

На правах рукописи

СЛЕПКОВ Александр Иванович

ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ В
РЕЗОНАНСНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ

01.04.03 -радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

МОСКВА -2005

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Василий Иванович Канавец

Официальные оппоненты: член корреспондент РАН, профессор, д.ф.-м.н.
Дмитрий Иванович Трубецков
профессор, д.т.н.
Дмитрий Михайлович Петров
профессор, д.ф.-м.н.
Юрий Андреевич Пирогов

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники РАН

Защита состоится « 22 » сентября 2005 г. В 16 часов на заседании
Диссертационного совета Д 501.001.67 в Московском государственном
университете им. М.В.Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, ГСП-2,
Ленинские горы, д.1, стр.2. физический факультет, ауд. им. Р.В.Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического
факультета МГУ им. М.В.Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, ГСП-2,
Ленинские горы, д.1, стр.2.

Автореферат разослан _____ 2005 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
К.ф.-м.н.

Королев А.Ф.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В последние годы в различных областях науки и техники большое распространение получили мощные генераторы и усилители СВЧ излучения. Мощное СВЧ излучение используется для радиолокации, передачи энергии на большие расстояния, в системах дальней связи, при изучении взаимодействия излучения с веществом, в биологических исследованиях и т.д.

К одному из наиболее обширных классов мощных приборов микроволновой электроники относятся источники излучения, принцип действия которых основан на продольном взаимодействии электронного потока с электромагнитным полем периодических электродинамических структур, имеющих положительную или отрицательную дисперсию основной волны. Наибольшее усиление и устойчивая генерация в устройствах данного класса наблюдается при реализации синхронизма потока и поля на частотах вблизи границ полосы прозрачности волноведущих систем. В этих частотных диапазонах все периодические системы проявляют резонансные свойства, в них одновременно могут возбуждаться прямые и обратные волны. В области традиционной электроники больших мощностей примером усилителей с взаимодействием вблизи границы полосы волноведущей системы, имеющей отрицательную дисперсию, служат часто применяемые на практике мощные ЛББ на цепочках связанных резонаторов. В сверхмощной электронике, где обычно применяются релятивистские сильноточные электронные пучки, перспективными оказались черенковские и дифракционные генераторы, использующие резонансные периодические структуры с положительной дисперсией основной волны и поперечными размерами, значительно превышающими длину волны излучения. Преимущества взаимодействия потока и поля на частотах вблизи границ полос прозрачности могут быть использованы также и в системах с поперечным взаимодействием, примером такого устройства является мазер на циклотронном резонансе и аномальном эффекте Доплера (МЦРАД).

Первые успешные эксперименты с релятивистскими сильноточными потоками были проведены в 70-х годах прошлого столетия, в частности, в карсиотроне с периодической электродинамической структурой типа гофра была получена мощность излучения 10^8 Вт при КПД~10% в 3-х сантиметровом диапазоне длин волн [1*]. Длительность импульса излучения была порядка длительности импульса тока и достигала нескольких десятков наносекунд. При этом энергия излучения оказалась достаточно малой, и для повышения энергии были запланированы эксперименты на физическом факультете МГУ на сильноточном ускорителе «Тандем», имевшем длительность импульса тока ~1 мкс. Однако ожидаемого увеличения длительности импульса излучения не было получено. Результаты подробных

экспериментальных и теоретических исследований генераторов позволили высказать предположение о том, что в экспериментах с карсинотроном могло быть реализовано взаимодействие потока и поля на частоте " π "-вида колебаний электромагнитного поля системы, что приводило к фиксации частоты генерации. Тогда же была выдвинута идея использования сверхразмерных структур для оптимизации сил пространственного заряда и уменьшения вероятности пробоя вблизи металлических стенок структур [2*,3*,5-7]. Выдвинутые идеи и результаты экспериментов положили начало новому направлению в релятивистской высокочастотной электронике, основанному на многоволновом взаимодействии релятивистского потока и поля сверхразмерных структур [3*-6*]. Рекордные до настоящего времени уровни мощности были получены в экспериментах с многоволновыми черенковскими генераторами (МВЧГ), проведенных в Томске в ИСЭ СО РАН, совместно с ИРЭ РАН и физическим факультетом МГУ (15 ГВт в 3-х см диапазоне длин волн [17] и 3 ГВт в 8-и мм диапазоне [23]).

Потребности теории новых приборов привели к разработке новых методов. Традиционные методы исследования взаимодействия потока и поля в приборах СВЧ - электроники не могли быть использованы для анализа процессов вблизи границы полосы прозрачности. Исключением являются метод волновых трансформаторов, часто используемый с привлечением эквивалентных схем [7*,8*] и модифицированный волновой подход [9*,10*]. Кроме того, переход к пространственно-развитым системам потребовал новых подходов, включающих точный электродинамический расчет электромагнитных полей сверхразмерных структур с релятивистским электронным потоком.

Основными проблемами при создании микроволновых устройств на резонансных периодических структурах с положительной или отрицательной дисперсией является устранение обратных связей и получение удовлетворительных полосовых характеристик в усилителях, получение одночастотной генерации с высокой эффективностью в генераторах. Надежная селекция мод, высокие уровни усиления, устойчивая генерация невозможны без детального изучения линейных и нелинейных процессов взаимодействия потока и поля в таких системах. Актуальным является изучение общих закономерностей взаимодействия потока и поля на частотах вблизи границ полосы прозрачности (прежде всего вблизи π -вида), а также особенности физических процессов в типичных усилителях и генераторах на резонансных периодических структурах. Этот круг проблем и является предметом изучения в диссертационной работе.

Цель диссертационной работы заключается в теоретическом исследовании процессов усиления, самовозбуждения и развития генерации во времени в устройствах, основанных на длительном преимущественном продольном взаимодействии электронных потоков с полями резонансных

одномодовых и многомодовых электродинамических структур для повышения эффективности и мощности излучения микроволновых источников. Специфика исследования заключается в изучении процессов взаимодействия потока и поля на частотах важных для практического применения резонансов вблизи низкочастотных или высокочастотных границ полос прозрачности низшей моды структуры.

Основные задачи, поставленные в диссертационной работе, относятся к исследованию взаимодействия потока и поля вблизи π -вида границы полосы прозрачности систем с отрицательной и положительной дисперсиями и состоят в следующем.

1. В разработке теоретического метода анализа взаимодействия электронных потоков с полями пространственно-развитых электродинамических систем, позволяющего рассматривать линейные, нелинейные и нестационарные процессы в мощных источниках микроволнового излучения.
2. В изучении дисперсионных характеристик и структуры собственных волн сверхразмерных периодических волноводов с электронным потоком и особенностей возбуждения этих волн в системах конечной длины.
3. В анализе общих закономерностей усиления, самовозбуждения и развития генерации в мощных микроволновых источниках, в том числе при учете поперечного и комбинированного (продольного и поперечного) взаимодействий потока и поля.
4. В исследовании особенностей взаимодействия в ряде реализованных на практике новых вариантов мощных устройств: многосекционных ЛБВ на цепочках связанных резонаторов, релятивистских ЛБВ-ЛОВ на гофрированном волноводе, МЦР на аномальном эффекте Доплера, релятивистских генераторах поверхностной волны, многоволновых черенковских генераторах.

Основная идея, позволившая решить поставленные в диссертационной работе задачи по исследованию излучения мощных электронных потоков в резонансных периодических системах, заключается в представлении нерегулярных волноводов в виде цепочек связанных волновых трансформаторов. Разработанный на основе такого представления новый теоретический метод позволил с единой точки зрения рассматривать линейные, нелинейные и нестационарные процессы при взаимодействии электронных потоков с полями одномодовых и многомодовых электродинамических структур, в том числе на частотах границ полос прозрачности. Для решения конкретных задач используются различные реализации этого метода. В частности, одномодовое взаимодействие исследуется с помощью приближенного энергетического подхода, основанного на введении эквивалентных схем, анализ многомодового

взаимодействия потока и поля основывается на использовании одного из вариантов метода поперечных сечений.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- в разработке и реализации специального метода анализа взаимодействия электронных потоков с полями пространственно-развитых электродинамических систем, основанного на введении волновых трансформаторов, позволяющего с единых позиций рассматривать различные процессы в мощных источниках микроволнового излучения, в том числе на частотах вблизи границы полосы прозрачности одной из мод системы,
- в анализе изменения дисперсии и структуры собственных волн периодических систем с электронным потоком, позволившем, в частности, выявить особенности формирования зависящей от влияния потока «горячей» границы полосы прозрачности, изучить многоволновый характер взаимодействия потока и поля в сверхразмерных волноводах,
- в исследовании роли электронной среды, приводящей к дополнительному рассогласованию системы и возбуждению продольных колебательных мод структуры на динамически сдвинутых резонансных частотах,
- в нахождении оптимального соотношения между черенковским и МЦР механизмами излучения, позволяющего повысить эффективность взаимодействия релятивистского электронного потока с полем резонансной замедляющей структуры на частотах вблизи границы полосы прозрачности,
- в выявлении важной роли поверхностной волны в формировании усиления и обратных связей в релятивистских черенковских генераторах на сверхразмерных периодических волноводах, в том числе использующих многоволновое взаимодействие потока и поля,
- в обнаружении и исследовании повышения эффективности излучения генераторов при отстройке точки синхронизма потока и поля от частоты π -вида в сторону ЛБВ или ЛОВ и принципиальных отличий спектра генерации для систем с преобладающим взаимодействием ЛБВ или ЛОВ-типов,
- в изучении внешней и внутренней синхронизации в секциях многосекционных генераторов и доказательстве определяющей роли первой секции в формировании спектра генерации,
- в анализе физических процессов в многосекционных усилителях типа ЛБВ на цепочках связанных резонаторов, в первых образцах релятивистских генераторов типа ЛБВ-ЛОВ, МЦР на аномальном эффекте Доплера, в многоволновых черенковских генераторах.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- на основе единого подхода разработана совокупность теоретических методов различного уровня сложности и создан комплекс программ, позволивших исследовать электродинамические свойства периодических волноводов, процессы усиления, самовозбуждения и генерации в одномодовых устройствах и устройствах релятивистской электроники на сверхразмерных периодических структурах,

- установленные в работе особенности самовозбуждения устройств вблизи границ полосы прозрачности, позволяют находить частоты генерации и стартовые условия и, могут быть использованы при создании новых конструкций черенковских источников микроволн на сверхразмерных периодических волноводах,

- результаты исследования соотношения между черенковским и МЦР излучениями в релятивистских устройствах применимы для объяснения характерных зависимостей мощности выходного СВЧ сигнала от магнитного поля и могут быть использованы для решения проблемы селекции мод в многомодовых устройствах релятивистской электроники,

- на основе развитого в работе волнового анализа, основанного на выделении собственных волн системы и позволяющего определять трансформацию волн на входе и выходе устройства, изучены особенности возбуждения паразитной генерации, показана принципиальная возможность создания усилителей с уменьшенными обратными связями,

- результаты анализа эффективности взаимодействия потока и поля и формирования спектра излучения релятивистских источников на сверхразмерных волноводах объясняют ряд характеристик существующих экспериментальных макетов многоволновых генераторов и могут быть использованы для создания новых источников с улучшенными параметрами.

На защиту выносятся следующие **основные положения**.

1. Разработанные в работе теоретические методы, основанные на представлении нерегулярных периодических волноводах цепочками связанных волновых трансформаторов, позволили впервые с единых позиций рассмотреть стационарные и нестационарные процессы взаимодействия потока и поля на частотах границ полос прозрачности в мощных источниках СВЧ излучения: ЛБВ на цепочках связанных резонаторах (в том числе с плазменным заполнением), ЛБВ-ЛОВ на гофрированном волноводе, МЦР на аномальном эффекте Доплера, релятивистском генераторе поверхностной волны на сверхразмерном периодическом волноводе, многоволновом черенковском генераторе.
2. В микроволновых генераторах и усилителях на периодических волноводах существует область значений фокусирующего магнитного поля, при которых реализуется синхронизм циклотронных волн потока и поля на частотах границы полосы прозрачности и резко возрастает

усиление и электронный КПД в системе. Этот механизм усиления может быть использован для селекции колебаний в МЦР на аномальном эффекте Доплера и выбора оптимальных фокусирующих магнитных полей в релятивистских источниках на продольном взаимодействии.

3. В мощных усилителях и генераторах на сверхразмерных периодических волноводах взаимодействие потока и поля поверхностной волны на частоте границы полосы прозрачности является эффективным методом селекции колебаний. В этом случае:

- релятивистский электронный поток изменяет структуры полей собственных волн периодического волновода, в частности, образуется электронная мода с максимумом вихревого поля в области локализации пучка, а также электромагнитные моды, характеризующиеся минимумом поля в области потока,
- существует оптимальный радиус потока, определяемый многоволновым характером взаимодействия и обеспечивающий наилучший энергообмен потока и поля,
- электрическое поле характеризуется наличием двух областей локализации – вблизи поверхности волновода (возбуждение поверхностной волны) и на оси структуры (рассеяние поверхностной волны и возбуждение объемных волн структуры).

4. Исследования формирования одночастотного электромагнитного поля в многоволновом черенковском генераторе, проведенные в рамках линейной и нелинейной нестационарной методик позволили установить:

- для получения максимальной эффективности генерации в релятивистских источниках на сверхразмерных волноводах (РГПВ и МВЧГ) необходимо отстраиваться от точного синхронизма потока и поля на π -виде,
- в процессе развития генерации происходит конкуренция основных механизмов взаимодействия потока и поля, в результате установившееся значение частоты генерации близко к частоте ближайшей к π -виду продольной моды колебаний поверхностной волны,
- при реализации преобладающего взаимодействия ЛБВ-типа (типичного для МВЧГ) мощность генерации может на порядок превышать мощность генерации в системе с преобладающим взаимодействием ЛОВ-типа, при этом, спектр излучения генератора ЛБВ-типа характеризуется набором дискретных частот, на которых наблюдается самовозбуждение и генерация, в генераторе типа ЛОВ частота генерации плавно изменяется при изменении точки кинематического синхронизма,
- В многосекционных генераторах спектр генерации в основном определяется процессами в первой секции.

Достоверность результатов устанавливается:

- соответствием данных, полученных теоретическими методами различного уровня сложности,
- совпадением экспериментальных и теоретических результатов при исследовании мощных многосекционных ЛБВ на связанных резонаторах,
- совпадением экспериментальных и теоретических результатов при исследовании релятивистских ЛБВ-ЛОВ на гофрированном волноводе, МЦР на аномальном эффекте Доплера, многоволновых черенковских генераторов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на международных, всесоюзных и всероссийских конференциях и школах-семинарах: на всесоюзных семинарах "Колебательные явления в потоках заряженных частиц" (Ленинград, 1977г. 1979г. 1981г.), всесоюзных конференциях по электронике СВЧ (Киев, 1976, Минск, 1983г., Орджоникидзе, 1986 г.), всесоюзной конференции «Автоматизация проектных и конструкторских работ» (Москва, 1979г.), на всесоюзных симпозиумах по сильноточной электронике (Новосибирск, 1982г., Томск, 1986г., 1988 г., Свердловск, 1990 г.), III Всесоюзном семинаре «Высокочастотная релятивистская электроника» (Горький, 1983 г.), всесоюзном семинаре проблемы электроники" (Москва, МИЭМ, 1981г.), на Всесоюзном семинаре по электродинамике периодических и нерегулярных структур (Москва, МЭИ, 1982г.), 7 Inter. Conf. on High-Power Particle Beams (Karlsruhe, 1988), на 44 Всесоюзной сессии, посвященной дню Радио (Москва, 1989, Новосибирск, 1989.), на всесоюзном семинаре "Математическое моделирование и применение явлений дифракции (Москва, МГУ, 1990), на 10 всесоюзном семинаре "Волновые и колебательные явления в электронных приборах О-типа" (Ленинград, 1990), 9 Intern. Conference on High-Power Particle Beams (Washington, 1992), 16 Intern. Symp. on discharges and Electr. Insulation (Moscow-St. Petersburg, 1994), всероссийских школах-семинарах «волновые явления в неоднородных средах» и «физика и применение микроволн» (Красновидово, Звенигород 1991-2004 гг.).

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 88 печатных работ (1 монография, 27 статей в российских и зарубежных журналах, 18 статей в тематических сборниках и сборниках трудов научных конференций, 4 депонированных рукописи, 1 препринт, 37 тезисов докладов).

Содержание работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения и списка литературы. Работа содержит 358 страниц основного текста, 131 рисунок, список литературы из 272 наименований.

В первой главе дается обзор литературы, отражающий современное состояние рассматриваемой проблемы. В **п.1.1** обсуждаются вопросы классификации индивидуального и коллективного излучений и особенности излучения потоков в мощных микроволновых источниках. В **п.1.2** обсуждаются различные теоретические подходы к анализу длительного взаимодействия потока и поля. Рассматриваются полевые теории, связанные с выделением пространственных гармоник поля, «синхронных» с электронным потоком, методики анализа взаимодействия потока и поля, основанные на выделении в электродинамической структуре резонансных объемов с известной структурой мод, точные электродинамические методы, основанные на прямом решении уравнений Максвелла с заданными граничными условиями и др. Анализ достижений мощной микроволновой электроники проводится в **п.1.3**. Рассмотрены характерные параметры и типичные конструкции мощных электровакуумных нерелятивистских и слабoreлятивистских устройств СВЧ. Рассматриваются особенности развития релятивистской СВЧ электроники, приводятся характеристики типичных релятивистских источников. Основное внимание уделяется приборам с преимущественным излучением черенковского типа. В **п.1.4** дается сводка основных результатов исследований длительного взаимодействия электронных потоков с полями одномодовых и сверхразмерных периодических структур. Рассматриваются особенности распространения и взаимодействия волн в периодических структурах. Приводятся известные данные относительно взаимодействия потока и поля в резонансных режимах, прежде всего на частотах вблизи границы полосы прозрачности, соответствующей " π "-виду колебаний низшей моды структуры. Обсуждаются особенности длительного взаимодействия в релятивистской электронике.

Во второй главе записываются основные уравнения теоретического метода, основанного на представлении нерегулярных волноводов в виде цепочек связанных волновых трансформаторов и позволяющего с единых позиций рассматривать линейные, нелинейные и нестационарные процессы при взаимодействии электронных потоков с полями резонансных одномодовых и многомодовых электродинамических структур, в том числе, на частотах границ полос прозрачности. Для решения конкретных задач рассматриваются различные реализации этого метода. В частности, для анализа одномодового взаимодействия развивается приближенный энергетический подход, основанный на введении эквивалентных схем, для анализа многомодового взаимодействия потока и поля разработан вариант метода поперечных сечений.

В п.2.1 записываются уравнения электроники при выделении вихревых полей. В п.2.1.1 обсуждаются особенности формулировки уравнений электроники при разделении полей и токов на вихревые и потенциальные части, записываются выражения для вихревого тока для частного случая движения электронного потока в гладком волноводе. В п.2.1.2. записываются основные уравнения, используемые при моделировании электронного потока.

В п.2.1.3 на примере многомодового нерегулярного волновода записываются общие соотношения, описывающие возбуждение вихревых полей нерегулярных волноводов вихревыми токами. Произвольный нерегулярный аксиально-симметричный волновод представляется в виде последовательности участков гладких волноводов. Для каждого выделенного участка с номером s записываются уравнения возбуждения вихревого электрического и магнитного полей, на скачках радиуса волновода производится сшивание полей. В общем случае может быть рассмотрено возбуждение симметричных и несимметричных полей Е- и Н- типов. В рамках конкретной реализации используется симметрия задачи и рассматриваются только аксиально-симметричные моды E_{0n} - типа. Для произвольного участка с номером s разложение имеет вид

$$\begin{aligned}\vec{E}_{e,s} &= \sum_{n=1}^N [C_{n,s}^+(z,t)\vec{E}_{n,s}^+ + C_{n,s}^-(z,t)\vec{E}_{n,s}^-] \\ \vec{H}_s &= \sum_{n=1}^N [C_{n,s}^+(z,t)\vec{H}_{n,s}^+ + C_{n,s}^-(z,t)\vec{H}_{n,s}^-]\end{aligned}\quad (1)$$

где $C_{n,s}^\pm(z,t)$ - комплексные коэффициенты разложения, $\vec{E}_{n,s}^\pm, \vec{H}_{n,s}^\pm$ - напряженности электрического и магнитного полей для прямых и обратных собственных волн гладкого волновода.

При выводе уравнений возбуждения делается предположение о медленном изменении амплитуд во времени. После проведения преобразований уравнений Максвелла, аналогичных используемым при выводе леммы Лоренца, уравнения возбуждения приобретают вид

$$\begin{aligned}\oint_S \{ [\vec{E}_{e,s} \cdot (\vec{H}_{n,s}^\pm)^*] + [(\vec{E}_{n,s}^\pm)^* \cdot \vec{H}_s] \} dS = \\ - \int_{V_s} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 \vec{H}_s) \cdot (\vec{H}_{n,s}^\pm)^* + \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \vec{E}_{e,s}) \cdot (\vec{E}_{n,s}^\pm)^* \right] dV - \int_{V_s} \vec{j}_{\omega e,s} (\vec{E}_{n,s}^\pm)^* dV.\end{aligned}\quad (2)$$

После подстановки (1) в (2) уравнения возбуждения сводятся к матричному виду.

$$D_{1s}^{\pm} \bar{x}_s^{\pm} + DD_{1s}^{\pm} \cdot \frac{d\bar{x}_s^{\pm}}{dz} + D_{2s}^{\pm} \bar{x}_s^{\pm} + DD_{2s}^{\pm} \cdot \frac{d\bar{x}_s^{\pm}}{dz} = \frac{d}{d\tau} \left(B_{1s}^{\pm} \bar{x}_s^{\pm} + BB_{1s}^{\pm} \cdot \frac{d\bar{x}_s^{\pm}}{dz} + B_{2s}^{\pm} \bar{x}_s^{\pm} + BB_{2s}^{\pm} \cdot \frac{d\bar{x}_s^{\pm}}{dz} \right) + \bar{\eta}_s^{\pm} \quad (3)$$

где $\bar{\eta}_s^{\pm} = -\int_{V_s} \vec{j}_{\omega\theta,s} (\vec{E}_{n,s}^{\pm})^* dV$, $\bar{x}_s^{\pm} = \begin{pmatrix} C_{1,s}^{\pm} \\ \dots \\ C_{N,s}^{\pm} \end{pmatrix}$, $\tau = \omega t$ -нормированное время.

При сшивании полей на скачке радиуса волновода используются условия, обеспечивающие непрерывность вектора Умова-Пойнтинга [11*]. Такие соотношения широко применяются для расчетов замедляющих систем и обеспечивают достаточно хорошее совпадение данных теории и эксперимента. В частности, при увеличении радиуса волновода ($R_{\theta,s} > R_{\theta,s-1}$), они имеют вид

$$\int_{S_{s-1,s}} [\vec{E}_{s-1} \times (\vec{h}_{n,s})^*] d\vec{S} = \int_{S_{s,s-1}} [\vec{E}_s \times (\vec{h}_{n,s})^*] d\vec{S} \quad (4)$$

$$\int_{S_{s-1,s}} [\vec{e}_{n,s-1} \times \vec{H}_{s-1}^*] d\vec{S} = \int_{S_{s-1,s}} [\vec{e}_{n,s-1} \times \vec{H}_s^*] d\vec{S}$$

Анализ системы уравнений возбуждения (3) и условий сшивания показывает, что произвольный нерегулярный волновод может быть рассмотрен как последовательность связанных объемов, в которых происходит трансформация вихревых полей. Такое описание применимо не только к слабонерегулярным волноводам, но и к другим электродинамическим системам. Представление нерегулярных волноводов цепочками связанных волновых трансформаторов рассматривается в п 2.1.4. В общем случае можно записать соотношение

$$\bar{x}_{s+1} = G_s \bar{x}_s \quad (5)$$

где G_s - матрица трансформации (прохождения). Вектора \bar{x}_s и \bar{x}_{s+1} представляют собой совокупности коэффициентов, определяющих поля на входе и выходе s -го выделенного объема (волнового трансформатора).

Преобразование полей на последовательности S волноводных трансформаторов описывается с помощью матрицы передачи всей системы G :

$$G = \prod_{s=1}^S G_s \quad (6)$$

и соотношения

$$\bar{x}_S = G \bar{x}_1 \quad (7)$$

Такой подход удобен тем, что с помощью матриц трансформации можно описать свойства как резонаторов, так и волноводов, тем самым с

единой точки зрения можно рассматривать волновые и колебательные явления в приборах СВЧ.

В том случае, когда через объем V_s проходит электронный поток, связь между векторами \vec{x}_s и \vec{x}_{s+1} усложняется и в общем случае не описывается системой алгебраических уравнений. Матричное описание сохраняется, если поток рассматривается в линейном приближении в виде нормальных волн.

Постоянные распространения и структуры собственных волн «связанной» периодической системы определяются из решения задачи на собственные вектора и собственные значения матрицы отдельного s -го периода системы с потоком G_s

$$G_s \cdot E = \Lambda \cdot E, \quad (8)$$

$E = \{E_1, E_2, \dots, E_{2N+2}\}$ - матрица, составленная из собственных векторов матрицы G_s , Λ - диагональная матрица, элементами которой являются собственные значения G_s , $\lambda_j = \exp(\alpha_j + i \cdot \varphi_j)$, здесь α_j - постоянная нарастания (затухания), φ_j - фазовый сдвиг j -й волны на период системы,

который определяет постоянную распространения $\beta_j = \frac{\varphi_j}{d}$, d - период системы.

В п.2.2 записаны основные уравнения теории одномодового взаимодействия потока и поля. В п.2.2.1 рассматривается описание вихревых полей переменной структуры с помощью эквивалентных схем. П.2.2.2 посвящен построению теории в малосигнальном приближении. При учете продольного и поперечного взаимодействия потока и поля записывается дисперсионное уравнение структуры с потоком в алгебраическом виде, выводятся аналитические выражения для компонент собственных волн системы. Показаны особенности постановки задачи для определения взаимодействия в системе конечной длины. Для анализа самовозбуждения системы записывается характеристическое уравнение, которое можно рассматривать как уравнение относительно комплексной частоты $\hat{\omega} = \text{Re } \omega + i \text{Im } \omega$. В этом случае величина $\text{Im } \omega$ определяет инкремент нарастания колебаний в системе. Особенности анализа нелинейных нестационарных процессов при использовании эквивалентных схем рассмотрены в п.2.2.3. Используется приближение медленного изменения амплитуд во времени, дифференциальные уравнения возбуждения заменяются их разностным аналогом. При интегрировании используется неявная двухслойная схема с опережением. Электронный поток в рамках данной методики описывается с помощью модели крупных частиц. Силами пространственного заряда пренебрегается.

В п.2.3 записываются уравнения матричного многомодового метода анализа взаимодействия электронного потока и поля сверхразмерного периодического волновода в малосигнальном приближении. Метод основан

на уравнениях, записанных в п.2.1. В п.2.3.1 описываются особенности постановки задачи, в п.2.3.2 записаны основные уравнения возбуждения вихревого поля периодического сверхразмерного волновода, определяется матрица передачи отдельного периода системы G_s . Особенности учета граничных условий в сечениях входа и выхода и определение структуры полей в односекционных и многосекционных устройствах рассматривается в п.2.3.3. Для этого в системах конечной длины записываются условия трансформации волн друг в друга на входе и выходе структуры. Элементы матриц трансформации волн на входе D и выходе F могут быть определены для заданной геометрии системы из общей постановки задачи без учета влияния потока. В рамках предложенной методики используется приближение идеального "холодного" согласования, при котором на концах системы волна каждой моды гладкого волновода в отсутствии пучка не отражается и не трансформируется в другие моды. Такая ситуация соответствует условиям эксперимента, когда используются специальные согласующие рупоры. Можно также считать, что отрезок периодического волновода на входе и выходе соединен с полубесконечными гладкими волноводами.

Полная система уравнений, позволяющая анализировать возбуждение полей в секции периодического волновода имеет вид:

$$\begin{cases} G_s^S \vec{X}_0 = \vec{X}_S \\ D \cdot \vec{X}_0 = \vec{Q}, \\ F \cdot \vec{X}_S = \vec{P}, \end{cases} \quad (9)$$

где S - число периодов, \vec{X}_0 - вектор, состоящий из амплитуд волн потока и поля на входе, \vec{X}_S - вектор на выходе системы, \vec{Q} вектор размерностью $N+2$, элементами которого являются амплитуды падающих волн (N - волн в структуре и две волны в потоке). Вектор \vec{P} определяется амплитудами обратных волн на выходе секции (в случае односекционной системы - нулевой вектор) и включает в себя N элементов. D и F матрицы трансформации полей на входе и выходе системы с размерностью соответственно $N \times (2N+2)$ и $N \times N$, K - число периодов в системе, N - число рассматриваемых мод гладких волноводов сравнения.

В случае достаточно длинных систем ($S > 10$) из-за экспоненциально нарастающих членов матрицы G_s , соответствующих запердельным модам гладких волноводов сравнения, возникают трудности при прямом решении системы линейных алгебраических уравнений (9). Для решения этой системы был разработан специальный метод, основанный на преобразовании соотношений (9) путем разложения векторов \vec{X}_0 и \vec{X}_S по базису собственных векторов матрицы G_s (модам периодического волновода, с электронным пучком)

$$\vec{X}_0 = E \cdot \vec{\xi} \quad (10)$$

и дальнейшей замене переменных в соответствии с уравнением $\vec{\xi} = Z\vec{\mathcal{G}}$, где Z - диагональная матрица,

$$Z_{mm} = \begin{cases} 1, & |\lambda_m| \leq 1, \\ \frac{1}{\lambda_m^k}, & |\lambda_m| > 1, \end{cases} \quad (11)$$

Полученная в результате замены переменных система уравнений разрешима относительно $\vec{\mathcal{G}}$ и не содержит членов, нарастающих с ростом K . После определения $\vec{\mathcal{G}}$ осуществляется обратный переход и определяются неизвестные амплитуды волн в системе.

Для нахождения полей в многосекционных устройствах, основанных на взаимодействии релятивистского электронного потока с полями сверхразмерных волноводов, используется метод последовательных приближений, аналогичный методу многократного рассеяния [12*] и использующий линейность уравнений теории.

Результаты анализа точности и сходимости решения приводятся в **п.2.3.4**. Анализ точности и сходимости решения проводился при определении дисперсионных характеристик и структуры нормальных волн. Для исследования сходимости решения дисперсионного уравнения к точному при увеличении числа мод N в разложении (1) рассматривалось семейство периодических волноводов с фиксированной формой поверхности (период $d=1,5$ см, высота прямоугольной неоднородности $h=3$ мм, ширина выступа $b=0,5$ см) различающиеся значением диаметра волновода $D_v=8,0, 14,0$ и $36,0$ см. Соотношение диаметра волновода D_v/λ_π (λ_π - длина волны, соответствующая "π"-виду колебаний) составляет соответственно $\sim 2,5, \sim 5, \sim 12$. Такие пространственно - развитые замедляющие системы характерны для многоволновых черенковских генераторов [6*]. Анализ дисперсионных характеристик показал, что для всех рассмотренных случаев для обеспечения точности $\sim 0.1\%$ необходимо учитывать ~ 10 запредельных мод. Для достижения достаточной точности при определении структуры поля необходимо учитывать ~ 15 запредельных мод. Для волноводов с плавно меняющейся формой неоднородности проводилось сравнение с данными, опубликованными в литературе.

В **п.2.4**. записаны уравнения многомодового метода анализа нестационарных процессов в генераторах на сверхразмерных периодических волноводах. Методика анализа нестационарных процессов строится в соответствии с принципами, заложенными в п.2.1. В **п.2.4.1** записывается система матричных уравнений возбуждения полей нерегулярного волновода релятивистским электронным потоком. Для этого используются разностные аналоги уравнений возбуждения (3) для трех соседних регулярных участков (с номерами $s-1, s, s+1$). Эти уравнения дополняются условиями сшивания

полей (4) на стыках участков $s-1, s$ и $s, s+1$. При этом на каждом временном шаге считаются известными амплитуды прямых и обратных волн, а также их производные по координате $\hat{x}_s^\pm, \frac{d\hat{x}_s^\pm}{dz}$. Далее из полученной системы десяти

матричных уравнений исключаются девять неизвестных векторов: $\frac{d\hat{x}_{s-1, s, s+1}^\pm}{dz}$

и $\hat{x}_{s-1, s, s+1}^-$. Оставшееся одно матричное уравнение записывается для неизвестных в данный момент времени амплитуд прямых волн:

$$A_{1,s} \hat{x}_{s-1}^+ + A_{2,s} \hat{x}_s^+ + A_{3,s} \hat{x}_{s+1}^+ = \bar{B}_s \quad (12)$$

Уравнения возбуждения (12) для внутренних выделенных участков нерегулярного волновода дополняются условиями на входе и выходе системы (граничными условиями). Процедура записи граничных условий аналогична описанной в п.2.3. Предполагается, при этом, что известны амплитуды волн, приходящих в систему на входе и выходе.

Система уравнений (12) совместно с граничными условиями на каждом временном шаге решается с помощью матричной прогонки. Для анализа процессов в электронном потоке используется модель крупных частиц. Крупные частицы представляют собой тонкие кольца. Движение потока считается одномерным, силами пространственного заряда пренебрегается.

В п.2.4.2 проводится анализ сходимости решения и точности результата. Для подтверждения сходимости решения была выбрана электродинамическая система с параметрами типичными для МВЧГ 3-х сантиметрового диапазона. Первоначально рассматривалось влияние числа мод в разложении (1) на точность определения структуры поля в системе. Для решения этой задачи расчеты проводились в отсутствие электронного потока. На вход системы подавался сигнал, соответствующий возбуждению прямой волны моды E_{01} . Длина системы выбиралась равной 10 периодам. Сходимость решения контролировалась по поведению величины

$$q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^S (E_z^N(z_i) - E_z^{N-1}(z_i))^2}{\sum_{i=1}^S (E_z^N(z_i))^2}}$$

Полученные в диссертации результаты свидетельствуют о немонотонной сходимости решения. Приемлемая точность в распределении полей $\sim 3-5\%$ обеспечивается при учете более 13 мод (9 запредельных мод). Анализ точности решения проводился также при изучении резонансных свойств системы. Для этого вынужденные колебания электромагнитного поля в системе возбуждались полем промодулированного на частоте ω электронного потока. Рассматривались колебания, наиболее близкие по частоте к частоте π -вида колебаний низшей аксиально-симметричной моды

системы. Возбуждение системы производилось электронным потоком, модулированным по плотности на частоте ω . В том случае, когда наблюдается синхронизм потока и одной из продольных волн в системе, происходит резонансное увеличение мощности, излучаемой потоком. Показано, что достаточно близкие значения резонансных частот получаются при учете более 10 мод гладкого волновода. В этом случае ошибка в определении резонансной частоты менее 0.2%. Такая точность достаточна для изучения резонансных свойств систем. Анализ точности решения при самосогласованном взаимодействии проводился для систем длиной от 15 до 20 периодов. Для анализа зависимости точности результата от числа частиц на длину волны, соответствующую опорной частоте, был выбран вариант системы длиной 20 периодов. Данные, полученные с использованием различного числа частиц на длину волны, показали, что близкие результаты (слабо зависящие от числа частиц) получаются при числе частиц равном 48 и более.

В третьей главе исследуются волновые и колебательные явления в одномодовых системах мощной микроволновой электроники. В **п.3.1** обсуждаются общие свойства собственных волн замедляющих систем с электронным потоком. В **п.3.1.1** в рамках приближенного энергетического подхода рассматриваются дисперсия и структура собственных волн периодических систем с электронным потоком, показывается, что собственные волны являются совокупностью введенных для холодного случая волн в системе. В **п.3.1.2** изучаются общие особенности возникновения усиления, затухания и внутренних обратных связей при взаимодействии потока и поля на частотах, вблизи границы полосы прозрачности рабочей моды. При рассмотрении потоков мощности, переносимой собственной волной с комплексной постоянной распространения, определено значение частоты, когда усиление меняется на затухание. Для системы с положительной дисперсией на этой частоте, которая может быть названа "горячей" границей полосы прозрачности, выполняется условие $\sin(\varphi)=0$. В **п.3.1.3** рассматривается усиление и самовозбуждение систем с затуханием, характерным для открытых систем, записываются стартовые условия возбуждения колебаний в системе типа ЛОВ при связи потока и поля выше критической.

В **п.3.2** анализируются общие особенности возбуждения колебаний и волн в замедляющих системах конечной длины. В **п.3.2.1** исследуются особенности возбуждения и подавления продольных мод в системах с электронным потоком. Показано, что в замедляющей системе, даже согласованной на входе и выходе, при введении электронного потока возникают отражения. Резонансный отклик системы на внешний сигнал возникает при выполнении условий $\varphi_m \cdot S = m\pi$, где $s=0,1,\dots,S$ - номер моды продольных колебаний, φ_m - сдвиг фазы прямой волны на период

структуры, S -число периодов в системе. Наибольшую добротность имеет мода с номером $m=S-1$, резонансная частота которой наиболее близка к “ π ”-виду. Введение электронного потока при любых условиях согласования приводит к возбуждению продольной моды системы, находящейся в синхронизме с потоком. В п.3.2.2 исследуется возбуждение продольных мод в системе с преобладающим взаимодействием ЛБВ-типа, показано, что электронная нагрузка приводит к смещению резонансных частот в сторону меньших значений и возникновению конкуренции между соседними модами. Особенности возбуждения полей при преимущественном взаимодействии ЛОВ-типа рассмотрены в п.3.2.3. Показано, что в этом случае условия согласования структуры играют меньшую роль, резонансные свойства системы и самовозбуждение в основном определяются внутренними обратными связями.

П.3.3 посвящен исследованию усиления и самовозбуждения в ЛБВ на цепочках связанных резонаторов, имеющих отрицательную дисперсию основного типа волны. В п.3.3.1 описана конструкция системы и особенности взаимодействия потока и поля в ЛБВ на цепочках связанных резонаторов. В п.3.3.2 рассмотрены частотные характеристики секций ЛБВ, в том числе особенности согласования и моделирования граничных нагрузок. Особенности усиления и самовозбуждения колебаний в секциях ЛБВ рассмотрены в п.3.3.3. Показано, что в таких системах взаимодействие потока и поля на частоте вблизи π -вида границы полосы прозрачности характеризуется скачкообразным изменением решений дисперсионного уравнения при повышении ускоряющего напряжения. Такое изменение дисперсионных характеристик сопровождается возникновением внутренних обратных связей, приводящих к резкому уменьшению стартовой длины системы; частота генерации в этом случае практически не зависит от условий согласования и длины структуры. Стабильное усиление в системе наблюдается при меньших ускоряющих напряжениях, при этом возникает изрезанность амплитудно-частотной характеристики из-за отражений волн от концов системы. Самовозбуждение отдельных секций возникает на резонансных частотах продольных мод при длине системы больше стартовой. В п.3.3.4 представлены результаты анализа усиления колебаний в мощных многосекционных ЛБВ. Изучено усиление и самовозбуждение колебаний в многосекционных ЛБВ; для трех- и четырех- секционных ЛБВ получено удовлетворительное соответствие данных теории и эксперимента по коэффициенту усиления и полосе усиливаемых частот [4].

П.3.4 посвящен изучению черенковского излучения релятивистского электронного потока в гофрированном и диафрагмированном волноводах. Теоретические исследования проводились в процессе разработки и экспериментального исследования релятивистского черенковского генератора на гофрированном волноводе [5]. В п.3.4.1 описана конструкция генератора и особенности теоретического описания. Адекватность

используемого теоретического подхода иллюстрируется сопоставлением данных теории и эксперимента при исследовании несвязанной системы. В п.3.4.2 в широком диапазоне изменения параметров потока исследуются дисперсионные зависимости, распределения полей вдоль системы и частотные характеристики. На основе анализа структуры собственных волн показывается, что в устройстве одновременно присутствуют как механизмы усиления типа ЛБВ, так и обратные связи типа ЛОВ, поэтому рассматриваемый источник излучения может быть назван ЛБВ-ЛОВ. Типичный вид дисперсионных зависимостей показан на рис.1 (α - постоянная нарастания (затухания), φ - фазовый сдвиг волны на период системы, M – коэффициент взаимодействия, вводимый в теории). В п.3.4.3 анализируются условия самовозбуждения системы. Численно показано, что внутренние обратные связи и отражения от концов устройства приводят к самовозбуждению прежде всего вблизи π -вида границы полосы прозрачности, при этом существуют зоны генерации, разнесенные по величине тока пучка и частотам. Полученные в теории пусковые токи и частоты самовозбуждения соответствуют условиям эксперимента.

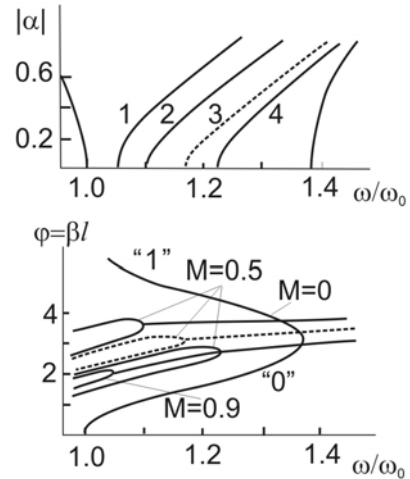


Рис.1. Дисперсионные характеристики ЛБВ-ЛОВ при сильной электронной нагрузке, $J_0=2.6$ кА; 1- $M=0.9$; $V_0= 700$ кВ; 2- $M=0.5$; $V_0=200$ кВ; 3- $M=0.5$; $V_0= 400$ кВ; 4- $M=0.5$; $V_0= 700$ кВ.

Исследованию дисперсии волн в резонансной замедляющей структуре с электронным пучком и плазмой посвящен п.3.5. На примере электродинамической системы типа цепочек связанных резонаторов с отрицательной дисперсией показывается, что плазма в канале периодической замедляющей структуры может существенно влиять на взаимодействие электронного пучка с ее волнами. Определена область параметров системы, при которых усиливаемая пучком плазменная волна с большим инкрементом имеет возможность связываться с волной структуры и обмениваться с ней энергией, образуя гибридные волны. Вследствие этого коэффициент усиления волны структуры резко возрастает, а величина ее инкремента порядка инкремента плазменной волны.

В п.3.6 рассматриваются основные особенности взаимодействия потока и поля в релятивистских черенковских генераторах на поверхностной волне (РГПВ). В п.3.6.1 кратко описана постановка задачи, принцип действия и основные результаты экспериментальных исследований генератора. В п.3.6.2 рассмотрены особенности возбуждения поверхностного поля периодического

волновода на частоте границы полосы прозрачности. С помощью матричной многомодовой методики исследуются дисперсионные характеристики сверхразмерного периодического волновода с электронным потоком, анализируется объемная структура собственных волн, проводится анализ низкочастотного сдвига горячей границы полосы прозрачности. В п.3.6.3 исследуются резонансные свойства секций периодического волновода с электронным потоком, усиление и самовозбуждение системы. Численно показывается, что в генераторе поверхностной волны на сверхразмерном периодическом волноводе объемные поля не вносят существенного вклада в процессы усиления и слабо влияют на стартовые условия самовозбуждения. Обосновывается возможность теоретического анализа основных особенностей нелинейных нестационарных процессов с помощью приближенной энергетической методики, основанной на введении эквивалентных схем.

В п.3.6.4 в широком диапазоне изменения параметров потока с помощью нелинейной нестационарной методики проводится анализ установления колебаний в генераторе поверхностной волны. Показывается, что самовозбуждение системы наблюдается на частотах внутри полосы прозрачности, причем при реализации синхронизма потока и поля непосредственно вблизи π -вида стартовые токи и мощность излучения имеют минимум. Величины внутренних обратных связей и связей за счет отражений при взаимодействии вблизи границы полосы прозрачности поверхностной волны близки, поэтому стартовые условия генерации мало отличаются для согласованных и рассогласованных систем. Показано, что развитие генерации во времени характеризуется конкуренцией продольных мод, причем в наиболее эффективных режимах устанавливается ближайшая к π -виду продольная мода.

Исследуется зависимость мощности генерации от преобладающего механизма

взаимодействия ЛБВ- или ЛОВ- типа. С помощью нелинейного нестационарного анализа показано, что мощность генерации в РГПВ с преобладающим взаимодействием ЛБВ типа может на порядок превышать мощность генерации в системе с преобладающим взаимодействием типа

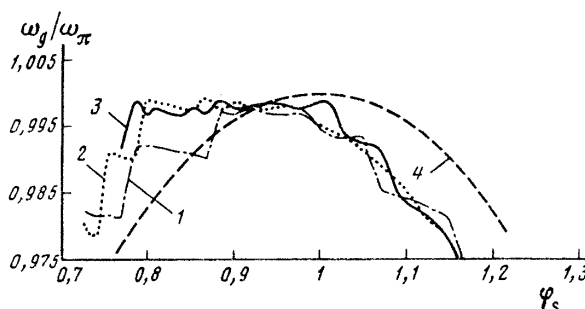


Рис. 2. Зависимость от нормированного на π пролетного угла φ_s частоты генерации для условий согласования $Z_0=Z_H=0.1Z_e$ (кривая 1), $Z_0=Z_H=0.5Z_e$ (кривая 2), $Z_0=Z_H=Z_e$ (кривая 3) и частоты кинематического синхронизма (кривая 4).

ЛОВ. При этом излучение РГПВ ЛБВ-типа (пролетный угол $\frac{\omega_s}{v_o} d = \varphi_s < 1$ на

рис.2, ω_s -частота синхронизма потока и поля) характеризуется дискретными частотами, на которых наблюдается самовозбуждение и генерация, в ЛОВ ($\varphi_s > 1$) частота генерации плавно изменяется при изменении точки кинематического синхронизма (рис.2, Z_o, Z_H -эквивалентные сопротивления входа и выхода, Z_e -волновое сопротивление системы). Рассмотрено влияние секционирования системы на повышение эффективности генерации. При оптимизации параметров двухсекционного генератора показано, что его эффективность может существенно превышать максимальную эффективность односекционного генератора, при этом незначительное изменение длины области дрейфа и длин секций может приводить к изменению эффективности в несколько раз. Полученное оптимальное распределение поля характеризуется возбуждением основной продольной моды в первой секции и распределением типа ЛБВ - во второй.

В п.3.6.5 исследуются особенности синхронизации колебаний в генераторе на периодическом волноводе. Формирование спектра и уровня выходного сигнала в многосекционной системе генератора определяется связью между отдельными секциями. Для типичных конструкций секции оказываются связанными по полю и по пучку, промодулированному в первой секции. В том случае, когда частота генерации в первой секции не совпадает с частотой самовозбуждения второй секции, во всей системе происходят процессы, связанные с нелинейным взаимодействием колебаний отдельных секций, и, прежде всего, с процессами синхронизации. Рассмотрение принудительной синхронизации отдельных секций внешним сигналом передаваемым по полю или с помощью предварительно промодулированного электронного потока показало, что процессы в рассматриваемом СВЧ-генераторе близки к процессам синхронизации в генераторах различных типов.

Для анализа процессов взаимной синхронизации секции в РГПВ был выбран двухсекционный вариант генератора с преимущественным взаимодействием ЛОВ-типа. В каждой секции по мере увеличения их длин могла возникать одночастотная генерация. Период секций несколько отличался, при этом частоты генерации были близкими. При малой длине первая секция может выступать как усилитель сигнала внешней ЭДС. В том случае, когда наблюдается взаимная синхронизация секций, генерация является одночастотной, причем изменение периода первой секции (и, соответственно, ее резонансной частоты) приводит к соответствующему изменению частоты генерации всей системы. Численно показано, что в том случае, когда стартовые условия самовозбуждения первой секции не выполнены, тем не менее может существовать область параметров, когда частота генерации всей системы определяется резонансными процессами в

первой секции. Анализ односекционных и многосекционных генераторов показал, что область принудительной и внутренней синхронизации секций в генераторе ЛБВ-типа в несколько раз уже, чем в аналогичном генераторе с преимущественным взаимодействием ЛОВ типа.

Четвертая глава посвящена исследованию поперечного и комбинированного (одновременного поперечного и продольного) взаимодействий в релятивистских источниках на периодических волноводах. В п.4.1 приводятся примеры периодических систем, применимых в релятивистской электронике, в которых может преобладать поперечное взаимодействие потока и поля. В том случае, когда рабочие частоты удовлетворяют условию существования аномального эффекта Доплера

$$\omega \left(1 - \frac{v_0}{v_\phi} \right) = -\omega_c$$

$$\left(\omega_c = \frac{\omega_{c0}}{\gamma}, \quad \omega_{c0} = \frac{|e|}{m_0} B, \quad \gamma = \left(1 - \left(\frac{v_0}{c} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \right) \quad (13)$$

или эквивалентному выражению для синхронизма медленной циклотронной волны и одной из волн структуры (основной или “-1” –й пространственной гармоники) в системе может наблюдаться усиление или самовозбуждение. Генератор, основанный на данном принципе взаимодействия потока и поля, не требует предварительной закрутки потока и может быть назван МЦР на аномальном эффекте Доплера (МЦРАД).

Рассматриваются электродинамические свойства структур с преобладающим поперечным взаимодействием потока и поля и особенности их описания в рамках приближенной энергетической методики при представлении электронного потока в виде совокупности волн пространственного заряда, циклотронных и синхронных волн.

В п.4.2 изучается влияние фокусирующего магнитного поля на дисперсию волн в системах с поперечным и комбинированным взаимодействиями. При изменении магнитного поля меняется частота циклотронного вращения электронов и, соответственно, меняются постоянные распространения быстрой и медленной циклотронных волн. При увеличенных значениях частоты циклотронного вращения быстрая и медленная циклотронные волны могут взаимодействовать с различными, далеко относящими друг от друга пространственными гармониками. Так, при циклотронных частотах $1,5 < \omega_c / \omega_\pi < 2,0$ обе циклотронные волны взаимодействуют с полем системы вблизи высокочастотной границы полосы прозрачности: быстрая волна - вблизи сдвига фаз $\varphi = -\pi$, медленная в

области - $\varphi = +3\pi$. Показано, что в областях значений величины магнитного поля, когда взаимодействие происходит вблизи границы полосы прозрачности, собственные волны системы характеризуются максимальными инкрементами нарастания. В этих режимах подробно изучены изменения решений дисперсионного уравнения для устройств с поперечным и комбинированным взаимодействием.

В п.4.3 при учете отражений от концов системы изучаются распределения амплитуд волн потока и поля вдоль устройства. Показывается, что при взаимодействии вблизи высокочастотной границы полосы прозрачности распределение поля характерно для ЛБВ с положительной дисперсией основного типа волны структуры. Для МЦР на аномальном эффекте Доплера исследованы частотные характеристики для различных значений величины магнитного поля. Показано, что максимальное усиление достигается вблизи горячей границы полосы прозрачности. Определены пусковые условия генерации без учета влияния продольного взаимодействия и с учетом.

Теоретические исследования проводились в процессе разработки и экспериментального исследования релятивистского циклотронного генератора [7]. Тонкий аксиально-симметричный электронный поток проходит в кольцевом зазоре замедляющей структуры типа ребристый стержень в круглом волноводе. Поток взаимодействует с поперечными полями зазоров между ребрами и волноводом. Замедляющая структура на выходе переходит в излучающий рупор. Для получения устойчивой генерации используется принцип самовозбуждения колебаний вблизи частоты π -вида границы полосы прозрачности.

Численный анализ показал, что в отсутствие потока частотная зависимость выходной мощности на сопротивлении нагрузки имеет много максимумов. Они соответствуют условиям резонанса при

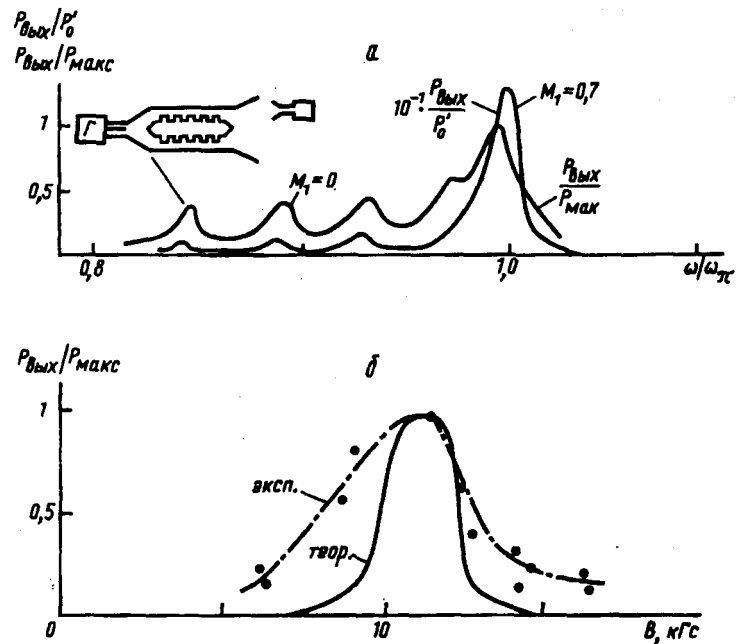


Рис.3. Зависимость выходной мощности сигнала от частоты $Z_0=Z_H=377$ Ом; $\epsilon_0/V_0=0.05$ (а); зависимости теоретического и экспериментального значений мощности сигнала на выходе от индукции магнитного поля (б). $V_0=300$ кВ; $J_0=2$ кА; $M_1=0.7$; $\epsilon_0/V_0=0.05$.

отражении от концов системы (возбуждение продольных мод). Абсолютный максимум достигается вблизи частоты π -вида (рис. 3,а). Влияние потока приводит к существенному увеличению мощности выходного сигнала прежде всего на частотах, примыкающих к границе полосы $\omega \approx \omega_\pi$. Вблизи вершины кривой мощность, развиваемая ЭДС \mathcal{E}_0 , становится отрицательной, и выполняются условия самовозбуждения. Частотная зависимость выходной мощности от магнитной индукции при заданном значении \mathcal{E}_0 показана на рис. 3б. Кривые имеют отчетливо выраженный максимум, соответствующий циклотронному резонансу при аномальном эффекте Доплера. Максимум теоретической и экспериментальной кривых приходится на одно и то же значение магнитной индукции $B = 11$ кГс. Частота генерируемых колебаний $f_{\text{ген}}$ соответствует данным теории и близка к частоте π -вида ($\lambda_{\text{ген}} = 3,1\text{—}3,2$ см).

Исследованию соотношения черенковского и МЦР механизмов взаимодействия релятивистского электронного потока с полем резонансной замедляющей структуры в условиях комбинированного резонанса посвящен **п.4.4**. Найдены области значений величин магнитного поля, когда одновременное действие продольного и поперечного взаимодействия приводит к уменьшению или увеличению обратных связей в устройстве. Этим значениям соответствуют условия одновременного синхронизма поля с волнами пространственного заряда и циклотронными волнами:

$$\frac{\omega}{\nu_0} \pm \left(\frac{\omega_c}{\nu_0} - \frac{2\pi}{d} \right) = \frac{\omega}{\nu_0} \pm \frac{\omega_q}{\nu_0}, \quad (14)$$

$$\frac{\omega}{\nu_0} \mp \left(\frac{\omega_c}{\nu_0} - \frac{2\pi}{d} \right) = \frac{\omega}{\nu_0} \pm \frac{\omega_q}{\nu_0}.$$

На ряде примеров показывается, что устройство комбинированного типа ЛОВ-ЛБВ-МЦРАД обладает наименьшими пусковыми токами и наибольшей выходной мощностью.

В **п.4.5** анализируются принципиальные подходы, необходимые для улучшения согласования системы при сильной электронной нагрузке и переходе от генерационных к усилительным режимам. Основная идея состоит в определении волновых сопротивлений собственных волн системы с потоком и создании специальных условий согласования на входе и выходе структуры, показано, что при этом необходима предварительная модуляция потока по плотности и скорости. Обсуждаются конструкции соответствующих одномодовых усилителей с резонансными замедляющими структурами на продольном и поперечном взаимодействии, работающих в условиях черенковского синхронизма и комбинированного резонанса. Условия «горячего» согласования получены для устройств с продольным, поперечным и комбинированным взаимодействиями.

Пятая глава посвящена исследованию релятивистских устройств на сверхразмерных периодических волноводах, в которых принципиальным является возбуждение многих волн системы.

В **п.5.1** предложен метод теоретического определения дисперсии волн в открытых периодических структурах, не требующий решения дисперсионного уравнения. Построена линейная теория продольного взаимодействия релятивистского электронного потока с дифракционным полем открытых периодических структур в режиме возбуждения поверхностных волн. Показано, что в данном случае возрастание амплитуд дифракционных гармоник вблизи аномалии Вуда соответствует черенковскому резонансу электронов с поверхностной волной.

В **п.5.2.** исследуется дисперсия и структура мод, в том числе «гибридных», периодических волноводов с различным отношением диаметра волновода к длине волны излучения. В **п.5.2.1** исследуются волны в периодическом волноводе с отношением $D_0/\lambda \sim 1,0$. Определяются оптимальные соотношения между шириной ступеньки и периодом системы соответствующие максимальному замедлению низшей моды структуры. В **п.5.2.2** приведены результаты исследования собственных волн сверхразмерного периодического волновода ($D_0/\lambda \gg 1,0$). Показано, что увеличение диаметра волновода при фиксированной величине неоднородности приводит к увеличению замедления низшей аксиально-симметричной моды периодического волновода, а структура замедленного поля приближается к поверхностной волне.

Проведению анализа дисперсии и структуры волн в периодических волноводах с электронным потоком посвящен **п.5.3.** В **п. 5.3.1** исследуется

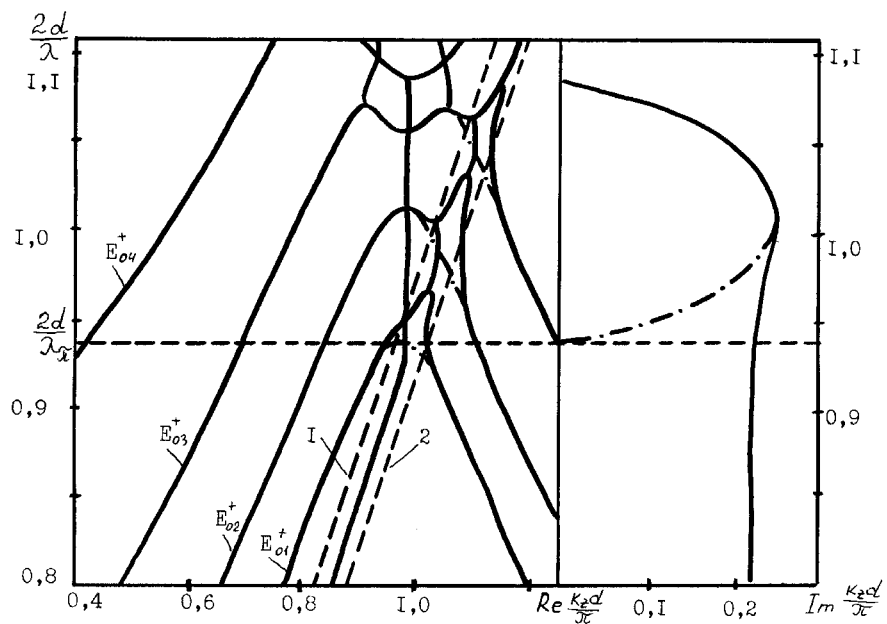


Рис.4. Дисперсионные характеристики периодического волновода с электронным потоком (сплошные линии). Штриховые линии соответствуют БВПЗ (1) и МВПЗ (2), штрих-пунктирные – волнам периодического волновода без пучка.

дисперсия волн в периодическом волноводе с кольцевым электронным потоком. Типичный вид дисперсионных характеристик показан на рис.4. Показано, что в периодических волноводах ниже критической частоты аксиально-симметричной моды реализуется широкополосная неустойчивость, которая может быть сопоставлена с усилением увлекаемых полей в электронном потоке из-за влияния периодической поверхности волновода.

В п.5.3.2 приводятся данные анализа структуры собственных волн периодического волновода с электронным потоком. Структура низшей аксиально-симметричной моды, распространяющейся без усиления близка к структуре поверхностной волны для "холодного" волновода (рис. 5, кривая 1). Взаимодействие этой волны с потоком характеризуется периодической связью ($\text{Im}(k_z d/\pi)=0$). Ее фазовая скорость отличается от средней скорости электронного пучка. Электрическое поле, соответствующее этой собственной волне, вытесняется из области потока, продольная компонента вихревого электрического поля E_z в области пучка имеет минимум (рис. 5, кривая 2). Аналогичный характер зависимостей

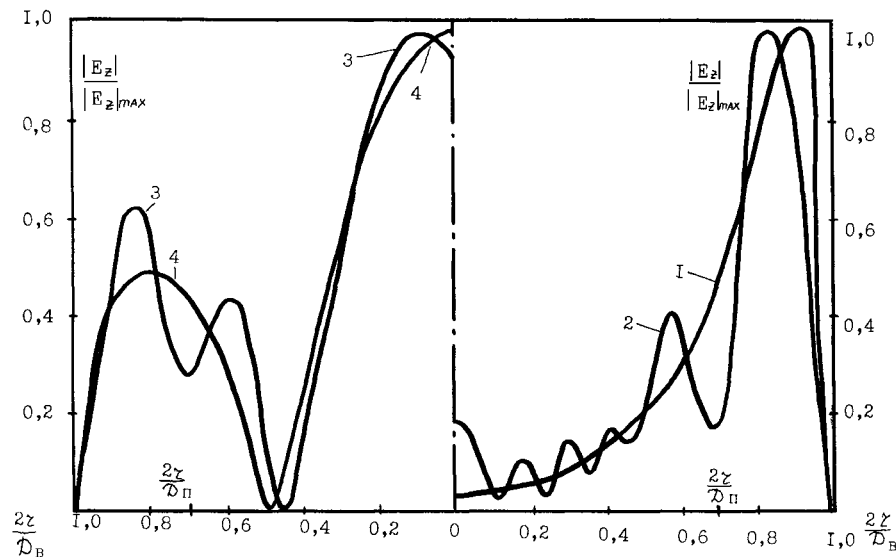


Рис.5. Структуры полей, соответствующих собственным волнам периодического волновода: кривая 1 – поверхностная волна, кривая 4 – прямая волна моды E_{02} . Кривые 2, 3 – структуры полей мод «горячем» случае .

наблюдается при взаимодействии электронного потока и прямой волны моды E_{02} периодического волновода (рис. 5, кривые 3,4).

Качественно иное распределение поля вдоль радиуса наблюдается для возрастающей и затухающей волн (кривые 1, 2 рис.6). Эти волны имеют одинаковые структуры полей. Наибольший интерес представляет распространяющаяся слева направо возрастающая волна. Фазовая скорость этой волны близка к скорости электронов, а электромагнитное поле локализовано в области потока и убывает при удалении от него. Продольная компонента вихревого поля имеет резкий

максимум, а поперечная компонента E_r меняет свой знак в области пучка (рис. 6, кривые 1,2). При выбранных параметрах системы возрастающая волна соответствует усилению увлекаемых полей потока и может быть названа "электронной модой". В достаточно длинной системе (усилительной секции) при одновременном возбуждении различных "горячих" мод, возрастающая волна преобладает и определяет характер усиления.

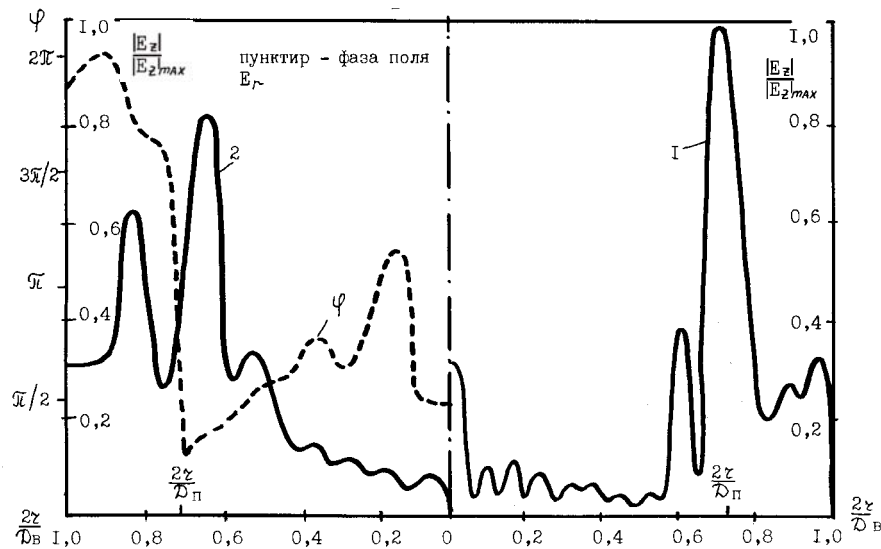


Рис.6. Структуры полей, соответствующих возрастающей и убывающей собственным волнам периодического волновода с электронным потоком (сплошные линии). Кривая 1 – продольная компонента E_z , кривая 2 – поперечная компонента E_r вихревого поля.

Высшие моды электромагнитного поля, распространяющиеся в периодической системе, слабо возмущаются электронным потоком, т.к. их фазовые скорости сильно отличаются от скорости электронов. Возбуждение этих волн обусловлено, в основном, резонансными эффектами в системе конечной длины.

В п.5.4 приводятся результаты исследования взаимодействия электронного потока и электромагнитного поля в секциях сверхразмерных периодических волноводов. Исследование распределения полей в секциях сверхразмерных периодических волноводов (п.5.4.1) показало, что поля в таких системах являются суперпозицией полей, локализованных вблизи стенки волновода и соответствующих поверхностной волне в системе конечной длины, а также полей, локализованных в области электронного пучка и соответствующих увлекаемым полям. На оси системы образуется мощное приосевое излучение, вызванное рассеянием поверхностной волны и увлекаемых полей на неоднородностях системы. В п.5.4.2 исследуются резонансы электромагнитных волн в секциях периодических волноводов без электронного потока. В отсутствие электронного потока основными

являются продольные резонансы поверхностной волны. При введении электронного потока (п.5.4.3) в зависимости мощности на выходе системы от длины появляется дополнительная изрезанность. Глобальные максимумы соответствуют продольному резонансу возрастающей волны и обратной поверхностной волны, а локальные максимумы - с возбуждением объемных волн. В случае двух секций периодического волновода, разделенных участком гладкого волновода, обратная связь между секциями приводит к раздвоению максимумов мощности вихревого поля на выходе системы в зависимости от частоты.

В п.5.5 представлены результаты анализа многоволнового черенковского генератора (МВЧГ). Показано, что распределение вихревых полей в многосекционных черенковских устройствах является устойчивым при некотором изменении параметров пучка и электродинамической системы. Теоретические исследования основных закономерностей взаимодействия потока и поля в МВЧГ (п.5.5.1) проводились в процессе разработки и экспериментального исследования релятивистского генератора на сильноточном электронном потоке [14,17]. Получено соответствие данных теории и эксперимента для пусковых токов и частоты возбуждения, проведен анализ эффективности излучения МВЧГ в зависимости от величины фокусирующего магнитного поля.

Показано, что существуют две области значений магнитной индукции, при которых наблюдаются максимумы излучения (рис.7). Получено соответствие данных этих исследований экспериментальным результатам. Изучена диаграмма направленности излучения МВЧГ, показано, что существенную роль в формировании диаграммы направленности играет возбуждение поверхностной волны. В п.5.5.2 приводятся результаты исследования полей в многоволновом черенковском усилителе, полученные в рамках многомодовой методики в приближении малых сигналов. Показано, что структуры полей являются устойчивыми в некотором диапазоне изменения параметров системы и пучка. Определены стартовые токи самовозбуждения системы для различных геометрий периодической неоднородности, показано, что существует оптимальное значение радиуса потока, соответствующее наибольшей эффективности взаимодействия потока и поля.

В п.5.5.3 с помощью нестационарной многомодовой методики изучаются процессы установления генерации в многоволновом черенковском

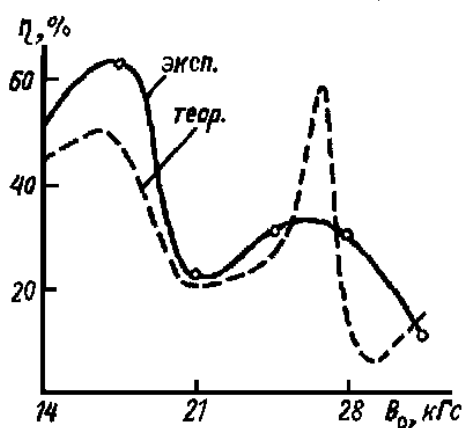


Рис. 7. Экспериментальная и теоретическая зависимости КПД МВЧГ от магнитного поля.

генераторе. Показано, что характер процессов в МВЧГ во многом соответствует процессам в генераторе поверхностной волны: с течением времени в устройстве происходит смена основных механизмов взаимодействия потока и поля, установившееся значение частоты генерации в случае преобладающего механизма взаимодействия ЛБВ-типа, близко к частоте S-1 продольной моды колебаний в отдельной секции, при преобладающем механизме ЛОВ-типа частота генерации определяется внутренними обратными связями. Показано, что доля мощности переносимая поверхностной волной увеличивается при уменьшении ускоряющего напряжения. На рис.8 показаны распределения продольной компоненты поля вдоль системы на оси системы и в области пучка, а также профили продольной компоненты поля во всем объеме взаимодействия. Зависимости иллюстрируют повышение роли поверхностной волны при уменьшении ускоряющего напряжения. Проведенное сравнение теоретических

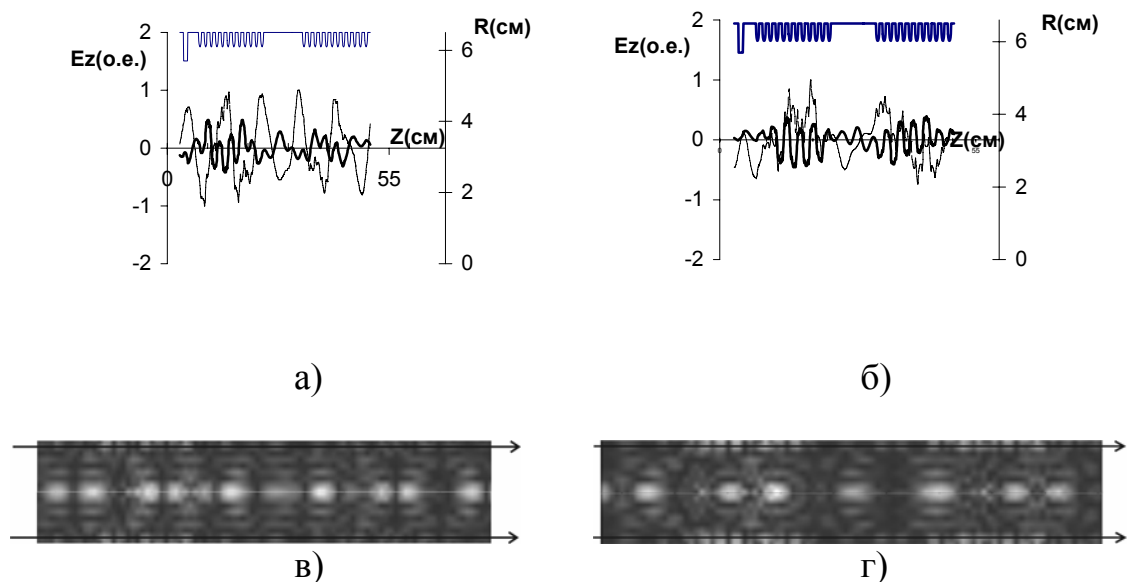


Рис.8. Распределение продольной компоненты поля вдоль системы (а,б). Сплошная линия – поле в области пучка, штриховая линия – поле на оси системы. Правая ось для профиля электродинамической структуры (верхняя часть рисунков). Профиль амплитуды продольной компоненты поля в системе(в,г): белый цвет соответствует максимальной амплитуде. а),в) - $U=1100$ кВ, $I=10$ кА, б),г) - $U=740$ кВ, $I=10$ кА.

результатов и опубликованных экспериментальных данных показало их соответствие по частоте и эффективности генерации.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Заключение

В диссертационной работе впервые проведено теоретическое исследование усиления, самовозбуждения и развития генерации в традиционных и релятивистских СВЧ-устройствах, основанных на длительном взаимодействии прямолинейных электронных потоков с полями резонансных одномодовых и многомодовых электродинамических структур на " π "-виде границы полосы прозрачности низшей моды структуры. Основные результаты и выводы этого исследования состоят в следующем.

1. Разработанный в работе метод анализа взаимодействия электронных потоков с полями пространственно-развитых электродинамических систем, позволяет с единых позиций рассматривать линейные, нелинейные и нестационарные процессы в мощных источниках микроволнового излучения, в том числе на частотах вблизи границы полосы прозрачности основной рабочей моды. Набор численных алгоритмов и программ, позволяет анализировать особенности взаимодействия потока и поля в резонансных режимах как в приборах традиционной нерелятивистской электроники, так и в релятивистских источниках микроволнового излучения, в том числе генераторах поверхностной волны на сверхразмерных периодических волноводах и многоволновых черенковских генераторах.

2. Анализ собственных волн периодических систем с электронным потоком позволил установить общие особенности возникновения усиления, затухания и внутренних обратных связей при взаимодействии потока и поля на частотах, вблизи границы полосы прозрачности рабочей моды, в том числе, формирование «горячей» границы полосы прозрачности. Показано, что в случае преобладающего взаимодействия ЛБВ типа система проявляет резонансные свойства на частотах, соответствующих колебательным модам с различными продольными индексами. При этом электронная нагрузка приводит к смещению резонансных частот в сторону меньших значений и возникновению конкуренции между соседними модами. При реализации преимущественного взаимодействия ЛОВ-типа, условия согласования структуры играют меньшую роль, резонансные свойства системы и самовозбуждение определяются внутренними обратными связями. Исследованы условия «идеального» согласования на входе и выходе для системы с электронным потоком, показана принципиальная возможность создания усилителей с уменьшенными обратными связями;

3. В ЛБВ на цепочках связанных резонаторов при повышении ускоряющего напряжения происходит скачкообразное изменение решений дисперсионного уравнения и возникновение внутренних обратных связей, приводящих к резкому уменьшению стартовой длины системы. В результате изучения усиления и самовозбуждения колебаний в многосекционных ЛБВ, для трех- и четырех- секционных ЛБВ, получено удовлетворительное

соответствие данных теории и эксперимента по коэффициенту усиления и полосе усиливаемых частот.

4. На примере электродинамической системы типа цепочек связанных резонаторов с отрицательной дисперсией исследованы волны в резонансной замедляющей структуре с электронным пучком и плазмой. Определена область параметров системы, при которых усиливаемая пучком плазменная волна с большим инкрементом имеет возможность связываться с волной структуры и обмениваться с ней энергией, образуя гибридные волны. Коэффициент усиления волны структуры в этом случае резко возрастает, а величина ее инкремента сравнима с инкрементом плазменной волны.

5. Процессы в релятивистских генераторах на гофрированном и диафрагмированном волноводах определяются механизмами усиления типа ЛБВ, обратными связями из-за отражений и внутренними обратными связями типа ЛОВ; численно обнаружено наличие зон генерации, разнесенных по величине тока пучка и частотам. Получено соответствие пусковых токов и частот самовозбуждения условиям эксперимента при исследовании ЛБВ-ЛОВ на гофрированном волноводе.

6. Исследована дисперсия волн в МЦР на аномальном эффекте Доплера. Определены области значений магнитной индукции, когда взаимодействие поля и поперечных волн потока происходит на частотах вблизи границы полосы прозрачности низшей аксиально-симметричной моды структуры. Эти режимы характеризуются максимальными инкрементами нарастания. Изучены особенности решения дисперсионного уравнения в системах с комбинированным взаимодействием. Показано, что в МЦРАД распределения амплитуд волн потока и поля при взаимодействии вблизи границы полосы прозрачности характерны для ЛБВ с положительной дисперсией основного типа волны структуры. При исследовании конкретного варианта генератора получено совпадение теоретических результатов с данными эксперимента по зависимостям выходной мощности от фокусирующего магнитного поля.

Исследовано соотношение черенковского и МЦР механизмов взаимодействия релятивистского электронного потока с полем резонансной замедляющей структуры в условиях комбинированного резонанса. Показано, что устройство комбинированного типа ЛОВ-ЛБВ-МЦРАД обладает наименьшими пусковыми токами и наибольшей выходной мощностью.

7. Численно показано, что в генераторе поверхностной волны на сверхразмерном периодическом волноводе объемные поля не вносят существенного вклада в процессы усиления и слабо влияют на стартовые условия самовозбуждения. С помощью нелинейного нестационарного анализа показано, что мощность генерации в РГПВ с преобладающим взаимодействием ЛБВ типа может на порядок превышать мощность генерации в системе с преобладающим взаимодействием типа ЛОВ. При этом спектр излучения РГПВ ЛБВ- типа характеризуется набором

дискретных частот, на которых наблюдается самовозбуждение и генерация, в РГПВ с преобладающим взаимодействием типа ЛОВ частота генерации плавно изменяется при изменении точки кинематического синхронизма. Изучение внешней и внутренней синхронизации в секциях многосекционных генераторов показало, что частота генерации в основном определяется процессами в первой секции.

8. Особенности многоволнового взаимодействия потока и поля в секциях черенковских источников на релятивистских электронных потоках заключаются в следующем: электронный поток сильно изменяет структуры полей собственных волн «связанной» системы, в частности, образуется электронная мода с максимумом вихревого поля в области локализации пучка, а также электромагнитные моды, характеризующиеся минимумом поля в области потока;

9. Вихревое поле, возбуждаемое релятивистским электронным потоком в секциях сверхразмерных периодических волноводов, является суперпозицией полей, локализованных у стенки и вблизи оси системы. При этом резонансные свойства секции в основном определяются возбуждением поверхностных волн, возбуждение объемных волн приводит к дополнительной изрезанности зависимости выходной мощности от частоты. Наилучшему энергообмену потока и поля соответствует оптимальный радиус потока, определяемый многоволновым характером взаимодействия.

10. Анализ усиления, самовозбуждения и генерации в релятивистских многоволновых черенковских источниках показал, что распределение вихревых полей в многосекционных черенковских устройствах является устойчивым к изменению параметров пучка и электродинамической системы.

При исследовании многоволнового черенковского генератора (МВЧГ) получено соответствие данных теории и эксперимента для пусковых токов, частоты возбуждения, а также для зависимости мощности излучения от величины фокусирующего магнитного поля. Численно показано, что в формировании диаграммы направленности существенную роль играет возбуждение поверхностной волны.

В процессе развития генерации в устройстве происходит конкуренция основных механизмов взаимодействия потока и поля. Установившееся значение частоты генерации близко к частоте продольной моды, ближайшей к π -виду колебаний поверхностной волны в отдельной секции, при этом доля мощности переносимая поверхностной волной увеличивается при уменьшении ускоряющего напряжения.

Цитируемая литература

1*. Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д., Сморгонский А.В., Цопп А.Э. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения потоком релятивистских электронов // Письма в ЖЭТФ, т.18, №4, 1973, с. 232-235.

2*. Александров А.Ф., Галузо С.Ю. Канавец В.И., Плетюшкин В.А. Возбуждение поверхностных волн релятивистским электронным потоком в диафрагмированном волноводе // ЖТФ, т.51, №8, 1981, с. 1727-1730.

3*. Канавец В.И. Тенденции развития релятивистской СВЧ электроники больших мощностей // В сб. Генераторы и усилители на релятивистских электронных потоках. М., 1987, с.5-27.

4*. Черепенин В.А. Многоволновое когерентное излучение релятивистских электронных потоков // Генераторы и усилители на релятивистских электронных потоках. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987, с.76-95.

5*. Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистский многоволновой черенковский генератор // Письма в ЖТФ. 1983, т.9, № 22, с. 1385-1389.

6*. Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы – Новосибирск: Наука. Сиб.отд-ние, 1991- 296 с.

7*. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д. Усиление лампы с бегущей волной за пределами полосы пропускания // Радиотехника и электроника, 1974, т.19, №4, с. 957-960.

8*. Булгакова Л.В., Трубецков Д. И., Фишер В.Л., Шевчик В.Н. Лекции по электронике СВЧ приборов типа 0 (дискретный подход к описанию взаимодействия электронного потока с ВЧ электромагнитным полем) – Саратов: Изд. Саратовского ун-та, 1974. 221с.

9*. Аркадакский С.С., Цикин Б.Г. Уравнения возбуждения однородных волноведущих систем на частоте отсечки // Радиотехника и электроника, 1976, т. 21, №3, с. 608-611.

10*. Солнцев В.А., Кравченко Н.П. Волновая линейная теория ЛБВ вблизи границы полосы пропускания // Радиотехника и электроника. 1978, т.23, № 5, с.1103-1105.

11*. Ильинский А.С., Косич Н.Б. Дифракция плоской волны на двумерной периодической структуре // Радиотехника и электроника. 1974, т.19, №6, с.1171-1182.

12* Митра Р., Ли С. Аналитические методы теории волноводов. -М.: Мир, 1974, 328 с.

Основные публикации по теме диссертации

1. Канавец В.И., Сандалов А.Н., Слепков А.И., Теребилов А.В. Группирование электронов в мощных широкополосных клистронах с высоким КПД. // Радиотехника и электроника, 1978, т. 23, №11, с. 2379-2390.
2. Канавец В. И., Мозговой Ю.Д., Пикунов В.М., Слепков А. И. Методы расчета и проектирования мощных многосекционных ЛБВ на связанных резонаторах. // Деп. рукопись. Электронная техника, сер. 1 Электроника СВЧ. 1981, № 11, с. 43; Москва, ЦНИИ Электроника, 1981, Р-3248.
3. Канавец В.И., Копылов В.В., Корешков Е.Н., Мозговой Ю.Д., Пикунов В.М., Слепков А. И. Исследование мощных ЛБВ на связанных резонаторах. //Деп. рукопись. Электронная техника, сер. I Электроника СВЧ, 1981. №. 11, с. 68; Москва, ЦНИИ Электроника, 1981. Р-3201.
4. Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Канавец В.И., Плетюшкин В.А., Слепков А.И. Особенности черенковского излучения релятивистского электронного потока в гофрированном волноводе. //ЖТФ, 1980, т.50, №11, с.2381-2389.
5. Александров А.Ф., Афонин А.М., Галузо С. Ю., Канавец В.И., Кубарев В.А., Лопухин В.М., Плетюшкин В.А., Руднев А.П., Сандалов А.Н., Слепков А. И. Релятивистские черенковские генераторы с резонансными замедляющими структурами. // В кн. Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. Горький, ИПФ АН СССР, 1981, с.145-169.
6. Галузо С.Ю., Канавец В.И., Слепков А.И., Плетюшкин В.А. Релятивистский циклотронный генератор на аномальном эффекте Допплера. // ЖТФ, 1982, т.52, №8, с.1681-1683.
7. Канавец В. И., Слепков А.И. Соотношение между черенковским и МЦР механизмами в релятивистских генераторах на периодических волноводах.// 17 Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. ИСЭ СО АН СССР, Томск, 1982. с.172-175.
8. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Слепков А.И. Метод анализа усиления и самовозбуждения колебаний в мощных ЛБВ.// Деп. рукопись. М.ЦНИИ Электроника. 1984. Р-3812.24 с.
9. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Слепков А.И. Исследование самовозбуждения колебаний в мощных ЛБВ на связанных резонаторах. // Деп. рукопись. М.ЦНИИ Электроника. 1984.Р-3811. 24 с.
10. Гаруца Н.А., Канавец В.И., Слепков А.И. Многоволновая теория релятивистских устройств на периодических волноводах.// 4 Всесоюзный семинар по релятивистской высокочастотной электронике. М.,1984. с.46.
11. Канавец В.И., Слепков А.И. Обратные связи в релятивистских усилителях на периодических волноводах и их устранение. // 4 Всесоюзный семинар по релятивистской высокочастотной электронике. М.,1984, с.66.

12. Канавец В.И., Нифанов А.С., Слепков А.И. Многомодовые процессы в релятивистских устройствах на периодическом волноводе.// 6 Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. ИСЭ СО АН СССР Томск, 1986, с.113-116.

13. Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И., Кошелев В.И., Слепков А.И., Черепенин В.А. Взаимодействие электронного потока и электромагнитного поля в многоволновом черенковском генераторе с мощностью 10^{10} ватт.// СО АН СССР Томск, 1986, препринт.

14. Гаруца Н.А., Канавец В.И., Слепков А.И. Релятивистский генератор поверхностной волны комбинированного типа.// Вестник МГУ, сер.3. Физика, астрономия, 1986, т.27, №4, с.37-42.

15. Канавец В.И. Мозговой Ю.Д., Слепков А.И. Исследование самовозбуждения колебаний в мощных ЛБВ.// Радиотехника и электроника 1986, т.31, №6, с.1178-1186.

16. Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И., Кошелев В.И., Слепков А.И., Черепенин В.А. Взаимодействие электронного потока и электромагнитного поля в многоволновом черенковском генераторе с мощностью 10^{10} ватт. //Радиотехника и электроника, 1987, т.32, №7, с.1488-1498.

17. Канавец В.И., Федоров А.В., Слепков А.И. Черепенин В.А. Линейная теория продольного взаимодействия релятивистского электронного потока с поверхностными волнами периодических структур. //Вестник МГУ, сер.3 Физика, астрономия, 1987, т.28, №5, с.79-82.

18. Гаруца Н.А., Канавец В.И., Слепков А.И. Матричный метод в теории взаимодействия релятивистских электронных потоков с полями многомодовых электродинамических структур.// Радиотехника и электроника, 1988, т.33, №4, с.783-795.

19. Канавец В.И., Нифанов А.С., Слепков А.И. Многомодовое взаимодействие электронного потока и электромагнитного поля периодического волновода.// 7 Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. ИСЭ СО АН СССР. Томск, 1988, с.277-279

20 Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И., Копенкин А.Д., Кошелев В.И., Попов В.А., Слепков А.И. , Федоров А.В., Черепенин В.А. Физические процессы в многоволновых черенковских генераторах. // В сб. Релятивистская высокочастотная электроника, вып.5, 1988, ИПФ АН СССР, Горький, с.78-100.

21. Bugaev S.P., Kanavets V.I., Koshelev V.I., Popov V.A., Slepkov A.I., Fedorov A.V., Cherepenin V.A. Investigation of millimeter wavelength-rang gigawatt power-level multiwave Cerenkov generator. // Proc.7 Inter.Conf. on High-Power Particle Beams.Karlsruhe, 1988, p.218-223.

22. Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Попов В.А., Слепков А.И. Федоров А.В., Черепенин В.А. Исследование многоволнового черенковского

генератора миллиметрового диапазона гигаваттного уровня мощности. // Радиотехника и электроника, 1989, т.34, №2, с.400-408.

23. Bugaev S.P., Cherepenin V.A., Kanavets V.I., Klimov A.I., Kopenkin A.D., Koshelev V.I., Popov V.A., Slepков A.I. Relativistic multiwave Cerenkov generators.// IEEE Trans.on plasma Sci. 1990, v.18, №3, pp.525-536.

24. Канавец В.И., Федоров А.В., Слепков А.И. Определение дисперсии волн открытых периодических структур методом пробного источника. //Вестник МГУ, сер.3 Физика, астрономия, 1990, т.31, №4, с.30-33.

25. Канавец В.И., Нифанов А.С., Слепков А.И. Возбуждение вихревых полей периодического волновода интенсивным электронным потоком. // Вестник МГУ, сер.3 Физика, астрономия, 1990, т.31, №5, с.34-41.

26. Канавец В.И., Нифанов А.С., Слепков А.И. Собственные волны периодического волновода, связанного с электронным потоком. // Вестник МГУ, сер.3 Физика, астрономия, 1990, т.31, №6, с.80-83.

27. Канавец В.И., Карбушев Н.И., Остренский Е.И., Слепков А.И. Волны в резонансной замедляющей структуре с электронным пучком и плазмой. // Радиотехника и электроника, 1990, т.35, №12, с.2574-2581.

28. Мозговой Ю.Д., Слепков А.И. Исследование условий согласования в мощных ЛБВ на резонансных замедляющих системах. //Физика и применение микроволн. Труды всесоюзной школы-семинара.М.МГУ, 1991, с.18-21.

29. Канавец В.И., Каева Н.С., Слепков А.И. Анализ нестационарных процессов в генераторах на резонансных замедляющих структурах. //Физика и применение микроволн. Труды всесоюзной школы-семинара.М.МГУ.1991, с. 22-25.

30. Горбунов В.И., Земсков Ю.Б., Мозговой Ю.Д., Слепков А.И. Исследование усиления и самовозбуждения колебаний в мощных ЛБВ вблизи границ полосы прозрачности. //Физика и применение микроволн. Труды всесоюзной школы-семинара.М. МГУ. 1991, с.54-57.

31. Нифанов А.С., Слепков А.И. Собственные волны сверхразмерного периодического волновода. //Физика и применение микроволн. Труды всесоюзной школы-семинара.М.МГУ. 1991, с.123-126.

32. Канавец В.И., Молодцов В.В., Слепков А.И. Электромагнитные поля в камерах СВЧ- нагрева. //Физика и применение микроволн. Труды всесоюзной школы-семинара.М.МГУ. 1991, с.176-179.

33. Нифанов А.С., Слепков А.И. Резонансные явления в секционированных усилителях черенковского типа. //Физика и применение микроволн. Труды всесоюзной школы-семинара.М.МГУ. 1991, с.34-37.

34. Канавец В.И. Нифанов А.С. Каева Н.С., Слепков А.И. Особенности возбуждения электромагнитных полей в релятивистском черенковском устройстве на сверхразмерном волноводе. // Электронная техника.Сер.4 Электривакуумные и газоразрядные приборы. 1992, вып.3, с.3-8.

35. Канавец В.И., Молодцов В.В., Слепков А.И. Анализ процессов в многолучевом клистроне со стабилизирующими резонаторами. //Электронная техника.Сер.4 Электровакуумные и газоразрядные приборы, 1992, вып.3, с.8-10.
36. Bastricov S. Bugaev S.P. Kanavets V.I.Koshelev V.I.Popov V.A.,Deychuly M.V., Slepков A.I. The state of art of investigation of relativistic multiwave microwave generators. // Proc. 9 Intern. Conference on High-Power Particle Beams. Vol.3, 1992, pp.1586-1591.
37. Kanavets V.I., Nifanov A.S., Slepков A.I. Relativistic Multiwave Serencov Generator. // Proc. 9 Intern. Conference on High-Power Particle Beams. Vol.1. 1992, pp. 211-218.
38. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Слепков А.И. Излучение мощных электронных потоков в резонансных замедляющих системах. - М.: Изд.Моск.Ун-та. 1993. 207 с.
39. Kanavets V.I., Nifanov A.S., Slepков A.I., Bacharev I.G. Nonlinear processes in relativistic Serencov Microwave resonance sources.// Proc.16 Intern. Symp. on discharges and Electr. Insulation. 1994, pp. 554-556.
40. Канавец В.И., Нифанов А.С., Слепков А.И. Особенности возбуждения поля периодического волновода на частоте границы полосы прозрачности. //Вестн.Моск.Ун-та. сер. 3. Физика, Астрономия, 1994, т.35, с.80-83.
41. Канавец В.И., Нифанов А.С., Слепков А.И., Удалов П.В. Возбуждение электромагнитных полей пространственно-развитых резонаторов сложной формы. //Труды V Всероссийской школы-семинара " Физика и применение микроволн". М.МГУ. 1995, с.49-53.
42. Гранит Я.Ш. Канавец В.И., Нифанов А.С., Слепков А.И., Удалов В.Н. Формирование полей в волноводных микроволновых камерах, предназначенных для сушки и обжига керамических изделий. //Труды V Всероссийской школы-семинара " Физика и применение микроволн". М.МГУ. 1995, с. 72-76.
43. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Слепков А.И., Хриткин С.А. Четырехволновое взаимодействие потока и поля в длинном периодическом волноводе. //Труды V Всероссийской школы-семинара " Физика и применение микроволн" М.МГУ. 1995, с.89-93.
44. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Слепков А.И., Хриткин С.А. Влияние динамических эффектов на электронные волны в периодическом волноводе. //Труды V Всероссийской школы-семинара " Физика и применение микроволн" М.МГУ. 1995, с.99-103.
45. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Слепков А.И., Хриткин С.А. Динамические эффекты и электронные волны в периодическом волноводе. // Вестн.Моск.Ун-та, Сер.3, 1996,Физика, Астрономия, т.37, №1, с.43-49.
46. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Слепков А.И., Хриткин С.А. Четырехволновое взаимодействие потока и поля в резонансном

периодическом волноводе. // Радиотехника и электроника, 1997, т.42, № 3, с.341-347.

47. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Слепков А.И., Хриткин С.А. Взаимодействие затухающей обратной волны периодического волновода с медленной волной электронного потока // Радиотехника и электроника, 1997, т.42, № 7, с.857-862.

48. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Слепков А.И., Хриткин С.А. Трехволновое взаимодействие и самовозбуждение генератора на периодическом волноводе с потерями. // Известия АН. Сер.Физическая, 1997, т.61, №12, с.2280-2288.

49. Канавец В.И., Лазаренко Р.Н., Нифанов А.С., Слепков А.И. Взаимодействие потока и поля в релятивистском генераторе поверхностной волны. // Известия АН. Сер.Физическая, 1997, т.61, №12, с.2303-2310.

50. Канавец В.И., Лазаренко Р.Н., Нифанов А.С., Слепков А.И. Резонансные эффекты в генераторе поверхностной волны при малом пространственном заряде.// Известия АН. Сер.Физическая, 1998, т.62, № 12, с.2450-2457.

51. Канавец В.И., Лазаренко Р.Н., Слепков А.И. Генератор поверхностной волны со взаимодействием ЛБВ-типа при малом пространственном заряде.// Известия АН. Сер.Физическая, 1999, т.63, №12, с.2303-2310.

52. Канавец В.И., Максимов А.С., Слепков А.И. Особенности дифракционного излучения электронного потока в периодической системе круглых стержней. // Известия АН. Сер.Физическая, 2000, т.64, №12, с.2490-2497.

53. О.В.Галлямова, В.И.Канавец, А.С.Нифанов, Слепков А.И. Дисперсия волн в высших полосах прозрачности в релятивистском генераторе дифракционного излучения.// Известия АН. Серия физическая, 2001, т.65, №12, с.1703-1707.

54. Слепков А.И. Многомодовый метод анализа нестационарных процессов в черенковских генераторах на периодических волноводах. // Известия АН. Сер.Физическая, 2003, т.67, №12, с.1678-1683.