

На правах рукописи

ПАЛИЦИН Алексей Валентинович

**ЦИКЛОТРОННЫЕ ЭФФЕКТЫ
В РЕЛЯТИВИСТСКИХ СВЧ ПРИБОРАХ
ЧЕРЕНКОВСКОГО ТИПА**

01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород
2011

Работа выполнена в Институте прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
 профессор Н.Ф. Ковалев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
 И.В. Пегель

 доктор физико-математических наук
 В.Е. Запелалов

Ведущая организация: Институт электрофизики УрО РАН

Защита диссертации состоится 7 ноября в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 при Институте прикладной физики РАН по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Ю.В. Чугунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

Наибольшие импульсные мощности пространственно-когерентного электромагнитного излучения в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн достигнуты в приборах релятивистской высокочастотной электроники [1, 2]. Данное направление электроники больших мощностей получило развитие с конца шестидесятых годов после появления первых сильноточных электронных ускорителей прямого действия, использующих в качестве инжекторов холодные взрывоземиссионные катоды [3].

В мощных черенковских релятивистских генераторах и усилителях электронные пучки обычно формируются с помощью взрывоземиссионных инжекторов типа коаксиальных диодов с магнитной изоляцией. Пространство взаимодействия пучка с электромагнитным полем имеет вид полого гофрированного волновода (рис. 1). Для формирования и транспортировки сильноточного пучка через пространство взаимодействия применяется стационарное или квазистационарное удерживающее магнитное поле, обычно создаваемое соленоидами. В идеальном случае бесконечно большого магнитного поля электроны двигаются вдоль его силовых линий, поперечные движения невозможны, и проявляется преимущественно черенковский механизм излучения, на котором и построена работа таких приборов. При конечных удерживающих магнитных полях могут проявляться и другие механизмы взаимодействия электронного пучка с электромагнитными волнами, в частности, циклотронного характера, т.е. связанные с вращением электронов в удерживающем магнитном поле. Практически сразу после первых успешных экспериментов, проведенных с релятивистской лампой обратной волны (ЛОВ) [4], был замечен эффект снижения или полного подавления выходной мощности прибора в определенном диапазоне магнитных полей, причем значения полей были заведомо больше необходимых для обеспечения токопрохождения пучка. Эффект проявлялся во всех релятивистских ЛОВ и вскоре был объяснен Н.Ф.Ковалевым циклотронным поглощением рабочей волны, т.е. резонансным циклотронным взаимодействием электромагнитной волны и электронного пучка на первой гармонике циклотронной частоты. Первые упоминания этого эффекта в литературе присутствуют в работах [5, 6]. Диссертация посвящена исследованию влияния подобных циклотронных резонансов на работу релятивистских генераторов и усилителей черенковского типа.

Отметим, что система формирования магнитного поля является одним из самых важных и сложных элементов, если речь идет о практическом применении приборов релятивистской электроники. Чем выше значения магнитных полей, тем технически сложнее становится эта система, соответственно сужается и область применения таких приборов. Актуальной становится задача

снижения удерживающих магнитных полей, при этом одним из основных ограничивающих факторов является наличие циклотронных резонансов, негативно влияющих на работу генераторов и усилителей.

Кроме отрицательного характера проявления циклотронных эффектов в релятивистских черенковских приборах, есть и полезные их применения, например, циклотронная селекция мод в ЛОВ [7, 8], повышение эффективности черенковского взаимодействия [9], подавление обратной связи в лампе бегущей волны (ЛБВ) [10] и т.д. В диссертации представлено исследование механизмов и закономерностей циклотронного взаимодействия, как в линейном, так и в нелинейном случае, а также влияние циклотронных резонансов на работу генераторов и усилителей. Система уравнений для описания циклотронных эффектов в релятивистских ЛОВ и ЛБВ черенковского типа дополнена уравнениями возбуждения волноводных электромагнитных волн. Это позволяет более корректно описывать особенности циклотронного взаимодействия в черенковских релятивистских приборах, а также обнаружить ряд новых эффектов, таких как появление полосы прозрачности в области циклотронного поглощения или возникновение жестких режимов генерации.

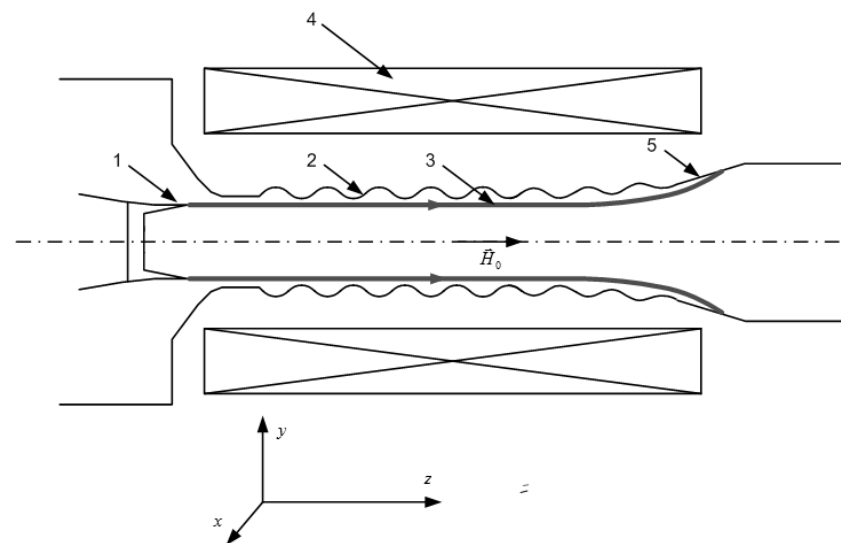


Рис. 1. Схематическое изображение черенковского генератора или усилителя с замедляющей системой в виде гофрированного волновода. 1 – катод, 2 – электродинамическая система СВЧ прибора, 3 – электронный пучок, 4 – соленоид для создания продольного удерживающего магнитного поля \vec{H}_0 , 5 – коллектор электронов

Цели диссертационной работы состояли

- 1) в теоретическом изучении особенностей циклотронного взаимодействия в черенковских приборах сильноточной электроники:
 - в релятивистской ЛОВ, где производился поиск эффективных режимов генерации и областей эффективной циклотронной селекции рабочей волны;
 - в релятивистской ЛБВ, где проводилось исследование циклотронного подавления волн обратной связи;
- 2) в экспериментальном исследовании различных применений циклотронного поглощения, таких как:
 - измерение энергии электронов пучка по циклотронному поглощению пробной электромагнитной волны;
 - циклотронная селекция мод в релятивистской ЛОВ на гибридной рабочей волне;
 - подавление пред- и послеимпульсов генерации в релятивистской ЛОВ.

Положения, выносимые на защиту

1. Система уравнений для описания циклотронных эффектов в релятивистских ЛОВ и ЛБВ черенковского типа дополнена уравнениями возбуждения электромагнитных волн, что позволяет более полно исследовать режимы стационарной генерации и усиления с учетом взаимной связи циклотронных и электромагнитных волн. В частности, такая самосогласованная система уравнений позволяет обнаружить и описать гистерезисные явления, такие как нелинейные полосы прозрачности в зонах циклотронного поглощения и жесткие режимы возникновения генерации в ЛОВ.

2. Зависимость циклотронного поглощения от энергии электронов может быть использована для подавления пред- и послеимпульсов генерации в релятивистских ЛОВ черенковского типа, а также для измерения энергии электронов пучка по циклотронному поглощению пробной электромагнитной волны. Зависимость от величины магнитного поля циклотронного поглощения волн обратной связи в релятивистской ЛБВ может применяться для оперативного изменения коэффициента усиления прибора.

3. На основе метода связанных волн выведен вариант нестационарных уравнений возбуждения волноводов, учитывающих зависимость поперечной структуры волноводных мод от частоты. Уравнения применимы, в том числе, к исследованию прохождения импульсов по нерегулярным волноводам.

4. Использование в релятивистской ЛОВ электродинамических систем с винтовой гофрировкой, обеспечивающей появление осесимметричной замедленной пространственной гармоника у несимметричной рабочей волны, позволяет улучшить селективность прибора с повышенными поперечными размерами. С применением циклотронной селекции в таких ЛОВ может быть

получена стабильная одномодовая генерация гибридной волны в низких магнитных полях, соответствующих циклотронному резонансу электронов пучка с рабочей электромагнитной волной.

Научная новизна работы

В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

- Система уравнений для описания циклотронных эффектов в релятивистских ЛОВ и ЛБВ черенковского типа дополнена уравнениями возбуждения электромагнитных волн. Теоретически исследованы режимы стационарной генерации и усиления в релятивистских ЛОВ и ЛБВ черенковского типа с учетом взаимной связи циклотронных и электромагнитных волн. Обнаружены гистерезисные явления, в частности, появление нелинейной полосы прозрачности в зонах циклотронного поглощения.
- Для релятивистских ЛОВ черенковского типа предложен и экспериментально продемонстрирован метод подавления пред- и послеимпульсов генерации, основанный на зависимости циклотронного поглощения от энергии электронов.
- Предложен метод оперативного управления коэффициентом усиления релятивистской ЛБВ путем изменения величины фокусирующего магнитного поля в пределах зоны циклотронного подавления волны обратной связи.
- На основе метода связанных волн выведен вариант нестационарных уравнений возбуждения волноводов. Уравнения применимы, в том числе, к исследованию прохождения импульсов по нерегулярным волноводам.
- Предложен и экспериментально реализован метод измерения энергии электронов пучка по циклотронному поглощению пробной электромагнитной волны.
- Экспериментально реализована релятивистская ЛОВ с замедляющей системой в виде цилиндрического волновода с винтовой гофрировкой. Получена стабильная одномодовая генерация на гибридной волне в достаточно широком диапазоне магнитных полей, обеспечивающих циклотронную селекцию.

Научная и практическая значимость

В релятивистских черенковских СВЧ-приборах транспортировка сильноточных релятивистских электронных пучков обычно обеспечивается наличием достаточно сильного продольного магнитного поля, создаваемого соленоидами. Для формирования электронных пучков также необходимо внешнее магнитное поле, обеспечивающее магнитную изоляцию взрывоэмиссионных катодов. Отметим, что существуют экспериментальные реализации релятивистских приборов и без внешнего магнитного поля [11], но такие системы

предполагают достаточно сильное токооседание в пространстве взаимодействия, а также использование сильнооточных диодов с сетчатым анодом. Очевидно, что это накладывает ограничение на частоту следования импульсов и ресурс приборов. Более перспективными представляются генераторы и усилители с внешним постоянным или квазипостоянным направляющим магнитным полем, обеспечивающим как формирование необходимых трубчатых тонкостенных пучков, так и их транспортировку через пространство взаимодействия. В этом случае частота следования импульсов и их общее количество могут быть значительно выше и будут определяться уже совсем другими факторами: деградацией катода, отводом тепла от коллектора, возможностями вакуумной системы или сильнооточных ускорителей и т.д. Конечно, и в этом случае задача снижения магнитного поля очень важна с практической точки зрения, так как позволяет значительно упростить и удешевить систему формирования фокусирующего магнитного поля, а в перспективе использовать в этих целях постоянные магниты. В частности, величина напряженности фокусирующего магнитного поля ($H = 6-7$ кЭ) в ЛОВ-генераторе, исследованном в диссертации, на данный момент уже достижима в системах на основе постоянных магнитов.

Использование результатов работы

Разработанный ЛОВ-генератор на гибридной волне использовался в ИПФ РАН, МРТИ РАН и Университете электронной науки и технологии Китая для проведения исследований в области высокочастотной электроники. Представляется перспективным его применение для других физических приложений, в частности, в радиотехнических системах. Метод подавления пред- и после-импульсов генерации может быть востребован в случае применения приборов релятивистской СВЧ-электроники в радиолокационных системах. Метод измерения энергии электронов пучка по циклотронному поглощению может использоваться разработчиками электронных сильнооточных ускорителей и приборов релятивистской электроники.

Публикации и апробация результатов

Результаты диссертационной работы опубликованы в работах [1а-23а], из которых 7 работ в реферируемых журналах из списка ВАК. Основные результаты диссертационной работы докладывались автором или соавторами на семинарах ИПФ РАН, на международных конференциях «Strong Microwaves in Plasmas» г. Нижний Новгород (1996, 1999, 2003, 2008), международных конференциях «High-Power Particle Beams», г. Хайфа, Израиль (1998), г. Альбукерк, США (2002), г. Санкт-Петербург (2004), Нижегородских сессиях молодых ученых, г. Нижний Новгород (1998–2000), международных конференциях «Intense Microwave Pulses», г. Орландо, США (2000, 2001), Все-

российском семинаре по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, г. Нижний Новгород (2005).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, приложения, списка цитируемой литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Объем диссертации составляет 168 страниц, включая 72 рисунка и список литературы из 47 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и сформулирована цель работы, кратко изложено содержание диссертации по главам.

В первой главе рассматривается взаимодействие электронных пучков с электромагнитными волнами в волноводах в условиях близости к циклотронному резонансу и в отсутствие черенковского взаимодействия, что нередко реализуется в эксперименте, например, при циклотронно-резонансном измерении энергии электронов пучка (см. раздел 1.4). В релятивистских черенковских приборах также могут присутствовать участки без синхронного черенковского взаимодействия, например, в области коллектора, в пределах брегговских рефлекторов в секционированных приборах [12, 13] или в промежутке между резонансным модулирующим рефлектором и началом гофрировки [14, 15].

В разделе 1.1 вводится полная самосогласованная система усредненных уравнений, описывающая, в том числе и черенковское взаимодействие. Для этого усредненные уравнения движения электронов [16] дополняются уравнениями возбуждения волноводных электромагнитных волн. Подробный вывод системы вынесен в приложение. Различные частные случаи полной системы используются во второй и третьей главах диссертации. Также представлен упрощенный вариант системы, соответствующий отсутствию черенковского взаимодействия, т.е. случаю двухволнового взаимодействия.

В разделе 1.2 теоретически рассмотрены линейные и нелинейные полосы запираания, особенности взаимодействия электромагнитных и циклотронных волн при встречном и попутном их распространении. При попутном распространении волн реализуется режим их биений, нелинейность проявляется как динамическая расстройка циклотронного синхронизма. Случай встречного распространения волн более интересен. При малых амплитудах волн, т.е. на линейной стадии взаимодействия, реализуется типичная полоса запираания. При увеличении амплитуд волн начинает проявляться нелинейный характер циклотронной волны, появляются решения с резонансным прохождением электромагнитной волны через область сильного циклотронного поглощения (см. рис.2). Смена роста амплитуды на спад происходит из-за дополнительной

нелинейной расстройки волн. Описанный эффект приводит к появлению нелинейной полосы прозрачности в зоне циклотронного поглощения.

В разделе 1.3 рассматривается обобщение метода связанных волн на нестационарные процессы. Метод позволяет ввести вариант нестационарных уравнений возбуждения волноводов, предполагающий дальнейшее обобщение на нерегулярные системы. В отличие от широко применяемых в СВЧ-электронике уравнений [17-19], структура поля волнового пакета находится без использования свёрток комплексных амплитуд с «временными» собственными вектор-функциями. При этом в уравнениях возбуждения появляется связь между взаимно-встречными волновыми модами с индексами

(s) и ($-s$). Усложнение уравнений из-за появления связи между волнами является следствием выбора более простого представления полного поля в виде суммы парциальных вектор-функций, зависящих только от пространственных переменных и не зависящих ни от времени, ни от частотных расстройек. Так же в текущем разделе получено универсальное соотношение, связывающее дисперсию волноводной волны с зависимостью структуры её полей от частоты.

В разделе 1.4 предлагается метод измерения энергии электронов пучка в каналах дрейфа по циклотронному поглощению пробной электромагнитной волны в отсутствие черенковской генерации. Эффект циклотронного поглощения наблюдается практически во всех релятивистских черенковских приборах. Он может проявляться и как поглощение входной волны, распространяющейся навстречу электронному пучку [20], и как снижение выходной мощности или срыв генерации в довольно широком диапазоне магнитных полей вблизи резонансного значения H_0 , определяемого условием синхронизма

$$\frac{eH_0}{m\gamma c} = \omega_0 - h(\omega_0)v_z. \quad (1)$$

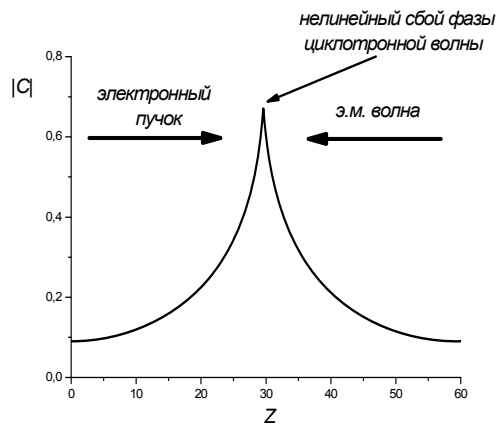


Рис. 2. Зависимость модуля амплитуды электромагнитной волны C от продольной координаты Z в случае нелинейного резонансного прохождения через область циклотронного поглощения

В предположении малых поперечных скоростей электронов ($v_{\perp} \ll v_z$) соотношение (1) однозначно связывает резонансное магнитное поле H_0 с релятивистским фактором электронов пучка γ при известных частоте ω_0 и продольном волновом числе $h(\omega_0)$ электромагнитной волны. Обычно зона циклотронного поглощения в релятивистском приборе достаточно широкая, что не позволяет определить резонансное магнитное поле H_0 и, соответственно, энергию электронов пучка с высокой точностью. Ширина зоны связана с нелинейным взаимным влиянием циклотронных волн и волн пространственного заряда пучка. Если же рассмотреть отдельно только циклотронное взаимодействие электронного пучка и электромагнитной волны, то оно близко к линейному, и зона резонансного циклотронного поглощения может быть достаточно узкой, что позволяет с достаточной точностью определять энергию электронов пучка по резонансному значению магнитного поля. В данном разделе приведены результаты экспериментальной реализации метода измерения энергии электронов в каналах дрейфа по циклотронному поглощению пробной электромагнитной волны в отсутствие черенковской генерации. Точность измерения в проведенных экспериментах составила порядка 10%.

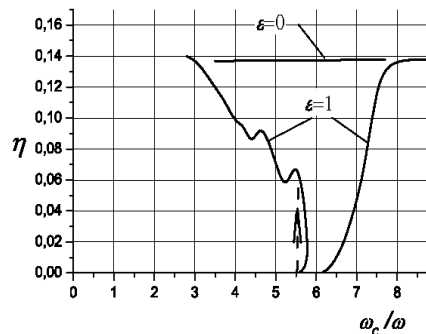
Глава 2 посвящена исследованию генерации и усиления в черенковских СВЧ приборах в условиях близости к циклотронному резонансу электронов пучка с какой-либо электромагнитной волной из присутствующих в системе.

В разделе 2.1 рассмотрена простая, но вместе с тем достаточно полно описывающая основные эффекты, модель релятивистской ЛОВ в планарной геометрии. В этом случае количество параметров, от которых зависит вид решений, может быть сведено к минимуму. Также в силу симметрии задачи, физически исключается часть эффектов, например, связанных с дрейфом центров электронных орбит.

Подраздел 2.1.1 посвящен исследованию линейной стадии взаимодействия в рамках малосигнального приближения. При этом система уравнений может быть линеаризована и сводится к известному виду [21–23]. Соответственно, анализ линейной системы, приведенный в данном подразделе, частично пересекается с представленным в работах [21–23]. В то же время, метод поиска решений краевой задачи и некоторые из найденных решений оригинальны.

В подразделе 2.1.2 теоретически рассмотрена нелинейная краевая задача в рамках усредненной стационарной системы уравнений, найдены зоны циклотронного поглощения, обнаружены жесткие режимы генерации на границе этих зон. На рис. 3 представлена одна из найденных зон, т.е. зависимость КПД генерации в ЛОВ от параметра, пропорционального магнитному полю. Путь жесткого самовозбуждения, являющегося частью петли гистерезиса, показан пунктирной линией.

Рис. 3. КПД генерации в ЛОВ η в зависимости от параметра ω_c/ω , пропорционального магнитному полю, при небольшом превышении длины над стартовой ($kL = 60$) и величине коэффициента связи с циклотронной волной $\varepsilon = 1$



В разделе 2.2 теоретически и экспериментально рассмотрено подавление пред- и послеимпульсов генерации в релятивистской ЛОВ. Успешные эксперименты по применению релятивистской ЛОВ в радиолокации [24] вызвали необходимость улучшения параметров её выходного излучения. Одним из важнейших требований является уменьшение или полное отсутствие сопутствующих импульсов, например, отвечающих генерации на послеимпульсах напряжения, возникающих из-за неполного согласования формирующей линии с инжектором электронов. Используя зависимость циклотронного поглощения от энергии электронов, можно найти область магнитных полей, где генерация основного импульса достаточно эффективна, а второй полностью подавлен. Зависимость резонансного магнитного поля и, соответственно, циклотронной частоты ω_H , от энергии электронов пучка в ЛОВ удобно проиллюстрировать схематической диаграммой Бриллюэна (рис. 4), где приведены дисперсионные зависимости взаимодействующих волн для двух значений ускоряющего напряжения. В данном разделе представлены результаты экспериментального исследования подавления послеимпульсов генерации в релятивистской ЛОВ черенковско-го типа.

В разделе 2.3 теоретически исследована модель регенеративной релятивистской лампы бегущей волны (ЛБВ) с циклотронным поглощением волн обратной связи. Релятивистская ЛБВ [25, 26] является достаточно перспективным прибором сильноточной СВЧ-электроники. Одно из основных её преимуществ заключается в благоприятной продольной структуре поля высокочастотной волны,

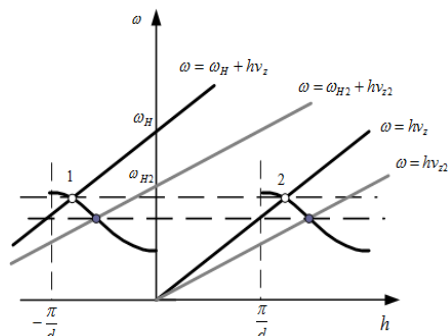


Рис. 4. Дисперсионные диаграммы взаимодействующих волн при различных значениях ускоряющего напряжения

которая способствует хорошей группировке электронного пучка и, соответственно, позволяет получать высокие значения КПД прибора. Традиционно ЛБВ является усилителем внешнего сигнала, но при наличии обратной связи она может переходить в режим автоколебаний [10, 27]. В разделе показана возможность управления коэффициентом усиления с помощью изменения величины фокусирующего магнитного поля, определяющего интенсивность циклотронного поглощения волны обратной связи. В рамках теоретической модели прямая и встречная волны переотражаются друг в друга на входе и выходе пространства взаимодействия. Обе волны взаимодействуют с одним и тем же электронным пучком, что корректно отражено в нелинейных уравнениях.

В главе 3 предложена и исследована релятивистская ЛОВ с электродинамической системой в виде цилиндрического волновода с однозаходной винтовой гофрировкой и несимметричной рабочей волной, близкой по структуре к TM_{11} волне цилиндрического волновода. Использование более высоких рабочих мод без потери пространственной когерентности выходного излучения является одним из перспективнейших путей развития релятивистской СВЧ-электроники [28]. Это позволяет при неизменном ускоряющем напряжении увеличивать токи и, соответственно, мощности электронных пучков, используемых в таких приборах. Увеличение напряжения в этих целях часто нежелательно из-за резкого возрастания массы и габаритов, как сильноточных ускорителей, так и систем защиты от сопутствующего ионизирующего излучения. Выходная мощность и длительность микроволновых импульсов, нередко ограничиваемые электропрочностью электродинамических систем релятивистских приборов, также могут быть увеличены в сверхразмерных системах.

В разделе 3.1 приведен теоретический анализ предлагаемого варианта ЛОВ на гибридной рабочей волне с осесимметричной замедленной гармоникой. В качестве одного из методов обеспечения одномодовости генерации в предложенной ЛОВ использовалась циклотронная селекция мод [7, 8, 29]. Показано, что в диапазоне магнитных полей 6–8 кЭ, возбуждается только рабочая гибридная волна типа “ TM_{11} ”, генерация основного конкурента, волны типа “ TM_{01} ”, полностью подавлена. Расчетные КПД стационарной генерации волн в зависимости от магнитного поля приведены на рис. 5.

В разделе 3.2 представлены результаты экспериментальных исследований нескольких вариантов предложенной ЛОВ, проведенные на ускорителях Синус-6 и Синуки-Такт в режиме однократных импульсов, а также с частотой повторения. В диапазоне магнитных полей 6–7 кЭ получена стабильная одномодовая генерация рабочей гибридной волны с мощностью $P = 300$ МВт в трехсантиметровом диапазоне длин волн. На рис. 6 представлены огибающая импульса выходного излучения и его спектр в режиме генерации гибридной волны. Для визуализации структуры выходного излучения ЛОВ применялось табло из газоразрядных лампочек, свечение которого для ЛОВ, обо-

рудованной встроенным брегговским рефлектором – преобразователем в выходную TE_{11} волну, показано на рис. 7.

Рис. 5. Расчетные зависимости от магнитного поля КПД стационарной генерации волн « TM_{01} » (1) и « TM_{11} » (2) экспериментального макета ЛОВ с однозаходной винтовой гофрировкой

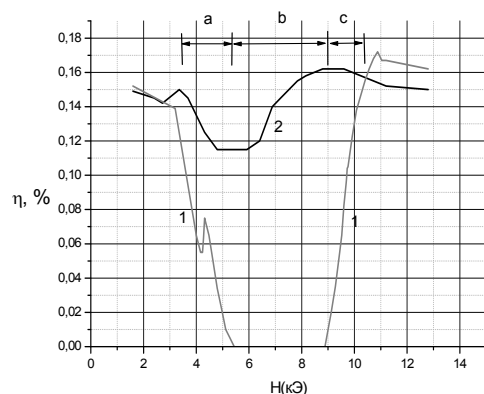


Рис. 6. Огибающая импульса выходного излучения ЛОВ (а) и его спектр (б) в режиме генерации гибридной волны « TM_{11} »

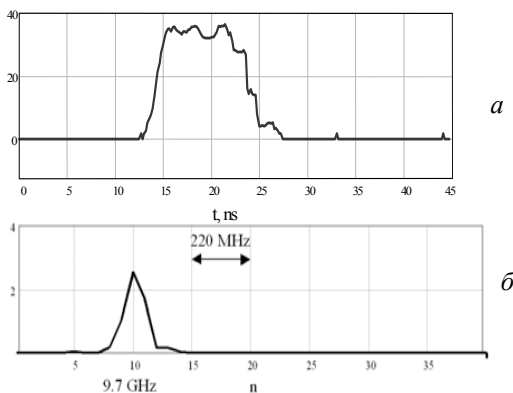
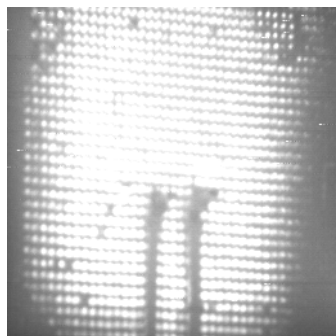


Рис. 7. Свечение табло из газоразрядных лампочек под воздействием СВЧ-излучения ЛОВ на рабочей « TM_{11} »-волне и со встроенным рефлектором – преобразователем в выходную TE_{11} -волну



В заключении приведены основные результаты диссертации.

В приложении представлен вывод наиболее полной усредненной системы уравнений взаимодействия электромагнитных волн в волноводах с электронным пучком в магнитном поле конечной величины.

Основные результаты работы

1. Теоретически исследованы режимы стационарной генерации и усиления в релятивистских ЛОВ и ЛБВ черенковского типа с учетом взаимной связи циклотронных и электромагнитных волн. Обнаружены гистерезисные явления, в частности, появление нелинейной полосы прозрачности в зонах циклотронного поглощения.
2. Для релятивистских ЛОВ черенковского типа предложен и экспериментально продемонстрирован метод подавления пред- и послеимпульсов генерации, основанный на зависимости циклотронного поглощения от энергии электронов.
3. Предложен метод оперативного управления коэффициентом усиления релятивистской ЛБВ путем изменения величины фокусирующего магнитного поля в пределах зоны циклотронного подавления волны обратной связи.
4. На основе метода связанных волн выведен вариант нестационарных уравнений возбуждения волноводов. Уравнения обобщаются на случай исследования прохождения узкополосных импульсов по нерегулярным волноводам.
5. Предложен и экспериментально реализован метод измерения энергии электронов пучка по циклотронному поглощению пробной электромагнитной волны.
6. Экспериментально реализована релятивистская ЛОВ с замедляющей системой в виде цилиндрического волновода с винтовой гофрировкой. В трехсантиметровом диапазоне длин волн получена стабильная одномодовая генерация на гибридной волне с уровнем мощности $P=300$ МВт в достаточно низких магнитных полях $H=6-7$ кЭ, обеспечивающих циклотронную селекцию.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1а. Гойхман М.Б., Ковалев Н.Ф., Колганов Н.Г., Палицин А.В. Измерение параметров выходного излучения релятивистских СВЧ-генераторов резистивными датчиками на горячих носителях // Письма в ЖТФ. 2004. Т.30, вып.12. С. 28-34.
- 2а. Goikhman M.B., Fuks M.I., Kovalev N.F., Palitsin A.V., Schamiloglu E. Waveguide resonators with combined Bragg reflectors // IEEE Trans. on Plasma Science. 2004. Vol.32, №3. P.1323-1333.
- 3а. Ковалев Н.Ф., Палицин А.В. Метод связанных волн в теории возбуждения волноводов высокочастотными токами с медленно изменяющимися амплитудами // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2005. Т. 48, №3. С.198-206.
- 4а. Ковалев Н.Ф., Палицин А.В., Фукс М.И. Циклотронное подавление генерации в релятивистской ЛОВ черенковского типа // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, №2. С. 105-120.
- 5а. Громов А.В., Ковалев Н.Ф., Палицин А.В. Метод расчета интегральных характеристик сильноточных диодов с кромочными магнитизолированными катодами // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12, №4. С.9-11.
- 6а. Goykhman M.B., Fuks M.I., Kovalev N.F., Palitsin A.V., Schamiloglu E. Controlled amplification in a TWT using the guide magnetic field // IEEE Trans. on Plasma Sci., 2008. V.36, №3. P.647-654.
- 7а. Гойхман М.Б., Громов А.В., Кладухин В.В., Ковалев Н.Ф., Колганов Н.Г., Палицин А.В., Храпцов С.П. Низкоимпедансная релятивистская лампа обратной волны // Письма в ЖТФ. 2011. Т.37, №7. С.87-93.
- 8а. Перестраиваемый полосно-пропускающий волноводный фильтр для измерения частоты мощного микроволнового излучения: пат. 2421852. Рос. Федерация / Палицин А.В., Родин Ю.В., Хозин М.А.; заявл. 24.02.2010; опубл. 20.06.2011.
- 9а. Abubakirov E.B., Fuchs M.I., Kolganov N.G., Kovalev N.F., Palitsin A.V., Volkov A.B. Reduction of focusing magnetic field in relativistic Cherenkov oscillators // Strong microwaves in plasmas, Proc. of the Int. Workshop, 1996, IAP RAS. Nizhny Novgorod. P.810-828.
- 10а. Abubakirov E.B., Fuks M.I., Kolganov N.G., Kovalev N.F., Palitsin A.V. Excitation of fast cyclotron waves of the electron beam with forward electromagnetic waves in relativistic BWO // Program and abstracts of 12th Int.Conf.on High-Power Particle Beams. Haifa, Israel, June 7-12, 1998. P.278.
- 11а. Палицин А.В. Влияние циклотронных волн на работу релятивистской ЛОВ // Сборник тезисов докладов. 3-я Нижегородская сессия молодых ученых. Н.Новгород, 1998. С.54-55.
- 12а. Палицин А.В. Уменьшение фокусирующего магнитного поля в релятивистской ЛОВ // Сборник тезисов докладов. Четвёртая нижегородская сессия молодых ученых. Нижний Новгород, 1999. S34.
- 13а. Белкин О.К., Ковалев Н.Ф., Палицин А.В. Локализованные колебания в системе взаимодействующих циклотронной и электромагнитной волн // Сборник тезисов докладов, Пятая нижегородская сессия молодых ученых. Нижний Новгород, 2000. С. 116.
- 14а. Kolganov N.G., Kovalev N.F., Palitsin A.V., Fuchs M.I. Relativistic BWO with cyclotron selection of an asymmetric wave // Strong microwaves in plasmas, 2000, IAP RAS. Nizhny Novgorod. V.2. P.845-850.
- 15а. Fuks M., Golkowski C., Grabowski C., Kovalev N., Palitsin A. Suppression of parasitic self-excitation in Cherenkov amplifiers // Proc. SPIE. Intense Microwave Pulses VII. Orlando, 2000. V. 4031. P.232-241.
- 16а. Schamiloglu E., Fuks M.I., Kovalev N.F., Palitsin A.V. Self-consistent theory of cyclotron phenomena in relativistic BWO // Proc. SPIE. Intense Microwave Pulses VIII. Orlando, USA, 2001. P. 146-156.
- 17а. Fuks M.I., Goyhman M.B., Kovalev N.F., Palitsin A.V., Schamiloglu E. On measurements of the basic parameters of high current relativistic electron beams // AIP Conference Proc. Of 14th Int. Conf. On High-Power Particle Beams, 2002. Albuquerque, USA. V. 650. P. 235-238.
- 18а. Fuks M.I., Kovalev N. F., Palitsin A.V., E. Schamiloglu. Cyclotron suppression of pre- and post-pulses of radiation from a relativistic BWO // AIP Conference Proc. Of 14th Int. Conf. On High-Power Particle Beams, 2002, Albuquerque, NM, USA. P. 267-270.
- 19а. Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Goyhman M.B., Palitsin A.V., Soluyanov E.I., Yastrebov V.V. Relativistic backward wave oscillators with distributed output of microwave power // AIP Conference Proc. Of 14th Int. Conf. On High-Power Particle Beams, 2002. Albuquerque, USA. V. 650. P. 275-278.
- 20а. Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Kovalev N.F., Palitsin A.V., Soluyanov E.I., Yastrebov V.V. Sectioned relativistic backward wave oscillator operating at low magnetic field // Proc. Of Int. Workshop "Strong Microwave in Plasmas", 2003. V.1. P.224-227.
- 21а. Fuks M.I., Kovalev N.F., Palitsin A.V., Schamiloglu E. Controlled amplification in a relativistic resonant TWT by varying the guide magnetic field // Abstracts of 15th Int. Conf. On High-Power Particle Beams. Saint Petersburg, 2004. P.156.
- 22а. Ковалев Н.Ф., Колганов Н.Г., Палицин А.В. Измерение параметров сильноточных релятивистских электронных пучков по циклотронному поглощению электромагнитной волны // Тезисы докладов Всероссийского семинара по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. Нижний Новгород, 2005. С. 17.
- 23а. M.B. Goykhman, A.B. Gromov, V.V. Kladuhin, A.V. Kluchnik, N.G. Kolganov, N.F. Kovalev, A.V. Palitsin, V.N. Tulpakov, Pulse-periodic gigawatt BWO's with low impedance and quick build-up // Book of Abstracts of the 7th International Workshop "Strong Microwaves: Sources and Applications". Nizhny Novgorod, Russia, 2008. P. 46.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кицанов С.А., Климов А.И., Коровин С.Д., Куркан И.К., Пегель И.В., Полевин С.Д. Резонансная релятивистская ЛОВ дециметрового диапазона с импульсной мощностью 5 GW // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, №6. С. 87-94.
2. Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В., Ульмаскулов М.Р., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. Субнаносекундный источник импульсов излучения в диапазоне 38 GHz с импульсной мощностью 1 GW // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, вып. 3. С.68-74.
3. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. Радио, 1974. 256 с.
4. Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д., Сморгонский А.В., Цопп Л.Э. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения потоком релятивистских электронов // Письма в ЖТФ. 1973. Т.18, №4. С.232-235.
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 // Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. Горький, 1981. С. 145-169.
6. El'chaninov A.S., Zagulov F.Ya., Korovin S.D., Mesyats G.A., Rostov V.V. The REB pulse-periodic microwave generators // High-Power Electron and Ion Beams. Research and Technology: Proc. IV Int. Topical Conf. Palaiseau, 1981. P. 847-852.
7. Абубакиров Э.Б., Белоусов В.И., Варганов В.М., Гинзбург В.А., Ковалев Н.Ф., Колганов Н.Г., Петелин М.И., Солуянов Е.И. Экспериментальная реализация метода циклотронно-резонансной селекции мод в релятивистских высокочастотных генераторах черенковского типа // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9, №9. С. 533-536.
8. Братман В.Л., Денисов Г.Г., Коровин С.Д., Офицеров М.М., Полевин С.Д., Ростов В.В. Релятивистские генераторы диапазона миллиметровых волн // В кн. Релятивистская высокочастотная электроника, вып.4. Горький: ИПФ АН СССР, 1984. С. 119-176.
9. Cherepenin V.A., Kornienko V.N., Vlasov A.N. Efficiency improvement in relativistic cherenkov devices due to dynamic cyclotron resonance // IEEE Trans. on Plasma Sc. V.24, N.3. P.870-878.
10. Абубакиров Э.Б., Гинзбург В.А., Зайцев Н.И., Ковалев Н.Ф., Колганов Н.Г., Родин Ю.В., Солуянов Е.И., Фукс М.И. Релятивистский секционированный высокочастотный генератор типа резонансной ЛБВ // 7-й Все-союзный симпозиум по сильноточной электронике. Тезисы докладов. Томск: ИСЭ СО АН СССР, 1988. Ч. 1. С. 188-190.
11. Климов А.И., Коровин С.Д., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. Релятивистский черенковский СВЧ-генератор без внешнего магнитного поля // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, №3. С. 55-61.
12. Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Ковалев Н.Ф., Копелович Е.А., Савельев А.В., Солуянов Е.И., Фукс М.И., Ястребов В.В. Релятивистская ЛОВ с селективным трансформатором мод // ЖТФ. 1999. Т. 69, №11. С. 102-105.
13. Abubakirov E.B., Fuks M.I., Denisenko A.N., Kolganov N.G., Kovalev N.F., Petelin M.I., Savelyev A.V., Schamiloglu E., Soluyanov E.I., Yastrebov V.V. An X-band gigawatt amplifier // IEEE Trans.on Plasma Science. 2002. V.30, №3. P. 1041-1052.
14. Коровин С.Д., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. Релятивистская лампа обратной волны с модулирующим резонансным рефлектором // Письма в ЖТФ. 2005. Т.31, №10. С. 17-23.
15. Кицанов С.А., Коровин С.Д., Климов А.И., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. Релятивистская лампа обратной волны с механической перестройкой частоты генерации // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, №15. С. 1-7.
16. Абубакиров Э.Б., Гинзбург Н.С., Ковалев Н.Ф., Фукс М.И. Влияние быстрых циклотронных волн на работу черенковских СВЧ-приборов с релятивистскими электронными пучками // Радиотехника и электроника, 1989. Т.34, №9. С. 1058-1066.
17. Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П. Периодические и стохастические автомодуляционные режимы в электронных генераторах с распределенным взаимодействием // Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. Горький, 1981. С. 101-144.
18. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по СВЧ электронике для физиков: в 2 т. М.: Физматлит, 2003. Т. 1. 496 с.
19. Вайнштейн Л.А. Переходные процессы при возбуждении волноводов // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика, 1998. Т.6, №1. С.21-24.
20. Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В., Шпак В.Г., Яландин М.И. Релятивистский СВЧ усилитель миллиметрового диапазона на сильноточном электронном мини-ускорителе // Письма в ЖТФ. 1985. Т.11, №17. С.1072-1076.
21. Ростов В.В. Исследование высокочастотных генераторов на основе сильноточных импульсно-периодических ускорителей электронов : кандидатская диссертация. Томск: ИСЭ СО АН СССР, 1985.
22. Н.М. Быков, В.П. Губанов, А.В. Гунин, Г.Г. Денисов, Ф.Я. Загулов, С.Д. Коровин, Ю.Д. Ларичев, И.М. Орлова, С.Д. Полевин, В.В. Ростов, А.В. Сморгонский, А.Ф. Якушев. Релятивистские импульсно-периодические СВЧ-генераторы сантиметрового диапазона длин волн // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. Вып. 5. С. 101-124.

23. Ростов В.В. Эффективные импульсно-периодические источники черенковского излучения на основе сильноточных электронных пучков : докторская диссертация. Томск: ИСЭ СО РАН, 2001.
24. Clunie D., Mesyats G., Osipov M.I., Petelin M.I., Zagulov P., Korovin S.D., Clutterbuck C.F., Wardrop B. The design, construction, and testing of an experimental high power, short-pulse radar // Strong Microwaves in Plasmas. Nizhni Novgorod: IAP RAS, 1996. V.2. P.886-902.
25. Абубакиров Э.Б., Ботвинник И.Е., Братман В.Л. Виноградов Д.В., Денисов Г.Г., Казача В.И., Красных А.К., Офицеров М.М., Перельштейн Э.А., Сидоров А.И. Получение мощного СВЧ излучения диапазона миллиметровых волн в черенковской ЛБВ с релятивистским электронным пучком // ЖТФ. 1990. Т.60, №11. С.186-190.
26. Abubakirov E.B., Botvinnik I.E., Bratman V.L. Vinogradov D.V., Denisov G.G., Perelshtein E.A., Polevin S.D., Rostov V.V., Sidorov A.I., Smorgonsky A.V. Experimental investigation of Cherenkov microwave amplifiers with high-current relativistic beam // Proc. of 8th International Conf. on High-Power Electron Beams, World Scientific, 1991. V.2. P.1179-1186.
27. Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Солуянов Е.И., Савельев А.В., Ястребов В.В. Релятивистская резонансная лампа бегущей волны с перестраиваемой частотой генерации // Письма в ЖТФ. 2000. Т.26, №4. С.14-18.
28. Ковалев Н.Ф., Петелин М.И. Селекция мод в высокочастотных релятивистских электронных генераторах с распределенным взаимодействием // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 62- 100.
29. Абубакиров Э.Б. Ковалев Н.Ф. Циклотронные эффекты в релятивистских СВЧ приборах черенковского типа // Релятивистская высокочастотная электроника. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1992. В. 7. С.7-21.

ПАЛИЦИН Алексей Валентинович

**ЦИКЛОТРОННЫЕ ЭФФЕКТЫ
В РЕЛЯТИВИСТСКИХ СВЧ ПРИБОРАХ
ЧЕРЕНКОВСКОГО ТИПА**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 3.10.2011 г.
Формат 60×90 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № 91(2011).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

