

К 20-летию журнала «Известия вузов.
Прикладная нелинейная динамика»

ISSN 0869-6632

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Прикладная Нелинейная Динамика



1,2
1993

ИЗДАНИЕ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

СОДЕРЖАНИЕ

От редактора. <i>Гуляев Ю.В.</i>	3
КОНФЕРЕНЦИИ. СЕМИНАРЫ. СИМПОЗИУМЫ	
ХАОС-91: Обзор номера. <i>Трубецков Д.И.</i>	5
ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ	
<i>Даценко Н.М., Сонечкин Д.М.</i> Вейвлетный анализ временных рядов и динамика атмосферы.....	9
БИФУРКАЦИИ В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ	
<i>Кузнецов А.П., Кузнецов С.П.</i> Критическая динамика одномерных отображений. Часть I: Сценарий Фейгенбаума.....	15
ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН	
<i>Блиох Ю.П., Бородкин А.В., Любарский М.Г., Онищенко И.Н., Файнберг Я.Б.</i> Применение метода функционального отображения для исследования ЛБВ-генератора с запаздывающей обратной связью.....	34
<i>Сонечкин Д.М.</i> Поиск периодических траекторий и описание аттрактора по временным реализациям.....	50
<i>Буц В.А., Курпьянов А.Н., Мануйленко О.В., Толстолужский А.П.</i> Неустойчивость и динамический хаос при слабонелинейном взаимодействии волн.....	57
<i>Сочнев С.В.</i> Построение одномерных отображений по данной плотности распределения и автокорреляционной функции.....	63
ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ХАОС	
<i>Зверев В.В.</i> О возникновении хаотического аттрактора при движении ядерных спинов в ферромагнетике.....	72
<i>Рождественский В.В., Стручков И.Н.</i> Переходный хаос в системах с четной нелинейностью.....	83
<i>Андрушкевич А.В., Кипчатов А.А., Красичков Л.В., Короновский А.А.</i> Путь к хаосу в кусочно-линейной модели генератора на туннельном диоде.....	93
<i>Намаюнас А.М., Тамашявичюс А.В.</i> Измерение корреляционной размерности из временных реализаций.....	104
АВТОВОЛНЫ. САМООРГАНИЗАЦИЯ	
<i>Санин А.Л., Ермолаев Ю.Л., Мизандронцев Д.Б.</i> Структуры электронного тока в неоднородных системах.....	109
МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ ПО НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКЕ	
<i>Безручко Б.П., Прохоров М.Д., Селезнев Е.П.</i> Как в эксперименте увидеть то, что реально «не должно существовать».....	117
<i>Кузнецов А.П., Кузнецов С.П.</i> Задача.....	123
PERSONALIA	
Памяти Льва Израилевича Каца.....	124
АНОНС	
Специальные выпуски.....	8
Новая книга.....	14, 33

ОТ РЕДАКТОРА

Представляем читателям новый научно-технический журнал «Прикладная нелинейная динамика», который будет выходить в серии «Известия высших учебных заведений». Соучредителями журнала стали Министерство высшего образования, науки и технической политики России и Саратовский государственный университет.

В последние годы в Саратовском университете, а также в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники РАН, сложились научные группы, активно работающие в области прикладной нелинейной динамики. Ими проведены теоретические и экспериментальные исследования детерминированного хаоса в системах различной природы, в процессе которых получен ряд важных результатов; написано несколько книг, положительно встреченных научной общественностью и переведенных за рубежом; проведено три школы «Стохастические колебания в радиофизике и электронике».

С самого начала журнал задуман как междисциплинарный, доступный для преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов разных специальностей. Он должен способствовать широкому распространению идей, методов, образов и представлений нелинейной теории колебаний и волн, сформировавшихся в последние годы. Думаем, что журнал должен выполнять роль своеобразного колледжа для подготовки специалистов по нелинейной динамике.

Журнал будет публиковать статьи по натурному и вычислительному эксперименту, по теории динамических систем различной природы; статьи, посвященные изложению результатов исследования бифуркаций, хаоса, самоорганизации, результатов решения прикладных задач нелинейной теории колебаний и волн в физике, химии, биологии, медицине, радиоэлектронике, экономике, социологии и других научных дисциплинах. Определение «прикладная» в названии журнала представляется важным: оно поможет исключить необъятность тематики, придаст журналу практическую направленность и, возможно, откроет новые (может быть даже необычные) сферы применения нелинейной динамики. Предполагается, что в журнале будут следующие основные разделы:

- Обзоры актуальных проблем нелинейной динамики
- Бифуркации в динамических системах различной природы
- Прикладные задачи нелинейной теории колебаний и волн
- Детерминированный хаос
- Солитоны
- Автоволны. Самоорганизация
- Нелинейная динамика в лицах. История. Personalia
- Школы, конференции, семинары, симпозиумы
- Книжное обозрение

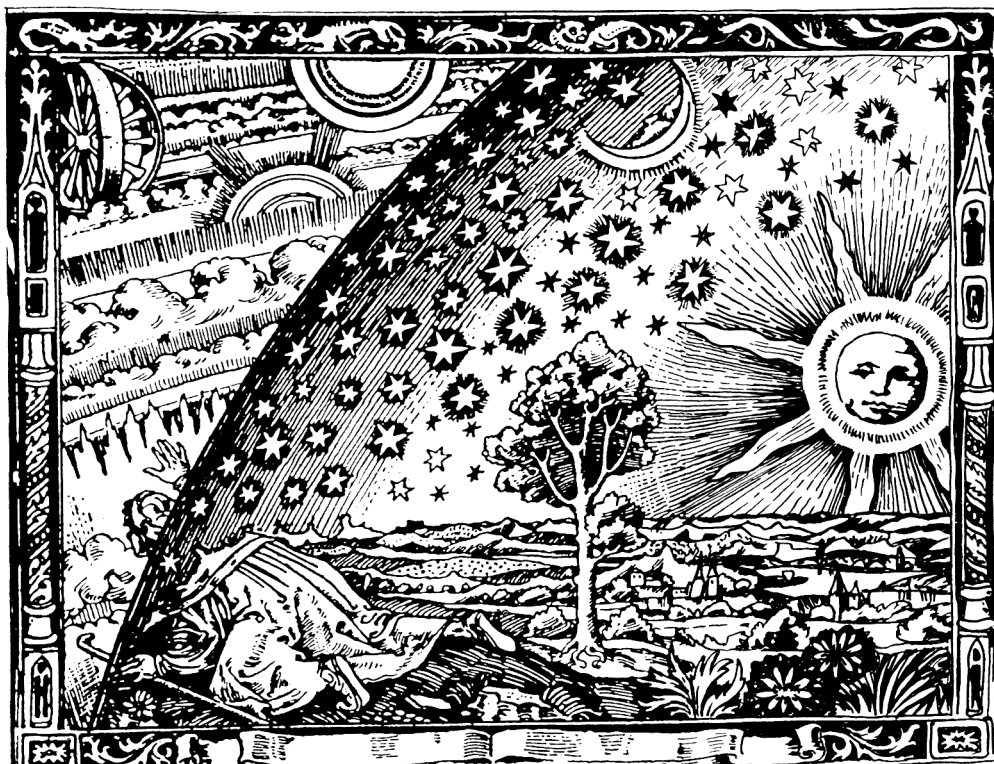
Представляется разумным для расширения читательской аудитории иметь «журнал в журнале» специально для студентов, аспирантов и преподавателей с такими рубриками:

- Методические заметки по нелинейной динамике
- Маленькая энциклопедия современной нелинейной динамики
- Книжная полка студента

Периодичность журнала – шесть номеров в год. Планируются тематические выпуски.

В состав редакционной коллегии вошли ведущие специалисты в различных областях науки, в которых могут использоваться идеи и методы нелинейной динамики. Я хотел бы поблагодарить их за то, что они берут на себя большой труд по созданию нового журнала.

Главный редактор журнала,
академик РАН Ю.В. Гуляев



Знакомая с детства по планетарию или из книжек по астрономии картинка. К сожалению как сообщил недавно альманах "Гермес" (1992), эта, якобы средневековая, гравюра, появившаяся впервые в 1861 г. у Камилла Фламариона в книге "Множественность обитаемых миров!" оказалась подделкой его друга-шутника. Мы рады сообщить своим читателям, что в архиве учебно-научного центра "Колледж" обнаружен оттиск XV века, очевидно, питавший фантазию фальсификатора. Как и когда попал этот оттиск в Саратов - уму непостижимо, но наиболее вероятно - после войны 1812 г. вместе с пленным французским офицером Понселе, ставшим впоследствии известным ученым и даже основателем (кстати, именно в Саратове) новой науки - проективной геометрии.

Мы публикуем этот подлинник на первой странице обложки и надеемся, что и впредь нам удастся выискивать какие-нибудь редкости; хотя, конечно, основной задачей журнала будет публикация статей по натурному и вычислительному эксперименту, по теории динамических систем различной природы, статей, посвященных изложению результатов исследований бифуркаций, хаоса, самоорганизации, результатов решения прикладных задач нелинейной теории колебаний и волн в физике, химии, биологии, медицине, радиоэлектронике, экономике, социологии и в других научных дисциплинах.

Журнал издается для профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов старших курсов высших учебных заведений, научных и инженерно-технических работников НИИ и вузов.

Распространение журнала по подписке и предварительным заявкам осуществляется учебно-научным центром "Колледж" при Саратовском государственном университете.

Периодичность журнала - 6 номеров в год.
Подписная и розничная цены договорные.



Реквизиты УНЦ "Колледж"
банковский - р/с N 000609446 в КБ "Экономбанк" г.
Саратова, МФО 251279, корсчет банка 700161122, РКЦ,
МФО 251008;
почтовый - 410071, г. Саратов, ул. Астраханская, д.83.
Государственный учебно-научный центр "Колледж", тел.
(845-2) 919-319.



Журнал включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий РФ, рекомендованных для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Известия высших учебных заведений

ПРИКЛАДНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА

научно-технический журнал

издается с 1993 года

Выходит 6 раз в год

Том 21, № 1, 2013, Саратов

К 60-летию кафедры электроники, колебаний и волн СГУ

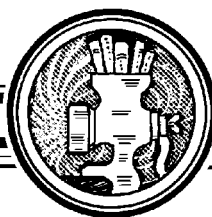
СО Д Е Р Ж А Н И Е

Страницы из прошлого	1
ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ	
<i>Ерёмка В.Д.</i> Вакуумные источники электромагнитного излучения терагерцового интервала частот: Зигзаги развития от клинотрона до клиноорбитрона	7
<i>Трубецков Д.И., Краснова Г.М.</i> О современном состоянии сверхвысокочастотных вакуумных электронных и микроэлектронных приборов с управляемой эмиссией	35
<i>Синицын Н.И., Ёлкин В.А., Бецкий О.В.</i> Определяющее значение структуры водосодержащей среды живых тканей в биомедицинских радиоэлектронных нанотехнологиях миллиметрового и терагерцового диапазонов	67
ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН	
<i>Солнцев В.А.</i> К теории электронных волн и дискретного электронно-волнового взаимодействия в полосах запирающих замедляющих систем	86
<i>Ланда П.С., Ушаков В.Г.</i> Нелинейные системы с быстрыми и медленными движениями. изменение распределения вероятностей для быстрых движений под влиянием медленных	99
ИЗ КНИГ И ЖУРНАЛОВ	
<i>Григорьев М.А.</i> Из истории становления кафедры электроники, колебаний и волн СГУ	112
КНИЖНОЕ ОБОЗРЕНИЕ	
Противолодочные подводные ракеты. Физические проблемы и история создания акустических систем наведения. Научные редакторы: <i>А.В. Мишаев, Ю.М. Романовский, О.В. Руденко</i>	123
<i>Новик В.К.</i> Поучительная память о былых достижениях: Рецензия	126

To the 60th Anniversary of the Chair of electronics, oscillation and waves SSU

C O N T E N T S

The pages from the past	1
REVIEWS OF ACTUAL PROBLEMS OF NONLINEAR DYNAMICS	
<i>Yeryomka V.D.</i> Terahertz vacuum electromagnetic radiation sources: Evolution zigzag from klynotron to klynoorbictron	7
<i>Trubetskov D.I., Krasnova G.M.</i> About current state high frequency vacuum electronic and microelectronic devices with field emission	35
<i>Sinitsyn N.I., Elkin V.A., Betskii O.V.</i> Determining the value of the structure on water-containing environment of living tissue in biomedical radio-electronic nanotechnologies millimetric and terahertz ranges	67
APPLIED PROBLEMS OF NONLINEAR OSCILLATION AND WAVE THEORY	
<i>Solntsev V.A.</i> By the theory of the electron waves and the discrete electron-wave interaction in the stopbands of the slow-wave systems	86
<i>Landa P.S., Ushakov V.G.</i> Nonlinear systems with fast and slow motions. The change of the probability distribution of fast motions influenced by slow ones	99
FROM BOOKS AND JOURNALS	
<i>Grigor'ev M.A.</i> From the history of the chair formation	112
BOOK REVIEW	
Antisubmarine underwater missiles: Physical problems and history of the development of the acoustic guidance systems. Scientific editors: <i>A.V. Minaev, Yu.M. Romanovsky, O.V. Rudenko</i>	123
<i>Novik V.K.</i> Instructive reminiscences about the former achievements: Review	126



ВАКУУМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИНТЕРВАЛА ЧАСТОТ: ЗИГЗАГИ РАЗВИТИЯ ОТ КЛИНОТРОНА ДО КЛИНООРБИКТРОНА

В. Д. Ерёмка

Исследование и разработка эффективных источников электромагнитных колебаний является одной из актуальных задач терагерцовой радиофизики и электроники. Освоение терагерцового интервала частот находится в начальной стадии. В обзорной статье, опубликованной в научно-техническом журнале США [1], посвященной вакуумным источникам излучения терагерцового диапазона, впервые скромно упоминается о применении «клинотронного эффекта» в лампе обратной волны, созданной в ИРЭ НАН Украины. Целью данной статьи является краткое описание вклада в освоение терагерцового интервала частот, который внесли исследователи и разработчики генераторных устройств, предложенных и созданных в ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины в период с 1956 по 2011 годы, а также выражение чувства уважения и признательности кафедре электроники Саратовского университета им. Н.Г. Чернышевского в связи с её 60-летием. Выпускники кафедры внесли весомый вклад в развитие электроники СВЧ, в том числе в исследование «клинотронного эффекта». Представлены результаты исследования методами физического и математического эксперимента вакуумных источников когерентного ТГц-излучения с нерелятивистским наклонным к рабочей поверхности периодической структуры электронным потоком, их эволюционный путь развития от лампы обратной волны О-типа (ЛОВО)-клинотрона до клиноорбитрона. Показана перспективность освоения терагерцового интервала частот с помощью схем вакуумных источников электромагнитного излучения с плавной перестройкой частоты выходного сигнала, в которых применяется «клинотронный эффект». Представленная информация расширяет знания о потенциальных возможностях вакуумных источников электромагнитного излучения терагерцового диапазона с наклонным ленточным электронным потоком. Исторические комментарии автора не лишены недостатков, так как отражают его познания и предубеждения.

Ключевые слова: Терагерцовые частоты, субмиллиметровые волны, вакуумные электронные приборы, ЛОВО-клинотрон, оротрон, орбитрон, клинооротрон, клиноорбитрон.

Все так же мчатся электроны...
Несут без усталы заряд...
И.И. Голенцкий, «Ода электронике»

Введение

Творцы научно-технического прогресса. Творческий гений инженеров и ученых XX века подарил человечеству новую область познания – электронику – и новые, не существовавшие в природе устройства – электронные приборы. Электроника была и остается активной движущей силой мирового научно-технического прогресса. К середине XX века на Земле сформировались учебно-научно-производственные

центры электроники. В Восточной Европе рядом с электронными звездами Москвы и её окрестностей, Санкт-Петербурга, Харькова, Киева, Нижнего Новгорода ярко засияла электронная звезда Саратова. Уже в 1950-х годах Саратов был мощным учебно-научно-производственным центром электроники. К настоящему времени саратовцы умножили свой вклад в развитие этой области познания. Автор данной статьи после окончания 3-го курса кафедры «Электронные и ионные приборы» Киевского политехнического института проходил практику на одном из электронных предприятий Саратова. Электронная промышленность страны и города не имела бы перспектив развития и созидания без высококвалифицированных кадров. Лозунг «Кадры решают все!» был в то время известен каждому, кто учился и работал. Кузницей высококвалифицированных кадров была и остается 60-летняя кафедра электроники Саратовского университета им. Н.Г. Чернышевского. Мы познавали азы теории электроники СВЧ и радиофизики по учебникам В.И. Калинина, Г.М. Герштейна, В.Н. Шевчика [2–8] и многих других подвижников и рыцарей электронной физики. Талантливые саратовцы А.С. Победоносцев и А.А. Негирев, Ю.А. Калинин, Ю.А. Григорьев, А.М. Кац, В.С. Андрушкевич, Ю.Г. Гамаюнов, С.Н. Голубев, И.А. Накрап на протяжении многих лет делились опытом с автором этих строк. Запомнились содержательные беседы с ними и их квалифицированные рекомендации при решении сложных задач электроники миллиметровых и субмиллиметровых волн. Незабываемы зимние школы-семинары по радиофизике и электронике в «Волжских даях», лекции Л.А. Вайнштейна, В.Т. Овчарова, Д.И. Трубецкова, В.А. Солнцева, Д.М. Петрова, Л.Н. Лошакова, Р.А. Силина, М.И. Петелина, Г.Г. Соминского и др. Проведение саратовских зимних школ-семинаров по электронике СВЧ и радиофизике для инженеров, молодых ученых, студентов и аспирантов с неизменным изданием лекций – это колоссальный труд организатора школ-семинаров профессора Д.И. Трубецкова и коллектива кафедры электроники. Реальный высокий авторитет выпускников кафедры электроники Саратовского государственного университета профессоров Д.И. Трубецкова, А.А. Кураева и А.Е. Храмова в среде «электронщиков» планеты Земля завоеван их весомым вкладом в развитие современной электроники СВЧ и радиофизики [9–19]. Всем Учителям, упомянутым и не названным, обогатившим меня знаниями в области электроники, выражаю свою искреннюю признательность.

1. Электромагнитное излучение терагерцового интервала частот

Терагерцовым в литературе называют интервал частот 0.10...10.0 ТГц [20]. Как известно, первые физические опыты в области ТГц частот проведены в 1920 г. Американские естествоиспытатели Никольс и Тир с помощью искрового генератора получили электромагнитные колебания с частотой 1.363 ТГц [21]. В 1924 г. А.А. Глаголева–Аркадьева начала свои обширные исследования на частотах диапазона ТГц, применяя предложенный ею так называемый массовый облучатель, в котором металлические частицы в масле направлялись с помощью вращающегося колеса в область разрядника [21]. В процессе этих исследований, продолжавшихся до 1943 г., наиболее высокой измеренной частотой генерируемых электромагнитных колебаний была частота 2.325 ТГц.

Проблемы генерации, усиления и преобразования в терагерцовом интервале частот являются одними из самых трудных в современной радиофизике и физической электронике. Интервал ТГц частот оказался трудным для освоения вакуумными приборами с нерелятивистскими электронными потоками, полупроводниковыми и квантовыми приборами. Особенно трудным для освоения упомянутыми генераторами является интервал частот 1.5...3.0 ТГц. Освоение области вблизи 3.0 ТГц когерентными источниками электромагнитного излучения – оптическими лазерами с накачкой сопряжено с большими трудностями. КПД лазеров с накачкой ограничен условиями Мэнли–Роу [22].

Источники когерентного электромагнитного излучения в интервале частот 0.1...10.0 ТГц требуются, в частности, в спектроскопии субмиллиметрового диапазона, субмиллиметровой радиоастрономии, при создании радаров с высоким разрешением, в линиях связи между сверхбыстродействующими компьютерами, в ТГц-устройствах обнаружения химических и биологических реагентов [23–25]. Такие источники должны обеспечивать генерирование в указанном интервале выходного сигнала требуемой мощности и плавную перестройку его частоты вблизи заданных рабочих точек. Процесс разработки электровакуумных генераторов ТГц-диапазона с плавной перестройкой частоты выходного сигнала можно сравнить с трудным подъемом от подножия Джомолунгмы к ее вершине. В начале 1940-х годов были созданы первые вакуумные источники электромагнитного излучения с распределенным взаимодействием нерелятивистских электронных потоков с электромагнитным полем – лампы бегущей волны (ЛБВ) [26], а в конце 1940-х было зарегистрировано изобретение лампы обратной волны О-типа [27]. Физика процессов, свойства и особенности ЛОВО описаны в монографиях [28, 29]. История создания ламп СВЧ, в том числе ЛБВО и ЛОВО, обстоятельно представлена в лекциях профессора Д.И. Трубецкого на 7-й зимней школе-семинаре по электронике СВЧ и радиофизике в 1986 г. [30]. Следует отметить, что в конструкциях ЛОВО, которые предложены М.Ф. Стельмахом, были применены периодические замедляющие структуры (ЗС) в виде гребенки или сдвоенной гребенки [31, 32]. Именно конструкции ЛОВО с гребенчатыми ЗС имеют перспективу при освоении терагерцового интервала частот. Особенности и характеристики гребенчатых ЗС описаны в [33, 34], а результаты их успешного применения при разработке и создании ЛОВО терагерцового интервала частот – в [35–39].

В 1960-х годах во Франции (Thomson-CSF – P. Guénard, O. Doehler, B. Epsztein, R. Warnecke) [35] и РСФСР (Корпорация «Исток» – Н.Д. Девятков, М.Б. Голант, А.А. Негирев, В.С. Савельев) [36] осуществлялось промышленное производство широкодиапазонных генераторов – ЛОВО-карсинотронов на ТГц-частотах с мощностью выходного сигнала от единиц до десятков милливольт. В ЛОВО-карсинотронах имеет место распределенное взаимодействие ленточного электронного потока, протекающего вблизи и параллельно рабочей поверхности гребенки, с электромагнитным полем замедленной волны первой отрицательной пространственной гармоники, распространяющейся в ЗС. В процессе взаимодействия осуществляется передача определенной части кинетической энергии заряженных частиц высокочастотному полю. Так как интенсивность электромагнитной волны первой отрицательной пространственной гармоники, распространяющейся вдоль периодической ЗС, при удалении от её рабочей поверхности экспоненциально уменьшается, то распределенное

взаимодействие электронов в ЛОВО-карсинотронах осуществляется с неоднородным по толщине ленточного пучка высокочастотным полем. Наличие пульсаций и обедненного слоя в сформированном ленточном электронном потоке, а также слабый импеданс связи поля волн пространственного заряда и волны первой отрицательной пространственной гармоники электромагнитного поля ЗС типа «гребенка» или «встречные штыри», способствует существенному уменьшению выходной мощности ЛОВО-карсинотронов в терагерцовом интервале частот с укорочением рабочей длины волны [35–39]. В связи с этим требования уменьшить толщину ленты электронного потока и увеличить плотность его тока возрастают, достигая технологического предела.

Технологический предел, которого достигли характеристики традиционных ЛОВО-карсинотронов в терагерцовом интервале частот, обусловлен следующими причинами: технологическими трудностями при изготовлении микроскопических элементов и узлов генераторов с наноразмерами их деталей; затруднениями, связанными с охлаждением микроскопических элементов периодической ЗС, возрастающими с укорочением длины волны; ростом высокочастотных (ВЧ) потерь, обратно пропорциональным $\lambda^{1/2}$; трудностями при формировании тонких электронных потоков с большой плотностью тока, пропорциональной $\lambda^{5/2}$ [23,35–39]. Следует отметить, что коэффициент использования ленточного электронного потока, который протекает параллельно рабочей поверхности ЗС, в ЛОВО-карсинотроне является сравнительно небольшим.

2. «Клиноотронный эффект»

В течение 1956 г. в созданном 30.09.1955 г. ИРЭ АН УССР коллектив лаборатории, которой руководил директор института А.Я. Усиков, обязан был выполнить поисковую НИР «Разработка методов создания широкодиапазонных измерительных генераторов миллиметрового диапазона волн» (шифр «Боксит») [40] по заказу столичного ведомства. Руководитель НИР А.Я. Усиков и его заместитель к.ф.-м.н. Г.Я. Левин сформулировали исполнителям работы задание – разработать генератор М-типа миллиметрового диапазона волн с электрической перестройкой частоты. После трех месяцев неудачных попыток получить генерацию электромагнитных колебаний с электрической перестройкой их частоты с помощью карматрона миллиметрового диапазона руководитель работы решил изменить направление поиска. Были проанализированы первые публикации зарубежных исследователей о результатах разработок ЛОВО миллиметрового диапазона [41–44]. Решить поставленную задачу с помощью ЛОВО настоятельно рекомендовал также один из пионеров-изобретателей ЛОВО М.Ф. Стельмах [27]. Опыт исследований и разработки приборов О-типа в коллективе лаборатории в то время отсутствовал. Основные элементы и узлы ЛОВО рассчитывали и конструировали впервые молодые ответственные исполнители. О примерах для подражания можно было только мечтать. При создании некоторых важных узлов лампы «не срабатывал» метод масштабного моделирования. Например, поглощающие нагрузки, применявшиеся в сантиметровом диапазоне, в миллиметровом диапазоне оказались неэффективными. Ответственные исполнители круглосуточно осуществляли откачку, тренировку и испы-

тания лабораторных макетов ЛОВО. Многолетний опыт, накопленный А.Я. Усиковым и Г.Я. Левиным при разработке и создании магнетронов, был передан молодым исследователям и способствовал разработке и созданию оригинальной широкодиапазонной ЛОВО миллиметрового диапазона длин волн. Особое внимание при испытании лабораторных макетов магнетронов уделялось точной юстировке прибора в однородном магнитном поле зазора электромагнита при пониженном токе на его анод. Аналогичная методика была применена также при юстировке созданных макетов ЛОВО в однородном магнитном поле зазора электромагнита. О том, что ленточный электронный поток пролетает над периодической гребенчатой ЗС параллельно её рабочей поверхности, судили по максимуму тока на коллектор. Несколько макетов ЛОВО даже после нескольких суток тренировки и испытаний не проявили признаков генерации. И только случайное нарушение методики испытаний заступившим в ночную смену младшим научным сотрудником А.Я. Кириченко позволило увидеть на экране осциллографа слабый, но устойчивый сигнал генерации ЛОВО. При большом токе на коллектор и большом напряжении генерация отсутствовала, и А.Я. Кириченко решил улучшить юстировку лампы в магнитном поле. При выполнении этой операции он заметил появление слабого, но устойчивого сигнала, только ток на коллектор не был максимальным при появлении генерации. Ленточный электронный поток частично оседал на рабочую поверхность гребенки. При этом рабочая поверхность гребенки и плоскость симметрии ленточного электронного потока образовывали острый угол α (рис. 1). Той ночью младший научный сотрудник был «подвергнут выволочке» за «нарушение методики тренировки» примчавшимися в лабораторию после телефонного сообщения А.Я. Усиковым и Г.Я. Левиным, но затем, после анализа полученного результата, все уладилось. В дальнейшем тренировку макетов ЛОВО в лаборатории А.Я. Усикова проводили при небольшом токе на коллектор, а предварительную юстировку лампы в зазоре магнита – при повышенном токе с катода. При такой методике тренировки и юстировки ламп первые неработоспособные макеты ЛОВО оказались «генерирующими в миллиметровом диапазоне волн лампами». Заместитель научного руководителя Г.Я. Левин, возглавлявший группу ответственных исполнителей, был первым, кто назвал обнаруженное явление в ЛОВО «клинотронным эффектом».

Ему не удалось убедить экспертов ВНИИГПЭ назвать новую ЛОВО «клинотроном» при вынесении положительного решения по его заявке на изобретение [45]. К моменту успешного завершения НИР «Боксит» были разработаны и испытаны ЛОВО-клинотроны в нескольких рабочих точках миллиметрового диапазона. Выходная мощность созданных широкодиапазонных ЛОВО в непрерывном режиме работы на два порядка превосходила мощности, предписанные техническим заданием Заказчика. При полосе электрической перестройки частоты 10...15% в выбранной

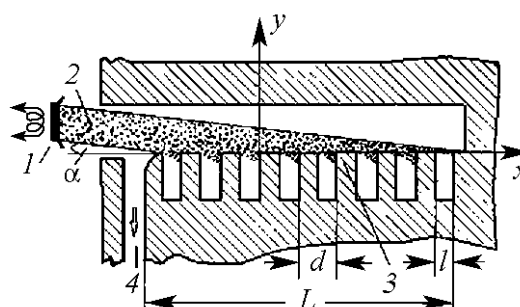


Рис. 1. Схематическое изображение ЛОВО-клинотрона Г.Я. Левина: 1 – диодная электрооптическая система, формирующая толстый и широкий ленточный электронный поток 2; 3 – периодическая ЗС гребенка; 4 – выходное устройство

рабочей точке мощность выходного сигнала созданных ЛОВО-клинотронов составляла единицы ватт в длинноволновой части и сотни милливатт в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

Таким образом, «клиноotronный эффект» был обнаружен в процессе экспериментальных исследований традиционных ЛОВО – карсинотронов с периодическими ЗС типа «гребенка», согласованными на концах [40]. Он проявляется в значительном увеличении мощности генерируемых электромагнитных колебаний при наличии острого угла α между рабочей поверхностью ЗС и направлением движения ленточного электронного потока [45]. В клиноотроне функция гребенки – периодической замедляющей структуры – совмещена с функцией коллектора электронов. С целью выяснения физики «клиноotronного эффекта» в течение 50 лет после его обнаружения выполнено множество экспериментов. Результаты экспериментов представлены в изобретениях, статьях и монографиях [46–56]. Экспериментально была подтверждена возможность электрической перестройки частоты выходного сигнала ЛОВО-клиноотрона без затрат мощности [54, 55]. Ряд работ развивают теорию клиноотрона [57–64]. Среди них есть очень интересные работы выпускников кафедры электроники Саратовского университета им. Н.Г. Чернышевского [60, 63]. В теоретических работах предложены различные модели процессов в клиноотроне, как простые, так и сложные на основе учета нелинейных эффектов в электронном потоке.

В последнее время появились работы по теории клиноотрона в гораздо более строгой самосогласованной постановке задачи (например, [63]). В них учитывается сложный характер пространственного распределения ВЧ-поля и влияние на процесс взаимодействия пространственного заряда электронного потока. Однако движение электронов по-прежнему предполагается одномерным в виде идеальных прямых.

Следует признать, что многие результаты экспериментальных исследований клиноотрона пока не удается объяснить в полном объеме с помощью моделей, описанных в теоретических работах. Одно из главных несоответствий результатов эксперимента и результатов теорий – наблюдаемый в экспериментах почти полный синхронизм электронов с замедленной волной рабочей пространственной гармоникой. При полном синхронизме КПД взаимодействия должен быть равен нулю. Вероятно, в клиноотроне имеет место специфический механизм группировки (или фазировки) электронов и механизм энергообмена, отличный от наблюдаемых в традиционных ЛБВ и ЛОВ О-типа.

Одной из возможностей объяснить особенности работы клиноотронов является учет взаимодействия электронов с поперечной (по отношению к направлению движения электронов) составляющей ВЧ-поля. Взаимодействием с поперечной составляющей ВЧ-поля при анализе процессов в приборах О-типа, как правило, пренебрегают. Автор оригинальной работы [64], выполненной в ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины в последние годы, пытается рассмотреть процесс взаимодействия электронов в клиноотроне с учетом реального пространственно-временного распределения поля вблизи рабочей поверхности гребенки, а также учесть поперечное движение электронов. Так как задача о движении электрона в реальном ВЧ-поле вблизи поверхности периодической замедляющей структуры весьма сложная, то в работе [64] автором ставилась цель выявить основные качественные закономерности процесса взаимодействия электронов с ВЧ-полем в клиноотроне, применяя простые модели. Отдельно рассмотрены три простые задачи: 1) о движении электронов в попереч-

ном электрическом поле над ламелями гребенки; 2) о влиянии сильно возрастающего вблизи ребра ламели электрического поля на процесс оседания электронов на поверхность ламели; 3) о взаимодействии электронов с ВЧ-полем в щелевом резонаторе гребенки при их попадании на его поперечную стенку.

На основе результатов анализа решений этих трех задач построена следующая модель работы клинотрона. Все электроны потока в какой-то момент подходят к рабочей поверхности гребенки и оседают на ней. Работа клинотрона определяется именно этими процессами вблизи рабочей поверхности гребенки. Под влиянием поперечного электрического ВЧ-поля происходит избирательное оседание электронов на ламели гребенки. В результате этого оседания тонкий слой электронного потока, прилегающий к рабочей поверхности гребенки, оказывается промодулированным по плотности. Именно эта промодулированная часть электронного потока попадает в щелевые резонаторы гребенки и завершает свое движение, падая на поперечную стенку щелевого резонатора. При дискретных значениях скорости электронов, формально соответствующих синхронизму электронного потока с некоторыми пространственными гармониками поля, возможна устойчивая группировка по плотности электронного потока и эффективное торможение модулированных электронов в поле щелевых резонаторов. Показано, что клинотрон может эффективно работать в режимах с большими углами пролета электронов в зонах щелевых резонаторов, что равносильно формальному синхронизму потока с полем пространственных гармоник больших номеров. В данной физической модели генерация возможна при формальном синхронизме электронов со всеми нечетными отрицательными пространственными гармониками ($n = -1, -3, -5, \dots$) и со всеми четными положительными гармониками ($n = 0, 2, 4, \dots$). Данная физическая модель позволяет объяснить такие экспериментальные результаты, как работа клинотрона при почти полном синхронизме электронов с пространственной гармоникой поля и работа клинотрона в режиме синхронизма с пространственными гармониками больших номеров.

Несомненно, описанная в работе [64] физическая модель сильно упрощена и в ней не учтены многие важные факторы, влияющие на работу клинотрона: процессы вдали от рабочей поверхности гребенки; влияние пространственного заряда; пульсации границ реального ленточного электронного потока; влияние волны, отраженной от концов периодической структуры и др. Однако новая модель, заставляя обратить внимание на принципиальную особенность процессов вблизи рабочей поверхности гребенки, показывает, что работа клинотрона коренным образом отличается от теоретически хорошо изученных процессов в обычных ЛБВ и ЛОВ О-типа, и поэтому для достоверного и корректного описания работы клинотрона необходимы более совершенные физические модели.

До настоящего времени клинотроны и карсинотроны остаются единственными широкодиапазонными генераторами с электрической перестройкой частоты в терагерцовом интервале. В табл. 1 приведены характеристики этих приборов в терагерцовом интервале частот [36,51].

По сравнению с карсинотронами, клинотроны имеют меньшие рабочие напряжения, меньший вес, они более технологичны в изготовлении, поэтому имеют меньшую себестоимость.

Экспериментальные исследования модификаций ЛОВО-клинотронов подтверждают, что хорошую перспективу для освоения интервала частот 1.5...3.0 ТГц имеют умножительные клинотроны и клиноорotronы [65–68].

Характеристики ТГц-клинотронов и ТГц-карсинотронов

Разработка	Частота, ТГц	Макс. ускоряющее напряжение, кВ	Макс. ток пучка, мА	Макс. выходная мощность, Вт	Крутизна дисперсионной характеристики, МГц/В	Вес, кг
КЛИНОТРОНЫ						
СТС-3М4	0.079...0.1	5.0	150	5.0	0.7...3.0	1.2
СГС-2.5М4	0.113...0.122	4.3	180	3.0	3.5...5.5	1.2
СТС-2.0М4	0.137...0.151	4.5	140	2.0	3.5...5.5	1.2
СТС-0.8М9	0.345...0.390	5.0	160	0.1	20.0	12.0
КАРСИНОТРОНЫ						
ТН4238	0.075...0.105	10.0	60	1.5	1.0...5.0	10.0
ТН4221С	0.105...0.120	10.0	60	0.5	4.0...10.0	10.0
ТН4233	0.130...0.160	10.0	60	0.5	5.0...20.0	10.0
ТН4218С	0.360...0.400	10.0	35	0.05	10.0...20.0	10.0
НПП Исток	0.118...0.178	1.5	20	0.02	–	< 1.0
НПП Исток	0.198...0.260	1.9	30	0.04	–	< 1.0
НПП Исток	1.176...1.400	6.0	40	0.002...0.0005	–	8.0

3. Оротрон, ледатрон, генератор дифракционного излучения

Традиционные вакуумные источники электромагнитного излучения СВЧ-диапазона (клистроны, магнетроны, ЛБВО, ЛОВО и т.п.) становятся неэффективными, когда их рабочая частота приближается к терагерцовому интервалу частот. Это обусловлено возрастанием высокочастотных потерь и технологических трудностей из-за микроскопических размеров ключевых элементов и узлов их закрытых электродинамических систем. Эти ограничения стимулировали поиск новых схем построения источников излучения, который привел к разработке новых устройств, в частности, лазера на свободных электронах, работающего на эффекте дифракционного излучения (эффекте Вавилова–Черенкова, Смита–Парселла), или оротрона [69–89].

Смит и Парселл наблюдали электромагнитное излучение в терагерцовом и оптическом диапазонах, когда высоковольтный электронный луч скользил по поверхности металлической дифракционной решетки [70]. Первые генераторы на эффекте дифракционного излучения были созданы независимо друг от друга в Институте физических проблем АН СССР Ф.С. Русиным и Г.Д. Богомолковым [69,71] и в университете Тохоку Японии S. Ono и K. Mizuno [79,80]. Русин и Богомоллов назвали свой прибор **оротроном** [71] (сокращение от слов «открытый резонатор, отражательная решетка, электрон»), а S. Ono и K. Mizuno – ледатроном [79] (Леда – мать близнецов

в греческой мифологии) – генератором микроволнового электромагнитного излучения в режиме ЛОВО и в режиме оротрона.

Электродинамическая система оротрона и ледатрона представляет собой открытый резонатор, образованный двумя зеркалами, при этом вся рабочая поверхность неподвижного плоского зеркала покрыта гребенчатой отражательной дифракционной решеткой. Существенное отличие оротрона от ледатрона состоит в том, что в первом подвижное зеркало открытого резонатора с выходным устройством имеет сферическую рабочую поверхность, а во втором – плоскую (резонатор Фабри–Перо). В ИРЭ НАН Украины (ИРЭ НАНУ) в 1967 году творческий коллектив под руководством профессора В.П. Шестопалова создал оротрон с отражательной дифракционной решеткой не на всей рабочей поверхности плоского зеркала, а только в центральной его части (рис. 2, *а*) [73]. Дифракционные потери в таком генераторе значительно уменьшены. Усовершенствованный оротрон с плоской гребенкой в центральной части неподвижного зеркала был назван генератором дифракционного излучения (ГДИ) [73–77]. В период с 1970 по 1990 г. в ИРЭ НАНУ были разработаны и созданы экспериментальные образцы ГДИ двух типов – с зазором постоянного магнита из сплава SmCo_5 , соответственно, 40 мм (А) и 32 мм (Б). Характеристики ГДИ терагерцового диапазона представлены в табл. 2.

Достоинства оротронов, ледатронов и ГДИ обстоятельно описаны в научной литературе [71–82]. Отметим ряд недостатков, которые уменьшают КПД оротрона, ледатрона и ГДИ терагерцового диапазона, а также закрывают им путь к серийному производству:

– относительно слабая связь поля объемной волны открытого резонатора (ОР) с полем поверхностной волны отражательной дифракционной решетки, которая выполняет функцию периодической замедляющей структуры;

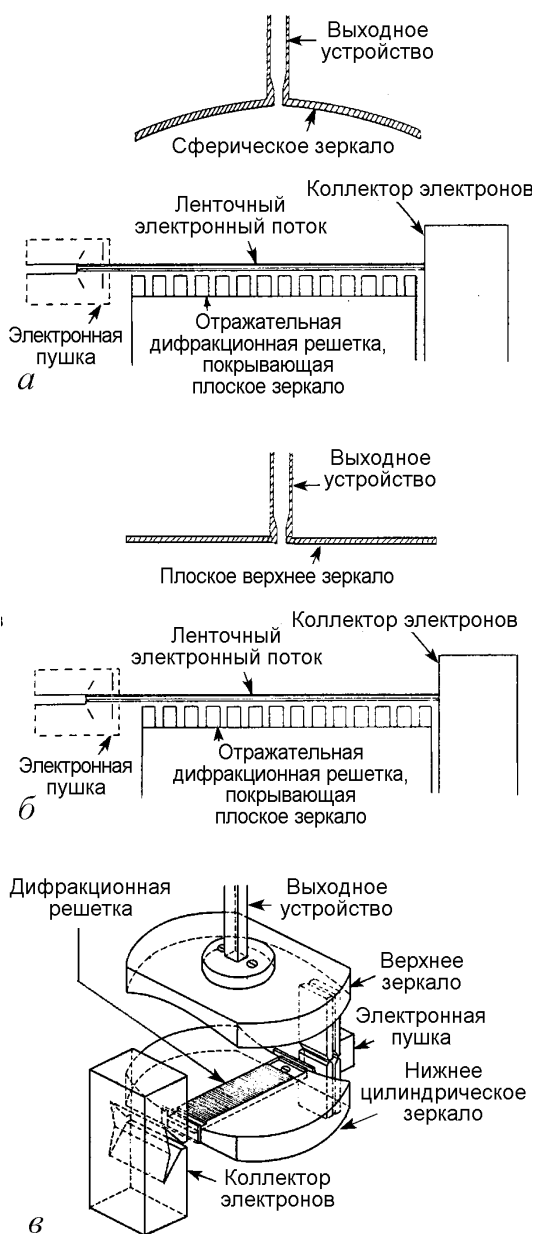


Рис. 2. Схематическое изображение: оротрона (а), ледатрона (б), генератора дифракционного излучения (в)

Характеристики ГДИ терагерцового диапазона [73,74]

Тип образца	Рабочий диапазон, ТГц	Выходная мощность, Вт	Диапазон электрической перестройки частоты, МГц	Круглизна электронной перестройки частоты, МГц/В	Масса ГДИ вместе с МФС*, кг	Рабочее магнитное поле, Тл
ГДИ-3А	0.1...0.12	3.0...0.6	35	0.3...0.6	3.2	0.5
ГДИ-2А	0.115...0.14	1.5...0.3	30	0.4...0.6	3.2	0.5
ГДИ-2Б	0.14...0.19	2.0...0.4				
ГДИ-1.5А	0.214...0.3	0.7...0.1	25	0.5...0.7	8.0	0.7
ГДИ-1.5Б	0.166...0.214	1.0...0.2				
ГДИ-1	0.273...0.375	0.5...0.1	25	0.5...0.7	8.0	0.7

* МФС – магнитная фокусирующая система.

– неоднородность интенсивности поля замедленной волны по толщине ленточного электронного потока вблизи рабочей поверхности периодической замедляющей структуры, что уменьшает коэффициент использования электронного потока;

– неоднородность интенсивности электромагнитного поля в ОР вдоль пространства взаимодействия генератора (гауссово распределение), при этом, как показывают результаты математического моделирования, КПД электронно-волнового взаимодействия возрастает в промежутке между осью ОР и пушечным концом дифракционной решетки [85]. Расположение выходного устройства и механизма механической перестройки резонансной частоты ОР на его подвижном зеркале существенно затрудняет применение оротронов, ледатронов и ГДИ в радиоэлектронных системах.

Увеличить коэффициент использования электронного потока в лампах дифракционного излучения можно путем применения сдвоенных гребенок, расположенных в перпендикулярных оси ОР плоскостях (оротрон) [83], сдвоенных гребенок, расположенных в параллельных оси ОР плоскостях (орбиктрон) [84,85], клинотронного эффекта [47,87,88].

4. Коаксиальный клинооротрон

Одним из эффективных способов повышения мощности выходного сигнала ламп дифракционного излучения (оротронов, ледатронов и ГДИ) является применение многопучковых электронных потоков (многопучковый орбиктрон) [85], а также трубчатых электронных потоков и коаксиальной конструкции генераторов с регулярными или нерегулярными дифракционными периодическими структурами [86–88]. Применение клинотронного эффекта в коаксиальном оротроне способствует также повышению коэффициента использования заряженных частиц по поперечному сечению «толстого» трубчатого электронного потока [87,88].

Ниже представлены результаты моделирования и расчетов, а также характеристики оптимальных вариантов коаксиального клинооротрона.

На рис. 3 схематически представлена конструкция оротрона с наклонным электронным потоком. Оротрон содержит в себе электродинамическую систему – коаксиальный открытый резонатор, образованный двумя зеркалами 1, 2 в виде поверхностей внешнего и внутреннего соосно расположенных тел вращения. Периодическая замедляющая структура оротрона – отражательная дифракционная решетка 3 – гребенка, выполнена на рабочей поверхности внешнего зеркала 1 в виде углового отражателя, созданного поверхностями 4, 5, расположенными зеркально-симметрично относительно плоскости симметрии открытого резонатора, перпендикулярной оси устройства, и повернутого вершиною угла ψ к оси прибора, причем угол ψ при вершине имеет величину, которая лежит в интервале $168^\circ \leq \psi \leq 179^\circ$. Электронно-оптическая система (ЭОС) коаксиального оротрона снабжена основным 6 и дополнительным 7 кольцевыми эмиттерами, установленными на концах ЗС 3. ЭОС формирует трубчатые электронные потоки 8, 9 с толстой (толщина $\Delta \gg \delta$) стенкой. Устройство 10 для выведения высокочастотной энергии из ОР, снабженное щелями 11 связи с нагрузкой, расположено на внутреннем зеркале 2, выполненном в форме гиперболоида вращения. Для фокусирования трубчатых электронных потоков 8, 9 применена магнитная фокусирующая система 12 из магнитотвердых материалов.

Для повышения эффективности энергообмена при взаимодействии между электронами и электромагнитными волнами ЗС в представленном оротроне трубчатые электронные потоки падают на рабочую поверхность ЗС под углом α . При этом острый угол между плоскостью симметрии каждого трубчатого электронного потока и рабочей поверхностью гребенки составляет $0.5^\circ \leq \alpha \leq 6.0^\circ$ (см. рис. 3). «Клинотронный эффект» [47] в оротроне способствует существенному повышению его КПД. ЭОС позволяет получать ток величиной в единицы ампер, и при ускоряющих напряжениях 3...12 кВ обеспечивать необходимую для работы с высоким КПД величину амплитуды высокочастотного поля в пространстве взаимодействия коаксиального оротрона. В одном из вариантов реализации коаксиального клинооротрона периодическая структура – отражательная дифракционная решетка 3 – гребенка выполнена на длине L с монотонно уменьшающимся периодом, что способствует, с одной стороны, повышению электронного КПД, с другой – устранению условий

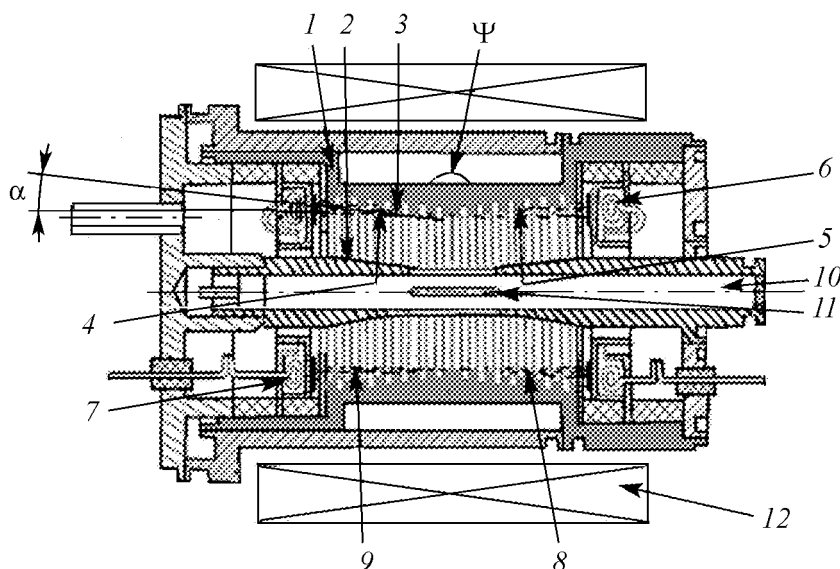


Рис. 3. Схематическое изображение коаксиального оротрона с наклонным электронным потоком

для возбуждения генератора в режиме ЛОВО [88]. Взаимодействие электронных потоков 8, 9, падающих на рабочую поверхность ЗС 3, осуществляется с замедленными волнами нарастающей интенсивности (гауссово распределение). Рабочая поверхность отражательной дифракционной решетки в представленной схеме коаксиального оротрона кроме функции замедляющей структуры выполняет функцию коллектора обработавших электронов. Реализация представленной схемы коаксиального оротрона в диапазоне 0.1...1.0 ТГц позволит создать источники электромагнитного излучения мощностью единицы ватт – сотни милливольт.

4.1. Математическая постановка задачи [87]. Математическая модель оротрона с нерегулярной гребенкой, обеспечивающей плавное изменение фазовой скорости синхронной гармоники в одномерном приближении на основе метода крупных частиц, записывается в виде

$$\begin{cases} \frac{dV_i}{dT} = -\frac{\theta_0}{V_i \gamma_i^3} [g(T) A E_{zi} - S_q F_{qi}], \\ \frac{du_i}{dT} = \theta_0 \left(\frac{1}{V_i} - 1 \right), \end{cases} \quad (1)$$

$V_i(0) = 1$; $u_i(0) = -\pi/2 + (2\pi(i - 0.5))/N$; $T = z/L$; L – длина гребенки, $0 \leq T \leq 1$; $V_i = v_i/v_0$; v_0 – средняя скорость электронов на входе в область взаимодействия.

$$\gamma_i = 1/\sqrt{1 - v_i^2/c^2}; \quad u_i = \omega t_i - (\omega z)/v_0; \quad \theta_0 = L\omega/v_0.$$

Здесь ωt_i – безразмерное время (t_i – размерное время), z/v_0 – среднее время. Силовая функция пространственного заряда –

$$F_{qi} = \frac{1}{N} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \frac{4\Delta^2(u_i - u_j)}{(u_i - u_j)[(u_i - u_j)^2 + 4\Delta^2]}, \quad \Delta = \frac{2\pi y(T)}{(\lambda\beta_0)}.$$

$S_q = 1.17 \cdot 10^{-4} I_0 \lambda / (\beta_0^2 l_s)$, I_0 – ток пучка, l_s – ширина пучка.

Нормированное поле синхронной гармоники с переменной фазовой скоростью представим в виде:

стоячая волна

$$E_{zi} = \sin(\omega t_i) \sin\left[\theta_0 \int_0^T \frac{dT}{V_{ph}(T)}\right], \quad (2)$$

синхронная волна

$$E_{zi} = \cos\left[\omega t_i - \theta_0 \int_0^T \frac{dT}{V_{ph}(T)}\right] = \cos\left[u_i - \theta_0 \int_0^T \left(\frac{1}{V_{ph}} - 1\right) dT\right], \quad (3)$$

где $\omega t_i = u_i + \theta_0 T$.

Функция распределения ВЧ-поля вдоль гребенки $g(T) = \rho(T) \sin^2 \pi T$

$$\rho(T) = \exp\left(\frac{2\pi}{\lambda} \left[y_0 \sqrt{\left[\frac{1}{\beta_0 V_{ph}(0)}\right]^2 - 1} - y(T) \sqrt{\left[\frac{1}{\beta_0 V_{ph}(T)}\right]^2 - 1} \right]\right), \quad (4)$$

$$y(T) = y_0 + (y_1 - y_0)T, \quad (5)$$

$y(T)$ – расстояние от центра тонкого ленточного электронного пучка до решетки в сечении T , y_0, y_1 – начальное и конечное значения, соответственно.

$$A = \frac{e}{m_0} \frac{E_m}{\omega v_0},$$

E_m – амплитуда ВЧ-поля.

Волновой КПД, определяющий эффективность взаимодействия,

$$\eta(T) = \frac{\theta_0 A (\gamma_0 + 1)}{\gamma_0^2} \int_0^T g(T) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{zi}(T) dT. \quad (6)$$

Качество взаимодействия оценивается функцией группировки

$$G_r = \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \cos u_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \sin u_i \right)^2}.$$

Выражение (4) учитывает уменьшение поля при удалении его от гребенки. Для компенсации снижения эффективности взаимодействия поля с пучком, последний предлагается пропускать под углом к гребенке, величина которого моделируется выражением (5).

Задача оптимального управления заключается в нахождении гладкой зависимости фазовой скорости $V_{ph}(T)$, а также параметров A и θ_0 , при которых обеспечивается максимум $\eta(T = 1)$.

4.2. Аппроксимация зависимости $V_{ph}(T)$ линейной комбинацией сдвигов функции $UP(x)$. Представим искомую зависимость $V_{ph}(T)$ обобщенным рядом [87,90,91]

$$V_{ph}(T) = \sum_{k=1}^m a_k \Phi_k^{np}(T), \quad (7)$$

где $\Phi_k^{np}(T) = UP(nT - k + p)/p$; n – количество отрезков, на которое разбивается интервал $[0,1]$; $2p$ – количество интервалов, перекрываемых финитной функцией $\Phi_k^{np}(T)$; $m = n - 1 + 2p$ – количество функций выбранного базиса, отличных от нуля, на интервале $[0,1]$.

Уникальность этого разложения состоит в том, что, хотя функции $\Phi_k^{np}(T)$ имеют конечный носитель, обобщенный ряд (7) является бесконечно дифференцируемым, так как в крайних точках $x = \pm 1$ все производные функции $UP(x)$ равны нулю. Наличие p -перекрытий позволяет в отличие от обычного сплайна или полинома производить изменения между локальными и интегральными свойствами функции управления.

Отработана методика получения начальных значений параметров a_k при наличии некоторого закона управления, принимаемого за начальное приближение. Использование обобщенного ряда (7) приводит задачу оптимального управления к задаче минимизации функции M переменных. Наличие дополнительных граничных условий позволяет уменьшить число оптимизируемых параметров. Задание граничных условий для управления при $T = 0$ и $T = 1$ легко учесть в выбранном разложении. Например, для граничного условия первого рода $V_{ph}(0) = V_{ph0}$ имеет

место соотношение $V_{ph}^m(0) = \sum_{k=1}^{2p-1} a_k \varphi_k^{np}(0) = V_{ph0}$, а так как $\varphi_p^{np}(0) = 1$, то $a_p = V_{ph0} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^{2p-1} a_k \varphi_k(0)$. Для граничного условия второго рода $\frac{dV_{ph}(0)}{dT} = dV_{ph0}$ имеет место соотношение $\sum_{k=1}^{2p-1} a_k \frac{d\varphi_k^{np}}{dT}(0) = dV_{ph0}$, из которого легко выразить a_{p-1} , при этом $p \geq 2$. Аналогичные соотношения получаются на другом конце отрезка при $T = 1$.

Расчеты показали, что удовлетворительное качество аппроксимации обеспечивается уже при $p = 2$ и $n = 5$, поэтому соотношения для коэффициентов a_k при учете граничных условий существенно упрощаются:

условия первого рода

$$a_2 = V_{ph0} - a_1 \varphi_1(0) - a_3 \varphi_3(0), \quad a_{m-1} = V_{ph1} - a_m \varphi_m(1) - a_{m-2} \varphi_{m-2}(1); \quad (8)$$

условия второго рода

$$a_1 = a_3 - dV_{ph0} / \frac{d\varphi_3(0)}{dT}, \quad a_m = a_{m-2} - dV_{ph1} / \frac{d\varphi_{m-2}(1)}{dT}. \quad (9)$$

При совместном использовании граничных условий первого и второго рода сначала по выражениям (9) вычисляются коэффициенты a_1 и a_m , затем их значения подставляются в (8) и вычисляются коэффициенты a_2 и a_{m-1} .

4.3. Результаты оптимизации [87, 91]. Описанная выше методика применена для оптимизации параметров оротрона с учетом встречной волны. При этом расчеты производились следующим образом. Вначале по методу синхронного электрона (без учета встречной волны) находилась оптимальная зависимость $V_{ph}(T)$. Затем для $n = 5$ и $p = 2$ находились значения коэффициентов a_k разложения (7). Эти значения использовались как начальное приближение для последующей оптимизации КПД с учетом встречной волны.

В случае применения прямолинейного электронного пучка, при $y(T) = y_0$ в выражении (5), для метода синхронного электрона получено значение $\eta(1) = 0.513$. После проведения оптимизации получены следующие значения параметров: $A_0 = 0.063$, $\theta_0 = 250$, $a_1 = 0.82167$, $a_2 = 0.17195$, $a_3 = 0.84174$, $a_4 = 0.13111$, $a_5 = 0.65664$, $a_6 = -0.0052$, $a_7 = 0.656$, которые обеспечивают

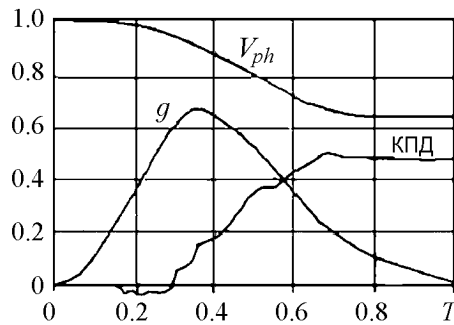


Рис. 4. Зависимости основных характеристик процесса взаимодействия с учетом встречной волны в оротроне с нерегулярной ЗС при $\alpha = 0^\circ$

КПД (с учетом встречной волны), равный 0.499 (рис. 4). Для сравнения: регулярная решетка даже при оптимизации величины $V_{ph} = \text{const} = 0.937$ обеспечивает КПД $\eta = 0.175$.

Использование наклонного пучка позволяет поднять КПД до величины 0.726 при расчете методом синхронного электрона и следующих значениях параметров: $A_0 = 0.063$, $d_0 = 0.07$, $d_1 = -0.0067$, $y_0 = 0.1$, $y_1 = 0.03$, в то время как для регулярной решетки $\eta = 0.182$ при $V_{ph} = 0.943$. Оптимизация варианта

с учетом встречной волны дает значение КПД $\eta(1) = 0.716$ (рис. 5) при следующих значениях параметров: $a_1 = 0.66227$, $a_2 = 0.31372$, $a_3 = 0.6832$, $a_4 = 0.23424$, $a_5 = 0.38893$, $a_6 = 0.0021$, $a_7 = 0.32028$.

Применение «клиноotronного эффекта» в умножительном клиноорotronе позволит орotronу пополнить перечень компактных мобильных источников электромагнитного излучения непрерывного действия с плавной перестройкой частоты в интервале 1.5...3.0 ТГц [66].

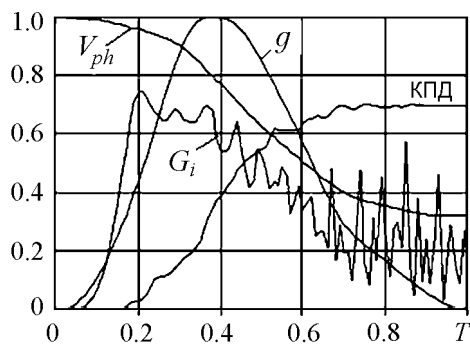


Рис. 5. Зависимости основных характеристик процесса взаимодействия с учетом встречной волны в орotronе с нерегулярной ЗС и наклонным электронным потоком при $0.5^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$

5. Орбиктрон

Нетрадиционная схема построения лампы дифракционного излучения – орбиктрона была предложена в июле 1976 г., а в сентябре автор этих строк наблюдал и исследовал процесс генерирования сигнала мощностью 11 Вт в 8-миллиметровом диапазоне с помощью первого лабораторного макета орбиктрона. КПД генератора составлял 10.2%. Доказать новизну и патентоспособность схемы орбиктрона помог Ф.С. Русин, который предоставил автору за несколько часов до заседания Контрольного совета ВНИИГПЭ копии своих статей, в которых дано четкое определение отличительных признаков орotronа. Орбиктрон является эффективной модификацией ГДИ. Он отличается от орotronа и ГДИ тем, что его дифракционная периодическая структура выполнена в виде двух плоских гребенок, расположенных зеркально-симметрично относительно оси резонатора в параллельных ей плоскостях (рис. 6, а) [84]. Название **орбиктрон** образовано путем сокращения английского словосочетания **open resonator** – открытый резонатор, **binary comb** – двоянная гребёнка, **electron** – электрон. В орбиктроне 2011 г. [92] двоянная гребенка 4 размещена в прямоугольной резонансной канавке 3 неподвижного зеркала 2 (рис. 6, б).

С помощью двумерного математического моделирования был проведен анализ Е-поляризованных колебаний в ОР орбиктрона, в котором элементарные волноводы, образованные щелевыми резонаторами двоянной гребенки, заменены отрезком двумерного волновода с узкой стенкой $2a$ и широкой стенкой $h_{кэл}$ (рис. 6, в). Незаполненная двоянной гребенкой часть резонансной прямоугольной канавки в 2D-модели представлена отрезком двумерного волновода шириной s и длиной $h_{рк}$. Строгий анализ радиационной добротности TE_{mq} -мод и структуры полей в 2D-модели (рис. 6, в) выполнен с использованием комплекса программ анализа двумерных ОР с произвольным профилем зеркал [93].

При $h_{рк} = \frac{n}{4} \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2s)^2}}$, ($n = 1, 3, 5...$) прямоугольная канавка является

четвертьволновым трансформатором, который согласует поле межзеркального объема ОР с полем неоднородности, в частности, в зоне двоянной гребенки, которая затягивает поле резонансного колебания ОР в зону периодической структуры полувол-

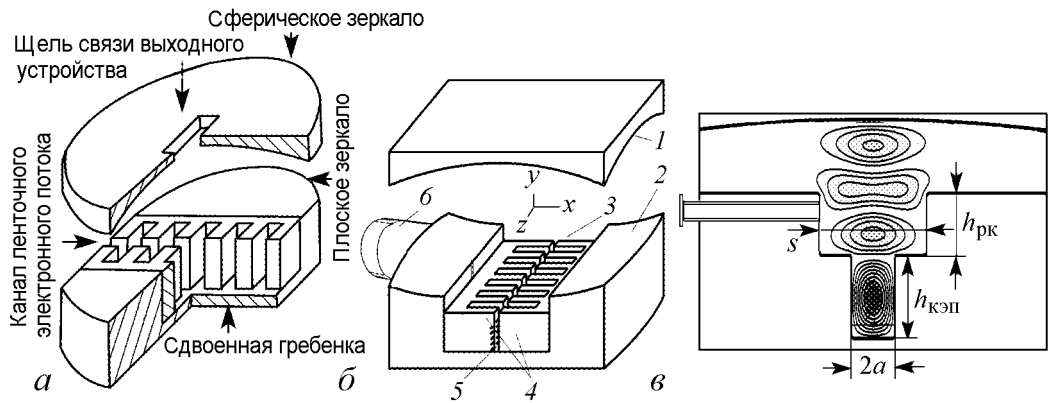


Рис. 6. Схематическое изображение электродинамической системы : орбитрона 1976 г. (а); орбитрона 2011 г. (б): 1 – подвижное зеркало, сферическое или корытообразное; 2 – неподвижное зеркало с резонансной канавкой 3; 4 – сдвоенная гребенка, 5 – канал для ленточного электронного потока, 6 – выходное устройство. Распределение TE_{04} -моды поля в 2D-модели ОР со сдвоенной гребенкой в прямоугольной резонансной канавке (в)

новых резонансных полостей, что приводит к снижению радиационных потерь и повышению амплитуды высокочастотного электрического поля $E_{гр}$ в канале сдвоенной гребенки, там где протекает ленточный электронный поток. Для TE_{03} -моды ($n = 1$) превышение амплитуды электрической составляющей высокочастотного поля в канале сдвоенной гребенки над амплитудой поля в пространстве между рабочими поверхностями зеркал ОР составляет $E_{гр}/E_0 = 5.06$, а для TE_{04} -моды ($n = 3$) превышение амплитуды составляет $E_{гр}/E_0 = 4.70$. Численное 2D-моделирование электродинамической системы орбитрона показывает, что при выборе ширины сдвоенной гребенки по оси y намного большей, чем $\lambda_w/2$, оказывается возможным подобрать такую её величину $(m\lambda)/2$, $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$ при которой реализуется резонанс на её собственной моде. При глубине резонансной канавки $h_{рк} \approx \lambda_w/4$ полоса перестройки частоты TE_{03} -моды с радиационной добротностью $\log Q_{рад} \geq 1 \cdot 10^4$ не превышает 1% (рис. 6, а, кривая 1). Для резонансной канавки с глубиной $h_{рк} \approx 3\lambda_w/4$ полоса перестройки частоты ОР на TE_{04} -моды возрастает до 6% (рис. 7, а, кривая 2). Если в спектре ОР со сдвоенной гребенкой (см. рис. 6, а) [83] присутствует до шести мод ($TE_{0q} \dots TE_{5q}$), то размещение сдвоенной гребенки в резонансной канавке способствует существенному высвечиванию высших мод: в спектре ОР орбитрона (см. рис. 6, б) остается только рабочая TE_{0q} -мода и высшая TE_{1q} -мода, поле которой не проникает в сдвоенную гребенку. В ОР неподвижное зеркало с резонансной канавкой и сдвоенной гребенкой выполняет функцию селектора типов колебаний.

Картина поля в пространстве взаимодействия орбитрона при ширине сдвоенной гребенки $h = 3\lambda$ показана на рис. 7, б. В этом случае амплитуда высокочастотного поля имеет максимум вблизи оси сдвоенной гребенки, что способствует существенному уменьшению неоднородности поля по ширине ленты электронного потока. При этом интенсивность поля на оси сдвоенной гребенки больше его интенсивности в пространстве между зеркалами ОР в 6 раз, как это видно из рис. 7, в.

Такая геометрия пространства взаимодействия орбитронных приборов открывает пути к достижению запуска процесса генерирования излучения в терагерцовом диапазоне при меньших стартовых токах, а также при той же добротности ОР достигать увеличения КПД и выходной мощности источника электромагнитного излучения.

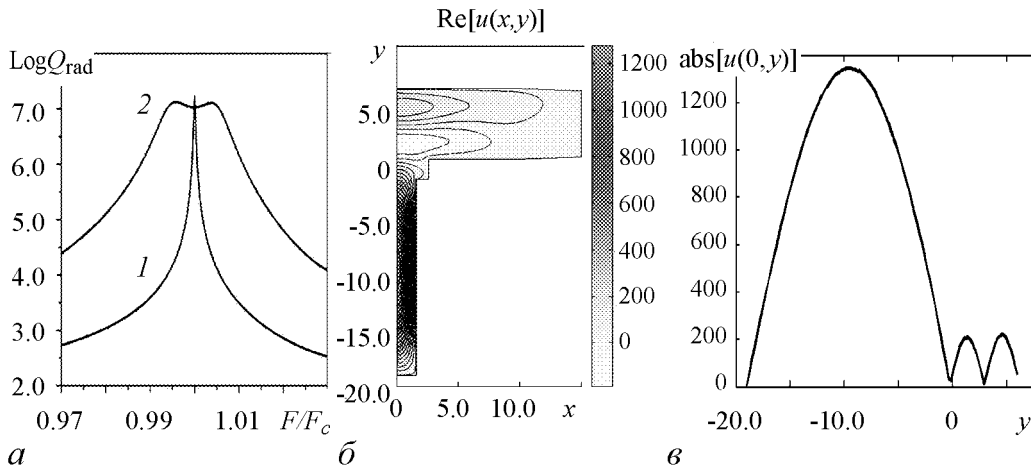


Рис. 7. Радиационные потери для TE_{03} -моды (1) и TE_{04} -моды (2) в 2D-модели орбитрона (а). Распределение высокочастотного поля TE_{03} -моды при ширине сдвоенной гребенки $h = 3\lambda$ (б). Интенсивность высокочастотного поля TE_{03} -моды на оси сдвоенной гребенки при её ширине $h = 3\lambda$ (в)

Сдвоенная гребенка в орбитроне является активной щелевой антенной в виде цепочки «полуволновых вибраторов», излучающих в межзеркальный объем ОР. При движении ленточного электронного потока в канале сдвоенной гребенки все его слои примерно в одинаковых условиях взаимодействуют с высокочастотным электромагнитным полем и коэффициент использования потока заряженных частиц повышается.

При продвижении ламп дифракционного излучения в терагерцовый интервал частот проблема повышения их КПД связана с необходимостью реализации достаточно высокой интенсивности электрической составляющей ВЧ-поля в области электронно-волнового взаимодействия и обеспечения высокого коэффициента использования всех слоев мощного ленточного электронного потока. Если последнее условие достаточно эффективно решается за счет применения «клинотронного эффекта» в коаксиальном клинооротроне [87, 88], то поиск способов повышения интенсивности ВЧ-поля в области ленточного потока в канале сдвоенной гребенки остается актуальным. Выше с помощью численного моделирования уже показано, что за счет расположения сдвоенной гребенки на дне резонансной канавки в неподвижном зеркале орбитрона (рис. 7, б) можно существенно увеличить амплитуду ВЧ-поля в области взаимодействия (рис. 7, в).

5.1. Эффект расслоения в орбитроне. Выяснение влияния ширины канала для ленточного электронного потока $2a = \text{const}$ и параметра заполнения q на эффективность обычного орбитрона проводилась на типичном варианте генератора в диапазоне $\lambda = 3$ мм: $L_1 = 25$ мм, количество периодов гребенки $N = 80$, период $d = 0.31$ мм, напряжение пучка $U_0 \approx 3$ кВ.

На рис. 8 представлены интегральные характеристики оптимизированного варианта для $2a = 0.14$ мм, $q = 0.5$, $C = 1$, $r_k = 12$ мм, $B_0 = 0.35$ Тл, в котором достигнут КПД $\eta = 0.145$ при нагруженной добротности (пересчитанной на ток пучка 1 А) $Q = 3400$. Хотя провисание поля в этом варианте $r_s = 0.78$ (отношение амплитуды в центре канала к амплитуде на поверхности гребенки) незначительно, однако уже приводит к существенному различию в характере взаимодействия с полем различных электронных слоев ленточного потока. Свой вклад в расслоение

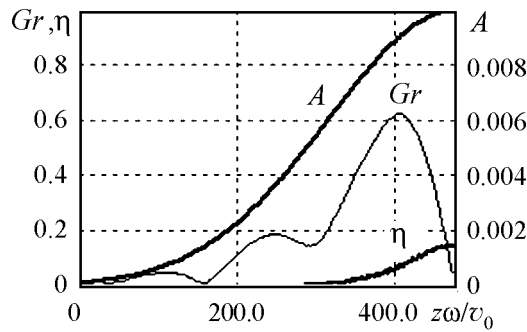


Рис. 8. Интегральные характеристики взаимодействия в оптимизированном орбитроне: A – распределение интенсивности ВЧ-поля в ОР, Gr – функция группировки, η – КПД

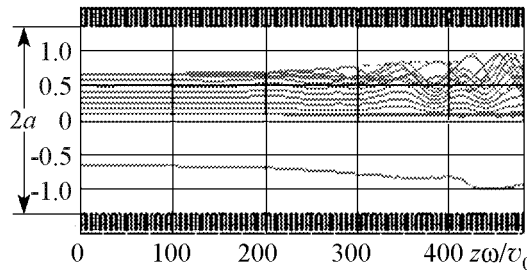


Рис. 9. Траектории электронов в канале сдвоенной гребенки орбитрона. С каждого из 7 слоев взято по одному электрону. На втором и последнем слое взято по 5 электронов с периода

вносит и компонента E_x высокочастотного поля. Поведение траекторий электронов из различных слоев потока для этого варианта представлено на рис. 9. При этом величина КПД внешнего слоя в 3 раза меньше, чем внутреннего.

При уменьшении параметра $q < 0.5$ КПД слегка возрастает и достигает $\eta = 0.162$. При увеличении $q > 0.5$, даже если увеличивать B_0 , эффективность резко снижается и при $q = 0.9$, $Q = 4800$, $\eta = 0.1$.

При $2a = 0.10$ мм величина неоднородности поля $r_s = 0.85$ и $q = 0.8$, $Q = 1730$, $\eta = 0.15$. С увеличением $2a > 0.14$ неоднородность поля приводит к тому, что даже при тонкой ленте электронного удается достичь $\eta > 0.1$ при слишком больших значениях добротности $Q > 10000$.

Таким образом, для эффективной генерации уже в трехмиллиметровом диапазоне толщина ленточного электронного потока орбитрона не должна превышать 0.08 мм, что ограничивает величину его тока значением порядка 0.1 А.

В период с 1978 по 2008 г. в ИРЭ НАНУ были разработаны и созданы экспериментальные образцы однопучковых орбитронов [84] с зазором 40 мм постоянного магнита из сплава SmCo_5 . Характеристики орбитронов терагерцового диапазона непрерывного и импульсного действия представлены в табл. 3 [77].

Таблица 3

Характеристики орбитронов [84] ТГц-диапазона непрерывного и импульсного действия

Разработка		Рабочая частота, ТГц	Выходная мощность, Вт	Рабочее напряжение, кВ	Рабочий ток, А	КПД, %
Непрерывный режим	ОРБИК-3	0.1	15	4.5	0.15	2.0
	ОРБИК-2	0.14	3.6	2.8	0.14	0.9
Импульсный режим	ОРБИК-И	0.1	300	14	0.6	3.5

6. Клиноорбиктрон с толстым пучком

Известно, что применение сдвоенной гребенки способствует уменьшению в орбиктроне до некоторой степени влияния динамического (по интенсивности ВЧ-поля) расслоения ленточного электронного потока [85]. Однако при уменьшении рабочей длины волны орбиктрона в терагерцовом интервале частот с целью обеспечения поперечной однородности поля в пространстве взаимодействия его сдвоенной гребенки – канале для ленточного электронного потока – ширину канала и толщину ленты электронного потока необходимо делать неприемлемо малыми. Толщину ленточного электронного потока в орбиктронах терагерцового диапазона можно существенно увеличить путем применения «клиноотронного эффекта» и выполнения пространства взаимодействия сдвоенной гребенки в виде клиновидного канала (рис. 10, а). Такая модификация орбиктрона названа клиноорбиктроном [94].

6.1. Математическая модель. Использовалась модель, ранее описанная в работах [85, 95]. Для исследования двумерных эффектов была разработана программа расчета процесса взаимодействия толстого электронного пучка, направляемого постоянным магнитным полем B_0 , с полем двумерной электромагнитной волны в зазоре между плоскими гребенками, с учётом токооседания на ЗС.

На рис. 10, а и рис. 10, в представлена схема пространства взаимодействия клиноорбиктрона. Высота зубьев гребенок $h = \lambda/4$. Ширина $2a$ зазора пространства взаимодействия изменяется вдоль z от $2a_0$ при $z = 0$ до нуля. Толщина ленты электронного потока задается параметром заполнения $q = b/a_0$. Расположение гребенки

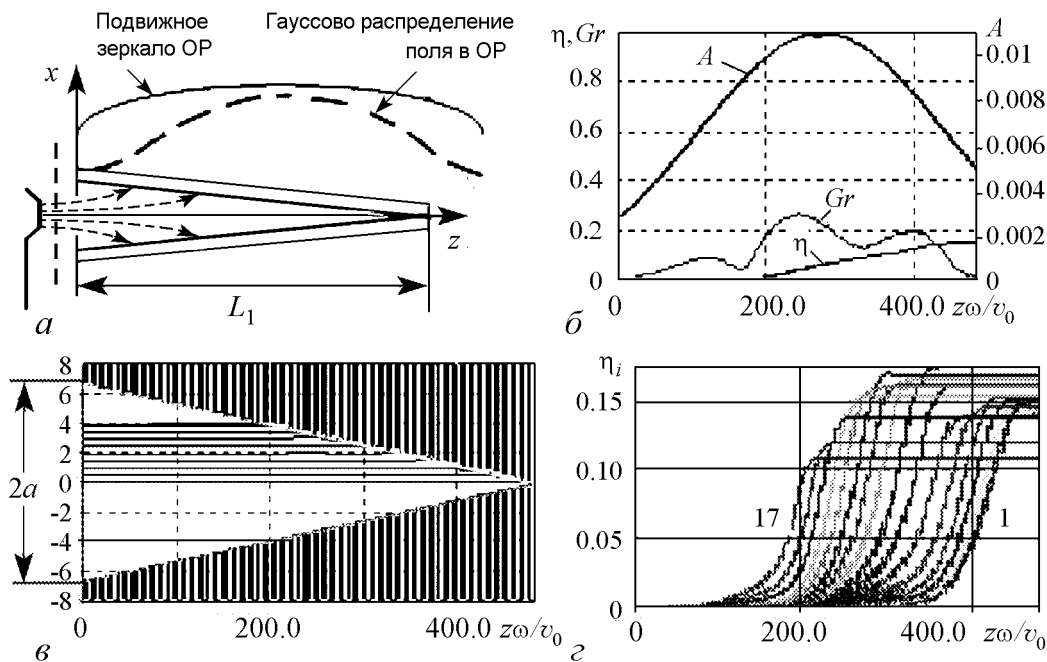


Рис. 10. Схема пространства взаимодействия клиноорбиктрона в сечении xz (а). Интегральные характеристики взаимодействия в клиноорбиктроне (б): A – распределение интенсивности ВЧ-поля в ОР, Gr – функция группировки, η – КПД. Траектории электронов в в пространстве взаимодействия клиноорбиктрона (в). Электронные КПД 17 слоев: 1 – внутренний слой, 17 – внешний слой (z)

по отношению к возбуждаемому полю открытого резонатора определялось параметрами $C = Z/L_1$ (Z – координата центра симметрии) и радиусом каустики r_k [96].

Как показывают расчеты, в схеме клиноорбиктрона толщину эффективно используемого ленточного электронного потока можно увеличить на порядок. Для тех же исходных параметров гребенок и напряжения пучка ($\lambda = 3$ мм: $L_1 = 25$ мм, $N = 80$, $U_0 \approx 3$ кВ) при $2a_0 = 0.7$ мм, $q = 0.6$, $B_0 = 0.5$ Тл получен КПД $\eta = 0.15$ при $Q = 3300$. Наилучшие условия достигаются здесь при $C = 0.57$, $r_k = 12$ мм. Величина $q = 0.6$ является оптимальной. Заметим, что, если не ограничивать величину добротности, то возможно достичь $\eta = 0.25$ даже при $2a_0 = 1.2$ мм.

На рис. 10, б и рис. 10, в представлены характеристики взаимодействия в клиноорбиктроне, аналогичные вышеприведенным. Отбор энергии в клиноорбиктроне происходит при меньшем искривлении электронных траекторий. Уменьшение магнитного поля приводит к уменьшению эффективности. Все слои довольно равномерно отдают энергию полю, что видно из рис. 10, г на котором приведено распределение электронных КПД по слоям ленточного потока.

Первыми достигают насыщения по КПД слои, ближние к рабочим поверхностям периодических структур сдвоенной гребенки. При этом электроны осаждаются на поверхности периодических структур и выбывают из процесса взаимодействия. Внутренние слои начинают эффективное взаимодействие по мере попадания в нарастающее поле достаточной амплитуды.

Вероятно, толщина ленты электронного потока в клиноорбиктроне может быть достаточно большой. Она может быть ограничена лишь условиями оптимального возбуждения сдвоенной гребенки полем открытого резонатора.

Разработка и исследование упомянутых выше вакуумных источников электромагнитного излучения терагерцового интервала частот не могут быть реализованы без адекватных радиоизмерительных устройств. В 1960-х годах Е.М. Кулешов заложил основы квазиоптической радиометрики в ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины. К настоящему времени созданы комплексы радиоизмерительных устройств (волнометры, аттенюаторы, детекторные головки, делители луча, модуляторы амплитуды, оконечные нагрузки) и комплекты высокочастотных трактов (секции волноведущих трактов) на основе квазиоптических линий передач [96]. Указанные комплексы могут служить основой для создания различных радиоизмерительных и других устройств и систем в интервале частот 0.1...2.0 ТГц электромагнитного спектра.

Выводы

В последние годы терагерцовая радиофизика и электроника активно развиваются. Известно, что интервал частот электромагнитных колебаний, в котором не созданы генераторные, усилительные и радиоизмерительные устройства, как правило, относят к неосвоенным. Освоение терагерцового интервала частот находится в начальной стадии. В настоящее время осуществляется разработка, создание и исследование вакуумных источников электромагнитных колебаний терагерцового диапазона. Вакуумные источники электромагнитного излучения терагерцового диапазона превосходят полупроводниковые источники по уровню мощности выходного сигнала

на двенадцать порядков и более чем на два порядка по величине граничной рабочей частоты. Развитие вакуумных источников терагерцового диапазона осуществляется по трем направлениям.

- Компактные источники с высокой мобильностью. К таким источникам следует отнести ЛОВО, в том числе ЛОВО-клинотроны, клиноорotronны, орбиктронны, клиноорбиктронны, клистронны с распределенным взаимодействием (КРВ), ЛБВО, магнетронны на пространственных гармониках, способные генерировать (в непрерывном или импульсном режиме) мощность $10^{-3} \dots 10^3$ Вт и решать задачи в интервале частот 0.1...1.0 ТГц.

- Компактные гиротронны на высоких гармониках циклотронной частоты с умеренной мобильностью, способные генерировать (в непрерывном или импульсном режиме) мощность $10^{-3} \dots 10^6$ Вт и решать задачи в интервале частот 0.1–1.0 ТГц.

- Стационарные источники на основе ускорителей заряженных частиц, в частности лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), способные генерировать (в непрерывном или импульсном режиме) мощность $10 \dots 10^9$ Вт и решать задачи в интервале частот 0.2...10 ТГц.

Грядущий прогресс в освоении терагерцового интервала частот, вероятно, будет обусловлен развитием компактных мобильных источников электромагнитного излучения терагерцового диапазона, обеспечивающих получение необходимых для практических применений: уровня мощности выходного сигнала, рабочей полосы частот, стабильности колебаний, плавной перестройки рабочей частоты, габаритов и массы устройств. В связи с этим разработку и создание эффективных компактных и мобильных вакуумных источников электромагнитного излучения терагерцового диапазона, таких как ЛОВО-клиноотрон, ЛБВО-клиноотрон, КРВ-клиноотрон, клиноорotron, клиноорбиктрон с нерелятивистским пространственно развитым электронным потоком, наклоненным под острым углом к рабочей поверхности периодической структуры, а также развитие терагерцовой радиометрики, следует отнести к актуальным направлениям развития терагерцовой радиофизики и электроники.

Работа выполнена при поддержке ГФФИ Украины, грант № Ф41/218-2012.

Библиографический список

1. *Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.-S., Park J., Temkin R.J.* Vacuum electromagnetic high-power terahertz sources // IEE Trans. on Terahertz Science and Technology. September 2011. Vol. 1, № 1. P. 54.
2. *Калинин В.И.* Генерирование дециметровых и сантиметровых волн (микрорадиоволн). М.: Связьиздат, 1948.
3. *Калинин В.И., Герштейн Г.М.* Введение в радиофизику. М.: Сов. радио, 1959.
4. *Шевчик В.Н.* Основы электроники СВЧ. М.: Сов. радио, 1959.
5. *Шевчик В.Н., Шведов Г.Н., Соболева А.В.* Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1962.
6. *Шевчик В.Н.* Взаимодействие электронных пучков с электромагнитными волнами. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1963.

7. Шевчик В.Н., Трубецков Д.И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Сов. Радио, 1970.
8. Электронные приборы СВЧ / Под ред. В.Н. Шевчика и М.А. Григорьева. Саратов: СГУ, 1980.
9. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.; Ижевск: РХД, 2000.
10. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
11. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2003.
12. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Том 1. Стационарные процессы / Под редакцией А.А. Кураева и Д.И. Трубецкова. М.: Физматлит, 2009.
13. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Том 2. Нестационарные и хаотические процессы / Под редакцией А.А. Короновского, Д.И. Трубецкова, А.Е. Храмова. М.: Физматлит, 2009.
14. Кураев А.А. Сверхвысокочастотные приборы с периодическими электронными потоками. Минск: Наука и техника, 1971.
15. Кураев А.А., Ковалев И.С., Колосов С.В. Численные методы оптимизации в задачах электроники СВЧ. Минск: Наука и техника, 1975.
16. Кураев А.А. Теория и оптимизация электронных приборов СВЧ. Минск: Наука и техника, 1979.
17. Кураев А.А. Мощные приборы СВЧ: Методы анализа и оптимизации параметров. М.: Радио и связь, 1986.
18. Кураев А.А., Байбурун В.Б., Ильин Е.М. Математическое моделирование и методы оптимального проектирования СВЧ приборов. Минск: Наука и техника, 1990.
19. Кураев А.А., Попкова Т.Д., Синицын А.К. Электродинамика и распространение радиоволн. Минск: Бестпринт, 2004.
20. Koch M. Terahertz technology: Quo vadis? // *Photonik international*, 2006. P. 14.
21. Миллиметровые и субмиллиметровые волны / Под ред. Р.Г. Мириманова. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.
22. Manley J.M., Rowe H.F. General energy relations in nonlinear reactances // *Proc. IRE*. 1959. Vol. 47, № 12. P. 2115.
23. Barnet L.R., Baird J.N., Grow R.W., and Holmes S.G. Submillimeter-wave BWO's // *IEEE Int. Electron Devices Meeting*. San Francisco, CA. Technical Digest. 1985. P. 364.
24. Woolard D., Kaul R., Sueniam R., Walker A.H., Globus T., and Samuela A. Terahertz electronics for chemical and biological warfare agent detection // *IEEE MTT-S Dig.* 1999. P. 925.
25. Piesiewicz R., et al. THz channel characterization, for future wireless gigabit indoor communication systems // in *Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics IV* / R.J. Hu and K.J. Linden (eds) // *Proceedings of SPIE*. 2005. Vol. 5727. P. 166.

26. *Kompfner R.* The invention on traveling-wave tube. San Francisco Press, 1964. 30 p.
27. А.с. СССР № 172364 от 31.05.1948. Генераторное устройство микроволнового диапазона / М.Ф. Стельмах // Бюллетень изобретений и открытий. № 13. 1965.
28. *Альциулер Ю.Г., Татаренко А.С.* Лампы малой мощности с обратной волной. М.: Сов. радио, 1963.
29. Электроника ламп с обратной волной / Под. ред. В.Н. Шевчика и Д.И. Трубецкова. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975.
30. *Трубецков Д.И.* Введение в СВЧ электронику. История и начальные сведения // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 7-я зимняя школа-семинар инженеров. Саратов: Книга 3. Изд-во Саратовского университета, 1986.
31. *Стельмах М.Ф.* К теории сдвоенного блока щелевых резонаторов // Радиотехника. 1953. № 8. С. 30.
32. *Стельмах М.Ф.* О взаимодействии электронного потока с с полем пространственных гармоник // Радиотехника и электроника. 1957. Т. 2, № 4. С. 461.
33. *Тараненко З.И., Трохименко Я.К.* Замедляющие структуры. Киев: «Техника», 1965.
34. *Силин Р.А., Сазонов А.Л.* Замедляющие системы. М.: Сов. Радио, 1966.
35. *Guénard P., Doehler O., Epsztein B., Warnecke R.* Nouveau tubes oscillateurs a large bande d'accord onique pour hyperfrequences // C.R. Acad. Sc. 1952. Vol. 235. P. 236.
36. *Гершензон Е.М., Голант М.Б., Негирев А.А., Савельев В.С.* Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Под ред. Н.Д. Девяткова. М.: Радио и связь, 1985. 136 с.
37. *Ives L., Kory C., Read M., et al.* Development of terahertz backward wave oscillators // International Vacuum Electronics Conference (IVEC'2004). Conf. Dig. Monterey, CA, USA (27–29 April 2004). 2004. P. 68.
38. *Dayton J.A.Jr., Mearini G.T., Kory C.L.* Diamond based submillimeter backward wave oscillator// International Vacuum Electronics Conference Digest. 1990. P. 341.
39. *Barnet L.R., Stankiewicz N., Dayton J.A.Jr.* Submillimeter backward-wave oscillator // IEEE Int. Electron Devices Meeting. San Francisco, CA Technical (IVEC'2004) / Conf. Dig. Monterey, CA, USA (27–29 April 2004). 2004. P. 71.
40. Отчет о НИР «Боксит» Разработка методов создания широкодиапазонных измерительных генераторов миллиметрового диапазона волн. Научный руководитель А.Я. Усиков. Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР. 1957. 168 с.
41. *Millman S.* A spatial harmonic travelling-wave amplifier for six millimeters wavelength //Proc. of the IRE. 1951. Vol. 39, № 9. P. 1035.
42. *Kompfner R.* Backward-wave oscillator //Bell Lab. Rec. 1953. Vol. 31, № 8. P. 281.
43. *Kompfner R., Williams N.T.* Backward-wave tubes// Proc. of the IRE. 1953. Vol. 41, № 11. P. 1602.
44. *Walker L.R.* Starting current in the backward-wave oscillator//J. Appl. Phys. 1953. Vol. 24, № 7. P. 854.

45. А.с. СССР №341113 от 17.12.1956. Лампа обратной волны / Г.Я Левин // Открытия, изобретения. 1972. № 25. С. 201.
46. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / Под ред. А.Я. Усикова. Киев.: Наук. думка, 1986.
47. Левин Г.Я., Бородкин А.И., Кириченко А.Я. и др. Клиноотрон / Под ред. А.Я. Усикова. Киев: Наук. думка, 1992.
48. Ефимов Б.П., Кириченко А.Я., Бужинский А.П. Экспериментальное исследование влияния отражений на частотные характеристики ЛОВ миллиметрового диапазона // Труды ИРЭ АН УССР. Харьков. 1967. Т. 15. С. 141.
49. Yeryomka V.D., Belukha O.Ya., Kirichenko L.O. Low-resonance mm and submm-wave BWO-klynotron // Proc. 13-th Int. Crimean conference «Microwave Telecommunication Technology» (CriMiCo'2003), Sevastopol, Ukraine, Weber, 2003. Vol. 1. P. 255.
50. Кириченко А.Я., Ефимов Б.П. К вопросу о работе ЛОВ О-типа с нежесткофокусированным электронным потоком в неоднородном магнитном поле // Труды ИРЭ АН УССР. Харьков. 1967. Т. 15. С. 130.
51. Лысенко Е.Е., Пишко О.Ф., Чумак В.Т., Чурипова С.А. Состояние разработок клинотронов непрерывного действия // Успехи современной радиоэлектрон. Зарубежная радиоэлектрон. 2004, № 8. С. 3.
52. Кириченко А.Я., Чурипова С.А. Клиноотрон // Радиофизика и электроника. Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. 2004. 1.9., спец. вып. С. 68.
53. Мильчо М.В., Ефимов Б.П., Завертанный В.В., Гончаров В.В. Особенности режимов работы генераторов типа клиноотрон // Радиофизика и электроника. Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. 2005. Т. 10, № 3. С. 435.
54. А.с. СССР № 555751 от 17.12.1956. Лампа обратной волны – клиноотрон / В.Д. Ерёмка, А.Я. Кириченко, В.А. Солодовник // Открытия, изобретения. 1978. № 44. С. 227.
55. Еремка В.Д., Кириченко А.Я., Солодовник В.А. О возбуждении косой гребенки электронным потоком // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 10. С. 1580.
56. Кириченко А.Я. Ортоклиноотронный эффект // Радиофизика и электроника. Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. 2007. Т. 12, спец. вып. С. 59.
57. Победоносцев А.С., Тагер А.С. Анализ взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной в приближении «заданного поля» // Электроника. 1958, № 5. С. 117.
58. Конторович В.М., Малеев В.Я. Об устойчивости наклонного пучка с импедансной плоскостью // Труды Ин-та радиофизики и электрон. АН УССР. Харьков, 1961, Т. 9. С. 217.
59. Конторович В.М. О волнах в наклонном пучке, заполняющем полупространство над замедляющей системой // Труды Ин-та радиофизики и электрон. АН УССР. Харьков. 1962, Т. 10. С. 143.
60. Андрушкевич В.С., Козлов Г.А., Трубецков Д.И. К двумерной линейной теории СВЧ приборов О-типа // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10, № 1. С. 105.

61. *Конторович В.М., Малеев В.Я.* Взаимодействие наклонного электронного пучка с поверхностной волной (теория клинотрона) // Радиофизика и электроника, 2007, т. 12, специальный выпуск, посвященный 50-летию клинотрона. С. 22.
62. *Ваврив Д.М.* Теория клинотрона // Радиофизика и электроника. 2007. Т. 12. Специальный выпуск, посвященный 50-летию клинотрона. С. 35.
63. *Андрушкевич В.С., Гамаюнов Ю.Г., Патрушева Е.В.* Нелинейная теория клинотрона // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 3. С. 355.
64. *Мильчо М.В.* Взаимодействие электронов с поперечной и продольной составляющими высокочастотного поля в генераторах типа клинотрон // Радиофизика и электроника. Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. 2007. Т. 12, специальный выпуск, посвященный 50-летию клинотрона. С. 59.
65. А.с. 50354. СССР. М.кл. H01J 25/10. Умножительный клинотрон миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / В.Д. Еремка, Л.А. Поспелов, А.Я. Кириченко // Открытия, изобретения. 1970. № 4.
66. А.с. 59810. СССР М.ПК. H01J 25/10. Умножительный клиноорotron миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / В.Д. Еремка, Л.А. Поспелов, А.Я. Кириченко // Открытия. Изобретения. 1971. № 46.
67. *Еремка В.Д.* Умножители частоты с наклонным электронным потоком // Радиофизика и электроника. Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. 2007. Т. 12. Специальный выпуск, посвященный 50-летию клинотрона. С. 81.
68. *Yeryomka V.D.* Frequency multipliers with inclined electron flow // Proc. 17-th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo' 2007). Sevastopol, Ukraine. Weber, 2007. Vol. 1. P. 151.
69. А.с. СССР №195557 от 16.02.1965. Электронный прибор для генерации и усиления колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Ф.С. Русин, Г.Д. Богомоллов // Открытия, изобретения, 1967, № 10.
70. *Smith S.J. and Purcell E.M.* Visible light from localized surface charges moving across a grating // Phys. Rev. 1953. Vol. 92, № 4. P. 1069.
71. *Русин Ф.С., Богомоллов Г.Д.* Оротрон – электронный прибор с открытым резонатором и отражающей решеткой // Изв. вузов. «Радиофизика». 1968, Т. 11. № 5. С. 756.
72. *Богомоллов Г.Д., Бородкин А.И., Куц В.С., и др.* О возбуждении гребенки в открытом резонаторе в режиме оротрона и режиме ЛОВ // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1970. № 1. С. 97.
73. А.с. СССР № 334605 от 03.04.1970. Генератор дифракционного излучения / Балаклицкий И.М., Курин В.Г., Скрынник Б.К., Третьяков О.А., Шестопапов В.П. // Открытия, изобретения. 1972. Бюллетень № 12.
74. *Балаклицкий И.М., Скрынник Б.К., Третьяков О.А., Шестопапов В.П.* Генератор дифракционного излучения воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов // Украинский физический журнал. 1969. Т. 14, № 4. С. 539.

75. Балаклицкий И.М., Курин В.Т., Скрынник Б.К. О работе ГДИ в режиме ЛОВ /Укр. физ. журн. 1970. Т. 15, № 5. С. 717.
76. Шестопапов В.П. Дифракционная электроника. Х.: «Вища школа». Изд-во Харьк. ун-та, 1976.
77. Корнеев В.К., Мирошниченко В.С., Скрынник Б.К. Генераторы дифракционного излучения непрерывного и импульсного действия // Радиофизика и электроника. Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. 1998. Т. 3, № 1. С. 67.
78. Wortman D.E., Leavitt R.P. The Orottron // In «Infrared and millimeter waves, 1983, vol. 7, Sources and Radiation» (K.J. Button, ed.), p. 322. Academic Press, New York.
79. Mizuno K., Ono S., Shibata Y. Two different mode interaction in an electron tube with a Fabry–Perot resonator – the ledatron // IEEE Trans. Electron Devices. 1973. ED-20, № 8. P. 749.
80. Mizuno K. and Ono S. The Ledatron // In «Infrared and millimeter waves. 1979, vol. 1, Sources and Radiation» (K.J. Button, ed.), p. 213. Academic Press, New York.
81. Вайнштейн Л.А., Исаев В.А., Трубецков Д.И. Электронный генератор с открытым резонатором // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28, № 7. С. 1233.
82. Цейтлин М.Б., Мясин Е.А. Оротрон. Анализ эффективных режимов // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, № 6. С. 961.
83. Мороз Е.Е., Сорока А.С., Третьяков О.А., Шматько А.А. Резонатор с двойной решеткой как колебательная система автогенератора // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25, № 11. С. 2301.
84. А.с. СССР № 669963 от 15.12.1976. Генератор дифракционного излучения / В.Д. Еремка, В.К. Корнеев, Б.К. Скрынник, В.П. Шестопапов // Открытия, изобретения. 1979. № 9. С. 47.
85. Еремка В.Д., Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Пустовойт В.С., Сеницын А.К. Атомарные функции в задаче оптимизации по КПД двухпучкового оротрона с нерегулярной сдвоенной гребенкой // Зарубежная радиоэлектрон. Успехи современной радиоэлектрон. 2000. № 3. С. 58.
86. Гуляев Ю.В., Кураев А.А., Нефедов Е.И. и др. К задаче оптимизации коаксиального оротрона // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 2. С. 349.
87. Yeryomka V.D., Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. Phase velocity optimization millimeter-wavelength orottron with tilted electron beam // Telecommunications and Radio Engineering. 2008. Vol. 67, № 9. P. 383.
88. Патент Украины № 89882 от 10.03.2010. Коаксиальный оротрон / В.Д. Еремка, А.А. Кураев, А.Л. Сеницын // Бюллетень, 2010, № 6.
89. Кураев А.А., Сеницын А.К. Исследование автофазного режима в релятивистском оротроне // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32, № 11. С. 2427.
90. Кравченко В.Ф., Рвачев В.А., Рвачев В.Л. Математические методы обработки

сигналов на основе атомарных функций // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40, № 9. С. 1385.

91. Батура М.П., Кураев А.А., Синицын А.К. Основы теории и оптимизации современных электронных приборов СВЧ. Минск: БГУИР, 2007.
92. Патент Украины № 72435 от 09.11.2011. Орбиктрон – генератор дифракционного излучения / В.Д. Еремка, В.С. Мирошниченко, Ю.М. Демченко // Бюллетень 2012, № 16.
93. Открытый резонатор с прямоугольной канавкой на зеркале, теория и эксперимент / М.Ю. Демченко, В.К. Корнеенков, В.С. Мирошниченко, А.Е. Поединчук, Ю.А. Тучкин, Ю.В. Свищев // Радиофизика и электроника. Сб. трудов ИРЭ НАН Украины. 2000. Т. 5. № 3. С. 19.
94. Yeryomka V.D., Gurevich A.V., Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. Klynoorbictron – Terahertz Range Oscillator // 12-th Int. Vacuum Electronics Conference (IVEC'2011). February 21–24, 2011, Bangalore, India. Conf Dig. P. 253.
95. Гуревич А.В., Еремка В.Д., Кураев А.А., Синицын А.К. Двухкаскадный орбиктрон – усилитель и умножитель частоты // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 10. С. 64.
96. Безбородов В.И., Киселев В.К., Кулешов Е.М., Яновский М.С. Квазиоптические измерительные устройства ближнего миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн на основе металлодиэлектрического волновода квадратного сечения // Радиофизика и электроника. Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. 2007. Том 12, № 3. С. 589.

*ИРЭ им. А.Я. Усикова
НАН Украины, Харьков*

Поступила в редакцию 4.12.2012

TERAHERTZ VACUUM ELECTROMAGNETIC RADIATION SOURCES: EVOLUTION ZIGZAG FROM KLYNOTRON TO KLYNOORBICTRON

V.D. Yeryomka

Investigation and development of efficient electromagnetic oscillations sources are one of the topical issues in the field of terahertz radiophysics and electronics. A frequency region is regarded as an explored for which oscillating, amplifying and measurement devices have not been developed. The exploration of the terahertz frequency range is at the initial state. In a review paper, published in one of the USA scientific journal [1], which was devoted to the terahertz radiation vacuum sources there is some reminder of using, a «klynotron effect» in the BWO developed at the IRE NASU. The aim of the present paper is to give a short description of the contribution to exploring the terahertz frequency range which was made by researchers and developers of oscillatory and measurement devices. These facilities were proposed and engineered at A. Usikov IRE NASU over the period 1956–2011. This paper also contains the feeling appreciation and gratitude to the Department of electronics of N.G. Chernyshevskiy Saratov state

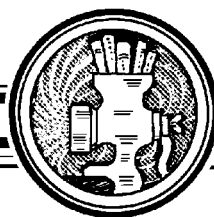
university on the occasion of its 60-th anniversary. The university graduates made a tangible contribution to the development a microwave electronics as well as to the study into the «klynotron effect». We have obtained the results from the investigation of the coherent terahertz region vacuum sources with nonrelativistic-tilted-to the surface of the periodic structure by an electron flow. This work was done using the techniques of physical and mathematical experiment. Evolutionary development was traced from the O-type BWO-klynotron to klynoorbictron. We have demonstrated the promising exploration of the terahertz radiation vacuum sources with smooth tuning of an output signal frequencies in which the «klynotron effect» is utilized. The information we have provided extends the knowledge about potential capabilities of terahertz electromagnetic radiation vacuum sources with an tilted sheet electron flow. The author's historical comments are not devoid of shortcoming some because they reflect his knowledges and prejudices.

Keywords: Terahertz (THz) frequencies, submillimeter waves, vacuum electronic devices, BWO-klynotron, orotron, orbictron, klynoorotron, klynoorbictron.



Ерёмка Виктор Данилович – родился в Донецкой обл. (1938). Окончил Киевский политехнический институт (1961). После окончания КПИ работает в ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ХГУ (1974) в области физической электроники. С 1982 по 1996 г. руководил Лабораторией вакуумной СВЧ-электроники и микроэлектроники. С 1996 по 2001 г. руководил Отделом вакуумной электроники. С 2001 года по настоящее время – старший научный сотрудник того же отдела. Соавтор монографий «Электровакуумные приборы диапазона миллиметровых волн» (2007) и «Физические основы и радиоэлектронные средства контроля надводной обстановки и судоходства» (2012). Опубликовал 130 научных статей по направлениям физической электроники и радиофизики. Автор 70 изобретений в области электроники СВЧ. Член редколлегии журнала «Техника и приборы СВЧ», член Украинского физического общества, Senior Member IEEE.

61085 Украина, Харьков, ул. Академика Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
E-mail: v.yerjomka@gmail.com



О СОВРЕМЕННОМ СОСТОЯНИИ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ И МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ С УПРАВЛЯЕМОЙ ЭМИССИЕЙ

Д. И. Трубецков, Г. М. Краснова

В работе кратко изложены некоторые результаты исследований и разработок приборов с управляемой эмиссией (ЛБВ, ЛОВ, карсинотрод, клистроны, а также рентгеновские лампы, полевые эмиссионные дисплеи и др.), которые проводились в течение последних двух десятилетий. Обозначен ряд направлений развития теории приборов с модуляцией эмиссии на поверхности катода. Также рассмотрены созданные в Европе и США программы по вакуумной СВЧ-электронике, направленные на использование новых технологий при освоении терагерцового диапазона и отражающие тенденции последних лет.

Ключевые слова: Автоэмиссионные катоды, ЛБВ, ЛОВ, клистрон, карсинотрод.

Введение

Начиная с 1988 года, ежегодно проводятся конференции, посвященные вопросам СВЧ-электроники приборов с управляемой эмиссией с акцентом на вакуумную микроэлектронику. За последние два десятилетия количество работ в этой области настолько возросло, что на данный момент проходят отдельно международные конференции по вакуумной электронике (International Vacuum Electronics Conference, IVEC), на которых также обсуждаются вакуумные электронные приборы СВЧ с управляемой эмиссией, включая и микроэлектронные, по микроэлектронике (International Vacuum Microelectronics Conference, IVMC) и по наноэлектронике (International Vacuum Nanoelectronics Conference, IVNC). Более того, проводились конференции, тематика которых полностью сводилась к изложению результатов исследования и анализу процессов эмиссии электронов с поверхности катода, а также поиску наиболее подходящих материалов для создания автоэмиссионных катодов (International Vacuum Electron Sources Conference, IVESC).

Одной из первых книг, посвященных СВЧ-микроэлектронике, явилась монография 1996 года [1]. В монографии были изложены основы теории автоэлектронной

эмиссии, известные на тот момент методы изготовления матричных автоэмиссионных катодов и основные математические модели для описания их параметров. Подробно была рассмотрена теория различных вариантов СВЧ-усилителей, генераторов и умножителей частоты, использующих принцип модуляции эмиссии СВЧ-полей (приборов с управляемой эмиссией). Большинство изложенных материалов сохранило свою значимость и сегодня, однако с момента выхода книги прошло 15 лет. Естественно задать вопрос: «Что произошло и изменилось в данной области электроники?»

К важным событиям следует отнести выход в свет монографии [2], в которой рассмотрены физико-химические основы процесса создания нового класса автоэмиссионных наноструктур на базе нанопористого анодного оксида алюминия. Описана принципиально новая интегральная технология создания наноструктурных автоэлектронных микроприборов и систем их межсоединений на основе тонких пленок вентильных металлов и их анодных оксидов. Изложены основы моделирования и расчета характеристик диодных структур, катодно-сеточных элементов, триодных структур. Нет смысла пересказывать монографию [2], остановимся лишь на моментах, важных для дальнейшего изложения, и некоторых, носящих характер напоминаний¹.

Необходимость применения катодов, с которых можно получить большую плотность тока, имеющих длительное время жизни, работающих при температуре окружающей среды и требующих небольшие значения приложенного напряжения, послужила в свое время основой для развития матричных автоэмиссионных катодов (МАЭК). Наиболее характерными их особенностями являются следующие [2]:

- высокая экономичность, обусловленная отсутствием накала;
- устойчивость эмиссии к колебаниям температуры в широком диапазоне ее изменения;
- высокая плотность тока эмиссии, достигающая 10^9 А/см²;
- устойчивость эмиссии к радиационному облучению вплоть до уровня, вызывающего разрушение материала автокатаода;
- высокая крутизна вольт-амперной характеристики, обусловленная экспоненциальной зависимостью тока от напряжения;
- безынерционность отклика тока на изменение внешнего напряжения.

Со временем стали проводиться исследования не только с решетками автокатодов с молибденовыми острями, метод создания которых был предложен более тридцати лет назад [4], но и с углеродными волокнами и углеродными нанотрубками (УНТ, CNT), карбидом гафния (HfC), арсенидом галлия (GaAs) и многими другими материалами, которые могут быть использованы для создания полевого катода. Также было произведено сравнение их характеристик между собой [5].

После открытия (1991) Иидзимой углеродных нанотрубок было опубликовано огромное количество работ, посвященных вопросам их применения. Результаты исследований по автоэмиссионным свойствам углеродных материалов наиболее полно обобщены и изложены в работе [6]. К настоящему времени предложено множество методов выращивания углеродных нанотрубок, в том числе синтез УНТ с помощью

¹Представляет интерес также книга [3], состоящая из двух глав. Как пишет автор, «первая из них содержит рассеянную по многочисленным журнальным публикациям информацию о строении, свойствах и возможных применениях нанотрубок... Предлагаемый к книге CD-ROM содержит пакет авторских программ на языке ФОРТРАН по расчету электронной структуры нанотрубок и нанопроводов.»

дугового разряда, каталитического химического осаждения и др. Диаметр выращиваемых УНТ обычно колеблется в диапазоне от 20 до 80 нм. Отношение длины и диаметра в зависимости от их изменения может варьироваться от 100 до 5000. Достоинством является получение автоэлектронной эмиссии с их поверхности при низких электрических полях, менее 10 В/мкм. Это в большой степени обусловлено высоким значением коэффициента усиления электрического поля из-за существенной шероховатости вершин УНТ. Одним из недостатков является то, что выращенным УНТ не хватает вертикально-параллельной ориентации, в результате чего они дают ограниченную тепловую и механическую стабильность, что приводит к неоднородной автоэлектронной эмиссии и продолжительному падению тока.

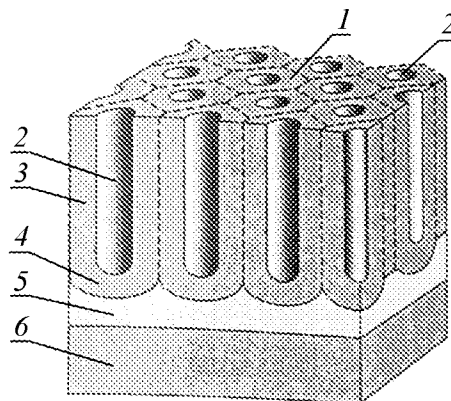


Рис. 1. Идеализированная структура пористого анодного оксида алюминия, сформированного из части слоя алюминия, осажденного на подложку в вакууме: 1 – окисная ячейка; 2 – пора; 3 – стенка окисной ячейки; 4 – барьерный окисный слой; 5 – слой алюминия; 6 – подложка [2]

Ключевым элементом интенсивно развивающейся в настоящее время вакуумной наноэлектроники является наноструктурная автоэмиссионная матрица [2]. Пористый анодный оксид алюминия (АОА) с регулярной нанопористой структурой (рис. 1), образующейся естественным путем, представляет собой дешевый и уникальный строительный материал для создания наноразмерных автоэмиссионных приборов. Пористый АОА состоит из плотной упаковки окисных ячеек в виде гексагональных регулярных призм, направленных по нормали к поверхности пленки и спаянных по боковым граням. Каждая окисная ячейка состоит из центрально расположенной поры, окисных стенок и барьерного окисного слоя (основания окисной ячейки), имеющего вид полусферы, выпячивающейся в нижележащий слой алюминия. В силу того, что пористый АОА представляет собой практически идеальную наноструктурированную диэлектрическую матрицу с вертикально ориентированными цилиндрическими наноканалами (порами), было проведено большое количество работ по разработке технологии выращивания углеродных нанотрубок в порах АОА [2].

Использование полевой эмиссии представляет определенный интерес в СВЧ-диапазоне. При применении автоэмиссионных катодов модуляция эмиссии оказывается эффективной из-за сильной зависимости тока эмиссии от поля на катоде, что позволяет управлять электронным потоком. Также это позволяет обеспечить практически мгновенную готовность прибора к работе и избавиться от необходимости источника питания катода. Кроме того, становится принципиально возможным создание устройств компактных размеров и сравнительно легкого веса.

О новых программах и новых нерешенных задачах

Заметим, что авторов работы [2] интересуют, главным образом, преимущества автоэлектронных приборов перед полупроводниковыми. Что касается работ по СВЧ вакуумным приборам с управляемой эмиссией, то они хаотически разбросаны в ма-

териалах различных конференций, поэтому одна из целей обзора собрать известные результаты, появившиеся после 1996 года. Но главная причина написания обзора связана с тем, что в последнее десятилетие в Европе и США созданы программы по вакуумной СВЧ-электронике, направленные на использование новых технологий при освоении миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн и отражающие тенденции последних лет.

В США Агентством по перспективным исследованиям Министерства обороны (DARPA) была предложена программа под названием «СВЧ-интегральная вакуумная электроника» (High Frequency Integrated Vacuum Electronics, HiFIVE) [7,8]. Программа находится в работе уже около трех лет. Аналогичный проект разрабатывается и в Европе (Optically Driven THz Amplifiers, OPTHER) [8]. Следует отметить, что значительное количество разработок проводятся в рамках именно этих программ [5, 9–14].

Выбор высокочастотного участка миллиметрового диапазона авторы проекта обосновали необходимостью расширения рабочей полосы частот, которая определяет пропускную способность каналов связи, используемых для обмена данными между военными системами различного назначения. Основное препятствие к использованию верхнего участка миллиметрового диапазона – отсутствие мощных широкополосных усилителей на такие частоты. Традиционные вакуумные приборы имеют удовлетворительные параметры, но на более низких частотах этого диапазона. В центре программ – создание компактного вакуумного усилителя на основе ЛБВ с центральной частотой 220 ГГц и полосой рабочих частот свыше 5 ГГц, коэффициент усиления которого составит 30 дБ, а выходная мощность – более 50 Вт. Производство выходной мощности на ширину полосы частот должно быть не менее 500 Вт-ГГц. В качестве возможных источников эмиссии рассматриваются холодные катоды с полевой эмиссией, на углеродных нанотрубках и др.

Одной из причин уменьшения мощности вакуумных приборов в короткой части миллиметрового диапазона является снижение эффективности взаимодействия электронного потока с полем замедляющей системы. Мощность взаимодействия напрямую зависит от величины $\tilde{N} f^{-8/3}$, где \tilde{N} – коэффициент формы пучка, то есть отношение ширины пучка к его толщине или отношение длины окружности к толщине, если речь идет о кольцевых пучках. Однако при увеличении ширины пучка, а соответственно, и коэффициента формы \tilde{N} , в замедляющей системе могут возникать высшие моды колебаний, требующие дополнительных методов подавления. Возможны и другие причины нестабильности (рассогласования в замедляющей системе, генерация на обратной волне и т.д.).

В американской программе HiFIVE указывается [7], что обязательным элементом создаваемого прибора должен быть многоступенчатый коллектор с КПД не менее 80 % (и с электронным КПД, не превышающим 5 %). Программа хорошо структурирована и разделена на три этапа.

Первый этап предполагает создание электронного потока с $\tilde{N} = 25$ при магнитном поле $B_{\text{макс}} < 11$ кГс и токопрохождении 95 %. Этот этап включает «холодные» испытания замедляющей системы (в настоящее время выбран «петляющий волновод»), изготовленный с помощью методов микрообработки. В испытания входят изучение дисперсии системы, возможных отражений, резонансов, паразитных мод.

Второй этап предполагает проверку работы собранного мощного усилителя и испытаний перспективных катодов, которые обеспечивали бы полный ток в 250 мА

при реальных значениях вакуума и напряжения со сроком службы более 1000 часов. В частности, планируются испытания катода на углеродных трубках.

На третьем этапе должен быть испытан мощный СВЧ-модуль, содержащий созданную ЛБВ.

В целях снижения тепловой нагрузки обсуждается также вариант сложной замедляющей системы, состоящей из параллельных единичных замедляющих систем со своим электронным потоком. В этом случае в систему на входе вводится делитель сигнала, а на выходе – сумматор [7].

В европейском проекте ORTHER одним из направлений предполагается создание вакуумного терагерцового усилителя с помощью технологии микрообработки и с использованием холодных катодов на основе автоэмиссии из углеродных нанотрубок [8]. В предлагаемой модели инфракрасный лазер, излучение которого модулировано на частоте ТГц диапазона, управляет эмиссией с холодного катода. Таким образом, имеет место возвращение к идее фото-ЛБВ на ином технологическом уровне и для иных целей.

Пример одной из возникающих задач

Определенное внимание следует уделить взаимодействию плоского электронного пучка и бегущей электромагнитной волны в продольном магнитном поле конечной величины, так как в некоторых случаях влияние полей пространственного заряда может привести к появлению и развитию пучковой неустойчивости, влияющей на процесс взаимодействия [15, 16]. В известных работах [17, 18] приведены результаты экспериментов по распаду ленточного и кольцевого электронных пучков на отдельные структуры вследствие неустойчивости. Оказалось, что при увеличении тока пучка исходный кольцевой контур теряет круговую симметрию формы. Это приводит к «скручиванию» пучка в нескольких местах, после чего пучок распадается на несколько структур, количество которых зависит от плотности тока и величины магнитного поля. Аналогичная неустойчивость возникает и в ленточном потоке.

Ниже в качестве примера приводится элементарная теория взаимодействия бесконечно тонкого ленточного электронного потока, движущегося в продольном магнитном поле, с бегущей электромагнитной волной [15–16]. В линейном приближении основные уравнения для такой модели имеют вид

$$\frac{d^2\tilde{x}}{dx^2} + 2j\beta_e \frac{d\tilde{x}}{dx} - \tilde{x} \left(\beta_e^2 - \eta B \frac{\omega_p}{v_0^2} \operatorname{th}(\beta_0 y_0) \right) = \frac{E_0}{2V_0} \operatorname{sh}(\beta_0 y_0) e^{-j\beta_0 x}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2\tilde{y}}{dx^2} + 2j\beta_e \frac{d\tilde{y}}{dx} - \tilde{y} \left((\beta_e^2 - \beta_c^2) + \eta B \frac{\omega_p}{v_0^2} \frac{1}{\operatorname{th}(\beta_0 y_0)} \right) = j \frac{E_0}{2V_0} \operatorname{ch}(\beta_0 y_0) e^{-j\beta_0 x}, \quad (2)$$

$$E_x = -\frac{\beta_0^2 K_0 I_0}{2 \operatorname{sh}(\beta_0 d)} \operatorname{sh}(\beta_0 y_0) e^{-j\beta_0 x} \int_0^x [j\beta_e \operatorname{sh}(\beta_0 y_0) \tilde{x}(\xi) + \beta_e \operatorname{ch}(\beta_0 y_0) \tilde{y}(\xi)] e^{j\beta_0 \xi} d\xi, \quad (3)$$

$$E_y = j \operatorname{cth}(\beta_0 y_0) E_x, \quad (4)$$

где V_0 – ускоряющее напряжение, E_0 – постоянная амплитуда волны, K_0 – сопротивление связи, β_0 – фазовая постоянная волны в системе без пучка, $\beta_c = \omega_c/v_0$ – фазовая постоянная циклотронной волны, $\omega_c = \eta B$ – циклотронная частота, $\eta = e/m$, e и m – заряд и нерелятивистская масса электрона, B – постоянная индукция магнитного поля, v_0 – постоянная продольная скорость потока, $\tilde{x}(x)$ и $\tilde{y}(x)$ – продольные и поперечные ВЧ-смещения электронов, соответственно, l – длина системы, y_0 – координата влета пучка. Вывод выражений для компонент поля пространственного заряда подробно приведен в [19].

Если замедляющей системы нет, и она заменена гладким металлическим электродом, то тонкий электронный пучок в магнитном поле подвержен влиянию лишь ВЧ-полей пространственного заряда, что соответствует нулевым правым частям в (1) и (2). Предполагая, что функции $\tilde{x}(x)$ и $\tilde{y}(x)$ изменяются как $\exp(-j\beta x)$, приходим к дисперсионным уравнениям и соответствующим им решениям

$$(\beta - \beta_e)^2 - \beta_p^2 = 0 \rightarrow \beta_{1,2} = \beta_e \pm \beta_p, \quad (5)$$

$$[(\beta - \beta_e)^2 - \beta_c^2] + \beta_p^2 \operatorname{cth}^2(\beta_0 y_0) = 0 \rightarrow \beta_{3,4} = \beta_e \pm \sqrt{\beta_c^2 - \beta_p^2 \operatorname{cth}^2(\beta_0 y_0)}, \quad (6)$$

здесь $\beta_p^2 = \eta B \omega_p / v_0^2 \operatorname{th}(\beta_0 y_0)$. Условием неустойчивости, как следует из (6), является выполнение неравенства

$$\beta_c^2 - \beta_p^2 \operatorname{cth}^2(\beta_0 y_0) < 0. \quad (7)$$

Применяя преобразования Лапласа к уравнениям (1), (2) в приближении заданного поля бегущей волны при начальных условиях $\tilde{x}(0) = \tilde{x}'(0) = \tilde{y}(0) = \tilde{y}'(0) = 0$ (здесь «'» означает производную по координате x) и используя уравнение (3), можно получить выражение для продольной составляющей напряженности электрического поля в первом приближении

$$E_x(l) = E_x(0) e^{-j\beta_0 l} \left[1 - (2\pi_0 N)^3 \left(\hat{F}(\Phi_0, \theta_p) + \hat{F}(\Phi_0, \phi_c, \theta_p) \right) \right], \quad (8)$$

где $\Phi_0 = (\beta_e - \beta_0) l$ – невозмущенный относительный угол пролета электронов и волны, $\theta_p = \beta_p l$, $\phi_c = \beta_c l$ – циклотронный угол пролета, $2\pi N = \beta_e l$, N – длина пространства взаимодействия в электронных длинах волн, $C_0^3 = (I_0 K_0)/(4V_0)$. Функции относительного угла пролета имеют вид

$$\begin{aligned} \hat{F}(\Phi_0, \theta_p) = & \frac{2\Phi_0 - \frac{1}{2\theta_p} \left[(\theta_p + \Phi_0)^2 \cos(\Phi_0 - \theta_p) - (\theta_p - \Phi_0)^2 \cos(\Phi_0 + \theta_p) \right]}{(\Phi_0 + \theta_p)^2 (\Phi_0 - \theta_p)^2} + \\ & + j \frac{\theta_p^2 - \Phi_0^2 + \frac{1}{2\theta_p} \left[(\theta_p + \Phi_0)^2 \sin(\Phi_0 - \theta_p) - (\theta_p - \Phi_0)^2 \sin(\Phi_0 + \theta_p) \right]}{(\Phi_0 + \theta_p)^2 (\Phi_0 - \theta_p)^2}, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\hat{F}(\Phi_0, \phi_c, \theta_p) = \frac{\exp[-j(\Phi_0 + q)] - 1}{2q(\Phi_0 + q)^2} - \frac{\exp[-j(\Phi_0 - q)] - 1}{2q(\Phi_0 - q)^2} - \frac{j}{\Phi_0^2 - q^2}, \quad (10)$$

где $q = j\sqrt{\theta_p^2 \operatorname{cth}^2(\beta_0 y_0) - \phi_c^2}$, $\theta_p^2 \operatorname{cth}^2(\beta_0 y_0) \geq \phi_c^2$. На рис. 2 приведены зависимости реальной и мнимой частей $\hat{F}(\Phi_0, \phi_c, \theta_p)$ при различных параметрах пространственного заряда для нескольких фиксированных значений циклотронного угла пролета ϕ_c . Видно, что на поведение кривых в этом случае оказывает влияние

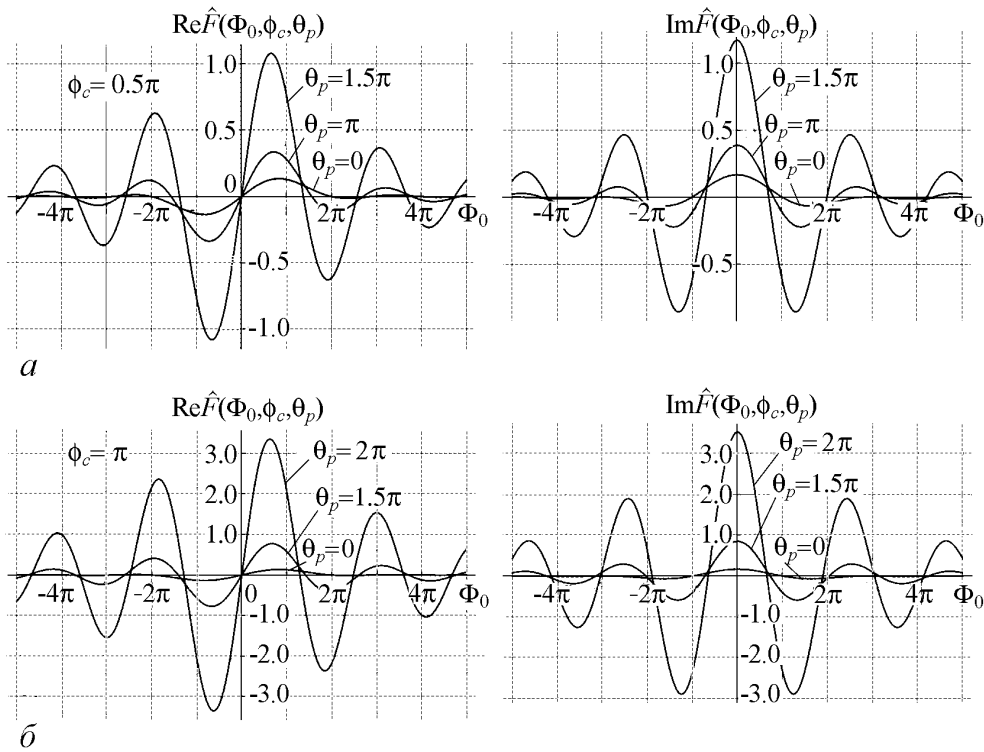


Рис. 2. Зависимости реальной и мнимой частей функции $\hat{F}(\Phi_0, \phi_c, \theta_p)$ от невозмущенного относительного угла пролета при различных значениях параметра пространственного заряда θ_p и циклотронного угла пролета ϕ_c [15,16]

как магнитное поле, так и поля пространственного заряда. Именно их соотношение определяет введенный параметр q . И чем выше его значение, тем больше амплитуда максимумов кривых активной и реактивной мощностей взаимодействия. Причем максимум активной составляющей по мере увеличения q смещается в сторону меньших значений Φ_0 . Условием передачи энергии электромагнитной волне является выполнение неравенства $\text{Re}\hat{F}(\Phi_0, \phi_c, \theta_p) < 0$.

Из анализа следует, что при наличии неустойчивости улучшается эффективность взаимодействия электронного потока и электромагнитной волны. Конечно, это лишь оценки, но уже они указывают на необходимость развития более полной теории взаимодействия ленточного или кольцевого неустойчивого пучка с электромагнитной волной. Задача еще более усложнится, если в качестве источников эмиссии будут использованы катоды с полевой эмиссией и сжатием электронного потока с помощью сходящейся оптики.

Остановимся далее на результатах исследования (в основном экспериментального) различных приборов с управляемой эмиссией.

Лампа бегущей волны

В [20] представлены результаты исследования мощного ЛБВ-усилителя в диапазоне 8...12 ГГц. На частоте 8.76 ГГц коэффициент усиления изменялся от 13 до 35 дБ, а выходная мощность – от 3 до 100 МВт. Для формирования релятивистского электронного пучка использовался полевой автоэмиссионный катод, погруженный в

магнитное поле. Энергия пучка составляла 850 кэВ, ток порядка 1 кА, а длительность импульса – 100 нс. Усилитель был задуман как узкополосный прибор.

Были созданы две ЛБВ с автоэмиссионными катодами в диапазоне 8...12 ГГц (рис. 3) [21]. Для первого экспериментального прибора разработан спиндтовский катод из молибдена с 14350 острьями на площади диаметром 0.84 мм. У данной ЛБВ с автоэмиссионным катодом высокочастотная выходная мощность составила 27.5 Вт, коэффициент усиления – 19.5 дБ на частоте 10.5 ГГц в полосе более, чем 3 ГГц. В режиме насыщения ток достигал 58 мА, а плотность тока – 10 А/см². На рис. 4, а показаны катодный ток, коллекторный ток, ток на спиральной замедляющей системе как функции от напряжения на управляющем электроде. Как видно из графика (рис. 4, а) основной недостаток первой ЛБВ с МАЭК связан с низким токопрохождением 82 %.

В целях улучшения токопрохождения и повышения эффективности работы в конструкцию ЛБВ были внесены некоторые преобразования. В частности, во втором экспериментальном приборе изменены фокусирующие электроды, уменьшен диаметр эмиссионной поверхности до 0.6 мм, введен ограничитель поперечного тока МАЭК. Были получены статические и ВЧ характеристики ЛБВ. На частоте 11.5 ГГц выходная мощность достигла 8 Вт, коэффициент усиления по мощности – 22 дБ, а ток на коллекторе – 29 мА. На рис. 4, б показано, как в зависимости от напряжения на управляющем электроде и анодного напряжения изменяются катодный ток и ток на спиральной замедляющей системе. Анализ экспериментальных данных показал, что существует максимально возможный ток, который можно было получить с электронной пушки с МАЭК с учетом хорошего токопрохождения. Для второй ЛБВ удалось получить токопрохождение 98 % при токе меньшем 20 мА, что превосходит

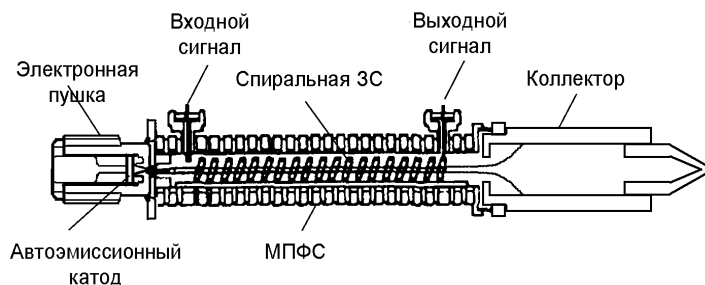


Рис. 3. Схематическое изображение ЛБВ с МАЭК [21]

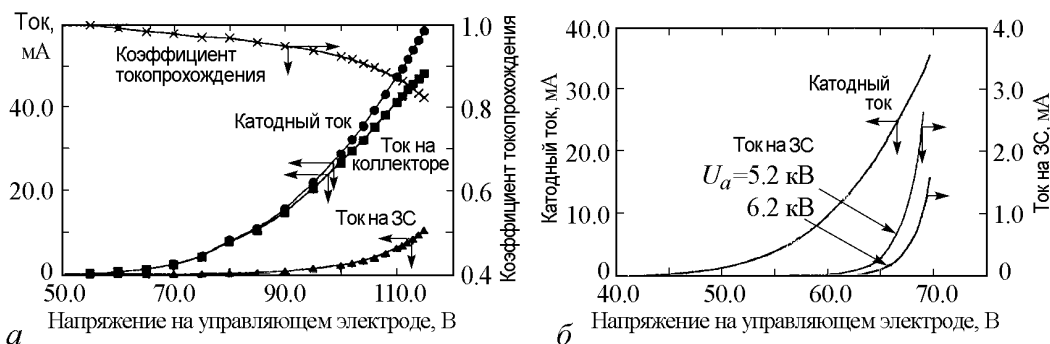


Рис. 4. Зависимость тока на катоде, тока коллектора, тока ЗС и токопрохождения от напряжения на управляющем электроде [21]

результаты для первой ЛБВ. Однако при большем значении тока становится существенным влияние пространственного заряда и токопрохождение резко снижается. Кроме того, оно сильно зависит от анодного напряжения.

Известна также ЛБВ с автоэмиссионным катодом и спиральной замедляющей системой [22,23], в которой использовался спиндтовский катод диаметром 1 мм. Экспериментальные данные хорошо согласовывались с предварительными теоретическими расчетами, результаты которых не приводятся. Наибольшее значение тока достигло 91.4 мА, выходная мощность составила 55.0 Вт на частоте 4.5 ГГц, коэффициент усиления в режиме насыщения – 23.4 дБ, а КПД – 17%. В течение всего времени работы прибора наблюдалась предельно устойчивая эмиссия с поверхности катода.

Новая разработанная геометрия электронной пушки позволила преодолеть сложности с фокусировкой расходящегося потока с высокой плотностью. Применение нескольких электростатических линз особой конфигурации дало возможность управлять электрическим полем на поверхности автоэмиссионного катода. Такая конструкция способствовала фокусировке пучков, ток которых изменялся в пределах от 0 до 0.150 А, а плотность потока на катоде от 0 до 19 А/см² и при напряжении пучка от 0 до 5000 В.

В дальнейшем был сконструирован ЛБВ-усилитель с управляемой эмиссией (рис. 5), частотный диапазон которого изменялся в пределах от 3.90 ГГц до 8 ГГц [24]. Хорошая фокусировка и управление электронным потоком позволили достичь тока 5.03 мА с учетом токооседания 1.5% от полной величины тока. При максимальном токе его плотность была немного больше 7 А/см², причем диаметр эмиссионной поверхности составил 300 мкм. ЛБВ была разработана с расчетом на то, что модуляция тока составит 1%, однако оказалось, что в частотном диапазоне от 4 до 8 ГГц с таких катодов можно получить модуляцию до 30%. На частоте 6.8 ГГц выходная мощность составила 280 мВт. Данные параметры получены при исследовании работы прибора в импульсном режиме с периодом следования импульса 100 мкс.

Также было проведено экспериментальное исследование возможности использования матричного автоэмиссионного катода в качестве источника электронов в ЛБВ средней мощности в диапазоне 4...8 ГГц [9,10]. Холодный катод в ЛБВ работал свыше 150 часов при коэффициенте заполнения вплоть до 10%, токе пучка – до 120 мА, и ВЧ мощности – до 100 Вт на частоте 5 ГГц. С помощью хорошего управления потоком удалось достичь высокой плотности тока в 15.4 А/см².

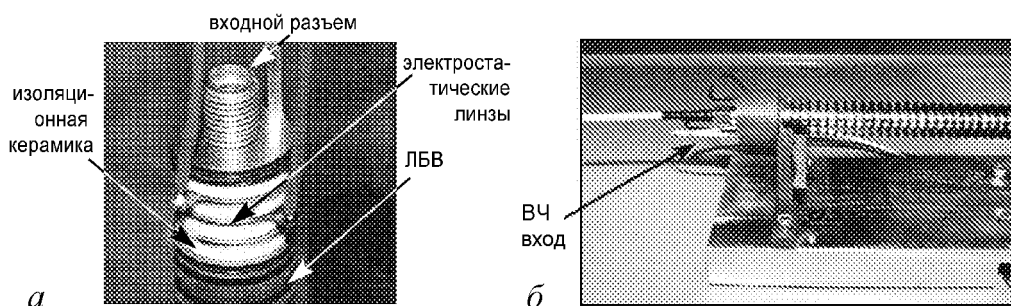


Рис. 5. Фотография электронной пушки и готовой ЛБВ [24]

Таблица 1 [9]

Напряжение	3500 В
Ток	100 мА
Мощность насыщения	100 Вт
Коэффициент усиления в режиме малого сигнала	32 дБ
Коэффициент усиления в режиме насыщения	25 дБ
Центральная частота	5 ГГц

Таблица 2 [9]

Напряжение пучка	3500 В
Ток пучка	121 мА
Мощность насыщения	100 Вт
Коэффициент усиления в режиме малого сигнала	32.7 дБ
Коэффициент усиления в режиме насыщения	22.1 дБ
КПД	24 %
Частота	5 ГГц

оптимизированных приборов, объединивших твердотельную и вакуумную технологии и получивших название «мощные СВЧ-модули» [25]. Эти модули заняли промежуточную по мощности область между твердотельными и вакуумными приборами и при этом заимствовали лучшее у тех и других.

В состав мощного СВЧ-модуля входят миниатюрная ЛБВ, твердотельный предусилитель (ТТУ) и интегральный источник питания (рис. 8). ТТУ – стандартные приборы, основное назначение которых усиление входного СВЧ-сигнала до уровня, достаточного для насыщения ЛБВ. ЛБВ в таком модуле представляет собой спиральную мини-ЛБВ с многоступенчатым понижением потенциала коллектора.

В таблице 1 приведены значения параметров, которых необходимо было добиться, а в таблице 2 представлены параметры, полученные уже при исследовании холодного катода в ЛБВ. Низковольтный полевой автоэмиссионный катод разработан SRI International. Катод состоит из кремниевой подложки с молибденовыми эмиттерами.

На рис. 6 приведены экспериментальные зависимости ВЧ выходной мощности и КПД от тока пучка. Видно, что выходная мощность достигает 100 Вт, когда ток равен 121 мА, а соответствующий КПД равен 24 %. Благодаря использованию низковольтного катода уменьшается величина требуемого приложенного напряжения на сетке (рис. 7).

Данная ЛБВ в диапазоне 4...8 ГГц входит в состав мощного СВЧ-модуля (microwave power module, MPM). Концепция мощных СВЧ-модулей была изложена в 1988 году в докладе Министерства обороны США по вакуумным СВЧ-приборам. Так сформировалось направление новых

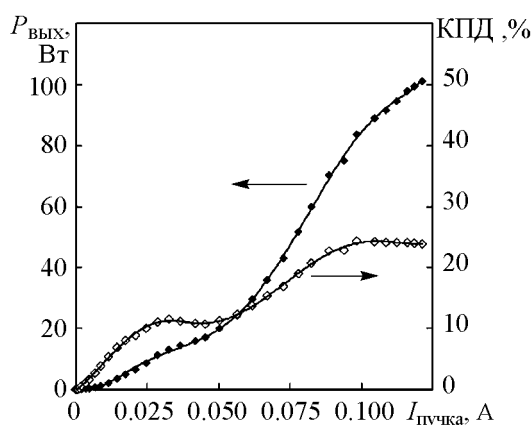


Рис. 6. Зависимость выходной мощности и КПД от тока [9]

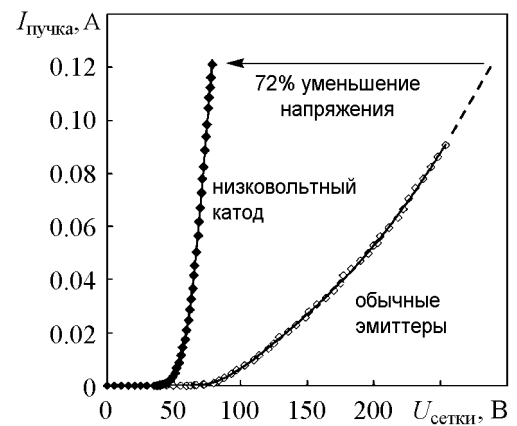


Рис. 7. Зависимость тока пучка от приложенного напряжения для разных катодов [9]

Источник питания модуля, преобразуя исходное напряжение, вырабатывает напряжение питания для ТТУ и ЛБВ.

В работе [26] описаны структура, процесс изготовления и исследование электронной пушки с МАЭК для ЛБВ. При проектировании электронной пушки с МАЭК была использована трехмерная программа моделирования MAFIA. Расчет траекторий электронного потока производился при условии, что половина угла, под которым вылетают эмиттированные электроны, составляет 30° . К сожалению, результаты расчета не приводятся.

Разработанная электронная пушка включает в себя матричный автоэмиссионный катод, электрод Венельта, фокусирующий электрод и анод. Электрод Венельта, воздействуя на МАЭК, вытягивает электроны. Электронный поток фокусируется цилиндрическим фокусирующим электродом и проходит через отверстие в аноде. Созданная электронная пушка была исследована в вакуумной камере при давлении $5 \cdot 10^{-6}$ Па. С такого матричного катода (17500 острий диаметром 0.6 мм) предполагалось получить ток в 30 мА. Однако после встраивания МАЭК в электронную пушку эмиссионный ток на коллекторе составил лишь 4.2 мА. Это является свидетельством того, что эмиссионная способность матричного катода резко снижается после встраивания в пушку и требуется предельная осторожность при их соединении.

В работе [27] исследованы два различных вида электронных ламп, в конструкцию которых входит холодный автоэмиссионный катод в качестве источника электронов. Катоды представляют собой массив вертикально ориентированных углеродных волокон. При рассмотрении триода получили коэффициент модуляции 82 % на частоте 32 ГГц с наибольшей плотностью тока 1.4 А/см^2 . В нем расстояния катод-сетка и сетка-анод равны 100 мкм и 500 мкм, соответственно. При исследовании лампы бегущей волны целью было протестировать катод и выяснить, возможно ли с него получить плотность тока 2 А/см^2 .

В работе [28] приведены результаты теоретического и экспериментального исследования маломощной ЛБВ с катодом УНТ в диапазоне 3.5...4.2 ГГц. Предшествующие испытания микротриода с углеродным автокатодом на частоте 32 ГГц (проект CANVAD [27]) подтвердили, что наиболее подходящим в качестве источника электронов для ЛБВ является массив УНТ. Но несмотря на это, имеются определенные трудности. Во-первых, эмиттированные электроны обладают большой поперечной скоростью. Во-вторых, плотность тока с массива УНТ все же мала. На данный момент управляющий электрод в приборе находится на довольно большом расстоянии от эмиттеров (100 мкм). Диаметр катода в два раза меньше внутреннего диаметра спиральной замедляющей системы. В импульсном режиме ток доходил до 4 мА, а наибольший ток на коллекторе составил 2.1 мА. Коэффициент усиления прибора достиг 2.8 дБ на частоте 3.3 ГГц, а токопрохождение – 92 %. Улучшению полученных параметров устройства может содействовать уменьшение расстояния между сетки и катодом, а также увеличение плотности тока катода.

С применением метода крупных частиц в работах [29,30] представлена математическая модель ЛБВ с катодной модуляцией эмиссии. Авторы проводили теоретическое исследование с учетом возбуждения высших гармоник в нерегулярной замедляющей системе. Расчеты были выполнены при значении ускоряющего напряжения равном 5086 В на частоте $f = 3 \text{ ГГц}$. Наряду с усилением основного сиг-

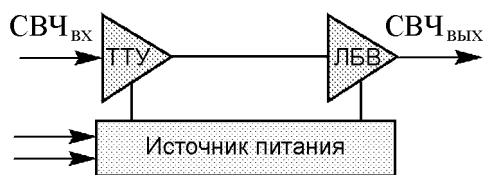


Рис. 8. Блок-схема мощного СВЧ-модуля [25]

нала, в рассмотрение входили высшие гармоники, возбуждающиеся на частотах $2f$, $3f$ и $4f$. Интенсивность их возбуждения была оценена по коэффициенту нелинейных искажений. Численное моделирование показало, что использование модуляции эмиссии снижает значение этого коэффициента при сохранении полосы усиления. Более того, использование нерегулярной ЗС позволило снизить коэффициент нелинейных искажений в 3...6 раз по сравнению с регулярной ЗС, и примерно в 1.5...2 раза – с обычной ЛБВ. Результаты, полученные при компьютерном моделировании, указывают на явные преимущества ЛБВ с катодной модуляцией по сравнению с обычной ЛБВ.

В [31] проведено моделирование траекторий электронов в электронно-оптических системах ЛБВ О-типа с матричными углеродными автоэмиссионными катодами, которые могут работать в вакууме $10^{-7} \dots 10^{-6}$ мм рт. ст. Основным недостатком подобной системы является то, что эмиссия идет в основном с периферийных острий, если несколько десятков эмитирующих острий размещены в пределах одной ячейки крупноячеистой управляющей сетки. Траектории электронов, эмитированных периферийными остриями, возмущаются электростатической линзой ячейки сетки, что вызывает появление поперечных скоростей электронов. Это, в свою очередь, приводит к проблемам фокусировки пучка магнитным полем. Основной целью работы стало исследование возможности уменьшения поперечных скоростей электронов в электронно-оптической системе матричным углеродным автоэмиссионным катодом. В результате моделирования было выяснено, что уменьшение диаметра частичного автоэмиссионного катода (была исследована пушка с семью АЭК) уменьшает углы наклона электронных траекторий, вызванные влиянием крупноячеистой управляющей сетки. Погружение пушки в постоянное магнитное поле уменьшает эти углы, если величина магнитного поля достигает нескольких тесла.

В силу того, что ЛБВ подходит в качестве компактного мощного усилителя в терагерцовом диапазоне, на основании компьютерного моделирования (программа Improved Concurrent Electromagnetic Particle-In-Cell, ICEPIC), применения катодов с полевой эмиссией и современных технологий микрообработки была разработана компактная мощная ЛБВ, работающая на 0.22 ТГц [5]. Если в ЛБВ ТГц диапазона использовать традиционные термокатоды, то требование большой плотности тока и малого радиуса потока приведет к тому, что при фокусировке электронного потока вследствие поперечных движений электронов потребуются большее магнитное поле. Кроме того, фокусировка электронного пучка до достаточно малого диаметра влечет

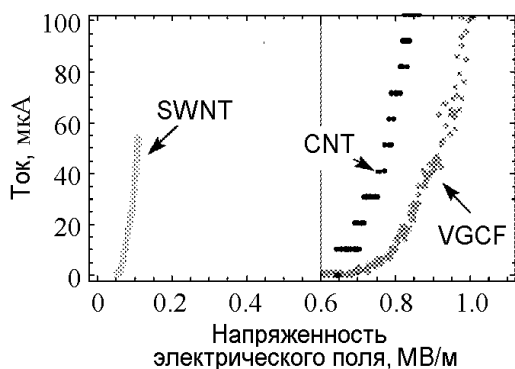


Рис. 9. Эмиссионный ток. Здесь: VGCF – углеродное волокно диаметром 20 мкм; CNT – массив углеродных нанотрубок диаметром 1 мм; SWNT – одностенные нанотрубки диаметром 100 мкм [5]

за собой определенные трудности, связанные с колебаниями на поверхности пучка. Использование АЭК, погруженного в ограничивающее магнитное поле, позволяет получить электронный поток, диаметр которого намного меньше диаметра пространства взаимодействия в ЛБВ.

Ключевой задачей при применении АЭК микронных размеров становится получение высокой плотности тока в течение длительного времени жизни. Тестировались различные материалы (рис. 9) (углеродные волокна, УНТ,

карбид гафния), пригодные для автоэмиссионного катода и способные работать 1000 часов. Углеродные волокна и УНТ характеризуются высокой проводимостью вдоль оси катода, в 1000 раз превышающей этот параметр для меди. Преимущество карбида гафния заключается в том, что он продемонстрировал около 2200 часов непрерывной работы при токе в 0.25 мА. С массива углеродных нанотрубок ток 3.6 мА был получен при 5180 В, но диаметр эмиссионной поверхности составил 1 мм, что в 10 раз превышает предельно возможный. Для одностенных нанотрубок (single-walled nanotube, SWNT) с поверхности диаметром в 100 мкм получены ток 3 мА и высокая стабильность эмиссии в течение около 1000 часов работы.

Следует заметить, что во всех работах есть лишь упоминания об особенностях теоретических расчетов, хотя имеются, например, указания на колебания поверхности пучка, что влечет за собой определенные трудности (на некоторые особенности взаимодействия ленточного потока с бегущей волной указывалось выше на основе элементарной теории).

Отметим, что, с точки зрения развития теории, представляют интерес следующие задачи:

- построение трехмерной нелинейной нестационарной теории СВЧ-приборов с управляемой эмиссией с длительным взаимодействием электронов и волны с учетом влияния сил пространственного заряда и фокусирующих полей;
- анализ побочных эффектов в СВЧ-приборах с модуляцией эмиссии из-за неустойчивости ленточных и полых электронных потоков (оценочный пример приведен выше);
- исследование паразитных явлений в усилителях с управляемой эмиссией (отражения, резонансы, паразитные виды колебаний, возбуждение на обратной волне) в рамках нестационарной теории;
- исследование возможности использования связанных замедляющих систем с электронными потоками вместо суммирования сигналов однопоточковых приборов;
- возвращение к теории приборов с фотокатодом;
- построение нестационарной теории мощных СВЧ-модулей, содержащих ЛБВ с управляемой эмиссией, с учетом возможных паразитных эффектов;
- построение теории новых приборов с управляемой эмиссией (в качестве примера ниже приведена теория карсинотрода).

Лампы обратной волны, клистроны и клистроды

Весьма впечатляющие экспериментальные результаты были получены для генераторов обратной волны в субмиллиметровом диапазоне длин волн. В данном разделе внимание уделено не только приборам и устройствам, но и технологиям изготовления. Кроме того, представлена развитая группой Солнцева одномерная теория карсинотрода, а так же двумерная теория карсинотрода, в которой учтено влияние магнитного поля.

Экспериментальные разработки. С использованием новых бипланарных встречно-штыревых замедляющих систем и запатентованной GENVAC технологии сложного химического вакуумного алмазного напыления CVD созданы ЛОВ на частоте 300 ГГц (рис. 10) и на 650 ГГц [11, 12, 32].

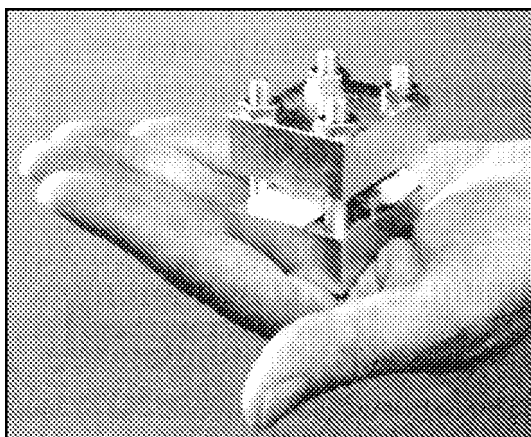


Рис. 10. Лампа обратной волны [10]

По предварительным расчетам выходная мощность и КПД ЛОВ на частоте 300 ГГц будут варьировать от 28.5 мВт и 4.5% на 285 ГГц до 35.2 мВт и 3.1% на 315 ГГц. Масса составит около 326 г. Для ЛОВ на частоте 650 ГГц выходная мощность составит 23.8 мВт, а КПД 1.6%.

В бипланарной встречно-штыревой системе противостоящие штыри расположены на параллельных пластинах. Плоский электронный пучок движется между этими пластинами в области высокого импеданса взаимодействия. В результате получается компактный относительно мощный субмиллиметровый источник сигнала.

Структура создана из алмаза, полученного на кремниевой основе с использованием глубокого реактивного ионного травления (DRIE). Во избежание проблем согласования двух секций электронная пушка выполнена как часть замедляющей системы. В качестве источника электронов взят спиндтовский катод, с которого можно получить ток в 1.8 мА. Управление электронным пучком осуществляется с помощью пары стержневых магнитов NdFeB (для ЛОВ на частоте 300 ГГц однородное магнитное поле 0.55 Тл).

ЛОВ на частоте 650 ГГц разрабатывается для работы с пучком, ток которого достигает 2 мА. Предполагается, что плотность тока с катода будет такая же, как и в ЛОВ на частоте 300 ГГц, но для обеспечения большей плотности тока в пространстве взаимодействия потребуется получить продольное магнитное поле величиной 0.8 Тл.

Разработки проводятся при поддержке NASA JPL и DARPA.

С применением двухэтапной технологии DRIE и пайки эвтектическим сплавом была создана ЛОВ на цепочке связанных резонаторов [33] для работы в терагерцовом диапазоне. В качестве источника электронов был использован матричный углеродный автоэмиссионный катод. На рис. 11 представлены эмиттеры, полученные при изготовлении катода с УНТ. Диаметр каждого точечного эмиттера составляет 4 мкм. В лампе использована обычная цепочка связанных резонаторов, расположенных вдоль оси.

Теоретическое исследование прибора и численное моделирование были основаны на методе конечных элементов и методе крупных частиц. Расчет проводился на частоте колебаний 0.1 ТГц. В результате оказалось, что прибор характеризуется довольно узкой полосой частот. Кроме того, центральная частота может быть точно настроена при изменении рабочего напряжения (рис. 12).

ЛОВ на частоте 300 ГГц предназначена для применения в тех случаях, когда необходим диапазон перестройки свыше 20%. Замедляющая система сконструирована таким образом, что она обеспечивает увеличение выходной мощности на 59% по сравнению с исходными прогнозами. Конструкция ЛОВ на 650 ГГц оптимизирована для работы на фиксированной частоте. С учетом преимущества работы на более короткой длине волны, на выходе 650 ГГц ЛОВ элемент связи представляет собой антенну, которая является частью алмазной структуры.

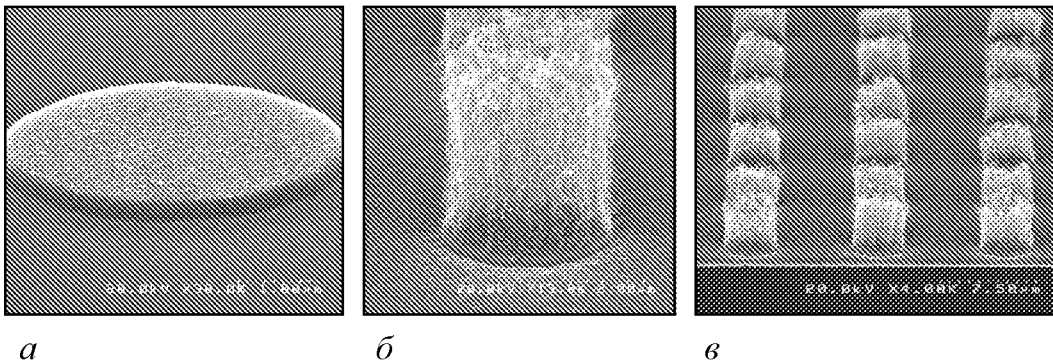


Рис. 11. *а* – пятно диаметром 4 мкм для образования эмиттера; *б* – «выращенный» точечный эмиттер; *в* – массив УНТ [33]

В рамках проекта OPTHER разрабатывается вакуумный усилитель обратной волны на частоте 1 ТГц [13]. Целью проекта является создание терагерцового вакуумного усилителя компактных размеров и легкого веса, коэффициент которого по мощности составит 10 дБ на частоте 1 ТГц. Ограничение наложено на предельно допустимое значение напряжения пучка (должно быть менее 12 кВ). В статье подробно изложены результаты компьютерного моделирования прибора и его узлов. В разрабатываемом усилителе используется замедляющая система – двойной гофрированный прямоугольный волновод (рис. 13), обеспечивающий эффективное взаимодействие электронного потока с полем обратной электромагнитной волны при минимальных потерях. Выбранная замедляющая система рассчитана для работы на частоте 1 ТГц при напряжении электронного потока 10 кВ. Потери составляют в среднем 0.15 дБ на секцию, а сопротивление на рабочей частоте – 2 Ом. Замедляющая система изготовлена из меди и имеет размеры 254 мкм × 80 мкм.

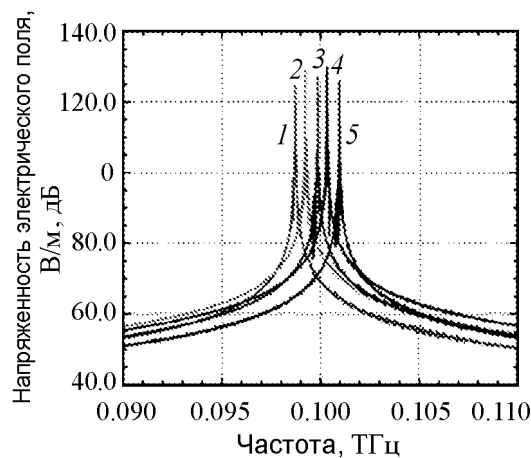


Рис. 12. Зависимость напряженности электрического поля от частоты при различных значениях напряжения электронного пучка, кВ: 1 – 11.0, 2 – 11.5, 3 – 12.0, 4 – 12.5, 5 – 13.0 [33]

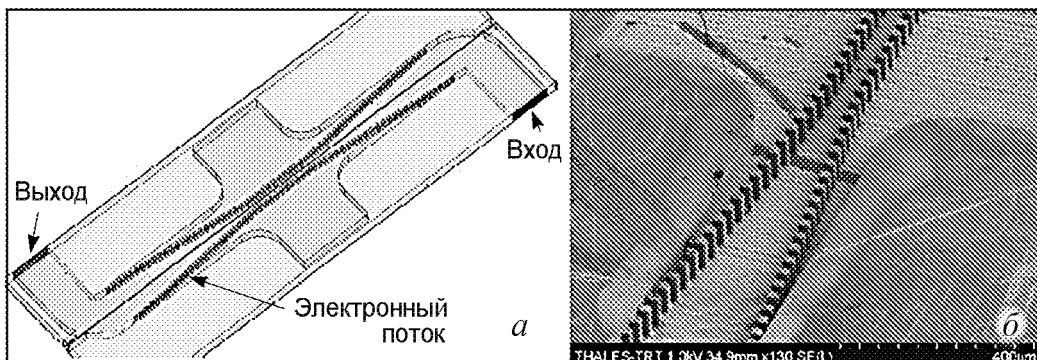


Рис. 13. *а* – структура ЗС с указанием входа и выхода сигнала; *б* – детализация конструкции ЗС [13]

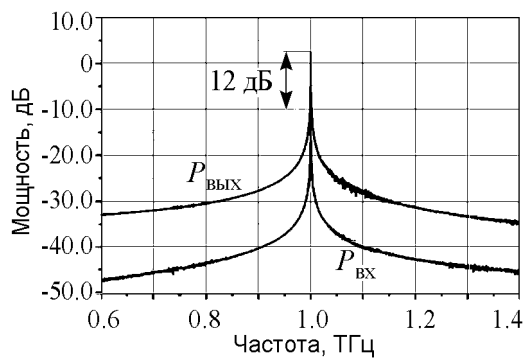


Рис. 14. Зависимость мощности от частоты сигнала [13]

В системе формируется цилиндрический электронный поток с радиусом 20 мкм. Он проходит вблизи ЗС на расстоянии 5 мкм от нее. Для обеспечения соответствующего сжатия пучка приложено магнитное поле величиной 0.8 Тл. Для рассматриваемого прибора значение пускового тока составило 6.0 мА. При численном моделировании усилителя обратной волны ток пучка был выбран немного меньше полученного значения 5.0 мА. На частоте 1 ТГц на вход подали сигнал мощностью 100 мкВт. Коэффициент усиления по мощности достигал 12 дБ (рис. 14). Расчет продолжался в течение 500 часов.

В работах [34,35] предложен отражательный клистрон с фотонным кристаллом для применения в качестве миллиметрового и субмиллиметрового устройства. Для контрольно-проверочного эксперимента такого отражательного клистрона в диапазоне 8...12 ГГц использовался холодный катод Спиндта, изготовленный на кремниевой подложке. Плотность упаковки катода составила $6.25 \cdot 10^6$ острий/см², причем площадь матричного катода оказалась равной 25 мм² (5×5 мм²).

В статье [14] описана разработка многолучевого клистрона в диапазоне 2...4 ГГц с полевым эмиттером. За основу был взят 19-лучевой клистрон с термокатодом для телекоммуникаций. Его составляющие были подробно изучены, и учтены все моменты, которые могли бы оказаться полезными при использовании полевого катода. Для успешной работы клистрона необходимо было добиться снижения пульсаций на поверхности ленточного электронного потока. В данном случае для этого применяется плоская сетка, на которую подан положительный потенциал, расстояние от нее до катода 100 мкм. Диаметр канала на входе в резонатор 2.8 мм. Работает клистрон на частоте 3.3 ГГц; его пиковая мощность составляет 3 кВт, а средняя 50 Вт.

Теоретическое исследование и численный расчет параметров клистрона с автоэмиссионным катодом приведены в работах [1,36].

Математическое моделирование. В плане развития теории следует выделить работы группы В.А. Солнцева [37–43], в которых предложен новый вариант прибора О-типа – лампа обратной волны с автомодуляцией эмиссии (карсинотрод) (рис. 15). Прибор сочетает принципы работы ЛОВ и клистрона. Для создания карсинотрода могут быть использованы электронные пушки с модуляцией эмиссии, применяемые в клистродах, индуктивных выходных лампах телевизионных передатчиков (ИОТ), или многолучевые пушки с модуляцией эмиссии, применяемые в приборах типа «Истрод».

Для осуществления автомодуляции эмиссии в карсинотроде между замедляющей системой и электронной пушкой введена цепь обратной связи. В этом случае

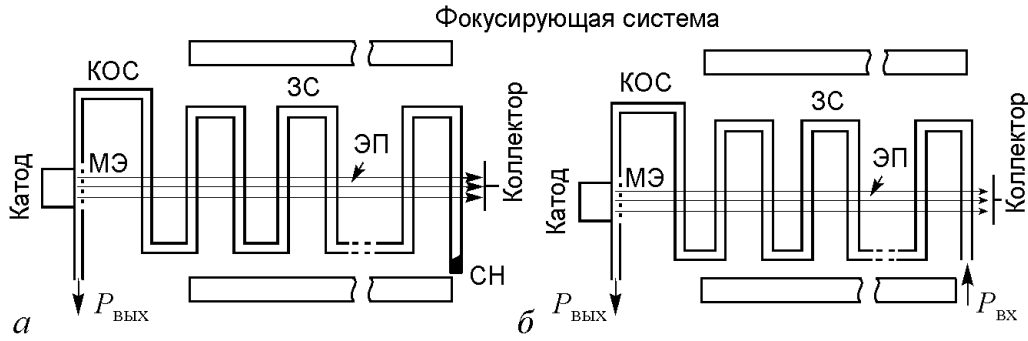


Рис. 15. Схема карсинотрода: *а* – генератор, *б* – усилитель (КОС – катодная обратная связь, МЭ – модулирующий электрод, ЗС – замедляющая система, ЭП – электронный поток, СН – согласованная нагрузка)

электромагнитное поле обратной волны с выхода замедляющей системы передается к электроду, обеспечивающему модуляцию эмиссии электронов с катода. Цепь катодной обратной связи (КОС) выполнена в виде отрезка замедляющей системы того же типа, который применяется в приборе. В этом случае сгустки электронов образуются непосредственно на катоде. Таким образом, вылетающий из электронной пушки модулированный электронный поток формируется фокусирующей системой и пролетает на коллектор через замедляющую систему. При влете в замедляющую систему электронные сгустки попадают в сильное ВЧ поле обратной волны, и при выполнении условий синхронизма они сразу начинают отдавать энергию полю, которое максимально у выхода замедляющей системы. Это обстоятельство приводит к увеличению КПД карсинотрода по сравнению с обычной ЛОВ. Таким образом, если в обычной ЛОВ КПД составляет 10–15 %, то в карсинотроде с АЭК можно получить 35 % при том же параметре усиления. В некоторых случаях, как было показано в [42,43], возможно более существенное увеличение КПД – до 70 % в режиме слабой автомодуляции колебаний при увеличении коэффициента обратной связи между выходом замедляющей системы и катодом и уменьшении статического поля в промежутке катод–сетка. Возможность значительного повышения КПД лампы обратной волны при введении автомодуляции подтвердило численное моделирование нелинейных процессов в приборе на основе метода крупных частиц [38–42]. Важным является тот факт, что посредством выбора КОС можно обеспечить широкую полосу электронной перестройки частоты. Для этого необходимо, чтобы цепь КОС обеспечивала модуляцию эмиссии на катоде в нужной фазе во всей полосе частот. Для конкретного варианта карсинотрода была показана возможность электронной перестройки частоты в полосе 50 % относительно центральной при сохранении постоянной выходной мощности [38–41].

В [42] на основе нестационарной нелинейной теории проведено моделирование процессов, происходящих в карсинотроде. Представлен один из способов вывода уравнения возбуждения поля в рамках нестационарной теории². Опуская подробности, приведем саму систему уравнений в безразмерных переменных.

Для численного моделирования карсинотрода на основе метода крупных частиц авторами было использовано уравнение возбуждения в виде

$$\frac{\partial F}{\partial \xi} - \frac{\partial F}{\partial \tau} = LI, \quad (11)$$

²Разные варианты вывода и применения такого уравнения в теории ЛОВ и ЛБВ можно найти в монографии [44].

где $F(\zeta, \tau)$, $I(\zeta, \tau)$ – безразмерные амплитуды поля и тока, которые медленно меняются как во времени $\tau = \frac{t-z/v_0}{l(1/|v_{гp}|+1/v_0)}$, так и по координате $\zeta = z/l$; $L = \varepsilon \frac{\omega_0 l}{v_0}$ – полная безразмерная длина; ε – параметр усиления на частоте ω_0 ($\varepsilon \approx C_0$); $v_{гp}(\omega_0) = (1/\frac{\partial h}{\partial \omega})|_{\omega=\omega_0}$ – групповая скорость волн на частоте ω_0 ; $h(\omega)$ – волновое число; v_0 , ω_0 – выбранные для нормировки значения постоянной составляющей скорости электронов и частоты; l – геометрическая длина замедляющей системы прибора. Уравнение возбуждения поля следует дополнить граничными и начальными условиями. Так на коллекторном конце лампы $F|_{\zeta=1} = 0$. Начальное условие $F(\zeta, \tau)|_{\tau=0} = F_0(\zeta)$ задается из линейной теории или в виде произвольной функции небольшой величины $F_0(\zeta) < 1$. Однако, в отличие от обычной ЛОВ, для карсинотрода учтена автомодуляция эмиссии на катоде за счет неравномерной расстановки крупных частиц-электронов, что находит отражение в уравнении возбуждения (11). Кроме того, в [42] был учтен фазовый сдвиг начальных значений фаз электронов, соответствующий стартовому синхронизму с полем, наличие запаздывания и параметров обратной связи. В результате была получена следующая система уравнений:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \zeta^2} = -L \left(1 + \frac{\varepsilon}{L} \frac{\partial u}{\partial \zeta} \right)^3 \operatorname{Re} F \exp(-ju), \quad (12)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \zeta} - \frac{\partial F}{\partial \tau} = LI \frac{1}{(1-\mu)^{3/2}}, \quad (13)$$

$$I = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} (1-\mu + \mu \cos u_0)^{3/2} \exp(ju) du_0, \quad (14)$$

где $u = u(u_0, \zeta) = \omega_0(t-z/v_0)$ – фаза частицы, I – нормированная первая гармоника тока, μ – коэффициент модуляции по отношению к максимальному полю на катоде.

Таким образом, нелинейные уравнения нестационарных процессов в карсинотроде (12)–(14) содержат три существенных параметра – параметр взаимодействия электронного потока с обратной волной, параметр обратной катодной связи, а также фазу обратной связи.

Ниже приведена приближенная нелинейная теория карсинотрода. Нелинейное взаимодействие электронов и поля описывается такими же уравнениями, как и в обычной ЛОВ. Отличие, как было указано ранее, состоит в том, что на входе в замедляющую систему задан ВЧ-ток, амплитуда и фаза которого определяются законом эмиссии электронов с катода и цепью обратной связи. В случае использования автоэмиссионного катода входной ток определяется законом Фаулера–Нордгейма.

В [38,40] рассмотрена модель без учета пространственного заряда. Исходные уравнения одномерной нелинейной теории ЛОВ были использованы в безразмерных переменных

$$-\frac{d^2 u_m}{d\zeta^2} = \left(1 + \varepsilon \frac{du_m}{d\zeta} \right)^3 \operatorname{Re} F \exp(-ju_m), \quad (15)$$

$$\frac{dF}{d\zeta} - j\xi F = I, \quad (16)$$

$$I = \frac{2}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \exp(ju_m), \quad (17)$$

где $u_m(\zeta) = \omega t_m - \omega(z/v_0)$ – фаза m -й частицы в системе координат, движущейся со скоростью v_0 ; $\zeta = \varepsilon z(\omega/v_0)$ – безразмерная координата; I, F – нормированные амплитуды 1-й гармоники ВЧ-тока пучка и поля системы, соответственно; $\xi = b + jd$, где b – параметр расстройки скорости электронов v_0 и фазовой скорости волны ЗС v_ϕ , d – параметр потерь; $\varepsilon \approx C_0$ – параметр усиления.

Разработанная в [38] аналитическая нелинейная теория исходит из того, что при достаточно большом $\mu = E_1(0)/E_{\max} > 0.5$ в замедляющую систему влетают узкие сгустки электронов. И вследствие этого авторы рассматривали движение этих сгустков в замедляющей системе без учета деформации, что дало возможность определить аналитическое решение нелинейных уравнений карсинотрода (15)–(17) и найти КПД. Таким образом, вместо движения M отдельных электронов рассматривалось движение одного недеформируемого сгустка, описываемого одним усредненным по электронам уравнением движения,

$$1 - \frac{1}{[1 + Cd\vartheta_0/d\zeta]^2} = \frac{C F^2(0) - |F(\zeta)|^2}{\alpha_0 2}, \quad (18)$$

где $\vartheta_0(\zeta)$ – среднее смещение по фазе под воздействием ВЧ-поля $F(\zeta)$. Уравнение (18) было использовано в аналитической нелинейной теории вместо M уравнений движения отдельных частиц (15).

Пренебрежение изменением формы сгустка также позволило переписать выражения для тока (17)

$$I = |I| \exp(j\psi), \quad |I| \equiv |I(0)| = \alpha_1, \quad \psi = \psi(0) + \vartheta_0(\zeta) \quad (19)$$

и свести комплексное уравнение возбуждения (16) к двум вещественным

$$\frac{d|F|}{d\zeta} = |I| \cos \varphi, \quad \frac{d\varphi}{d\zeta} = -\xi + \frac{d\psi}{d\zeta} - \frac{|I|}{|F|} \sin \varphi, \quad (20)$$

где φ – разность фаз между током и полем. С использованием полученной системы уравнений (18)–(20) были исследованы электронная перестройка частоты карсинотрода и КПД прибора. На рис. 16 приведены зависимости генерируемой длины волны λ , выходной мощности P и КПД η карсинотрода от приложенного ускоряющего напряжения U_e .

Для исследования усилительного режима и пусковых условий генераторного режима прибора были использованы уравнения одномерной линейной теории ЛОВ [40], соответствующие случаю бесконечно большого продольного фокусирующего магнитного поля,

$$\frac{dF}{d\zeta} - j\xi F = I, \quad \frac{d^2 I}{d\zeta^2} + \sigma^2 I = -jF, \quad (21)$$

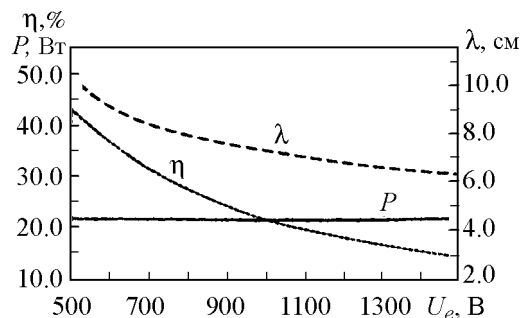


Рис. 16. Зависимости генерируемой длины волны, выходной мощности и КПД от ускоряющего напряжения [40]

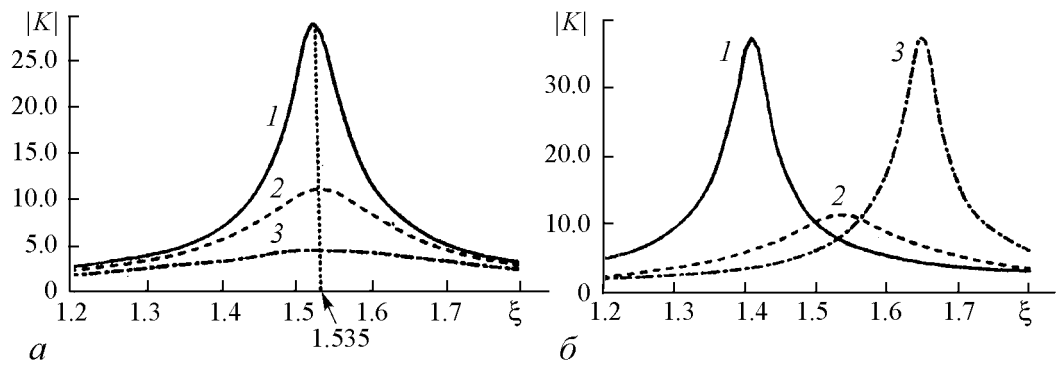


Рис. 17. Зависимость модуля коэффициента усиления $|K|$ от параметра расстройки ξ . *a* – при различных значениях модуля параметра КОС $|Y|$: 1 – 0, 2 – 0.1, 3 – 0.2; $\arg Y = 0$. *б* – при различных значениях фазы параметра КОС $\arg Y$: 1 – $(-90)^\circ$, 2 – $(0)^\circ$, 3 – $(+90)^\circ$; $|Y| = 0.1$, $L = 1.95$ [40]

где параметр пространственного заряда $\sigma^2 \approx 4QC_0 = \Gamma(\omega_{пл}/\omega C_0)^2$ определяется плазменной частотой $\omega_{пл}$, частотой ω , коэффициентом депрессии сил пространственного заряда Γ и параметром усиления $\varepsilon \approx C_0$.

Как уже было указано в карсинотроде в начале замедляющей системы имеется ВЧ-ток, обусловленный модуляцией эмиссии ВЧ-полем, передаваемым на катод по КОС. В этом случае граничные условия для усилителя принимают вид

$$F(L) \neq 0, \quad I(0) + YF(0) = 0, \quad dI/d\xi = 0, \quad (22)$$

где L – полная безразмерная длина системы; Y – параметр, определяемый КОС и эффективностью модуляции эмиссии на катоде. Рассмотрен случай малого пространственного заряда и отсутствия потерь в замедляющей системе.

На величину максимума коэффициента усиления $K = F(0)/F(L)$ влияет модуль параметра КОС $|Y|$ (рис. 17, *a*), а смещение этого максимума от частоты точного синхронизма электронов и волны замедляющей системы зависит от фазы Y (рис. 17, *б*). С увеличением модуля параметра КОС $|Y|$ полная безразмерная длина системы уменьшается, при этом снижается коэффициент усиления K , но полоса усиливаемых частот расширяется в 2–4 раза. Все эти эффекты сохраняются при изменении ускоряющего напряжения и, соответственно, частоты синхронизма. Поэтому в карсинотроде возможно регенеративное усиление с электронной перестройкой центральной частоты и расширенной по сравнению с обычной ЛОВ полосой усиливаемых частот.

Для режима генерации граничные условия примут вид

$$F(L) = 0, \quad I(0) + YF(0) = 0, \quad dI/d\xi = 0, \quad K = \infty. \quad (23)$$

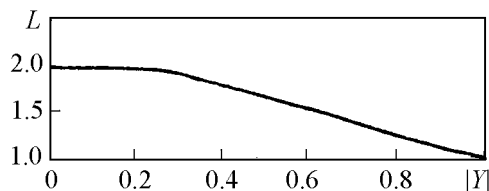


Рис. 18. Зависимость безразмерной длины системы L в пусковом режиме от модуля параметра КОС $|Y|$ при $\arg Y = 0$ [40]

Исследования пускового режима карсинотрода показали возможность уменьшения безразмерной длины системы в 2 раза по сравнению с обычной ЛОВ (рис. 18). При этом пусковой ток уменьшается в 8 раз (либо геометрическая длина замедляющей системы может быть уменьшена в 2 раза).

В упомянутых работах модель построена без учета влияния конечной величины фокусирующего магнитного поля на процессы взаимодействия электронов и поля обратной электромагнитной волны. Ниже приводятся результаты учета этого влияния на пусковые условия карсинотрода.

При решении задачи методом последовательных приближений исходные выражения для напряженности ВЧ электрического поля в линии передачи и сгруппированного тока использовались в виде

$$E_x(l) = E_x(0) e^{-j\beta_0 l} + \frac{\beta_0^2 K_0}{2} \int_0^l i(\bar{x}) e^{-j\beta_0(l-\bar{x})} d\bar{x}, \quad (24)$$

$$i(x) = \tilde{i}(0) e^{-j\beta_e x} + \beta_e I_0 \frac{\text{sh}(\beta_0 y_0)}{\text{sh}(\beta_0 d)} [j \text{sh}(\beta_0 y_0) \tilde{x}(x) + \text{ch}(\beta_0 y_0) \tilde{y}(x)], \quad (25)$$

$$\tilde{x}(x) = \int_0^x \frac{E_0}{2V_0} \text{sh}(\beta_0 y_0) e^{-j\beta_0 \xi} (x - \xi) e^{-j\beta_e(x-\xi)} d\xi, \quad (26)$$

$$\tilde{y}(x) = \int_0^x j \frac{E_0}{2V_0} \text{sh}(\beta_0 y_0) e^{-j\beta_0 \xi} \frac{\sin[\beta_c(x-\xi)]}{\beta_c} e^{-j\beta_e(x-\xi)} d\xi, \quad (27)$$

где $i(0) = Y E_x(0)$ – ток в начале системы в предположении, что возникает только его продольная составляющая; Y – проводимость на единицу длины.

С использованием уравнений (24)–(27) можно получить выражение для продольной составляющей напряженности электрического поля

$$E_x(l) = E_x(0) e^{-j\beta_0 l} \left[1 + (2\pi_0 N)^3 \left(\hat{F}(\Phi_0) + \hat{F}(\Phi_0, \phi_c) \right) + X \hat{F}_X(\Phi_0) \right], \quad (28)$$

где $X = \frac{\beta_0^2 K l}{2} Y$, а функции от относительного угла пролета $\Phi_0 = (\beta_e - \beta_0) l$ и циклотронного угла пролета $\phi_c = \beta_c l$ имеют вид

$$\hat{F}(\Phi_0) = \frac{2(1 - \cos \Phi_0) - \Phi_0 \sin \Phi_0}{\Phi_0^3} + j \frac{2 \sin \Phi_0 - \Phi_0 (\cos \Phi_0 + 1)}{\Phi_0^3}, \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \hat{F}(\Phi_0, \phi_c) = & \frac{4\Phi_0 \phi_c - (\Phi_0 + \phi_c)^2 \cos(\Phi_0 - \phi_c) + (\Phi_0 - \phi_c)^2 \cos(\Phi_0 + \phi_c)}{2\phi_c (\Phi_0^2 - \phi_c^2)^2} + \\ & + j \frac{-2\phi_c (\Phi_0^2 - \phi_c^2) + (\Phi_0 + \phi_c)^2 \sin(\Phi_0 - \phi_c) - (\Phi_0 - \phi_c)^2 \sin(\Phi_0 + \phi_c)}{2\phi_c (\Phi_0^2 - \phi_c^2)^2}, \quad (30) \end{aligned}$$

$$\hat{F}_X(\Phi_0) = \frac{\sin \Phi_0}{\Phi_0} + j \frac{\cos \Phi_0 - 1}{\Phi_0}. \quad (31)$$

Выражения для мощности взаимодействия примут вид

$$P_{eI} = \frac{1}{4} P_0 \xi_x^2 \bar{\varphi}_0 \left[\hat{F}(\Phi_0) + \hat{F}_X(\Phi_0) \right], \quad (32)$$

$$P_{eII} = \frac{1}{4} P_0 \xi_y^2 \bar{\varphi}_0 \hat{F}(\Phi_0, \phi_c). \quad (33)$$

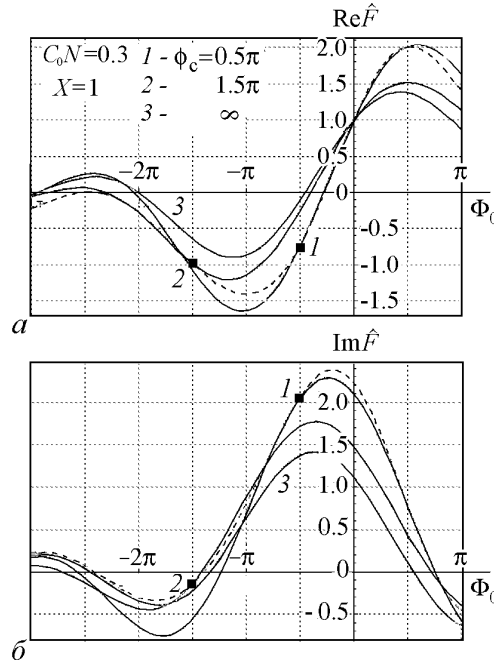


Рис. 19. Зависимость функции \hat{F} от относительного угла пролета

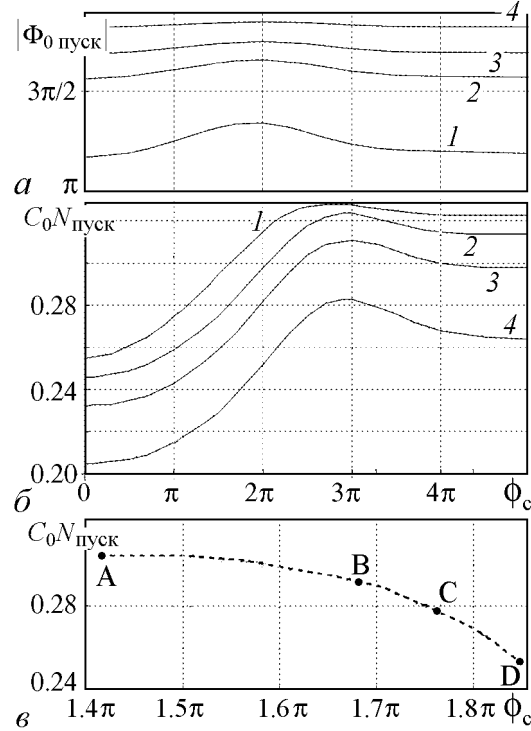


Рис. 20. *a* – пусковое значение относительного угла пролета $|\Phi_{0\text{пуск}}|$ и *б* – пусковые значения величины $C_0N_{\text{пуск}}$ как функции циклотронного угла пролета ϕ_c для различных значений X : 1 - 0.5, 2 - 3.3, 3 - 5.4, 4 - 10.5; *в* – зависимость $C_0N_{\text{пуск}}$ от ϕ_c при синхронизме с МСВ ($\phi_c = \Phi_{0\text{пуск}}$) для значений X в точках: А - 1.0, В - 3.0, С - 5.0, D - 10.0

где $\xi_x = E_0 l \operatorname{sh}(\beta_0 y_0)/V_0$, $\xi_y = E_0 l \operatorname{ch}(\beta_0 y_0)/V_0$, $\bar{\Phi}_0 = \beta_e l$ – абсолютный невозмущенный угол пролета электронов, $P_0 = I_0 V_0$. Из выражения (30) видно, что при выполнении условия $\phi_c = -\Phi_0$ (или $\beta_0 = \beta_e + \beta_c$) имеют место резонансные эффекты, связанные с точным синхронизмом электромагнитной волны с медленной циклотронной волной и обусловленные учетом конечности фокусирующего магнитного поля. Так как существуют области с отрицательной активной мощностью при синхронизме волны в линии с медленной циклотронной волной, то появляется возможность описать ранее неисследованный режим работы карсинотрода, используя двухволновое приближение. Тогда выражение (30) заметно упростится

$$\hat{F}(\Phi_0 = -\phi_c) = -\frac{2\phi_c^2 + \cos(2\phi_c) - 1}{8\phi_c^3} + j\frac{2\phi_c - \sin(2\phi_c)}{8\phi_c^3}. \quad (34)$$

На рис. 19 приведены зависимости действительной и мнимой части функции $\hat{F} = (2\pi C_0 N)^3 \times (\hat{F}(\Phi_0) + \hat{F}(\Phi_0, \phi_c)) + X\hat{F}_X(\Phi_0)$ от относительного угла пролета для $C_0 N = 0.3$ и $X = 1$. Пунктирная кривая соответствует двухволновому приближению, когда вместо (30) используется упрощенное выражение (34). Видно, что результаты, полученные в общем случае и в двухволновом приближении, хорошо согласуются между собой (соответствующие пересечения отмечены точками «1» и «2»).

Пусковые условия определяются равенством нулю электрического поля на конце системы $E(l) = 0$. На рис. 20 приведены зависимости пусковых значений от величины магнитного поля.

При большом постоянном магнитном поле (большие ϕ_c) пусковые значения относительного угла пролета Φ_0 и $C_0 N_{\text{пуск}}$ стремятся к конкретным значениям, и увеличение магнитного поля уже не влечет за собой их изменения. При $\phi_c > 4\pi$ результаты совпадают с результатами одномерной теории. Так, в случае бесконечно большого фокусирующего магнитного поля при $X = 0$ пусковые величины Φ_0 и $C_0 N_{\text{пуск}}$ стремятся к значениям $-\pi$ и 0.315, соответственно; при $X = 3$ $\Phi_0 \rightarrow -1.56\pi$ и $C_0 N_{\text{пуск}} \rightarrow 0.310$; при $X = 10$ $\Phi_0 \rightarrow -1.82\pi$ и $C_0 N_{\text{пуск}} \rightarrow 0.258$. При уменьшении ϕ_c зависимость пусковых величин от продольного магнитного поля становится заметной.

Диоды и триоды

Большое количество работ посвящено теоретическому и экспериментальному исследованию диодных и триодных структур с автоэмиссионными катодами [27, 38, 45–56]. В работах [45,46] приведены результаты компьютерного моделирования процессов генерации электромагнитных волн в диодных структурах. При моделировании исследовались структуры, содержащие автоэмиссионные катоды Спиндта. Были выполнены расчеты для треугольного и закругленного катодов. Расстояние от сетки до эмиттеров 1 мкм, толщина сетки 0.2 мкм. Радиус скругления каждого эмиттера достигал 500 Å, а плотность упаковки $6.4 \cdot 10^5$ острий/см². Если на управляющую сетку подать напряжение 50...100 В, то с тонкопленочных катодов при таких параметрах можно получить ток до 100 мА (плотность тока при этом 12 А/см²).

Анализ процессов генерации волн в диодных структурах показал эффективность использования схемы обычного монотрона [1]. Данная структура наиболее проста в микровакуумном исполнении. Более того, имеет реализуемые значения пусковых (128 мА для длины волны 3 см) и рабочих токов, а так же технологична в изготовлении. Согласно теоретическим расчетам, КПД = 18 % [45, 46].

С использованием матричного углеродного эмиссионного катода был создан вакуумный микротриод [47]. Триод был выбран в силу того, что несмотря на простую геометрию прибора определить его характеристики несложно, а его исследование может помочь при создании более сложных устройств. Здесь триод рассматривался как уменьшенная версия обычного триода, содержащего катод, управляющую сетку и анод. Все электроды были изготовлены в виде подвижных поликристаллических кремниевых пластин.

Диаметр УНТ варьировал от 20 до 50 нм. Длина нанотрубок связана со временем их роста, а соответствующая скорость роста при этом была равна 10 мкм/мин. Следует отметить, что именно высота УНТ определяет расстояние между катодом и управляющем электродом, а, следовательно, это влияет и на поле. По экспериментальным данным были получены анодно-сеточные характеристики (рис. 21). При работе прибора получена плотность тока более 16 А/см².

В работе [50] подробно описан процесс выращивания и формирования вертикально ориентированных углеродных нанотрубок. Диаметр выращенных УНТ составляет 50 нм, высота 5 мкм, расстояние 10 мкм, площадь всей матрицы 500×500 мкм². При этих значения ток менялся в диапазоне 2.5...3 мА.

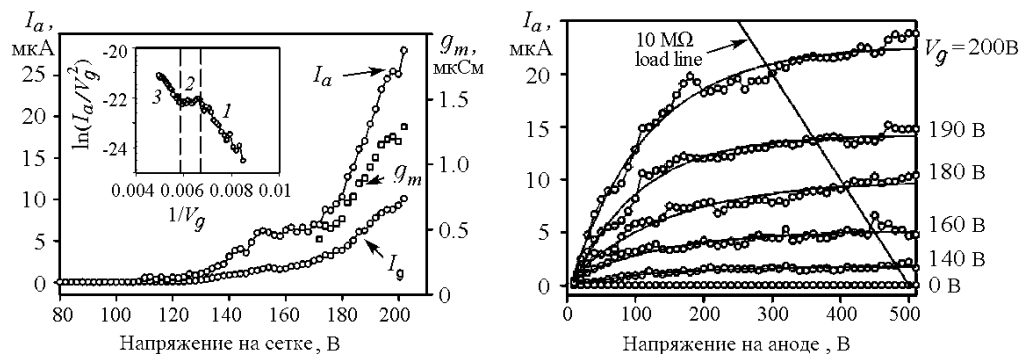


Рис. 21. Анодно-сеточные характеристики микротриода [47]

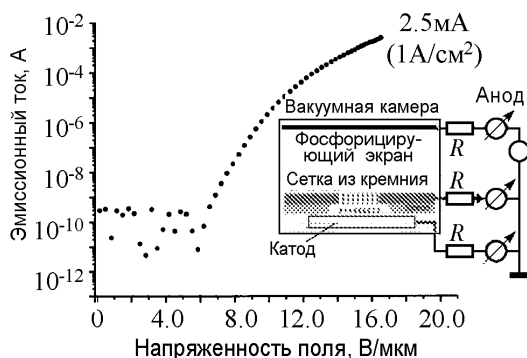


Рис. 22. Зависимость эмиссионного тока от напряженности электрического поля [5]

На рис. 22 приведена зависимость эмиссионного тока от приложенного напряжения, полученная экспериментально при исследовании триода. Большая плотность эмиссионного тока является результатом того, что массив УНТ обладал высокой степенью однородности и хорошим соотношением геометрических размеров отдельных эмиттеров. Также оказало свое влияние то, что до встраивания в прибор катод подвергся быстрому отжигу при температуре 850° .

Вместо заключения

Известно, что катоды с управляемой эмиссией находят применение не только в СВЧ-электронике (см., например, [3]). В частности, автоэмиссионные катоды используют и в рентгеновских трубках [57–65]. Компания «Oxford Instruments» производит катоды с углеродными волокнами для компактных рентгеновских источников (30 кВ , 16.4 см^3) [60]. Проводились исследования их эмиссионной стабильности, утечки тока и воспроизводимости рентгеновских трубок, а также углового отклонения для каждого из CNT катодов. Оказалось, что половина угла разлета электронов, эмитированных в однородное электрическое поле, составляет примерно 3° .

В [61] представлено описание конструкции и характеристик прототипа рентгеновской лампы с углеродными волокнами в качестве полевого эмиттера. Такая лампа представляет собой устройство длиной 40 мм и диаметром 16 мм.

Использование холодного катода обеспечивает стабильность рентгеновского источника для компьютерной томографии или цифровой томографической реконструкции [62]. Применение множественного источника позволяет упростить систему формирования и обработки изображения и обеспечивает возможность увеличения скорости обработки. Для получения пятна диаметром 250 $\mu\text{м}$ использовался электронный пучок, ток которого составил 25 мА при напряжении от 25 до 30 кВ.

Разработана многолучевая рентгеновская трубка на основе полевой эмиссии [63], которая работает при анодном напряжении 140 кВ.

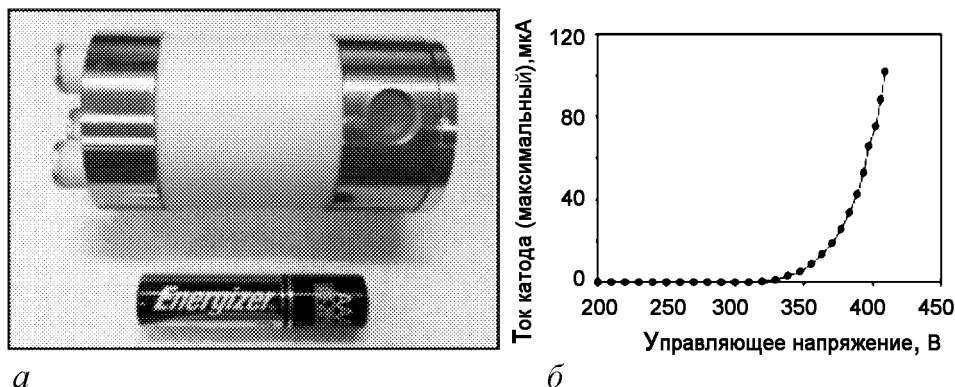


Рис. 23. *a* – рентгеновская лампа в сравнении с батареей «AAA»; *б* – ВАХ рентгеновской лампы [64, 65]

В [64,65] представлена рентгеновская лампа, в конструкцию которой входят катод, сетка, два фокусирующих электрода и анод (пентод). Наличие пары фокусирующих электродов приводит к тому, что диаметр фокального пятна становится меньше 0.3 мм при соответствующем значении напряжения. Лампа имеет довольно компактные размеры: длина 71 мм, диаметр 35 мм (рис. 23, *a*). Все металлические элементы данной рентгеновской лампы изготовлены из кобальт-никелевого сплава (ковар), в качестве изолирующего вещества выбрана окись алюминия. Эмиттер из УНТ встроен в катод из ковара методом трафаретной печати (screen printing method). Размер матрицы эмиттеров УНТ составляет около 20 мм², диаметр каждого эмиттера 0.2 мм, расстояние катод–сетка 0.2 мм. На рис. 23, *б* приведена ВАХ рентгеновской лампы. Как показали экспериментальные данные, для такого прибора характерна стабильность эмиссионного тока.

Продвижение в технологиях изготовления сделало возможным создание полевых эмиссионных дисплеев (Field emission display, FED) на основе матричных автоэмиссионных катодов [3, 66–77]. Полевые эмиссионные дисплеи имеют толщину панели, не превышающую нескольких миллиметров. В основном они предназначены для использования в устройствах отображения информации: плоские дисплеи для ПК, телевизионные приемники новых поколений, устройства отображения информации с высокой четкостью, бортовые автомобильные, авиационные и космические системы отображения информации.

На рис. 24 изображена упрощенная схема поперечного сечения полевого эмиссионного дисплея [67]. Автокатод состоит из матрицы полевых эмиттеров. Эмиттеры расположены на пересечении двух проводящих линий перпендикулярных друг к другу. Место их пересечения определяет пиксель – минимальный элемент изображения (элемент матрицы). Количество эмиттеров зависит от предъявляемых требований к разрешающей способности и яркости дисплея. Каждый пиксель содержит от 500 до 5000 острий. Для получения минимального элемента изображения (пикселя) необходимо, чтобы эмиссионный ток достиг значения в пределах от 0.1 до 10 мкА.

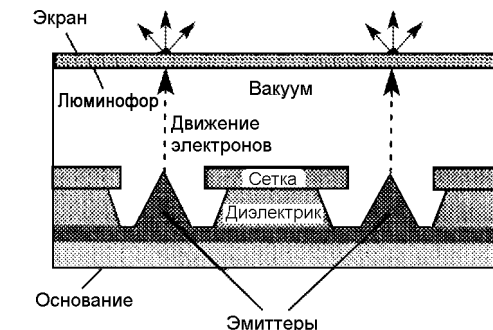


Рис. 24. Схема поперечного сечения полевого эмиссионного дисплея [67]

В работе [68] предложен полевой эмиссионный дисплей, размер которого составляет 4.5 дюйма (10.16 см), изготовленный на основе углеродных волокон. Напряженность электрического поля, при котором электроны начинали вылетать с катода, оказалась примерно равной 1 В/мкм. В том случае, когда величина напряженности поля достигла 3 В/мкм, удалось получить эмиссионный ток 1.5 мА; при этом плотность тока составила 90 мкА/см². При напряженности 3.7 В/мкм яркость такой панели составила 1800 кд/см².

В лаборатории вакуумной микроэлектроники Сибирского федерального университета был разработан, изготовлен и испытан плоский матричный автоэлектронный экран с катодами планарно-торцевого (лезвийного) типа, конструкция которого содержит высокоомный резистор на каждый эмитирующий элемент, что позволяет повысить яркость свечения экрана и его надежность [70, 71]. В последующие годы в этой лаборатории были созданы дисплеи, состоящие из матрицы микроминиатюрных катодных узлов острейного либо планарного типа и люминофорного экрана, размещенных в герметичном плоском корпусе при давлении не более 10⁻⁷ мм.рт.ст. Основные технические характеристики таких дисплеев: высокая разрешающая способность (до 100 лин/мм); высокое быстродействие (определяется параметрами применяемых люминофоров, время отклика катодов на управляющее напряжение порядка 10⁻¹² с); малые значения управляющего напряжения (менее 30 В); возможность воспроизведения стереоизображения и др.

В работах [73–76] представлены цветные полевые эмиссионные дисплеи с катодами Спиндта. Толщина катода и анода составляет 1.1 мм, а расстояние 0.6 мм. Таким образом, полная толщина панели оказывается равной 2.8 мм. Автокатод, управляющая сетка и фокусирующие электроды изготовлены из ниобия (Nb), разделитель диаметром 50 мкм – из стекловолокна, а сами эмиттеры – из молибдена (Mo). С целью предотвращения перекрестных помех в цвете на одной из сторон сетки нанесен фокусирующий слой. При исследовании дисплея на управляющий электрод было подано напряжение 40 В в то время, как катодное напряжение составило 25 В.

Следует также упомянуть, что единичные автоэмиссионные катоды нашли применение в электронно-зондовых системах: просвечивающих и растровых электронных микроскопах атомного разрешения, в системах электронной литографии и спектроскопии [78,79]. Создание класса приборов сверхвысокого разрешения стало возможно благодаря тому, что острейный автокатод является почти идеальным точечным источником электронов с очень узким энергетическим спектром и большой яркостью. Одним из последних достижений является реализация идеи электронной голографии [78]. В электронной голографии удается получить объемное изображение атомных объектов. Этот результат был получен благодаря тому, что острейный автоэмиттер обладает одновременно большой яркостью и высокой пространственной и временной когерентностью.

И заключительное замечание. Авторы отдают себе отчет в том, что наверняка не все работы, выполненные после 1996 года, вошли в обзор, поскольку многие из них нам просто не доступны по разным причинам.

Библиографический список

1. Трубецков Д.И., Рожнев А.Г., Соколов Д.В. Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике. Саратов: Гос УНЦ «Колледж», 1996.

2. *Татаренко Н.И., Кравченко В.Ф.* Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе. М.: Физматлит, 2006.
3. *Дьячков П.Н.* Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
4. *Spindt C.A., Brodie L., Humphrey L., Westerberg E.R.* Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones // J. of Appl. Physics. 1976. Vol. 47, № 12. P. 5248.
5. *Lockwood N.P., Cartwright K.L., d'Aubigny C.Y., et.al.* Development of field emission cathodes, electron gun and a slow wave structure for a terahertz travelling wave tube // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2010. P. 25.
6. *Шешин Е.П.* Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Физматкнига, 2001.
7. *Викулов И.* Американская программа по СВЧ вакуумной электронике HiFIVE // Электроника НТБ. 2008. № 5. С. 70.
8. *Викулов И.* Вакуумная СВЧ электроника. По материалам конференции IVEC 2009 // Электроника НТБ. 2010. № 4. С. 108.
9. *Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M., et al.* Operation of a low-voltage high-transconductance field emitter array TWT // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2008. P. 78.
10. *Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M., et al.* 100 W operation of a cold cathode TWT // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. Vol. 56, № 5. P. 896.
11. *Dayton J.A., Kory C.L., Mearini G.T.* Backward wave oscillator development at 300 and 650 GHz // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006. P. 423.
12. *Dayton J.A., Mearini G.T., Kory C.L., Bower C.A.* Fabrication of diamond-based 300 and 650 GHz BWOs // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2007. P. 1.
13. *Paoloni C., Carlo A.D., Brunetti F., et.al.* Design and Fabrication of a 1 THz Backward Wave Amplifier // Terahertz Science and Technology. 2011. Vol. 4, № 4. P. 149.
14. *Guzilov I., Konnov A., Kuzmich K., et.al.* Multi Beam S-band Klystron with the field emitter // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2009. P. 366.
15. *Краснова Г.М.* К двумерной линейной теории взаимодействия электронного потока с бегущей электромагнитной волной: учет влияния пространственного заряда в модели тонкого пучка // Изв. вузов «ПНД». 2010. Т. 18, № 5. С. 151.
16. *Krasnova G.M.* Interaction of space-charge waves in an electron beam with electromagnetic waves in a longitudinal magnetic field // Physics of Wave Phenomena. 2011. Vol. 19, № 4. P. 290.
17. *Kyhl R.L., Webster H.F.* Break of Hollow Cylindrical Electron Beams // IRE Trans. Electron Devices ED-3. 1956. № 4. P. 172.
18. *Cutler C.C.* Instability in hollow and strip electron beams // Jour. of Applied Physics. 1956. Vol. 27, № 9. P. 1028.
19. *Шевчик В.Н., Трубецков Д.И.* Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Советское радио, 1970.

20. *Shiffler D., Nation J.A., Kerslick G.S.* A high-power, TWT amplifier // IEEE Trans. on Pl. Sci. 1990. Vol. 18, № 3. P. 546.
21. *Imura H., Tsuida S., Takahasi M., et al.* Electron gun design for TWT using a field emitter array cathode // Electron Devices Meeting, 1997. IEDM '97. Technical Digest. P. 721.
22. *Whaley D.R., Gannon B.M., Smith C.R., Armstrong C.M., Spindt C.A.* Application of field emitter arrays to microwave power amplifiers // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2000.
23. *Whaley D.R., Gannon B.M., Smith C.R., Armstrong C.M., Spindt C.A.* Application of field emitter arrays to microwave power amplifiers // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. Vol. 28, № 3. P. 727.
24. *Whaley D.R., Gannon B.M., Heinen V.O., et al.* Experimental demonstration of an emission-gated TWT amplifier // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. Vol. 30, № 3. P. 998.
25. *Вукулов И.* Мощные СВЧ-модули. Гибрид вакуумной и твердотельной электроники // Электроника НТБ. 2007. № 7. С. 69
26. *Li X., Bai G., Ding M., et al.* Field emitter array electron gun for travelling wave tubes // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006. P. 507.
27. *Legagneux P., Le Sech N., Guiset P., et al.* Carbon nanotube based cathodes for microwave amplifiers (Keynote Presentation) // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2009. P. 80.
28. *Andre F., Ponard P., Rozier Y., et al.* TWT and X-Ray devices based on carbon nanotubes // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2010. P. 83.
29. *Гуринович А.Б., Кураев А.А., Синуцын А.К.* Исследование оптимальных вариантов ЛБВ с катодной модуляцией // 9-я Международная Крымская Конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрымМиКо 1999. С. 127.
30. *Gourinovitch A.B., Kurayev A.A., Popkova T.L., Sinitsyn A.K.* Optimized TWT with cathode modulation // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2000.
31. *Петросян А.И., Роговин В.И.* Расчет электронно-оптических систем ЛБВО с полевой эмиссией. // Прикладная физика. 2008. № 2. С. 86.
32. *Dayton J.A., Mearini G.T., Kory C.L., et al.* Assembly and preliminary testing of the prototype 650 GHz BWO // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2008. P. 394.
33. *Baik C.-W., Son Y.-M., Kim S.I., et al.* Microfabricated coupled-cavity backward-wave oscillator for terahertz imaging // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2008. P. 398.
34. *Jeon S.G., Shin Y.M., Kim J.I., et al.* Photonic Crystal Reflex Klystron using Field Emission Cathode // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2004. P. 120.
35. *Park G.-S., Jang K.H., Jeong S.G. et al.* Experimental investigation on high-order-mode photonic crystal reflex klystron using Spindt-type cathodes // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006. P. 189.

36. *Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sokolov D.V., Trubetskov D.I., Han S.T., Kim J.I., Park G.S.* Novel concepts of vacuum microelectronic microwave devices with field emitter cathode arrays // *Physics of Plasmas*. 2002. Vol. 9, № 9. P. 4020.
37. *Солнцев В.А.* Карсинотрод. Патент на изобретение № 2121194RU2121194С1.Б.И. № 30.27.10.98 г.
38. *Солнцев В.А.* Нелинейные явления в вакуумных микроэлектронных структурах // *Изв.вузов «ПНД»*. 1998. Т. 6, № 1. С. 54.
39. *Solntsev V.A.* Nonlinear analysis of a carcinotrode: a BWO with an automodulation of the cathode emission // *Jour. of Communications Technology and Electronics*. 2000. Vol. 45, № 1. P. S39.
40. *Солнцев В.А., Колтунов Р.П., Мелихов В.О.* Исследование характеристик лампы обратной волны с автомодулирующей эмиссии // *Радиотехника и электроника*. 2005. Т. 50, № 4. С. 483.
41. *Koltunov R., Melikhov V., Solntsev V.* Frequency properties of BWO with emission automodulation // *IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2005*. P. 203.
42. *Мелихов В.О., Назарова М.В., Солнцев В.А.* Моделирование нестационарных процессов в лампе обратной волны с автомодулирующей эмиссии (карсинотроде) // *РЭ*. 2009. Т. 54, № 12. С. 1481.
43. *Назарова М.В., Солнцев В.А., Мелихов В.О.* Группирование электронов в оптимальном режиме карсинотрода // *РЭ*. 2011. Т. 56, № 4. С. 511.
44. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по СВЧ электронике для физиков. М.: Физматлит, 2003. Т. 1.
45. *Кураев А.А., Лукашевич Д.В., Синицын А.К., Сокол В.А.* Генерация электромагнитных волн в диодных структурах с автоэмиссионными катодами // 9-я Международная Крымская Конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо 1999. С. 133.
46. *Kurayev A.A., Lukashevich D.V., Sinitsyn A.K.* Modeling of Diode Oscillators with Field-Emission Cathodes // *IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2000*.
47. *Bower C., Shalom D., Zhu W., et al.* Micromachined Vacuum Triode Using a Carbon Nanotube Cold Cathode // *IEEE Trans. Electron Devices* 2002. Vol. 49, № 8. P. 1478.
48. *Holloway B., Zhu M., Zhao X., et al.* Milliamper-Class Back-Gated Triode Field Emission Devices Based on Free-Standing Two-Dimensional Carbon Nanostructures // *IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006*. P. 517.
49. *Tyler T., Shenderova O., Ray M., et al.* Buried-line back-gated triode field emission devices // *IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006*. P. 519.
50. *Milne W.I., Teoa K.B., et al.* Aligned carbon nanotubes/fibers for applications in vacuum microwave amplifiers // *J. Vac. Sci. Technol.* 2006. Vol. 24, № 1. P. 345.
51. *Riccitelli R., Brunetti F., Petrolati E., et al.* Innovative design of nano-vacuum triode // *IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2007*. P. 1.

52. *Riccitelli R., Brunetti F., Paoloni C., et al.* Field-emission vacuum triode: THz waveguide solutions for the transmission lines // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2008. P. 382.
53. *Бенедик А.И.* Численное моделирование генератора на основе диода с автоэмиссионным катодом и фотонно-кристаллическим резонатором // Изв.вузов «ПНД». 2012. Т. 20, № 2. С. 63.
54. *Benedik A.I., Ryskin N.M., Han S.-T.* Simulation of the field emission diode oscillator with photonic crystal resonator // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2012. P. 379.
55. *Lei W., Zhang X., Wang B.* Field emission display with printable planar triode // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2012. P. 555.
56. *Zheng L., Zhu Z., Lei W., et al.* Enhanced field emission density current of a planar triode structure with double cathodes // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2012. P. 377.
57. *Terranova M.L., Orlanducci S., Tamburri E., et.al.* Cold cathodes assembled by microsized cnt systems // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2009. P. 415.
58. *Cheng Y., Zhou O.* Electron field emission from carbon nanotubes // C.R. Physique. 2003. № 4. P.1021.
59. *Modi A., Koratkar N., Lass E., et al.* Miniaturized gas ionization sensors using carbon nanotubes // Nature (London). 2003. № 424. P. 171.
60. *Espinosa R.J., McKenzie C., Munson M., et.al.* X-ray tubes incorporating CNT cathodes // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2004. P. 253.
61. *Maslennikov O.Y., Stanislavchik K.V., et.al.* Small-sized X-ray tube with the field electron emitter on the base of CNT // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006. P. 513.
62. *Schwoebel P., Holland C.E., Spindt C.A.* Field emission arrays for tomographic medical X-ray imaging // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006. P. 511.
63. *Guzilov I., Kuzmich K., Maslennikov O., et.al.* Multi beam X-ray tube with field emitter on the base of nanocrystalline graphite for computer tomography // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2009. P. 289.
64. *Jeong J.-W., Kim J.-W., Choi S., Kang J.-T., Song Y.-H.* The Vacuum-sealed micro-focus X-ray tube with CNT field emitters // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2012. P. 93.
65. *Kim J.-W., Kang J.-T., Jeong J.-W., Choi S., Kim D.-O. Song Y.-H.* The design and fabrication of CNT field emitters for a vacuum-sealed X-ray tube // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2012. P. 103.
66. *Kim J.M., Hong J.P., Kim J.W., Choi J.H., Park N.S., Kang J.H., Jang J.E., Ryu Y.S., Yang H.C., Gorfinkel B.I., Roussina E.V.* Reliability analysis of 4 in. field-emission display // Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. 1997. Vol. 15, № 2. P. 528.

67. *Temple D.* Recent progress in field emitter array development for high performance applications // *Materials Science and Engineering*. 1999. R24. P. 185.
68. *Choi W.B., Chung D.S., Kang J.H., et al.* Fully sealed, high-brightness carbon-nanotube field-emission display // *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 75, № 20. P. 3129.
69. *Горфинкель Б.И., Миронов Б.Н., Михайлова В.В., Финкельштейн С.Х., Хазанов А.А., Зеленукин А.В.* Патент на изобретение RU2174268C2.
70. <http://www.ire.krgtu.ru/subdivision/pc/data/tecnol.htm>
71. *Будзиаловский В.В., Засемков В.С.* Патент на изобретение RU2174266C2.
72. *Горфинкель Б.И., Абаньшин Н.П., Хоу В.Х., Крузос Д.А., Наар С., Кастальский А., Шохор С.* Патент на изобретение RU2217837C2.
73. *Itoh S. et al.* Development of field emission display // *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. 2004. Vol. 22, № 3. P. 1362.
74. *Sakurada K. et al.* Development of high resolution Spindt-type FED // *IDW06*, 2006. P. 1805.
75. *Itoh S. et al.* Development of field emission display (FEDs) // *J. of Vac. Sci. Technol. Microelectronics and Nanometer Structures*. 2006. № 6. P. 1821.
76. *Mimura H.* The status of field emission displays // *IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2007*. P. 1.
77. *Abanshin N.P., Yakunin A.N., Gorfinkel B.I.* Questions of development of durable flat graphic indicators on the basis of planar-edge auto-emissive structures // *Proc. of the 14th International Symposium: Advanced Display Technologies, Crimea, 2006*. P. 16.
78. *Фурсей Г.Н.* Автоэлектронная эмиссия // *Соросовский образовательный журнал*. 2000. № 11. С. 96.
79. *Jonge N., Lamy Y., Schoots K., Oosterkamp T.H.* High brightness electron beam from a multi-walled carbon nanotube // *Nature (London)*. 2002. № 420. P. 393.

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Поступила в редакцию 25.07.2012

ABOUT CURRENT STATE HIGH FREQUENCY VACUUM ELECTRONIC AND MICROELECTRONIC DEVICES WITH FIELD EMISSION

D. I. Trubetskov, G. M. Krasnova

Some results of researches and development of devices with field emission (TWT, BWO, carcinotrode, klystrons and X-ray tubes, field emission displays, etc.) have been briefly presented in the article. Lines of development of its theory have been designated. Also the vacuum microwave electronics programs offered in Europe and USA have been considered. They are directed on using new technologies in coping with the terahertz frequency range, reflecting the trend of recent years.

Keywords: Field emission array cathodes, TWT, BWO, klystron, carcinotrode.



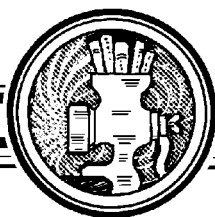
Трубецков Дмитрий Иванович – родился в Саратове (1938). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1960). Защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата (1965) и доктора физико-математических наук в СГУ (1978) в области радиофизики. Заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Президента РФ в области образования. Научный руководитель Лицея прикладных наук и факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов: вакуумная электроника и микроэлектроника сверхвысоких частот, теория колебаний и волн, нелинейная динамика, история науки. Автор более двадцати учебных пособий и монографий, а также более двухсот статей в периодической печати.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: dtrubetskov@yahoo.com



Краснова Галина Михайловна – родилась в 1989 году. В 2011 году окончила Саратовский государственный университет. Продолжает обучение в аспирантуре на кафедре электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Принимала участие в таких конференциях, как «Нелинейные дни в Саратове для молодых», «Волновые явления в неоднородных средах», «Физика и применение микроволн» и в XV Международной юбилейной зимней школе-семинаре по электронике СВЧ и радиофизике.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: krasnovagm@rambler.ru



Памяти наших учителей, выдающихся учёных XX века в области сверхвысокочастотной электроники, академика Н.Д. Десяткова, профессоров М.Б. Голанта и В.Н. Шевчика посвящают эту работу авторы

ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ВОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЫ ЖИВЫХ ТКАНЕЙ В БИМЕДИЦИНСКИХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ НАНОТЕХНОЛОГИЯХ МИЛЛИМЕТРОВОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНОВ

Н. И. Сеницын, В. А. Ёлкин, О. В. Бецкий

Статья содержит краткий обзор основных результатов по исследованию роли структуризации водосодержащей среды в живых тканях, являющихся объектами исследования в биомедицинских радиоэлектронных нанотехнологиях крайне высокочастотного и терагерцового диапазонов. Описаны экспериментальная установка и методика исследований структуризации водосодержащей среды под действием электромагнитного излучения. Приведены результаты экспериментальных исследований. Обсуждаются перспективы сочетанного воздействия на организм крайне высокочастотных и терагерцовых излучений со структурирующим эффектом природных минералов и искусственных материалов. Оцениваются перспективы диагностики и терапии с помощью предлагаемых технологий. Выдвигаются новые положения, относящиеся к объяснению природы механизма биосовместимости живых и неживых элементов. Делается один из первых шагов научного объяснения механизма кристаллотерапии.

Ключевые слова: Структуризация водосодержащей среды, невозмущающие радиоэлектронные методы, биомедицинские радиоэлектронные нанотехнологии, нанонеоднородные поверхности, биосовместимость, миллиметровые и терагерцовые излучения, ИК излучения.

Предисловие

В выпусках журнала «Прикладная нелинейная динамика», посвящённых 60-летию кафедры электроники, колебаний и волн, помещены в основном статьи тех исследователей и преподавателей, которые на протяжении многих лет сотрудничали с этой замечательной кафедрой или работали на ней. Всех авторов представляемой

статьи также связывают тесные многолетние научные и дружеские контакты с кафедрой. Н.И. Сеницын окончил эту кафедру вместе с нынешним заведующим кафедрой членом-корреспондентом РАН Д.И. Трубецковым и ныне академиком Беларуси А.А. Кураевым. Вместе они поступили в очную аспирантуру кафедры. Их научным руководителем был В.Н. Шевчик. Вместе они защитили кандидатские диссертации, вместе работали на кафедре многие годы. В.А. Ёлкин, активно способствующий развитию новых направлений на кафедре, также выпускник этой кафедры. О.В. Бецкий на протяжении более пяти десятков лет, хотя и работал в Москве и Фрязино, поддерживал плодотворные научные контакты с кафедрой. И, наконец, следует отметить, что некоторые из основополагающих вопросов, отражённых в представленной статье, относящихся к новому научному направлению современного естествознания, связанному с развитием биомедицинских радиоэлектронных нанотехнологий, впервые в мировой литературе докладывались на проводимых кафедрой знаменитых научных школах ещё в 1970-х годах одним из наших учителей профессором М.Б. Голантом. И уже в те годы многие из развиваемых идей, несмотря на сложность анализируемых вопросов, получили одобрение исследователей, присутствовавших на этих научных школах.

Введение

К одним из наиболее важных и перспективных направлений современного естествознания относится изучение особенностей взаимодействия электромагнитных волн с живыми системами и возможностей их практического использования в биологии и медицине. В этом направлении большой интерес представляют электромагнитные волны крайне высокочастотного (КВЧ) и терагерцового частотного (ТГЧ) диапазонов. КВЧ и ТГЧ электромагнитные излучения (ЭМИ) низкой интенсивности, занимающие особое место в шкале электромагнитных волн, благодаря ряду совершенно необычных и уникальных особенностей их взаимодействия с биологическими объектами, уже широко используются в настоящее время в медицине и биологии. Основоположниками данного направления, впервые в мире рождённого в нашей стране, явились академик Н.Д. Девятков, профессора М.Б. Голант и О.В. Бецкий [1–3]. Но, хотя КВЧ-медицина уже состоялась и продолжает развиваться, полной ясности в понимании природы её механизмов воздействия на биологические объекты нет вплоть до настоящего времени.

Среди открытых вопросов одним из особенно важных, основополагающих и принципиальных (как удалось в последние годы обнаружить авторам), является вопрос об особой роли структуризации водосодержащей среды в биосистемах, являющихся объектами исследования в современных биомедицинских радиоэлектронных технологиях. Как это ни парадоксально, вплоть до последнего времени данный вопрос, несмотря на всю его принципиальную значимость, не ставился на повестку дня. Мысль о том, структурирована или не структурирована водная среда в живых тканях организма при воздействии на них ЭМИ, просто не возникала, хотя исследования в этом плане в какой-то степени уже имели место. Например, в работах авторов [4] исследовались особенности поведения спектральных характеристик водной среды в различных физических и биологических объектах. Структуризация воды в живой клетке была исследована позже в работах Г. Линга [5], однако, без учёта воздействия на клетку ЭМИ. К сожалению, основные положения физической тео-

рии живой клетки, выдвинутые Г. Лингом и связанные со структурой воды в живой клетке, не принимались научной общественностью. Это и понятно, так как для исследования влияния структуризации водной среды в живых системах на её взаимодействие с ЭМИ, прежде всего, должны были быть разработаны специальные, невозмущающие, радиоэлектронные методы анализа состояния структуры водной среды и создана соответствующая высокочувствительная радиоэлектронная аппаратура. Эта задача, уже сама по себе, являлась самостоятельной и достаточно сложной проблемой в радиофизике как в научном, так и в техническом плане.

В ходе проведения исследований электродинамических характеристик тонких слоев воды, ограниченных нерастворимыми материалами (пластины из Ge, Si и из других полупроводниковых и химически устойчивых проводящих материалов), было сделано важное открытие явления генерации электрической энергии тонким водосодержащим слоем [6]. Этот эффект связан с образованием в водной среде цепных конструкций из молекул воды от контакта водной среды с нанонеоднородностями на поверхности внешнего нерастворимого в воде материала.

В процессе построения физической модели этого эффекта и в последующих экспериментах было обнаружено явление структуризации водосодержащей среды, в том числе и в биосистемах. Важно отметить, что при воздействии ЭМИ на эти предварительно структурированные среды обнаруживается усиление эффекта структуризации. Подчеркнем, что структуризация водной среды возникает при её контакте с нанонеоднородной поверхностью нерастворимых в воде внешних материалов [7–10].

Таким образом, в результате экспериментов обнаружена определяющая роль структуризации водной среды в появлении особенностей при взаимодействии ЭМИ с водной средой. В частности, увеличивается глубина проникновения излучения КВЧ и ТГЧ диапазонов в биоткани. Обнаруженные особенности лежат в основе развития и совершенствования современных биомедицинских радиоэлектронных технологий, обеспечении их высокой эффективности и надёжности.

Далее установлено, что именно структуризация водосодержащих слоёв, которая происходит за счёт построения цепных конструкций из молекул воды и которая начинается от границы контакта водных слоёв с нанонеоднородной поверхностью минералов или искусственных материалов, лежит в основе используемых с древних времён методов кристаллотерапии или, как часто её сейчас называют, литотерапии.

По результатам первых лабораторных экспериментов, проведённых в клинических условиях, намечены реальные пути повышения эффективности биомедицинских радиоэлектронных технологий КВЧ и ТГЧ диапазонов за счёт их совместного использования с подходами кристаллотерапии.

Выдвигаются принципиально новые положения в объяснении механизма био-совместимости живых и неживых элементов.

1. Приборы и техника экспериментов

В ходе экспериментов были впервые получены результаты фундаментального плана, свидетельствующие об особой роли системы «миллиметровые волны – водная среда» в природе [4]. Было обнаружено явление резонансного взаимодействия ЭМИ с водой, водосодержащими средами и биологическими объектами. Впервые явления, связанные со структуризацией водосодержащей среды в живых структурах и особой

ролью структуризации водной среды при её взаимодействии с низкоинтенсивными излучениями КВЧ и ТГЧ диапазонов, были обнаружены и стали исследоваться авторами в 2003 году. С этого момента началось изучение авторами особенностей структуризации водосодержащих сред в физических и живых объектах, в том числе и в зависимости от контакта водных сред в исследуемых структурах с внешними факторами. Диагностика структуризации водосодержащей среды и многие особенности такой структуризации экспериментально исследовались с использованием разработанной оригинальной методики на созданном аппаратном радиоэлектронном комплексе по измерению прозрачности водосодержащей среды в ИК диапазоне [7,8]. И только затем, с учётом обнаруженного и измеренного уровня структуризации водосодержащей среды, проводилось дальнейшее изучение особенностей взаимодействия водосодержащих сред и живых структур с ЭМИ. При этом использовались разработанные в [8–10] методика измерений и аппаратура. Естественно, что наряду с рассмотрением вопросов фундаментального характера исследования проводились и с целью выявления возможностей создания новой высокоэффективной КВЧ терапевтической и диагностической аппаратуры. В значительной степени данные выполненных экспериментов изложены в работах [7–12] и других работах авторов.

Исследования привели к неожиданным и принципиально новым результатам. Впервые экспериментально было установлено, что особенности взаимодействия водосодержащей среды с ЭМИ, в отличие только от её теплового нагрева, проявляются лишь при структуризации водной среды в исследуемых системах внешними факторами и на определённых частотах, зависящих от строения конкретного внешнего материала, структурирующего водную среду. Поэтому ниже речь пойдет о некоторых из полученных в этом направлении результатах, а также выводах и рекомендациях, которые можно из них сделать.

Разработанная методика измерений и созданная экспериментальная установка позволяют получать информацию о степени структуризации водосодержащего слоя от контакта с различными материалами путём приёма и обработки проходящего через водный слой ИК излучения малой интенсивности, при котором отсутствует нагревание исследуемого водосодержащего слоя.

Наиболее важными рабочими блоками установки (рис. 1) являются: *широкополосный ИК излучатель; высокочувствительное приёмное устройство, включающее ИК оптический блок и блок обработки и управления ИК радиометром, КВЧ генератор и чашку контейнера для размещения в ней исследуемого слоя воды и структурирующих материалов. Важно подчеркнуть, что широкополосный ИК излучатель имеет трёхслойную теплоизоляцию, исключаящую его теплообмен с исследуемым водосодержащим слоем.*

При проведении всех экспериментов строго выполнялись следующие условия:

- использовались слои воды толщиной $h = 1$ мм,
- мощность ИК луча составляла 25 мВт в полосе пропускания фильтра 1.5...23 мкн, выполненного из пластины кремния толщиной 0.5 мм,
- квазиоптические модули позволяли работать в диапазоне 32...650 ГГц,
- падающая мощность КВЧ излучения лежала в пределах 5...10 мВт,
- флуктуационная чувствительность достигала 0.005 К,
- диаметр ИК луча в области исследуемого слоя воды составлял 17 мм,
- постоянная времени накопления ИК радиометра не превышала 5 с,

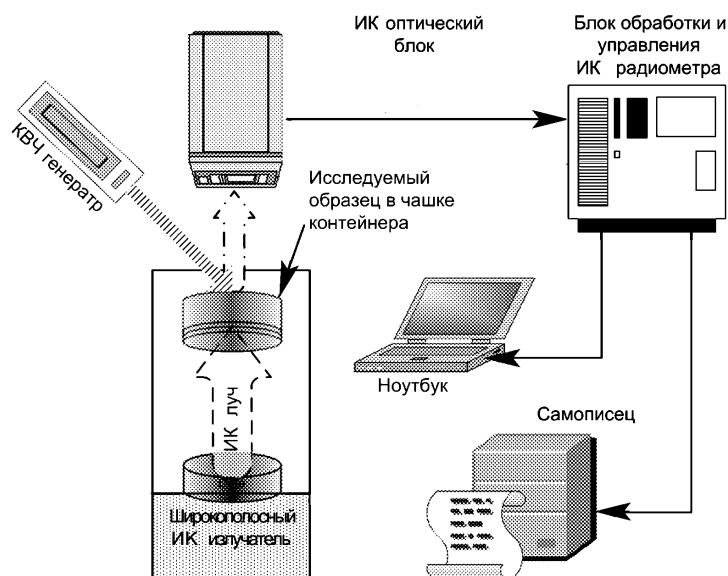


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования ИК прозрачности водосодержащих сред в зависимости от контакта с различными материалами и КВЧ воздействия

- шаг времени при переходе с одной частоты КВЧ излучения на другую составлял 5 мин,
- шаг перестройки частоты КВЧ излучателя равнялся 1 ГГц,
- общая площадь поверхности воды в контейнере достигала 19 см^2 ,
- измерения проводились при температуре окружающей среды 22°C .

2. Методика измерений и результаты экспериментов

Развитый метод экспериментальных исследований структуризации водной среды и особенностей её взаимодействия с ЭМИ основывается на том, что структура водосодержащей среды чувствительна к физическим полям контактирующих с ней материалов, к различным воздействиям и откликается на них рождением и распадом разнообразных форм ассоциатов. В данном случае за счёт процессов формирования связей водосодержащей среды с элементами нанонеоднородных поверхностей материалов, контактирующих с водой, происходит структуризация водного слоя, а следовательно, и изменение его прозрачности в ИК диапазоне [7–10]. То есть, увеличение прозрачности слоя воды в ИК диапазоне при контакте водного слоя с внешним материалом свидетельствует о росте степени структуризации водного слоя [8–10]. Это изменение структуры водной среды от её контакта с различными материалами и от воздействия КВЧ излучения обнаруживается на созданной установке.

Проведённые эксперименты по исследованию структуризации тонких слоёв воды и влияния структуризации тонких слоёв воды на особенности их взаимодействия с ЭМИ выполнялись по следующей схеме.

До начала воздействия ЭМИ на водные слои использовались гарантированно неструктурированные слои воды. При этом полезно обратить внимание на такой момент. Казалось бы, что до контакта воды с тем или иным используемым в эксперименте материалом вода и является неструктурированной. Но, как показали проведённые исследования [8], этот вопрос уже сам по себе не такой простой. Воду может

структурировать материал сосуда, в котором она находится до или во время эксперимента. Однако было показано, что стекло приводит к незначительной структуризации воды, поэтому в эксперименте исследовался слой бидистиллированной воды, помещенной в чашке контейнера, выполненной из стекла. Затем на установке ИК радиометром измерялись интенсивность $I_{\text{соб}}$ (уровень собственного ИК излучения водного слоя) и интенсивность излучения $I_{\text{нач}}$ (уровень ИК излучения, прошедшего через неструктурированный в чашке контейнера водный слой), которая полагалась начальным уровнем прозрачности неструктурированного водного слоя. После этого обеспечивался контакт тонкого слоя воды (толщиной порядка 1 мм) с нанонеоднородной поверхностью внешнего структурирующего воду материала. Начиналась структуризация водного слоя, приводящая к увеличению его прозрачности. По завершении процесса структуризации водного слоя ИК радиометром фиксировалась интенсивность излучения I_0 (уровень ИК излучения, прошедшего структурированный водный слой).

Наряду с дистиллированной водой подобные исследования проводились также и с различными водосодержащими средами. Но многие водосодержащие среды уже и без их контакта с внешними материалами оказывались структурированными за счёт присутствия в их объёме нанонеоднородных структурирующих включений [12]. Поэтому у них уровень излучения $I_{\text{нач}}$ характеризует уже структурированную водосодержащую среду, а уровень излучения I_0 характеризует уровень её структуризации под действием внешних структуризаторов. В дальнейшем, когда на подобные водные слои или водосодержащие среды подавалось ЭМИ, исследовалось влияние уровня структуризации воды и различных водосодержащих сред на особенности их взаимодействия с ЭМИ.

В качестве внешних факторов структуризации воды для эксперимента отбирались некоторые наиболее интересные и распространённые минералы и синтетические материалы – слюда, яшма, янтарь, гранат, хризопраз, шунгит, кварц, полиэтиленовые, фторопластовые и целлофановые плёнки, кремний, углеродные нанотрубки и ряд других материалов [8–12].

Экспериментально установлено, что многие из исследованных материалов приводят к значительной структуризации тонкого водного слоя. Причём для некоторых материалов коэффициент структуризации $k = (I_0 - I_{\text{соб}})/(I_{\text{нач}} - I_{\text{соб}})$, связанный с увеличением прозрачности слоя воды в ИК диапазоне, достигает 5...7 [8]. Этот факт, уже сам по себе, является не только неожиданным, но и практически чрезвычайно важным.

Эксперименты, проведённые с неструктурированными слоями воды, показали, что при взаимодействии тонких неструктурированных слоёв воды с ЭМИ никаких особенностей в этом взаимодействии не наблюдается. При воздействии ЭМИ на водный неструктурированный слой не происходит изменения прозрачности слоя воды в ИК диапазоне. Сделанное наблюдение представляется особенно важным и принципиальным для биомедицинских радиоэлектронных технологий КВЧ и ТГЧ диапазонов. Из него следует, что при изучении особенностей взаимодействия водосодержащих сред с ЭМИ и практическом использовании этого взаимодействия величина уровня структуризации водосодержащей среды внешними или внутренними факторами представляется исключительно важной и её надо учитывать.

В дальнейшем при исследовании особенностей взаимодействия уже структурированных водных слоёв с ЭМИ эти ранее неструктурированные водные слои перед

проведением данных экспериментов структурировались. Для структуризации водного слоя поверхность исследуемого водного слоя приводилась в контакт с исследуемым нерастворимым в воде материалом и выдерживалась в таком состоянии некоторое время, необходимое для полного завершения процесса структуризации воды с использованием методики, развитой в [8]. Обычно оно не превышало 60 мин. Затем ИК радиометром измерялась интенсивность I_0 проходящего через структурированный водный слой ИК излучения без КВЧ воздействия на слой. Затем измерялась I интенсивность ИК излучения, проходящего через этот водный слой, но при КВЧ воздействии на слой. Частота КВЧ воздействия изменялась в диапазоне 35...250 ГГц и не превышала 1 мВт/см². Значения I и I_0 регистрировались в моменты времени, когда структуризация водного слоя от его контакта с исследуемым материалом полностью завершалась. На рис. 2 для примера представлена зависимость интенсивности проходящего ИК луча через водный слой, структурированный поверхностью пластины граната тёмно-коричневого (толщиной 0.8 мм), от падающего на водный слой КВЧ излучения в диапазоне частот 53...78 ГГц [10]. Шкала и нормировка выбраны на рис. 2 таким образом, что при отсутствии КВЧ воздействия или отсутствии каких-либо последствий его взаимодействия с водным слоем (то есть $I = I_0$) относительная интенсивность будет равна 50 от. ед. Из рисунка следует, что КВЧ воздействие приводит к заметному увеличению прозрачности, а потому и дополнительной структуризации водного слоя во многих, но на вполне определённых участках диапазона частот 53...78 ГГц. Наиболее заметным оно оказывается вблизи частот 58...61, 63, 65, 67, 72, 76 ГГц.

На рис. 3 представлена аналогичная зависимость интенсивности проходящего ИК луча через водный слой, но, в отличие от рис. 2, структурированный поверхностью кремния (толщиной 1 мм) [10]. Из рисунка видно, что КВЧ воздействие приво-

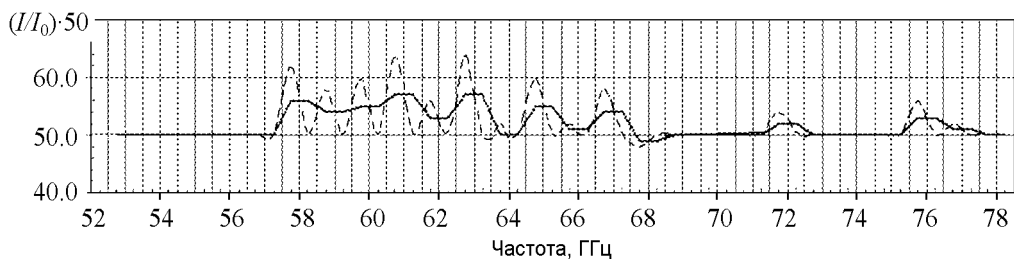


Рис. 2. Зависимость интенсивности проходящего структурированный водный слой ИК луча от падающего КВЧ излучения в диапазоне частот 53...78 ГГц. Верхняя граница слоя – кристаллы граната тёмно-коричневого. Окружающая температура 19°C

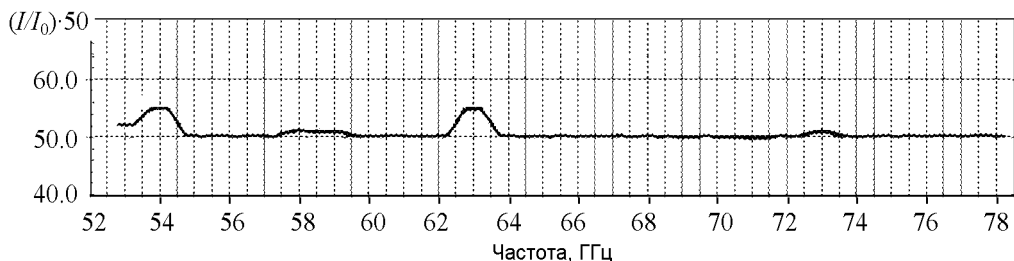


Рис. 3. Зависимость интенсивности проходящего структурированный водный слой ИК луча от падающего КВЧ излучения в диапазоне частот 53...78 ГГц. Верхняя граница слоя – пластина кремния. Окружающая температура 19°C

дит к увеличению прозрачности и дополнительной структуризации водного слоя от действия кремня, но уже на других участках диапазона частот 53...78 ГГц в отличие от действия граната тёмно-коричневого. Интересно отметить, что кремень широко используется в народной медицине Востока.

Как уже выше отмечалось в работе [8] экспериментально установлено, что увеличение интенсивности проходящего через водный слой ИК излучения свидетельствует о возрастании степени структуризации водного слоя. Поэтому полученные результаты показывают, что воздействие ЭМИ на структурированный водный слой приводит к его дополнительной структуризации на некоторых вполне определённых участках исследуемого диапазона частот. И эти участки определяются наноструктурой поверхности материала, контактирующего с водным слоем и структурирующего его [8–10].

Проведённые в диапазоне частот 35...250 ГГц эксперименты со слоями воды, структурированными названными выше и другими минералами и синтетическими материалами, показали, что многие из исследованных материалов приводят к значительной структуризации тонкого водного слоя. А при взаимодействии этого уже структурированного водного слоя с ЭМИ уровень его структуризации заметно возрастает лишь только на вполне определённых для каждого минерала или материала участках частот. Причём для каждого структурирующего материала характерна своя степень увеличения структуризации водного слоя при его взаимодействии с ЭМИ. То есть каждый минерал или искусственный материал имеет свою «индивидуальную» частотную и амплитудную картину взаимодействия структурированного им водного слоя с ЭМИ. Следует отметить стопроцентную повторяемость результатов экспериментов и то, что эта «индивидуальность» полностью определяется структурой минерала и поэтому оказывается одинаковой для одних и тех же минералов, взятых даже из разных месторождений. Так, к примеру, экспериментально полученная картина структуризации и взаимодействия с ЭМИ структурированного водного слоя образцами янтаря коричневого (рис. 4, а) и янтаря белого (рис. 4, б) взятыми

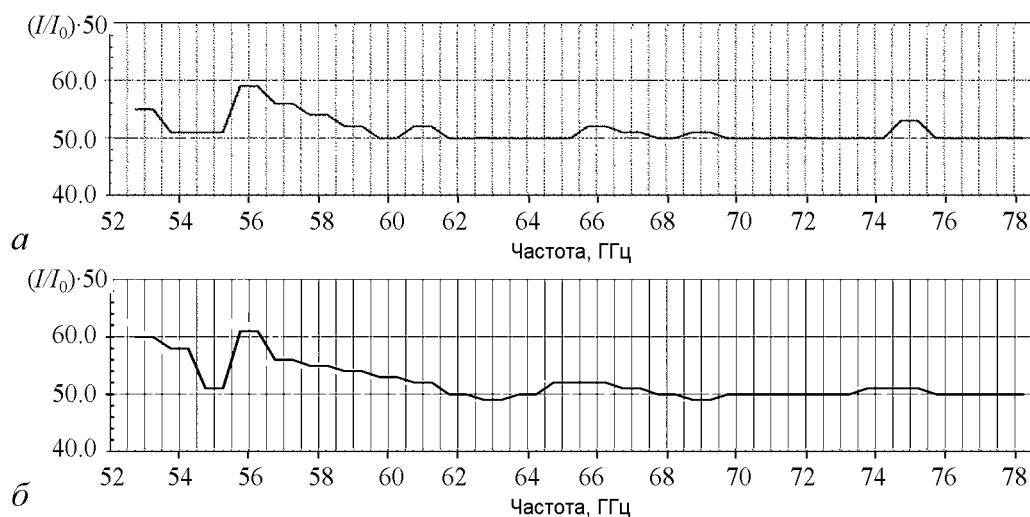


Рис. 4. Зависимость интенсивности проходящего структурированный водный слой ИК луча от падающего КВЧ излучения в диапазоне частот 53...78 ГГц. Верхняя граница слоя – пластины янтаря коричневого (а) и янтаря белого (б) имели толщину 0.5 мм. Окружающая температура составляла 20°С

из месторождений, расположенных на противоположных сторонах нашей планеты (из месторождений Прибалтики и Бразилии), практически не отличаются одна от другой [10].

Аналогичные исследования проведены авторами для целого ряда искусственно созданных материалов [10–12]. Как и для натуральных минералов, также была обнаружена «индивидуальность» амплитудно-частотной картины по структуризации тонких слоёв воды и взаимодействию их с ЭМИ для искусственных синтетических материалов, созданных по довольно близким технологиям. Некоторые отклонения в их действии на структуризацию водной среды и её взаимодействие с ЭМИ, экспериментально обнаруженные и отмеченные авторами, связаны с отклонениями в технологиях их производства на различных предприятиях [10,12].

Наряду со сказанным следует особо подчеркнуть следующее. Как показывают результаты многолетних работ в области кристаллотерапии, каждый из исследованных минералов (см. рис. 2–4) при использовании в лечебных целях позволяет способствовать лечению только вполне определённого круга конкретных заболеваний [13,14].

Авторами впервые был также предсказан и экспериментально обнаружен эффект структуризации воды α -аминокислотами разных классов, являющимися наноструктурными субстратами синтеза белков [15,16]. Полученные результаты имеют принципиальное значение как в научном, так и в практическом плане. Процесс структуризации водного слоя состоит в том, что молекулы аминокислоты фенилаланина D-Фен, используемые в эксперименте, у поверхности водного слоя выстраиваются в чёткую упорядоченную структуру. Каждая молекула является электрическим диполем, отрицательный полюс которого в структуре направлен вглубь водного слоя, а ароматическое кольцо D-Фен находится у поверхности раздела вода–воздух. Нити и грозди из молекул воды направлены преимущественно ортогонально границе раздела вода–воздух [15,16]. Интенсивность прямого прохождения ИК луча сквозь таким образом структурированный молекулами D-Фен слой воды зависит от степени структуризации этого слоя.

На рис. 5 приведены результаты эксперимента с водными растворами D-Фен различной концентрации, начиная от минимальной концентрации в точке 1 и завершая максимальной концентрацией в точке 5 с постоянным шагом 0.11 моль/л. Через слой воды толщиной в 1 мм проходит при вертикальном падении ИК луч с плотностью мощности 1 мВт/см². Прошедшее слой воды излучение принимается радиометром. В точке 1 в слой дистиллированной воды помещается капля раствора D-Фен. С этого момента начинается процесс структуризации, проявляющийся ростом прозрачности слоя воды и достижением насыщения через 20 мин. В точке 2 снова добавляется капля раствора D-Фен того же объёма. Сразу же начинается второй цикл структуризации, отражённый на графике ростом прозрачности слоя до насыщения через 15 мин. Таких циклов на

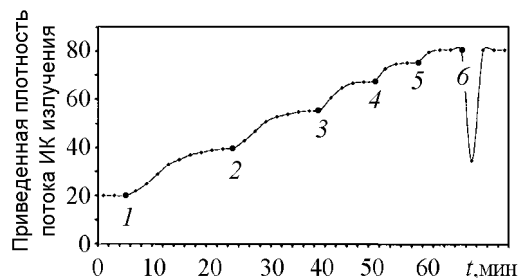


Рис. 5. Временная зависимость ИК прозрачности слоя воды (толщиной 1 мм) от воздействия аминокислотой D-Фен при ступенчато нарастающей концентрации

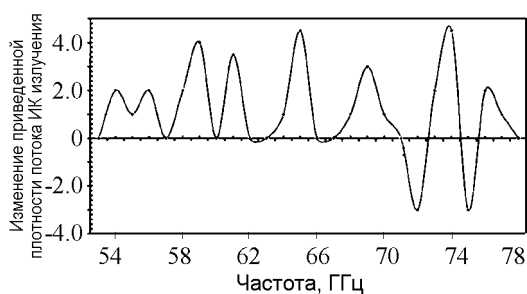


Рис. 6. Наиболее характерный ИК/КВЧ спектр водного слоя, структурированного молекулами D-Фен

выполненные по методу, описанному в [8]. Именно по этому методу проводились приведённые выше оценки коэффициента структуризации водного слоя различными минералами и материалами.

В точке 6 в слой опускается капля чистой воды. Это сразу приводит к разрушению поверхностного структурированного слоя воды и резкому падению прозрачности слоя, но кратковременному. Степень структуризации слоя, а следовательно, и прозрачность, полностью восстанавливается всего за 2 мин.

Изменение прозрачности плёнки водного раствора аминокислоты D-Фен с концентрацией 0.11 моль/л в зависимости от частоты падающего КВЧ излучения с постоянной плотностью мощности 1 мВт/см² приведено на рис. 6. Как показали многочисленные аналогичные измерения, кривая демонстрирует характерные существенные изменения ИК/КВЧ спектра водного слоя [15,16]. Результаты позволяют подойти к построению моделей структуризации воды органическими соединениями, определить величину, скорость структуризации и время жизни структурированных водных слоёв от действия разных аминокислот. А также определить, и это, видимо, один из принципиально и наиболее важных моментов в развиваемых авторами исследованиях, на каких вполне определённых участках КВЧ и ТГЧ диапазонов заметно возрастает структуризация водного слоя, а следовательно, и эффективность его взаимодействия с ЭМИ от действия разных аминокислот. Поэтому полученные результаты с учётом изложенного выше позволяют подойти к объяснению механизмов биохимических процессов в живых структурах. Намечаются пути к построению принципиально новых высокоэффективных методов диагностики и терапии КВЧ и ТГЧ медицины.

К сказанному можно добавить следующее. Во всех рассмотренных экспериментальных исследованиях речь шла о структуризации водных слоёв от их контакта с нерастворимыми в воде материалами, когда в водном слое отсутствовали молекулы структурирующего воду материала. Что же касается действия на водные слои растворимых в воде аминокислот, то в этом случае молекулы за счёт межмолекулярных взаимодействий могут образовывать новые структуры со своей архитектурой. Поэтому эти вопросы, в определённой степени, входят в область нового научного направления – супрамолекулярная химия, широко развиваемого в настоящее время в России, Франции, США, Нидерландах, Испании, Италии, Японии. В России эти работы казанских химиков, получивших широкое международное признание, возглавляются академиком А.И. Коноваловым. В наших работах, как было отмечено, действие аминокислот на водную среду оценивается с позиции приобретения водной

графике 5 шт. Последний цикл заканчивается насыщением на 64 мин. наблюдения. При дальнейшем увеличении концентрации раствора D-Фен процессы образования мицелл из молекул D-Фен с гидрофобным ядром начинают препятствовать дальнейшему структурированию воды. Коэффициент структуризации k , связанный с увеличением прозрачности слоя воды, достигает величины 1.7 как показывают расчёты,

средой принципиально новых, ранее не обнаруженных частотных свойств, прежде всего в КВЧ и ТГЧ диапазонах. Естественно, что оба эти направления (развиваемое в работах авторов и супрамолекулярная химия) близки и могут способствовать развитию друг друга.

Эксперименты аналогичного плана впервые были выполнены также и для водосодержащих сред в живых структурах: свободных и находящихся в контакте с различными минералами [12] или материалами. В качестве живых структур в эксперименте использовались лоскуты живой кожи человека. На рис. 7 приведены полученные зависимости интенсивности ИК луча, проходящего слой живой кожи человека толщиной 100 мкм, смоченной физиологическим раствором. Результаты, приведенные на рис. 7, а, относятся к слою кожи, не находящемуся в контакте с внешними материалами; результаты, приведенные на рис. 7, б, в, относятся к этому же слою живой кожи, но находящемуся в контакте со смоченными физиологическим раствором фторопластовой плёнкой или пластиной слюды, соответственно.

Следует особо отметить, что водосодержащий слой в живой коже уже структурирован от контакта с наноструктурными неоднородностями самих живых тканей. Поэтому при взаимодействии его с ЭМИ изменение интенсивности ИК луча, проходящего этот слой живой кожи, наблюдается (см. рис. 7, а) на вполне определённых частотах. При контакте живой кожи с фторопластовой плёнкой (см. рис. 7, б) или пластиной слюды (см. рис. 7, в) структуризация водного слоя кожи происходит уже на других частотах, нежели для живой кожи, не находящейся в контакте с внешним структурирующим воду материалом, а именно: на частотах, характерных для суммарного действия собственных резонансных частот кожи, не находящейся в контакте с внешним материалом, и кожи, находящейся под действием внешнего структуризатора – фторопластовой плёнки или слюды.

В биологических объектах водосодержащие слои могут структурироваться и распространяться в каналах самых различных размеров, поэтому вопрос о скорости структуризации тонких водосодержащих слоёв в зависимости от их толщины требует исследования. Впервые он был рассмотрен в работах авторов [17,18], где представлены результаты исследования скорости структуризации тонких водных слоёв от контакта с нанонеоднородной поверхностью окружающего материала

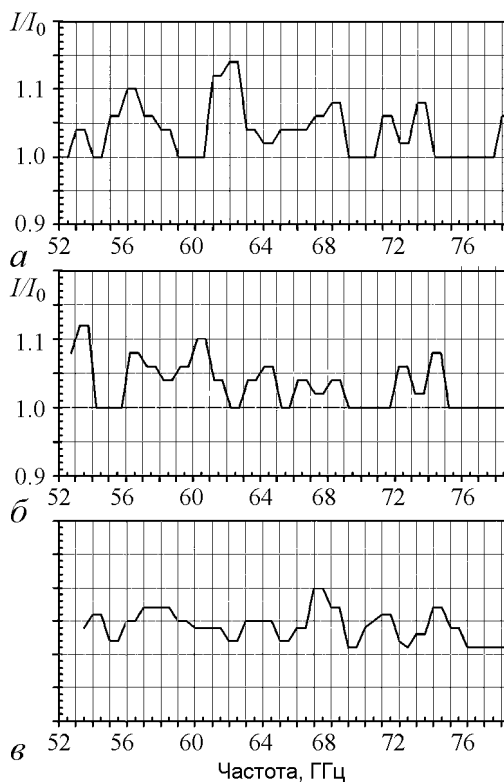


Рис. 7. Зависимости интенсивности ИК луча от частоты падающего КВЧ излучения. ИК луч проходит слой: а – живой кожи (толщиной 100 мкм); б – кожи, контактирующей с фторопластовой плёнкой (50 мкм); в – кожи, контактирующей со слюдяной пластиной (50 мкм). Мощность ИК излучения 20 мВт; окружающая температура 21°С

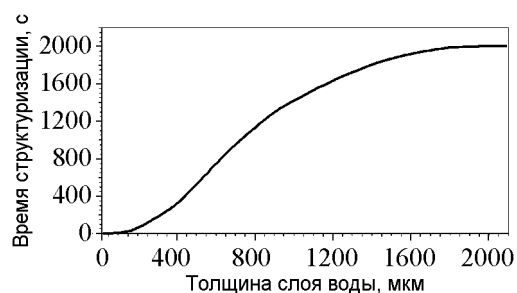


Рис. 8. Зависимость времени структуризации слоя воды от его толщины при контакте с поверхностью кремния

капилляра выполнялась из пластины кварцевого стекла, а верхняя плоская поверхность – из пластины кремния и обе поверхности находились в контакте со слоем воды. Толщина структурируемого водного слоя определялась расстоянием между параллельно ориентированными друг относительно друга стеклянной и кремниевой пластинами.

Результаты эксперимента показали, что время структуризации тонких водных слоёв при контакте с наноструктурной, нанонеоднородной поверхностью окружающего материала может оказаться очень малым. Так, для толщин водных слоёв порядка десятков микрон оно не превышает единиц секунд [17, 18]. А при значительном увеличении времени структуризации может быть достигнута структуризация водных слоёв, толщина которых несколько превышает 2 мм.

Что же касается скорости и времени деструктуризации слоёв воды после нарушения контакта водного слоя с поверхностью структурирующего воду материала, то это самостоятельный и важный вопрос. Частично он уже поднимался в работах авторов [8–12]. Экспериментально было установлено, что время деструктуризации слоёв воды толщиной более 1 мм при комнатной температуре близко ко времени структуризации, хотя и в 1.2...1.3 раза превышает его. Приблизительное равенство времени структуризации и деструктуризации сохранялось и для более толстых слоёв воды до 2 мм и более, причём оно мало зависело от увеличения толщины водного слоя [8]. А при толщине водного слоя меньше 300 мкм время деструктуризации водного слоя начинало всё заметнее превышать время структуризации. И эта разница становилась всё более значительной с уменьшением толщины водного слоя.

Полученные результаты важны при их использовании в медицине и биологии. Они показывают, что при движении тонких водосодержащих слоёв в живых структурах возможна эффективная структуризация этих слоёв при контакте с наноструктурной поверхностью граничной среды из натуральных минералов или искусственных материалов [8,9]. В таком случае с этими структурированными на определённых резонансных частотах водосодержащими средами [10] возможно эффективное взаимодействие низкоинтенсивного излучения КВЧ и ТГЧ диапазонов [10–12], а потому возможен перенос воздействия этого излучения на большие глубины в живых организмах [10,12].

Итак, экспериментально удалось обнаружить, что использование контакта живой кожи с выбранными минералами позволяет: во-первых, увеличить уровень струк-

в зависимости от толщины водных слоёв. В качестве исследуемых материалов для определённости использовалась чистая дистиллированная вода и монокристаллический кремний. Зависимость времени структуризации слоя воды от его толщины при контакте с поверхностью кремния приведена на рис. 8. В эксперименте использовался плоский капилляр, который полностью заполнялся водой. Нижняя плоская поверхность

туризации водосодержащей среды в клетках живой кожи (и в других клетках организма); во-вторых, обеспечить высокий уровень структуризации на вполне определённых частотах. На данных частотах за счёт высокого уровня структуризации водосодержащей среды обеспечивается высокая эффективность взаимодействия клеток с ЭМИ. Если эти частоты совпадают с характерными резонансными частотами здоровых клеток, то именно на этих частотах будет обеспечиваться эффективное взаимодействие клеток организма с ЭМИ. Таким образом, перестройкой резонансных частот клеток организма с патологическими отклонениями на резонансные частоты здоровых клеток решается одна из задач биомедицинской радиоэлектронной терапии – повышение её эффективности. Далее, при использовании внешних структурирующих факторов перестройка резонансной частоты клеток с патологическими отклонениями на резонансные частоты здоровых клеток может осуществляться и на значительной глубине в организме, следовательно, обеспечивается возможность восстановления эффективного взаимодействия между клетками, характерного для взаимодействующих между собой клеток здорового организма.

В настоящее время применение методов КВЧ терапии в сочетании с использованием некоторых природных минералов в ряде клиник Саратовского государственного медицинского университета позволило приостановить резкое облысение больных, обеспечить лечение острых форм псориаза, заболеваний щитовидной железы и ряда онкологических заболеваний кожи [19–22].

Обсуждение результатов и выводы

Представленные выше результаты свидетельствуют об особой роли структуризации водосодержащей среды в живых и физических объектах при её взаимодействии с ЭМИ. Без структуризации водной среды никаких особенностей в поведении водной среды при её взаимодействии с ЭМИ не наблюдается и происходит только тепловой нагрев среды. Структуризация может достигаться за счёт действия различных внешних факторов.

На основе сделанного вывода одним из перспективных направлений дальнейшего развития и совершенствования биомедицинских радиоэлектронных технологий, по мнению авторов, следует считать развитие методов структуризации водосодержащих сред в живых системах при их взаимодействии с ЭМИ. Результаты экспериментов показали, что к значительной структуризации водных сред может приводить использование многих нерастворимых в воде минералов и синтетических материалов. К тому же, как экспериментально установлено, к существенной структуризации водного слоя при контакте с нерастворимыми в воде материалами могут приводить не только проводники и диэлектрики, но также аминокислоты и живые структуры. Именно вблизи микро-, наноразмерных и параметрических неоднородностей этих структур начинают развиваться процессы структуризации водосодержащих сред [8,9]. Обнаруженные явления могут с успехом использоваться в биомедицинских радиоэлектронных технологиях. Причём значительная роль в них будет принадлежать именно нанотехнологиям, позволяющим обеспечить требуемый уровень структуризации водосодержащих сред (включая биосреды), при использо-

вании внешних структурирующих факторов на наноразмерном уровне и на нужных частотах. Естественно, что сказанное относится также и к биотехнологиям и биомедицинским технологиям в сельском хозяйстве, использующим ЭМИ.

Результаты приведённых экспериментов показывают, что один из реальных путей повышения эффективности биомедицинских радиоэлектронных технологий состоит в совместном их использовании с подходами кристаллотерапии [13,14,23]. Но данный вопрос требует специального рассмотрения. Это объясняется практически полным отсутствием в литературе научного объяснения механизмов кристаллотерапии, хотя она используется в народной медицине с древнейших времён вплоть до настоящего времени. В этой связи авторами, как они считают, сделан один из первых шагов в плане научного понимания механизмов кристаллотерапии, ключевую роль в которых играет структуризация водосодержащих сред в живых тканях при их непосредственном контакте с различными натуральными минералами и, как экспериментально установлено, с некоторыми искусственными материалами. Начаты экспериментальные исследования возможности сочетанного использования методов КВЧ терапии и кристаллотерапии. Полученные результаты в ряде случаев демонстрируют большую эффективность, чем при КВЧ монотерапии [19–22].

В рассматриваемых радиоэлектронных технологиях по исследованию спектральных характеристик водосодержащей среды в тканях открывается возможность построения на новых принципах сверхвысокочувствительной, неинвазивной, ранней диагностики заболеваний (в том числе и онкологических), выявления признаков новообразований кожи, определяются пути развития соответствующих терапевтических нанотехнологий. За счёт возможности достижения высокого уровня структуризации водосодержащей среды в областях патологий при использовании ряда натуральных кристаллов или искусственных материалов открывается возможность повышения эффективности КВЧ и ТГЧ нанотехнологий в диагностике и в терапии [19–22,24,25]. К примеру, авторами впервые при лечении больных очаговым облысением было предложено использовать низкоинтенсивное электромагнитное излучение КВЧ диапазона на резонансных частотах наноструктур биологического объекта, контактирующего с нанонеоднородной поверхностью внешнего материала [20], что позволило получить положительные результаты.

Ещё раз обратим внимание на наиболее важные результаты проведённой работы.

1. Обнаружено явление структуризации воды при контакте ее с нерастворимыми в воде внешними материалами, имеющими в поверхности контакта с водой нанонеоднородные включения [6–10].
2. Обнаружены резонансы на определённых частотах структурированной воды при воздействии на нее КВЧ или ТГЧ излучением, свипируемом в широком диапазоне. Резонансные отклики зависят от структуры материала, параметрических и геометрических характеристик нанонеоднородных включений в поверхности, контактирующей с водой [10–12]. Установлено, что частота ЭМИ и эффективность его взаимодействия с биотканями зависят от структуры нанонеоднородной поверхности материала, структурирующего водосодержащую среду. Такими материалами, наряду с живыми структурами, могут быть природные натуральные минералы или искусственные материалы, а также нано-

структурные объекты, доставляемые в живые органы в виде живых наноструктур, нанокапсул и наноконтейнеров с лечебными препаратами.

3. Обнаружено, что живая и гипоксированной ткань (кожа, мышечная ткань и др.) также обладают структурирующими свойствами – клеточная структура ткани сама по себе является микро- и нанонеоднородной средой, которая инициирует построение диполей воды в виде протяженных ветвей, что и является собой структурированное состояние биожидкостей [12].
4. Обнаружено, что структуризация слоёв чистой воды происходит и в присутствии в ней наноструктурных молекулярных образований в виде аминокислот [15,16]. То есть выяснилось, что при наличии аминокислот начинали образовываться слои, создаваться и вырастать цепные конструкции из связанных друг с другом диполей воды [9–12,15,16].

Подчеркнем, эффекты обнаруженные в п. 3 и 4 оказались общими как для неживых, так и для живых структур.

5. Впервые экспериментально было обнаружено, что в КВЧ диапазоне резонансные полосы собственных излучений водосодержащей среды живых структур также имеют вполне определённые значения, которые зависят от структуры живых элементов [10–12]. Появляется возможность создания биосовместимого стабильного интерфейса живой клетки и соответствующего неживого элемента. В основе такого механизма биосовместимости живого и неживого элементов лежат два явления: во-первых, это явление структуризации воды в живой клетке от её контакта с нерастворимым в воде внешним искусственным материалом (водоэлектрический эффект [6–9]); во-вторых, это формирование определённого спектра излучений в структурированной водосодержащей среде живых клеток от действия на неё нанонеоднородных включений внешнего материала и внешнего КВЧ или ТГЧ излучения. Критерием биосовместимости может быть вид ИК/КВЧ спектра, совпадающий по присутствующим в нем резонансным полосам с собственным спектром ткани в КВЧ диапазоне*.

Авторы считают, что сделанный вывод является достаточно смелым и, бесспорно, требует в дальнейшем проверки при проведении соответствующих теоретических и экспериментальных исследований. Поэтому в настоящее время авторы обсуждают высказанную мысль в порядке дискуссии.

Авторы выражают благодарность Ю.В. Гуляеву за внимание и многолетний интерес, проявленный к нашим работам, Ю.П. Чуковой за полезные консультации по термодинамике исследуемых процессов, В.Н. Баграташвили за поддержку развиваемых направлений и Г.Е. Бриллиу за ранние совместные работы и помощь в постановке уникальных экспериментов.

Работа поддержана грантом № 08-02-00987 РФФИ.

*При этом речь идёт не о полном совпадении спектров этих двух сред. Полного их совпадения вряд ли можно ожидать. Видимо, достаточно совпадения лишь на вполне определенных, наиболее характерных и ярко выраженных в энергетическом плане резонансных частотах. Для удобства и краткости их можно назвать опорными резонансными частотами. То есть, по мнению авторов, будет ли такая система биосовместимой зависит от того, совпадёт ли спектр структурированной водосодержащей среды от неживого элемента с собственным спектром водосодержащей среды в самом живом элементе.

Библиографический список

1. *Бецкий О.В., Голант М.Б., Девятков Н.Д.* Миллиметровые волны в биологии. М.: Знание, 1988. 64 с.
2. *Девятков Н.Д., Голант М.Б., Бецкий О.В.* Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. М.: Радио и связь, 1991. 168 с.
3. *Бецкий О.В., Кислов В.В., Лебедева Н.Н.* Миллиметровые волны и живые системы. М.: Сайнс-пресс, 2004. 272 с.
4. *Синицын Н.И., Петросян В.И., Ёлкин В.А., Девятков Н.Д., Гуляев Ю.В., Бецкий О.В.* Особая роль системы «миллиметровые волны – водная среда» в природе // Биомедицинская радиоэлектроника. 1998. № 1. С. 5; От редактора выпуска // Биомедицинская радиоэлектроника. 1999. № 1. С. 3.
5. *Линг Г.* Физическая теория живой клетки. Незамеченная революция. СПб.: Наука, 2008. 492 с.
6. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А.* Диплом № 329 на открытие. Выдан 29 мая 2007 г. Международной академией авторов научных открытий и изобретений на основании результатов научной экспертизы заявки на открытие.
7. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А.* Явление генерации электрической энергии тонким водосодержащим слоем. Часть I. Экспериментально наблюдаемые электрические характеристики водоелектрического эффекта // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2006. № 1–2. С. 35–53.
8. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А.* Явление генерации электрической энергии тонким водосодержащим слоем. Часть II. Экспериментальное исследование структуризации тонких водосодержащих слоёв при их контакте с различными материалами // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2006. № 5–6. С. 34.
9. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А.* Явление генерации электрической энергии тонким водосодержащим слоем. Часть III. Модель механизма водоелектрического эффекта и структуризации тонкого водосодержащего слоя. Горизонты этих явлений в природе // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2007. № 1. С. 24.
10. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А.* Особая роль структуризации водосодержащей среды в современных биомедицинских радиоэлектронных технологиях и нанотехнологиях будущего // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2007. № 2–4. С.31. Юбилейный выпуск к 100-летию со дня рождения Н.Д.Девяткова.
11. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А., Бецкий О.В.* Миллиметровая наноструктурная медицина – нанотехнология будущего в биомедицинских радиоэлектронных технологиях // Альманах клинической медицины. Т. XVII, ч. II, Москва, 2008, III Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине». С. 354–357.
12. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А., Бецкий О.В., Кислов В.В.* Миллиметровые волны и наноструктуры – будущее медицины и биоэлектроники // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 3. С. 21.
13. *Стоун Дж.* Все о лечебных и магических минералах. СПб.: ООО «СЗКЭО “Кристалл”», 2006. 176 с.
14. *Стюарт Дж.С.* Кристаллотерапия. М.: ООО «Изд. АСТ», ООО «Изд. Астрель», 2004. 109 с.

15. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А., Синицына Р.В., Бецкий О.В.* Структуризация воды аминокислотами – наноструктурными субстратами синтеза белков. Часть I. Экспериментальное исследование структуризации воды аминокислотами с неполярным гидрофобным боковым радикалом // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 12. С. 45.
16. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А., Синицына Р.В., Бецкий О.В.* Структуризация воды аминокислотами – наноструктурными субстратами синтеза белков. Часть II. Экспериментальное исследование структуризации воды аминокислотами разных классов с гидрофильным боковым радикалом // Биомедицинская радиоэлектроника. 2011. № 3. С. 25.
17. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А.* Влияние поверхности с наноструктурной неоднородностью на скорость структуризации воды при её контакте с этой поверхностью // 15 Российский симпозиум с международным участием «Миллиметровые волны в медицине и биологии»: Сборник трудов. Москва, 25–27 мая 2009. М.: Изд-во «МТА-КВЧ», 2009. С. 189–195.
18. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А.* Исследование скорости структуризации тонких водосодержащих слоёв – одного из важнейших факторов биомедицинских радиоэлектронных нанотехнологий будущего // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2009. Т. 55, № 3. С. 29.
19. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А., Бецкий О.В., Суворов А.П., Суворов С.А., Гуляев А.И., Лисенкова Л.А.* О перспективе использования электромагнитного излучения миллиметрового диапазона при онкологических заболеваниях//Oncology.ru. Конференция с международным участием «Нанотехнологии в онкологии». Москва, 9–10 октября 2009. М.: Изд-во «Инфомедиа Паблшерз», 2009. С. 38–39.
20. *Суворов А.П., Синицын Н.И., Ёлкин В.А., Суворов С.А.* Способ лечения больных очаговым облысением. Патент на изобретение № 2364427. Зарегистрирован в Гос. реестре изобретений РФ 20 августа 2009.
21. *Гуляев А.И., Лисенкова Л.А., Синицын Н.И., Ёлкин В.А.* Применение миллиметровой терапии при узловом зобе щитовидной железы // Онкохирургия. 2009. № 2. С. 88–89. III Конгресс с международным участием «Опухоли головы и шеи». Сочи, май 2009. М.: Изд-во «Инфомедиа Паблшерз», 2009. 115 с.
22. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А., Бецкий О.В., Молочков В.А., Суворов А.П., Суворов С.А., Гуревич Г.И.* Новые принципы диагностики онкологических заболеваний кожи // Материалы Третьей Всероссийской научной конференции с международным участием «Нанотехнологии в онкологии 2010». Москва, 30 октября 2010. М.: Изд-во Московского научно-исследовательского онкологического института им. П.А. Герцена. С. 111–114.
23. *Баумен К.* Исцеляющий кристалл. СПб.: Будущее земли, 2002. 224 с.
24. *Суворов А.П., Суворов С.А., Синицын Н.И., Ёлкин В.А.* Биомедицинские радиоэлектронные технологии миллиметрового и терагерцового диапазонов в терапии больных дерматозами // 2 Конгресс ЕААД (Евро-Азиатская ассоциация дерматовенерологов). Москва, 21–23 марта 2012. www.eaad2012.ru/tezis/show/39
25. *Синицын Н.И., Ёлкин В.А., Бецкий О.В., Суворов А.П., Суворов С.А.,*

Гуревич Г.И. Новые принципы биомедицинских радиоэлектронных нанотехнологий миллиметрового и терагерцового диапазонов в диагностике и терапии онкологических заболеваний кожи // 2 Конгресс ЕААД (Евро-Азиатская ассоциация дерматовенерологов). Москва, 21–23 марта 2012.
www.eaad2012.ru/tezis/show/38

СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Поступила в редакцию 9.01.2013

DETERMINING THE VALUE OF THE STRUCTURE WATER-CONTAINING ENVIRONMENT OF LIVING TISSUE IN BIOMEDICAL RADIO-ELECTRONIC NANOTECHNOLOGIES MILLIMETRIC AND TERAHERTZ RANGES

N. I. Sinitsyn, V. A. Elkin, O. V. Betskii

The article contains the short review of the main results on research of a role of structuration of the water-containing environment in the living tissues. These tissues are used as the objects of research in biomedical radio-electronic nanotechnologies of the extremely high-frequency and terahertz ranges. The experimental devices and technique of researches of the water containing environment structuration under the influence of electromagnetic radiation are described. The results of pilot studies are given. Prospects of the combined impact on an organism of the extremely high-frequency and terahertz radiations with structuring effect of natural minerals and artificial materials are discussed. Diagnostics and therapy prospects by means of offered technologies are estimated. New principals are proposed relating to an explanation of the nature mechanism of live and lifeless elements biocompatibility. One of the first steps of a scientific explanation of the mechanism of a crystaltherapy is fomulated.

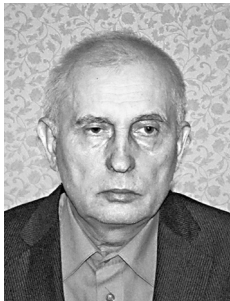
Keywords: Structuring a water-containing environment, perturbing radio-electronic techniques, biomedical radio-electronic nanotechnology, nanoinhomogeneities surface, biocompatibility, millimeter and terahertz radiation, infrared radiation.



Синицын Николай Иванович – родился в 1937 году в Саратове, окончил Саратовский государственный университет (1960). После окончания СГУ работал на физическом факультете СГУ. Защитил кандидатскую диссертацию (1964, СГУ) и докторскую диссертацию (1980, СГУ). С 1981 г. работает в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники АН СССР (ныне-Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН). Область научных интересов: СВЧ вакуумная микроэлектроника, СВЧ твердотельная акустоэлектроника, исследование воздействия низкоинтенсивных миллиметровых и терагерцовых излучений на биологические структуры. Заместитель директора по научной работе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Академик РАЕН, Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор. Автор одной монографии, более 400 научных публикаций, более 60 авторских свидетельств и патентов. Лауреат Государственной премии РФ. Член редакционной коллегии журнала «Биомедицинская радиоэлектроника».

410019 Саратов, ул. Зелёная, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
E-mail: info@soire.renet.ru

Ёлкин Владимир Александрович – родился в 1948 году на ст. Барятинская Калужской области, окончил Саратовский государственный университет, физический факультет в 1971 году. Работал в ОКБ Саратовского радиоприборного завода, в Центральном НИИ измерительной аппаратуры, в НИИ механики и физики при СГУ. С 1981 г. работает в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники АН СССР (ныне-Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук в Саратовском государственном техническом университете (2000 г.) по специальности антенны, СВЧ устройства и их технологии. Ст.н.с. Доцент. Область научных интересов: радиофизические методы исследования природных образований, исследование воздействия низкоинтенсивных миллиметровых и терагерцовых излучений на биологические структуры. Автор 185 научных публикаций, в том числе 35 авторских свидетельств и патентов.

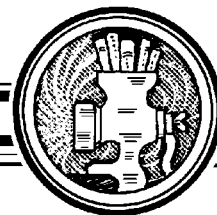


410019 Саратов, ул. Зелёная, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
E-mail: info@soire.renet.ru; vlaelkin@gmail.com; zet2004@mail.ru

Бецкий Олег Владимирович – родился в 1938 году в г. Куба республики Азербайджан, окончил Московский энергетический институт (1963). После окончания института работал в институте радиотехники и электроники АН СССР (ныне – Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН). Защитил кандидатскую диссертацию (1980, ИРЭ АН СССР). Область научных интересов: электроника СВЧ и КВЧ биофизические механизмы воздействия низкоинтенсивных излучений миллиметрового и терагерцового диапазонов на биологические структуры. Академик Российской академии естественных наук. Заведующий лабораторией «Биологические эффекты миллиметровых излучений». Генеральный директор Медико-технической ассоциации «КВЧ». Доктор физико-математических наук, профессор. Автор 6 монографий, более 200 научных публикаций, в том числе 30 авторских свидетельств и патентов. Лауреат Государственной премии РФ. Заместитель главного редактора журнала «Биомедицинская радиоэлектроника».



125009 Москва, Моховая 11, стр.7
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
E-mail: ehf@cplire.ru



К ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЛН И ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПОЛОСАХ ЗАПИРАНИЯ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

В. А. Солнцев

Обсуждается роль дискретного описания электронно-волнового взаимодействия в мощных лампах с бегущей волной. Рассматривается развитие этого направления теории взаимодействия с применением разностного уравнения возбуждения волноводов. Показана справедливость разработанной линейной теории и универсального характеристического уравнения электронных волн, использующих разностное уравнение возбуждения волноводов, в полосах запираания замедляющих систем. При синхронном взаимодействии электронов с полем запредельной секции замедляющей системы характеристическое уравнение сводится к биквадратному, аналитические решения которого позволяют проанализировать свойства электронных волн и усиление сигнала в запредельной секции.

Ключевые слова: Замедляющая система, электронный пучок, лампа бегущей волны, полоса запираания, полоса пропускания, взаимодействие.

Введение

Первые лампы с бегущей волной (ЛБВ) были созданы в 1940-х годах на основе спиральных замедляющих систем (ЗС), имеющих слабую зависимость фазовой скорости электромагнитной волны от частоты (слабую дисперсию) и большое сопротивление связи с электронным потоком (см., например, в кн. [1]). В последующие годы была разработана теория ЛБВ на основе представлений о непрерывности взаимодействия электронного потока с полем бегущей электромагнитной волны (волновой анализ) с использованием простых моделей ЗС [2], общей теории возбуждения волноводов [3,4], разделения переменных в конкретных вариантах ЗС [5,6]. Введены также основные параметры, характеризующие это взаимодействие: параметр скорости b , параметр затухания d , параметр пространственного заряда $4QC$, параметр усиления C ; в отечественной литературе часто используются также уточненные значения этих параметров: ξ' , ξ'' , σ^2 , ε , соответственно. ЛБВ со спиральной ЗС позволяют получить большое усиление в широкой полосе частот, однако мощность таких

приборов ограничена величиной теплоотвода от спирали через диэлектрические элементы ее крепления в корпусе прибора. Для увеличения выходной мощности ЛБВ используют обладающие хорошим теплоотводом «цельнометаллические» резонаторные ЗС, наиболее известными из которых являются цепочки связанных резонаторов (ЦСР) и встречные штыри. Такие ЗС являются, по существу, СВЧ-фильтрами с чередующимися частотными полосами пропускания и запираения. Они имеют наиболее высокое сопротивление связи отдельных волн вблизи частот отсечки (границ полос пропускания) и поэтому работают, как правило, вблизи этих частот внутри, а иногда и вне полос пропускания. Применение для расчета ЛБВ с резонаторными ЗС волнового анализа, разработанного для спиральных ЛБВ, встречает значительные трудности, связанные с «запираем» резонаторных ЗС на частотах отсечки, обращением в бесконечность сопротивления связи отдельных волн и взаимодействием электронного потока вблизи этих частот с пространственными гармониками двух волн – прямой и встречной.

Для преодоления этих трудностей в 1950–70-е годы развивались два основных направления теории резонаторных ЛБВ. Теория дискретного электронно-волнового взаимодействия основана на выделении в пространстве взаимодействия ЛБВ зазоров взаимодействия в составляющих ЗС резонаторах и участков дрейфа электронных потоков. Такой вариант теории является, по существу, обобщением теории многорезонаторных клистронов с тем отличием, что резонаторы в ЛБВ связаны друг с другом и возбуждаемое в них поле определяется, в первую очередь, этой связью, а электронный поток группируется, главным образом, на участках дрейфа, как и в клистронах (каскадная группировка).

Основы теории дискретного взаимодействия и каскадной группировки в ЛБВ были заложены в работах научной школы профессора В.Н. Шевчика, который возглавлял кафедру электроники Саратовского государственного университета в те годы. Обобщающие результаты изложены им вместе с коллективом учеников в книге [7], где дан также подробный обзор работ других авторов. В ней, в частности, отмечается: «В последние годы появился вынужденный интерес к «старой» задаче дискретного описания взаимодействия электронного потока с полями нерезонансных колебательных систем, связанный, в частности, с разработкой мощных ЛБВ с замедляющими системами типа цепочки связанных резонаторов, а также с исследованиями внеполосного излучения в таких приборах». Интерес к этой «старой» задаче сохраняется и в настоящее время, поскольку необходимые для современных радиосистем мощности более десятков-сотен ватт в коротковолновой части сантиметрового диапазона и миллиметрового диапазона можно получить в электровакуумных СВЧ-приборах более эффективно (как в техническом, так и в экономическом плане), чем в полупроводниковых приборах, несмотря на успехи в развитии твердотельной электроники [8]. В теории дискретного электронно-волнового взаимодействия ЗС резонаторной ЛБВ представляется той или иной эквивалентной схемой. Используются различные варианты RLC-схем или цепочек многополюсников, многие из которых, предложенные до 1974 г., описаны в [7]. В дальнейшем рассматривались и другие варианты эквивалентных схем и систем; отметим результаты, приведенные в [9], а также эквивалентную схему работы [10] и волноводно-резонаторную модель ЗС [11], на основе которых созданы комплексы компьютерных программ для проектирования

ЛБВ с резонаторными ЗС. При моделировании ЗС эквивалентными схемами или системами во многих случаях можно описать дискретное взаимодействие электронного потока с полем ЗС с помощью эквивалентных параметров, не имеющих, в отличие от обычного сопротивления связи, особенностей на частотах отсечки и дающих возможность исследовать взаимодействие в полосах запираания ЗС. Однако, как отмечено в [7], в известных теориях дискретного электронно-волнового взаимодействия «наиболее уязвимое место подхода – использование для описания электродинамической части задачи соответствующих (пусть даже очень общих) эквивалентных схем, обоснование которых может состоять лишь в тщательном сопоставлении теоретических результатов решения «холодных» задач на основе эквивалентных схем с экспериментальными данными».

В связи с этим, рядом авторов разрабатывался также электродинамический подход к описанию полей в периодических, в том числе резонаторных ЗС. В работе [12] дана теория электронных волн в периодических структурах, основанная на разработанной в ней теории возбуждения периодических волноводов и на разложении всех ВЧ-полей и токов электронного пучка в ряды по пространственным гармоникам. Получено общее характеристическое уравнение, однако вопрос о его решении на частотах отсечки и в полосах запираания ЗС не рассматривался. Разные варианты теории возбуждения периодических волноводов вблизи частоты отсечки, позволяющие устранить имеющуюся здесь особенность в уравнении возбуждения, рассматривались в работах [13–16] и ряде других работ, где удалось исследовать электронно-волновое взаимодействие в областях частот отсечки.

Уже в ранних работах по дискретному взаимодействию в резонаторных ЗС обращалось внимание на возможность описания возбуждения представляющих их эквивалентных схем разностными уравнениями. Это позволило получить ряд характеристических (дисперсионных) уравнений электронных волн, имеющих, однако, разный вид в зависимости от применяемой эквивалентной схемы; обзор соответствующих работ и полученных в них результатов дан в [7].

Общее разностное уравнение возбуждения периодических волноводов любого вида получено в работе [17] и там же найден его частный вид при возбуждении продольным током в приборах типа О. Его применение позволяет без использования каких-либо эквивалентных схем сформулировать уравнения линейной теории дискретного электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ с периодическими резонаторными ЗС, справедливые в полосах пропускания, запираания и на частотах отсечки ЗС, и получить ряд результатов при их численном решении [18,19]. Более того, удастся получить самое общее характеристическое уравнение электронных волн в периодических структурах, найти ряд его аналитических решений и их трансформацию при переходе от одной к другой границе полосы пропускания ЗС с нормальной и аномальной дисперсией основной пространственной гармоники рабочей волны [20]. Эти решения найдены в [20] без учета величины пространственного заряда для ЗС с бесконечно тонкими зазорами взаимодействия в полосах пропускания, включая их границы. В настоящей работе в тех же приближениях найдены аналитические решения полученного в [20] характеристического уравнения в полосах запираания ЗС, позволяющие рассмотреть поведение электронных волн и усиление сигнала на границах и в полосах запираания ЗС.

1. Особенности конечно-разностного уравнения возбуждения в полосах запираия ЗС

Рассматриваем прямолинейный электронный поток в ЗС с зазорами взаимодействия, расположенными периодически с шагом L .

Конечно-разностное уравнение возбуждения связывает ВЧ-напряжение на трех соседних зазорах

$$\Delta^2 U_q + 2U_q(1 - \cos \varphi_s) = iR_s^0 \sin \varphi_s J_q d^2, \quad (1)$$

где $\Delta^2 U_q = U_{q+1} - 2U_q + U_{q-1}$ – конечная разность второго порядка, $\varphi_s = h_s L$ – сдвиг фазы между соседними зазорами, R_s^0 – усредненное по сечению пучка удельное сопротивление связи в зазоре [4], d – ширина плоского зазора, эквивалентного реальному зазору взаимодействия, с распределением усредненного по сечению продольного электрического поля $\bar{e}_q(z)$,

$$J_q = \frac{1}{d_q} \int_{z_q-L/2}^{z_q+L/2} J(z) \bar{e}_q(z) dz \quad (2)$$

– наведенный в q -м зазоре ток, $J(z)$ – ВЧ конвекционный ток электронного пучка. Правила усреднения полей и токов при переходе к рассматриваемой одномерной модели ЛБВ сформулированы в [4,18,19].

Остановимся на свойствах конечно-разностного уравнения возбуждения (1) в разных случаях.

1. ЗС с нормальной дисперсией основной пространственной гармоники ($m = 0$, см. рисунок), которая является рабочей для ЛБВ.

Для спиральной ЗС или бесконечно широкой гребенки низкочастотная граница основной полосы пропускания отсутствует, $\omega_{0н} = 0$. Переходя к пределу $L \rightarrow 0$, то есть к спирально проводящему цилиндру или импедансной плоскости, получим, как показано в [18], известное уравнение возбуждения, применяющееся в одноволновом анализе [4].

Для ЗС типа диафрагмированного волновода или поперечно ограниченной гребенки $\omega_{0н} \neq 0$, и в основной полосе пропускания для рабочей пространственной гармоники $m = 0$ имеем $0 \leq \varphi_{s,0} = \varphi_s \leq \pi$.

Удельное сопротивление связи R_s^0 и поток энергии волны P_s положительны и определяются соотношениями

$$R_s^0 = \frac{|E_s^0|^2}{2P_s}, \quad P_s = W_s v_{гр} = W_s L \frac{d\omega}{d\varphi_s}, \quad (3)$$

где $v_{гр}$ – групповая скорость волны, а W_s – запасенная на единицу длины ЗС энергия. При этом входящий в правую часть (1) локальный импеданс связи

$$Z_s = R_s^0 d^2 \sin \varphi_s = R_s L^2 \sin \varphi_s \quad (4)$$

является положительной ограниченной величиной, что показано, например, в [21], а $R_s = R_s^0 d^2 / L^2$.

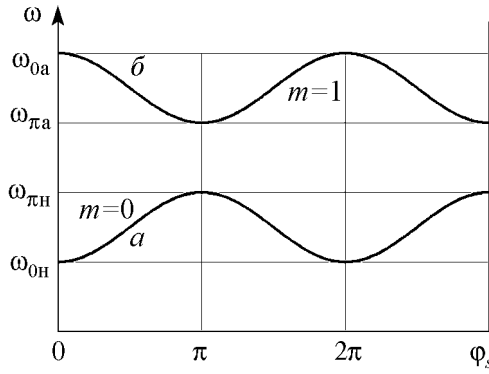


Рис. Кривые дисперсии электромагнитной волны в ЗС с нормальной (а) и аномальной (б) дисперсией основной пространственной гармоники

В низкочастотной полосе запира-ния при $\omega \leq \omega_{0н}$ имеем реактивное затухание, так что в пренебрежении омическими потерями

$$\varphi_s = i\varphi_s'', \quad R_s^0 = i \frac{d\varphi_s''}{d\omega} \frac{1}{L} \frac{|E_s^0|^2}{2W_s}, \quad (5)$$

где $\varphi_s'' > 0$ для затухающей волны, $d\varphi_s''/d\omega < 0$. Последнее выражение (5) следует из обобщенного соотношения между потоком и запасенной энергией (нормами волны), полученного в [22] для систем с потерями и в полосах запира-ния. Подставляя (5) в (4), получим в низкочастотной полосе запира-ния

$$Z_s = -\frac{d\varphi_s''}{d\omega} \frac{1}{L} \frac{|E_s^0|^2}{2W_s} d^2 \text{sh} \varphi_s'' > 0. \quad (6)$$

В высокочастотной полосе запира-ния при $\omega > \omega_{\piн}$ имеем

$$\varphi_s = \pi + i\varphi_s'', \quad (7)$$

но $d\varphi_s''/d\omega > 0$ вблизи отсечки $\omega_{0н}$. Получим $\sin \varphi_s = -i \text{sh} \varphi_s''$ и

$$Z_s = \frac{d\varphi_s''}{d\omega} \frac{1}{L} \frac{|E_s^0|^2}{2W_s} d^2 \text{sh} \varphi_s'' > 0. \quad (8)$$

2. ЗС (цепочка связанных резонаторов или встречные штыри) с аномальной дисперсией основной пространственной гармоники; рабочей для ЛБВ является первая пространственная гармоника ($m = 1$, см. рисунок).

В полосе пропускания имеем

$$\pi \leq \varphi_{s,1} = \varphi_s \leq 2\pi, \quad (9)$$

удельное сопротивление связи и поток энергии волны положительны и определяются формулами (3), но $\sin \varphi_s < 0$, так что локальный импеданс связи, согласно (4), формально имеет отрицательное значение. Однако в уравнении возбуждения (1) можно учесть этот знак, записав уравнение в виде

$$\Delta^2 U_q + 2U_q(1 - \delta \cos \varphi_s) = \delta \cdot i |Z_s| J_q, \quad (10)$$

считая $0 \leq \varphi_s \leq \pi$ при

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{для ЗС с нормальной дисперсией,} \\ -1 & \text{для ЗС с аномальной дисперсией.} \end{cases}$$

В низкочастотной полосе запираия при $\omega < \omega_{\text{та}}$ имеем для φ_s выражение (7), $d\varphi_s''/d\omega < 0$ вблизи отсечки (реактивное затухание увеличивается с уменьшением частоты) и получим выражение, аналогичное (8), но формально $Z_s < 0$.

В высокочастотной полосе запираия при $\omega > \omega_{2\text{та}} = \omega_{0\text{а}}$ имеем

$$\varphi_s = 2\pi + i\varphi_s'', \quad (11)$$

$d\varphi_s''/d\omega > 0$ вблизи отсечки, и получим по аналогии с (6) $Z_s < 0$.

Таким образом, в общем случае для ЗС с нормальной и аномальной дисперсией в полосах пропускания и запираия для Z_s можно использовать выражение

$$Z_s = \delta |R_s^0 d^2 \sin \varphi_s| \quad (12)$$

и конечно-разностное уравнение возбуждения в форме (10).

2. Универсальное характеристическое уравнение электронных волн и его частные случаи

В работе [19] с использованием конечно-разностного уравнения возбуждения найдена матрица коэффициентов a_{ij} , связывающая безразмерные величины ВЧ-тока электронного пучка I , скорости электронов (кинетического потенциала) V и поля F в $(q+1)$ -м зазоре взаимодействия ЗС с их значениями в одном, а для поля – в двух предыдущих зазорах:

$$\begin{aligned} I_{q+1} &= a_{11}I_q + a_{12}V_q + a_{13}F_q, \\ V_{q+1} &= a_{21}I_q + a_{22}V_q + a_{23}F_q, \\ F_{q+1} &= a_{31}I_q + a_{32}V_q + a_{33}F_q + a_{34}F_{q-1}. \end{aligned} \quad (13)$$

При этом взаимодействие электронного потока и поля ЗС рассматривалось в рамках линейной теории для полос пропускания ЗС. Выше, в п. 1, обоснована справедливость полученных в [19] выражений для a_{ij} и для полос запираия ЗС. В рассматриваемой линейной теории взаимодействия решение можно искать в виде электронных волн, для которых $I_{q+1} = \lambda I_q$, $V_{q+1} = \lambda V_q$, $F_{q+1} = \lambda F_q$. При этом из (13) получаем систему однородных линейных уравнений третьего порядка

$$\begin{aligned} (a_{11} - \lambda)I_q + a_{12}V_q + a_{13}F_q &= 0, \\ a_{21}I_q + (a_{22} - \lambda)V_q + a_{23}F_q &= 0, \\ a_{31}I_q + a_{32}V_q + (a_{33} - \lambda + \frac{a_{34}}{\lambda})F_q &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Приравнивая к нулю определитель этой системы, получаем, однако, уравнение 4-й степени относительно собственных чисел $\lambda = e^{i\psi}$, что объясняется разностным видом исходного уравнения возбуждения (10), связывающего значения безразмерного поля $F_q \sim U_q$ на трех шагах ЗС. В результате, раскрывая определитель системы (14), придем к универсальному характеристическому уравнению электронных волн в периодических структурах, полученному в [20]

$$(\cos \psi - \cos \theta_q)[\cos \varphi_s - \delta \cos(\varphi_e + \psi) - i(\varepsilon \varphi_e)^3(Y_1 - iY_2)] + G = 0, \quad (15)$$

где

$$G = \frac{1}{2} \exp(-i\psi) \left\{ a_{13} [\sigma(\varepsilon\varphi_e)^2 (\exp(i\frac{\theta}{2}) - M) \sin \theta_q + (\cos \theta_q - \exp(i\psi)) \cdot i\varepsilon\varphi_e^2 M] + a_{23} [\varepsilon\varphi_e^2 M \frac{\sin \theta_q}{\sigma} - (\cos \theta_q - \exp(i\psi)) \cdot i(\varepsilon\varphi_e)^2 (\exp(i\frac{\theta}{2}) - M)] \right\}. \quad (16)$$

Это уравнение определяет комплексное возмущение ψ сдвига фазы электронной волны на шаг ЗС по отношению к невозмущенному сдвигу фазы в электронном потоке $\varphi_e = (\omega/v_e)L$, так как $U_{q+1} = U_q \exp(i(\varphi_e + \psi))$. Физический смысл и выражения для других входящих в (15), (16) величин приведены в [19]. В частности, величина ε имеет смысл параметра усиления C в ЛБВ с тем отличием, что она выражается через локальный импеданс связи, поэтому не имеет особенностей на частотах отсечки и определена в полосах запираия ЗС.

В [20] дано преобразование характеристического уравнения электронных волн (15) для малого пространственного заряда и тонких зазоров взаимодействия, а также получен ряд аналитических решений в полосах пропускания и на частотах отсечки ЗС. Здесь рассмотрены свойства и решения характеристического уравнения при тех же предположениях в полосах запираия ЗС. В этом случае $\theta_q = 0$, $\sigma = 0$, $\theta = 0$, $M = 1$, $d/D = 0$, $\theta_d = 0$, и коэффициенты a_{ij} принимают вид:

$$a_{11} = 1, \quad a_{12} = -i\varepsilon\varphi_e, \quad a_{13} = -i(\varepsilon\varphi_e)^2, \quad a_{21} = 0, \quad a_{22} = 1, \quad a_{23} = \varepsilon\varphi_e, \\ a_{31} = -2i\varepsilon\varphi_e^2 e^{-i\varphi_e} \delta, \quad a_{32} = 0, \quad a_{33} = 2\delta \cos \varphi_s e^{-i\varphi_e}, \quad a_{34} = -e^{-2i\varphi_e},$$

Так как обычно параметр усиления мал, $\varepsilon \ll 1$, то $\psi \ll 1$. В этом случае, пренебрегая в (16) членами выше третьего порядка малости, получаем следующее характеристическое уравнение:

$$2(1 - \cos \psi) [\cos \varphi_s - \delta \cos(\varphi_e + \psi)] + \varepsilon^3 \varphi_e^4 = 0 \quad (17)$$

при $\delta = \pm 1$, $0 \leq \varphi_s \leq \pi$, или

$$2(1 - \cos \psi) [\cos \varphi_s - \cos(\varphi_e + \psi)] + \delta \varepsilon^3 \varphi_e^4 = 0, \quad (18)$$

где $0 \leq \varphi_s = \varphi_{s,0} \leq \pi$ при $\delta = 1$ – рабочая 0-я пространственная гармоника, $\pi \leq \varphi_s = \varphi_{s,1} \leq 2\pi$, при $\delta = -1$ – рабочая 1-я пространственная гармоника.

Полагая также $\cos \psi \cong 1 - \psi^2/2$, $\sin \psi \approx \psi$, получаем из (18) следующее алгебраическое характеристическое уравнение четвертой степени для комплексного возмущения фазы электронных волн:

$$\frac{\psi^4}{2} \cos \varphi_e + \psi^3 \sin \varphi_e + \psi^2 (\cos \varphi_s - \cos \varphi_e) + \delta \varepsilon^3 \varphi_e^4 = 0. \quad (19)$$

В теории электронных приборов это малое возмущение обычно нормируется с использованием параметра усиления ε [4]:

$$\eta = \frac{\psi}{\varepsilon\varphi_e} = \frac{\psi' + i\psi''}{\varepsilon\varphi_e} = \eta' + i\eta''. \quad (20)$$

Тогда характеристическое уравнение электронных волн в периодической структуре принимает вид

$$\frac{\varepsilon}{2} \cos \varphi_e \eta^4 + \frac{\sin \varphi_e}{\varphi_e} \eta^3 + \frac{\cos \varphi_s - \cos \varphi_e}{\varepsilon \varphi_e^2} \eta^2 + \delta = 0. \quad (21)$$

В «гладких» ЗС с импедансными стенками (например, в спирально-проводящем цилиндре) существует только одна основная пространственная гармоника волны, то есть $\delta = 1$. Шаг системы мал, так что $L \rightarrow 0$, $\varphi_s \rightarrow 0$ и при синхронизме электронов с прямой волной

$$\varphi_e = \frac{\varphi_s}{1 - \varepsilon \xi} = \varphi_s \rightarrow 0,$$

где $\xi = b$ – параметр расстройки скоростей электронов и волны. Используя малость φ_s и φ_e , получим из (21)

$$\frac{\varepsilon}{2} \eta^4 + (\eta - \xi) \eta^2 + 1 = 0. \quad (22)$$

Пренебрегая членом $\sim \varepsilon$, характеризующим взаимодействие электронного потока со встречной волной, получаем характеристическое уравнение, точно совпадающее с уравнением, приведенным в [2,4] для рассматриваемого кинематического приближения, то есть в пренебрежении пространственным зарядом $\sigma^2 \approx 4QC = 0$.

3. Решение характеристического уравнения в полосах запираия ЗС

В периодических ЗС в полосах запираия фаза поля во всем объеме ЗС либо одинакова, либо скачком меняется на π в некоторых сечениях, как в объемных резонаторах или стоячих волнах, что показано в [23] в пренебрежении омическими потерями. При этом возможно синхронное взаимодействие электронного потока и поля, условия которого несколько различаются в разных полосах ЗС, но в любом случае величины фазового набега в электронном потоке φ_e при точном синхронизме кратны π , так как $\varphi_e = \varphi_s$. В уравнениях (19) и (21) исчезает кубическое слагаемое и получается биквадратное характеристическое уравнение, аналитические решения которого позволяют исследовать усиление в полосах запираия ЗС. Аналогичным образом в этом случае получаются аналитические решения и более общего характеристического уравнения (18). Рассмотрим разные варианты.

В низкочастотной полосе запираия ЗС с нормальной дисперсией основной пространственной гармоники имеем, согласно (5) на m -й пространственной гармонике при точном синхронизме с ней электронов

$$\varphi_s = 2\pi m + i\varphi_s'', \quad \varphi_e = 2\pi m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (23)$$

В случае $m = 0$ синхронизм с нерелятивистскими электронными потоками невозможен, так как поле синфазно во всем объеме ЗС. В других случаях получаем из (18) характеристическое квадратное уравнение относительно $\cos \psi$

$$2(1 - \cos \psi)[\operatorname{ch} \varphi_s'' - \cos \psi] + \varepsilon^3 (2\pi m)^4 = 0, \quad (24)$$

решения которого имеют вид

$$\cos \psi = 1 + \frac{1}{2}(\operatorname{ch} \varphi_s'' - 1) \mp \sqrt{(\operatorname{ch} \varphi_s'' - 1)^2 - 2\varepsilon^3(2\pi m)^4}. \quad (25)$$

Если взаимодействия электронов и поля ЗС нет, то $\varepsilon = 0$ и получаем два значения

$$\cos \psi = \begin{cases} 1 & \text{при верхнем знаке,} \\ \operatorname{ch} \varphi_s'' & \text{при нижнем знаке.} \end{cases} \quad (26)$$

Первое из них определяет две совпадающие волны электронного потока без учета пространственного заряда, $\psi_{1,2} = 0$; при его учете они расщепляются на две волны пространственного заряда – быструю и медленную. Второе значение $\cos \psi$ соответствует двум реактивно затухающим волнам ЗС в полосе запираения; с учетом их пространственных гармоник получим

$$\psi_{3,4} = 2\pi m \pm i\varphi_s''.$$

С ростом параметра усиления ε значения $\cos \psi$ изменяются, однако остаются вещественными вплоть до критической точки, определяемой соотношением

$$\sqrt{2\varepsilon_{\text{кр}}^2(2\pi m)^2} = \operatorname{ch} \varphi_s'' - 1. \quad (27)$$

При $\varepsilon > \varepsilon_{\text{кр}}$ значения $\cos \psi$ комплексны и при этом, по-видимому, возможно усиление электронных волн в полосе запираения ЗС.

Рассмотрим теперь высокочастотную полосу запираения ЗС с нормальной дисперсией основной пространственной гармоники ($\delta = 1$), ближайшую к $\omega_{\text{ЛН}}$ (см. рисунок). Здесь при точном синхронизме

$$\varphi_s = \pi(2m + 1) + i\varphi_s'', \quad \varphi_e = \pi(2m + 1), \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (28)$$

и из (18) получим

$$2(1 - \cos \psi)[\operatorname{ch} \varphi_s'' - \cos \psi] - \varepsilon^3 \pi^4 (2m + 1)^4 = 0, \quad (29)$$

$$\cos \psi = 1 + \frac{1}{2}(\operatorname{ch} \varphi_s'' - 1) \mp \frac{1}{2}\sqrt{(\operatorname{ch} \varphi_s'' - 1)^2 + 2\varepsilon^3 \pi^4 (2m + 1)^4}. \quad (30)$$

В отличие от (25), значения $\cos \psi$ вещественны и, по-видимому, отсутствует усиление для любых ε .

Аналогичные результаты получены для полосы запираения ЗС с аномальной дисперсией основной пространственной гармоники ($\delta = -1$). В низкочастотной полосе запираения справедливы соотношения (28), но ввиду изменения знака δ получаем решение (25) (с учетом $2\pi m \rightarrow \pi(2m + 1)$) и соответствующие выводы о возможном усилении при $\varepsilon > \varepsilon_{\text{кр}}$,

$$\sqrt{2\varepsilon_{\text{кр}}^2 \pi^2 (2m + 1)^2} = \operatorname{ch} \varphi_s'' - 1. \quad (31)$$

В высокочастотной полосе запираания при $\omega \geq \omega_{2\pi a}$ получаем решения, аналогичные (30), $\cos \psi$ является вещественной величиной и усиления, по-видимому, нет.

Сделанные выводы о возможности усиления электронных волн при $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$ можно обосновать, применяя 3-й закон сохранения в электронных потоках [см. [4], приложение VI], из которого в линейной теории следует кинетическая теорема, имеющая следующий вид:

$$P_K(z) - P_K(0) = V_e J_0 \varepsilon \operatorname{Re} IV^*, \quad (32)$$

где $P_K(z)$ – поток кинетической энергии электронов в сечении z ; V_e, J_0 – ускоряющее напряжение и ток пучка. При дискретном взаимодействии из неё для каждой j -й электронной волны можно получить

$$P_{q+1,j} - P_{q,j} = V_e J_0 \exp(-2\psi''_i) \varepsilon \operatorname{Re} I_{q,j} V_{q,j}^*, \quad (33)$$

где $P_{q,j}$ – поток кинетической энергии этой волны в q -м зазоре взаимодействия. Используя первые два соотношения (14) и исключая из них F_q , найдем комплексный импеданс электронной волны $Z_j = I_{q,j}/V_{q,j}$, а также величину

$$\operatorname{Re}(I_{q,j} V_{q,j}^*) = |V_{q,j}|^2 Z_{q,j} = -|V_{q,j}|^2 \operatorname{Re} \frac{a_{23} a_{12} - a_{13}(a_{22} - \lambda_j)}{a_{23}(a_{11} - \lambda_j) - a_{13} a_{21}}, \quad (34)$$

характеризующую изменение её активной мощности на шаге ЗС. Вычислим эту величину в рассматриваемом случае малого пространственного заряда и тонких зазоров взаимодействия, когда матричные коэффициенты определяются выражениями (17), и учитывая, что $\psi \ll 1$, так что $\lambda_j = \exp(i\psi_j) \approx 1 + i\psi_j$. Получим

$$\operatorname{Re} I_{q,j} V_{q,j}^* = -|V_{q,j}|^2 \varepsilon \varphi_e \frac{\psi'_j}{|\psi_j|^2} = -|V_{q,j}|^2 \frac{\eta'_j}{|\eta_j|^2}. \quad (35)$$

Из (33), (35) видно, что при $\psi'_j = \varepsilon \varphi_e \eta'_j > 0$ имеем $P_{q+1,j} - P_{q,j} < 0$, то есть пучок отдает энергию электронной волне, в противном случае – наоборот. В то же время амплитуда волны нарастает в положительном направлении при $\psi''_j < 0$, так как $U_{q+1,j} = U_{q,j} \exp(i(h_e + \psi_j)) = U_{q,j} \exp(i(h_e + \psi'_j)) \cdot \exp(-\psi''_j)$. Полученные выше аналитические решения позволяют проанализировать разные случаи. Для простоты ограничимся ЗС с нормальной дисперсией ($\delta = 1$) основной рабочей пространственной гармонике, рассматривая частоты отсечки, когда реактивного затухания нет, $\varphi''_s = 0$. В этом случае $\varepsilon_{кр} = 0$. На низкочастотной отсечке из формулы (25) получим

$$\psi_j^2 = \mp i \sqrt{2\varepsilon^3 (2\pi m)^4}, \quad \psi_j = \exp(i\frac{\pi}{2}(j + \frac{1}{2})) \cdot 2\pi m \sqrt[4]{2\varepsilon^3}, \quad j = 0, 1, 2, 3. \quad (36)$$

Рассмотрим разные волны.

При $j = 0$ электронный пучок отдает энергию волне ($\psi' > 0$), которая нарастает в отрицательном направлении ($\psi'' > 0$). Этот случай соответствует обратной волне (ЛОВ).

При $j = 1$ электронный пучок забирает энергию у волны ($\psi' < 0$), которая убывает в положительном направлении ($\psi'' > 0$). Этот случай соответствует затухающей прямой волне в ЛБВ.

При $j = 2$ электронный пучок забирает энергию у волны ($\psi' < 0$), поток убывает в отрицательном направлении ($\psi'' < 0$). Этот случай соответствует затухающей обратной волне в ЛОВ.

При $j = 3$ электронный пучок отдает энергию волне ($\psi' > 0$), которая нарастает в положительном направлении ($\psi'' > 0$). Этот случай соответствует усиливаемой прямой волне в ЛБВ. Если теперь взять частоту ниже частоты отсечки, то усиление сохраняется при условии увеличения параметра усиления ε выше критического значения $\varepsilon_{кр}$, определяемого соотношением (27).

С помощью полученных аналитических решений аналогичные исследования электронно-волнового взаимодействия можно провести и на других частотах отсечки ЗС с нормальной и аномальной дисперсией основной пространственной гармоники.

Заключение

Теория ЛБВ, построенная на анализе дискретного электронно-волнового взаимодействия в замедляющих системах, обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным волновым анализом, давая возможность исследования взаимодействия не только в полосах пропускания, но и полосах запирающего ЗС. Это первоначально делалось с использованием эквивалентных схем ЗС, позволивших получить ряд новых физических результатов и разработать алгоритмы и программы для проектирования конкретных конструкций мощных ЛБВ. Применение развитой в последние годы разностной теории возбуждения волноводов дало возможность создать разработанный здесь универсальный метод анализа дискретного электронно-волнового взаимодействия независимо от вида используемой ЗС. Полученные аналитические решения универсального характеристического уравнения электронных волн дают возможность дальнейших исследований усиления в полосах пропускания и запирающего ЗС с применением 3-го закона сохранения в электронном потоке (кинетической теоремы) и путем решения краевых задач.

Исследование осуществлено в рамках Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2013-2014 гг., проект № 12-01-0066.

Библиографический список

1. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по СВЧ электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2003.
2. Пирс Дж.Р. Лампа с бегущей волной / Пер. с англ. под ред. В.Т. Овчарова. М.: «Советское радио», 1952.
3. Вайнштейн Л.А. Электронные волны в замедляющих системах. 4. I. Общая теория, 4. II. Конкретные задачи // ЖТФ. 1956. Т. 26, № 1. С. 126, 141.
4. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973.
5. Лошаков Л.Н. Распространение волн в волноводе при наличии электронного пучка с учетом затухания // ЖТФ. 1953. Т. 23, № 10. С. 1820.
6. Лошаков Л.Н., Пчельников Ю.Н. Теория и расчет усиления лампы с бегущей волной. М.: Сов радио, 1964.

7. Булгакова Л.В., Трубецков Д.И., Фишер В.Л., Шевчик В.Н. Лекции по электронике СВЧ приборов типа О. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1974.
8. Пореш С.Б. Суперлинейные усилители мощности производства СРІ SATCOM // НПО СвязьПроект <http://www.nprosp.ru/articles/detail.php?ID=256>
9. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Сленков А.И. Излучение мощных электронных потоков в резонаторных замедляющих системах. М.: Изд-во МГУ, 1993.
10. Малыхин А.В., Соловьев А.С. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37, № 3. С. 397.
11. Мухин С.В., Солнцев В.А. Описание взаимодействия в ЛБВ с цепочкой связанных резонаторов на основе волноводно-резонаторной модели // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33, № 6.
12. Вайнштейн Л.А. Электронные волны в периодических структурах // ЖТФ. 1957. Т. 27, № 10. С. 2340.
13. Аркадакский С.С., Цикин Б.Г. Уравнения возбуждения однородных волноведущих систем на частоте отсечки // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21, № 3. С. 608.
14. Солнцев В.А., Кравченко Н.П. Волновая линейная теория ЛБВ вблизи границы полосы прозрачности // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23, № 5. С. 1103.
15. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П. О характере неустойчивости в ЛБВ вблизи границы полосы пропускания // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23, № 9. С. 1104.
16. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рожнев А.Г., Блохина Е.В., Булгакова Л.В. Волновая теория ЛБВ вблизи границы полосы пропускания // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 6. С. 399.
17. Солнцев В.А., Мухин С.В. Разностная форма теории возбуждения периодических волноводов // РЭ. 1991. Т. 36, № 11. С. 2161.
18. Солнцев В.А., Колтунов Р.П. Обобщенная линейная теория дискретного электронно-волнового взаимодействия в замедляющих системах // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 11. С. 1362.
19. Назарова М.В., Солнцев В.А., Колтунов Р.П., Шабанов Д.С. Исследование дискретного электронно-волнового взаимодействия в полосах пропускания и запираания замедляющих систем // Изв. вузов. ПНД. 2012. Т. 20, № 3. С. 118.
20. Солнцев В.А. Характеристическое уравнение и свойства электронных волн в периодических структурах // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, № 12. С.1312.
21. Солнцев В.А., Колтунов Р.П. Анализ уравнений дискретного электронно-волнового взаимодействия и группировки электронных потоков в периодических и псевдопериодических замедляющих системах // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 6. С. 738.
22. Солнцев В.А. Возбуждение однородных и периодических волноводов сторонними токами // ЖТФ. 1968. Т. 38, № 1. С. 100.
23. Осин А.В., Солнцев В.А. Электронные волны в запредельных периодических структурах // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24, № 7. С. 1380.

Московский институт электроники
и математики Национального исследова-
тельского университета
«Высшая школа экономики»

Поступила в редакцию 4.02.2013

**BY THE THEORY OF THE ELECTRON WAVES
AND THE DISCRETE ELECTRON-WAVE INTERACTION
IN THE STOPBANDS OF THE SLOW-WAVE SYSTEMS**

V. A. Solntsev

The role of the discrete description of electron-wave interaction in high-power traveling wave tubes is shown. Deals with the development of this trend on the basis of the theory of interaction of the difference equation excitation waveguides. The validity of the linear theory and developed a universal characteristic equation of electron waves, using the difference equation excitation waveguides in stopbands of slow-wave systems. Synchronous interaction of the electrons with the field stopband sections slow-wave systems characteristic equation reduces to biquadratic, analytical solutions which allow to analyze the properties of electron waves and amplification of the signal into the stopband section.

Keywords: Slow-wave system, electron beam, interaction, TWT, passband, stopband.

Солнцев Виктор Анатольевич – родился в Москве (1931). Окончил Московский гос. университет, физический ф-т (1953), аспирантуру МГУ (1957), к.ф.-м.н. (1960), д.ф.-м.н. (1973), профессор(1979). С 1973 года – заведующий кафедрой Московского государственного института электроники и математики (МИЭМ), ныне профессор МИЭМ НИУ ВШЭ. Научные интересы в области электроники и радиофизики СВЧ. Автор более 250 научных трудов и 20 изобретений по усилению и генерации СВЧ колебаний, теории, методам и программам проектирования электронных приборов СВЧ, вакуумной микро-и наноэлектронике. В их числе изобретение и разработка многолучевых ламп обратной волны (1956, с А.С. Тагером, А.А. Негиревым и др.), явившихся основой для создания первой в мире серии генераторов, перекрывающих мм и субмм волны, книга «Лекции по сверхвысокочастотной электронике» (1973, с Л.А. Вайнштейном). Руководитель КЦП «Функционально – ориентированная электроника СВЧ» (1984–1989), объединявшей 10 вузов, ряд НИИ АН СССР и промышл. Рук. ведущей научной школы России, поддержанной грантами Президента РФ (1996–2005), организатор постоянно действующего с 1973г. Междунар. семинара «Проблемы электроники». В разные годы член 4-х дисс. советов, редколлегий журналов «Радиотехника и электроника» и «Зарубежная радиоэлектроника», член 2-х научных советов РАН, консультант «Физической энциклопедии» (1988–1998) и энцикл. словаря «Электроника» (1990). Заслуженный деятель науки РФ (1999), почетный член Российского НТО РЭС им. А.С. Попова (1999), «Почетный радист» (1980), «Почетный работник высшего проф. образования РФ» (2001).



109028 Москва, Бол. Трехсвятительский пер., 3
Московский институт электроники и математики
Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»
E-mail: soln05@miem.edu.ru



НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ С БЫСТРЫМИ И МЕДЛЕННЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ. ИЗМЕНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ДЛЯ БЫСТРЫХ ДВИЖЕНИЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ МЕДЛЕННЫХ*

П. С. Ланда, В. Г. Ушаков

На примере стохастического резонанса рассматривается влияние медленной компоненты движения на быструю компоненту. Показано, что в стохастических системах это влияние сводится к изменению эффективных параметров быстрой и медленной компонент движения, а также распределения вероятностей для быстрой компоненты. Показано также, что найденное изменение обладает свойством мультифрактальной универсальности.

Ключевые слова: Нелинейные стохастические системы, быстрые и медленные процессы, влияние медленных процессов на распределение вероятностей для быстрых процессов.

Введение

Разделение систем и движений на быстрые и медленные известно давно. Такое разделение использовалось в различных применениях, но главным образом в атомной физике, механике и теории колебаний. Из ряда экспериментов [1–4], известно, что медленные процессы (регулярные или случайные) могут существенно влиять на быстрые процессы, в частности, на их распределение вероятностей. Этот же результат следует из теоретического рассмотрения ряда примеров различной физической природы, например, стохастического резонанса [5, 6], броуновского движения [7] и альфа-распада [8]. Интересно, что получаемые результаты обладают свойством скейлинга (scaling), называемым также мультифрактальностью, то есть в соответствующем масштабе являются одинаковыми. Это в неявном виде отмечено в экспериментальных работах, описанных в книге [9].

В литературе (см., например [10]), в основном рассматривается влияние быстрых процессов (главным образом, высокочастотной вибрации) на медленные, существенно изменяющее поведение медленных процессов. Это описание основано

*Статья написана по материалам доклада на IX Всероссийской научной конференции «Нелинейные колебания механических систем», Нижний Новгород, Россия, 24–29 сентября 2012.

на большом количестве экспериментов. Однако известны теоретические и экспериментальные работы (см. например, [11] и множество экспериментальных работ С.Э. Шноля с соавторами [9]), в которых описывается обратное влияние. Такое влияние является темой настоящей статьи. Она основана на трех известных фактах, главным образом, экспериментальных, казалось бы, не связанных между собой.

- В 1960–1970-х годах вышли работы сотрудников ЦАГИ Е.В. Власова и А.С. Гиневского [3, 12], где были описаны результаты экспериментов по управлению турбулентностью акустическим воздействием. Очевидно, что акустическое воздействие в некоторой области частот может рассматриваться как медленное по сравнению с турбулентными возмущениями. Было показано, что в определенной области частот воздействия уровень турбулентности сначала существенно понижается при повышении частоты, но затем начинает опять расти. тогда как в области высоких частот он вначале повышается, а затем остается постоянным. Для практических целей особенно важно уменьшение турбулентности. Никаких убедительных физических объяснений наблюдаемых эффектов в литературе мы не знаем.
- Изменение распределения вероятностей при стохастическом резонансе для быстрой составляющей процесса [6, 13]. Это явление было обнаружено в указанных работах, но поскольку эти работы были посвящены изменению динамических параметров систем под влиянием шума, нашего внимания оно не привлекло.
- Влияние вращения Земли и других космических процессов на скорости некоторых случайных процессов, например, броуновского движения [7], радиоактивного распада [1, 2, 8] и др.

Остановимся более детально на стохастическом резонансе.

1. Стохастический резонанс как один из примеров влияния медленных процессов на быстрые

Работы [6, 13] показали, что механизм стохастического резонанса связан с изменением параметров системы (жесткости и коэффициента трения) под действием шума, причем никакого резонанса в общепринятом смысле там нет. В свою очередь, это изменение параметров приводит к изменению плотности вероятности для случайной составляющей процесса.

Одним из наиболее интересных результатов этих работ является обнаруженная универсальность наблюдаемых явлений, то есть независимость от природы системы и масштаба времени. Такая универсальность называется мультифрактальной [14, 15]. Следует отметить, что о наличии универсальности для всех процессов, наблюдаемых С.Э. Шнолем с коллегами, достаточно подробно написано в книге [9].

Понятие стохастического резонанса было впервые введено в 1981 году [16] с целью объяснения близкой к периодической (с периодом примерно 100 000 лет) последовательности появления ледниковых периодов. Одной из причин такой последовательности может быть изменение эксцентриситета земной орбиты с этим же периодом.

Первые попытки дать хоть какое-то теоретическое объяснение этого явления (см. [16]) были сделаны на основе очень простой модели (в духе последних работ Ю.И. Неймарка [17]) – грубого нелинейного уравнения для изменения температуры поверхности Земли при слабом периодическом изменении температуры воздуха в предположении, что температура поверхности Земли имеет два устойчивых состояния равновесия, одно из которых соответствует оледенению, а другое – таянию.

В простейшем случае это уравнение можно записать так

$$\dot{x} + f(x) = A \cos \omega t + \xi(t), \quad (1)$$

где $f(x) = x^3 - x$. При слабом периодическом воздействии переходы из одного устойчивого состояния в другое невозможны. Добавление малого белого шума делает эти переходы вполне вероятными. Такие процессы представляют собой переходы через потенциальный барьер, или туннельный эффект [18]. Заметим, что классический туннельный эффект по своим проявлениям аналогичен квантовому.

Предполагая, что $x(t)$ является нечетной функцией времени, можно представить его в виде

$$x(t) = s(t) + n(t), \quad (2)$$

где

$$s(t) = \langle x(t) \rangle = \sum_{k=0}^{\infty} B_{2k+1} \cos\left((2k+1)\omega t + \psi(K, \omega, A)\right), \quad (3)$$

$$\langle n(t) \rangle = -\langle n(t) \rangle = 0.$$

Отношение B_1 к A мы называем коэффициентом усиления и обозначаем $Q(K, \omega, A)$.

Численное решение уравнения (1) показывает, что коэффициент усиления $Q(K, \omega, A)$ и фазовый сдвиг $\psi(K, \omega, A)$ являются немонотонными функциями интенсивности шума K . Значение Q максимально при некотором значении K , которое тем больше, чем выше частота сигнала. Зависимость Q от K при фиксированных значениях частоты и амплитуды напоминает резонансную зависимость амплитуды некоторого осциллятора от частоты внешней силы. Так как K определяет среднюю частоту скачков из одной ямы в другую, вызванных случайными переходами через потенциальный барьер, многие исследователи первоначально предполагали, что зависимость Q от K должна иметь максимум, когда период сигнала равен удвоенному среднему времени первого перехода через потенциальный барьер. Однако, очевидно, что этого быть не может. Если бы это было верно, то Q должно было бы иметь максимум не только при изменении K , но и при изменении ω . Однако известно, что при увеличении ω значение Q монотонно уменьшается.

Как показано в работах [6, 13], причины резонансноподобной зависимости Q от K заключены в изменении эффективных параметров системы под влиянием шума. Чтобы рассчитать эти эффективные параметры, представим решение уравнения (1) в форме (2), подставим (2) в (1) и разобьем это уравнение на два, так что одно из них будет описывать величины, усредненные по статистическому ансамблю, а второе – отклонения от этих усредненных значений. Так как при $s = 0$ все нечетные моменты $m_j = \langle n^j \rangle$ должны равняться нулю, мы можем задать приближенно третий момент в виде

$$m_3 = as + b\dot{s}, \quad (4)$$

где a и b – неизвестные функции K и ω , которые вычислим ниже. Принимая это во внимание, запишем уравнения для $s(t)$ и $n(t)$ как

$$(1 + b)\dot{s} + cs + s^3 = A \cos \omega t, \quad (5)$$

$$\dot{n} + (3s^2 - 1)n + n^3 + (3n^2 - 1 - c)s - b\dot{s} = \xi(t), \quad (6)$$

где b – вызванная шумом добавка к коэффициенту затухания, а эффективная жесткость

$$c = 3m_2 - 1 + a. \quad (7)$$

Отметим, что такое разделение одного исходного уравнения на два подобно разделению движений на медленные и быстрые, предложенному И.И. Блехманом [10]. Только мы разделяем движения на регулярные и случайные. Как отмечено Блехманом, такое разделение не является однозначным, но это не мешает решению задачи.

Чтобы рассчитать моменты m_j и эффективные параметры a , b и c , используем уравнение Фоккера–Планка, соответствующее уравнению Ланжевена (6). В линейном приближении по $s(t)$ и $\dot{s}(t)$ это уравнение имеет вид

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial n} \left\{ \left[n^3 - n + (3n^2 - 1 - c)s - b\dot{s} \right] w \right\} + \frac{K}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial n^2}. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) удобно искать в виде суммы трех составляющих: основной ($w_0(n) \sim 1$) и двух маленьких ($w_1(n) \sim w_2(n) \sim \varepsilon$)

$$w(n, t) = w_0(n) + \varepsilon \left(w_1(n)s(t) + w_2(n)\dot{s}(t) \right). \quad (9)$$

Первая составляющая описывает распределение вероятностей для быстрого случайного процесса $n(t)$ в отсутствие медленного, а остальные две определяют изменение этого распределения за счет медленных процессов $s(t)$ и $\dot{s}(t)$.

Поскольку в линейном приближении $s(t)$ является гармоническим сигналом частоты ω , имеем $\ddot{s}(t) = -\omega^2 s(t)$. Принимая это во внимание, подставляя (9) в (8) и ограничиваясь членами первого порядка по ε , получаем следующие уравнения для $w_0(n)$, $w_1(n)$ и $w_2(n)$:

$$\frac{K}{2} \frac{\partial w_0}{\partial n} + (n^3 - n)w_0 = 0, \quad (10)$$

$$w_1 - \left(\frac{d}{dn} \left((n^3 - n)w_2 \right) + \frac{K}{2} \frac{d^2 w_2}{dn^2} \right) = b \frac{dw_0}{dn}, \quad (11)$$

$$-\omega^2 w_2 - \left(\frac{d}{dn} \left((n^3 - n)w_1 \right) + \frac{K}{2} \frac{d^2 w_1}{dn^2} \right) = -\frac{d}{dn} \left((3n^2 - 1 - c)w_0 \right).$$

Решение уравнения (10), обращающееся в нуль при $n = \pm\infty$, имеет вид

$$w_0(n) = C \exp \left(\frac{n^2}{K} - \frac{n^4}{2K} \right), \quad (12)$$

где нормировочная постоянная C зависит от K . Например, $C = 0.008078503537$ для $K = 0.1$ и $C = 0.06591872565$ для $K = 0.2$.

Зная $w_0(n)$, можем вычислить дисперсию шума как функцию K

$$m_2(K) = \int_{-\infty}^{\infty} n^2 w_0(n) dn. \quad (13)$$

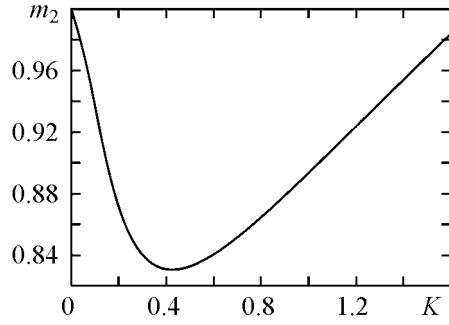


Рис. 1. Зависимость m_2 от интенсивности шума K

Зависимость m_2 от K показана на рис. 1. Видно, что при некотором значении K дисперсия шума $m_2 = \langle n^2 \rangle$ минимальна.

Интегрируя уравнения (11) по n от $-\infty$ до ∞ и принимая во внимание, что функции $w_0(n)$, $w_1(n)$ и $w_2(n)$ должны обращаться в нуль при $|n| \rightarrow \infty$, находим

$$\int_{-\infty}^{\infty} w_{1,2}(n) dn = 0. \quad (14)$$

Легко видеть, что условию (14) удовлетворяют нечетные функции $w_1(n)$ и $w_2(n)$, то есть функции, для которых справедливы следующие начальные условия:

$$w_{1,2}(0) = 0. \quad (15)$$

Из условия $\langle n \rangle = 0$ и выражения (4) для третьего момента, с учетом (7), получаем следующие соотношения:

$$\int_{-\infty}^{\infty} n w_1(n) dn = \int_{-\infty}^{\infty} n w_2(n) dn = 0, \quad (16)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} n^3 w_1(n) dn = c + 1 - 3m_2, \quad \int_{-\infty}^{\infty} n^3 w_2(n) dn = b,$$

где $w_1(n)$ и $w_2(n)$ – решения уравнений (11). Легко видеть, что соотношения (16) могут быть совместными, только если функции $w_1(n)$ и $w_2(n)$ будут содержать произвольные постоянные.

Общее решение неоднородных уравнений (11) имеет вид

$$w_1(n) = w_{1in}(n) + w_{1h}(n), \quad w_2(n) = w_{2in}(n) + w_{2h}(n), \quad (17)$$

где $w_{1in}(n)$ и $w_{2in}(n)$ – частные решения неоднородных уравнений (11), определяемые правыми частями этих уравнений. Их удобно представить в виде суммы трех слагаемых

$$\begin{aligned} w_{1in}(n) &= w_{11in}(n) + c w_{12in}(n) + b w_{13in}(n), \\ w_{2in}(n) &= w_{21in}(n) + c w_{22in}(n) + b w_{23in}(n). \end{aligned} \quad (18)$$

В формуле (17) $w_{1h}(n)$ и $w_{2h}(n)$ – частные решения однородных уравнений (11), которые могут быть представлены в виде линейной комбинации двух независимых частных решений

$$w_{1h}(h) = C_1 w_{11h}(n) + C_2 w_{12h}(n), \quad w_{2h}(n) = C_1 w_{21h}(n) + C_2 w_{22h}(n). \quad (19)$$

Интегрируя теперь уравнения (11) по n от 0 до ∞ , с учетом (17), (18) и (19), получаем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} w_{11in}(n) dn - \frac{K}{2} \frac{dw_{21in}(n)}{dn} \Big|_{n=0} &= 0, \\ \int_0^{\infty} w_{12in}(n) dn - \frac{K}{2} \frac{dw_{22in}(n)}{dn} \Big|_{n=0} &= 0, \\ \int_0^{\infty} w_{13in}(n) dn - \frac{K}{2} \frac{dw_{23in}(n)}{dn} \Big|_{n=0} &= -w_0(0), \\ -\omega^2 \int_0^{\infty} w_{21in}(n) dn - \frac{K}{2} \frac{dw_{11in}(n)}{dn} \Big|_{n=0} &= -w_0(0), \\ -\omega^2 \int_0^{\infty} w_{22in}(n) dn - \frac{K}{2} \frac{dw_{12in}(n)}{dn} \Big|_{n=0} &= -w_0(0), \\ -\omega^2 \int_0^{\infty} w_{23in}(n) dn - \frac{K}{2} \frac{dw_{13in}(n)}{dn} \Big|_{n=0} &= 0, \end{aligned} \quad (20)$$

где $w_0(0) = C(K)$. Эти соотношения позволяют, в принципе, найти недостающие начальные условия для уравнений (11). Из (20) находим

$$\begin{aligned} \frac{dw_{11in}(n)}{dn} \Big|_{n=0} &= \frac{2C(K)}{K} - \frac{2\omega^2}{K} \int_0^{\infty} w_{21in}(n) dn = 0, \\ \frac{dw_{12in}(n)}{dn} \Big|_{n=0} &= \frac{2C(K)}{K} - \frac{2\omega^2}{K} \int_0^{\infty} w_{22in}(n) dn, \\ \frac{dw_{13in}(n)}{dn} \Big|_{n=0} &= -\frac{2\omega^2}{K} \int_0^{\infty} w_{23in}(n) dn, \\ \frac{dw_{21in}(n)}{dn} \Big|_{n=0} &= \frac{2}{K} \int_0^{\infty} w_{11in}(n) dn, \\ \frac{dw_{22in}(n)}{dn} \Big|_{n=0} &= \frac{2}{K} \int_0^{\infty} w_{12in}(n) dn, \\ \frac{dw_{23in}(n)}{dn} \Big|_{n=0} &= \frac{2C(K)}{K} + \frac{2}{K} \int_0^{\infty} w_{13in}(n) dn. \end{aligned} \quad (21)$$

Следует заметить, что эти начальные условия являются неявными. (Ссылки на решение дифференциальных уравнений с неявными начальными условиями мы не знаем.)

Подставляя дальше (16), с учетом (18) и (19), в уравнения (11) и приравнявая коэффициенты при c , b , C_1 и C_2 , находим следующие дифференциальные уравнения для $w_{11in}(n)$, $w_{12in}(n)$, $w_{13in}(n)$, $w_{21in}(n)$, $w_{22in}(n)$, $w_{23in}(n)$, $w_{11h}(n)$, $w_{12h}(n)$, $w_{21h}(n)$ and $w_{22h}(n)$:

$$\begin{aligned}
w_{11in}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{21in}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{21in}(n)}{dn^2} &= 0, \\
w_{12in}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{22in}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{22in}(n)}{dn^2} &= 0, \\
w_{13in}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{23in}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{23in}(n)}{dn^2} &= \frac{dw_0(n)}{dn}, \\
-\omega^2 w_{21in}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{11in}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{11in}(n)}{dn^2} &= -\frac{d}{dn} \left((3n^2 - 1) w_0(n) \right), \\
-\omega^2 w_{22in}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{12in}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{12in}(n)}{dn^2} &= \frac{dw_0(n)}{dn}, \\
-\omega^2 w_{23in}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{13in}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{13in}(n)}{dn^2} &= 0,
\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
w_{11h}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{21h}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{21h}(n)}{dn^2} &= 0, \\
w_{12h}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{22h}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{22h}(n)}{dn^2} &= 0, \\
-\omega^2 w_{21h}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{11h}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{11h}(n)}{dn^2} &= 0, \\
-\omega^2 w_{22h}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{12h}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{12h}(n)}{dn^2} &= 0.
\end{aligned} \tag{23}$$

Уравнения (22) должны быть решены с начальными условиями (15) и (21), тогда как уравнения (23) можно решать с любыми начальными условиями.

Чтобы решить уравнения (22) с неявными начальными условиями (21), введем новые переменные

$$\begin{aligned}
W_{11}(n) &= \int_0^n w_{11in}(n) dn, & W_{12}(n) &= \int_0^n w_{12in}(n) dn, & W_{13}(n) &= \int_0^n w_{13in}(n) dn, \\
W_{21}(n) &= \int_0^n w_{21in}(n) dn, & W_{22}(n) &= \int_0^n w_{22in}(n) dn, & W_{23}(n) &= \int_0^n w_{23in}(n) dn.
\end{aligned} \tag{24}$$

С учетом этих переменных уравнения (22) с начальными условиями (21) принимают вид

$$\begin{aligned}
w_{11\text{in}}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{21\text{in}}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{21\text{in}}(n)}{dn^2} &= 0, \\
w_{12\text{in}}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{22\text{in}}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{22\text{in}}(n)}{dn^2} &= 0, \\
w_{13\text{in}}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{23\text{in}}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{23\text{in}}(n)}{dn^2} &= \frac{dw_0(n)}{dn}, \\
-\omega^2 w_{21\text{in}}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{11\text{in}}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{11\text{in}}(n)}{dn^2} &= -\frac{d}{dn} \left((3n^2 - 1) w_0(n) \right), \\
-\omega^2 w_{22\text{in}}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{12\text{in}}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{12\text{in}}(n)}{dn^2} &= \frac{dw_0(n)}{dn}, \\
-\omega^2 w_{23\text{in}}(n) - \frac{d}{dn} \left((n^3 - n) w_{13\text{in}}(n) \right) - \frac{K}{2} \frac{d^2 w_{13\text{in}}(n)}{dn^2} &= 0, \\
\frac{dW_{11}(n)}{dn} = w_{11\text{in}}(n), \quad \frac{dW_{12}(n)}{dn} = w_{12\text{in}}(n), \quad \frac{dW_{13}(n)}{dn} = w_{13\text{in}}(n), \\
\frac{dW_{21}(n)}{dn} = w_{21\text{in}}(n), \quad \frac{dW_{22}(n)}{dn} = w_{22\text{in}}(n), \quad \frac{dW_{23}(n)}{dn} = w_{23\text{in}}(n);
\end{aligned} \tag{25}$$

$$w_{11\text{in}}(0) = w_{12\text{in}}(0) = w_{13\text{in}}(0) = w_{21\text{in}}(0) = w_{22\text{in}}(0) = w_{23\text{in}}(0) = 0,$$

$$\begin{aligned}
\left. \frac{dw_{11\text{in}}(n)}{dn} \right|_{n=0} &= \frac{2C(K)}{K} - \frac{2\omega^2}{K} W_{21}(\infty), \\
\left. \frac{dw_{12\text{in}}(n)}{dn} \right|_{n=0} &= \frac{2C(K)}{K} - \frac{2\omega^2}{K} W_{22}(\infty), \\
\left. \frac{dw_{13\text{in}}(n)}{dn} \right|_{n=0} &= \frac{2C(K)}{K} - \frac{2\omega^2}{K} W_{23}(\infty), \\
\left. \frac{dw_{21\text{in}}(n)}{dn} \right|_{n=0} &= \frac{2}{K} W_{11}(\infty), \\
\left. \frac{dw_{22\text{in}}(n)}{dn} \right|_{n=0} &= \frac{2}{K} W_{12}(\infty), \\
\left. \frac{dw_{23\text{in}}(n)}{dn} \right|_{n=0} &= -\frac{2}{K} W_{13}(\infty).
\end{aligned} \tag{26}$$

Графики функций $w_{11\text{in}}(n)$, $w_{21\text{in}}(n)$, $w_{12\text{in}}(n)$, $w_{22\text{in}}(n)$, $w_{13\text{in}}(n)$, $w_{23\text{in}}(n)$ для $\omega = 0.1$, (1) $K = 0.1$ и (2) $K = 0.2$ показаны на рис. 2.

Следует отметить, что функции $w_{11\text{in}}(n)$, $w_{21\text{in}}(n)$, $w_{12\text{in}}(n)$, $w_{22\text{in}}(n)$, $w_{13\text{in}}(n)$, $w_{23\text{in}}(n)$, $w_{11\text{h}}(n)$, $w_{21\text{h}}(n)$, $w_{12\text{h}}(n)$ и $w_{22\text{h}}(n)$ обращаются в нуль при больших n , несмотря на то, что мы решали не краевую задачу, а задачу Коши.

Частные решения однородных уравнений (23) $w_{11\text{h}}(n)$, $w_{21\text{h}}(n)$, $w_{12\text{h}}(n)$ и $w_{22\text{h}}(n)$ с начальными условиями $w_{11\text{h}}(0) = w_{21\text{h}}(0) = w_{12\text{h}}(0) = w_{22\text{h}}(0) = 0$, $dw_{12\text{h}}(n)/dn|_{n=0} = dw_{22\text{h}}(n)/dn|_{n=0} = 0$, $dw_{11\text{h}}(n)/dn|_{n=0} = 1$, $dw_{22\text{h}}(n)/dn|_{n=0} = 5$ при $\omega = 0.1$ и $K = 0.1$ показаны на рис. 3.

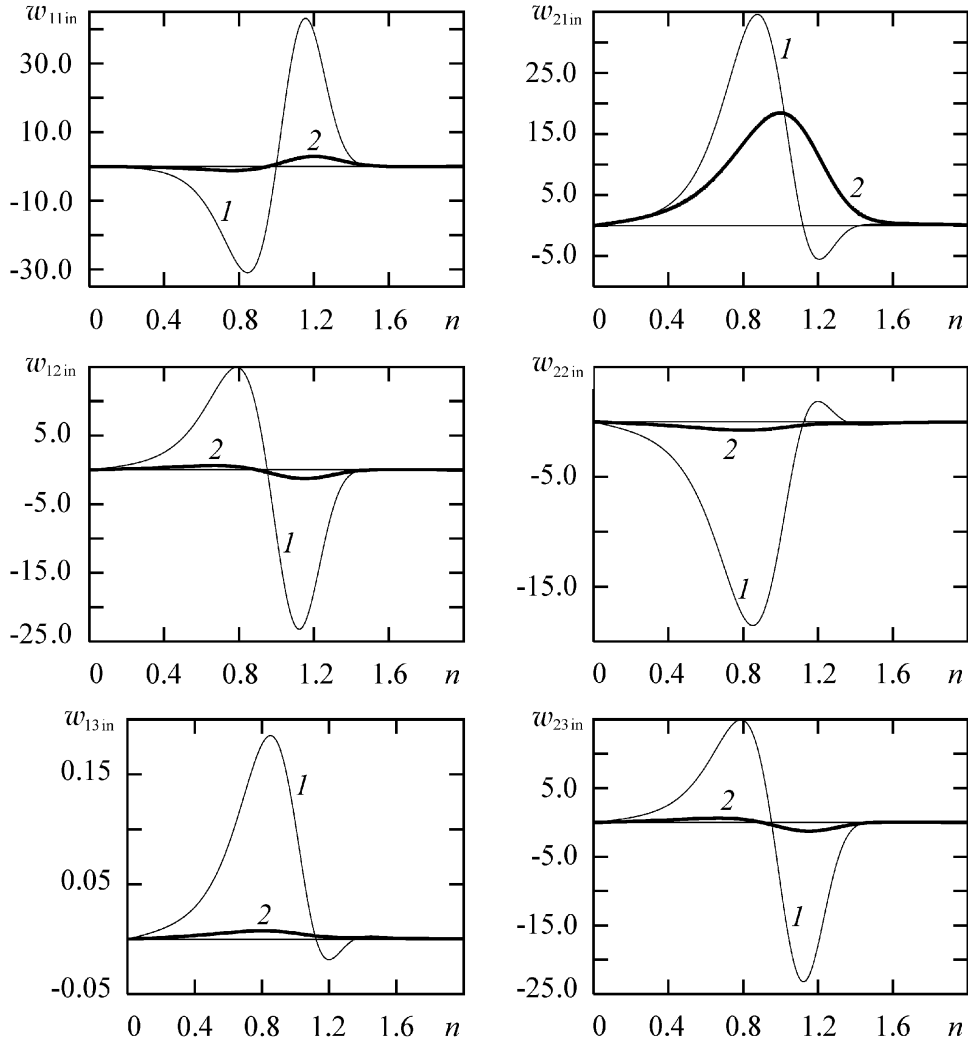


Рис. 2. Частные решения $w_{11in}(n)$, $w_{21in}(n)$, $w_{12in}(n)$, $w_{22in}(n)$, $w_{13in}(n)$ и $w_{23in}(n)$ уравнений (22) с нулевыми начальными условиями для $\omega = 0.1$ и $K = 0.1$

Уравнения для неизвестных c , b и a можно найти из условий равенства нулю первого и третьего моментов. Принимая во внимание (7), (17) и (20), мы получаем следующие уравнения:

$$\begin{aligned}
 & \int_{-\infty}^{\infty} n \left(w_{11in}(n) + w_{12in}(n)c + w_{13in}(n)b + w_{11h}(n)C_1 + w_{12h}(n)C_2 \right) dn = 0, \\
 & \int_{-\infty}^{\infty} n \left(w_{21in}(n) + w_{22in}(n)c + w_{23in}(n)b + w_{21h}(n)C_1 + w_{22h}(n)C_2 \right) dn = 0, \\
 & \int_{-\infty}^{\infty} n^3 \left(w_{11in}(n) + w_{12in}(n)c + w_{13in}(n)b + w_{11h}(n)C_1 + w_{12h}(n)C_2 \right) dn = c+1-3m_2, \\
 & \int_{-\infty}^{\infty} n^3 \left(w_{21in}(n) + w_{22in}(n)c + w_{23in}(n)b + w_{21h}(n)C_1 + w_{22h}(n)C_2 \right) dn = b.
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

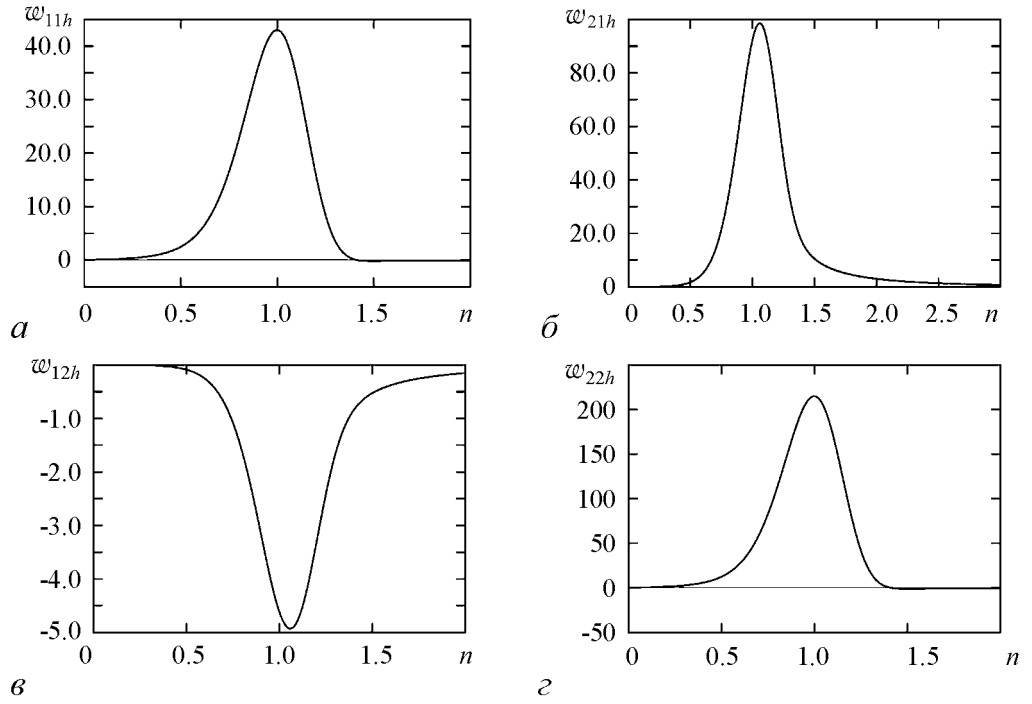


Рис. 3. Частные решения $w_{11h}(n)$, $w_{21h}(n)$, $w_{12h}(n)$ и $w_{22h}(n)$ с начальными условиями $w_{11h}(0) = w_{21h}(0) = w_{12h}(0) = w_{22h}(0) = dw_{12h}(n)/dn|_{n=0} = dw_{22h}(n)/dn|_{n=0} = 0$, $dw_{11h}(n)/dn|_{n=0} = 1$, $dw_{22h}(n)/dn|_{n=0} = 5$ при $\omega = 0.1$ и $K = 0.1$

Зная c , b , $w_{11in}(n)$, $w_{12in}(n)$, $w_{13in}(n)$, $w_{21in}(n)$, $w_{22in}(n)$, $w_{23in}(n)$, $w_{11h}(n)$, $w_{12h}(n)$, $w_{21h}(n)$ и $w_{22h}(n)$, можно рассчитать, исходя из формул (9) и (17), полное распределение вероятностей $w(n, t)$ и его изменение $\Delta w(n, t)$, которые определяются следующими выражениями:

$$w(n, t) = w_0(n) + \Delta w(n, t), \quad (28)$$

$$\Delta w(n, t) = \varepsilon \left(w_1(n) s(t) + w_2(n) \dot{s} \right), \quad (29)$$

где $w_1(n)$ и $w_2(n)$ определяются формулами (18). Будем делать это в предположении нулевых начальных условий для уравнений (23). В этом случае $w_{11h}(n)$, $w_{12h}(n)$, $w_{21h}(n)$ и $w_{22h}(n)$ равны нулю и выражения (28) и (29) могут быть переписаны как

$$w(n, t) = w_0(n) + \Delta w(n, t), \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \Delta w(n, t) = \varepsilon \left(w_{11in}(n) + c w_{12in}(n) + b w_{13in}(n) \right) A \cos \omega t - \\ - \omega^2 \left(w_{21in}(n) + c w_{22in}(n) + b w_{23in}(n) \right) A \sin \omega t. \end{aligned} \quad (31)$$

Отсюда видно, что как полное распределение вероятностей $w(n, t)$, так и его изменение $\Delta w(n, t)$ периодически зависят от времени.

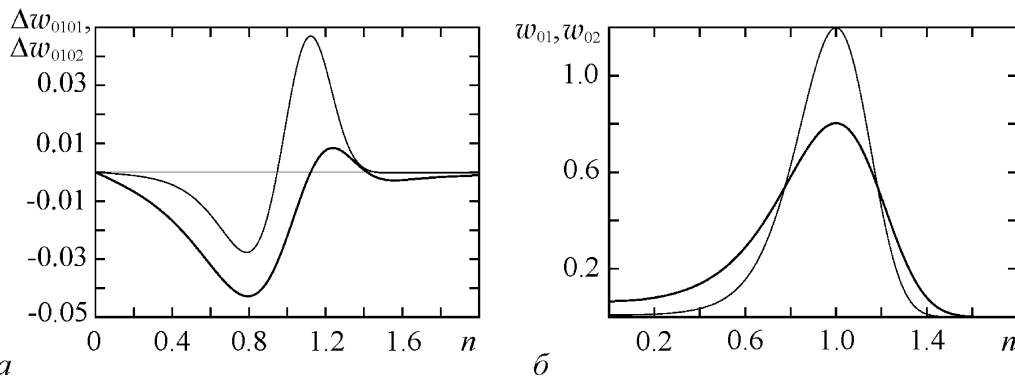


Рис. 4. *a* – Зависимости $\Delta w(n, t)$ от n для $\omega = 0.1$, $A = 0.1$, $K = 0.1$ (тонкие линии) и $\omega = 0.1$, $A = 0.1$, $K = 0.2$ (жирные линии); *б* – зависимости $w(n, t)$ для тех же значений K

Примеры зависимостей $w(n, t)$ и $\Delta w(n, t)$ от n для $\omega = 0.1$, $A = 0.1$, $K = 0.1$ (1) и $\omega = 0.1$, $A = 0.1$, $K = 0.2$ (2) показаны на рис. 4. Видно, что медленный сигнал $s(t)$ существенно изменяет форму распределения вероятностей и уменьшает его размах.

Заключение

Рассмотренный простейший пример стохастического резонанса показал, что медленное регулярное (периодическое) воздействие на систему с шумом (быстрыми флуктуациями) существенно изменяет распределение вероятностей для шумов (см. рис. 4, *a*). Величина этого изменения зависит от амплитуды и частоты медленного воздействия. Это хорошо видно из сравнения распределений вероятности с медленным воздействием (см. рис. 4, *a*) и без него (см. рис. 4, *б*).

Библиографический список

1. Jenkins J.H., Fischbach E., Buncher J.B., Gruenwald J.T., Krause D.E., Mattes J.J. Evidence of correlations between nuclear decay rates and Earth-Sun distance // *Astroparticle Physics*. 2009. Vol. 32. P. 42.
2. Cramer J.G. Radioactive Decay and the Earth-Sun Distance // *Analog Science Fiction & Fact Magazine*. 2009, Vol. 129.
3. Vlasov E.B., Гиневский А.С. Генерация и подавление турбулентности в осесимметричной турбулентной струе при акустическом воздействии // *Механика жидкости и газа*. 1973, № 6. С. 37.
4. Landa P.S., Ginevsky A.S. Control of Turbulence in Jets by Acoustic Means // *Proc. Int. Conf. Physics and Control*, St. Petersburg, IEEE, 2003. P. 372.
5. Landa P.S. *Regular and Chaotic Oscillations*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.
6. Ланда П.С. Механизм стохастического резонанса // *ДАН*. 2004. Т. 399, № 4. С. 1.
7. Ланда П.С., Власов В.А. Аналитическое рассмотрение влияния космических

- факторов на флуктуации скоростей броуновских частиц // Изв. вузов ПНД. 2011. Т. 19, № 2. С. 56.
8. Шноль С.Э., Ланда П.С., Власов В.А. Влияние космических факторов на скорость альфа-распада // Вестник научно-технического развития. 2011. Т. 42, № 2. С. 1.
 9. Шноль С.Э. Космофизические факторы в случайных процессах. Svenska Fisikarkivet, 2009.
 10. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Наука, 1994. 400 с.
 11. Дыхне А.М., Крайнов В.П. Быстрые и медленные подсистемы в атомной физике. Азбука, 2002. 217 с.
 12. Vlasov Ye.V. and Ginevsky A.S. Acoustic modification of the aerodynamic characteristics of a turbulent jet // Fluid Dynamics. 1967. Vol. 2, № 4. P. 93.
 13. Landa P.S., Ushakov V., Kurths J. Rigorous theory of stochastic resonance in overdamped bistable oscillators for weak signals // Chaos, Solitons & Fractals. 2006. Vol. 30. P. 574.
 14. Mandelbrot B.B. Fractals: Form, Chance and Dimension. San Francisco: Freeman Comp., 1977.
 15. Mandelbrot B.B. and Freeman W.H. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco: Freeman Comp., 1983.
 16. Nicolis G. and Nicolis C. Stochastic aspects of climate transitions and additive fluctuations // Tellus. 1981. Vol. 33. P. 225.
 17. Неймарк Ю.И. Математическое моделирование как наука и искусство. Н.Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2010.
 18. Понтрягин Л.С., Андронов А.А., Витт А.А. О статистическом рассмотрении динамических систем. Андронов А.А. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1956.

*Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова*

Поступила в редакцию 5.10.2012

**NONLINEAR SYSTEMS WITH FAST AND SLOW MOTIONS.
THE CHANGE OF THE PROBABILITY DISTRIBUTION
OF FAST MOTIONS INFLUENCED BY SLOW ONES**

P. S. Landa, V. G. Ushakov

The influence of slow processes (random or regular) on the probability distribution of fast random processes is considered. We show that such influence is universal for all random processes, and in some cases this universality is of the multifractal character. As an example we consider stochastic resonance.

Keywords: Probability distribution, random processes, stochastic resonance.

Ланда Полина Соломоновна – окончила физический факультет МГУ. Защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в МГУ и доктора физико-математических наук в Горьковском госуниверситете в области теории колебаний и волн. Профессор, ведущий научный сотрудник МГУ. Область научных интересов – теория колебаний и волн, радиофизика, применение методов нелинейной динамики в различных областях науки. Автор и соавтор десяти монографий по колебаниям и волнам, в том числе монографии «Стохастические и хаотические колебания», переведенной на английский язык, а также монографии «Нелинейные колебания и волны в динамических системах», вышедшей в издательстве «Kluwer», «Регулярные и хаотические колебания», вышедшей в издательстве «Springer» в 2001 году, и нескольких обзоров, в том числе в УФН и «Physics Reports». Член Национального комитета по механике (Россия). Опубликовала много научных статей по направлениям, указанным выше. Член редакционной коллегии журналов «Chaos, Solitons and Fractals» и «Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика».

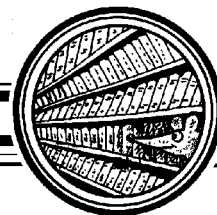


119899 Москва, Ленинские горы, МГУ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
E-mail: planda@mail.ru



Ушаков Вадим Геннадьевич – родился в Анапе (1977), окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. С 2004 по 2009 год работал в Московском филиале ЦАГИ. Имеет 5 публикаций по тематике статьи в российских и зарубежных изданиях.

119899 Москва, Ленинские горы, МГУ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
E-mail: uwadim@gmail.com



ИЗ ИСТОРИИ СТАНОВЛЕНИЯ КАФЕДРЫ ЭЛЕКТРОНИКИ, КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН СГУ

М. А. Григорьев

Отрывки из неопубликованных воспоминаний автора «Я учился и работал в Советском Союзе», относящиеся к самому началу «электронного образования» в Саратове. Первая часть воспоминаний «Я учился в СССР» была напечатана в журнале Известия вузов. ПНД, 2009, т. 17, № 1, с. 103.

Ключевые слова: История Саратовского университета, кафедра электроники.

В марте 1952 года я начал работать старшим лаборантом физического практикума, а с 1 сентября – ассистентом на *кафедре общей физики и электроники*, заведующим которой был профессор Пётр Васильевич Голубков. Кафедра, как и сейчас, располагалась на втором этаже III корпуса СГУ. В те годы на кафедре работали доценты Ю.Г. Альтшулер, Л.Э. Бахрах, Н.П. Будникова, Б.М. Заморозков, С.И. Сорокин, А.Н. Сус, С.А. Суслов, В.Н. Шевчик, ст.преподаватели А.М. Алесковский, В.Ф. Боголюбов, С.И. Кирьяшкин, И.А. Козель, С.В. Соломонов, Л.В. Штромберггер, ассистенты Н.К. Варнаков, С.А. Зайцева, Н.Н. Серебряникова, И.Ф. Тайков, Л.С. Шрайбер, научные сотрудники Н.И. Коваленко, Е.А. Ридель, В.П. Степанчук, Фронтасев, аспирант Ш.Е. Цимринг, старшие лаборанты А.Ф. Безсуднов, В.А. Гудошников, П.В. Можаяев, лаборанты Н.С. Галанов, В.М. Диденко, А.А. Муравьёв, Ю.Я. Семёнушкин, стеклодув и лекционный демонстратор Л.С. Арясов и механик по точному приборостроению Ф.Ф. Троицкий, работавший ещё с основателем кафедры физики СГУ профессором В.Д. Зёрновым, и другие. Такое большое число преподавателей и лаборантов объясняется тем, что кафедра обслуживала почти все факультеты университета.

Среди преподавателей кафедры, пожалуй, одним из наиболее молодых был Владимир Николаевич Шевчик. Когда я поступал учиться на физический факультет СГУ в 1946, он его заканчивал. Впервые я познакомился с ним, когда учился на третьем курсе. Он был аспирантом П.В. Голубкова и руководил студенческим кружком по ознакомлению с электроникой сверхвысоких частот. Думаю, что я в тот год в памяти В.Н. Шевчика не остался, да и судьба моя сложилась так, что с электроникой СВЧ я связал свою жизнь только через десятилетие.

Считаю, что мне повезло начать работу в СГУ именно на кафедре общей физики. Это существенно помогло заполнить некоторые пробелы в моих знаниях. На кафедре мне сразу же поручили вести занятия в общем физическом практикуме и семинары по решению задач. Чтобы успешно вести эти семинары, я с удовольствием прорешал подряд все задачи из интересующих меня разделов задачника, рекомендованного студентам, кажется, это был задачник В.С. Волькенштейна или Д.И. Сахарова. По воспоминаниям бывших студентов, им нравилась моя манера проведения семинаров. Помнится, декан факультета З.И. Кирьяшкина как-то пришла ко мне на семинар и просидела на нём от начала до конца. Уходя, она похвалила меня, а в качестве критики сказала, что я слишком много объясняю студентам. Среди студентов, которые занимались на этих семинарах, были будущие профессора В.И. Березин и Ю.Г. Гамаюнов, будущий директор ЦНИИИА В.Д. Тупикин и другие.

Со следующего семестра (1953) я начал проводить занятия со студентами четвертого курса, переведёнными из пединститута (дополнительный набор «допы»), во вновь образованной учебной лаборатории электроники СВЧ. В её создании сыграл важную роль В.Н. Шевчик, будучи ещё аспирантом. Надо сказать, что эта лаборатория была для меня совершенно незнакомой, находилась она в очень примитивном состоянии, получил я её в учебную нагрузку неожиданно и практически осваивал одновременно со студентами, что способствовало интенсификации моего образования. Фактически моё знакомство с техникой СВЧ началось одновременно с этими студентами. Я тогда ещё не знал, что с учебной лабораторией по электронике СВЧ будет связана вся моя дальнейшая жизнь.

Лаборатория размещалась на втором этаже III корпуса, рядом с кабинетом П.В. Голубкова. В это время там были такие лабораторные работы, как «СВЧ-триод», «отражательный клистрон», «разрезной магнетрон» (лабораторного изготовления), а также несложная измерительная техника – резонансный волномер, двухпроводная линия с кристаллическим детектором. Возможно, были и другие работы, но они не остались в памяти.

НИР «Заградитель»

К началу 1950-х годов в стране практически закончилось восстановление народного хозяйства, разрушенного войной. Эти годы ознаменовались бурным развитием научных исследований в СССР.

В сентябре 1952 года был открыт в СГУ второй физический факультет, предназначенный для подготовки специалистов по электронике и радиофизике для научных организаций и производственных предприятий страны.

В 1955 году в СГУ была открыта проблемная лаборатория по радиоэлектронике. Её разместили в подвале V корпуса и в неё кроме сотрудников физического факультета перевели несколько инженеров с саратовских заводов электронной промышленности. В их число попали М.А. Харит и мои однокурсники Ю.Н. Попченко, А.И. Тореев и В. Жаров. Первой НИР в этой лаборатории была разработка нового в то время СВЧ-прибора – лампы обратной волны (ЛОВ), шифр «Камелия». Она выполнялась по постановлению правительства.

Мир стоял на пороге космической эры. Радиолокация и космическая связь требовали широкого освоения миллиметрового диапазона радиоволн. В связи с этим в 1957 году по постановлению правительства в указанной проблемной лаборатории СГУ под руководством П.В. Голубкова были начаты работы, направленные на созда-

ние лампы бегущей волны (ЛБВ) и ЛОВ миллиметрового диапазона. К тому времени в СССР уже были организации, где велись разработки таких приборов. Решение о проведении подобных исследований в Саратовском университете, где не было ещё никакого опыта работы в этом диапазоне, по-видимому, преследовало цель расширения фронта исследований в стране по такой тематике. Пётр Васильевич сформировал коллектив исполнителей, в основном, из молодых сотрудников. Группу, которая разрабатывала ЛБВ, возглавил к.ф.-м.н. В.С. Стальмахов (позже – профессор, заведующий кафедрой общей физики СГУ). В группе, которая занималась разработкой ЛОВ (шифр НИР «Заградитель») – функции заместителя научного руководителя по поручению П.В. Голубкова стал выполнять к.ф.-м.н. Ш.Е. Цимринг, кандидатская диссертация которого была посвящена вариационному методу расчёта гребенчатых замедляющих систем. В эту группу кроме меня входили В.С. Андрушкевич, В.Н. Артемьев, А.И. Тореев, позднее – Л.И. Кац, только что окончивший физфак¹.

Первым важным делом для всех нас было перенять опыт работы с миллиметровыми волнами у тех, кто его уже имел. В Харькове, в ИРЭ АН УССР были разработаны измерительные приборы и различные генераторы, включая ЛОВ, близкие по своим параметрам к прибору, который нам предстояло разрабатывать. Свою ЛОВ, созданную под руководством заведующего лабораторией Г.Я. Левина, харьковчане называли клинотроном². Мы не могли рассчитывать на беспрепятственное получение информации о харьковских работах, поскольку наш коллектив оказался для них конкурентом. Делу помог приказ Министерства обороны, обязывающий ИРЭ АН УССР ознакомить саратовцев в полном объёме со всеми их исследованиями в миллиметровом диапазоне. Таким образом, харьковчане превратились в наших товарищей, а конкуренция – в социалистическое соревнование. Надо отдать должное украинским коллегам. Они бескорыстно предоставили всю интересующую нас информацию. По два-три человека мы неоднократно приезжали в длительные командировки в Харьков, где подробно изучали конструкцию, технологию изготовления, откачку и динамические испытания клинотрона. В первую командировку поехали А.И. Тореев, В.Н. Артемьев и я.

Это было моё первое посещение Харьковского университета после окончания учёбы в нём³. За прошедшие семь лет в Харькове появилось метро. Был восстановлен Дом кооперации, разрушенный во время войны. Он стал новым высотным зданием университета. Приехав в Харьков, я первым делом отправился в университет, к Марии Петровне Жуковой, которая, будучи начальником спецчасти, хорошо знала нас – студентов спецотделения. Она радушно встретила меня и заинтересованно выслушала мой рассказ о том, как я попал в Саратовский университет и о моей работе. ИРЭ АН УССР помещался ещё в здании Украинского физико-технического института (УФТИ), в котором работал руководитель моей дипломной работы Алексей Павлович Ключарев. Это была моя первая и последняя встреча с ним после окончания университета.

¹Впоследствии Ш.Е. Цимринг стал профессором радиофизического факультета Горьковского университета, В.С. Андрушкевич – профессором кафедры электроники СГУ, В.Н. Артемьев – доцентом кафедры физики плазмы СГУ, А.И. Тореев – к.ф.-м.н, ст. научным сотрудником лаборатории радиоэлектроники НИИМФа СГУ, Л.И. Кац – профессором кафедры электроники СГУ.

²В 1960 году группа сотрудников Харьковского ИРЭ, включая Г.Я. Левина, получила Ленинскую премию за разработку приборов миллиметрового диапазона

³После 4 курса СГУ группа из 17 студентов физфака (и я в том числе) была переведена для продолжения учебы в Харьковский университет. Полтора года, начиная со второго полугодия 1950 года до конца 1951 года, я слушал лекции по некоторым вопросам теории атомного ядра и выполнял дипломную работу, создавая источник протонов.



Голубков
Петр Васильевич



Шевчик
Владимир Николаевич



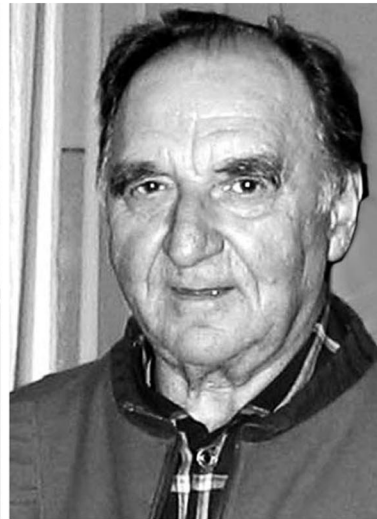
Трубецков Дмитрий Иванович
2000-е годы



Синицын Николай Иванович
2000-е годы



Жарков Юрий Дмитриевич
— 2000-е годы



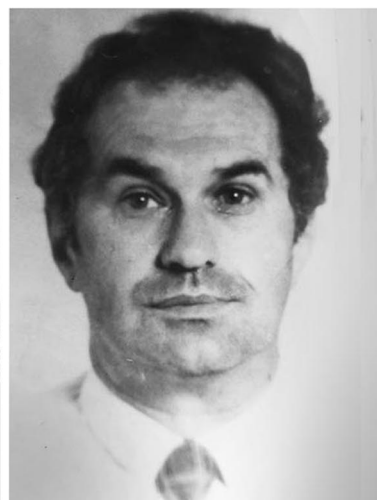
Андрушкевич Владимир Степанович
2000-е годы



Тореев Александр Иванович
2000-е годы



Гамаюнов Юрий Григорьевич
2004 год



Кац Лев Израилевич
1970-е годы



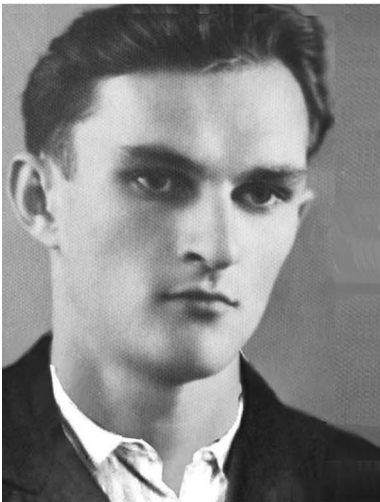
Будникова Надежда Петровна
1970-е годы



Зайцева Сара Абрамовна
1950-е годы



Зюрюкин Юрий Анатольевич
2000-е годы



Цикин Борис Геннадьевич
1950-е годы



Толстиков Александр Владимирович
2004 год



Скороходов Владимир Николаевич
2000-е годы



Навроцкая Юлия Натановна
2006 год



Фотографии из архивов автора, Будниковой Н.П., Зюрюкиной О.В., Трофимовой Н.Б., Толстикова А.В.

Другим важным делом было обеспечение исследований необходимой измерительной аппаратурой миллиметрового диапазона, не выпускавшейся ещё отечественной промышленностью. Нам оставалось либо разрабатывать и делать её самостоятельно, либо перенять разработки у харьковчан, заказав им необходимый минимум приборов, а затем наладить их повторение. Первое было для нас непосильной задачей, второе требовало существенных денежных затрат. Надо было принимать решение, кто будет заниматься аппаратурой и самими измерениями в рамках темы. Я взялся за это дело с одобрения всего нашего коллектива и договорился с группой харьковчан из лаборатории Е.М. Кулешова, занимающейся разработкой измерительной аппаратуры миллиметрового диапазона, об изготовлении ряда приборов. Руководителем этой группы стал научный сотрудник Вячеслав Александрович Щербов (возможно, Щерба). Кроме того, я договорился с радиотехником Леонидом Семёновичем Немировским об изготовлении для нас блоков питания отражательных клистронов 4-миллиметрового диапазона радиоволн. Эти клистроны были разработаны в ИРЭ АН УССР, и мы приобрели их для проведения необходимых «холодных» измерений в ходе разработки нашей лампы. П.В. Голубков, будучи в то время ещё и директором НИИМФа, нашёл возможность финансирования заказа и дал указание оформить трудовое соглашение между этой группой и НИИМФом. Ко мне подключился заниматься измерительной аппаратурой Л.И. Кац. В.С. Андрушкевич с А.И. Тореевым были заняты разработкой газоразрядного умножителя частоты, а также созданием высоковольтного стабилизированного источника питания. Дополнительно, по предложению В.Н. Шевчика, В.С. Андрушкевич занялся разработкой теории лампы обратной волны с наклонным электронным пучком – клинотрона. В.Н. Артемьев занимался теоретическими расчётами и созданием электронной пушки. А.И. Тореев был основным технологом в нашей группе и, кроме того, проводил динамические испытания лампы в процессе её откатки. Пока шло изготовление аппаратуры, я активно занимался вместе с другими сотрудниками нашей группы конструированием, приготовлением чертежей для мастерских, сборкой и наладкой технологического оборудования.

Станок токовой пайки предназначался для вакуумно-плотного соединения деталей нашей лампы серебряными припоями. Собранный пакет деталей зажимался охлаждаемыми водой электродами, к которым подводилось напряжение от вторичной обмотки понижающего трансформатора. К первичной обмотке подводилось сетевое напряжение с помощью ЛАТРа. Эти электроды вместе с собранным макетом накрывались большим стеклянным колпаком, из-под которого выкачивался воздух форвакуумным насосом. Собираемый макет разогревался большим током до температуры плавления припоя.

Металлические краны для вакуумных установок были нужны для оперативного соединения и разъединения диффузионного насоса с откачиваемым объёмом и форвакуумного насоса с диффузионным. Их преимуществом, по сравнению со стеклянными, являлась большая пропускная способность и механическая прочность. Такие краны в то время не применялись в практике СГУ. Конструируя краны, я воспользовался опытом, полученным ещё при выполнении дипломной работы в Харькове.

Приспособление для ручного изготовления гребенчатых замедляющих систем представляло собой направляющие, обеспечивающие точное перемещение миниатюрной пилки, с помощью которой в медной заготовке выполнялись зубцы гребёнки,

а также перемещение самой гребёнки. Шаг этой гребёнки, ширина и высота зубцов были порядка 0.1 мм. Указанные размеры следовало выдерживать с микронной точностью.

Приставка к токарному станку для прокатки волноводов состояла из двух пар вальцов (роликов), обжимающих заготовку прямоугольного волновода в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Одна пара вальцов обеспечивала размер широкой стенки волновода, а другая – узкой. Заготовкой служила медная трубка, отожжённая в водороде, надетая на тщательно отполированный стальной стержень прямоугольного сечения. После прокатки стальной стержень вытягивался из получившегося волновода. Всё приспособление крепилось на суппорте токарного станка, который обеспечивал перемещение вальцов по неподвижной заготовке.

Устройство для поворота лампы в магнитном поле при её испытаниях в процессе откачки представляло собой крепёжную конструкцию, позволяющую расположить паромасляный насос так, что откачиваемый прибор размещался в зазоре мощного электромагнита. Как известно, вектор скорости электронов совпадает по направлению с напряжённостью магнитного поля. Поэтому, чтобы обеспечить требуемое направление электронного потока в лампе, необходимо было подбирать её положение в зазоре электромагнита. Это осуществлялось наклоном диффузионного насоса, к которому была присоединена откачиваемая лампа, на небольшой угол в пределах нескольких градусов с помощью поворотного устройства.

Вакуумная установка для силицидирования фокусирующих электродов электронной пушки состояла из паромасляного и форвакуумного насосов, а также объёма, в котором помещалась электрическая печь. Она заполнялась порошком кремния, куда погружались подготовленные электроды из молибдена. В процессе откачки печь прогревалась до температуры 700...800°С. При достаточно длительной откачке кремний диффундировал в молибден, создавая вблизи его поверхности антиэмиссионный слой. Такой фокусирующий электрод, помещённый в непосредственной близости от катода электронной пушки, переставал быть источником электронов и позволял сформировать электронный пучок требуемого сечения. Следует сказать, что для первых наших пушек фокусирующие электроды приходилось возить в УФТИ для силицидирования. Там нам помогал мой однокашник по харьковскому университету Николай Тарасов, оставшийся после окончания работать в УФТИ. Чтобы избавиться от поездок, мы решили эту технологию реализовать у себя в лаборатории. Так появилась потребность в создании специальной вакуумной установки, о которой сказано выше. Чтобы получить в этой установке достаточно высокий вакуум, приходилось при нагретой печи откачивать её непрерывно в течение нескольких суток. Мы с Л.И. Кацем, как энтузиасты этого дела, ночевали в лаборатории и спали прямо на столах.

К марту 1959 года измерительная аппаратура, заказанная харьковчанам, была готова, и мы с Л.И. Кацем поехали получать её в Харьков. Работа всех передаваемых нам приборов была продемонстрирована, и накануне 8 марта был подписан акт приёмки-передачи изготовленной измерительной аппаратуры. Получив аппаратуру из Харькова, мы занялись её освоением. Одной из задач, которую нам пришлось решать, было измерение КСВ с помощью направленного ответвителя и фазовращателя⁴. Мы сами с помощью мастерских СГУ изготавливали отрезки волноводов,

⁴Позднее эта работа была опубликована мною в соавторстве с Л.И. Кацем и Ш.Е. Цимрингом в журнале «Известия вузов. Радиотехника».

аттенюаторы, направленные ответвители, волномеры, фазовращатели, детекторные головки. Одной из трудностей было то, что прямоугольных волноводов сечением $1.8 \times 3.6 \text{ мм}^2$ промышленность не выпускала, а наша мастерская не имела опыта в их изготовлении. Поэтому совместно с мастерскими пришлось разрабатывать соответствующую технологию. После изготовления все детали серебрились электролитическим методом в химической лаборатории, которой руководила Мария Фёдоровна Гаранина.

Профессор П.В. Голубков, как руководитель, устраивал совещания, на которых мы обсуждали проделанную работу и намечали действия на будущее. В дела каждого сотрудника в отдельности он не вникал, этим еженедельно занимался в нашей группе Ш.Е. Цимринг. В случаях, когда речь шла об очень важном, Пётр Васильевич интересовался работой отдельных товарищей.

Следует сказать, что весь наш коллектив работал очень интенсивно, в лаборатории находились допоздна. В 1960 году, в последние дни нашей работы, когда уже была известна дата приезда госкомиссии для приёмки темы, мы работали круглосуточно. Пётр Васильевич, которому в 1959 году было присвоено звание «Заслуженный деятель науки РСФСР», приходил к нам поздним вечером в подвал, интересовался, как идут дела, просил заведующего лабораторией Ю.Н. Попченко принести чайник, пил с нами чай и, уходя, желал успешной работы. ЛОВ, предназначенную для показа комиссии, мы окончательно подготовили буквально за несколько часов до её приезда. Основные параметры лампы, предъявленной комиссии, оказались существенно выше, чем у харьковского аналога. В акте приёмки содержалась высокая оценка результатов НИР и рекомендация премировать исполнителей. По отзывам членов комиссии, их особенно поразил небольшой срок выполнения разработки и малый объём финансирования. С сентября 1959 года я оставил кафедру общей физики и перешёл ассистентом на кафедру электроники по приглашению В.Н. Шевчика, который стал её заведующим.

Лаборатория электроники СВЧ на кафедре электроники

На протяжении всей моей работы на кафедре я был ответственным за учебную лабораторию по электронике СВЧ. Она зародилась ещё на кафедре общей физики. Начало положил В.Н. Шевчик, будучи аспирантом, с которым работали лаборанты В.А. Гудошников и П.В. Можяев. Когда я стал работать на кафедре электроники в 1959 году, лаборатория располагалась в комнате № 20 (III корпус СГУ), в которой уже имелись следующие работы: отражательный клистрон, электронная проводимость в отражательном клистроне, лампа бегущей волны, многорезонаторный магнетрон, нагрузочные характеристики отражательного клистрона, генератор с тормозящим полем, электронно-волновой генератор. Экспериментальные установки лаборатории были созданы под руководством Б.М. Заморозкова, В.Н. Шевчика, В.С. Стальмахова, В.С. Андрушкевича, Н.П. Будниковой, Ю.Д. Жаркова, Г.Н. Шведова. Вскоре после моего прихода на кафедру, Владимир Николаевич поручил мне быть ответственным за эту лабораторию, и я стал считать себя обязанным заботиться о её модернизации и развитии.

К 1964 году, когда вышло в свет первое издание учебного пособия «Электронные приборы СВЧ»⁵, были поставлены новые лабораторные работы:

⁵Электронные приборы СВЧ / Под ред. В.Н. Шевчика и М.А. Григорьева. Саратов: СГУ, 1980.

- Н.И. Сеницыным – «Изучение лампы обратной волны»;
- М.А. Григорьевым заново поставлена работа «Исследование нагрузочных характеристик отражательного клистрона с помощью измерительной линии», поскольку существующая установка не удовлетворяла современным требованиям;
- Д.И. Трубецковым, Е.В. Бочаровым, М.А. Григорьевым – «Исследование шумов в ЛБВ» (на мою долю в этой работе выпали разработка методики измерений коэффициента шума ЛБВ и создание экспериментальной установки).

Прогресс лаборатории потребовал увеличения её территории, поэтому зав. кафедрой распорядился в 1967 году добавить к ней ещё одну комнату № 24. Эта комната освободилась после переезда из неё научной группы М.А. Григорьева и Ю.А. Зюрюкина в подвал III корпуса. В 1970-е годы из лаборатории были изъяты работы, посвящённые изучению генератора с тормозящим полем и электронно-волнового генератора как приборов, не нашедших широкого применения на практике. Совместно с В.Л. Фишером была поставлена работа, посвящённая изучению магнетрона, настраиваемого напряжением (митрон). С Ю.Д. Жарковым мы провели коренную модернизацию учебной установки по исследованию электронной проводимости отражательного клистрона. Первоначальный вариант этой установки был создан в диссертационной работе Н.П. Будниковой.

В электронику СВЧ стали быстро проникать твердотельные приборы. В 1959 году в Советском Союзе был создан лавинно-пролётный диод (ЛПД), в 1963 году за рубежом был открыт эффект Ганна. Появились электронные приборы СВЧ, использующие ЛПД и диоды Ганна. В связи с этим в 1970-е годы я начал читать курс лекций по твердотельной электронике СВЧ и поставил новые лабораторные работы: генератор на ЛПД и генератор на диоде Ганна. В начале 1980-х по согласованию с Ю.Д. Жарковым, поскольку он читал курс лекций по электронике СВЧ, была реконструирована работа «Изучение многорезонаторного магнетрона», поставленная В.С. Стальмаховым ещё до моего прихода на кафедру. В старой установке использовался импульсный магнетрон 3-сантиметрового диапазона радиоволн мощностью 25 кВт. На анод этого магнетрона подавалось импульсное напряжение 12 кВ. Установка занимала в лаборатории целую стену. Новый магнетрон имел импульсную мощность 0.2 кВт в 10-сантиметровом диапазоне, при напряжении на аноде 1.5 кВ. Вдоль той же стены разместились две новые установки, ставшие безопасными в электрическом и радиационном отношении. Я продублировал также лабораторную работу «Изучение ЛБВ». Существовавшая установка была создана В.С. Стальмаховым на основе первой промышленной лампы УВ-1 с большим и тяжёлым соленоидом, создающим постоянное магнитное поле для фокусировки электронного пучка. В новом варианте я установил пакетированную ЛБВ с периодической магнитной фокусировкой. Мною была поставлена ещё одна твердотельная работа «Параметрический усилитель на полупроводниковом диоде». Учебное пособие по последней работе было опубликовано Издательством СГУ.

В доперестроечное время в учебной лаборатории электроники СВЧ работали два или три лаборанта. Обычно они были студентами вечернего отделения физического факультета. После окончания учёбы некоторые из них оставались работать в университете инженерами или преподавателями. В 1978–1979 годах в учебной лаборатории электроники СВЧ работал инженер Александр Владимирович Толстиков, который принимал активное участие в создании книги «Электронные приборы СВЧ». Модернизация и постановка новых работ выполнялась с помощью лаборантов

и инженеров, работавших в этой лаборатории, в том числе и инженером А.В. Толстиком. В частности, им была создана дублирующая установка «Изучение много-резонаторного магнетрона».

Лаборанты участвовали в проведении занятий, помогая студентам знакомиться с приборами, которые использовались в установках, тем самым они освобождали преподавателя от необходимости прерывать беседу со студентами по теоретическим вопросам. В 1990-е годы на должность заведующего учебными лабораториями кафедры пришёл инженер Валентин Николаевич Скороходов, окончивший физический факультет в 1982 году, и стал фактически отвечать за лабораторию электроники СВЧ и физического эксперимента. Поскольку в годы перестройки и в последующее время лаборантов почти не стало, то ему приходится обслуживать все установки указанных лабораторий, осуществлять их ремонт и модернизацию, а также вести занятия вместе с преподавателями. В силу сложности лабораторных установок, Валентин Николаевич каждой паре студентов, получивших допуск к выполнению работы, подробно рассказывает, как надо выполнять пункты экспериментальной части задания. И в настоящее время он активно помогает преподавателям проводить занятия. Надо сказать, что В.Н. Скороходов – высококвалифицированный и очень ценный сотрудник кафедры. На нём держатся наиболее трудные и сложные учебные лаборатории.

В практикуме по электронике СВЧ занимались студенты 4 курса физического факультета кафедр радиофизики, электроники, электрорадиотехники, полупроводников, физики твёрдого тела, в последние годы студенты кафедр радиофизики и нелинейной динамики, радиотехники и электродинамики, а также студенты факультета нелинейных процессов, специализирующиеся по радиофизике и электронике. Занятия в практикуме вели В.С. Андрушкевич, Г.А. Багаева, Б.П. Безручко, Ю.Г. Гамаюнов, М.А. Григорьев, Ю.Д. Жарков, Ю.А. Калинин, Г.Л. Соболев, Н.И. Сеницын, В.Н. Титов, Д.И. Трубецков, В.Л. Фишер, Б.Г. Цикин, А.П. Четвериков. В проведении занятий, модернизации и в текущем обслуживании работ активное участие принимал инженер А.В. Толстиков (в настоящее время к.-ф.м.н., старший научный сотрудник, заведующий научной лабораторией). В учебной лаборатории электроники СВЧ в разное время работали лаборанты Н.В. Белоусов, В.А. Гудошников, В.В. Колосов, А.А. Мизюкин, П.В. Можаяев, А.П. Митрофанов, А.И. Мищенко, В.А. Назаров, А.А. Понукалин (ныне профессор СГТУ), А.А. Тодорцев.

Лаборатория физического эксперимента – спецпрактикум

В соответствии с учебным планом подготовки специалистов по радиофизике и электронике в 1967 года на кафедре начала создаваться новая учебная лаборатория по физическому эксперименту для студентов 5 курса. Ответственным за эту лабораторию В.Н. Шевчик сделал доцента Ю.Д. Жаркова. В её создании принимали участие сам Ю.Д. Жарков («Эффект Компфнера: исследование замедляющих систем с помощью электронного пучка на основе использования эффекта Компфнера»), «Добротность: исследование объёмного резонатора с помощью измерительной линии», «Клистрон: пятирезонаторный пролётный клистрон») и доценты: М.А. Григорьев («Добротность»), «Гиперзвук: пьезоэлектрический электроакустический СВЧ-преобразователь», «Фазовые характеристики ЛБВ», «Клистрон», «Лавинно-пролётный диод (ЛПД)», «Диод Ганна», «Параметрический усилитель на полупроводниковом диоде»), Ю.А. Зюрюкин («Фазовые характеристики ЛБВ», «Ги-

перзвук»), В.Л.Фишер («Добротность»). В постановке работ участвовали инженеры: А.В. Толстиков, А.Ю. Дмитриев, лаборанты В.А. Митряков и Е.И. Сычёв; в 1982 году пришёл в лабораторию инженер В.Н. Скороходов. Учебные пособия к работам писали Ю.Д. Жарков («Эффект Компфнера», «Клистрон»), М.А. Григорьев («Добротность», «ЛПД», «Диод Ганна», «Параметрический усилитель», «Фазовые характеристики ЛБВ», «Гиперзвук»), Ю.А. Зюрюкин («Фазовые характеристики ЛБВ», «Гиперзвук»). Часть этих пособий была опубликована. В Издательстве СГУ М.А. Григорьевым были опубликованы учебные пособия по работам «Добротность», «Параметрический усилитель», а также в интернете на сайте СГУ было размещено пособие «Гиперзвук». Пособие по ЛПД и диоду Ганна вошли в книгу «Электронные приборы СВЧ». Новые варианты учебных пособий к лабораторным работам «Фазовые характеристики ЛБВ» и «Пролётный клистрон» были написаны в 2008 году, соответственно М.А. Григорьевым и Ю.Д. Жарковым. В работе «Эффект Компфнера» Ю.Д. Жарков использовал методику измерений, разработанную им и вошедшую в его докторскую диссертацию.

В целом о практикуме можно сказать, что диапазон вопросов, которые в нём представлены, весьма широк. Здесь и вакуумные и твердотельные приборы СВЧ, а также сложные методы измерений на СВЧ. Поэтому и для студентов 5 курса эта лаборатория оказывается весьма трудной, поскольку работы в ней носят научно-исследовательский характер. Занятия в этой лаборатории вели преподаватели Г.А. Багаева, М.А. Григорьев, Ю.Д. Жарков, Ю.А. Калинин.

FROM THE HISTORY OF THE CHAIR FORMATION

M. A. Grigor'ev

This is the fragments from my unpublished book «I learned and worked in the Soviet Union». These fragments are date back to the first years of the «electronical education» at the Saratov State University. The first part of the memory notes «I learned in the USSA» was published in the journal «Applied Nonlinear Dynamics» (2009, vol. 17, № 1, p. 103).

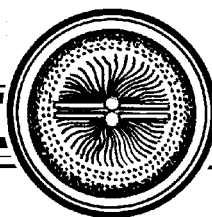
Keywords: History of Saratov State University, Chair of electronics.



Григорьев Михаил Алексеевич – родился в 1928 году в деревне Хилино Ильинского района Великолукской области. В 1946 году с отличием окончил Саратовский авиационный техникум и поступил на физический факультет СГУ. В 1950 году по приказу Министерства высшего образования был переведён на спецотделение физико-математического факультета Харьковского госуниверситета, который окончил в декабре 1951 года. Работает в СГУ с 1952 года, в настоящее время профессор кафедры электроники, колебаний и волн. Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук (1965, СГУ) и доктора физико-математических наук (1988, СГУ) в области электроники СВЧ, акустоэлектроники и акустооптики. Соавтор и соредатор книги «Электронные приборы сверхвысоких частот», допущенной Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для вузов, а также 4 учебных пособий. Автор более 140 научных статей по направлениям, указанным выше.

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
410012, Саратов, ул. Астраханская, 83

Редакция благодарит Ю.Н. Навроцкую за помощь в подготовке данного материала к публикации.



ПРОТИВОЛОДОЧНЫЕ ПОДВОДНЫЕ РАКЕТЫ

Физические проблемы и история создания акустических систем наведения

*Б. М. Гуськов, А. В. Минаев, А. Е. Орданович, Ю. С. Рендель,
Ю. М. Романовский, О. В. Руденко, Н. В. Степанова, С. П. Стрелков,
В. И. Трухин, Д. Е. Хаминов, Л. А. Шенявский, В. И. Шмадьгаузен*

© Коллектив авторов, 2011

© Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2011

Научные редакторы: А. В. Минаев, Ю. М. Романовский, О. В. Руденко

Ответственный редактор: М. А. Коршунов

М.: Изд-во Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2011. 208 с.

ISBN 978-5-8279-0096-2

Монография посвящена проблеме создания самонаводящихся подводных противолодочных ракет. Эта задача является примером решения одной из трудных проблем фундаментальной физики, точнее – нелинейной акустики, с выходом на уровень прикладной физики и инженерной практики. Эти решения получены около пятидесяти лет назад физиками ЦНИИ АГ и МГУ, но не потеряли своей актуальности и сегодня.

Материалы монографии могут использоваться в сегодняшней инженерной практике и в педагогическом процессе вузов физико-математического и инженерного профиля.

Содержание

Предисловие

Часть I

История создания первой подводной противолодочной самонаводящейся ракеты

Часть II

Факсимиле монографии «Вопросы шумообразования подводных ракет в приложении к задачам самонаведения»

Часть III

Послесловие

Предисловие

Летом 1945 г. в США была испытана на полигоне первая атомная бомба. А уже 6 и 9 августа она была применена в войне против Японии. При этом были полностью уничтожены города Хиросима и Нагасаки. Менее чем через месяц Япония капитулировала, а человечество ясно осознало, что использование атомного оружия в войне ставит под сомнение само существование цивилизации.

Оставалась нерешенной проблема доставки атомного оружия к вероятному противнику. Ракеты в те времена имели радиус действия до 1000 км, и использование их в войне против СССР было невозможно. Существовало несколько путей решения этой проблемы.

1. Повысить радиус действия ракет – сделать их межконтинентальными.
2. Создать подводные лодки с атомными двигателями и оснастить их имеющимися ракетами с атомными зарядами, имея в виду, что благодаря энергетическому потенциалу атомных подводных лодок (ПЛ) высокая скорость делала их неуязвимыми для самонаводящихся торпед нашего ВМФ. Следовательно, они могли осуществлять боевое дежурство вблизи наших берегов. Оснащение глубинных бомб атомными зарядами и их применение против ПЛ практически могло привести к атомной войне, что было совершенно неприемлемым.
3. Создать межконтинентальные бомбардировщики с атомными ракетами на борту. Это и было сделано, но оказалось недостаточно эффективным ввиду хорошего состояния ПВО нашей страны.

Решающим для борьбы против ПЛ оказался вопрос о существенном (в несколько раз) повышении скорости подводного оружия, то есть создание подводных ракет с системой самонаведения, оснащенных боевой частью с обычным взрывчатыми веществами. Их создание исключало бы возможность для атомных ПЛ противника, которые в середине 50-х годов уже появились, барражировать вблизи наших берегов, и, следовательно, сделало бы территорию СССР недоступной для их ракет.

Собственно, еще в 1952 г. была создана первая подводная несамонаводящаяся ракета РАТ-52, но ее использование оказалось неэффективным. Вскоре ракета РАТ-52 оказалась не у дел. Однако, опыт работы с ней подтвердил соображения об огромном уровне гидроакустического шума, генерируемого реактивной струей в воде. Этот недостаток, с одной стороны, делал невозможным создание системы самонаведения. С другой стороны, высокий уровень шума гарантировал пеленгацию ракеты акустической системой ПЛ и, следовательно, возможность ее уклонения от курса ракеты.

Так сформировался тезис о необходимости на фундаментальном научном уровне обсудить вопрос о генерировании шума реактивного двигателя под водой и найти способ его радикального снижения. Эта проблема представляла собой пример постановки задачи фундаментальной физики, а точнее, нелинейной акустики, решение которой сводило бы ее на уровень прикладной физики и инженерной практики.

Скажем, несколько забегаая вперед, что эта задача была решена с участием физиков Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. История этого вопроса изложена в первой главе монографии «Советская военная мощь». – Москва: Издательский дом «Оружие и технологии», изданной в 2010 г.

к 65-летию Победы в Великой отечественной войне. Первое издание этой книги вышло в 1999 году и в 2001 году было удостоено Премии Правительства РФ [1,2].

Новые «бесшумные» и скоростные ракеты были в конце концов созданы учеными и конструкторами СССР. В результате иностранные ПЛ ушли от наших берегов и лишились возможности угрожать нам ядерным ударом. И это – одна из причин разрядки напряженности 60-х годов. Затем, правда, появились и у нас и в США ракеты межконтинентальной дальности (МБР) как со стационарным стартом, так и стартом с ПЛ. Обе стороны оказались доступными для МБР друг друга. В результате в 1973 г. был подписан бессрочный договор о «несоздании» систем противоракетной обороны. (Смотри в монографиях [1,2] главу 2, написанную известнейшим Российским дипломатом Г.М. Корниенко, Героем социалистического труда.) К глубокому сожалению, этот «бессрочный» договор в 2003 году был отменен США в одностороннем порядке. Будем надеяться, что новые руководители России и США найдут политическое решение, обеспечивающее мир на долгие десятилетия, или, что еще лучше, решения, которые сделают атомную войну невозможной.

Первая часть книги представляет собой параграф из статьи А.В. Минаева в монографии [1,2].

Во второй части книги воспроизводится факсимиле монографии «Шумы подводных ракет в приложении к задачам самонаведения», написанной более сорока лет назад физиками и инженерами ЦНИИАГ и МГУ под грифом «Совершенно секретно». (Редакторы – профессора А.В. Минаев и С.П. Стрелков, авторы – выпускники физического факультета МГУ указаны на обложке факсимильного издания и в оглавлении настоящей книги.) Комиссия ЦНИИАГ и МГУ в 2010 году сняла этот гриф, что делает возможным использование материалов этой книги в научной практике и педагогическом процессе.

В конце книги в части третьей помещено Послесловие, в котором отражена роль акустики в фундаментальной и прикладной физике и роль российских ученых и, в частности, ученых физического факультета Московского государственного университета в этой области науки.

Послесловие написано профессорами А.В. Минаевым, Ю.М. Романовским, О.В. Руденко и В.И. Трухиным.

Редакторы выражают самую глубокую признательность руководителям ЦНИИ автоматики и гидравлики Виктору Леонидовичу Солунину и Борису Георгиевичу Гурскому и руководителям физического факультета МГУ декану Владимиру Ильичу Трухину, заместителю декана Николаю Николаевичу Сысоеву, заведующему кафедрой общей физики и волновых процессов Владимиру Анатольевичу Макарову за всестороннюю поддержку издания настоящей книги.

Мы также благодарим за помощь, которую оказали В.Б. Волошинов, В.Н. Задков, А.А. Карабутов, А.В. Козарь, Н.В. Нетребко, Л.И. Пентегова, В.Б. Смирнов, А.С. Чиркин, В.И. Шмальгаузен, О.В. Салецкая на разных этапах работы над книгой.

Особо отметим вклад в работу над дизайном книги М.А. Коршунова.

А.В. Минаев, Ю.М. Романовский, О.В. Руденко

ПОУЧИТЕЛЬНАЯ ПАМЯТЬ О БЫЛЫХ ДОСТИЖЕНИЯХ

В.К. Новик

*д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник,
лауреат Государственной премии*

В середине 2011 г. издательство физического факультета МГУ выпустило репринтное, с комментариями, издание редкостной книги «Вопросы шумообразования подводных ракет в приложении к задачам самонаведения» под редакцией С.П. Стрелкова и А.В. Минаева [1], которая вошла в данную монографию. По ходатайству факультета, книга, увидевшая свет в 1968 году с соответствующим грифом, была рассекречена и допущена к открытому изданию. Цель переиздания – в рамках негласной программы ознакомить нынешнее студенчество и преподавательский состав с достижениями прошлых лет физического факультета, получившими общегосударственное и мировое признание и сыгравшими существенную роль в научно-техническом прогрессе страны, в частности, применительно к обороне. В данном случае речь идет о решении одной из важнейших проблем – о создании подводных ракет, исключивших на длительное время возможность ракетно-ядерной бомбардировки территории СССР с борта атомных подводных крейсеров США.

Содержание книги занимает 208 страниц, из них собственно факсимильная перепечатка оригинала – 158 страниц. Остальные посвящены воспоминаниям участников событий (с фотографиями давних лет), истории и современному состоянию исследований по фундаментальной и прикладной акустике на физическом факультете МГУ.

Красной нитью через все содержание книги проходит участие выпускников и сотрудников физфака в создании ракетных торпед.

Ракетные торпеды (подводные ракеты) были созданы как ответ на появление быстроходных, с необычно большой глубиной погружения, атомных подводных лодок, за которыми обычные торпеды с механическим двигателем попросту не могли угнаться. Подлодки США безнаказанно заходили в наши территориальные воды на Черном море (сухумский инцидент) и даже в устье Енисея. Страна была беззащитна со своей огромной береговой полосой против этого нового вида вооружений.

Первые подводные ракеты имели фатальный дефект – шум сверхзвуковой газовой струи воспринимался в водной толще за десятки километров и, конечно, исключал построение каких-либо акустических головок самонаведения, без которых сама торпеда не имела смысла.

Весной 1957 года, казалось бы безнадежной, проблемой шумов подводных ракет в одном из оборонных НИИ пришлось заняться выпускнику аспирантуры физфака А.В. Минаеву. Ему тогда было 27 лет. Через год, расчетным путем, была найдена группа условий, при которых звуковая волна от реактивной струи замыкается в газовой каверне и, практически, не проходит в водную среду. Теория и эксперименты

по проверке такого заключения, описанные в книге (стр. 9–22, 28–53), вызывают истинное восхищение.

Проблема шума двигателя была снята. Противник не мог обнаружить ракету. И во всей своей сложности встал вопрос о системе боевого управления ракетой, то есть о создании акустической головки самонаведения снаряда в трехмерном пространстве. Система должна была принципиально отличаться от привычных акустических постов подводных лодок исключением человека с его опытом в выдаче управляющих команд на рули. Время реакции на поступивший сигнал также сокращалось на порядки величины. На начальном этапе разработки ставилась задача только лишь выведения ракеты на источник звука без идентификации и распознавания этого источника. Иными словами, требовалось с высокой вероятностью определить наличие источника в паре полуплоскостей «слева↔справа и вверх↔вниз» акустического поля зрения по оси ракеты. Очевидно, что конструкция головки самонаведения должна была в максимальной степени подавлять воздействие источников звука в самой ракете на приемные чувствительные элементы – пьезоэлектрические гидрофоны. Теория, развитая в книге (стр. 54–70), предсказала, и эксперименты подтвердили доминирующую роль в формировании шумов турбулентных вихрей, возбуждающих звук в головном обтекателе. Авторы нашли оптимальный профиль обтекателя, минимизирующий этот источник, рассчитали и реализовали тип среды заполнения обтекателя, ослабляющей поступление звука от него на гидрофоны.

Во многом сохранила интерес и сейчас методология поиска авторами оптимизированного алгоритма выделения направления на цель из зашумленного сигнала четырех узконаправленных гидрофонов. Из проведенного анализа авторы делают принципиальные выводы (стр. 121):

«1. Теория статистических решений позволяет установить общую структуру и составить блок-схему оптимального приемника;

2. Частотные характеристики элементов этого приемника могут быть рассчитаны на основе теории фильтров из соображений максимизации отношения сигнал/шум на выходе системы;

3. Оптимизацию приемного тракта целесообразно производить для пороговых сигналов».

Сказанное обосновывало возможность создания устойчиво работоспособной системы с выделением квадранта цели по простому превышению уровня сигнала в тракте одного гидрофона, сравнительно с уровнем в других трактах. Упоминание о простоте не является случайным. Простота являлась большим достоинством. Напомним, что речь шла о возможности реализации головки на базе аналоговой техники с дискретной элементной базой. Эксперименты подтвердили безошибочность выбранного алгоритма.

Опытные образцы устойчиво обеспечивали подачу управляющего сигнала на рули при соотношении сигнал/шум ≥ 0.8 (стр. 153) даже при асимметричных гидродинамических шумах в условиях рыскания и маневров ракеты.

Рецензируемая книга, как упоминалось, увидела свет в 1968 г. А уже через год, прошли государственные испытания и была принята на вооружение Авиационная Подводная Ракета АПР-1, которая верой и правдой служила стране полтора десятилетия [2]. Впоследствии АПР-1 была продана в ряд стран, но, насколько известно, ни

в США, ни в какой-либо другой стране она так и не была воспроизведена. Нынешний читатель может вспомнить бурные шпионские страсти вокруг ракеты «Шквал», потомка этой первой разработки.

Дополняющие комментарии к факсимильному переизданию представляют, пожалуй, даже больший интерес, чем былые технические откровения. Они восстанавливают творческую атмосферу тех лет и содержат суждения о судьбе нынешнего состояния науки. В «Послесловии» к читателю обращаются заслуженные ученые: О.В. Руденко, академик РАН, В.И. Трухин, тогда декан физического факультета МГУ, А.В. Минаев, ранее член Военно-Промышленной Комиссии СССР, Ю.М. Романовский, профессор физического факультета МГУ. Перечень этих имен представляет ученого, известного мировой общественности, деятеля высшего образования, деятеля оборонной промышленности и заслуженного профессора. Лейтмотивом их выступления является тревога, выраженная эпиграфом: «Без науки Россия превратится в колонию!» [3]. Авторитет авторов дает им полное право тревожиться о катастрофическом падении в эпоху возрожденного капитализма престижа естественных наук и, в частности, физики.

Они пишут: нам «... посчастливилось начать свою творческую и производственную деятельность в «золотой век» Российской науки. Двое из нас окончили учебу на физическом факультете МГУ в 1953 году, а другие – в 1958 и 1971 годах... Мы не нажили ни дворцов на Лазурном берегу, ни яхт, ни домов на Рублевке. Но были счастливы; прежде всего, потому что востребованы! И наслаждались творчеством... И почему после огромных сдвигов в общественно-политическом устройстве России успехи модернизации были растеряны и мы сейчас живем «на нефтяной игле»? (стр. 182, 184, 185).

Заключительный вопрос справедлив и объективен. Согласимся с выраженной в книге надеждой на возвращения внимания государства к проблемам науки.

Книга в целом отражает редкостный в документальной научно-технической литературе диалог времен и читается с большим интересом.

Библиографический список

1. Б.М. Гуськов, А.В. Минаев, А.Е. Орданович, Ю.С. Рендель, Ю.М. Романовский, О.В. Руденко, Н.В. Степанова, В.И. Трухин, Д.Е. Хаминов, Л.А. Шенявский, В.И. Шмальгаузен. Противолодочные подводные ракеты. Физические проблемы и история создания акустических систем наведения / Под ред. А.В. Минаева, Ю.М. Романовского, О.В. Руденко. М.: Изд-во Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2011. 208 с.
<http://www.phys.msu.ru/rus/about/history/PUBLICATIONS/>
2. Советская военная мощь. М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2010.
3. Г.И. Марчук // Наука в Сибири. № 34. 06.09.2007.

10.02.2013