин М.Д.</i> Анализ влияния скоростного разброса на ширину полосы перестройки частоты в гиросприборах.....	79
<i>Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Юровский Л.А., Вилков М.Н., Сергеев А.С.</i> Формирование мощных микроволновых импульсов путем предварительного растяжения, последовательного усиления спектральных компонент и последующей компрессии.....	80

Приемники микроволнового излучения, спектроскопия и метрология

<i>Кленов Н.В., Щеголев А.Е., Соловьев И.И., Бакурский С.В., Куприянов М.Ю., Терешонок М.В.</i> Элементная база нейроморфных сигнальных процессоров на основе макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках.....	83
<i>Рудаков К.И., Дмитриев П.Н., Парамонов М.Е., Барышев А.М., Худченко А.В., Хеспер Р., Кошелев В.П.</i> Сверхпроводниковые приемные структуры для новых радиоастрономических проектов.....	84
<i>Смирнов А.В., Александров Ю.А., Андрианов А.С., Архипов М.Ю., Бабакин Н.Г., Барышев А.М., Бирюков А.В., Вдовин В.Ф., Виноградов И.С., Голубев Е.С., Каневский Б.З., Кардашев Н.С., Киселев А.Б., Космович Т.А., Лихачев С.Ф., Ляховец А.О., Мышонкова Н.В., Озолин А.А., Пилипенко С.В., Подобедов Я.Г., Пышинов В.Н., Рудницкий А.Г., Смирнов А.И., Федорчук С.Д., Филина Е.К., de Graaf Th., Халиманович В.И., Черный Р.А., Шипилов Г.В.</i> Космическая обсерватория «Миллиметр».....	85
<i>Гольцман Г.Н.</i> Современное состояние исследований и разработок терагерцевых болометров на горячих электронах.....	86
<i>Палашиов С.А., Ильичев А.В., Шор Е.Д., Осипов Ю.А., Шалацкий А.В.</i> Современное состояние разработки приемников Ка- и Х-диапазонов.....	87
<i>Резник А.Н.</i> Микроволновая микроскопия полупроводниковых структур.....	88
<i>Алексеев Р.А., Лапинов А.В., Голубятников Г.Ю.</i> Субдплеровские исследования спектров изотопологов молекул NH_2D и HC_3N	90
<i>Андрианов М.Н.</i> Возможности увеличения скорости передачи данных в миллиметровом диапазоне радиоволн на линии «космический аппарат – наземная станция слежения».....	91
<i>Балашов А.А., Серов Е.А., Одицова Т.А., Кошелев М.А., Зибарова А.О., Финенко А.А., Чистиков Д.Н.</i> Экспериментальное исследование континуального поглощения в сухих атмосферных газах в миллиметровом диапазоне.....	92
<i>de Bernardis P., Bubnov G., Korotaev D., Masi S., Okunev V., Vdovin V.</i> Olimpo mission: development and results of stratospheric polar balloon sub terahertz observatories.....	93
<i>Лапинов А.В.</i> Исследования параметров 20-м радиотелескопа ОНСАЛА в 3-мм диапазоне.....	94
<i>Шураков А., Михайлов Д., Беликов И., Приходько А., Зильберлей Т., Каурова Н., Воронов Б., Гольцман Г.</i> Изготовление однородной матрицы планарных диодов Шоттки с использованием кельвин-зондовой силовой микроскопии.....	95
<i>Бубукин И.Т., Ракуть И.В., Агафонов М.И., Панкратов А.Л., Яблоков А.А., Троицкий А.В.</i> Прототип двухволновой радиометрической системы	

миллиметрового диапазона для дистанционного зондирования атмосферы, прогноза опасных гидрометеорологических явлений и исследований астроклимата .	96
<i>Коудельный А.В., Бондаренко А.С., Малай И.М., Перепелкин В.А., Семенов В.А., Чирков И.П.</i> Разработка комплекса аппаратных средств высшей точности для измерений мощности электромагнитных колебаний в миллиметровом диапазоне длин волн.....	97

Миллиметровое и субмиллиметровое излучение в прикладных исследованиях

<i>Гущин М.Е., Терехин В.А., Коробков С.В., Стриковский А.В., Айдакина Н.А., Зудин И.Ю., Гундорин В.И., Лоскутов К.Н.</i> Эксперименты со сверхширокополосными электромагнитными импульсами излучения на крупномасштабном плазменном стенде «Крот»: первые результаты и перспективы.....	101
<i>Сидоров А.В., Голубев С.В., Разин С.В., Водопьянов А.В., Веселов А.П., Викторов М.Е., Синцов С.В., Лучинин А.Г., Морозкин М.В., Проявин М.Д., Глявин М.Ю.</i> Газовый разряд в сфокусированных пучках волн терагерцового диапазона частот.....	102
<i>Бирюков В.В., Вакс В.Л., Панин А.Н., Приползин С.И., Раевская Ю.В., Раевский А.С., Щербаков В.В.</i> Разработка приемопередающего устройства связи субтерагерцового частотного диапазона	103
<i>Бубнов Г.М., Вдовин В.Ф., Носов В.И., Землянуха П.М.</i> О корректности измерений оптической толщины атмосферы при помощи широкополосных радиометров	104
<i>Бубукин И.Т., Ракуть И.В., Агафонов М.И., Панкратов А.Л., Троицкий А.В., Лапченко В.А., Горбунов Р.В., Зинченко И.И., Носов В.И., Вдовин В.Ф.</i> Анализ результатов исследования астроклимата на радиоастрономической станции «Кара-Даг» в Крыму и возможностей уменьшения влияния атмосферы на радиоастрономические наблюдения в миллиметровом диапазоне.....	105
<i>Куликов Ю.Ю., Андриянов А.Ф., Демин В.И., Демкин В.М., Кириллов А.С., Козлов Б.В., Рыскин В.Г., Шишаев В.А.</i> Результаты микроволновых наблюдений озона средней атмосферы за Полярным кругом зимой 2017/18 года.....	106
<i>Паршин В.В., Власов С.Н., Копосова Е.В., Корнишин С.Ю., Перминов Д.М.</i> Широкодиапазонные окна для миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов .	108
<i>Скалыга В.А., Выбин С.С., Глявин М.Ю., Голубев С.В., Еремеев А.Г., Изотов И.В., Латин Р.Л., Плотников И.В., Проявин М.Д., Разин С.В., Шапошников Р.А.</i> Непрерывный сильноточный ЭЦР ионный источник	109
<i>Швецов А.А., Большаков О.С., Красильников А.А., Куликов М.Ю., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Серов Е.А., Федосеев Л.И., Леснов И.В., Горьков А.Д., Фейгин А.М.</i> Развитие методов микроволнового дистанционного зондирования в ИПФ РАН.....	110
<i>Сидоров А.В., Разин С.В., Водопьянов А.В., Веселов А.П., Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Морозкин М.В.</i> Теоретическое и экспериментальное исследование порога пробоя мощным терагерцовым излучением в различных газах	112
<i>Голубев С.В., Шапошников Р.А., Изотов И.В., Латин Р.Л., Разин С.В., Сидоров А.В., Скалыга В.А.</i> Формирование широкоапертурных плотных потоков плазмы из ЭЦР-разряда, поддерживаемого излучением гиротрона	113
Авторский указатель	114

**ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ
ИЗЛУЧЕНИЯ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА**

НОВОСИБИРСКИЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

*Я.В. Гетманов^{1,2}, Н.А. Винокуров^{1,2}, В.С. Арбузов¹, К.Н. Чернов¹,
И.В. Давидюк^{1,2}, О.И. Дейчули¹, Е.Н. Дементьев¹, Б.А. Довженко¹,
Я.И. Горбачев¹, Б.А. Князев^{1,2}, Е.И. Колобанов¹, А.А. Кондаков¹,
В.Р. Козак¹, Е.В. Козырев^{1,2}, С.А. Крутихин¹, В.В. Кубарев^{1,2},
Г.Н. Кулипанов¹, Е.А. Купер¹, И.В. Купцов¹, Г.Я. Куркин¹,
Л.Э. Медведев¹, С.В. Мотыгин¹, В.К. Овчар¹, В.Н. Осипов¹,
В.М. Петров¹, А.М. Пилан¹, В.М. Попик¹, В.В. Репков¹,
Т.В. Саликова¹, О.А. Шевченко¹, М.А. Щеглов¹, И.К. Седяров¹,
С.С. Середняков^{1,2}, А.Н. Скринский¹, С.В. Тарарышкин¹,
А.Г. Трибендис^{1,3}, В.Г. Ческидов¹, П.Д. Вобльи¹, В.Н. Волков¹*

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

² Новосибирский государственный университет

³ Новосибирский государственный технический университет

Комплекс «Новосибирский ЛСЭ» включает в себя три лазера на свободных электронах (ЛСЭ), которые установлены на первой, второй и четвертой дорожках многооборотного ускорителя рекуператора (УР). Длина волны излучения первого ЛСЭ перестраивается в диапазоне 90–240 мкм. Излучение данного ЛСЭ состоит из периодической последовательности коротких импульсов, следующих друг за другом с частотой повторения 5,6 или 11,2 МГц. Средняя мощность излучения может достигать значения 0,5 кВт, а пиковая – 1 МВт.

Второй ЛСЭ работает в диапазоне длин волн 40–80 мкм. Частота повторения импульсов излучения составляет 7,5 МГц, а значения средней и пиковой мощности совпадают с первым ЛСЭ. В настоящее время первые два ЛСЭ в своих диапазонах длин волн являются самыми мощными в мире (по величине средней мощности) источниками когерентного узкополосного излучения (с шириной линии менее 1 %).

Третий ЛСЭ был введен в эксплуатацию в 2015 году. Его диапазон длин волн составляет 5–20 мкм. Новосибирский УР является первым и единственным в мире многооборотным ускорителем-рекуператором. Он обладает рядом отличительных особенностей, которые включают в себя использование ускоряющей структуры с нормально проводящими резонаторами, работающими на частоте 180 МГц, использование электростатической электронной пушки с термокатодом и управляющей сеткой, три возможных конфигурации включения магнитной системы и довольно компактные (6×40 м) размеры. В терагерцовом диапазоне Новосибирский ЛСЭ работает на пользователей с 2004 года.

ОБЗОР РАБОТ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ НА НОВОСИБИРСКОМ ЛСЭ

Ю.Ю. Чопорова^{1,2}, И.А. Азаров^{2,3}, С.Л. Вебер⁴, В.В. Герасимов¹, Я.И. Горбачев¹, Р.Х. Жукавин⁴, О.Э. Камешков^{1,2}, Я.В. Гетманов¹, Б.А. Князев^{1,2}, В.В. Кубарев^{1,2}, Г.Н. Кулипанов¹, А.К. Никитин⁵, В.С. Павельев⁶, С.Е. Пельтек⁷, А.К. Петров⁸, В.М. Попик¹, Т.В. Саликова¹, М.А. Щеглов¹, С.С. Середняков¹, Е.Н. Чесноков⁸, В.Н. Шасти⁴, О.А. Шевченко¹, Н.А. Винокуров¹

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

² Новосибирский государственный университет

³ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

⁴ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

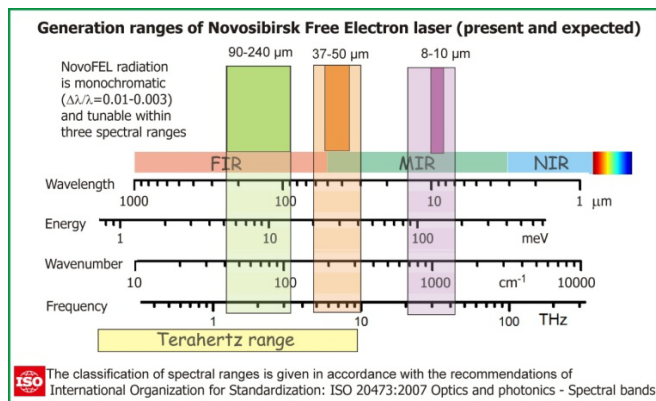
⁵ Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

⁶ Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск

⁷ Самарский государственный университет

⁸ Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ) используется в режиме центра коллективного пользования для проведения широкого спектра научных исследований в области химии, физики, биологии, медицины, а также для исследований нанообъектов. В 2017 году впервые была получена генерация третьей очереди, и в настоящее время работают все три лазерные системы. Первая очередь ЛСЭ генерирует перестраиваемое монохроматическое излучение в терагерцовом спектральном диапазоне от 90 до 240 мкм, диапазон второго лазера охватывает область от 40 до 80 мкм, третий лазер – 5–20 мкм. В работе показан инструментарий, доступный для исследователей на пользовательских станциях, приведены примеры экспериментов, проведенных за три года, прошедших после предыдущей конференции.



ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ГИРОТРОНЫ: ЗАРУБЕЖНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И РОССИЙСКИЕ ОТВЕТЫ

М.Ю. Глявин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Интерес к разработке и приложениям источников достаточно мощного излучения терагерцового (0,1–10 ТГц) диапазона частот непрерывно растет. При этом очевиден взаимный интерес – появление источников инициирует новые приложения, а существующие актуальные задачи требуют создания соответствующих источников излучения. Хотя в мире существует весьма ограниченное количество лабораторий, занимающихся разработкой гиротронов, можно утверждать, что именно интерес к освоению ТГц-диапазона привел к появлению нескольких новых, весьма активных групп.

В данном обзоре представлен ряд наиболее интересных результатов, полученных зарубежными исследователями за время, прошедшее с предыдущего семинара в сопоставлении с близкими работами, выполненными в ИПФ РАН. Сразу необходимо отметить, что в силу ограниченности времени и места данный обзор не претендует на всеохватность.

Одной из наиболее актуальных проблем остается реализация относительно широкополосной перестройки частоты излучения, востребованная целым рядом спектроскопических приложений. Здесь следует отметить значительное число работ по генерации последовательности мод с различными продольными индексами, но только в ИПФ было предложено теоретическое обоснование выбора параметров резонатора, позволяющее расширить полосу перестройки.

Другой пример связан с исследованием зависимости инициации газового разряда от количества свободных носителей заряда в области локализации высокочастотного поля. В серии экспериментов, выполненных в корейском национальном институте науки и технологии, наблюдалась зависимость времени задержки инициации разряда от наличия вблизи радиоактивных источников в экспериментах с гиротроном на частоте 95 ГГц. Следует отметить, что в серии экспериментов с гиротроном на частоте 263 ГГц в ИПФ РАН данный эффект не наблюдался.

Наконец, продолжается поиск оригинальных электронно-оптических и электродинамических систем, позволяющих осуществить селективное возбуждение высших гармоник гирочастоты. Из зарубежных работ наиболее интересной представляется конфокальная схема, а в ИПФ РАН успешно реализованы и гиротрон с приосевым электронным пучком, и многолучевые гиротроны, и приборы с профилированным пространством взаимодействия, позволившие получить рекордные по частоте и мощности результаты.

ЗАРЯ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ГРАФЕНОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ: «ПОДЗАТВОРНЫЙ» ПЛАЗМОННЫЙ «КЛИСТРОН»

А.А. Андронов, В.И. Позднякова

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Обсуждаются недавние результаты по наблюдению усиления при $T = 300$ К (Boubanga-Tombet et al. arXiv: 1801, 04518, 2018) и резонансного детектирования при $T = 10\text{--}77$ К (Bandurin et al. arXiv: 1807, 04703v2) в подзатворных плазмонах на сэндвичах нитрид бора – графен, которые автор доклада считает выдающимися событиями и началом графеновой ТГц-электроники. Эти результаты оказались возможны из-за прогресса в технологии создания таких сэндвичей, благодаря которому появились сэндвичи с подвижностью выше 50000 см²/В·с и дрейфовой скоростью до $(7\text{--}8) \cdot 10^7$ см/с при $T = 300$ К, что позволило вернуться к развитию достаточно старых идей использования подзатворных плазмонов для целей генерации и приема ТГц-излучения.

В докладе представлен механизм (объяснение) наблюдавшегося в работе Boubanga-Tombet et al. перестраиваемого по частоте током поглощения и усиления ТГц-излучения при прохождении ТГц-волны через решетку из металлических затворов над сэндвичем нитрид бора – графен при 300 К. Убедительное объяснение отсутствовало в этой работе. Наш анализ основан на рассмотрении взаимодействия падающей ТГц-волны с отдельным затвором над сэндвичем с током. Рассчитано перестраиваемое поглощение и усиление ТГц-волны при взаимодействии с возбуждаемыми этой волной модами подзатворного плазмона. Перестройка частот вызвана эффектом Доплера волн мод плазмона из-за дрейфа электронов, причем усиление возникает при скорости дрейфа больше скорости плазмона, когда обе волны, составляющие моду плазмона, распространяются вдоль дрейфа. В этом случае энергия ТГц-волны, затрачиваемая на возбуждение мод плазмона при входе дрейфующих электронов под затвор, оказывается меньше, чем энергия, передаваемая ТГц-волне при выходе электронов и плазмонов из-под затвора (при достаточно большом входном сопротивлении возбуждения плазмона и определенным интервалом «угла пролета» плазмонов через затвор). Такая ситуация аналогична процессам в вакуумном клистронном усилителе, поэтому мы и называем предложенную схему усиления *плазмонным клистроном*. На основе этого рассмотрения проведен анализ результатов, полученных в работе Boubanga-Tombet et al. В целом данные этих экспериментов могут быть полностью объяснены проведенными расчетами. Полученная картина, как нам представляется в силу ее «простоты и красоты», просто не может не быть верной. Следует лишь по-другому посмотреть на экспериментальные данные, полученные в работе. Надо учесть роль давления в ди-

намике электронов (что дает существенный вклад в скорость плазмонов), изменить номер плазмонной моды, которая определяет наблюдаемые эффекты, и учесть, что не вся плотность электронов, заданная постоянным напряжением на затворах (как следует из работы), «сидит» в графене. Отметим, что рассчитанное усиление составляет 10–15 % для частот 1–3 ТГц (что несколько больше максимального наблюдавшегося усиления 9 %).

Мы рассматриваем все эти результаты, вместе с недавней демонстрацией Vandurin et al. плазмонного резонансного детектирования в графене, как указание на начало возникновения графеновой ТГц-электроники. Уже полученные результаты позволяют считать, что можно будет на одном сэндвиче интегрировать и излучатель (гетеродин), и детектор (смеситель) и, скорее всего, УПЧ. И наше российское ТГц-сообщество вполне может (должно!!) «вскочить» на этот ТГц-поезд.

ДВУХЧАСТОТНАЯ ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ АНТЕННЫ ТИПА РАКУШКИ С РЕЗОНАНСНЫМИ СЛОТАМИ И БОЛОМЕТРАМИ НА ХОЛОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ МИССИИ CORE

*Л.С. Кузьмин^{1,2}, А.В. Благодаткин^{2,3}, А.С. Мухин^{1,2}, Д.А. Пиманов²,
В.О. Зброжек², А.В. Гордеева^{2,3}, А.Л. Панкратов^{2,3}, А.В. Чигинев^{2,3}*

¹ Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

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

³ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Разработана двухчастотная приемная система на основе антенны типа ракушки с внутренними фильтрами, образованными резонансными слотами и болометрами на холодных электронах (БХЭ) [1]. Поскольку болометры являются широкополосными приемниками, необходимо ставить LC-фильтры, ограничивающие полосу частот. Первым прорывом в области создания нанофильтров было решение об использовании кинетической индуктивности нитрида ниобия, где резонанс был реализован емкостью SIN-перехода и кинетической индуктивностью пленки нитрида ниобия, встроенной в антенну с перекрестными щелями [2]. Однако изготовление пленки нитрида ниобия связано с рядом технологических трудностей [3]. В качестве индуктивного элемента для согласования с емкостью БХЭ мы предлагаем использовать реактивное сопротивление щелевой антенны и копланарной линии.

В качестве прототипа приемной системы мы выбрали двухчастотный одиночный пиксель для частот 75 и 105 ГГц, разрабатываемый для космического проекта SOGrE. Этот пиксель основан на двухчастотной seashell-антенне, состоящей из пар щелевых антенн, соединенных с БХЭ копланарными линиями. Антенна для одной поляризации состоит из двух пар слотов, находящихся на расстоянии половины длины волны друг от друга, для формирования требуемых характеристик луча.

Были разработаны, изготовлены и измерены образцы двухчастотной приемной системы на основе seashell-антенны с внутренними полосовыми фильтрами на резонансных щелях и БХЭ. Измерения образцов seashell-антенны с одной поляризацией проводились при облучении образцов перестраиваемым источником электромагнитного излучения в диапазоне 78–118 ГГц. Были сняты вольт-амперные характеристики (ВАХ). Получен резонансный отклик на частотах 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 118 ГГц, который является разницей между ВАХ без нагрузки и ВАХ под засветкой источником электромагнитного излучения. Также были сняты АЧХ образцов при облучении перестраиваемым источником электромагнитного излучения. Результаты измерений образцов качественно согласуются с численным моделированием в пакете CST. В результате эксперимента обнаружилось некоторое несоответствие между измеренными и полученными теоретически центральными частотами и полосами пропускания. Незначительные разногласия по центральным частотам и полосам пропускания могут быть вызваны изменениями ширины копланарной линии на этапе литографии. На сдвиг частоты может также влиять режим окисления алюминия при изготовлении болометрической структуры, поскольку изменяется емкость SIN-перехода.

Основным преимуществом разработанной технологии является отсутствие дополнительного слоя нитрида ниобия для изготовления кинетической индуктивности, что значительно упрощает процесс изготовления и делает систему более надежной и повышает процент выхода годных образцов при изготовлении.

Работа выполнена в рамках госзадания № 16.2562.2017/ПЧ.

1. *Kuzmin L.S., Blagodatkin A.V., Mukhin A.S., Pimanov D.A., Zbrozhek V.O., Gordeeva A.V., Pankratov A.L., Chiginev A.V.* // *Supercond. Sci. Technol.*, submitted (2018).

2. *Kuzmin L.S.* // *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology*, 4, 314 (2014).

3. *Kuzmin L.S., Mukhin A.S., and Chiginev A.V.* // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28, 2400304 (2018).

ИЗЛУЧАТЕЛИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

В.И. Гавриленко

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Проблема создания компактных источников излучения ТГц-диапазона продолжает оставаться актуальной. В диапазоне 1–5 ТГц и выше 15 ТГц ($\lambda = 20$ мкм) наиболее эффективными излучателями являются квантовые каскадные лазеры (ККЛ) [1]. В интервале 5–15 ТГц в большинстве используемых для создания ККЛ полупроводников АЗВ5 наблюдается сильное фононное поглощение, препятствующей лазерной генерации. Имеются отдельные сообщения о лазерной генерации в этом диапазоне на основе графена и III-нитридов, где частоты оптических фононов значительно выше, однако эти работы пока не получили подтверждения. В то же время еще с 80-х годов известны межзонные лазеры на основе узкозонных твердых растворов PbSnSe(Te), в которых частоты оптических фононов, напротив, низки, а симметрия законов дисперсии электронов и дырок подавляет безызлучательную межзонную оже-рекомбинацию; в наших недавних работах в этом материале продемонстрирована лазерная генерация вплоть до длины волны 50 мкм ($f = 6$ ТГц) [2, 3]. Показано, что лазеры на основе PbSnSe могут быть использованы для лабораторной спектроскопии, однако их характеристики радикально ограничены технологией роста материала: типичная концентрация электрически активных собственных дефектов составляет $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и может быть снижена максимум до 10^{17} см^{-3} путем многомесячного отжига.

Альтернативной узкозонной полупроводниковой системой с «графеноподобным» (близким к линейному) законом дисперсии являются квантовые ямы (КЯ) HgTe/CdHgTe, выращиваемые методом молекулярно-лучевой эпитаксии с концентрацией остаточных примесей на уровне 10^{14} см^{-3} . Как в PbSnSe, в CdHgTe частоты оптических фононов ниже, чем в материалах АЗВ5, а симметричные законы дисперсии электронов и дырок подавляют оже-рекомбинацию. Все это позволяет рассчитывать на создание лазеров, работающих в широком интервале длин волн от 3 до 50 мкм (вплоть до $f = 6$ ТГц). В докладе будут представлены результаты наблюдения стимулированного излучения вплоть до длины волны 20 мкм и результаты исследований характеристик материала на длинах волн до 50 мкм, подтверждающие сделанный вывод.

1. *Vitiello M.S., Scalari G., Williams B., De Natale P.* // Opt. Express, **23**, 5167 (2015).
2. *Маремьянин К.В., Румянцев В.В., Иконников А.В., Бовкун Л.С., Чижевский Е.Г., Засавицкий И.И., Гавриленко В.И.* // ФТП. 2016. **50(12)**, 1697.
3. *Маремьянин К.В., Иконников А.В., Бовкун Л.С., Румянцев В.В., Чижевский Е.Г., Засавицкий И.И., Гавриленко В.И.* // ФТП. 2018. **52(12)**, 1486.

ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И ШУМЫ В БОЛОМЕТРАХ НА ХОЛОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ КОСМОЛОГИЧЕСКИХ МИССИЙ

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

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

² Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

³ Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

Болометры миллиметрового диапазона для космологических миссий находятся в стадии интенсивного развития, благодаря новым задачам, поставленным космологией. Одна из самых актуальных задач детектирования поляризации В-моды реликтового излучения пока не решена из-за того, что существующие детекторы не обладают необходимой чувствительностью. Таким образом, для дальнейшего прогресса требуется создание нового поколения детекторов, которыми могут стать болометры на холодных электронах (cold-electron bolometer), за счет своих преимуществ перед другими типами болометров. Одним из таких преимуществ является исключительно малый объем абсорбера (порядка $0,01 \text{ мкм}^3$), обеспечивающий нечувствительность к космическим лучам, которые являются сильным источником помех для болометров с абсорбером типа паутины (spider-web bolometer). Второе преимущество состоит в самоохлаждении абсорбера, основанном на эффекте электронного охлаждения туннельных СИН-переходов (сверхпроводник-изолятор-нормальный металл). Самоохлаждение позволяет болометру понижать электронную температуру абсорбера, улучшая шумовые свойства, и работать без насыщения в широком диапазоне принимаемых мощностей. Также малый размер болометра на холодных электронах позволяет интегрировать их в различные виды планарных антенн и создавать массивы из сотен болометров в одном пикселе.

В данной работе экспериментально исследованы приемные свойства болометров на холодных электронах и продемонстрировано рекордное электронное охлаждение с 300 мК до 65 мК , достигаемое с помощью охлаждающей мощности СИН-переходов. Также продемонстрирована предельная чувствительность к принимаемому излучению, ограниченная фотонным шумом принимаемого сигнала для температуры детектора 300 мК и ниже.

СЕКЦИОНИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПЕРЕСТРОЙКИ И ПОВЫШЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ГИРОТРОНОВ (МНОГОЛУЧЕВЫЕ И МНОГОСТВОЛЬНЫЕ СХЕМЫ)

В.Е. Запезалов, А.С. Зуев, А.Н. Куфтин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Секционирование активной среды для повышения селекции мод и мощности выходного излучения было предложено много лет назад. В многолучевых гиротронах к основному пучку добавляется один или несколько винтовых электронных пучков. В зависимости от параметров (главным образом, величин осцилляторной и дрейфовой скоростей) дополнительный электронный пучок может быть излучающим или выполнять функцию электронных поглотителей [1, 2]. Многолучевая схема может быть использована и для многочастотной генерации при взаимодействии разных пучков с разными модами. Многочастотная генерация может быть организована последовательно при изменении циклотронной частоты или одновременно (при фиксированном магнитном поле электроны в пучках могут иметь разную энергию и находиться в резонансе с разными модами на разной частоте). В [3] приводятся результаты успешных испытаний нового двухлучевого гиротрона ТГц-диапазона на второй гармонике гирочастоты. В нем наблюдалась генерация целого ряда мод на первой и второй гармониках, что делает такие многочастотные приборы привлекательными для многих приложений.

Многолучевые гиротроны могут в общем случае быть построены на основе тонких (карандашных), ленточных или цилиндрических пучков, находящихся в одной или нескольких плоскостях (см. [2]). Эти системы из пучков разных типов могут быть построены в сочетании с самыми разнообразными электродинамическими системами. При различных параметрах пучков и разной связи между резонаторами могут быть реализованы самые разнообразные динамические и стохастические режимы и, в частности, открывается огромное количество возможностей с точки зрения перестройки частоты. Некоторая техническая сложность таких систем может компенсироваться их уникальными характеристиками.

В качестве примера рассматривается многоствольный гиротрон с несколькими цилиндрическими резонаторами, в каждом из которых имеется приосевой электронный пучок (подобно ГБО [2, 4]). В такой конфигурации эффективный спектр мод значительно реже, чем в обычных гиротронах. Предполагается использование модифицированной магнетронно-инжекторной пушки с азимутально-неоднородной эмиссией электронов. В такой системе с пятью резонаторами показана возможность реализации перестройки в интервале 8 ГГц на частоте около 140 ГГц при работе на основном гирорезонансе. Проведен анализ возможности возбуждения мод

на первой, второй и третьей гармониках с возможностью генерации нескольких частот.

1. *Цимринг Ш.Е.* Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2012. 576 с.

2. *Запевалов В.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 4. С. 305.

3. *Idehara T., Glyavin M., Kuleshov A. et al.* // Review of Scientific Instruments. 2017. V. 88, № 9. P. 094708.

4. *Братман В.Л., Калынов Ю.К., Федотов А.Э.* // ЖТФ. 1998. Т. 68, № 10. С. 91.

УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРОМ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ФОТОПРОВОДЯЩЕЙ АНТЕННЫ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОЙ МОДУЛЯЦИИ ИМПЕДАНСА

Д.В. Лаврухин^{1,2}, Р.А. Хабибуллин^{1,2}, А.Э. Ячменев^{1,2}, А.Ю. Павлов^{1,2}, Ю.Г. Гончаров², И.Е. Спектор², К.И. Зайцев^{2,3}, Д.С. Пономарев^{1,2}

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

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

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

В работе впервые предложен подход к управлению спектром терагерцовых (ТГц) импульсов фотопроводящих антенн-источников (ФПА) с помощью частотно-зависимой модуляции импеданса. Мы предложили теоретическую физико-математическую модель, описывающую процесс генерации ТГц-излучения в ФПА с учетом частотной зависимости импедансов фотопроводника и излучающей антенны. Дополнительно мы провели моделирование фотоотклика антенны-детектора для количественного сравнения теории с экспериментом. Для практической демонстрации влияния частотно-зависимой модуляции импеданса на спектр ТГц-импульса, мы применили разработанную теоретическую модель к широкополосным спиральным ФПА с разной закруткой витков спирали, которые были нами экспериментально изготовлены [1]. Сравнительный анализ показал хорошую корреляцию между результатами моделирования и экспериментом [2], тем самым подтверждая верность предложенного подхода к оптимизации спектра генерации ФПА путем модуляции ее частотно-зависимого импеданса. Результаты исследования могут быть крайне полезны для систем импульсной терагерцовой спектроскопии и изображающих систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-79-10195.

1. *Lavrukhin D.V. et al.* // Proc. SPIE. Optical Sensing and Detection. V 106801M (2018).

2. *Lavrukhin D.V. et al.* // Semiconductor Science and Technology (2018).

МИНИМИЗАЦИЯ СТАРТОВЫХ ТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧЕРЕНКОВСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

*А.М. Малкин, Н.С. Гинзбург, В.Ю. Заславский, А.С. Сергеев,
Е.В. Фильченков*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Релятивистские черенковские генераторы поверхностной волны (ГПВ) перспективны с точки зрения освоения коротковолновых диапазонов, включая терагерцовый, на высоком (мультимегаваттном) уровне мощности. В указанных генераторах за счет возбуждения замедленной прижатой волны, фактически, решается задача селекции мод по поперечной координате, направленной по нормали к замедляющей структуре. Для обеспечения селекции мод по второй поперечной координате было предложено использование двумерно-периодических замедляющих структур. Электродинамическая система ГПВ, работающего в режиме возбуждения «пи»-мод представляет собой металлическую пластину конечной длины с мелкой гофрировкой, формирующую брэгговский резонатор поверхностной волны, который обладает дискретным спектром высокодобротных мод.

В данной работе в рамках квазиоптического подхода получены асимптотические формулы, описывающие частоты и добротности указанных мод в зависимости от параметров. Показано, что радиационная добротность фундаментальной моды растет с увеличением глубины гофрировки, в то время как омическая добротность уменьшается вследствие увеличения степени концентрации поля вблизи гофрированной поверхности. Таким образом, для заданной проводимости металла и длины гофрированного участка можно найти оптимальную глубину гофрировки, при которой значение добротности основной моды резонатора максимально. Соответственно, стартовый ток ГПВ в этой области параметров будет минимален. Моделирование ГПВ производилось как на основе самосогласованной нелинейной модели, включающей параболическое уравнение для описания формирования поперечной структуры поля, так и прямых РИС-кодов.

Полученные результаты могут быть применимы при разработке генераторов терагерцового диапазона частот.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-79-10252.

**КОНКУРЕНЦИЯ
ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ И ОЖЕ-РЕКОМБИНАЦИИ
В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ HgTe/CdHgTe
ДЛЯ ЛАЗЕРОВ ДИАПАЗОНА 5–15 ТГц**

*В.В. Румянцев¹, В.В. Уточкин¹, Н.С. Куликов¹, М.С. Жолудев¹,
М.А. Фадеев¹, В.Я. Алешкин¹, Н.Н. Михайлов², В.И. Гавриленко¹,
С.В. Морозов¹*

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

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

В работе представлены результаты по стимулированному излучению (СИ) в диапазоне длин волн от 10 до 20 мкм и фотолюминесценции вплоть до 32 мкм при импульсной и непрерывной оптической накачке альтернативной квантовым каскадным лазерам гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) на основе HgCdTe/CdHgTe. В отличие от графена, в структурах с КЯ HgTe/CdHgTe можно перестраивать ширину запрещенной зоны путем изменения ширины КЯ и содержания Cd в ней. Оценка пороговой интенсивности накачки для гетероструктур HgCdTe с КЯ с запрещенной зоной 20 мэВ (что соответствует частоте 4,8 ТГц) дает 10 кВт/см² для таких структур. Таким образом, HgCdTe гетероструктуры с КЯ должны обеспечить усиление излучения и в диапазоне 5–15 ТГц.

Важным моментом в данных исследованиях является изучение времени межзонной излучательной рекомбинации, которое классически увеличивается с уменьшением ширины запрещенной зоны. Это препятствует получению эффективной излучательной межзонной эмиссии и как следствие снижает характеристики лазеров на основе таких структур. Излучательная рекомбинация обычно изучалась в квантовых ямах HgTe/CdHgTe с запрещенной зоной в диапазоне 40–140 мэВ с использованием четырехзонной модели Кейна. Рассчитанные нами излучательные времена жизни хорошо согласуются с измерениями кинетики фотопроводимости. Мы показали, что боковые максимумы в энергетическом спектре валентной зоны препятствуют излучательной рекомбинации при высоких концентрациях носителей, и обсуждаем, как преодолеть этот эффект для создания длинноволновых лазеров. В то же время одной из причин снижения вероятности излучательной рекомбинации является увеличение вклада безызлучательной оже-рекомбинации, что в конечном итоге препятствует созданию лазеров. В ходе работы были построены зонные спектры и графическим методом рассчитаны пороговые энергии оже-процесса ряда эпитаксиальных структур с КЯ на основе узкозонных твердых растворов HgCdTe с шириной запрещенной зоны от 60 до 110 мэВ и различным содержанием Cd в яме. Показано, что полученные значения соответствуют разнице энергий потолка валентной зоны и боковых максимумов в первой

валентной подзоне и хорошо согласуются с полученными экспериментально максимальными температурами наблюдения СИ в образцах. На примере наиболее узкозонной структуры продемонстрировано, что переход к более узким ямам из чистого HgTe и барьерам с меньшей шириной запрещенной зоны при сохранении энергий межзонных переходов в КЯ позволяет понизить боковые максимумы в валентной подзоне и, соответственно, повысить вплоть до 45 мэВ пороговую энергию оже-процесса с участием двух электронов и одной дырки. Полученные результаты создают предпосылки для увеличения максимальных рабочих температур излучателей на основе квантовых ям HgTe/CdHgTe в среднем и дальнем ИК-диапазонах.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 17-12-01360.

МОДЕЛИ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

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

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Широкополосные терагерцовые импульсы, состоящие из одного колебания электромагнитного поля, представляют большой интерес для практических приложений в области медицины, неразрушающего контроля, анализа химического состава веществ. Существует множество способов генерации таких импульсов от полупроводниковых терагерцовых антенн до генерации в результате возбуждения колебаний в воздушной плазме оптического пробоя. Генерация ТГц-излучения с поверхности металлов занимает особое место, так как на данный момент получаемые в эксперименте эффективности генерации сравнительно малы. В то же время зависимости эффективности генерации и спектра получаемого ТГц-излучения могут быть важны для изучения свойств электронной подсистемы материала. В этом докладе представлен обзор основных экспериментальных результатов и теоретических моделей генерации ТГц-излучения с поверхности металлов при наклонном падении p -поляризованных лазерных импульсов фемтосекундной длительности. Представлены стрикционная и тепловая модели. Рассмотрен случай структурированной поверхности.

В первой части доклада представлена стрикционная модель генерации ТГц-импульсов с поверхности металла. Эта модель использует гидродинамические уравнения для описания динамики электронов в модели Друде. Учет всех гидродинамических нелинейностей в условиях границы металл – вакуум, идеально отражающей электроны, позволяет определить низкочастотный нелинейный ток, наводимый лазерным излучением. Этот низкочастотный ток сосредоточен вблизи поверхности и имеет сложную структуру, тем не менее последовательное рассмотрение каждого из нелинейных слагаемых в системе гидродинамических уравнений позволяет найти решения задачи излучения для каждой нелинейной компоненты.

Во второй части доклада представлена тепловая модель генерации ТГц-излучения. В этом случае система гидродинамических уравнений дополняется уравнением диффузии энергии неупорядоченного движения электронов. Здесь возникает ряд дополнительных параметров: скорость диффузии, время рассеяния, эффективная частота столкновений электронов. Экспериментальное исследование этих параметров является сложной научной задачей. Анализ полученных данных по генерации ТГц-излучения в такой модели и их сопоставление с экспериментальными данными позволяют сделать выводы о зависимостях вышеописанных характеристик от скорости движения электронов в металле.

В третьей части доклада будут представлены результаты аналитических и численных исследований генерации ТГц-импульсов в тепловой модели при облучении массивов частиц субволнового масштаба и периодически структурированных поверхностей. В последнем случае исследован процесс возбуждения плазмонов, которые существенно увеличивают время взаимодействия электромагнитного излучения на оптических частотах с поверхностью, приводя к существенным изменениям в спектре излучаемых ТГц-импульсов.

Попутно в докладе будут представлены экспериментальные результаты, наблюдавшиеся в нашей и других группах. Наиболее интересным результатом является отсутствие симметрии зависимости эффективности генерации ТГц-излучения от угла падения лазерного излучения на кристаллический висмут, являющийся полуметаллом. Фактически имеет место существенное изменение эффективности генерации при повороте образца на 180 градусов вокруг нормали. Интерпретация этого и некоторых других интересных экспериментальных результатов остается открытой проблемой.

ТЕРАГЕРЦОВОЕ СПОНТАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛОТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ПО ДЛИНЕ

И.В. Бандуркин, Ю.С. Опарина, Д.С. Першин, А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Спонтанное когерентное излучение плотных коротких электронных сгустков, создаваемых на современных фотоинжекторных ускорителях, можно использовать для создания источников мощных электромагнитных импульсов терагерцового частотного диапазона. Для длительного поддержания процесса излучения необходимо стабилизировать фазовый размер сгустка на всем пространстве электронно-волнового взаимодействия. Мы предлагаем два метода обеспечения такой стабилизации, основанных на использовании собственных полей излучения сгустков.

Увеличение продольного размера сгустка можно скомпенсировать в фазовом пространстве в случае циклотронного излучения. При этом группировка электронов по фазам носит двумерный продольно-поперечный характер. Продольная группировка компенсирует поперечную в случае, когда поступательная скорость электронов равна групповой. При этом длина сгустка увеличивается из-за кулоновского взаимодействия между частицами, а фазовый размер сгустка остается неизменным.

В случае ондуляторного излучения имеет место только продольная группировка электронов в фазовом пространстве. Однако если выполнено условие точного группового синхронизма электронов с волной, электронный сгусток садится в «правильную» с точки зрения компрессии фазу: электроны, летящие впереди, оказываются в максимуме тормозящей фазы, а электроны, летящие в «хвосте» – в окрестности нейтральной фазы, таким образом, электронный сгусток компрессируется. Такой процесс самокомпрессии собственным полем излучения можно использовать для контроля размера пучка и его компрессии в двухволновой схеме излучения. В ней используется сразу два ондулятора с разными периодами. Первый ондулятор с относительно длинным периодом обеспечивает спонтанное когерентное излучение вспомогательной (компрессирующей) волны с большей длиной в режиме точного группового синхронизма (сверхизлучение). Самокомпрессия сгустка в поле этой волны ведет к сокращению его длины, что делает возможным уже спонтанную генерацию коротковолнового (терагерцового) излучения в ондуляторе с меньшим периодом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 18-32-00351.

ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПУЧКАМИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ЛАЗЕРА

*В.С. Павельев^{1,2}, А.Н. Агафонов^{1,2}, К.Н. Тукмаков^{1,2}, Б.А. Князев^{3,4},
Ю.Ю. Чопорова^{3,4}*

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева

² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара

³ Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск

⁴ Новосибирский государственный университет

Появление источников когерентного мощного терагерцового излучения [1] открыло новые горизонты для исследований в этом частотном диапазоне [2]. В работах [3–7] приведены результаты исследования силовых кремниевых терагерцовых дифракционных оптических элементов (ДОЭ) – дифракционных линз, фокусаторов, делителей пучка. Для изготовления бинарных (двухуровневых) кремниевых элементов в [3, 4] была использована технология плазмохимического травления. Однако литографическое травление обладает недостатком в случае изготовления элементов с многоуровневым микрорельефом, так как в этом случае требуется сложная процедура совмещения фотошаблонов [8]. Бинарные (двухуровневые) элементы, с другой стороны, обладают ограниченной энергетической эффективностью [8]. Технология лазерной абляции для изготовления кремниевой многоуровневой дифракционной линзы с высокой энергетической эффективностью была впервые использована в [5]. В [6, 7] с помощью аналогичного подхода изготовлены ДОЭ с микрорельефом, близким к непрерывному. Однако дифракционные оптические элементы рассчитаны только на работу с монохроматическим излучением заданной длины волны [8]. Изготовление терагерцовых отражающих элементов свободной формы для работы в достаточно широком спектральном диапазоне рассмотрено в [9]. Алюминиевые элементы (сферические и цилиндрические зеркала, отражающие фокусаторы излучения в заданные области) были изготовлены с помощью технологии микрофрезерования [9]. Изготовленные оптические элементы исследовались в пучке лазера Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ). Измеренная энергетическая эффективность сферического зеркала (>94%) находится в хорошем соответствии с результатами численного моделирования и теоретических расчетов. Исследована возможность применения аддитивных технологий для изготовления оптических элементов терагерцового диапазона.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и при поддержке гранта РФФИ 18-29-03303-мк. Работа выполнена с использованием оборудова-

ния Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения».

1. *Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A.* Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements // *Measurement Science and Technology*, 21 (5), 054017, p. 1–13 (2010).

2. *Kulipanov G.N. et al.* Novosibirsk Free Electron Laser – Facility Description and Recent Experiments // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 5.5, p. 798–809 (2015).

3. *Agafonov A.N. et al.* Focusing of Novosibirsk Free Electron Laser (NovoFEL) radiation into paraxial segment // *Journal of Modern Optics*, 63, 11, p. 1051–1054 (2016).

4. *Agafonov A.N. et al.* Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 49, p. 189–195 (2013).

5. *Volodkin B.O. et al.* Fabrication of a multilevel THz Fresnel lens by femtosecond laser ablation // *Quantum Electronics*, 45, 10, p. 933–936 (2015).

6. *Minkevičius L. et al.* Terahertz multilevel phase Fresnel lenses fabricated by laser patterning of silicon // *Optics Letters*, 42, 10, p. 1875–1878 (2017).

7. *Тукмаков К.Н. и др.* Изготовление методом лазерной абляции и исследование кремниевого фокусатора излучения терагерцового диапазона с непрерывным дифракционным микрорельефом // *Компьютерная оптика*, 2018 (принято к публикации).

8. *Soifer V. A.* Computer Design of Diffractive Optics (Cambridge International Science & Woodhead, 2012).

9. *Pavlyev V.S. et al.* Terahertz optical elements for control of high-power laser irradiation // *EPJ Web of Conferences*, 195, 07006 (2018).

ВТСП ДЖОЗЕФСОНОВСКИЕ КОНТАКТЫ УВСО И ВСССО ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Л.С. Ревин^{1,2}, А.Л. Панкратов^{1,2,3}, Е.А. Вopilкин¹, С.А. Краев¹,
Д.В. Мастеров^{1,2}, А.Е. Парафин¹, С.А. Павлов¹, А.А. Яблоков^{1,2},
А.В. Чигинев^{1,2}, А.В. Гордеева^{1,2}, И.В. Ракуть^{2,3}, В.О. Зброжек²,
А.В. Благодаткин^{1,2}, С.А. Чурин¹, Л.С. Кузьмин^{2,4}, А.Б. Кулаков⁵*

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

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

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

⁴ Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

⁵ Институт физики твердого тела РАН, Черногловка Московской обл.

В докладе рассказывается о работах по созданию генераторов ТГц-диапазона частот на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для задач спектроскопии. Исследуются образцы генераторов как

на основе слоистых сверхпроводников BSCCO, так и на основе планарных структур YBCO.

Для изготовления одиночных мезоструктур BSCCO используется метод быстрого химического травления [1], что позволяет получить мезы с большой толщиной порядка 1–15 мкм. Изготовление таких мез выполнено с использованием гальванического наращивания медной подложки, что позволяет получить жесткие конструкции, устойчивые к механическим повреждениям, а также имеющие хороший теплоотвод, что уменьшает перегрев образцов при больших токах смещения. Были изготовлены образцы с медной подложкой толщиной от 30 до 100 мкм. Изменялись и изучались вольт-амперные характеристики сверхпроводящих образцов при различных температурах от 5 до 60 К и наблюдалась значительная зависимость от условий теплоотвода [2]. Для одного из образцов с помощью ячейки Голея, расположенной снаружи криостата, проведено измерение ТГц-излучения порядка 0,1 мкВт. В ИФМ РАН разработана технология роста монокристаллов BSCCO, основанная на методе Бриджмена, получены первые образцы. Критическая температура этих образцов составляет 84 К, однородность и площадь образцов является достаточной для изготовления мезоструктур.

Для изготовления планарных джозефсоновских контактов на основе тонких пленок сверхпроводника YBCO используется разработанный в ИФМ РАН метод задающей маски, не требующий использования химического травления [3]. Изготовлены образцы с модифицированными антеннами, исследованы вольт-амперные характеристики и с помощью болометров на холодных электронах измерено излучение в диапазоне 0,1–0,8 ТГц.

Работа поддержана грантом РНФ № 16-19-10478 (изготовление и измерение ВТСП джозефсоновских контактов) и ГЗ № 16.2562.2017/ПЧ (измерение ТГц отклика болометрами на холодных электронах).

1. *Vopilkin E.A., Chiginev A.V., Revin L.S., Tropanova A.N., Shuleshova I.Yu., Okhapkin A.I., Shovkun A.D., Kulakov A.B., Pankratov A.L.* // *Supercond. Sci. Technol.* 28, 045006 (2015).

2. *Revin L.S., Vopilkin E.A., Pankratov A.L., Kraev S.A., Yablokov A.A., Kulakov A.B.* // *Supercond. Sci. Technol.*, 31, 104001 (2018).

3. *Masterov D.V., Parafin A.E., Revin L.S., Chiginev A.V., Skorokhodov E.V., Yunin P.A., Pankratov A.L.* // *Supercond. Sci. Technol.*, 31, 104001 (2017).

ДЕТЕКТОР ФОТОНОВ НА ДЕСЯТКИ ГИГАГЕРЦ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО КОНТАКТА

*Л.С. Ревин^{1,2}, А.В. Гордеева^{1,2}, А.Л. Панкратов^{1,2},
А.В. Благодаткин¹, В.О. Зброжек¹, И.В. Ракуть^{1,3}, Л.С. Кузьмин^{1,4}*

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

² Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

⁴ Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

В настоящее время одной из важных проблем является создание однофотонных детекторов ГГц-диапазона частот, что крайне актуально как в русле создания квантовых компьютеров, так и поиска аксионов – частиц темной материи. Коммерчески доступные однофотонные детекторы работают на частотах в десятки терагерц и выше, а на частотах в единицы гигагерц, где энергия фотона на несколько порядков ниже, обнаружить его существенно сложнее. Предлагаемый детектор на основе джозефсоновского контакта является пороговым, при приходе фотона он переключается в резистивное состояние, в связи с чем возникает конечное напряжение, достигающее единиц милливольт. При этом тепловые и квантовые шумы приводят к ложным срабатываниям детектора.

В работе рассматриваются несколько алюминиевых джозефсоновских контактов с разными параметрами критического тока, емкости и нормального сопротивления. Исследованы темновые переключения и показано, что время одного ложного срабатывания может быть увеличено до 3000 секунд и больше. При этом чувствительность детектора к сигналу с частотой 9,5 ГГц и малой мощностью позволяет рассматривать данные образцы в качестве эффективных детекторов фотонов ГГц-диапазона.

Работа выполнена при поддержке МОН (грант 16.2475.2017/ПЧ).

УДВОЕНИЕ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ ГИРОТРОНОВ ЗА СЧЕТ РЕШЕТОЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ В КРИСТАЛЛАХ ФОСФИДА ИНДИЯ

*В.В. Румянцев¹, А.П. Фокин², А.А. Дубинов¹, К.В. Маремьянин¹,
С.В. Морозов¹, М.Ю. Глявин²*

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Работа посвящена генерации интенсивного (мощностью 1–30 Вт) терагерцового излучения (диапазон частот 0,5–2 ТГц) при умножении частоты излучения непрерывных и импульсных гиротронов за счет нели-

нейности в объемных полупроводниковых кристаллах и полупроводниковых структурах. Создание эффективных источников терагерцового диапазона необходимо для множества приложений: спектроскопии, диагностики материалов, мониторинга окружающей среды, радиоастрономии и др. В настоящее время эта задача еще решена не до конца. Вакуумные источники, такие как лампа обратной волны, работающие вблизи 1 ТГц, появились совсем недавно, и их мощность невелика [1]. Газовые лазеры, хотя и работают при комнатной температуре, доступны лишь для некоторого набора частот [2]. На данный момент основной метод получения относительно мощного терагерцового излучения в полупроводниковых структурах сводится к генерации разностной частоты при накачке нелинейных кристаллов параметрическими генераторами света или оптическом выпрямлении импульсов фемтосекундных лазеров [3]. При этом высокая мощность достигается лишь в максимуме импульса длительностью несколько пикосекунд и широким спектром излучения (порядка 1 ТГц), что не всегда приемлемо для спектрометрических применений.

Альтернативным способом получения интенсивного терагерцового излучения является умножение частоты излучения за счет различных типов нелинейности в полупроводниковых структурах. К настоящему времени уже появились альтернативные мощные источники излучения в субтерагерцовом диапазоне: гиротроны с частотой излучения вблизи нижней границы терагерцового диапазона частот с достаточно большой мощностью как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Дальнейшее повышение их частоты ограничено доступными на настоящий момент магнитными полями и трудностями селекции рабочей моды.

В данной работе исследованы возможности генерации второй и третьей гармоники за счет решеточной и электронной нелинейности в различных полупроводниковых материалах: InP, GaAs, GaSb с различной концентрацией носителей (от полуизолирующих до концентрации электронов в диапазоне 10^{15} – 10^{18} см⁻³). Показано, что кристаллы фосфида индия InP:Fe позволяют достичь коэффициента преобразования ~1 %, что соответствует плотности мощности 50–100 Вт/см² на второй гармонике для доступных на настоящее время гиротронов. Приведены экспериментальные результаты по наблюдению второй гармоники гиротронного излучения с помощью фильтра на основе HgCdTe-структур в режиме циклотронного резонанса.

1. *Xiong Xu, Yanyu Wei, Fei Shen, Hairong Yin, Jin Xu et al.* A watt-class 1-THz backward-wave oscillator based on sine waveguide // *Phys. Plasmas*, 19, 013113 (2012); doi: 10.1063/1.3677889.

2. *Dodel G.* On the history of far-infrared (FIR) gas lasers: Thirty-five years of research and application // *Infrared Phys. Technol.*, 40, 127–39. (1999)

3. *Sergey B. Bodrov, Aleksey A. Murzanev, Yury A. Sergeev et al.* Terahertz generation by tilted-front laser pulses in weakly and strongly nonlinear regimes // *Applied Physics Letters*, 103, 251103 (2013).

НЕПРЕРЫВНЫЙ СУБТЕРАГЕРЦОВЫЙ ГИРОТРОН НА ВЫСОКИХ ЦИКЛОТРОННЫХ ГАРМОНИКАХ

*И.В. Бандуркин, Н.А. Завольский, Ю.К. Калынов, В.Н. Мануилов,
И.В. Ошарин, А.В. Савилов, А.Ш. Фикс*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В ИПФ РАН разработан и создается субтерагерцовый гиротрон с большой орбитой электронов (ГБО) непрерывного действия, работающий сразу на нескольких циклотронных гармониках. Этот универсальный генератор рассчитан на малую для высоких гармоник энергию частиц 30 кэВ. В нем при работе на второй, третьей и четвертой циклотронных гармониках в сравнительно слабом магнитном поле до 5 Т может быть получена генерация излучения на востребованных в настоящее время в ЯМР-спектроскопии частотах 0,26; 0,39 и 0,52 ТГц соответственно. Электронно-оптическая система ГБО с реверсом магнитного поля в анодно-катодном промежутке и фактором компрессии магнитного поля более чем в 1000 раз формирует электронный пучок требуемого качества с током до 0,7 А. Разработанный для этого ГБО коллектор, основанный на осаждении приосевого пучка во вращающемся поперечном магнитном поле, способен обеспечить непрерывный режим работы ГБО при рассеянии мощности до 45 кВт.

К настоящему времени проведено экспериментальное тестирование ГБО на второй-третьей гармониках в режиме длинных импульсов (длительности 0,1–60 с) с выводом ГБО в непрерывный режим генерации. В экспериментах использовался традиционный резонатор в виде отрезка слабонерегулярного цилиндрического волновода. Получена устойчивая генерация на модах $TE_{2,5}$ и $TE_{3,7}$ на 2-й и 3-й циклотронных гармониках. Измеренная мощность выходного излучения ГБО при работе на третьей гармонике с частотой 0,3938 ТГц составила 370 Вт, что соответствует КПД около 1,7 %. При работе на второй гармонике выходная мощность и эффективность генератора составили 900 Вт и 4,2 %.

Ослабление электронно-волнового взаимодействия с ростом номера гармоники приводит к тому, что для обеспечения возбуждения ГБО на четвертой циклотронной гармонике (частота 0,52 ТГц) в регулярном резонаторе его длина должна составлять приблизительно 60 длин волн, что соответствует дифракционной добротности более 100 000. В этом случае примерно 95 % мощности, излучаемой электронным пучком, теряется в стенках резонатора. С учетом того, что электронный КПД при переходе на четвертую гармонику также довольно низок (приблизительно 2 %), выходной (волновой) КПД гиротрона в таких условиях оказывается менее 0,1 %. Для решения этой проблемы разработан квазирегулярный секционированный резонатор, в котором пятая продольная мода взаимодейству-

ет с электронами в высокоэффективном и некритичном к разбросу режиме циклотронного резонанса гиротронного типа. Хотя резонатор весьма длинный (около 90 длин волн), дифракционная добротность рабочего колебания составляет менее 30 000, что снижает долю омических потерь до 60 %. При примерно том же (около 2 %) электронном КПД такое снижение омических потерь обеспечивает 8-кратный рост выходной мощности, что соответствует выходному КПД 0,7 % и для рабочего электронного пучка 0,5 А / 30 кВ соответствует выходной мощности около 100 Вт при непрерывной генерации на частоте 0,52 ТГц.

Дальнейшее развитие данного ГБО основывается на возможности формирования качественного электронного пучка при согласованном увеличении ускоряющего напряжения частиц до 45 кВ и рабочего магнитного поля до 6,3 Тл. Это даст возможность значительно расширить частотный диапазон прибора и получить, при работе ГБО на четвертой циклотронной гармонике, генерацию на перспективных для ЯМР-спектроскопии частотах 0,585 и 0,65 ТГц.

Работа поддержана РФФИ (проект 17-19-01605).

ТЕРАГЕРЦОВЫЙ БЛИЖНЕПОЛЬНЫЙ ОТКЛИК МОНОСЛОЯ ГРАФЕНА И СТРУКТУР НА ЕГО ОСНОВЕ

В.Н. Трухин, И.А. Мустафин, П.А. Алексеев, С.П. Лебедев

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

Настоящая работа посвящена исследованию взаимодействия ближнепольной компоненты терагерцового электромагнитного поля с монослойным и многослойным графеном с использованием терагерцового микроскопа ближнего поля. Были исследованы волновые формы терагерцового импульса, возникающего в результате рассеяния терагерцового излучения зондом, ближнее поле которого модифицируется в результате взаимодействия с образцом. Экспериментально было показано, что сила взаимодействия ближнепольной компоненты терагерцового электромагнитного поля с многослойным графеном имеет по порядку ту же величину, как и в случае взаимодействия с поверхностью металла Au. Оказалось, что сила взаимодействия ближнепольной компоненты терагерцового электромагнитного поля с монослойным графеном значительно ниже. Также представлены результаты экспериментального исследования возбуждения и детектирования плазмонных волн терагерцовым зондом в периодических структурах на основе монослойного графена, синтезированных методом локального анодного окисления с помощью сканирующего зондового микроскопа.

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ПРОБОЕ ВОЗДУХА: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

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

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В последние годы генерация импульсного ТГц-излучения в процессе оптического пробоя газов стала достаточно популярной темой исследования. Все новые и более тонкие характеристики генерируемых импульсов становятся доступны в эксперименте, в результате чего требуется постоянное уточнение моделей генерации ТГц-излучения. Важнейшим фактором является то, что низкочастотное излучение имеет длину волны, существенно превышающую характерные поперечные размеры области источника – плазменного канала или «искры». Это делает многие модели эксплуатирующие приближения однонаправленного распространения неприменимыми для изучения процесса генерации ТГц-излучения из области пробоя газа. В среде научных групп, занимающихся лазерно-плазменными механизмами генерации, и сейчас идут споры о настоящей длительности ТГц-импульсов, генерируемых из области оптического пробоя. Одни модели принципиально позволяют описывать только передний, достаточно резкий фронт генерируемого низкочастотного излучения, соответствующий времени огибающей лазерного импульса; другие слишком сложны для проведения расчетов на характерных временах, соответствующих длительности ТГц-импульса, с учетом трехмерного характера задачи и достаточно резких перепадов плотности плазмы, создаваемой лазерным импульсом. В экспериментальных данных также нет полной согласованности касательно спектра генерируемого ТГц-излучения. Часть групп используют методы с потенциальной разрешающей способностью, достигающей длительности падающего лазерного импульса (~20–30 фс), получая при этом спектры, обрывающиеся на 4–5 ТГц; другие группы используют техники, показывающие длинный «хвост» низкочастотного излучения вплоть до 80 ТГц, получая при этом очень короткие терагерцевые импульсы субпикосекундной длительности.

В большинстве экспериментов используется существенно нелинейный режим пробоя воздуха, при котором параметры лазерного импульса и плазменного канала не поддаются аналитическим оценкам. Для получения даже усредненных данных о диаметре канала, предельной концентрации плазмы, амплитуде оптического импульса необходим детальный расчет пробоя газа с учетом всех нелинейных процессов.

В данном докладе будут в основном представлены результаты численных расчетов процессов пробоя газа лазерными импульсами и модельные численные эксперименты по генерации ТГц-излучения из плаз-

менных каналов. Расчеты пробоя газа проводились в аксиальном приближении, но являются при этом достаточно точными в контексте задания начальных условий, качества вычислительных сеток, учета различных нелинейных эффектов. Не всегда эти результаты можно легко использовать для дальнейшего моделирования процесса генерации низкочастотного излучения. Так, например, в некоторых областях плазменного канала образуются очень резкие градиенты – канал в разрезе имеет вид плато с резкими границами. Такие распределения чрезвычайно сложно использовать для последующего трехмерного моделирования процесса излучения ТГц-импульсов. Тем не менее, для модельных задач генерация ТГц-излучения рассматривалась в полной трехмерной модели, для полной системы уравнений Максвелла и линеаризованного второго уравнения гидродинамики для плотности тока.

Существует достаточно большое число вариаций эксперимента по генерации ТГц-излучения: с приложением внешнего электрического поля, с использованием второй гармоники, генерация простым линейно-поляризованным монохроматическим импульсом, генерация импульсом, сфокусированным аксиконной линзой. В рамках модельных расчетов эти методы генерации отличаются скоростью движения и поляризацией источника тока в плазменном канале. Нашей группе удалось интерпретировать множество экспериментальных результатов, наблюдаемых как в наших экспериментальных исследованиях, так и полученных другими группами.

МАССИВ ЩЕЛЕВЫХ ПЛАНАРНЫХ АНТЕНН НА 220 И 240 ГГц С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ РЕЗОНАНСНЫМИ БОЛОМЕТРАМИ НА ХОЛОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ ДЛЯ БАЛЛОННОГО ТЕЛЕСКОПА LSPE

*Л.С. Кузьмин^{1,2}, Д.А. Пиманов¹, А.В. Чигинев^{1,3}, А.В. Гордеева¹,
А.Л. Панкратов^{1,3}, Л.С. Ревин^{1,3}*

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

² Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

³ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

В работе представлены результаты численного моделирования антенной системы, рассчитанной на прием сигнала на частотах 220 и 240 ГГц в полосе частот шириной порядка 5 % от основной частоты. Представлены также результаты предварительных измерений тестовых образцов элементарной ячейки антенной системы. Данная антенная система разрабатывается для применения в составе баллонного телескопа LSPE, предназначенного для исследования реликтового излучения.

В работе рассматривалось два варианта такой антенной системы. Первый вариант представляет собой массив щелевых антенн, соединенных между собой копланарными линиями, в разрывы которых включены болометры на холодных электронах. Провода для питания по постоянному току также выведены копланарными линиями. Такая система позволяет реализовать усовершенствованную конструкцию с однослойной технологией СВЧ-слоя. Моделирование этого варианта антенной системы показало резонансный характер ее частотного отклика с максимумами на 220 и 240 ГГц и с ширинами резонансов близкими к требуемым 5 % от основной частоты. Второй вариант системы представляет собой массив элементарных антенных ячеек, состоящих из двух щелевых антенн и болометра на холодных электронах. Сигнал от щелевых антенн подводится к болометру с помощью копланарных линий. Данный вариант антенны предполагается объединить в массив путем параллельного или последовательного соединения по постоянному току проводами, проходящими под базовым электродом. В качестве считывающей системы будет использоваться СКВИД для параллельного соединения и JFET для последовательного соединения. Моделирование элементарной ячейки такой антенны показало наличие резонанса с полосой менее 5 % от основной частоты.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 16.2562.2017/Пч).

ЖИДКИЕ И «ДИСКРЕТНЫЕ» СРЕДЫ В ТЕРАГЕРЦОВОЙ ФОТОНИКЕ

*А.В. Балакин, В.М. Гордиенко, М.С. Джиджоев, П.М. Кузечкин,
П.М. Солянкин, А.П. Шкуринов*

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

Жидкие среды и их аналоги, которые построены из макрочастиц, служат в последние годы объектом интенсивного исследования с помощью терагерцового излучения. В нашей работе мы используем жидкие газы при криогенных температурах для генерации мощного терагерцового излучения от фемтосекундных лазерных импульсов. Особое внимание при рассмотрении физических основ взаимодействия оптического излучения с жидкими средами уделяется анализу конкуренции процессов ионизации и нелинейности в жидком азоте и в адиабатически замороженных системах. Мы анализируем возможность одновременной генерации как терагерцового, так и рентгеновского и ультрафиолетового излучений в рассматриваемых средах.

ДИФРАКЦИЯ ПУЧКОВ С ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ НА ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕТКАХ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

О.Э. Камешков^{1,2}, Б.А. Князев^{1,2}, И.А. Котельников^{1,2}

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

² Физический факультет, Новосибирский государственный университет

Пучки фотонов с орбитальным угловым моментом (или закрученные пучки) представляют интерес как для фундаментальной физики, так и для различных приложений. В видимом диапазоне имеется много способов генерации таких пучков, например, с использованием пространственных модуляторов света (ПМС). В терагерцовом диапазоне, для которого методы пространственной модуляции еще разрабатываются, дифракционные оптические элементы (ДОЭ) остаются одним из наиболее эффективных и простых устройств для амплитудно-фазовой трансформации пучков. Например, на Новосибирском лазере на свободных электронах (НЛСЭ), являющемся мощным источником терагерцового излучения, для преобразования гауссова пучка в пучки с различным модовым составом используются кремниевые ДОЭ. ДОЭ в рамках физической оптики можно рассматривать как амплитудно-фазовые маски (АФМ). Объекты в некоторых экспериментах, таких как терагерцовая голография и дифракция пучка сложного модового состава на амплитудных и фазовых решетках, также являются АФМ.

Для сопровождения экспериментов на НЛСЭ была написана программа WaveThruMasks в среде Matlab с простым в использовании интерфейсом для моделирования прохождения излучения через оптические системы, состоящие из последовательности амплитудно-фазовых элементов. Расчеты проводились в рамках скалярной теории дифракции. Программа вычисляет интеграл Рэлея – Зоммерфельда в приближении Френеля, используя комбинацию методов импульсного отклика и передаточной функции, которые обеспечивают правильность решения во всей области дифракции Френеля.

В течение года программа широко использовалась для моделирования распространения пучка в различных оптических системах, используемых в экспериментах на НЛСЭ, таких как формирование пучков с различным модовым составом с помощью ДОЭ (эрмит-гауссовы пучки, лаггер-гауссовы пучки и бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом), дифракция пучков на амплитудных и фазовых решетках и т. д. Во всех случаях численные расчеты хорошо совпадали с экспериментальными результатами. Впервые выполненные эксперименты по дифракции на периодических решетках сформированного спиральным фазовым аксико-

ном пучка Бесселя с орбитальным угловым моментом (аналог эффекта Тальбота) показали, что в этом случае в плоскостях Тальбота

$$L_T = \frac{2p^2}{\lambda} \left(N - 1 + \frac{n}{m} \right) = Z_T \cdot \left(N - 1 + \frac{n}{m} \right),$$

где p – период решетки; N, m, n – рациональные числа; λ – длина волны излучения, при некоторых дополнительных условиях возникает периодическая «решетка» кольцевых пучков с орбитальным угловым моментом, пространственная частота которой подчиняется тому же закону, что и самоизображения в классическом эффекте Тальбота. Численные эксперименты позволили исследовать это явление при большем числе параметров, чем в эксперименте, и выявить параметрические зависимости. Число параметров в этом случае больше, чем в случае классического эффекта Тальбота. Найденные зависимости показали, что дифракционные картины, наблюдаемые в плоскостях Тальбота, имеют простую геометрию, что предполагает существование изящного аналитического решения для их описания. Эта задача в значительной мере уже решена. Первые результаты будут представлены в данном докладе. Мы надеемся вскоре завершить эту работу и опубликовать окончательные результаты.

УПРАВЛЕНИЕ МОДОВЫМ СОСТАВОМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОВОСИБИРСКОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Б.А. Князев^{1,2}, Н.Д. Осинцева¹, В.С. Павельев^{3,4}, К.Н. Тукмаков^{3,4},
Ю.Ю. Чопорова^{1,2}*

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

² Новосибирский государственный университет

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

⁴ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

Для эффективного применения терагерцового лазерного излучения в различных приложениях требуется создание элементов, позволяющих управлять поперечно-модовым составом пучка. Представляется актуальным использование опыта управления поперечно-модовым составом пучка с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в оптическом диапазоне [1] для уплотнения каналов связи телекоммуникационных систем терагерцового диапазона. Возможность повышения устойчивости терагерцового лазерного пучка к неоднородностям среды с помо-

щью управления его поперечно-модовым составом важна для перспективных лидарных терагерцовых систем. Таким образом, актуальными задачами являются создание и исследование ДОЭ, предназначенных для формирования из освещающего пучка терагерцового лазера пучков с заданным поперечно-модовым составом. Ранее были изготовлены и исследованы ДОЭ, преобразующие гауссов пучок Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) в гауссовы [2] и бесселевы [3–5] одно-модовые пучки (формировались и исследовались моды Гаусса – Эрмита, Гаусса – Лагерра, а также моды Бесселя с орбитальным угловым моментом). Изготовленные элементы представляли собой фазовые пластинки с бинарным микрорельефом. Элементы были выполнены методом плазмохимического травления подложки из высокоомного кремния. Высота рельефа ДОЭ зависит от длины волны падающего излучения, и в случае бинарного элемента составляла $\Delta h = \lambda/2 (n - 1) = 29,1$ мкм, где $\lambda = 141$ мкм – длина волны излучения лазера, $n = 3,42$ – коэффициент преломления кремния. Энергетическая эффективность элементов, измеренная в ходе экспериментов, составила 21–35 %. Основные потери энергии приходятся на френелевское отражение – около 49 %, но этого можно избежать при нанесении антиотражающего покрытия из парилена, как это было сделано в [6].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения».

1. Дифракционная компьютерная оптика / Под ред. В.А. Соифера. – М. : Физматлит, 2007. 736 с.

2. Agafonov A.N., Choporova Yu.Yu., Kaveev A.K., Knyazev B.A., Kropotov G.I., Pavelyev V.S., Tukmakov K.N., Volodkin B.O. Control of transverse mode spectrum of Novosibirsk free electron laser radiation // *Applied Optics*, 2015, **54**, №12, 3635–3639.

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

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

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

6. Agafonov A.N., Volodkin B.O., Kachalov D.G., Knyazev B.A., Kropotov G.I., Tukmakov K.N., Pavelyev V.S., Tsyphishka D.I., Choporova Y.Yu., Kaveev A.K. Focusing of Novosibirsk Free Electron Laser (NovoFEL) radiation into paraxial segment. *Journal of Modern Optics*, 2016, **63**, N 11, 1051–1054.

ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ НА ОСНОВЕ СЕКЦИОНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ СВЧ-ОНДУЛЯТОРОВ

А.А. Вихарев, С.В. Кузиков, А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В настоящее время наиболее интенсивное рентгеновское излучение получено в ЛСЭ, работающих на основе ондуляторов на постоянных магнитах и электронных пучках с энергией частиц более 10 ГэВ. Поскольку получение таких пучков требует ускорителей с километровой длиной, перспективным является создание компактных рентгеновских лазеров. Требованиям компактности могли бы удовлетворить ЛСЭ с микроволновыми ондуляторами, в которых раскачка электронов осуществляется полем встречной коротковолновой СВЧ-волны. Более короткая эффективная длина волны накачки обеспечивает существенное снижение энергии электронов, необходимое для достижения рентгеновского диапазона. Одна из основных проблем здесь – трудность запитать протяженную систему электронно-волнового взаимодействия ЛСЭ одним мощным СВЧ-источником, что делает необходимым секционирование системы и, вообще говоря, фазовую синхронизацию источников, запитывающих разные секции системы. Еще одной проблемой рентгеновских ЛСЭ является слабость электронно-волнового взаимодействия, что ведет к низким КПД на стадии насыщения и сильной критичности к скоростному разбросу электронов сгустка.

Авторами предложен новый режим электронно-волнового взаимодействия, который (i) реализуется в секционированных системах, (ii) не требует фазировки ондуляторных полей от секции к секции, и (iii) может обеспечить высокий КПД электронно-волнового взаимодействия даже при использовании рабочего электронного сгустка с большим энергетическим разбросом. Этот режим основан на использовании последовательности СВЧ-ондуляторов с профилированными резонансными параметрами, которые запитываются независимыми мощными импульсными СВЧ-генераторами. Путем накопления от секции к секции энергии, отданной электронным пучком усиливаемой волне, можно реализовать систему с высоким КПД при использовании электронного пучка с большим энергетическим разбросом.

Принципиальной особенностью данного режима является то, что для его реализации не требуется сфазированность (фазовая корреляция) ондуляторных секций. Это позволяет использовать предложенный метод в ЛСЭ с системой последовательных секций коротковолновых СВЧ-ондуляторов, которые запитываются независимыми мощными импульсными СВЧ-генераторами. В частности, может быть использована система

так называемых «летающих ондуляторов». Каждый такой ондулятор представляет собой мощный СВЧ-импульс, распространяющийся в волноводе вместе с рабочим электронным пучком ЛСЭ. Хотя групповая скорость ондуляторного импульса положительна, большой фактор доплеровского преобразования частоты при комптоновском рассеянии такого СВЧ-импульса на частицах достигается путем использования гофрированного волновода, в результате чего в ондуляторном СВЧ-поле присутствует (-1)-я пространственная гармоника с отрицательным волновым числом (отрицательной фазовой скоростью). Использование в качестве источника ондуляторного поля релятивистской черенковской лампы обратной волны (30 ГГц, 10 нс, 1 ГВт) может обеспечить СВЧ-ондулятор с эффективной длиной 10 м, эффективным фактором ондуляторности 0,3 и периодом около 5 мм. Прототипы профилированных микроволновых систем таких ондуляторов рассчитаны, изготовлены и протестированы. Профилирование эффективного ондуляторного периода осуществляется профилированием параметров гофрировки волновода. Характерный эффективный ондуляторный период в таких системах составляет 5,5 мм, причем на длине порядка метра оказывается возможным обеспечить профилирование ондуляторного периода с координатой, при котором он спадает (от начала секции к концу) приблизительно на 20 %. Согласно расчетам, предложенный подход позволяет реализовать рентгеновский ЛСЭ, в котором при использовании плотных пучков электронов с относительно большим энергетическим разбросом, формирующихся в современных лазерно-плазменных ускорителях, может быть достигнут КПД на уровне нескольких процентов.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-02-00765. Часть работ выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение научных исследований по теме № 0035-2014-0013.

ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КРИСТАЛЛА ГИПОТИОДИФОСФАТА ОЛОВА ВБЛИЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

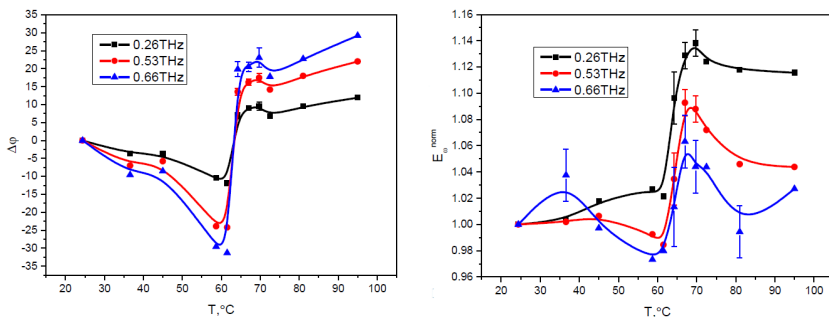
*Д.А. Сафроненков, Е.Д. Воробьева, К.А. Кузнецов, А.А. Леонтьев,
Г.Х. Китаева*

Физический факультет Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова

Кристаллы гипотиодифосфата олова $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ (SPS) интенсивно исследуются в связи с их возможным использованием в устройствах сверхбыстрой оптической памяти. По аналогии со сверхбыстрым оптиче-

ским магнетизмом [1], принципы сверхбыстрого оптического сегнетоэлектричества также могли бы применяться в устройствах памяти. Малое коэрцитивное поле и наличие мягкой моды в кристаллах SPS дают гипотетическую возможность переключения поляризации доменов внешним терагерцовым полем. В настоящее время эти процессы успешно реализованы для некоторых сегнетоэлектриков [2].

При комнатной температуре кристалл SPS является сегнетоэлектриком-полупроводником с шириной запрещенной зоны 2,35 эВ. При нагреве вблизи температуры $\sim 64^\circ\text{C}$ кристалл переходит в параэлектрическую фазу. Методом терагерцовой спектроскопии временного разрешения нами исследовался кристалл SPS в схеме на отражение в диапазоне частот от 0,1 до 0,7 ТГц. Источником оптической накачки служил эрбиевый волоконный лазер с длительностью импульсов 100 фс и частотой повторения 70 МГц. С помощью двух параболических зеркал терагерцовое излучение антенны собиралось на исследуемый образец, находящийся в термостабилизированной ячейке. Температура ячейки варьировалась в диапазоне $25\text{--}95^\circ\text{C}$. Далее отраженное излучение собиралось дополнительными параболическими зеркалами и регистрировалось второй фотопроводящей антенной. При прохождении через точку фазового перехода в спектрах отраженных волн, поляризованных вдоль кристаллографической оси X , нами наблюдались существенные изменения как амплитуды, так и фазы сигнала. В работе обсуждается возможность влияния мягкой моды на наблюдаемые изменения в спектрах отражения в терагерцовом частотном диапазоне.



Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-02-00258 и 18-29-20101.

1. Калашникова А.М., Кимель А.В., Писарев Р.В. Сверхбыстрый оптомагнетизм // УФН. 2015. Т. 185. С. 1064–1076.

2. Hauf C. et al. Soft-mode driven polarity reversal in ferroelectrics mapped by ultrafast x-ray diffraction // Structural dynamics, 5, 024501 (2018).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ ГИРОТРОНОВ

*М.Ю. Глявин, М.В. Морозкин, М.Д. Проявин, А.П. Фокин,
А.И. Цветков*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Активное развитие приложений излучения субтерагерцового диапазона частот обуславливает направление развития источников. В Институте прикладной физики РАН активно разрабатываются и исследуются гиротроны как среднего уровня мощности [1], так и прототипы гиротронов для установок управляемого термоядерного синтеза нового поколения [2].

В докладе представлены результаты экспериментов с гиротронами различных частотных диапазонов. Для гиротрона с частотой 263 ГГц выполнена модернизация измерительных систем и системы управления автоматизированного гиротронного комплекса и показана возможность расширения диапазона перестройки частоты излучения за счет вариации температуры резонатора гиротрона, представлены результаты исследования спектра излучения.

Для мощного гиротрона с рабочей частотой 250 ГГц представлены результаты численного моделирования процессов электронно-волнового взаимодействия и полученные в эксперименте уровни мощности. Приведены параметры перспективного гиротрона, работающего на второй гармонике циклотронной частоты, предназначенного для задач спектроскопии.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 17-02-00183.

1. *M. Glyavin et al.* Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // *Rev. Sci. Instr.*, 86(5), 054705 (2015).

2. *G.G. Denisov et al.* First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics // *Review of Scientific Instruments*, 89, 084702 (2018).

ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ОСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОК ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ

$\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$

*А.Д. Фролов¹, К.А. Кузнецов¹, П.И. Кузнецов², Г.Г. Якущева²,
Г.Х. Кутаева¹*

¹ Физический факультет Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова, Фрязино Московской обл.

В последнее время внимание многих исследователей во всем мире приковано к принципиально новым материалам – топологическим изоляторам (ТИ), которые характеризуются наличием устойчивых («топологически защищенных») проводящих поверхностных состояний электронного газа [1]. В данной работе исследовалось пропускание/отражение терагерцового излучения в пленках четверных составов топологических изоляторов $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$. Пленки топологических изоляторов различной толщины и химического состава были выращены МOCVD-методом на подложках сапфира (0001) с нанесенным тонким буферным слоем ZnSe.

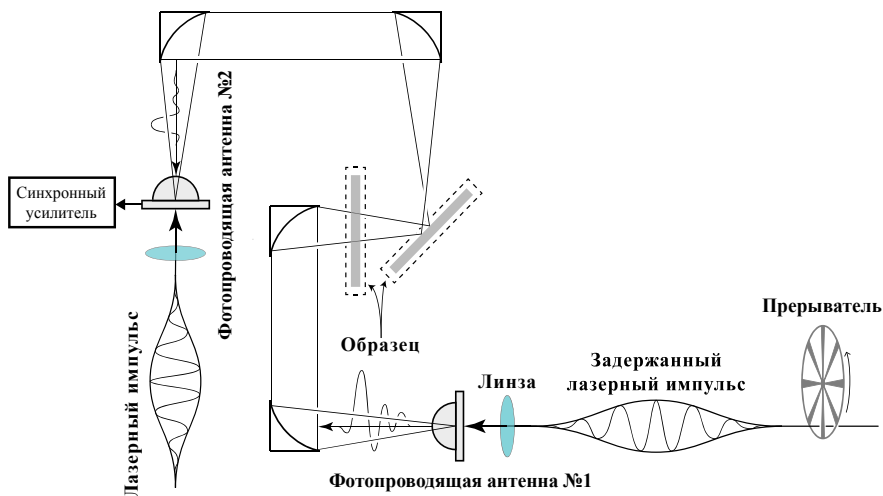


Схема экспериментальной установки

Образцы топологических изоляторов исследовались методом терагерцовой спектроскопии временного разрешения в диапазоне частот от 0,1 до 0,7 ТГц (см. рисунок). Источником оптической накачки служил

эрбиевый волоконный лазер с длительностью импульсов 100 фс и частотой повторения 70 МГц. Через линию временной задержки излучение накачки заводилось на излучающую фотопроводящую антенну №1. Далее с помощью двух параболических зеркал терагерцовое излучение, испускаемое антенной, собиралось на исследуемый образец. Установка могла работать в схеме как на пропускание, так и на отражение. Затем прошедшее/отраженное излучение фокусировалось дополнительными параболическими зеркалами и регистрировалось фотопроводящей антенной №2, сигнал с которой поступал на вход синхронного усилителя. На основании измеренных спектров пропускания/отражения была измерена дисперсия проводимости топологических изоляторов в терагерцовом диапазоне спектра.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-20101 мк.

1. *Тарасенко С.А.* Электронные свойства топологических изоляторов. Структура краевых состояний и фотогальванические эффекты // УФН. 2018. Т. 188. С. 1129–1134.

**ИСТОЧНИКИ
МОЩНОГО МИКРОВОЛНОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ МОЩНЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

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

¹ Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

³ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

В докладе представлено состояние исследований фазово-стабильных релятивистских СВЧ-генераторов. Задачей является синфазная работа генераторных приборов с сильноточными пучками, что при когерентном суммировании излучения обеспечивает получение в свободном пространстве направленных волновых пучков с высокой интенсивностью. Кооперацией институтов РАН анализируются практические условия, влияющие на возбуждение релятивистских ламп обратной волны (ЛОВ) со стабильной от импульса к импульсу фазой. Рассматриваются два способа фиксации и управления фазой генерации в индивидуальном канале. При электронной методике фиксация фазы ЛОВ определяется коротким фронтом тока пучка – источником затравочного электромагнитного сигнала. Альтернативный способ (электромагнитная фазировка) обеспечивается внешним радиоимпульсом.

Режим электронной фазировки генерации определяется стабильностью фронта электронного пучка. Показано, что фиксация фазы облегчена дополнительным кинематическим обострением субнаносекундного фронта тока, в результате чего возможна пониженная чувствительность к амплитудному разбросу ускоряющего импульса на катоде и допускается применение импульсов напряжения с более длинным фронтом, имеющим на начальном участке быстрый перепад.

Для электромагнитной фазировки определена требуемая мощность затравочного сигнала в условиях конкуренции с электронной фазировкой и без нее, а также при наличии шумов пучка. Шумы взрывоэмиссионного пучка с графитового катода регистрировались в специальных экспериментах в полосе частот до 60 ГГц и имели выраженные спектральные максимумы. Экспериментальный факт изменения длительности переходного процесса ЛОВ при вариации мощности и фазы внешней затравки получил теоретическую интерпретацию. Рассмотрен случай фазировки ЛОВ при большой длительности внешнего затравочного сигнала.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 10, государственного задания 0389-2015-0026 и грантов РФФИ 17-08-00046; 18-08-00133.

МЕГАВАТТНЫЕ ГИРОТРОНЫ

Г.Г. Денисов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

I. Результаты разработки. Гиротроны для установок плазменно-го синтеза обычно работают на частотах 40–170 ГГц. Требуемая выходная мощность составляет около 1 МВт, а длительность импульса от нескольких секунд до тысяч секунд (в зависимости от параметров установки). В установке ITER будет 24 гиротронных системы с частотой 170 ГГц и мощностью 1 МВт каждая. Требования ITER включают также высокую эффективность гиротронов – более 50 %, возможность модуляции мощности с частотой до 5 кГц, совместимость гиротронного комплекса с системой управления ITER. В мае 2015 года были завершены испытания российского прототипа гиротронной системы ИТЭР. Система включает гиротронный генератор, безжидкостный сверхпроводящий магнит, дополнительные магниты, несколько источников питания, системы управления и защиты, системы охлаждения и другие устройства. В 2016 году была изготовлена первая серийная система, а в 2017 году вторая. Еще один гиротрон ITER был передан европейской команде для тестирования микроволновых компонентов. Все три системы показали надежную работу в требуемых 1000-секундных импульсах. Выходной СВЧ-пучок с малыми потерями поступает в гофрированный волновод HE₁₁ диаметром 50 мм. Рентгеновское излучение и рассеянное микроволновое излучение не превышают безопасные уровни. Мегаваттная мощность в очень длинных импульсах (300–1000 с) также продемонстрирована на частотах 105 ГГц и 140 ГГц для сверхпроводящих токамаков EAST (Китай) и KSTAR (Корея). Гиротроны с умеренной длительностью импульса от 2 до 10 с были разработаны для токамаков TCV, HL-2A и ASDEX Upgrade.

II. Новые требования. Будущие установки, как DEMO, претендуют на более высокую частоту ЭЦР системы – 230 ГГц (сравнение с ITER – 170 ГГц), увеличение мощности модуля на 1,5–2,0 МВт (1 МВт), повышение эффективности до значения выше 60 % (50 %), многочастотную работу во избежание широкоугольного сканирования волновых пучков в плазме. Требования противоречивы: например, более высокая частота и более высокая мощность требуют большего размера резонатора гиротрона (более высокая рабочая мода), и это влияет на эффективность гиротрона. В настоящее время указанное сочетание параметров выглядит нереальным – как и требования ИТЭР 25 лет назад. Помимо повышения мощности и эффективности в последнее время возрастают требования к спектрам колебаний. Для будущей установки DTT (Европа) предполагается работа гиротрона на двух частотах (170 и 135 ГГц). Гиротрон ИТЭР был испытан на второй частоте и в коротком импульсе показал мощность

0,8 МВт. Этот предварительный тест мотивировал разработку оптимизированного двухчастотного гиротрона.

Результаты теоретических исследований и первых экспериментов по фазовой синхронизации гиротронов весьма оптимистичны. Продемонстрирована также возможность очень высокой стабилизации частоты гиротрона – источника сигнала для захвата частоты мегаваттного генератора.

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ С ОДНОМЕРНО- И ДВУМЕРНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ЗАМЕДЛЯЮЩИМИ СИСТЕМАМИ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Н.С. Гинзбург

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

На основе квазиоптического подхода проводится обзор теоретических исследований пространственно-развитых релятивистских черенковских генераторов поверхностной волны с одномерными и двумерными замедляющими системами. Результаты теоретического анализа сопоставляются с результатами PIC-моделирования и экспериментальными исследованиями источников указанного типа, работающих в режимах квазистационарной и короткоимпульсной инжекции электронов. Обсуждаются преимущества использования двумерно-периодических замедляющих систем для стабилизации поперечной (азимутальной) структуры выходного излучения.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИРОТРОНОВ СРЕДНЕЙ И МАЛОЙ МОЩНОСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА В МОЛЕКУЛЯРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Г.Ю. Голубятников

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В настоящей работе обсуждаются перспективы использования гиротронов средней и малой мощности миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в молекулярной спектроскопии [1].

Продемонстрированы возможности использования стабилизированного по частоте 263-ГГц гиротрона [2] для записи слабых спектральных линий молекул SO_2 , OCS и CH_3OH на спектрометре с радиоакустическим

детектированием (РАД). Полученная чувствительность РАД спектрометра по коэффициенту поглощения для некоторых слабых линий (SO_2) была ограничена только эффектами насыщения (мощность в ячейке < 5 Вт) и оценена как $\sim 8 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-1}$ (время записи линий ~ 10 мин).

Часть записанных молекулярных линий в полосе 263–264 ГГц идентифицированы как линии поглощения от излучения гиротрона на 2, 3 и 4-й гармониках основной частоты генерации. Фазы излучений на гармониках синхронны с фазой излучения на фундаментальной частоте [3]. Мощность излучения, содержащаяся во 2-й и 3-й гармониках, была оценена по известным интенсивностям наблюдаемых спектральных линий и составила соответственно порядка 1 и 0,1 % по отношению к мощности на основной гармонике. Обсуждается возможность использования излучения на гармониках гиротрона и увеличения их интенсивности с целью расширения частотного диапазона и более широкого применения гиротронов в молекулярной спектроскопии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 17-19-01602).

1. *Glyavin M.Yu. et al.* High-Power Terahertz Sources for Spectroscopy and Material Diagnostics // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 186(6), 667–677 (2016); *Koshelev M.A. et al.* Molecular gas spectroscopy using radioacoustic detection and high-power coherent subterahertz radiation sources // *JMS*, 331, 9–16 (2017).

2. *Glyavin M.Yu. et al.* Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // *Rev. Sci. Instr.*, 86(5), 054705 (2015); *Fokin A.P. et al.* High-power sub-terahertz source with a record frequency stability at up to 1 Hz // *Scientific Reports*, 8, 4317 (2018).

3. *Danly B.G., Mulligan W.J., Temkin R.J., Sollner T.C.L.G.* Highpower second harmonic emission and frequency locking in a 28 GHz gyrotron // *Applied Physics Letters*, 46, 728 (1985).

РЕАЛИЗАЦИЯ ПЕРЕДАТЧИКОВ Ка-ДИАПАЗОНА НА БАЗЕ МИНИАТЮРНОГО ТРЕХВАТТНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

А.В. Ильичев, А.А. Быкадоров, А.В. Шалацкий

АО «НПП «Салют-27», Нижний Новгород

Рассматриваются особенности практической реализации широкополосного передающего канала Ка-диапазона с интегрированным в микрополосковый СВЧ-тракт бескорпусным арсенид-галлиевым (GaAs) усилителем мощности.

Передающий канал обеспечивает выходную мощность до 3 Вт с длительностью фронта импульса не более 3 нс при работе в режиме ампли-

тудно-импульсной модуляции и временем переключения фазы не более 20 нс в режиме фазовой манипуляции. Компактность устройства обеспечивается интеграцией составляющих узлов в единый корпус и допустимо высокой плотностью монтажа.

Приводится обоснование выбранной структурной схемы, данные по основным техническим характеристикам и режимам работы, рассматриваются особенности конструкции, технологии сборки и монтажа отдельных узлов, приводятся фотографии готового серийного изделия, а также обсуждаются перспективы дальнейшего увеличения выходной мощности.

КАНОНИЧЕСКИЕ ГИРОТРОНЫ: ДОСТИЖЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

В.Е. Запезалов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Во второй половине прошлого века был разработан целый ряд гирорезонансных устройств, принцип действия которых основан на синхронном взаимодействии криволинейного электронного пучка и электромагнитной волны [1–5]. Для эффективного взаимодействия должно удовлетворяться условие синхронизма электронных осцилляторов с электромагнитной волной на гирочастоте или ее гармониках. В гиротронах для рабочих режимов выбираются условия взаимодействия на квазикритической частоте в волноводе, что позволяет минимизировать негативное влияние скоростного разброса. Канонический гиротрон (КГ) содержит адиабатическую магнетронно-инжекторную электронную пушку (МИП), формирующую трубчатый винтовой электронный пучок (ВЭП), сверхразмерный резонатор в виде отрезка слабонерегулярного цилиндрического волновода, систему вывода излучения и коллектор электронного пучка часто с рекуперацией [2–7]. Для производства канонических гиротронов благоприятны аксиальная симметрия и отсутствие мелкомасштабных элементов. Подавляющее большинство современных промышленно выпускаемых гиротронов соответствует канонической схеме. Отметим, что возможности канонических гиротронов в плане роста мощности и частоты при использовании соответствующих магнитных систем далеко не исчерпаны [6].

За минувшие годы в России и зарубежных странах созданы мощные высокоэффективные гиротроны от см- до субмм-диапазонов [2–7] и сформировался ряд фундаментальных научных направлений, успешное развитие которых прямо обусловлено наличием этих источников. Для некоторых приложений нужны повышение частоты и мощности гиротро-

нов, но сложность задачи обостряется техническими возможностями современных магнитных систем, проблемой конкуренции мод и высоким уровнем омических потерь, особенно в гиротронах, работающих на гармониках циклотронной частоты в субмм-диапазоне [3–5]. Далее проведен обзор физических факторов (провисание потенциала, скоростной и энергетический разброс ВЭП, послерезонаторное взаимодействие, омические потери и паразитная трансформация мод) и конструктивных особенностей основных подсистем (магнитной, электронно-оптической и электродинамической, а также вывода и транспортировки ВЧ-мощности), ограничивающих мощность, энергию в импульсе и эффективность КГ. Рассмотрены перспективы канонических гиротронов с точки зрения дальнейшего повышения их частоты и мощности для различных приложений.

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

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

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

4. Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore : The Johns Hopkins University Press, 2004.

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

6. Zapevalov V.E. Increasing power and efficiency of gyrotrons // Fusion Science and Technology. 2007. Vol. 52, № 2. P. 340–344.

7. Thumm M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. KIT Scientific Publishing, 2014.

ПЛАНАРНЫЕ ГИРОТРОНЫ НА ОСНОВНОЙ И ВТОРОЙ ГАРМОНИКАХ С ПОПЕРЕЧНЫМ ДИФРАКЦИОННЫМ ВЫВОДОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.С. Гинзбург, В.Ю. Заславский, А.Н. Куфтин, В.Н. Мануилов, М.Ю. Глявин, И.В. Железнов, А.С. Сергеев, И.В. Зотова

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В докладе проведен теоретический анализ нелинейной динамики планарного гиротрона с поперечным дифракционным выводом излучения на основе усредненных моделей и с помощью трехмерной версии PIC кода CST STUDIO SUITE. Преимуществом указанной схемы по сравнению с традиционной цилиндрической геометрией является возможность

обеспечения когерентности излучения при большем факторе сверхразмерности за счет дифракционного механизма селекции мод по открытой поперечной координате. Показана возможность достижения мощности излучения в сотни киловатт на частотах до 1 ТГц. Важным достоинством обсуждаемой планарной схемы является возможность реализации перестройки частоты излучения гиротрона за счет механического изменения расстояния между пластинами планарного волновода. Для обеспечения однонаправленного вывода излучения предложена схема генератора с комбинированным продольно-поперечным выводом излучения. Указанная конфигурация позволяет обеспечить эффективную селекцию мод не только по широкой поперечной, но и по продольной координате. На основе теоретического анализа разработан проект 140 ГГц гиротрона на первой гармонике циклотронной частоты с ускоряющим напряжением 50 кВ и током 30 А, реализация которого планируется в ИПФ РАН. Для продвижения указанного класса генераторов в коротковолновые диапазоны проведен анализ планарных гиротронов, работающих на гармониках циклотронной частоты. В частности, продемонстрирована возможность эффективной генерации на второй гармонике. С целью дальнейшего улучшения селекции мод по поперечному индексу предложено использование многолучевых конфигураций электронно-оптических систем.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 18-19-00704.

ЛБВ W-ДИАПАЗОНА: РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ

А.А. Иванов

АО «НПП «Салют», Нижний Новгород

В настоящее время на предприятии АО «НПП «Салют» ведутся работы по созданию ЛБВ W-диапазона. В этих приборах используется замедляющая система типа «петляющий волновод», как наиболее полно отвечающая требованиям по величине ускоряющего напряжения, сопротивления связи и широкополосности. К тому же такая цельнометаллическая ЗС обладает высокой теплостойкостью и механической прочностью. По результатам разработки была изготовлена лампа с выходной импульсной мощностью 50 Вт при ускоряющем напряжении 11,8 кВ, токе пучка 110 мА с коэффициентом усиления 32 дБ и полосой рабочих частот 6 % [1].

В данной работе предложены некоторые варианты модернизации конструкции ЛБВ с замедляющей системой типа «петляющий волновод». Каждая модификация нацелена на повышение эффективности взаимодей-

ствия поля ЗС с электронным пучком. Применение этих конструктивных решений в совокупности позволит увеличить выходную мощность ЛБВ в 2–2,5 раза при неизменных токе и напряжении пучка. Также разработан коллектор с двухступенчатой рекуперацией, использование которого повысит технический КПД лампы до 20 %.

1. *Иванов А.А.* Разработка и экспериментальные исследования ЛБВ W-диапазона с выходной мощностью 50 Вт // Материалы 27 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 2017. Т. 1. С. 235.

СИЛЬНОТОЧНЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ГИРОТРОН Ка-ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

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

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Представлены результаты разработки гиротрона, рассчитанного на генерацию СВЧ-импульсов Ка-диапазона длительностью порядка 20 нс и мощностью до 200 МВт. Для запитки генератора предполагается использовать винтовой электронный пучок, формируемый путем раскачки на коротком участке неадиабатического магнитного поля прямолинейного электронного потока с током до 2 кА и энергией частиц до 500 кэВ, инжектируемого со взрывоэмиссионным катодом.

Выполнено моделирование электронно-волнового взаимодействия в резонаторе гиротрона как на основе усредненных уравнений, так и на основе трехмерного PIC-кода KARAT. Продемонстрированы результаты теоретического и экспериментального исследования электронно-оптической системы гиротрона, демонстрирующие получение электронного пучка с заявленными характеристиками, а также результаты первых экспериментов по генерации СВЧ-излучения.

Также обсуждается возможность реализации сильноточного релятивистского гиротрона с использованием высокоселективного продольно-щелевого резонатора с рабочей модой ТМ-типа с целью повышения эффективности электронно-волнового взаимодействия и ослабления возможной конкуренции мод.

Доклад подготовлен по итогам исследований, проведенных в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований № 16-08-01001 и 18-38-00725.

ОРОТРОН С ДВУХРЯДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ДИАПАЗОНА 185...245 ГГц

Е.А. Мясин

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

Задача, которая решалась в этой работе, была связана с увеличением генерируемой ВЧ-мощности в оротроне с двухрядной периодической структурой (ДРПС) вблизи окна прозрачности около длины волны 1,3 мм, точнее 1,39 мм (≈ 216 ГГц) – 1,3 мм (≈ 231 ГГц). Для решения этой задачи были теоретически исследованы особенности электронно-волнового взаимодействия различных конструкций оротронов как с различными длинами структур, так и открытых резонаторов (ОР).

В данном докладе будут приведены результаты экспериментального исследования оротрона с «длинной» ДРПС ($\gg 5r$ – радиусов каустики).

Для получения генерации на длине волны 1,3 мм были проведены эксперименты по исследованию работы оротрона с ДРПС, имеющей период 0,29 мм и длину 33 мм. Высота нижнего ряда ДРПС, расположенного на плоском зеркале, $b_1 = 0,25$ мм, высота верхнего – $b_2 = 0,13$ мм, высота пролётного канала $2H = 0,1$ мм, высота ДРПС $b_0 = b_1 + 2H + b_2 = 0,48$ мм. Использовались два типа открытых резонаторов (ОР). В одном из них использовалось сфероцилиндрическое фокусирующее зеркало с радиусом кривизны 65 мм сферы и цилиндра, с образующей вдоль пространства взаимодействия, длиной 34 мм и поперечным размером 15 мм. В другом ОР использовалось 7-фокусное сфероцилиндрическое зеркало с длиной цилиндра 4 мм и образующей, перпендикулярной электронному потоку, с радиусом кривизны 32 мм цилиндра и сферы, длиной 34 мм. Однако при изготовлении ДРПС был не выдержан размер высоты рядов, в результате чего оптимальная мощность (20 Вт) была достигнута на частотах более низких (185, 190 ГГц), а не на частотах 220–225 ГГц. В докладе будут приведены результаты экспериментов, дано объяснение полученным результатам и приведен пример расчёта одного из режимов работы оротрона по программе [1].

1. *Андреев Ю.В., Мясин Е.А.* Программа расчёта для вычисления электронного КПД оротрона с однорядной или двухрядной периодической структурой на плоском зеркале открытого резонатора с фокусирующими зеркалами различной геометрии : свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016613929. Заявка № 2016611291 от 17 февраля 2016 г. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11 апреля 2016.

ЗАХВАТ ЧАСТОТЫ МНОГОМОДОВОГО ГИРОТРОНА КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКИМ ВНЕШНИМ СИГНАЛОМ

В.Л. Бакунин, Г.Г. Денисов, Ю.В. Новожилова

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Возросший в последнее время интерес к исследованию воздействия внешнего сигнала или отраженной волны на гиротрон инициирован созданием в ИПФ РАН синтезированного двухзеркального квазиоптического преобразователя [1], который, в отличие от традиционных квазиоптических преобразователей, трансформирует входной сигнал в рабочую моду гиротрона. Проведенные ранее исследования показали, что в режиме захвата частоты многомодового гиротрона по сравнению с автономной генерацией достигаются более высокие КПД при умеренных токах электронного пучка, а также увеличивается полоса перестройки частоты излучения [2]. Для различных практических приложений, таких как подавление МГД-неустойчивостей плазмы в магнитных ловушках, спектроскопия, создание в перспективе комплекса когерентно излучающих гиротронов в больших установках УТС, представляет интерес исследование возможности перестройки частоты и управления спектром излучения многомодового гиротрона под воздействием внешнего сигнала с переменными параметрами. Подобные исследования проводились ранее теоретически и экспериментально для гиротрона, в который поступает отраженная волна с гармонически меняющейся фазой поля [3]. В данной работе рассматриваются режимы генерации, возникающие при воздействии на многомодовый гиротрон квазимонохроматического внешнего сигнала с частотой, близкой к частоте рабочей моды. Расчеты проведены для мощного гиротрона с частотой 170 ГГц, разработанного в ИПФ РАН в качестве прототипа для ИТЕР. Найдены области параметров, при которых частота излучения рабочей моды захвачена внешним сигналом и отслеживает изменения частоты внешнего сигнала. Показано, что выход из зон захвата сопровождается биениями частоты и амплитуды рабочей моды или возбуждением паразитных мод.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект 18-02-00839.

1. *Chirkov A.V., Denisov G.G., and Kufitin A.N.* Perspective gyrotron with mode converter for co- and counter-rotation operating modes // *Applied Physics Letters*. 2015. 106, 263501.

2. *Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В.* Влияние конкуренции мод на режим захвата частоты многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2016. Т. 59, № 8/9. С. 709–719.

3. *Kharchev N., Cappa A., Malakhov D., Martinez J., Konchekov E., Tolkachev A., Borzosekov V., Sarkisyan K., Petelin M.* Influence of controlled reflected power on gyrotron performance // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2015. V. 36, № 12. P. 1145–1156.

СИСТЕМЫ НАКАЧКИ КОМПТОНОВСКИХ ЛСЭ: ИСТОЧНИКИ И СВЧ-ОНДУЛЯТОРЫ

*Н.Ю. Песков, Э.Б. Абубакиров, А.А. Вихарев, Н.С. Гинзбург,
А.Н. Денисенко, В.Ю. Заславский, С.В. Кузиков, А.В. Савилов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) являются наиболее мощными источниками когерентного излучения в диапазонах вплоть до рентгеновского и активно разрабатываются в настоящее время в крупных мировых научных центрах. Однако основные проблемы этих проектов связаны с колоссальными размерами установок, низкой эффективностью электронно-волнового взаимодействия и высокими требованиями к качеству рабочих пучков.

Одним из подходов, ориентированных на решение указанных проблем, может быть создание комптоновских ЛСЭ-скаттренов. Использование в ЛСЭ данного типа встречной частицам волны накачки (так называемые СВЧ-ондуляторы) миллиметрового диапазона (вместо традиционных магнитостатических ондуляторов, период которых ограничен несколькими сантиметрами) дает возможность существенно снизить энергию электронного пучка, необходимую для работы в рентгеновском диапазоне, в итоге снизить длину как самого ускорителя, так и пространства взаимодействия ЛСЭ (за счет увеличения параметра Пирса) и увеличить КПД генерации.

Концепция комптоновского ЛСЭ-скаттрена развивается в последние годы в ИПФ РАН. Основой данной концепции является новая схема СВЧ-ондуляторов – так называемый летящий ондулятор [1]. Проведено моделирование различных схем ондуляторов, в том числе с профилированными параметрами. Показано, что на основе подобных ондуляторов может быть реализован режим нерезонансного мультимпульсного захвата, который позволяет обеспечить снижение чувствительности к качеству (т. е. разбросу параметров) рабочего электронного пучка и, таким образом, дальнейшее увеличение эффективности ЛСЭ данного типа.

Экспериментальные исследования прототипа системы накачки ЛСЭ-скаттрена начаты в Ка-диапазоне. Для тестирования работы «летающих» СВЧ-ондуляторов на высоком уровне мощности разработан проект пространственно развитого генератора поверхностной волны субгигаваттного уровня мощности на основе сильноточного взрывозмиссионного ускорителя «Синус-6» 0,5 МэВ / 5 кА / 20 нс. Обеспечение высокой степени когерентности излучения (необходимой для запитки резонансных структур СВЧ-ондуляторов) предполагается достичь путем использования двумерной распределенной обратной связи, реализуемой с помощью двумерно-периодических замедляющих структур. Данный механизм об-

ратной связи [2] является достаточно универсальным методом получения когерентного излучения в пространственно развитых генераторах, основанных на различных механизмах индуцированного излучения РЭП [3, 4].

В настоящее время разработан проект генератора поверхностной волны с двумерно-периодической замедляющей структурой цилиндрической геометрии с периметром, составляющим около 16 длин волн. Результаты трехмерного моделирования демонстрируют установление в условиях проводимых экспериментов узкополосного режима генерации на азимутально-симметричной моде с мощностью на уровне 0,5 ГВт и электронном КПД около 25 %. Изготовлен макет электродинамической системы генератора. Эксперименты по реализации генератора поверхностной волны и запитке на его основе макета «летающего» ондулятора ведутся в настоящее время в ИПФ РАН на ускорительном стенде «Синус-6».

Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ (грант 18-02-40009).

1. *Kuzikov S.V., Savilov A.V., Vikharev A.A.* // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. P. 033504.
2. *Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S. e. a.* // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research A. 1995. Vol. A358. P. 189–192.
3. *Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Kalinin P.V. e. a.* // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 117. P. 114801.
4. *Ginzburg N.S., Ilyakov E.V., Kulagin I.S. e. a.* // Phys. Rev. Accel. and Beams. 2018. Vol. 21. P. 080701.

ВОЛНОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

М.И. Петелин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Электродинамические системы, освоенные на сантиметровых волнах, при попытках скейлинга в более коротковолновые диапазоны обычно испытывают трудности, для преодоления которых приходится увеличивать относительные размеры волноводных структур, а методы управления волновыми потоками заимствовать из оптики. Примером такого заимствования может служить металлическая гребенка.

С использованием таких гребенок мы совместно с немецкими, японскими и американскими коллегами теоретически и экспериментально исследуем относительно новые варианты квазиоптических мультиплексоров, делителей поляризаций, универсальных поляризаторов, дуплексеров, резонансных фильтров.

Эти элементы предлагаются для включения в системы радиолокации, управляемого термоядерного синтеза и динамической поляризации ядер.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО МОЩНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 28 ГГц

*М.Д. Проявин¹, М.Ю. Глявин¹, В.Н. Мануилов^{1,2}, М.В. Морозкин¹,
Д.И. Соболев¹*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Непрерывные гиротроны с рабочими частотами 24–45 ГГц и выходной мощностью несколько десятков киловатт рассматриваются сейчас как следующая ступень развития хорошо известных технологических комплексов для спекания композитных материалов, создания CVD-алмазов, генерации интенсивных потоков многозарядных ионов и ряда других перспективных технологий. В связи с этим актуальным представляется повышение энергоэффективности гиротронных комплексов, что, в частности, может быть достигнуто путем снижения энергопотребления магнитной системы.

Разработан проект непрерывного гиротрона на основном циклотронном резонансе с рабочей частотой 28 ГГц и выходной мощностью более 20 кВт. Требуемое для формирования электронного потока и обеспечения условий взаимодействия распределение магнитного поля формируется магнитоэкранированной системой (МЭС). Выполнена оптимизация МЭС с целью минимального энергопотребления.

При интенсивности магнитного поля 1,02 Тл реализован требуемый для эффективной генерации однородный (65 мм на уровне 0,5 %) участок магнитного поля при потреблении энергии соленоидами около 13 кВт. Экспериментально продемонстрирована возможность дальнейшего увеличения магнитного поля при сохранении приемлемого теплового режима МЭС.

Работа на первой циклотронной гармонике существенно упрощает селекцию рабочего типа колебаний и позволяет в несколько раз увеличить выходную мощность по сравнению с существующими на данный момент технологическими гиротронами, работающими на второй гармонике. Представлены результаты оптимизации ключевых узлов разрабатываемого прибора, в частности электронной пушки, резонатора и коллектора, что позволяет рассчитывать на работу в непрерывном режиме генерации с КПД около 50 % и мощностью излучения около 25 кВт. Полный КПД гиротронного комплекса при этом находится в пределах 35 % (значительно больше, чем в существующих системах), что представляется крайне важным для потребителей.

Работа выполнена в рамках субсидии на госзадание ИПФ РАН, тема 0035-2019-0001.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИРОЛБВ СО СПИРАЛЬНО-ГОФРИРОВАННЫМИ ВОЛНОВОДАМИ В ИПФ РАН: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

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

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Гиротронная лампа бегущей волны (гироЛБВ) является широкополосной разновидностью гиротронных усилителей, открывающих возможность получения импульсного или непрерывного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн с мощностью, на 1–2 порядка превосходящей мощность «обычных» ЛБВ с замедляющими структурами и прямолинейными пучками. С 1996 г. в ИПФ РАН развивается концепция гиросЛБВ, основанная на использовании волновода с винтовой гофрировкой поверхности, которая радикально изменяет дисперсию одной из собственных волн гладкого волновода круглого сечения. Рабочая собственная волна винтового волновода имеет достаточно большую и почти постоянную групповую скорость при нулевом продольном волновом числе, что обеспечивает широкополосное усиление такой гиросЛБВ с минимальной критичностью к скоростному разбросу электронов. Ряд первых экспериментов в 3-см и 8-мм диапазонах длин волн подтвердил основные теоретические выводы и преимущества винтовых гиросЛБВ перед усилителями других типов.

В докладе будет представлен обзор последних экспериментов, в которых были реализованы гиросЛБВ длинноволновой части миллиметрового диапазона с непрерывной и средней мощностью до 10 кВт. Кроме того, будут представлены разработки гиросЛБВ 3-мм диапазона длин волн, а также ряд новых перспективных решений, направленных на повышение мощности и частоты этого усилителя.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В УСКОРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЯХ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

*П.В. Логачев¹, П.А. Бак¹, К.И. Живанков¹, Е.К. Кенжебулатов¹,
Е.С. Сандалов¹, С.Л. Сеницкий^{1,2}, Д.И. Сквородин^{1,2}*

¹ Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

Работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию возбуждения ультрарелятивистским сильноточным электрон-

ным пучком электромагнитных колебаний в ускорительных модулях линейного индукционного ускорителя (ЛИУ). В процессе настройки ЛИУ при движении сильноточного пучка (ток ~ 1 кА) в ускорительной структуре были обнаружены колебания пучка как целого в диапазоне частот 0,3–1 ГГц. Амплитуда этих колебаний нарастала во времени и имела наибольшее значение в выходных модулях ускорителя. Одной из возможных причин таких колебаний может служить развитие ВВU-неустойчивости (beam-breakup instability) [1]. Механизм возбуждения такой неустойчивости обусловлен взаимодействием пучка с собственными дипольными колебаниями ускорительного модуля и последующей модуляцией положения центра пучка полями этих колебаний. Для изучения этих мод нами были проведены расчеты структур полей, частотного спектра и добротностей с помощью стандартного кода на основе метода конечных элементов. Достоверность результатов расчетов была подтверждена сравнением с данными «холодных» экспериментов. С помощью кода собственной разработки проведено моделирование возбуждения пучком (энергия электронов 2–5 МэВ, ток ~ 1 –2 кА, длительность ~ 100 –200 нс, сечение ~ 10 см²) колебаний в восьми ускорительных модулях ЛИУ и показано качественное согласие результатов расчетов с экспериментальными данными. По результатам исследования определены основные высокодобротные моды, влияющие на инкремент развития ВВU-неустойчивости, а также предложены методы подавления этих колебаний.

1. Neil V.K., Hall L.S., Cooper R.K. Further theoretical studies of the beam breakup instability // Particle Accelerators. 1979. Vol. 9. P. 213–222.

СИСТЕМА ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАНАРНОГО ГИРОТРОНА

Д.И. Соболев, В.Ю. Заславский, Н.С. Гинзбург, А.Н. Куфтин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В последние годы достигнут существенный прогресс в разработке гиротронов субтерагерцового диапазона, в которых получена мощность излучения в несколько киловатт. При работе в субмиллиметровом диапазоне в традиционных схемах гиротронов с резонаторами, формируемыми отрезками слаборегулярных цилиндрических волноводов, для достижения высокой мощности при малом поперечном размере системы необходимы высокая степень компрессии пучка и большие плотности токов в пространстве взаимодействия. В качестве одного из возможных решений

представляет интерес планарная схема гиротрона с ленточным поливинтовым электронным пучком. Достоинством такой схемы является возможность использования в качестве электродинамической системы открытого в поперечном направлении планарного волновода. Соответственно, если по продольной координате волновод закрыт закритическими сужениями, то может быть реализован поперечный по отношению к направлению поступательного движения частиц вдоль ведущего магнитного поля дифракционный вывод излучения, который одновременно позволяет обеспечить селекцию мод по открытой координате, вследствие различия дифракционных потерь мод с различным числом вариаций [1, 2].

Для вывода излучения из планарного гиротрона в данной работе предлагается система из зеркал, направляющих излучение вперед, и квазиоптических преобразователей высокой моды планарного волновода в наклонный гауссов пучок. Наличие зеркал обусловлено ограниченностью пространства внутри магнита. Возможно как объединение излучения из обоих поперечных каналов в один волновой пучок, так и независимый вывод излучения в одном волноводе. В первом случае требуется заданное соотношение интенсивности излучения в различных каналах, что не всегда возможно обеспечить. Схема с независимым выводом излучения менее требовательна к симметричности и больше подходит для экспериментального гиротрона.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-19-00704.

1. *Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S., Zaslavsky V.Yu., Zheleznov I.V.* High-power terahertz-range planar gyrotrons with transverse energy extraction // *Phys. Rev. Letters*. 2012. V. 108. Art. 105101.

2. *Zaslavsky V.Yu., Ginzburg N.S., Glyavin M.Yu., Zheleznov I.V., Zotova I.V.* Three-dimensional particle-in-cell modeling of terahertz gyrotrons with cylindrical and planar configurations of the interaction space // *Phys. Plasmas*. 2013. V. 20. Art. 043103.

РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СТРУКТУР ДЛЯ УСТРОЙСТВ ВАКУУМНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

*А.В. Стародубов^{1,2}, А.А. Сердобинцев², А.М. Павлов²,
В.В. Галушка², И.В. Синев², И.Ш. Бахтеев³, С.Ю. Молчанов³,
А.Г. Рожнев^{1,2}, Г.В. Торгашов¹, Р.А. Торгашов^{1,2}, Н.М. Рыскин^{1,2}*

¹ Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

² Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

³ Центральный научно-исследовательский институт измерительной аппаратуры,
Саратов

Актуальность и востребованность исследований, направленных на разработку и создание как отдельных базовых компонентов для усилителей и генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, так и готовых устройств вакуумной микроэлектроники, в настоящее время не вызывает сомнений [1]. Одной из основных проблем при разработке генераторов и усилителей миллиметрового и субмиллиметрового диапазона является создание электродинамических структур и систем. Для изготовления как самих непосредственно замедляющих систем, так и отдельных элементов пробуют использовать [2] методы литографии и ее разновидности (LIGA, UV-LIGA, SU-8-процесс), методы электроэрозионной обработки (EDM), методы глубокого реактивного ионного травления (DRIE), методы 3D-печати, микро- и нанofрезерования с компьютерным управлением.

В представленном докладе изложены особенности и преимущества предложенного авторами нового и оригинального подхода к изготовлению планарных замедляющих структур для устройств вакуумной микроэлектроники, основанного на использовании физических процессов магнетронного распыления и лазерной абляции. Разработан [3] и изготовлен ряд макетов планарных замедляющих структур для ламп бегущей волны миллиметрового диапазона с ленточным электронным пучком. В диапазоне частот V (50–70 ГГц) и W (75–110 ГГц) проведены измерения коэффициентов передачи и отражения изготовленных структур. Сравнение экспериментально полученных данных и результатов численного моделирования показало хорошее качественное и количественное соответствие [4].

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

1. *Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.S., Park J.H., Temkin R.J.* Vacuum electronic high power terahertz sources // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. Vol. 1, № 1. P. 54–75.

2. Gamzina D., Himes L.G., Barchfeld R., Zheng Y., Popovic B.K., Paoloni C., Choi E., Luhmann N.C. Nano-CNC machining of sub-THz vacuum electron devices // IEEE Transactions on Electron Devices. 2016. Vol. 63, № 10. P. 4067–4073.

3. Ryskin N.M., Benedik A.I., Rozhnev A.G., Sinityn N.I., Torgashov G.V., Torgashov R.A. // EPJ Web of Conferences, 149 (2017) 04027.

4. Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Benedik A.I., Torgashov R.A., Torgashov G.V., Sinityn N.I. Planar microstrip slow-wave structure for low-voltage V-band traveling-wave tube with a sheet electron beam // IEEE Electron Device Letters. 2018. Vol. 39, № 5. P. 757–760.

ПОЛЕВЫЕ ЭМИТТЕРЫ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МИНИАТЮРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ, РАБОТАЮЩИХ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВАКУУМЕ

Г.Г. Соминский¹, В.Е. Сезонов¹, Е.П. Тарадаев¹, Т.А. Тумарева¹, С.П. Тарадаев¹, А.А. Рукавицина¹, М.Е. Гиваргизов², А.Н. Степанова²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого

² Институт кристаллографии им. А.А. Шубникова, Москва

Полевые эмиттеры привлекательны для использования в системах формирования электронных потоков для многих вакуумных электронных устройств. Преимущества полевых эмиттеров по сравнению с термокатодами очевидны, поскольку они не требуют нагрева и безынерционны. До недавнего времени полевые эмиттеры использовались в основном в сверхвысоковольтных, низкочастотных и низковольтных устройствах.

В то же время растет интерес к использованию полевых эмиттеров в миниатюрных высоковольтных устройствах, где трудно использовать накаливаемые термоэлектронные катоды. К таковым можно отнести, например, электронно-лучевые СВЧ-приборы коротковолнового миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн, а также портативные и мобильные рентгеновские источники. Как правило, в таких приложениях требуются эмиссионные токи, превышающие десятки миллиампер с плотностью тока более $\sim 100\text{--}200 \text{ mA/cm}^2$.

В докладе будут рассмотрены некоторые типы распределенных полевых эмиттеров, которые могут быть перспективны для миниатюрных высоковольтных электронных приборов. Основное внимание уделяется определению возможностей их работы в условиях интенсивной бомбардировки остаточными газовыми ионами, характерной для устройств, работающих в техническом вакууме.

ВОЛНОВОДНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МОД, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫЕ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ ИЗ ДИЭЛЕКТРИКА

*А.Э. Федотов, В.И. Белоусов, П.Б. Махалов, С.В. Мишакин,
М.Д. Проявин, Д.И. Соболев*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Преобразователи волноводных мод друг в друга либо в квазиоптические волновые пучки широко используются в различных микроволновых системах и устройствах. Эти компоненты, как правило, представляют собой металлические волноводы сложной формы, иногда с мелко-масштабной гофрировкой, расчет и изготовление которых могут быть достаточно трудоемки. Особенно много времени может занимать создание нестандартных элементов, требуемых для проведения научных исследований и разработок в области микроволнового и терагерцового излучения.

Последнее десятилетие ознаменовалось большими успехами в области аддитивных технологий изготовления деталей сложной формы (3D-печать). В мире широко исследуются возможности изготовления сложных волноводных компонентов путем либо 3D-печати из металла, либо печати из пластика с последующим гальваническим наращиванием металла и удалением диэлектрика. В данном докладе будет рассмотрен другой возможный подход – непосредственное использование элементов, напечатанных из диэлектрика. В частности, волноводные преобразователи мод могут иметь вид диэлектрических вставок сложной формы в металлические волноводы простой формы (круглые, прямоугольные либо конические). Применение таких элементов возможно для приложений с малым и средним уровнем мощности (до единиц или даже в некоторых случаях десятков ватт). К настоящему времени рассчитаны несколько достаточно простых элементов, в частности преобразователь волны $TE_{1,1}$ круглого волновода в гауссов пучок; поляризатор (преобразователь стоячей по азимуту моды $TE_{1,1}$ во вращающуюся); преобразователь моды $TE_{1,0}$ в моду $TE_{2,0}$ прямоугольного волновода. Результаты расчетов некоторых компонентов и первые результаты электродинамических тестов планируется представить на семинаре. Также будет рассмотрен подход к разработке метода синтеза для автоматизированного нахождения требуемой формы диэлектрических элементов.

ЧЕРЕНКОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ КОМПАКТНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ С НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИМПУЛЬСА

*Р.В. Цыганков¹, В.В. Ростов¹, И.К. Куркан¹, М.И. Яландин²,
К.А. Шарыпов², В.Г. Шпак², М.Р. Ульмаскулов², С.А. Шунайлов²*

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

² Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Для таких междисциплинарных исследований, как физика плазмы, представляют интерес мощные миллиметровые источники с сильноточными электронными пучками. Кроме того, компактность микроволновых источников очень важна и привлекательна для практического применения. Результаты наших недавно проведенных экспериментов в Томске и Екатеринбурге уже опубликованы [1, 2]. Здесь рассматривается концепция и дизайн и некоторые неопубликованные детали. В частности, в течение следующей экспериментальной серии мы увеличили ускоряющее напряжение до 470 кВ и ток электронного пучка до 3,8 кА и достигли СВЧ-мощности Ка-диапазона ($0,75 \pm 0,05$) ГВт с длительностью импульса 2,8 нс. Вместо нержавеющей стали, как в первых экспериментах, замедляющая структура (ЗС) была изготовлена с использованием титанового сплава. Концепция СВЧ-генераторов была описана ранее [1–3], и она основана на взаимодействии электронного пучка в основном с поверхностной модой TM_{01} в секционированной ЗС. Вблизи верхней границы полосы пропускания эта волна сильно связана с объемной модой TM_{02} , которая обеспечивает обратную связь и передачу мощности. Следующая симметричная волна TM_{03} не может распространяться на этих частотах, потому что диаметр ЗС удовлетворяет условию $D \approx 2,5\lambda$. Выбор таких сверхразмерных ЗС объясняется высокими электрическими полями, которые наблюдались в симуляциях и достигали более 1 МВ/см, когда сокращение импульса может происходить в наносекундном диапазоне длительностей импульсов.

1. *Rostov V.V., Totmeninov E.M., Tsygankov R.V., Kurkan I.K., Kovalchuk O.B., Emelyanov E.V.* Two-wave Ka-band nanosecond relativistic Cherenkov oscillator // IEEE Trans. On Electron Devices. 2018. Vol. 65, № 7. P. 3019–3025.

2. *Rostov V.V., Romanchenko I.V., Tsygankov R.V., Yalandin M.I.* Numerical and experimental investigation of 4 mm wavelength microwave oscillator based on high-current compact accelerator // Phys. Plasmas. 2018. Vol. 25. Art. 073110 (1–7).

3. *Rostov V.V., Gunin A.V., Tsygankov R.V., Romanchenko I.V., Yalandin M.I.* Two-wave Cherenkov oscillator with moderately oversized slow-wave structure // IEEE Trans. On Plasma Sci. 2018. Vol. 46, № 1. P. 33–42.

РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ВИНТОВОЙ ГИРОЛБВ И НАСЫЩАЮЩЕГОСЯ АБСОРБЕРА, ОСНОВАННОГО НА ЦИКЛОТРОННОМ ПОГЛОЩЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

*Н.С. Гинзбург, М.Н. Вилков, И.В. Зотова, А.С. Сергеев,
С.В. Самсонов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Представлены результаты по разработке генераторов периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов 32 ГГц диапазона. Проведено моделирование схемы, состоящей из винтовой гиrolбв и насыщающегося абсорбера, основанного на циклотронном поглощении излучения прямолинейным электронным пучком. Согласно результатам проведенного анализа при параметрах усилителя, близких к экспериментально реализованной винтовой гиrolбв Ка-диапазона (ускоряющее напряжение 68 кВ и ток пучка 10 А), возможна генерация периодической последовательности импульсов с пиковой мощностью 400 кВт, длительностью по полувысоте 200 пс и частотой повторения 1 ГГц. Результаты моделирования на базе усредненного описания частично подтверждены PIC-моделированием на основе кода CST.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В ГИРОТРОНЕ С ЭШЕЛЕТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

*С.Н. Власов, В.Е. Запелалов, А.С. Зуев, А.Н. Куфтин, Е.В. Копосова,
Павельев А.Б.*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Экспериментальное исследование гиротронов с эшелетными резонаторами [1] показало, что при некоторых параметрах эшелетной структуры имеет место электронная перестройка генерируемой частоты в широком диапазоне (порядка 10 %) длин волн. В докладе строится теория гиротронов такого типа. Она основывается на том, что в резонаторе с эшелетной структурой добротность мод с одинаковой поперечной структурой, но с разными продольными индексами может быть сделана существенно меньше (практически снижена на порядок), чем так называемая минимальная дифракционная добротность рабочей моды традиционного «квазицилиндрического» резонатора, используемого в гиротронах. Достигаемое с помощью эшелетной структуры снижение добротности суще-

ственно выгоднее по сравнению с тем же эффектом, получаемым путем увеличения омических потерь [2]. Это явление в исследуемой резонансной системе с эшелетной структурой связано с вырождением продольных мод, при этом сама электродинамическая система гиротрона становится «квазиинтерферометром» [3]. Структура поля в гиротроне в этом случае формируется электронным пучком.

Расчеты электронно-волнового взаимодействия проведены в рамках нового подхода. Вместо профиля эшелетного резонатора взят квазицилиндрический резонатор с той же длиной и со средним радиусом. При этом потери, возникающие при обратном отражении от гофрированной поверхности, учтены путем изменения омической добротности. В рамках данной самосогласованной модели определены зависимости мощности и частоты генерации от величины магнитного поля. Показано, что относительная перестройка частоты в этом случае более чем на порядок превышает величину $1/Q$, где Q – полная добротность системы.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-02-00832.

1. *Агапов Л.Н., Богданов С.Д., Венедиктов Н.П. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 7. С. 489.

2. *Torrezan A.C., Shapiro M.A., Sirigiri J.R. et al.* // IEEE Trans. Dev. 2011. V. 58, № 8. P. 2777.

3. *Власов С.Н., Миллер М.А.* Открытый резонатор // Физическая энциклопедия / под ред. А.М. Прохорова. М. : Большая Российская энциклопедия, 1992. Т. 3. С. 491.

ВАРИАНТ КОАКСИАЛЬНОГО ВВОДА СИГНАЛА В ГИРОВИСТРОН НА МОДЕ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

И.Г. Гачев, Ю.М. Гузнов, Д.А. Луковников, С.Е. Фильченков

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Для высокочастотной модуляции электронного пучка с высоким азимутальным индексом предлагается использовать последовательность секций, осуществляющих

- квазиоптический ввод волны в коаксиальный волновод большого диаметра,
- смену азимутального индекса волны на участке с азимутально-периодической гофрировкой стенки,
- коническое сопряжение коаксиального волновода с модулирующей секцией.

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

П.Б. Махалов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В целом ряде приложений вакуумной электроники, спектроскопии и телекоммуникаций необходимы устройства, преобразующие структуру поля электромагнитной волны – волноводные преобразователи. Для задач, связанных с мощными гиротронами, в ИПФ РАН был предложен и развит метод синтеза волноводных преобразователей [1]. В данном методе синтезируется поверхность однородно заполненной волноведущей структуры, или, другими словами, стенка металлического волновода. Однако изготовление такого устройства – волновода со сложной поверхностью – часто оказывается дорогим и сложным. В то же время в большом количестве приложений мощность не велика и преобразователь может быть изготовлен из диэлектрика [2]. Более того, развивающаяся в последнее время технология трёхмерной печати существенно упрощает изготовление диэлектрических деталей. В работе [2] представлены диэлектрические преобразователи мод, полученные из общих соображений. В настоящей работе обсуждается развитие подхода [1] для автоматического синтеза диэлектрических волноводных преобразователей.

Ядро метода синтеза строится по аналогии с принципами, изложенными в [1]: функция перекрёстной удельной мощности определяет смещение границы на шаге итерации. В отличие от [1] функция перекрёстной мощности рассматривается во всём пространстве задачи, что приводит к тому, что итерационная процедура может сойтись к форме с произвольным индексом связанности. Используемые методы коррекции формы диэлектрика обсуждаются в настоящей работе.

Технически реализованный метод синтеза строится на методе конечных элементов (МКЭ), в качестве среды разработки используется среда FreeFem++ [3]. Задание диэлектрической константы производится с помощью функции уровня, что, помимо простоты задания диэлектрической проницаемости, позволяет относительно легко контролировать дополнительные параметры геометрии диэлектрика. Передвижение границы диэлектрика на шаге итерации осуществляется добавлением функции кросс-преобразования к функции уровня диэлектрика.

Написанная реализация алгоритма позволяет генерировать структуры в планарной и аксиально-симметричной конфигурациях. Для демонстрации метода были синтезированы планарные преобразователи на моды $TE_{1,0}$ – $TE_{2,0}$ в планарном волноводе прямоугольного сечения и $TM_{0,1}$ – $TM_{0,2}$ в цилиндрическом волноводе. Расчёт этих преобразователем сторонним МКЭ-кодом показал хорошее соответствие результатов.

Таким образом, был предложен автоматический метод синтеза диэлектрических волноводных преобразователей, пригодных для изготовления с помощью метода трёхмерной печати.

1. Denisov G.G., Chirkov A.V., Belousov V.I. et al. // J. Infrared Milli. Terahz. Waves. 2011. V. 32. P. 343.

2. Федотов А.Э., Белоусов В.И., Махалов П.Б., Мишакин С.В., Проявин М.Д., Соколов Д.И. // Науч. сб. С. 65.

3. Hecht F. New development in FreeFem++ // J. Numer. Math. 2012. V. 20, № 3/4. P. 251–265. 65Y15.

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В ГИРОТРОНАХ С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

И.В. Железнов, А.С. Зувев, И.В. Ошарин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В настоящее время гиротроны являются наиболее привлекательными источниками когерентного излучения, работающими в субтерагерцовом и терагерцовом частотных диапазонах с относительно высокой мощностью. Из-за трудностей использования сильных сверхпроводящих магнитов переход гиротронов к работе в терагерцовом частотном диапазоне практически неизбежно связан с работой на высоких циклотронных гармониках [1]. При этом возникает ряд известных проблем, одной из которых является необходимость увеличения длины рабочего резонатора, что ведет к росту дифракционной добротности рабочей моды и, соответственно, к росту омических потерь. Одной из гиротронных схем [2], обеспечивающих эффективное возбуждение низкодобротных мод, является квазирегулярный резонатор с периодической системой фазовых корректоров (расширений). В таком резонаторе мода с продольным индексом, равным числу секций резонатора, возбуждается в высокоэффективном и некритичном к скоростному разбросу гиротронном режиме, обеспечивая относительно низкие омические потери, что существенно увеличивает выходную мощность гиротрона (волновой КПД). При этом низшая продольная мода возбуждается в режиме лампы обратной волны (ЛОВ) или лампы бегущей волны (ЛБВ).

В данной работе описанная схема теоретически исследуется с точки зрения процессов перестройки частоты при изменении рабочего магнитного поля. В рамках этой задачи исследовался терагерцовый гиротрон с большой орбитой [1], работающий на третьей циклотронной гармонике на

моды $TE_{3,7}$. Для этого гиротрона была исследована трёхсекционная схема резонатора, позволяющая получить относительно высокий (выше 2 %) волновой КПД. Моделирование проводилось на основе полных усредненных уравнений движения электронов, а также уравнения для медленной комплексной амплитуды фиксированной поперечной моды, учитывающего нестационарную пространственно-временную динамику возбуждения.

Показано, что в таком секционированном резонаторе волновой КПД в области гиротронного возбуждения третьей продольной моды близок к волновому КПД в области магнитных полей, соответствующих возбуждению первой продольной моды. Такая картина имеет место вследствие того, что если третья мода имеет преимущество работы в высокоэффективном гиротронном режиме, то первая мода, возбуждаемая в режиме ЛОВ, имеет большую добротность за счет меньшей групповой скорости вывода излучения из резонатора. При приблизительно одинаковой выходной мощности стационарной генерации частоты этих мод различаются, так что диапазон перестройки частоты составляет около 0,1 %. Таким образом, путем простого переключения рабочего магнитного поля можно обеспечить достаточно заметное (для гиротрона) изменение частоты стационарной генерации без изменения мощности выходного излучения.

Важно, что этот эффект наблюдается и при моделировании работы гиротрона в непрерывном режиме. Это дает возможность быстрого управления частотой генерации в течение одного импульса выходного излучения.

Работа поддержана РФФИ, проект 18-32-00772 мол_а.

1. *Bratman, V.L., Kalynov, Yu.K., Manuilov, V.N.* // Phys. Rev. Lett., 2009, 102 (24), № 245101.
2. *Bandurkin, I.V., Kalynov, Y.K., Osharin, I.V., Savilov, A.V.* // Physics of Plasmas, 2016, 23 (1), № 013113.

УМЕНЬШЕНИЕ ОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В РЕЗОНАТОРАХ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ ГИРОТРОНОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

В.Е. Запезалов, А.С. Зуев, В.В. Паршин, Е.А. Серов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Одной из основных тенденций развития современных гиротронов является продвижение в терагерцовый диапазон частот [1]. При повышении частоты генерации растёт доля омических потерь в резонаторе, что осложняет самовозбуждение рабочего типа колебания и ограничивает

эффективность и мощность выходного излучения гиротрона. Кроме этого, при работе гиротрона на высокой гармонике циклотронной частоты с ростом рабочей частоты существенно усложняется проблема селекции рабочего типа колебаний.

Существует несколько способов снизить омические потери в резонаторе гиротрона. Например, за счёт оптимизации профиля, технологии изготовления, выбора материала резонатора или его охлаждения. В данной работе рассмотрена перспективность различных методов понижения омических потерь в резонаторах субтерагерцовых гиротронов малой мощности. Для расчёта омических потерь использованы результаты исследования отражательной способности различных материалов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [2]. Исследована специфика влияния омических потерь на эффективность работы гиротрона и на селекцию рабочего типа колебаний в зависимости от частоты для разных подходов к изготовлению и режиму работы резонаторов. Расчёты проведены для серии гиротронов с разной протяжённостью пространства взаимодействия, работающих на второй гармонике циклотронной частоты в разных частотных диапазонах.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-02-00832.

1. Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Запезалов В.Е. и др. // УФН. 2016. Т. 186, № 6. С. 667.

2. Serov E.A., Parshin V.V., Bubnov G.M. // IEEE Trans. Microw. Techn. 2016. V. 64, № 11. P. 3828.

РАЗРАБОТКА МОЩНОГО ГЕНЕРАТОРА ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ НА ОСНОВЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ЛЕНТОЧНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

*Н.Ю. Песков¹, А.В. Аржанников², Н.С. Гинзбург¹,
В.Ю. Заславский¹, П.В. Калинин², Е.С. Сандалов²,
А.С. Сергеев¹, С.Л. Синицкий², В.Д. Степанов²*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

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

Концепция сверхмощных импульсных пространственно-развитых генераторов развивается в течение ряда лет в сотрудничестве ИПФ РАН и ИЯФ СО РАН. Оригинальным подходом в данной концепции является использование сильноточных ленточных релятивистских электронных пучков (РЭП) и планарной геометрии пространства взаимодействия, ко-

торая позволяет наращивать полную мощность генератора путем увеличения одного из его поперечных размеров при сохранении умеренных плотностей тока и потоков электромагнитной энергии. При этом пространственная когерентность излучения в условиях существенной сверхразмерности достигается путем использования двумерной распределенной обратной связи (РОС) [1]. Работоспособность нового механизма обратной связи подтверждена экспериментально в мазерах на свободных электронах (МСЭ) при рекордных для данного класса генераторов поперечных размерах системы (до 50 длин волн) и уровне выходной мощности $\sim 50\text{--}100$ МВт [2, 3].

Перспективным развитием концепции двумерной РОС является создание релятивистских мазеров планарной геометрии, основанных на черенковском механизме электронно-волнового взаимодействия. В отличие от МСЭ, в генераторах данного типа используются прямолинейно движущиеся РЭП, что существенно упрощает систему их формирования и транспортировки, а также значительно снижает требования к разбросу параметров частиц. В результате черенковский механизм взаимодействия допускает использование более интенсивных РЭП по сравнению с МСЭ и, таким образом, дальнейшее увеличение выходной мощности излучения в совокупности с перспективой продвижения в более коротковолновые диапазоны вплоть до субмиллиметрового.

В качестве режима работы пространственно-развитого планарного черенковского мазера выбран так называемый π -вид (генераторы данного типа принято также называть генераторами поверхностной волны), в котором имеет место замедление основной гармоники поля, что существенно повышает импеданс связи с электронным потоком. Разработан проект генератора поверхностной волны 4-мм диапазона длин волн на основе ускорителя «ЭЛМИ» 1 МэВ / 2–5 кА / 5 мкс (ИЯФ СО РАН). Проведено моделирование электродинамической системы генератора – двумерно-периодической замедляющей структуры, которая в данном случае совмещает в себе свойства замедляющей системы, создающей условия эффективного черенковского взаимодействия с сильноточным прямолинейным ленточным РЭП, и высокочастотного резонатора, реализующего механизм двумерной РОС и обеспечивающего селективное возбуждение рабочей моды в условиях существенной сверхразмерности пространства взаимодействия. Согласно проведенному моделированию использование в генераторе данного типа нового механизма обратной связи позволяет получить при ширине ленточного РЭП $\sim 15\text{--}20$ см установление устойчивого узкополосного режима генерации с гигаваттным уровнем выходной мощности. Экспериментальное исследование данного генератора начато на ускорительном комплексе «ЭЛМИ».

Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ (грант 19-08-00550).

1. Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S. *e. a.* // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research A. 1995. Vol. A358. P. 189–192.
2. Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 18. С. 8–16.
3. Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Kalinin P.V. *e. a.* // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 117. P. 114801.

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА КОЛЛЕКТОР ГИРОТРОНА

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

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В мощной СВЧ-электронике существует проблема утилизации энергии отработавшего (отдавшего часть своей энергии для генерации СВЧ-излучения) электронного пучка. Например, в типичном мощном гиротроне непрерывного режима с энергией электронного пучка 3 МВт после генерации 1 МВт СВЧ-излучения (что соответствует 33 % к.п.д.) в отработавшем электронном пучке будет сосредоточена мощность 2 МВт, которая и должна быть рассеяна на коллекторе.

Ширина электронного пучка в зоне оседания на коллектор, как правило, очень мала и составляет несколько сантиметров. Таким образом, средняя тепловая нагрузка на стенку может достигать 5–10 кВт/см², а максимальная и того больше. Такие нагрузки неприемлемы для длительной работы прибора. Существуют различные методики снижения тепловых нагрузок. Как правило, они используют статические магнитные поля для увеличения ширины пучка и динамические – для «размазывания» тепловой нагрузки по стенкам коллектора.

В данной работе предлагается электростатический метод увеличения ширины пучка, а также особая конструкция коллектора, позволяющая достичь высокой частоты сканирования в системе динамического «размазывания», решающая проблему пиковых нагрузок. На примере гиротронов с максимальной мощностью электронного пучка 0,5 МВт и 4 МВт рассматриваются варианты коллекторов на основе предложенных методик, а также их комбинация со статическими магнитными системами.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 3D-ПЕЧАТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДЛЯ СВЧ-ПРИЛОЖЕНИЙ

*М.Д. Проявин, Д.И. Соколов, Н.Ю. Песков, В.Ю. Заславский,
В.В. Паршин*

Институт прикладной физики, Нижний Новгород

Развитие технологий 3D-печати содержит в себе большой потенциал для промышленности, науки и техники. Существует ряд задач, которые сложно или практически невозможно реализовать традиционными методами производства. В частности, 3D-печать диэлектрическими материалами является крайне удобным и дешевым инструментом для создания прототипов элементной базы СВЧ-электроники. В этом случае важны свойства диэлектрика, поэтому поиск и исследование новых материалов являются крайне актуальной задачей.

Были рассмотрены несколько видов материалов и методов 3D-печати, экспериментально изучены свойства полученных образцов. Результаты измерений позволили выявить наиболее подходящие материалы (стирол-бутадиен-стирол (СБС), полиамид), что позволило реализовать, например, двумерный брэгговский резонатор и широкополосные безотражательные окна для СВЧ-приборов малой мощности.

Продемонстрировано соответствие численного моделирования и экспериментальных данных, подтверждающее корректность используемых расчетных моделей. В случае двумерного брэгговского резонатора получены коэффициенты отражения, прохождения и рассеяния в полосе частот 58–61 ГГц. Полученный результат и использование более совершенных 3D-принтеров в дальнейшем позволят рассчитывать на продвижение аналогичных технологий в субТГц-диапазон частот.

Возможность быстрого и дешевого создания диэлектрических элементов позволила провести оптимизацию формы поверхности моделей, в ходе которой удалось добиться очень широкой безотражательной (до 200 ГГц на уровне в 30 дБ) полосы пропускания. Подобные окна могут быть использованы в спектроскопических задачах.

Работа выполнена в рамках субсидии на госзадание ИПФ РАН, тема 0035-2019-0001.

ИМПУЛЬСНАЯ ДИНАМИКА ГИРОТРОНОВ С БОЛЬШОЙ НАДКРИТИЧНОСТЬЮ

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

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований динамики гиротронов, работающих при значительном (до 1000 раз) превышении параметра тока над стартовым значением (режимы с большой надкритичностью). При типичных значениях токов винтовых электронных пучков, формируемых магнетронно-инжекторными пушками, необходимый уровень надкритичности может быть обеспечен за счет перехода к возбуждению низших поперечных мод рабочего волновода. Анализ в рамках усредненных уравнений показывает, что в этих условиях вблизи критической частоты могут реализоваться режимы импульсно-периодической генерации со скважностью (отношением периода к длительности) порядка 10 (рис. 1, *а*). При этом импульсы являются коррелированными по фазе, а соответствующий спектр представляет собой так называемую частотную гребенку (frequency comb). Принципиальным моментом для анализа указанных режимов является учет в уравнениях движения временной производной, отвечающей за конечность времени пролета электронов через пространство взаимодействия и, следовательно, за реальный наклон характеристики электронного пучка относительно дисперсионной характеристики рабочей моды.

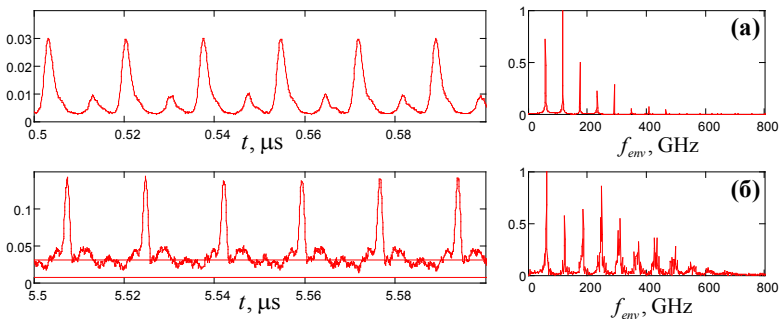


Рис. 1. Осциллограммы и спектры огибающей выходного излучения гиротрона в режиме периодической инжекции импульсов: *а* – расчеты по усредненным уравнениям, *б* – экспериментальные данные

Результаты теоретического анализа получили подтверждение в экспериментах, проведенных на стенде импульсного слабoreлятивистского

гиротрона диапазона 33 ГГц с рабочей модой TE_{11} , запитываемого электронным пучком с энергией 30 кэВ, током 0,2 А и питч-фактором 1,0. В расчетной области параметров наблюдались режимы периодической импульсной генерации (рис. 1, б). При этом измеренные значения длительности и периода следования импульсов, а также спектральные характеристики огибающей выходного сигнала находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными на основе усредненных уравнений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-01077.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ МЕГАВАТТНОГО ПОТОКА СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ВЫХОДЯЩЕГО ВДОЛЬ ОСИ ЗАМАГНИЧЕННОГО ПЛАЗМЕННОГО СТОЛБА ПРИ РЕЛАКСАЦИИ В НЕМ КИЛОАМПЕРНОГО РЭП

*А.В. Аржанников^{1,2}, В.В. Анненков^{1,2}, И.А. Иванов^{1,2},
А.А. Касатов^{1,2}, С.А. Кузнецов^{1,2}, М.А. Макаров¹, К.И. Меклер¹,
С.В. Полосаткин^{1,2}, А.Ф. Ровенских¹, Д.А. Самцов¹,
С.Л. Синицкий^{1,2}, В.Д. Степанов^{1,2}, И.В. Тимофеев^{1,2}*

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

² Новосибирский государственный университет

Существуют различные источники генерации субмм-излучения: гиротроны [1], ЛСЭ и генераторы на основе килоамперных пучков, генерируемых в ускорителях прямого действия. Одним из вариантов генерации с использованием таких пучков являются системы с пучково-плазменным взаимодействием [2]. Генерация в таких системах может происходить по двум механизмам [3]. Первый механизм заключается в том, что верхнегибридная плазменная волна в результате рассеяния на градиентах плотности трансформируется в электромагнитную с той же частотой. По второму механизму в результате слияния двух верхнегибридных плазменных волн образуется электромагнитная волна с удвоенной частотой. Особенностью данных систем является возможность генерации мегаваттных потоков субмм-излучения в частотном диапазоне от 0,1 до 1 ТГц. Высокая мощность (порядка нескольких мегаватт) и широкий диапазон частот излучения открывают широкий спектр для практического применения генераторов данного типа. Эксперименты, проводимые на установке ГОЛ-ПЭГ, сосредоточены на исследовании субмм-излучения, которое формируется по первому механизму [4]. Мы приведем последние результаты экспериментов, для которых более подробно рас-

смотрим спектральный состав излучения, выходящего вдоль оси замагниченного плазменного столба при релаксации в нем килоамперного РЭП.

1. *Glyavin M.Y., Luchinin A.G., Nusinovich G.S. et al.* // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 101, № 15. P. 153503.

2. *Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Kalinin P.V. et al.* // Vestnik Novosibirsk State University. Series: Physics. 2010. Vol. 5. P. 44–49.

3. *Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Burmasov V.S. et al.* // Transactions of Fusion Science and Technology. 2013. Vol. 63. P. 82–87.

4. *Arzhannikov A.V., Annenkov V.V., Burmasov V.S. et al.* // EPJ Web of Conferences. EDP Sciences. 2018. Vol. 195. P. 01002.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГИРОТРОНА 28 ГГц НОВЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ANGEL

Е.С. Семенов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В работе представлены новые инструменты для численного моделирования гиротронов, реализованные в комплексе программ ANGEL [1]. Код позволяет проводить расчёт взаимодействия электронного пучка с полем в резонаторе по стационарной и нестационарной моделям с фиксированной структурой поля (полученной из «холодной» задачи либо гауссовой), а также по стационарной самосогласованной модели с нефиксированной структурой поля с учётом разбросов скоростей и радиусов ведущих центров при неоднородном (вдоль оси системы) статическом магнитном поле.

Посредством данного комплекса программ выполнено моделирование непрерывного 10 кВт технологического гиротрона с частотой 28 ГГц, работающего на 2-й гармонике гирочастоты на моде $TE_{0,2}$, подробно описанного в [2]. Проведено сравнение расчётных данных, полученных по различным моделям, с экспериментальными данными.

1. *Планкин О.П., Семенов Е.С.* Траекторный анализ электронно-оптической системы технологического гиротрона // Вестник НГУ. Серия «Физика». 2013. Т. 8, № 2. С. 44–54.

2. *Bykov Yu., Denisov G., Ereemeev A., Gorbatushkov V., Kurkin V., Kalynova G., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I.* // Rev. Sci. Instrum. 2004. Vol. 75. P. 1437.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОГО РАЗБРОСА НА ШИРИНУ ПОЛОСЫ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В ГИРОПРИБОРАХ

*А.Э. Федотов, И.В. Бандуркин, М.Ю. Глявин, И.В. Зотова,
А.Г. Лучинин, М.В. Морозкин, Р.М. Розенталь, М.Д. Прохвин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Сравнительно широкополосная перестройка частоты в гиротронах возможна путем возбуждения ряда последовательных продольных мод резонатора при изменении магнитного поля. Во многих известных экспериментах по перестройке частоты субтерагерцовых гиротронов эффективная генерация происходит лишь на первой продольной моде, в то время как при увеличении частоты и, соответственно, продольного индекса моды выходная мощность и КПД падают. Одной из причин уменьшения мощности гиротронов при работе на высоких продольных модах является высокая чувствительность циклотронного взаимодействия к скоростному разбросу частиц в пучке, которая, как известно, быстро увеличивается с ростом продольного волнового числа. Получена аналитическая оценка для ограничения на ширину полосы перестройки частоты в гиротроне или гироЛЮВ, вызванного влиянием скоростного разброса. Оценка позволяет подобрать параметры гиротрона, оптимальные для достижения требуемой ширины полосы перестройки частоты. С помощью численных расчетов показано, что использование сравнительно малой длины резонатора и относительно большого нормированного параметра тока позволяет сделать перестройку частоты значительно более плавной и широкополосной. Согласно расчетам, при использовании электронного пучка с типичной для гиротронов величиной скоростного разброса около 20 % возможно реализовать прибор с киловаттным уровнем мощности и перестройкой частоты до 5–6 %. Следует отметить, что при этом параметры тока и длины резонатора не являются оптимальными с точки зрения получения максимальной мощности на фиксированной частоте, так что расширение полосы перестройки частоты происходит за счет некоторого падения КПД. Поскольку в верхней части полосы электронный пучок взаимодействует преимущественно со встречной волной, рассматриваемый генератор представляет собой нечто среднее между традиционным гиротроном и гиротронной лампой обратной волны (гироЛЮВ). Полученные аналитические и численные оценки подтверждаются результатами демонстрационного эксперимента с технологическим гиротроном, в котором на частоте около 12,5 ГГц была продемонстрирована перестройка с полосой более 4 % при мощности выходного излучения более 1 кВт.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-12-00394.

ФОРМИРОВАНИЕ МОЩНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ПУТЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАСТЯЖЕНИЯ, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ КОМПРЕССИИ

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

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Исследована возможность переноса в СВЧ-электронику широко используемого в лазерной физике метода генерации мощных и ультракоротких импульсов, основанного на предварительном растяжении начального импульса, последовательного по времени усиления в широкополосном усилителе различных спектральных компонент и заключительного сжатия (компрессии) в линии с отрицательной дисперсией. При этом выигрыш в пиковой амплитуде определяется степенью растяжения начального сигнала, от которой зависит полная энергия, приобретаемая электромагнитным импульсом в усилителе.

В микроволновом диапазоне в качестве стретчера и компрессора предлагается использовать участки волноводов со спиральной гофрировкой поверхности. Особенностью данных элементов является возможность подбора дисперсионных характеристик путем выбора геометрических параметров, обеспечивающих необходимые растяжение и компрессию. В качестве усилителя выбирается гироЛБВ с винтовой гофрировкой поверхности, работающей в режиме широкополосного усиления и обеспечивающей на выходе сигнал мощностью 250 кВт при энергии электронов 68 кэВ, токе пучка 10 А и питч-факторе 1,2. В качестве исходного рассматривался импульс мощностью 300 Вт, длительностью 200 пс на центральной частоте 30 ГГц.

Моделирование показало, что для стретчера с длиной 1 м подбор параметров компрессора с длиной 1 м обеспечивает 65 % восстановления начальной формы в отсутствие усилителя. При включении усиливающего элемента пиковая мощность достигает 2 МВт, что соответствует усилению в 38 дБ для начального импульса 300 Вт (усиление без предварительного растяжения составляет 29 дБ).

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-08-00717.

**ПРИЕМНИКИ
МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,
СПЕКТРОСКОПИЯ И МЕТРОЛОГИЯ**

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА НЕЙРОМОРФНЫХ СИГНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ НА ОСНОВЕ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТОВ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ

*Н.В. Кленов¹⁻⁵, А.Е. Щеголев^{1-3,5}, И.И. Соловьев^{2,5},
С.В. Бакурский^{2,4}, М.Ю. Куприянов², М.В. Терешонок^{3,5}*

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

³ Московский технический университет связи и информатики

⁴ Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный Московской обл.

⁵ Московский технологический университет (МИРЭА)

В последние годы развитие беспроводных и спутниковых средств связи, других телекоммуникационных и радиолокационных систем заметно тормозят трудности с высокоскоростной обработкой данных в широких частотных диапазонах. Для передачи и обработки постоянно растущих объемов информации необходимо использование «прямой оцифровки» сигнала во всём диапазоне принимаемых частот с последующей его обработкой в реальном времени. В частности, это актуально для когнитивных радиотехнических систем, где возможны программным образом реализованные переключения между полосами в сверхшироком диапазоне частот (от условного нуля до 100 ГГц) и адаптивная подстройка параметров системы под меняющиеся условия радиосреды. Проведенный анализ показал необходимость совершенствования элементной базы для практической реализации таких устройств. Необходим поиск новой посткремниевой элементной базы, причем новые элементы должны обладать не только сверхвысоким быстродействием (для работы с сигналами на высокой несущей частоте порядка десятков гигагерц), но и высокой энергоэффективностью. Ведь именно высокая диссипация энергии (порядка 10^{-15} Дж на операцию) в традиционных полупроводниковых цифровых устройствах ограничивает предельную степень интеграции и тактовую частоту.

С этой точки зрения интересной выглядит перспектива использования сверхпроводниковой цифровой технологии, построенной на основе принципов быстрой одноквантовой логики. Макроскопические квантовые эффекты в сверхпроводниках (когерентное состояние электронов в металле) обуславливают отсутствие сопротивления для постоянного тока и возможность «баллистической» передачи радиосигналов без искажений со субсветовыми скоростями и позволяют создавать логические элементы на основе «нелинейных элементов» – джозефсоновских гетероструктур с характерной энергией переключения между состояниями на уровне 10^{-19} Дж и тактовой частотой в сотни гигагерц. Для увеличения степени

интеграции сверхпроводниковых комплексов приема и обработки сигнала в рамках данной работы применялся комплексный подход, включающий использование энергоэффективных схмотехнических решений; компактных стековых структур, в том числе с нормальными (несверхпроводящими) металлами в области слабой связи и магнитными материалами. Именно такие структуры предназначены для реализации быстрой криогенной памяти, которая к тому же при своем функционировании диссипирует крайне мало энергии. Наконец, особое внимание уделяется также использованию возможностей квантовых и нейросетевых сверхпроводниковых блоков обработки сигнала.

Важной особенностью работы является сочетание «микроскопического» и «макроскопического» подходов к разработке универсальной сверхпроводниковой энергоэффективной технологии, пригодной для реализации когнитивных широкополосных сверхпроводниковых систем для приема и обработки сигналов с использованием классических, нейросетевых и квантовых алгоритмов. В рамках «микроскопического» подхода из первых принципов определяются характеристики джозефсоновских гетероструктур, особенности токового транспорта. В «макроскопическом» подходе на основе полученных данных в рамках «обобщенной резистивной модели» производится моделирование динамики достаточно сложных многоэлементных систем. Таким образом, в рамках итерационной процедуры разработаны под требования к современным радиотехническим устройствам ключевые новые элементы, ячейки и блоки, при необходимости – с дополнительной оптимизацией их характеристик.

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ НОВЫХ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

*К.И. Рудаков^{1,2,3}, П.Н. Дмитриев¹, М.Е. Парамонов¹,
А.М. Барышев^{1,2}, А.В. Худченко^{1,2}, Р. Хеспер², В.П. Кошелец¹*

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

² Астрономический институт университета Гронингена, Нидерланды

³ Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный Московской обл.

Был разработан, изготовлен и протестирован волноводный приемный элемент диапазона 211–275 ГГц на основе туннельных структур сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник. Отработаны методы изготовления высококачественных туннельных структур на кварцевых подложках. Для расширения полосы приемника в первых экспериментах были использованы туннельные переходы Nb/AlN/NbN с высокой плотно-

стью тока; также были изготовлены и исследованы структуры на основе переходов Nb/AlO_x/Nb. Проведены измерения туннельных структур с различной плотностью тока, определены основные параметры туннельных барьеров. Проведено моделирование характеристик приемных элементов от частоты сигнала при полосе промежуточных частот 4–12 ГГц. Первые измерения продемонстрировали хорошее совпадение входной полосы приемных структур с расчетом; шумовая температура приемника не превышала 45 К на частоте 240 ГГц. Разрабатываемые приемники предназначены для ряда наземных вновь создаваемых радиотелескопов (Суффа, LLMA), а также для космической программы «Миллиметррон».

КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ «МИЛЛИМЕТРОН»

*А.В. Смирнов¹, Ю.А. Александров¹, А.С. Андрианов¹,
М.Ю. Архипов¹, Н.Г. Бабакин¹, А.М. Барышев^{1,2}, А.В. Бирюков¹,
В.Ф. Вдовин¹, И.С. Виноградов¹, Е.С. Голубев¹, Б.З. Каневский¹,
Н.С. Кардашев¹, А.Б. Киселев¹, Т.А. Космович¹, С.Ф. Лихачев¹,
А.О. Ляховец¹, Н.В. Мышонкова¹, А.А. Озолин¹, С.В. Пилипенко¹,
Я.Г. Подобедов¹, В.Н. Пышинов¹, А.Г. Рудницкий¹, А.И. Смирнов¹,
С.Д. Федорчук¹, Е.К. Филина¹, Th. de Graauw¹, В.И. Халиманович³,
Р.А. Черный¹, Г.В. Шипилов³*

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

² Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, The Netherlands

³ АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева,
Железногорск

Астрономические исследования в миллиметровом и дальнем ИК-диапазоне длин волн имеют огромное значение для понимания механизмов создания и развития различных объектов нашей Солнечной системы, таких как галактики, звезды и планеты. Именно в этом диапазоне длин волн находится максимум фонового реликтового излучения, спектры галактик и квазаров с большим красным смещением, излучение межзвездного вещества, спектры сложных органических молекул. Новые научные вопросы и задачи, поднимаемые сегодняшними учеными-астрономами и астрофизиками, требуют для своего решения создания астрономических инструментов с предельной чувствительностью. Для реализации последнего необходимо охлаждение не только детекторов, но и конструкции самого астрономического инструмента, а именно телескопа, что позволит уменьшить его собственное тепловое воздействие, которое очень сказывается при работе в ИК-диапазоне длин волн. С другой стороны, увеличить чувствительность возможно за счет увеличения входной апертуры антенны телескопа.

Проект «Спектр-М», нацеленный на создание космической обсерватории «Миллиметрон», разрабатывается Астрокосмическим центром ФИАН в кооперации с рядом российских и зарубежных организаций. Обсерватория представляет собой 10-метровый охлаждаемый космический телескоп, работающий в миллиметровом и ИК-диапазоне длин волн. Для решения стоящих перед проектом научных задач в составе приемного комплекса планируется использовать фотометрические приемники с предельной чувствительностью, приемники среднего $\lambda / \Delta\lambda \approx 10^3$) и высокого ($\lambda / \Delta\lambda \approx 10^5$) спектрального разрешения, а также приемники, оптимизированные для работы в интерферометрическом режиме, то есть совместимые с приемниками, находящимися на наземных радиотелескопах. Использование телескопа, находящегося в 1,5 млн. км от Земли, в качестве плеча для наземно-космического интерферометра субмиллиметрового диапазона позволит реализовать инструменту беспрецедентное угловое разрешение $\sim 10^{-8}$ угловых секунд. Требования к бортовым приемникам и системам, а также их параметры соответствуют самому передовому уровню развития технологий в обозначенных диапазонах длин волн.

В докладе будут представлены основные параметры обсерватории «Миллиметрон» и технические достижения по отдельным направлениям ее разработки и создания.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК ТЕРАГЕРЦОВЫХ БОЛОМЕТРОВ НА ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНАХ

Г.Н. Гольцман

Московский педагогический государственный университет

Развитие техники и технологий осаждения ультратонких сверхпроводниковых пленок, создание сверхпроводниковых структур нанометрового масштаба является основой значительного прогресса в области сверхпроводниковых приемных систем. Ультратонкие пленки NbN являются основой для широкого спектра рекордных по характеристикам устройств на эффекте электронного разогрева: прямых и гетеродинных детекторов терагерцового диапазона. Приемники терагерцового диапазона особенно востребованы в спектроскопии высокого разрешения для проведения астрономических, атмосферных, медицинских исследований.

НЕВ-приемники нашли широкое применение в терагерцовой радиоастрономии. Так, голландским институтом SRON готовится проект телескопа GUSTO на воздушном шаре с матрицей НЕВ-смесителей на 1,4 и 1,9 ТГц. На Южном полюсе установлен 5-метровый китайский терагер-

цовый телескоп DATE5 с НЕВ-смесителями на 1,4 ТГц. В стратосферной обсерватории (SOFIA) используются матрицы НЕВ-смесителей в GREAT-инструменте, работающем в диапазоне 1,2–4,7 ТГц. Планируется реализация международного проекта Origins Space Telescope в дальней инфракрасной области на основе НЕВ-приемников. Японский проект Smiles-2 позволит проводить измерения на 1,8 ТГц в верхних слоях стратосферы и мезосферы. В России продолжается разработка космической обсерватории «Миллиметр».

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ ПРИЕМНИКОВ Ка- И Х-ДИАПАЗОНОВ

С.А. Палашиов, А.В. Ильичев, Е.Д. Шор, Ю.А. Осипов, А.В. Шалацкий
АО «НПП «Салют-27», Нижний Новгород

Приемник является одной из главных составляющих современной радиоизмерительной аппаратуры. В свою очередь, это накладывает особые требования на параметры, характеризующие внутреннюю защищенность измерительных приемников и активных антенн от возможных помех. Прежде всего, это касается таких параметров, как избирательность, динамический диапазон и линейность приемника, подавление помех по промежуточной и зеркальной частотам, динамический диапазон и т. д.

К настоящему времени в АО «НПП «Салют-27» разработана и освоена в производстве широкая номенклатура приемных устройств в диапазоне от 0,5 до 37,5 ГГц.

В данном докладе представлен обзор приемников Х- и Ка-диапазонов и требования, предъявляемые к данным устройствам.

В первой части доклада представлен многоканальный приемник Х-диапазона. Данный приемник осуществляет преобразование входных сигналов на промежуточную частоту с высокой избирательностью и синхронное квадратурное детектирование на промежуточной частоте с широкой полосой пропускания не менее 150 МГц.

Во второй части доклада рассмотрено приемное устройство Ка-диапазона. Устройство выпускается серийно и предназначено для работы в составе импульсной РЛС обзора земной (морской) поверхности в 40-мильной зоне. Его характеристики: двукратное частотное преобразование принятого (отраженного от цели) сигнала с последующим логарифмическим детектированием; изменение сквозной полосы пропускания для селекции целей по дальности; наличие в своем составе системы автоподстройки частоты, осуществляющей поиск и захват частоты магнетронного

передатчика для формирования частот гетеродинов в канале приема; наличие систем ручной регулировки усиления, автоматической регулировки усиления по шумам, временной автоматической регулировки усиления, что позволяет обеспечивать максимальный динамический диапазон работы приемника во всех режимах эксплуатации.

МИКРОВОЛНОВАЯ МИКРОСКОПИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

А.Н. Резник

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Дается обзор результатов по сканирующей ближнеполевой микроволновой микроскопии (СБММ), полученных под руководством автора за последние несколько лет. Разработан метод количественной характеристики полупроводниковых материалов и структур [1, 2]. Метод базируется на построенной теории [2, 3], согласно которой зонд СБММ представляет собой монополярную антенну малых волновых размеров. Рассчитывается входной импеданс антенны, взаимодействующей с произвольно структурированным плоскостойким образцом. Регистрируемые параметры СБММ (резонансная частота и добротность) вычисляются при помощи предложенной эквивалентной схемы. Характеристики исследуемого образца определяются путем решения соответствующей обратной задачи. Создан лабораторный макет СБММ [2, 4], включающий зонд на основе коаксиального резонатора с игольчатым центральным проводником, прецизионную систему позиционирования и векторный анализатор цепей. Рабочий диапазон частот прибора 1,3–1,5 ГГц, латеральная разрешающая способность 50–500 мкм. Возможности метода продемонстрированы в измерениях слоевого сопротивления эпитаксиальных полупроводниковых пленок и транзисторных гетероструктур [1, 2, 4]. В частности, исследованы структуры HEMT на основе гетероперехода AlGaIn/GaN и квантовой ямы AlGaAs/GaAs/InGaAs/GaAs/AlGaAs [4]. Показано, что в диапазоне сопротивления слоев 0,1–15 кОм точность измерений составляет ~ 10 %. С разрешением ~ 70 мкм исследованы проводящие свойства монокристаллических подложек и эпитаксиальных слоев CVD-алмаза в условиях гигантской латеральной неоднородности проводимости [5]. Разработанный метод позволил измерить сопротивление эпитаксиального слоя на фоне шунтирующего действия неоднородно проводящей подложки. Микроволновым методом в комплексе со стандартными методами диагностики полупроводников получены электрические параметры эпи-

таксиальных слоев алмаза: сопротивление, подвижность, концентрация свободных носителей заряда, концентрация и степень ионизации примесных атомов. Разработанные метод и устройство оптимизированы для решения задачи определения удельного сопротивления высокочистого поликристаллического кремния при $\rho > 1 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ и диаметре пластин не менее 125 мм. Оптимальное соотношение между разрешающей способностью ($\sim 250 \text{ мкм}$) и чувствительностью СБММ обеспечило точность измерения ρ не хуже 10 %. Предложен метод микроволновой томографии с микронным латеральным разрешением [6]. Экспериментальная демонстрация метода произведена на полупроводниковой структуре низкобарьерного диода Мота – дельта-легированный изолирующий слой на сильно легированной подложке [7]. Зондирующая система представляла собой решетку коаксиальных антенн с диаметром центрального контакта 11–50 мкм, сформированных на поверхности структуры. При помощи зондовой станции Cascade Microtech измерялся частотный спектр импеданса антенн в диапазоне 0,1–67 ГГц. Наблюдалась сильная (более чем на порядок) латеральная неоднородность проводимости слоя при изменении его толщины в пределах 10 % и однородной проводимости подложки. Предложена электродинамическая модель СБММ [8], обладающая атомарным разрешением в режиме туннельного пробоя [9]. Микроволновый импеданс взаимодействия зонда с образцом включает дополнительную компоненту – импеданс туннельного контакта Z_t . С использованием приведенных в [9] экспериментальных данных получена высотная зависимость туннельного сопротивления $R_t(h) = \text{Re } Z_t(h)$ и найдена индуктивная компонента импеданса $\omega L_t = \text{Im } Z_t$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 15-02-04081, 18-02-00914.

1. *Reznik A.N., Demidov E.V.* // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 113. Art. 094501.
2. *Reznik A.N., Korolyov S.A.* // J. Appl. Phys. 2016. Vol. 119. Art. 094504.
3. *Reznik A.N.* // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115. Art. 084501.
4. *Korolyov S.A., Reznik A.N.* // Rev. Sci. Instrum. 2018. Vol. 89. Art. 023706.
5. *Reznik A.N., Korolyov S.A., Drozdov M.N.* // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 121. Art. 164503.
6. *Reznik A.N., Shereshevsky I.A., Vdovicheva N.K.* // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 109. Art. 094508.
7. *Reznik A.N., Vostokov N.V., Vdovicheva N.K., Korolyov S.A., Shashkin V.I.* // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 122. Art. 244505.
8. *Reznik A.N.* // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. Art. 083512.
9. *Lee J., Long C.J., Yang H., Xiang X.-D., Takeuchi I.* // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97. Art. 183111.

СУБДОПЛЕРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ ИЗОТОПОЛОВОГ МОЛЕКУЛ NH_2D И NC_3N

Р.А. Алексеев^{1,2}, А.В. Лапинов¹, Г.Ю. Голубятников¹

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

При помощи созданного в ИПФ РАН субдоплеровского спектрометра выполнены исследования спектров молекул однократно дейтерированного аммиака NH_2D , включая $^{15}\text{NH}_2\text{D}$, а также ^{13}C - и ^{15}N -изотопологов молекулы цианоацетилена NC_3N . Благодаря измерениям на основе провала Лэмба экспериментальные точности частот переходов в диапазоне 85–503 ГГц улучшены по сравнению с традиционной спектроскопией [1] примерно на два порядка. Полученные данные представляют большой интерес как при исследованиях физических параметров в областях звездообразования, так и при поиске возможных вариаций фундаментальных констант. Молекула частично дейтерированного аммиака NH_2D представляет особый интерес из-за инверсионно-вращательных переходов, лежащих в миллиметровой области спектра и обладающих различной чувствительностью к вариации отношения массы электрона к массе протона [2].

Нами были получены зависимости смещения частоты и ширины провала Лэмба от давления для перехода $J = 52-51$ на частоте 470 ГГц в изотопологе молекулы HCC_{13}CN при девиации сигнала ЛОВ 120 и 60 кГц. Установлено, что при уменьшении давления примерно до 1 мТорр точность определения центра линии растет. И только при малых давлениях (меньше 1 мТорр) точность нелинейных субдоплеровских измерений ухудшается.

Также были проведены исследования зависимости ширины провала Лэмба от интенсивности излучения ЛОВ. В результате было получено, что ширина провала Лэмба прямо пропорциональна давлению и определяется в основном соударениями между молекулами и уширением линий за счет излучения ЛОВ.

Наши исследования показали, что, несмотря на высокую точность измерений с провалом Лэмба, частоты переходов в молекулах однократно дейтерированного аммиака и изотопологах NC_3N сильно зависят как от давления, так и от мощности ЛОВ.

Все лабораторные измерения были выполнены благодаря поддержке РФФИ (проект 16-02-00761). Анализ данных поддержан грантом РНФ (проект 17-12-01256).

1. <https://spec.jpl.nasa.gov/>; <https://spec.jpl.nasa.gov/ftp/pub/catalog/catdir.html>.

2. *Kozlov M.G., Lapinov A.V., Levshakov S.A.* Sensitivity of microwave spectra of deuterated ammonia to variation of electron to proton mass ratio // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2010. Vol. 43.

ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН НА ЛИНИИ «КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ – НАЗЕМНАЯ СТАНЦИЯ СЛЕЖЕНИЯ»

М.Н. Андрианов

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

Рассмотрены алгоритмы обеспечения высокой скорости и достоверности передачи данных в космических проектах на линии «спутник – наземная станция слежения». Установлено, что плотность вероятности отношения сигнал/шум (ОСШ) для статистически локально однородной изотропной тропосферы, в соответствие с методом плавных возмущений, описывается логнормальным законом, дисперсия которого, наряду с длиной волны, зависит от дальности распространения по тропосфере, которая, в свою очередь, зависит угла места антенны.

Рассмотрены зависимости дисперсии логнормальных флуктуаций амплитуды от соотношения радиуса первой зоны Френеля с внутренним и внешним масштабами турбулентности. Определено, что при распространении сигнала от спутника в окрестности т. Лагранжа (L_2) к наземной станции слежения радиус первой зоны Френеля будет существенно больше внешнего масштаба турбулентности. При этом дисперсия логнормальных флуктуаций амплитуды сигнала будет определяться фраунгоферовой дифракцией, линейно зависеть от длины пути сигнала по тропосфере и квадратично – от волнового числа. Вычисления представлены для гауссовой корреляционной функции случайного поля.

Определены вероятности ошибок для некогерентного и когерентного приема сигналов при различных значениях дисперсии. Установлен максимум увеличения скорости в зависимости от полосы частот и ОСШ на входе приемника, показано практическое ограничение скорости передачи данных в зависимости от модуляции и помехоустойчивого кодирования.

Например, при полосе сигнала 4 ГГц на несущей частоте 40 ГГц ($\lambda = 7,5$ мм) модуляция QPSK обеспечит максимум скорости передачи данных с LDPC-кодом и без кодирования соответственно 8 и 7,736 Гбит/с при отношении сигнал/шум на входе приемника 9,5 и 13 дБ соответственно с вероятностью ошибки не более 10^{-5} . При этом для гауссова канала теоретический предел Шеннона в данной полосе частот при отношении сигнал/шум 9,5 дБ позволяет получить предельную скорость 13,2 Гбит/с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТИНУАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В СУХИХ АТМОСФЕРНЫХ ГАЗАХ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

А.А. Балашов^{1,2}, Е.А. Серов², Т.А. Одинцова², М.А. Кошелев²,
А.О. Зибарова^{1,2}, А.А. Финенко³, Д.Н. Чистиков³

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

В данной работе исследовалось континуальное поглощение азота в миллиметровом диапазоне длин волн. Азот – симметричная двухатомная молекула, не обладающая собственным дипольным моментом. Наличие поглощения в миллиметровом диапазоне обусловлено возникновением дипольного момента, индуцированного столкновениями. В исследуемом диапазоне длин волн зависимость поглощения от частоты можно считать квадратичной. Азот является самым распространенным газом в атмосфере Земли. При обычных условиях поглощение в азоте гораздо меньше поглощения, обусловленного водяным паром, однако на высотах более 10 км содержание воды в воздухе настолько мало, что вклад азотного континуума становится существенным.

Измерения проводились на резонаторном спектрометре, обладающем рекордной в своем классе чувствительностью $4 \cdot 10^{-9}$ см⁻¹. Высокая чувствительность обусловлена быстрым (за время ~ 10 мкс/шаг) прецизионным переключением частоты при записи резонансной кривой без скачков фазы, а также высокой стабильностью условий эксперимента. Измерения проводились в диапазоне температур от -10 °С до $+36$ °С и давлений от 750 до 1500 Торр. Полученные в ходе данного исследования значения коэффициентов азотного континуума согласуются в пределах погрешности с предыдущими экспериментальными работами [1].

Проведено сравнение измеренного поглощения с расчетом по модели МРМ [2] и с расчетом, выполненным методом классических траекторий [3]. Классический спектр получен в результате преобразования Фурье временной зависимости дипольного момента на статистически усредненном массиве столкновительных траекторий. Индивидуальные траектории рассчитывались путем решения уравнений Гамильтона в молекулярно-фиксированной системе отсчета с использованием точного классического гамильтониана в приближении жестких мономеров. В ходе расчета использовались *ab initio* поверхности потенциальной энергии и индуцированного дипольного момента из [4]. Показано, что данные расчеты в целом согласуются с экспериментальными данными, но значение коэффициента поглощения, определенного из расчетов, примерно на 10 % ниже полученного в эксперименте.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 18-05-00698, 18-05-00119.

1. Meshkov A.I., De Lucia F.C. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2007. Vol. 108. P. 256–276.
2. Rosenkranz P. // Remote Sens. Code Library. 2017 ; doi:10.21982/M81013.
3. Chistikov D.N., Finenko A.A., Kalugina Y.N., Lokshantov S.E., Petrov S.V., Viganin A.A. // 25th Int. Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy: Abstract Book. 2018. P. 211.
4. Karman T., Miliordos E., Hunt K.L., Groenenboom G.C., van der Avoird A. // JCP. 2015. Vol. 142 (8). Art. 084306.

OLIMPO MISSION: DEVELOPMENT AND RESULTS OF STRATOSPHERIC POLAR BALLOON SUB TERAHERTZ OBSERVATORIES

*P. de Bernardis¹, G. Bubnov^{2,3}, D. Korotaev², S. Masi¹, V. Okunev²
and V. Vdovin^{2,3}*

¹ Roma La Sapienza University, Italy

² IAP RAS, Nizhny Novgorod

³ NNSTU, Nizhny Novgorod

The balloon-borne sub mm-wave telescope OLIMPO has been developed and launched into stratosphere from the Arctic airport of Longyearbyen, at 09:07 CET of July 14th, 2018. OLIMPO is aimed at cosmological observations of the Cosmic Microwave Background in the direction of some clusters of galaxies. The launch travelled following circumpolar vortex and have been terminated in Canada due technical reasons. The instrument has been developed by a research team coordinated by prof. Silvia Masi of the Physics Department of Sapienza University, in collaboration with the Institute for Photonics and Nanotechnologies of CNR (Rome), the Institute for Applied Physics of CNR (Florence), the Universities of Bicocca (Milan), Cardiff Univ. (UK), Arizona State (USA) and NNSTU Nizhny Novgorod (Russia).

The observations of CMB and clusters of galaxies at those wavelengths are obtained from an altitude higher than 37 km, to avoid atmospheric influence. A helium-filled balloon with a volume of 830000 cubic meters has been used to lift the two-tons instrument in the stratosphere (37.8 km). OLIMPO can observe space objects at frequencies up to 500 GHz by cryogenically cooled bolometric receivers. Details of technical realization of the Olimpo instrumentation are presented in a talk. There is a liquid helium tank onboard of observatory for cooling. These are much higher frequencies than those around 150 GHz of ground based telescopes and even better than instruments operated in Ant-

arctica (SPO) and in the Atacama desert (ALMA). Some interesting astronomical results have been received in a framework of the mission.

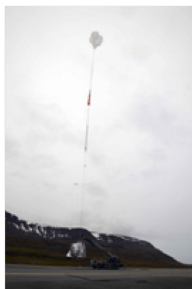


Fig. 1. Launch

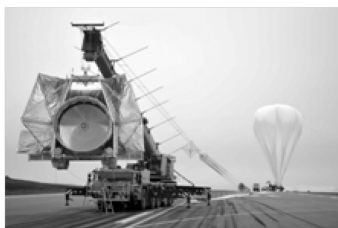


Fig. 2. Before launch



Fig. 3. The Olimpo team

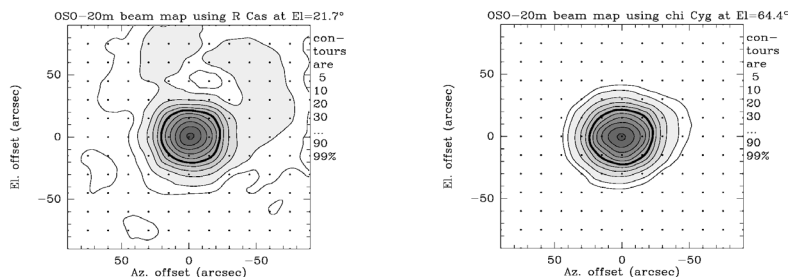
1. <http://stratocat.com.ar/fichas-e/2018/LON-20180714.htm>.
2. <https://www.uniroma1.it/en/notizia/backlight-view-galaxy-clusters-olimpo>.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ 20-м РАДИОТЕЛЕСКОПА ОНСАЛА В 3-м ДИАПАЗОНЕ

А.В. Лапинов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Приведены результаты измерений характеристик 20-м радиотелескопа обсерватории Онсала (Швеция), выполненных в марте 2018 г. после модернизации системы управления вторичным зеркалом. Исследования проводились на частоте 86,2 ГГц линии $\text{SiO } J = 2-1 \nu = 1$ в направлении ряда мазерных источников с использованием высокочувствительных двухполяризационных радиометров на основе усилителей НЕМТ (диапазон 67–87 ГГц), а также SIS-смесителей (диапазон 84–116 ГГц) [1].



Примеры измерений диаграммы направленности 20-м радиотелескопа Онсала для угла места в 22 град. (слева) с высоким уровнем боковых лепестков и для угла места в 64 град. (справа) вблизи оптимального угла облучения

Благодаря выполненным измерениям детально изучена форма диаграммы направленности в диапазоне углов места от 20 до 81 градуса, исследованы ошибки наведения. Приводится сравнение с результатами аналогичных исследований, проводившихся в январе – феврале 1999 г., а также с измерениями на других инструментах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 17-12-01256).

1. *Belitsky V., Lapkin I. et al.* A new 3 mm band receiver for the Onsala 20 m antenna // A&A. 2015. V. 580, A29.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОДНОРОДНОЙ МАТРИЦЫ ПЛАНАРНЫХ ДИОДОВ ШОТТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЕЛЬВИН-ЗОНДОВОЙ СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

*А. Шураков¹, Д. Михайлов¹, И. Беликов¹, А. Приходько¹,
Т. Зильберлей², Н. Каурова¹, Б. Воронov¹, Г. Гольцман^{1,3}*

¹ Московский педагогический государственный университет

² Московский физико-технический институт (государственный университет)

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва

В работе представлены результаты перекрестного исследования омического контакта с n-GaAs модифицированным методом передающей линии и средствами кельвин-зондовой силовой микроскопии. Эксперимент показал, что карта поверхностного потенциала в окрестности площадки омического контакта может быть использована для анализа эволюции контактного сопротивления и профиля удельного сопротивления в подконтактной области в процессе быстрого термического отжига. По итогам измерений были получены удельные контактные сопротивления 2,7 и 0,15 мкОм·см² для структуры Ni/Au/Ge/Ni/Au (5/45/20/5/100 нм), отожженной в течение 60 с в атмосфере N₂ при температурах 350 и 450 °С соответственно. Последняя температура оказалась потенциально более эффективна в случае толстого полупроводника: отношение удельных сопротивлений составило 2:1 и 3,3:1 на расстояниях 150 и 210 нм ниже уровня контакта соответственно и продолжало расти при дальнейшем углублении. Мы изготовили матрицу планарных диодов Шоттки в соответствии с результатами исследований. Однородность диодов была ярко выражена при температуре отжига 350 °С, в этом случае выход годных элементов составил 97 %. Повысив температуру до 450 °С, мы добились снижения последовательного сопротивления для 64,5 % диодов (29 % показали улучшение более чем в 2 раза) за счет уменьшения выхода на

22 % и увеличения разброса параметров в 5,6 раза. Существенного влияния термической обработки на значения коэффициента неидеальности и высоты барьера обнаружено не было. Статистика измерений была получена для 32-элементной матрицы. Максимальные входные рабочие частоты составили 2,1 и 7,5 ТГц для диодов, отожженных при 350 и 450 °С соответственно.

Таким образом, параметры процесса отжига могут быть выбраны в соответствии с требованиями, предъявляемыми применением изготавливаемого диода (например, низкочастотный многоэлементный приемник прямого детектирования или высокочастотный одноэлементный гетеродинальный приемник).

ПРОТОТИП ДВУХВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ, ПРОГНОЗА ОПАСНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ АСТРОКЛИМАТА

*И.Т. Бубукин¹, И.В. Ракуть^{1,3}, М.И. Агафонов¹,
А.Л. Панкратов^{1,2,3}, А.А. Яблоков^{2,3} А.В. Троцкий¹*

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

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

Традиционно для дистанционного определения влаго- и водозапаса, температурного зондирования и тропосферной задержки радиосигнала используется излучение атмосферы в окне прозрачности на длине волны 0,8 см, на линиях поглощения кислорода и водяного пара на длинах волн 0,5 и 1,35 см. Такие системы в настоящее время предлагается использовать для коррекции тропосферной задержки радиосигнала в спутниковых навигационных системах и радиоастрономии, для дистанционного зондирования атмосферы и прогноза опасных гидрометеорологических явлений.

Диагностика состояния атмосферы (влаго- и водосодержание, температурное зондирование, наличие кластерных структур) может быть решена по ее излучению в окнах прозрачности в миллиметровом диапазоне длин волн 3 и 2 мм и на линиях поглощения водяного пара 1,64 мм и кислорода 5 мм. Существенное развитие в последнее время технологий приема и усиления слабых сигналов в миллиметровом диапазоне длин

волн позволяет ставить задачу создания многоканальных систем дистанционного зондирования миллиметрового диапазона. По сравнению с традиционными системами, работающими в коротковолновой части сантиметрового диапазона, комплекс миллиметрового диапазона будет иметь более высокую точность измерения параметров атмосферы, более высокое пространственное разрешение, меньшие весовые и габаритные характеристики, более высокую помехоустойчивость. В настоящее время специализированные системы дистанционного зондирования влагосодержания атмосферы миллиметрового диапазона используются для введения поправок на фазовые задержки в атмосфере для систем апертурного синтеза и РСДБ-систем в высокогорных обсерваториях.

Прототип двухволновой радиометрической системы миллиметрового диапазона для дистанционного зондирования атмосферы апробирован летом 2018 г. при исследованиях астроклимата на РАС «Кара-Даг».

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проекты государственного задания ННГУ 3.8070.2017/БЧ, НГТУ 16.2562.2017/ПЧ и ИПФ РАН 0035-2014-0021 и 0035-2014-0206).

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ ВЫСШЕЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

*А.В. Коудельный, А.С. Бондаренко, И.М. Малай, В.А. Перепелкин,
В.А. Семенов, И.П. Чирков*

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

Очевидной тенденцией развития радиоэлектроники является освоение новых частотных диапазонов. Современная техника СВЧ продвинулась в область миллиметровых и начинает осваивать субмиллиметровый диапазон длин волн, уменьшая габариты и вес используемых приборов, увеличивая дальность и скорость передачи данных. Успех разработки устройств СВЧ-диапазона непосредственно связан с точностью измеряемых параметров.

Основными параметрами, характеризующими качество приборов, работающих в СВЧ-диапазоне, являются мощность СВЧ, спектральная плотность мощности шумового радиозлучения и частота. От них зависит

дальность и устойчивость приема радиосигналов, качество связи, контроль качества используемых приемо-передающих устройств, определение характеристик применяемых приборов.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» по заказу Росстандарта выполняется работа, целью которой в том числе является расширение рабочего диапазона частот государственного первичного эталона единицы мощности электромагнитных колебаний и обеспечение единства измерений путем его модернизации.

Чувствительный элемент эталонного измерителя мощности изготавливается в виде V-образного поглощающего клина, изготовленного из монокристаллического полупроводника (кремния).

Преимуществами преобразователей мощности СВЧ на основе клиновидных кремниевых болометров являются: хорошее согласование в широком диапазоне частот, высокая долговременная стабильность, практически полное отсутствие паразитного излучения СВЧ, удобство поэлементного анализа составляющих погрешности. Недостаток, связанный с относительно большой тепловой постоянной времени, может быть компенсирован применением системы замещения на основе аналогового или цифрового регулирования мощности постоянного тока при поддержании неизменного значения сопротивления болометра.

Технические характеристики полупроводниковых болометрических преобразователей, применяемых в составе разрабатываемого комплекса аппаратуры (слабая частотная зависимость калибровочного коэффициента КК, хорошее согласование с трактом СВЧ, низкая неэквивалентность замещения, приемлемое время установления показаний), позволяют проводить измерения мощности СВЧ на любой произвольной частоте в диапазоне частот волновода.

Проведенные расчеты и экспериментальные исследования подтвердили возможность выполнения заявленных технических характеристик в полном объеме. По результатам выполненных работ утвержден Государственный рабочий эталон единицы мощности электромагнитных колебаний 3.1.ZZT.0288.2018 в диапазоне значений от 0,1 до 10 мВт на частотах от 37,5 до 220 ГГц. По завершении ОКР планируется утверждение государственного первичного эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц с перспективой расширения диапазона частот до 178,4 ГГц и выше.

**МИЛЛИМЕТРОВОЕ
И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
В ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

ЭКСПЕРИМЕНТЫ СО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ ПЛАЗМЕННОМ СТЕНДЕ «КРОТ»: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*М.Е. Гуцин¹, В.А. Терехин², С.В. Коробков¹, А.В. Стриковский¹,
Н.А. Айдакина¹, И.Ю. Зудин¹, В.И. Гундорин¹, К.Н. Лоскутов¹*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров

Стенд «Крот» является крупнейшим объектом научной структуры РФ – он имеет вакуумную камеру объемом 180 м³ с высокочастотным индукционным источником плазмы и генератором импульсного магнитного поля килогауссного уровня. Уникальность установки заключается в возможности создания квазиоднородного плазменного столба длиной до 10 м и диаметром до 3 м. Стенд «Крот» был создан в начале 1980-х годов как специализированная установка для изучения процессов взаимодействия мощных микроволновых пучков с плазмой. В настоящее время стенд используется для проведения модельных исследований в области динамики космической плазмы, генерации и распространения радиоволн в ионосфере и магнитосфере Земли.

Сверхширокополосные электромагнитные импульсы (СШП ЭМИ), формируемые различными источниками, представляют интерес с точки зрения развития новых методов диагностики ионизированных оболочек Земли и создания новых каналов радиосвязи. Распространение СШП ЭМИ (как правило – высокой интенсивности) в плазме сопровождается трансформацией формы импульса, эффектами ускорения заряженных частиц и дополнительной ионизации. Одним из перспективных подходов к моделированию этих процессов является лабораторное моделирование. Из имеющихся установок реализует необходимое для адекватного моделирования приближение «безграничной» плазмы только стенд «Крот».

В докладе представлены результаты экспериментов по распространению СШП ЭМИ с длительностью фронта около 70 пс и частотным спектром в полосе до нескольких гигагерц в плазме. Полученные в квазиоднородном плазменном столбе данные согласуются с результатами численного моделирования. Описан планируемый эксперимент по распространению СШП ЭМИ в гигантской коаксиальной линии с плазменным заполнением. Полученные результаты используются для интерпретации эффектов распространения СШП ЭМИ в ионосфере. Обсуждается возможность создания плазменной дисперсионной линии с перестраиваемыми параметрами для испытаний элементов техники при воздействии СШП ЭМИ, прошедшего через плазму.

ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД В СФОКУСИРОВАННЫХ ПУЧКАХ ВОЛН ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

*А.В. Сидоров^{1,2}, С.В. Голубев¹, С.В. Разин¹, А.В. Водопьянов^{1,2},
А.П. Веселов¹, М.Е. Викторов^{1,2}, С.В. Синцов¹, А.Г. Лучинин¹,
М.В. Морозкин¹, М.Д. Проявин¹, М.Ю. Глявин¹*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Терагерцовый диапазон, занимающий промежуточное положение между микроволновым и оптическим участками спектра электромагнитных волн, оставался в течение долгого времени наименее изученным. Вместе с тем этот диапазон обладает рядом специфических особенностей, делающих его весьма привлекательным для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, биологии и медицины. В частности, терагерцовый диапазон, равно как и субтерагерцовый, является наименее изученным с точки зрения физики газового разряда.

Изучение газового разряда в квазиоптических пучках мощного электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот привлекательно для большого количества как фундаментальных, так и прикладных исследований, поскольку плотная плазма разряда может служить ярким источником излучения оптического и УФ-диапазона. Изучение данного разряда стало возможным благодаря появлению уникальных и надежно работающих источников излучения терагерцового диапазона частот. В настоящее время в ИПФ РАН (Нижний Новгород) созданы электровакуумные источники излучения терагерцового диапазона – гиротроны с мощностью на уровне 100 кВт в импульсном режиме работы (длительность импульса ~ 10 мкс) и киловатта в непрерывном режиме, начаты исследования газоразрядных явлений в различных газах.

В данной работе представлены результаты исследований терагерцового разряда в различных газах в широком диапазоне давлений, которые велись в ИПФ РАН в течение последних нескольких лет.

Теоретически и экспериментально изучены пороги пробоя в одноатомных и молекулярных газах для различных частот греющего излучения в субтерагерцовом и терагерцовом диапазоне. Изучена динамика свечения разряда. Продемонстрировано наличие мощного послесвечения в разряде как в одноатомных газах (при низких давлениях газа), так и в молекулярных (при высоких давлениях). Проведены первые эксперименты по исследованию динамики распространения терагерцового разряда в различных газах в широких диапазонах давлений (от нескольких торр до нескольких атмосфер) и при различных плотностях потока падающего терагерцового излучения (от десятков кВт/см² до нескольких МВт/см²).

Изучено возможное образование терагерцового разряда в неоднородном потоке газа в качестве точечного источника УФ, ВУФ и ЭУФ-излучения.

РАЗРАБОТКА ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА СВЯЗИ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

*В.В. Бирюков¹, В.Л. Вакс^{1,2}, А.Н. Панин^{1,2}, С.И. Приползин^{1,2},
Ю.В. Раевская¹, А.С. Раевский¹, В.В. Щербачев¹*

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

² Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

В докладе представлены результаты совместной работы коллективов НГТУ им. Р.Е. Алексеева и ИФМ РАН по созданию широкополосного приемопередающего устройства на частоте 200–220 ГГц с применением современных полупроводниковых приборов. В качестве задающих генераторов как передатчика, так и гетеродина приемника применены генераторы на диэлектрических резонаторах (ГДР). Они обладают достаточно высокой стабильностью частоты и спектральной чистотой сигнала. Далее сигналы от ГДР проходят через умножитель частоты на 15. В передатчике этот сигнал предварительно модулируется по амплитуде. Выбрана амплитудная манипуляция как наиболее простой способ и при данном построении схемы единственно возможный. Другие виды модуляции неизбежно были бы искажены при умножении частоты. Сигнал с частотой 110 ГГц в передатчике затем удваивается по частоте до 220 ГГц и поступает на антенну, имеющую высокий (порядка 50 дБ) коэффициент усиления.

Приемная антенна принимает сигнал с несущей частотой 220 ГГц и передает его на входной субгармонический смеситель, на другой вход которого поступает сигнал от гетеродина 105 ГГц. С выхода смесителя сигнал ПЧ 10 ГГц усиливается и проходит демодуляцию. Расчеты показывают, что мощности на выходе передатчика в несколько сотен микроватт достаточно для передачи цифровых данных на расстояние до 1,5 км при коэффициенте усиления антенны не менее 50 дБ.

Одним из видов антенн, обеспечивающих такой высокий коэффициент усиления, является зеркальная антенна Кассегрена. Она состоит из рупорного облучателя, вспомогательного зеркала – субрефлектора в виде гиперboloида вращения – и основного зеркала в виде параболоида вращения. Преимуществом антенны является небольшой размер, простота в изготовлении, при этом достигаются высокие значения коэффициента усиления и малые уровни боковых лепестков.

Диаграмма направленности разработанной и изготовленной антенны имеет игловидную форму и полностью соответствует предъявляемым требованиям, при этом достигается хорошее согласование в полосе частот 219–221 ГГц. Коэффициент стоячей волны по напряжению не превышает 1,06 в указанной полосе.

Лабораторные испытания разработанного приемопередающего устройства показали возможность связи со скоростью до 1 Гбит/с на расстоянии 1 км.

Дальнейшее развитие предложенной схемы предполагает применение усилителей в передатчике и приемнике для увеличения выходной мощности и уменьшения коэффициента шума приемника.

Доклад подготовлен по итогам исследования, проведенного в рамках проекта Российского научного фонда № 17-19-01628.

О КОРРЕКТНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ АТМОСФЕРЫ ПРИ ПОМОЩИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОМЕТРОВ

Г.М. Бубнов^{1,2}, В.Ф. Вдовин^{1,2}, В.И. Носов¹, П.М. Землянуха¹

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

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

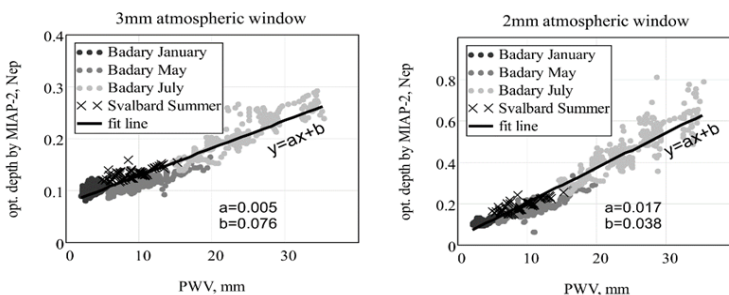
Калибровка микроволновых радиометрических систем обычно производится по яркостной температуре черного тела. Однако этот подход не совсем корректен применительно к измерениям оптической толщины атмосферы широкополосными радиометрами, работающими по методу «атмосферных разрезов». В широкополосных приемниках начинает сказываться неоднородность спектра излучения атмосферы по сравнению с планковским характером спектра черного тела. В то же время в природе не существует эталонной атмосферы, что приводит к необходимости внесения поправок в метод разрезов с учетом параметров радиометра.

Идея этих поправок состоит в том, чтобы: а) определить взаимосвязь оптической толщины в миллиметровом диапазоне с интегральной влажностью; б) путем моделирования реальной атмосферы получить эквивалентные частоты приемников по совпадению коэффициентов «сухого» поглощения и удельного поглощения в парах воды.

На рисунке представлена взаимосвязь оптической толщины в окнах прозрачности 2 мм и 3 мм по радиометру МИАП-2 и интегрального влагосодержания PWV (мм). Взаимосвязь получена в двух независимых экспериментах: в обсерватории Бадары (точки) и возле г. Баренцбург (кресты).

Моделирование атмосферы в MPM Liebe с использованием реальных высотных профилей давления, температуры и влажности показало, что эквивалентные частоты радиометрической системы МИАП-2 составляют

79 ГГц для окна прозрачности 3 мм и 133 ГГц для окна 2 мм. Это позволяет конкретизировать частоты для проведенных ранее измерений.



Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ (СП-5103.2018.3), госзадания ИПФ РАН 0035-2014-0021, а также IEEE APS Eugene F. Knott Memorial Doctoral Research Grant.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОКЛИМАТА НА РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «КАРА-ДАГ» В КРЫМУ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

*И.Т. Бубукин¹, И.В. Ракуть^{1,3}, М.И. Агафонов¹,
А.Л. Панкратов^{1,2,3}, А.В. Троицкий¹, В.А. Лапченко⁴,
Р.В. Горбунов⁴, И.И. Зинченко^{1,2}, В.И. Носов², В.Ф. Вдовин^{2,3}*

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

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

⁴ Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН, Крым

Представлены результаты исследования астроклимата на радиоастрономической станции «Кара-Даг» (Республика Крым). Измерения проводились с 22 июля по 21 сентября 2017 года. Проведен анализ алгоритмов обработки данных, полученных методом атмосферных разрезов. Рассмотрены закономерности изменения параметров прозрачности атмосферы и их связи с климатическими особенностями места наблюдений. Предложены альтернативные и более дешевые по сравнению с существ-

вующими тенденциями (строительство инструментов в гористой местности или в местности с холодным климатом) подходы по уменьшению влияния атмосферной влаги на работу радиоастрономических инструментов в миллиметровом диапазоне.

Анализ связи гистограмм атмосферного поглощения в диапазоне 2 и 3 мм на станции «Кара-Даг» с метеоусловиями показал, что при северных ветрах и ясном небе характер гистограмм может существенно отличаться от среднестатистических. В этом случае гистограммы имеют два максимума. Сравнение величин поглощений в боковых максимумах с гистограммами измерений поглощения на МРАО «Суффа» показывает, что при указанных обстоятельствах условия наблюдений для станции «Кара-Даг» сравнимы с МРАО «Суффа» (высота 2,4 км над уровнем моря). Измерения на станции «Кара-Даг» проводились летом 2017 года в условиях погодной аномалии, при частых дождях и грозах. Очевидно, что для стандартных условий крымского лета – низкой влажности и отсутствии дождей – процент возникновения ситуаций с низким влагосодержанием должен возрастать. В дальнейшем планируется продолжение длительных исследований астроклимата на Карадаге, в том числе и в зимнее время.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проекты государственного задания ННГУ 3.8070.2017/БЧ, НГТУ 16.2562.2017/ПЧ и ИПФ РАН 0035-2014-0021 и 0035-2014-0206).

I. Agafonov M.I., Bubnov G.M., Bubukin I.T., Vdovin V.F., Gorbunov R.V., Zinchenko I.I., Lapchenko V.A., Nosov V.I., Pankratov A.L., Rakut I.V. The Results of Observing the Astroclimate on the Crimean Peninsula in the Shortwave Part of the Millimeter Wavelength Range // *Astrophysical Bulletin*. 2018. Vol. 73, № 3. P. 387–392 ; doi: 10.1134/S1990341318030124.

РЕЗУЛЬТАТЫ МИКРОВОЛНОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ОЗОНА СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗА ПОЛЯРНЫМ КРУГОМ ЗИМОЙ 2017/18 ГОДА

*Ю.Ю. Куликов¹, А.Ф. Андриянов¹, В.И. Демин², В.М. Демкин³,
А.С. Кириллов², Б.В. Козелов², В.Г. Рыскин¹, В.А. Шишаев²*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Полярный геофизический институт, Апатиты

³ Высшая школа экономики, Нижний Новгород

Мы представляем новый цикл измерений озона средней атмосферы на Кольском полуострове в Апатитах (67N, 33E) методом микровол-

новой радиометрии. Целью наблюдений было исследовать изменения озона при воздействии заряженной компоненты в авроральной зоне, а также влияние внезапного стратосферного потепления на вертикальную структуру озона на высотах выше 20 км. Средняя атмосфера над Апатитами, как правило, находится внутри полярного зимнего вихря, и с этим связано понижение содержания стратосферного озона, которое ранее неоднократно отмечалось [1, 2]. Причина возникновения дефицита озона также представляет интерес для исследования. В наблюдениях был использован мобильный микроволновый озонметр с рабочей частотой 110836,04 МГц. Наблюдения продолжались с ноября по март. Кроме того, за этот период были проведены три непрерывные серии измерений озона с временным разрешением 15 минут в течение нескольких суток. Данные о вертикальном распределении озона на высотах 22–60 км по микроволновым наземным измерениям были сопоставлены с бортовыми измерениями озона и температуры MLS/Aura и с прямыми измерениями озонзондами на станции Sodankyla (68N, 27E). Получены суточные вариации содержания озона на высоте 60 км во время полярной ночи и весеннего солнцестояния: уменьшение концентраций днем и рост ночью. Наибольшие амплитуды суточного изменения содержания озона наблюдались весной, что связано с большими скоростями процессов фотодиссоциации молекул озона солнечным излучением при больших углах высоты Солнца. Обнаружена разница суточных ходов озона нижней мезосферы в зависимости от угла Солнца над горизонтом.

Настоящая работа поддержана грантами РФФИ № 15-05-04249 и 18-45-52009.

1. Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Красильников А.А., Кукин Л.М. Микроволновые наблюдения изменчивости озона в стратосфере высоких широт зимой 2002–2003 годов // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 2. С. 134–141.

2. Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Кукин Л.М., Рыскин В.Г., Белоглазов М.И., Савченко В.Р. О поведении стратосферного озона в Западном секторе Арктики зимой – весной 2003/2004 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 2. С. 260–265.

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ ОКНА ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

*В.В. Паршин, С.Н. Власов, Е.В. Копосова, С.Ю. Корнишин,
Д.М. Перминов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Представляются результаты теоретического расчета и экспериментального исследования двухстороннего просветления пластины диэлектрика, путем создания на ее поверхности гофрированной структуры специального профиля, позволяющей минимизировать коэффициент отражения электромагнитной волны на уровне $R = 10^{-3}$ в диапазоне по крайней мере одной октавы. Подобное просветление предполагается использовать как для окон вывода энергии перестраиваемых генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, так и для окон широкодиапазонной спектроскопической аппаратуры, используемой для диагностики широкого класса материалов, как газов, так и конденсированных сред, включая медицинские применения, в которой исследуемый образец/объект размещается внутри герметичного бокса.

Теоретические расчеты основаны на численном решении полных уравнений электромагнитного поля.

Экспериментальное исследование отражения от гофрированной пластины проводилось по классической схеме на основе интерферометра Майкельсона. Выявлено, что в диапазоне частот 900 ГГц коэффициент отражения не более -23 дБ.

Просветляющий профиль выполнен на пластине, изготовленной из арфлона – радиационно модифицированного тефлона Ф-4. Именно этот современный материал позволил изготовить просветляющую структуру с требуемой точностью.

НЕПРЕРЫВНЫЙ СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЭЦР ИОННЫЙ ИСТОЧНИК

*В.А. Скалыга^{1,2}, С.С. Выбин^{1,2}, М.Ю. Глявин¹, С.В. Голубев¹,
А.Г. Еремеев¹, И.В. Изотов¹, Р.Л. Лапин¹, И.В. Плотников¹,
М.Д. Проявин¹, С.В. Разин¹, Р.А. Шапошников¹*

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В ИПФ РАН продолжительное время ведутся исследования электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) разряда, поддерживаемого в открытых магнитных ловушках мощным излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн. Работы были направлены в первую очередь на решение проблемы создания сильноточного ЭЦР-источника многозарядных ионов. Перспективы были связаны с использованием мощного высокочастотного излучения гиротронов для нагрева плазмы, которое позволило существенно повысить ее концентрацию (пропорционально квадрату частоты греющего поля). Эксперименты в импульсном режиме продемонстрировали существенные преимущества использования гиротронов в ЭЦР ионных источниках, была достигнута рекордная плотность тока ионного пучка – до 600–700 мА/см² в сочетании с уникально низким эмиттансом. Однако в большинстве случаев ионный источник должен иметь возможность работы в непрерывном режиме. Последние исследования, проводимые в ИПФ РАН, как раз связаны с переходом от импульсного к непрерывному режиму работы таких систем. Исследования разряда в непрерывном режиме потребовали создания новой экспериментальной установки, которая получила название GISMO (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation). Источник использует излучение гиротронов с характеристиками 28 ГГц/10 кВт и 37,5 ГГц/20 кВт. Одной из особенностей установки является возможность реализации рекордного для ЭЦР-источников ионов удельного энерговклада в плазму – до 100 Вт/см³. В докладе будут представлены первые результаты исследования параметров плазмы и извлекаемых ионных пучков в новой системе.

Работа выполняется в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-исследовательского комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение 14.604.21.0195 (уникальный идентификационный номер RFMEFI60417X0195).

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МИКРОВОЛНОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ИПФ РАН

*А.А. Швецов, О.С. Большаков, А.А. Красильников,
М.Ю. Куликов, Ю.Ю. Куликов, В.Г. Рыскин, Е.А. Серов,
Л.И. Федосеев, И.В. Леснов, А.Д. Горьков, А.М. Фейгин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Методы и средства микроволнового дистанционного зондирования атмосферы и земной поверхности развиваются в ИПФ РАН в течение нескольких десятилетий. С 1986 по 2004 год эта деятельность была в первую очередь сконцентрирована на экспериментальных и теоретических исследованиях озонового слоя Земли и проходила под руководством Е.В. Суворова, который возглавлял Отдел физики атмосферы и микроволновой диагностики. В этот период наряду с модернизацией и созданием аппаратных средств получили развитие оригинальные методы решения обратных задач восстановления профиля малых составляющих атмосферы. С помощью этих приборов и методов были проведены длительные серии измерений в различных географических зонах земного шара: в средних широтах, в Арктике и Антарктике, а также с передвижных платформ: борта ледокола и вагона-лаборатории [1, 2]. Наиболее современный, полностью автоматизированный, оснащенный оригинальной системой непрерывной внутренней калибровки и цифровым анализатором спектра озонметр был введен в эксплуатацию в 2013 году [3]. С 2015 года с его помощью проводится непрерывный мониторинг состояния озонового слоя над Нижним Новгородом [4].

В последующие годы в Отделе физики атмосферы и микроволновой диагностики ИПФ РАН были созданы мобильные автоматизированные спектрорадиометры для наземного термического зондирования средней атмосферы, свободной тропосферы и приземного слоя, работающие в 5 мм полосе излучения молекулярного кислорода [6]. К настоящему времени эти приборы и микроволновый мобильный озонметр объединены в спектрометрический комплекс, предназначенный для мониторинга состояния озонового слоя и термической структуры атмосферы [5, 6]. Все приборы комплекса представляют собой высокочувствительные радиометры супергетеродинного типа с малошумящим НЕМТ входным усилителем и внутренней автоматической калибровкой на основе модулятора-калибратора [7]. Управление комплексом и сбор данных осуществляется с помощью ПК.

Для исследования земных покровов по тому же принципу в последние годы создан трехдиапазонный спектрорадиометр, позволяющий выполнять дистанционные измерения излучательных и рассеивающих характеристик земных покровов. Прибор работает в диапазонах длин волн 5,5; 2,5 и 8 мм. Он прошел успешные испытания при измерениях характе-

ристик снежного покрова в условиях Арктики (Финляндия) и среднегорья (Франция, Альпы) [8].

В настоящее время проводится модернизация термометрической части комплекса для зондирования земной атмосферы. В частности, 8-канальный спектро радиометр 5-мм диапазона оснащен переключателем линейных поляризаций, что существенно расширяет область его применения: модернизированный прибор может быть использован для дистанционных измерений твердых частиц в атмосфере и поляризационных характеристик земных покровов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-72-10113.

1. Kulikov Y.Y., Kuznetsov I.V., Andrianov A.F., Borisov O.N., Dryagin S.Y., Erukhimova T.L., Kukun L.M., Lubyako L.V., Mocheneva O.S., Nikiforov P.L., Ryskin V.G., Suvorov E.V., Shanin V.N., Shvetsov A.A., Yurkov V.M. Stratospheric ozone variability in high latitudes from microwave observations // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, № D10. P. 21109–21116.

2. Белоглазов М.И., Демкин В.М., Красильников А.А., Кукин Л.М., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Шанин В.Н. Микроволновые измерения содержания озона в зимней стратосфере Арктики // Геомагнетизм и аэронавигация. 2010. Т. 50, № 2. С. 265–272.

3. Красильников А.А., Куликов М.Ю., Кукин Л.М., Рыскин В.Г., Федосеев Л.И., Швецов А.А., Мухин Д.Н., Беликович М.В., Большаков О.С., Щитов А.М., Михайловский В.Л., Шумилов В.А., Фейгин А.М. Мобильный спектро радиометрический комплекс для зондирования озона средней атмосферы // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8/9. С. 699–710.

4. 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. Автоматизированный микроволновый спектро радиометр для измерения излучения атмосферы в линии озона // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 2. С. 123–125.

5. Куликов М.Ю., Красильников А.А., Швецов А.А., Федосеев Л.И., Рыскин В.Г., Кукин Л.М., Мухин Д.Н., Беликович М.В., Караитин Д.А., Скалыга Н.К., Фейгин А.М. Одновременные микроволновые измерения озона и температуры средней атмосферы с поверхности Земли // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 6. С. 454–464.

6. Рыскин В.Г., Швецов А.А., Куликов М.Ю., Беликович М.В., Большаков О.С., Красильников А.А., Кукин Л.М., Леснов И.В., Скалыга Н.К., Фейгин А.М. Микроволновый радиометрический комплекс для исследования термической структуры атмосферы Земли // Известия вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 8/9. С. 819–827.

7. Красильников А.А., Куликов М.Ю., Рыскин В.Г., Федосеев Л.И., Швецов А.А., Божков В.Г., Большаков О.С. Система калибровки микроволновых радиометров на основе модулятора-калибратора // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 5. С. 96–99.

8. Швецов А.А., Большаков О.С., Рыскин В.Г., Фейгин А.М., Федосеев Л.И., Коробовский А., Аверченко А.В. Дистанционное зондирование снежного покрова в миллиметровом диапазоне длин волн // Известия вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 3. С. 231–240.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОГА ПРОБОЯ МОЩНЫМ ТЕРАГЕРЦОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В РАЗЛИЧНЫХ ГАЗАХ

*А.В. Сидоров, С.В. Разин, А.В. Водопьянов, А.П. Веселов,
М.Ю. Глявин, А.Г. Лучинин, М.В. Морозкин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В отличие от хорошо исследованных СВЧ-разряда и лазерной искры (прежде всего в ИК и видимом диапазонах) разряд в пучках волн терагерцового диапазона частот остается практически не изученным, в том числе с точки зрения пробоя газа. В настоящее время наблюдается существенный прогресс в исследовании терагерцового разряда, связанный в первую очередь с созданием источников мощного когерентного излучения в указанном диапазоне – гиротронов и лазеров на свободных электронах.

В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований пробоя различных газов (аргон, криптон, ксенон, азот, кислород, воздух) мощным излучением гиротронов терагерцового и субтерагерцового диапазона, созданных недавно в ИПФ РАН.

Экспериментальные исследования проводились в сфокусированных пучках волн импульсных гиротронов с частотой 670 ГГц (40 кВт) и 250 ГГц (250 кВт). Достигнутые величины интенсивности излучения (10 МВт/см² на 670 ГГц, 5 МВт/см² на 250 ГГц) позволили осуществить пробой различных газов (как одноатомных, так и молекулярных) в широком диапазоне давлений газа: 1–1500 Торр. В случае с гиротроном с частотой 250 ГГц проведено подробное исследование пробойной кривой (зависимость пробойной величины напряженности поля от давления газа), для терагерцового гиротрона с частотой 670 ГГц измерены границы существования пробоя при фиксированной мощности гиротрона.

Теоретические исследования пробоя тяжелых одноатомных газов осуществлялись согласно теории, подробно изложенной в [1]. В этом случае, пренебрегая потерями на упругих столкновениях, решая кинетическое уравнение для функции распределения электронов, можно найти частоту ионизации. Диффузия при этом предполагается не зависящей от энергии электронов и определяемой только давлением газа. В результате уравнение баланса ионизации сводится к некоему трансцендентному уравнению, разрешив которое относительно напряженности поля можно найти пробойную кривую. Расчет пробойных полей для молекулярных газов, в частности для воздуха, проводился с использованием табулированных значений частоты ионизации и коэффициента диффузии, полученных для постоянных полей, с заменой постоянного поля на так называемое эффективное. В случае электроотрицательных газов учитывалось также как прилипание, так и отталкивание электронов. Проведено сравнение результатов экспериментов с теоретическими расчетами.

1. *Vyskrebentsev A.I., Raizer Yu.P.* // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 14, 1, pp. 32–38 (1973).

ФОРМИРОВАНИЕ ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ПЛОТНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ ИЗ ЭЦР-РАЗРЯДА, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА

*С.В. Голубев, Р.А. Шапошников, И.В. Изотов, Р.Л. Лапин,
С.В. Разин, А.В. Сидоров, В.А. Скалыга*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Одним из наиболее эффективных способов получения плотной плазмы с высокой степенью ионизации является электронно-циклотронный резонансный (ЭЦР) разряд, поддерживаемый мощным излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн. Предыдущие эксперименты в ИПФ РАН показали, что при формировании такого разряда в прямой магнитной ловушке может быть получена сильно неравновесная плазма с температурой электронов на уровне 100 эВ и концентрацией $(1-8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Успешно была продемонстрирована возможность извлечения из такой плазмы пучков многозарядных ионов тяжелых газов и протонных пучков с плотностью тока до 800 мА/см^2 при низких значениях их эмиттанса. Такие пучки перспективны для инъекции в современные сильноточные ускорители.

Другой актуальной задачей является формирование сильноточных водородных пучков с большими апертурами для современных систем нейтральной инъекции, одного из основных средств нагрева плазмы в термоядерных установках. В данной работе предложено исследовать возможность использования в таких системах источника плазмы на основе ЭЦР-разряда. Были проведены эксперименты по получению плотных потоков плазмы из ЭЦР-разряда в магнитном поле одиночного соленоида, поддерживаемого излучением гиротрона с частотой 37,5 ГГц и мощностью до 100 кВт. В ходе экспериментов были проведены исследования зависимости плотности потока плазмы от параметров системы, показана возможность получения потоков плазмы на уровне 750 мА/см^2 с равномерным распределением в поперечном сечении. Также были проведены эксперименты по экстракции ионов из плазмы, в ходе которых была достигнута плотность тока $1,5 \text{ А/см}^2$.

Авторский указатель

В		Богдашов А.А.	60	Гордиенко В.М.	35
Bubnov G.	93	Большаков О.С.	110	Горьков А.Д.	110
D		Бондаренко А.С.	97	Гузнов Ю.М.	68
de Bernardis P.	93	Бубнов Г.М.	104	Гундорин В.И.	101
de Graauw Th.	85	Бубукин И.Т.	96, 105	Гущин М.Е.	101
К		Быкадоров А.А.	50	Д	
Korotaev D.	93	В		Давидюк И.В.	11
М		Вакс В.Л.	103	Дейчули О.И.	11
Masi S.	93	Вдовин В.Ф.	85, 104, 105	Дементьев Е.Н.	11
О		Вебер С.Л.	12	Демин В.И.	106
Okunev V.	93	Веселов А.П.	102, 112	Демкин В.М.	106
V		Викторов М.Е.	102	Денисенко А.Н.	54, 57
Vdovin V.	93	Вилков М.Н.	67, 80	Денисов Г.Г.	48, 56, 60
А		Виноградов И.С.	85	Джиджоев М.С.	35
Абубакиров Э.Б.	54, 57	Винокуров Н.А.	11, 12	Дмитриев П.Н.	84
Агафонов А.Н.	26	Вихарев А.А.	39, 57	Довженко Б.А.	11
Агафонов М.И.	96, 105	Власов С.Н.	67, 108	Дубинов А.А.	29
Азаров И.А.	12	Воблый П.Д.	11	Е	
Айдакина Н.А.	101	Водопьянов А.В.	102, 112	Еремеев А.Г.	109
Александров Ю.А.	85	Волков В.Н.	11	Ж	
Алексеев П.А.	32	Вопилкин Е.А.	27	Железнов И.В.	52, 70
Алексеев Р.А.	90	Воробьева Е.Д.	40	Живанков К.И.	60
Алешкин В.Я.	22	Воронов Б.	95	Жолудев М.С.	22
Андрианов А.С.	85	Выбин С.С.	109	Жукавин Р.Х.	12
Андрианов М.Н.	91	Г		З	
Андриянов А.Ф.	106	Гавриленко В.И.	17, 22	Завольский Н.А.	31
Андронов А.А.	14	Галушка В.В.	63	Зайцев К.И.	20
Анненков В.В.	77	Гачев И.Г.	60, 68	Запевалов В.Е.	19, 51, 67, 71, 74
Арбузов В.С.	11	Герасимов В.В.	12	Заславский В.Ю.	21, 52, 57, 61, 72, 75
Аржанников А.В.	72, 77	Гетманов Я.В.	11, 12	Зброжек В.О.	15, 18, 27, 29
Архинов М.Ю.	85	Гиваргизов М.Е.	64	Землянуха П.М.	104
Ахмеджанов Р.А.	23, 33	Гинзбург Н.С.	21, 47, 49, 52, 57, 61, 67, 72, 76, 80	Зибарова А.О.	92
Б		Глявин М.Ю.	13, 29, 42, 52, 59, 79, 102, 109, 112	Зильберлей Т.	95
Бабакин Н.Г.	85	Голованов А.А.	47	Зинченко И.И.	105
Бак П.А.	60	Голубев Е.С.	85	Зотова И.В.	47, 52, 67, 76, 79, 80
Бакунин В.Л.	56	Голубев С.В.	102, 109, 113	Зудин И.Ю.	101
Бакурский С.В.	83	Голубятников Г.Ю.	49, 90	Зуев А.С.	19, 67, 70, 71
Балакин А.В.	35	Гольцман Г.Н.	86, 95	И	
Балашов А.А.	92	Гончаров Ю.Г.	20	Иванов А.А.	53
Бандуркин И.В.	25, 31, 79	Горбачев Я.И.	11, 12	Иванов И.А.	77
Барышев А.М.	84, 85	Горбунов Р.В.	105	Изотов И.В.	109, 113
Бахтеев И.Ш.	63	Гордеева А.В.	15, 18, 27, 29, 34	Ильичев А.В.	50, 87
Беликов И.	95			Иляков И.Е.	23, 33
Белоусов В.И.	65				
Бирюков А.В.	85				
Бирюков В.В.	103				
Благодаткин А.В.	15, 18, 27, 29				

К		Лапин Р.Л.	109, 113	П	
Калинин П.В.	72	Лапинов А.В.	90, 94	Павельев А.Б.	67
Кальнов Ю.К.	31	Лапченко В.А.	105	Павельев В.С.	12, 26, 37
Камешков О.Э.	12, 36	Лебедев С.П.	32	Павлов А.М.	63
Каневский Б.З.	85	Леонтьев А.А.	40	Павлов А.Ю.	20
Кардашев Н.С.	85	Леонтьев А.Н.	54	Павлов С.А.	27
Касатов А.А.	77	Леснов И.В.	110	Палашов С.А.	87
Каурова Н.	95	Лихачев С.Ф.	85	Панин А.Н.	103
Кенжебулатов Е.К.	60	Логачев П.В.	60	Панкратов А.Л.	15, 18, 27, 29, 34, 96, 105
Кириллов А.С.	106	Лоскутов К.Н.	101	Парамонов М.Е.	84
Киселев А.Б.	85	Луковников Д.А.	68	Парафин А.Е.	27
Китаева Г.Х.	40, 43	Лучинин А.Г.	79, 102, 112	Паршин В.В.	71, 75, 108
Кленов Н.В.	83			Пельтек С.Е.	12
Князев Б.А.	11, 12, 26, 36, 37	М		Перепелкин В.А.	97
Козак В.Р.	11	Макаров М.А.	77	Перминов Д.М.	108
Козелов Б.В.	106	Малай И.М.	97	Першин Д.С.	25
Козырев Е.В.	11	Малкин А.М.	21	Песков Н.Ю.	57, 72, 75
Колобашов Е.И.	11	Мануилов В.Н.	31, 52, 59	Петелин М.И.	58
Кондаков А.А.	11	Маремьянин К.В.	29	Петров А.К.	12
Копосова Е.В.	67, 108	Мастеров Д.В.	27	Петров В.М.	11
Корнишин С.Ю.	108	Махалов П.Б.	65, 69	Пилан А.М.	11
Коробков С.В.	101	Медведев Л.Э.	11	Пилипенко С.В.	85
Космович Т.А.	85	Меклер К.И.	77	Пиманов Д.А.	15, 18, 34
Котельников И.А.	36	Миронов В.А.	23, 33	Планкин О.П.	74
Коудельный А.В.	97	Михайлов Д.	95	Плотников И.В.	109
Кошелев М.А.	92	Михайлов Н.Н.	22	Подобедов Я.Г.	85
Кощелец В.П.	84	Мишакин С.В.	65	Позднякова В.И.	14
Краев С.А.	27	Молчанов С.Ю.	63	Полосаткин С.В.	77
Красильников А.А.	110	Морозкин М.В.	42, 59, 79, 102, 112	Пономарев Д.С.	20
Крутихин С.А.	11			Попик В.М.	11, 12
Кубарев В.В.	11, 12	Морозов С.В.	22, 29	Приползин С.И.	103
Кузечкин П.М.	35	Мотыгин С.В.	11	Приходько А.	95
Кузиков С.В.	39, 57	Мустафин И.А.	32	Проявин М.Д.	42, 59, 65, 75, 79, 102, 109
Кузнецов К.А.	40, 43	Мухин А.С.	15		
Кузнецов П.И.	43	Мышонкова Н.В.	85		
Кузнецов С.А.	77	Мясин Е.А.	55		
Кузьмин Л.С.	15, 18, 27, 29, 34	Н		Пышнов В.Н.	85
Кулаков А.Б.	27	Никитин А.К.	12		
Куликов М.Ю.	110	Новожилова Ю.В.	56	Р	
Куликов Н.С.	22	Носов В.И.	104, 105	Раевская Ю.В.	103
Куликов Ю.Ю.	106, 110			Раевский А.С.	103
Кулипанов Г.Н.	11, 12	О		Разин С.В.	102, 109, 112, 113
Купер Е.А.	11	Овчар В.К.	11	Ракуть И.В.	27, 29, 96, 105
Куприянов М.Ю.	83	Одинцова Т.А.	92		
Купцов И.В.	11	Озолин А.А.	85	Ревин Л.С.	18, 27, 29, 34
Куркан И.К.	66	Оладышкин И.В.	23, 33	Резник А.Н.	88
Куркин Г.Я.	11	Опарина Ю.С.	25	Репков В.В.	11
Куфтин А.Н.	19, 52, 61, 67	Осинцева Н.Д.	37	Ровенских А.Ф.	77
		Осипов В.Н.	11	Рожнев А.Г.	63
Л		Осипов Ю.А.	87		
Лаврухин Д.В.	20	Ошарин И.В.	31, 54, 70		

Розенталь Р.М.	54, 76, 79				
Ростов В.В.	47, 66	Степанов В.Д.	72, 77	Ц	
Рудаков К.И.	84	Степанова А.Н.	64	Цветков А.И.	42
Рудницкий А.Г.	85	Стриковский А.В.	101	Цыганков Р.В.	66
Рукавицина А.А.	64	Суворов Е.В.	23, 33	Ч	
Румянцев В.В.	22, 29			Чернов К.Н.	11
Рыскин В.Г.	106, 110	Т		Черный Р.А.	85
Рыскин Н.М.	63	Тарадаев Е.П.	64	Ческидов В.Г.	11
С		Тарадаев С.П.	64	Чесноков Е.Н.	12
Савилов А.В.	25, 31, 39, 57	Тарарышкин С.В.	11	Чигинев А.В.	15, 27, 34
Саликова Т.В.	11, 12	Терехин В.А.	101	Чирков И.П.	97
Самсонов С.В.	60, 67	Терешонок М.В.	83	Чистиков Д.Н.	92
Самцов Д.А.	77	Тимофеев И.В.	77	Чопорова Ю.Ю.	12, 26, 37
Сандалов Е.С.	60, 72	Торгашов Г.В.	63	Чурин С.А.	27
Сафроненков Д.А.	40	Торгашов Р.А.	63		
Седляров И.К.	11	Трибендис А.Г.	11	Ш	
Сезонов В.Е.	64	Троицкий А.В.	96, 105	Шалацкий А.В.	50, 87
Семенов В.А.	97	Трухин В.Н.	32	Шапошников Р.А.	109, 113
Семенов Е.С.	74, 78	Тукмаков К.Н.	26, 37	Шарыпов К.А.	47, 66
Сергеев А.С.	21, 52, 67, 72, 76, 80	Тумарева Т.А.	64	Шастин В.Н.	12
Сердобинцев А.А.	63	У		Швецов А.А.	110
Середняков С.С.	11, 12	Ульмаскулов М.Р.	66	Шевченко О.А.	11, 12
Серов Е.А.	71, 92, 110	Уточкин В.В.	22	Шипилов Г.В.	85
Сидоров А.В.	102, 112, 113	Ф		Шишаев В.А.	106
Синев И.В.	63	Фадеев Д.А.	23, 33	Шишкин Б.В.	23, 33
Синицкий С.Л.	60, 72, 77	Фадеев М.А.	22	Шкуринов А.П.	35
Синцов С.В.	102	Федорчук С.Д.	85	Шор Е.Д.	87
Скальга В.А.	109, 113	Федосеев Л.И.	110	Шпак В.Г.	66
Сковородин Д.И.	60	Федотов А.Э.	54, 65, 76, 79	Шунайлов С.А.	47, 66
Скринский А.Н.	11	Фейгин А.М.	110	Шураков А.	95
Смирнов А.В.	85	Фикс А.Ш.	31	Щ	
Смирнов А.И.	85	Филина Е.К.	85	Щеглов М.А.	11, 12
Соболев Д.И.	59, 61, 65, 75	Фильченков Е.В.	21	Щеголев А.Е.	83
Соловьев И.И.	83	Фильченков С.Е.	68	Щербаков В.В.	103
Солянкин П.М.	35	Финенко А.А.	92	Ю	
Соминский Г.Г.	64	Фокин А.П.	29, 42	Юровский Л.А.	80
Спектор И.Е.	20	Фролов А.Д.	43	Я	
Стародубов А.В.	63	Х		Яблоков А.А.	27, 96
		Хабибуллин Р.А.	20	Якущева Г.Г.	43
		Халиманович В.И.	85	Яландин М.И.	47, 66
		Хеспер Р.	84	Ячменев А.Э.	20
		Худченко А.В.	84		