

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 «клиноotronного 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 «клиноotronного 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)-клиноotronа до клиноорбитрона. Показана перспективность освоения терагерцового интервала частот с помощью схем вакуумных источников электромагнитного излучения с плавной перестройкой частоты выходного сигнала, в которых применяется «клиноotronный 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-клиноotron, 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 двоянной 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

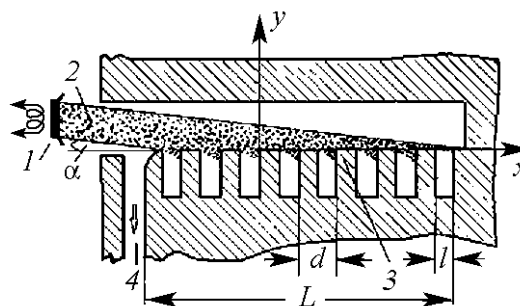


Рис. 1. Схематическое изображение ЛОВО-клинотрона Г.Я. Левина: 1 – диодная электрооптическая система, формирующая толстый и широкий ленточный электронный поток 2; 3 – периодическая ЗС гребенка; 4 – выходное устройство

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. Богомолвым [69,71] и в университете Тохоку Японии С. Оно и К. Mizuno [79,80]. Русин и Богомолв назвали свой прибор **оротроном** [71] (сокращение от слов «открытый резонатор, отражательная решетка, электрон»), а С. Оно и К. 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;

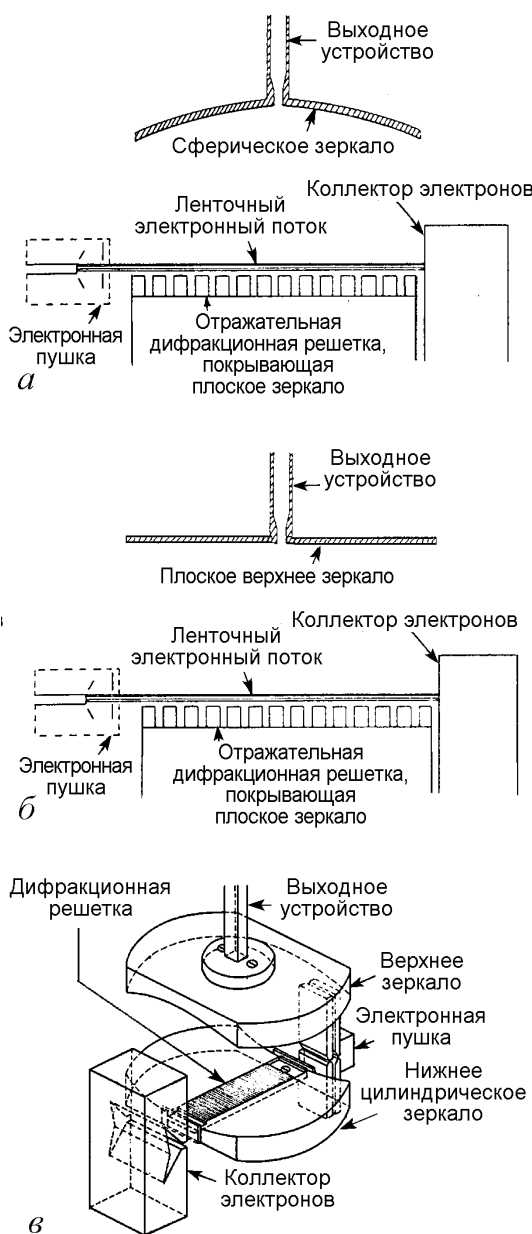


Рис. 2. Схематическое изображение: оротрона (а), ледатрона (б), генератора дифракционного излучения (в)

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 гиперблоида 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

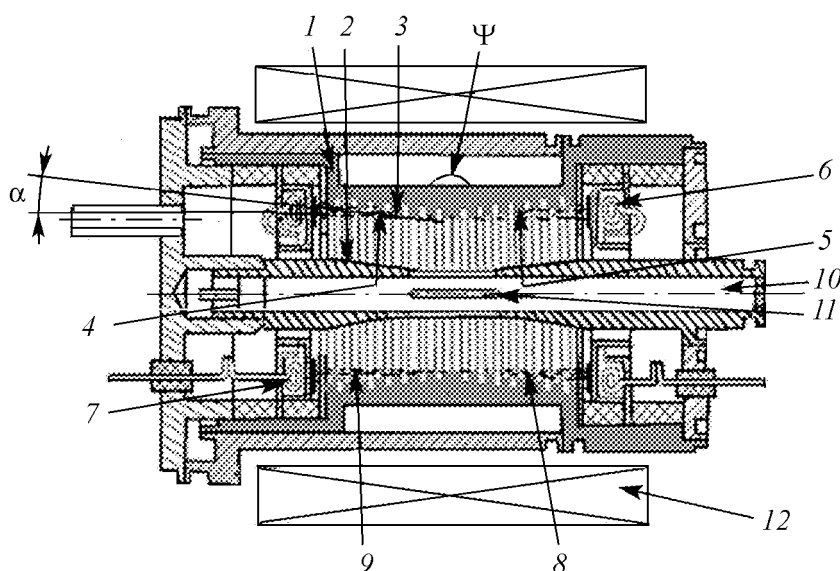


Рис. 3. Схематическое изображение коаксиального оротрона с наклонным электронным потоком

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 милливатт.

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

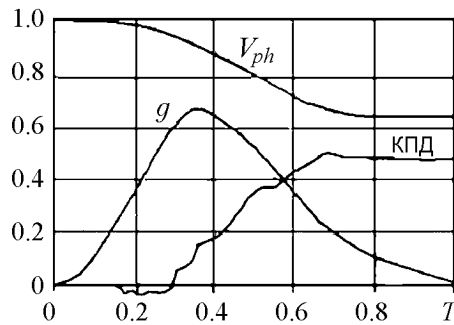


Рис. 4. Зависимости основных характеристик процесса взаимодействия с учетом встречной волны в оротроне с нерегулярной ЗС при $\alpha = 0^\circ$

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].

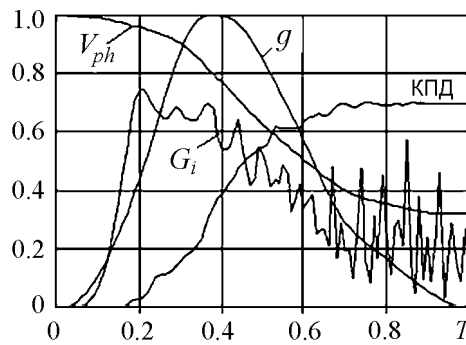


Рис. 5. Зависимости основных характеристик процесса взаимодействия с учетом встречной волны в орotronе с нерегулярной ЗС и наклонным электронным потоком при $0.5^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$

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-

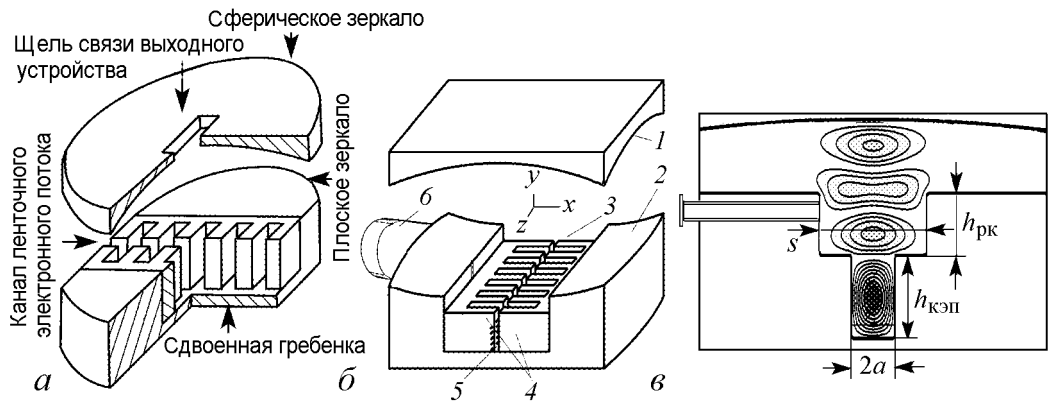


Рис. 6. Схематическое изображение электродинамической системы : орбитрона 1976 г. (а); орбитрона 2011 г. (б): 1 – подвижное зеркало, сферическое или корытообразное; 2 – неподвижное зеркало с резонансной канавкой 3; 4 – сдвоенная гребенка, 5 – канал для ленточного электронного потока, 6 – выходное устройство. 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} -моде 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.

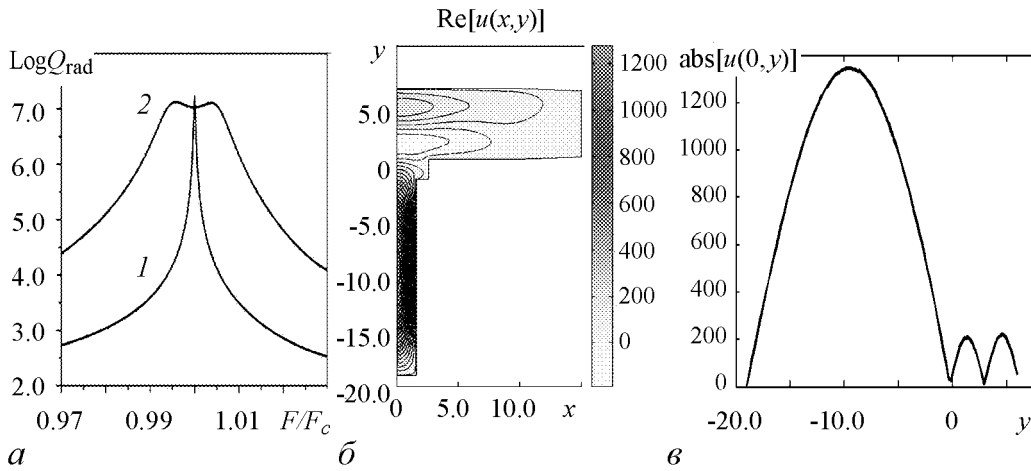


Рис. 7. Радиационные потери для TE_{03} -моды (1) и TE_{04} -моды (2) в 2D-модели орбитрона (а). Распределение высокочастотного поля TE_{03} -моды при ширине сдвоенной гребенки $h = 3\lambda$ (б). Интенсивность высокочастотного поля TE_{03} -моды на оси сдвоенной гребенки при её ширине $h = 3\lambda$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

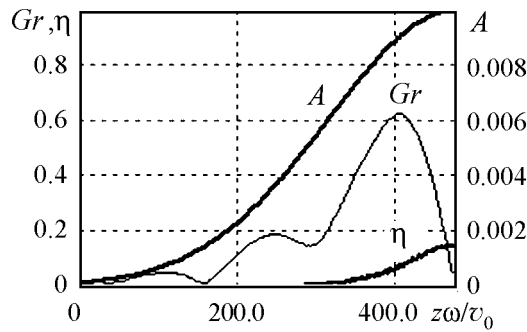


Рис. 8. Интегральные характеристики взаимодействия в оптимизированном орбитроне: A – распределение интенсивности ВЧ-поля в ОР, Gr – функция группировки, η – КПД

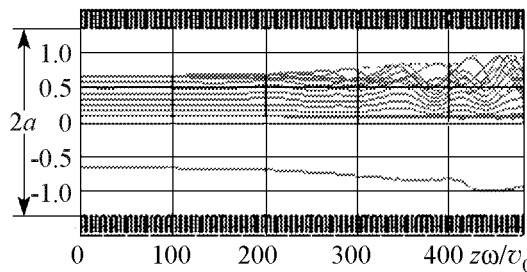


Рис. 9. Траектории электронов в канале сдвоенной гребенки орбитрона. С каждого из 7 слоев взято по одному электрону. На втором и последнем слое взято по 5 электронов с периода

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

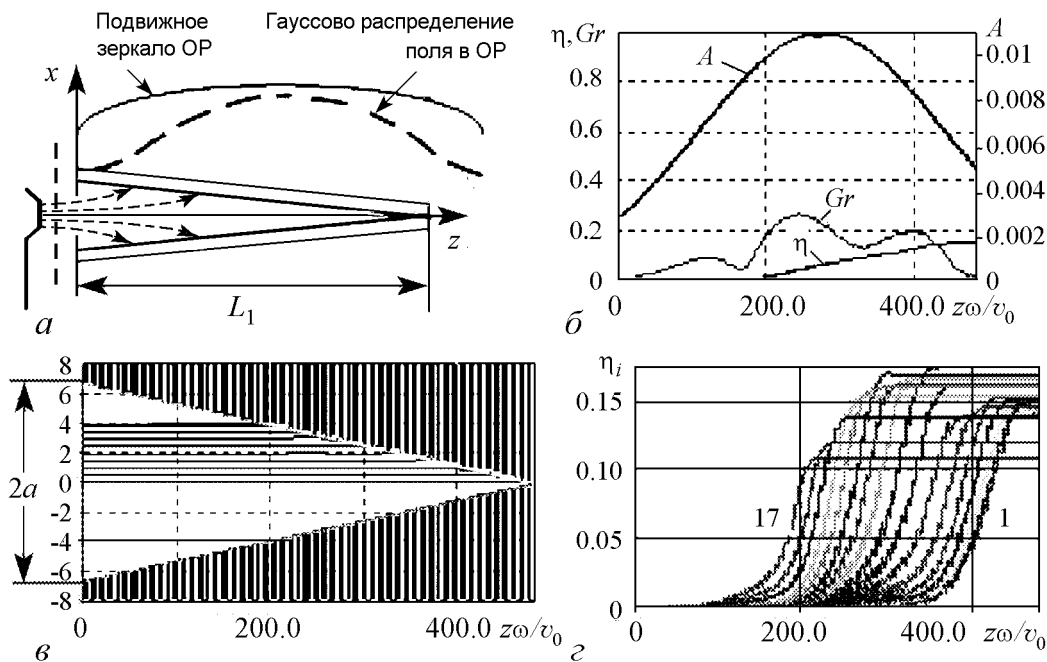


Рис. 10. Схема пространства взаимодействия клиноорбиктрона в сечении xz (а). Интегральные характеристики взаимодействия в клиноорбиктроне (б): A – распределение интенсивности ВЧ-поля в ОР, Gr – функция группировки, η – КПД. Траектории электронов в в пространстве взаимодействия клиноорбиктрона (в). Электронные 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 Orotron // 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 orotron 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 // Радиопизика 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 орбитрон – 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 // Радиопизика и электроника. Харьков: Ин-т радиопизики 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.yeromka@gmail.com