

На правах рукописи

ТОТЬМЕНИНОВ ЕВГЕНИЙ МАРКОВИЧ

**МОЩНЫЕ РЕЛЯТИВИСТСКИЕ СВЧ-ГЕНЕРАТОРЫ НА ОСНОВЕ
ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ С РЕЗОНАНСНЫМ РЕФЛЕКТОРОМ**

01.04.04. – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2006

Работа выполнена в Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской Академии Наук, г. Томск

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Ростов В.В.
(ИСЭ СО РАН, г. Томск)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Кошелев В.И.
(ИСЭ СО РАН, г. Томск)

доктор технических наук,
член корреспондент РАН
Яландин М.И.
(Институт электрофизики УрО РАН,
г. Екатеринбург)

Ведущая организация: Институт прикладной физики РАН
г. Нижний Новгород

Защита состоится “__” _____ 2006 г. в “__” часов
на заседании диссертационного совета Д.003.031.01 в Институте сильноточной
электроники СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, пр. Академический 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭ СО РАН.

Автореферат разослан “__” _____ 2006 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
Доктор физико-математических наук,
профессор

Проскуровский Д.И

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации проведено численное и экспериментальное исследование релятивистской лампы обратной волны (РЛОВ) с резонансным рефлектором в качестве отражателя встречной волны. Рассмотрено влияние предварительной модуляции электронного потока в области резонансного рефлектора на стартовые параметры генератора и условия энергообмена. На основе исследований для ведущих магнитных полей ниже и выше области циклотронного поглощения встречной волны в экспериментах реализованы генераторы с высоким коэффициентом преобразования энергии электронного пучка в электромагнитное излучение. Создан релятивистский генератор с расширенной механической перестройкой частоты генерации за счёт перемещения рефлектора относительно замедляющей структуры (ЗС).

Актуальность темы

Появление сильноточных электронных ускорителей в начале 70-х годов привело к становлению релятивистской высокочастотной электроники и повышению импульсной мощности СВЧ-излучения сразу на несколько порядков. К настоящему времени в экспериментах реализованы генераторы микроволнового излучения с уровнями выходной мощности $10^8 - 10^{10}$ Вт и длительностями СВЧ-импульсов в десятки наносекунд. Однако, практические применения СВЧ-генераторов (для целей наносекундной локации, специальных радиотехнических приложений) диктуют необходимость повышения стабильности и эффективности генерации, увеличения энергии в СВЧ-импульсе. Актуальными также являются сохранение высокой когерентности излучения для высоких значений мощности генерации, широкая перестройка частоты генерации, экономичность.

Среди релятивистских СВЧ-генераторов наибольшее внимание уделяется РЛОВ благодаря высокой степени адаптивности к изменениям параметров пучка, малому времени переходного процесса, простоте конструкции. В традиционной схеме РЛОВ для отражения встречной волны используется запредельное сужение. Для энергий электронов ≈ 500 кэВ в режиме одиночных импульсов и диапазоне частот вблизи 10 ГГц в экспериментах обычно реализуется КПД генератора около 20% при ведущем магнитном поле около 25 кЭ, а в случае профилирования параметров ЗС (за счёт вносимых изменений распределения сопротивления связи или фазовой скорости синхронной гармоники) удается достичь 30-40% при гигаваттном уровне импульсной мощности. Для

энергий электронов ≈ 1 МэВ в 8-см диапазоне длин волн достигнутая максимальная мощность генерации составляет 5 ГВт при длительности СВЧ- импульса около 20 нс.

В отличие от нерелятивистских аналогов ЛОВ, создаваемые генераторы не обеспечивают необходимую электронную перестройку частоты излучения. Поэтому приходится разрабатывать конструкции с достаточно сложной механической перестройкой частоты от импульса к импульсу, которая может составлять около 15% за счёт изменения периода гофрированной системы. Для фиксированного же периода гофрировки перестройка составляет не более 3-4% за счёт сдвига запредельного сужения относительно ЗС и обусловлена эффектом предварительной модуляции электронного пучка. Другая специфическая особенность работы РЛОВ заключается в необходимости применения сильных магнитных полей, создаваемых для реализации импульсно-периодического режима сверхпроводящими соленоидами (эффективность генератора в слабом магнитном поле «теплого» соленоида составляет менее 10%). Это обстоятельство во многом сдерживает развитие ряда приложений данного генератора, в силу дороговизны и необходимости участия квалифицированных специалистов в обслуживании сверхпроводников. Увеличение поперечного размера ЗС генератора, для снижения вероятности ВЧ-пробоя на поверхности гофрировки с целью повышения мощности и энергии СВЧ-излучения, связано с проблемой селективного возбуждения рабочей моды.

Задачи повышения мощности, длительности и эффективности СВЧ-излучения, снижения величины ведущего магнитного поля, а также расширения и упрощения механической перестройки частоты генерации РЛОВ приводят к необходимости модернизации существующей конструкции генератора. Для повышения мощности и энергии излучения надо увеличивать средний диаметр ЗС и обеспечивать условия для селективного возбуждения рабочей моды. Снижение ведущего магнитного поля требует повышения качества электронного пучка в области слабых магнитных полей и увеличения связи с синхронной гармоникой. Усиление влияния эффекта предварительной модуляции пучка может привести к расширению полосы механической перестройки частоты.

На данный момент такими возможностями может обладать конструкция РЛОВ, которая состоит из ЗС с увеличенным поперечным размером (средний диаметр гофрировки превышает длину волны излучения) и резонансного рефлектора в качестве отражателя встречной волны. Исследование данного генератора и составляет актуальность данной работы, направленной на практическую реализацию предложенной конструкции РЛОВ и различных режимов её работы.

В связи с вышеизложенным целью диссертационной работы являлось:

- теоретическое и экспериментальное исследование влияния предварительной модуляции электронного пучка на работу РЛОВ с резонансным рефлектором;
- практическая реализация эффективного генератора в относительно слабом и большом магнитных полях;
- разработка и создание эффективного релятивистского генератора с полосой перестройки частоты около 10% для фиксированных параметров ЗС и электронного пучка.

Научная новизна результатов

Результаты численного моделирования с использованием различных моделей расширяют знания о физических процессах в РЛОВ с предмодуляцией электронного потока. В расчётах продемонстрированы эффекты снижения стартового тока для рабочей моды при наличии предварительной модуляции электронного потока и изменения частоты генерации при смещении положения резонансного рефлектора относительно ЗС. Получено условие оптимального энергообмена, которое для режимов с высоким КПД генерации устанавливает связь между глубиной модуляции и нормированным током пучка.

На основе имеющегося программного аппарата произведены оценки электродинамических параметров ЗС и резонансного рефлектора, что расширило возможности численного эксперимента.

В расчётах с помощью полностью электромагнитного кода KARAT продемонстрирована принципиальная возможность реализации на практике эффективной генерации как в большом, так и относительно слабом магнитных полях, а также возможность реализации эффективного генератора с полосой перестройки частоты около 10% для фиксированных параметров ЗС и электронного пучка.

Положения, выносимые на защиту

1. Теоретически показано, что в релятивистской ЛОВ с резонансным рефлектором его геометрия и положение относительно замедляющей системы существенно изменяют стартовые условия и эффективность генерации. При этом для оптимального

- комплексного параметра модуляции электронов по энергии на входе однородной замедляющей системы расчётный КПД генератора достигает 60%.
2. В эксперименте показано, что для релятивистской ЛОВ с резонансным рефлектором и отношением поперечного размера замедляющей структуры к длине волны излучения 1.3 в магнитных полях выше области циклотронного поглощения встречной волны КПД генерации по мощности достигает $37 \pm 5\%$, при пиковой мощности трехсантиметрового излучения 0.75 ± 0.1 ГВт. При этом одним из основных препятствий на пути достижения максимального КПД, предсказываемого теоретически, является возбуждение конкурентных колебаний.
 3. Предложен и теоретически обоснован метод перестройки частоты генерации релятивистской ЛОВ за счет изменения положения резонансного рефлектора относительно замедляющей системы. Показано, что смещение частоты генерации связано с изменением разности фаз ВЧ-тока и поля синхронной гармоники на входе в замедляющую систему. С увеличением глубины модуляции электронов по энергии происходит расширение полосы перестройки частоты и, в частности, реализуются условия для перехода к режиму генерации вблизи точного синхронизма.
 4. В эксперименте продемонстрирована возможность изменения частоты генерации релятивистской ЛОВ в полосе 11% на половинном уровне от максимальной мощности за счет перемещения резонансного рефлектора относительно замедляющей системы. При этом максимальная мощность генерации в 8-сантиметровом диапазоне длин волн составляет 4 ± 1 ГВт при эффективности $25 \pm 6\%$ в магнитных полях ниже области циклотронного поглощения встречной волны.

Практическая ценность работы

Полученные в диссертационной работе сведения о физических процессах в РЛОВ с предмодуляцией электронного потока используются при конструировании и создании эффективных генераторов.

Создание эффективного релятивистского генератора в магнитных полях ниже области циклотронного поглощения встречной волны позволило существенно снизить энергетические затраты по магнитному полю при его работе в импульсно-периодическом режиме. Это в свою очередь значительно упростило обслуживание генератора.

Создание эффективного релятивистского генератора с широкой полосой перестройки частоты расширяет область его практического применения.

Использование ЗС с увеличенным поперечным размером создаёт предпосылки для увеличения длительности и импульсной мощности микроволнового излучения.

Результаты работы используются в ИСЭ СО РАН, и были применены при проведении ряда совместных исследовательских работ.

Публикации результатов

Результаты работы докладывались на следующих международных конференциях и симпозиумах: BEAMS 98 – Хайфа (Израиль), BEAMS 2002 – Альбукерк (США), “Симпозиум по сильноточной электронике” 2000 г. и 2004 г. Томск, 11th IEEE International Pulsed Power Conference – Балтимор (США), BEAMS 92 – Вашингтон (США), 1996 - Денвер (США), EUROEM’98 – Тель-Авив (Израиль) и других.

Структура и объём диссертации

Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, одно приложение и список литературы из 100 наименований. Объём диссертации составляет 135 страниц, число рисунков - 78, таблиц - 3.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы, и формулируются цели исследований. Оценивается научная новизна и практическая значимость работы. Формулируются научные положения, выносимые на защиту.

В **Первой главе** даны общие представления о конструкции РЛОВ и механизме энергообмена между электронным пучком и ВЧ-полем. На основе широко используемой гидродинамической модели генератора представлены основные закономерности энергообмена. Проведён обзор основных результатов предшествующих численных и экспериментальных исследований РЛОВ. Рассмотрены основные ограничения, препятствующие повышению мощности и энергии выходного СВЧ-излучения, и эффективности энергообмена для конструкции генератора с запердельным сужением.

Во **Второй главе** излагаются основные результаты численного исследования РЛОВ с резонансным рефлектором на основе гидродинамической модели генератора в ультрарелятивистском приближении.

В П. 2.1 рассмотрена электродинамическая система РЛОВ с резонансным рефлектором. Показано, что отражение от резонансного рефлектора происходит в режиме холостого хода вследствие возбуждения в нем запертой моды, в резонансном поле которой осуществляется эффективная модуляция электронного потока по энергии. Получены аналитические выражения для оценки дифракционной добротности резонансного рефлектора и добротности, связанной с потерями на модуляцию электронного потока. Приведён результат расчёта полосовой характеристики рефлектора с использованием программы на основе метода матриц рассеяния.

Проанализированы возможные паразитные колебания, которые могут составить конкуренцию рабочей моде в ЗС с увеличенным поперечным размером. Отмечено, что согласование ЗС с участками регулярных волноводов с целью уменьшения отражений на её концах и использование ЗС с неоднородными параметрами гофрировки ухудшает условия для возбуждения π -вида и других паразитных колебаний диафрагмированного волновода.

С помощью программы на основе метода матриц рассеяния сделаны оценки сопротивлений связи пучка с основной и синхронной $(-1)^{\text{ой}}$ пространственной гармониками волны E_{01} в ЗС с увеличенным поперечным размером.

В П. 2.2 представлена гидродинамическая модель генератора с предмодуляцией электронного потока. Записаны аналитические выражения для параметров глубины модуляции электронного потока по энергии в области рефлектора и фазы модуляции, которая задаёт положение центрального электрона формирующегося сгустка относительно фазы поля $(-1)^{\text{ой}}$ пространственной гармоники на входе в пространство взаимодействия. Показано, что регулировка фазы модуляции осуществляется посредством изменения положения модулятора относительно ЗС генератора.

В П. 2.3 в рамках линейной несамосогласованной модели генератора (параметр фазы модуляции считается свободным параметром задачи) проведён анализ стартовых условий. Показано, что наличие предварительной модуляции обеспечивает условия для снижения стартового тока (или стартовой длины генератора) рабочей моды. Другой важной особенностью стартовых условий генератора является зависимость расстройки синхронизма от параметра фазы модуляции, что создаёт условие для расширения полосы перестройки частоты генерации РЛОВ. Отмечено, что с ростом глубины модуляции частиц на входе расширяется диапазон изменения стартовой расстройки синхронизма, а минимальное значение расстройки стремится к точному синхронизму между пучком и

синхронной волной. Проанализировано влияние пространственного заряда электронного пучка на пусковые условия генератора. Отмечено, что с увеличением параметра пространственного заряда происходит как рост разделения между стартовыми длинами основной и соседних продольных мод, так и сокращение количества продольных мод, возбуждаемых в генераторе с заданной длиной ЗС, которая существенно превышает длину необходимую для возбуждения основного колебания.

В П. 2.4 приведены результаты численных расчётов с использованием нелинейной несамосогласованной стационарной модели. Показано, что расчётная эффективность генератора может достигать 60% при малом параметре пространственного заряда электронного пучка. Режимы с высоким КПД генератора реализуются в расчетах благодаря оптимальной взаимной фазировке ВЧ тока и синхронной волны, когда на входе в область взаимодействия формирующийся сгусток находится вблизи середины тормозящей фазы поля $(-1)^{ой}$ пространственной гармоники. Для расчётных режимов с высокой эффективностью получено условие оптимального энергообмена $|\alpha I^{1/2}|_{opt} \approx (4\pi)^{-1/2}$, которое устанавливает связь между нормированным током пучка (I) и глубиной модуляции электронного потока ($|\alpha|$) в области рефлектора (рис. 1). Показано, что и в нелинейном режиме с увеличением глубины модуляции частиц на входе расширяется диапазон изменения расстройки синхронизма.

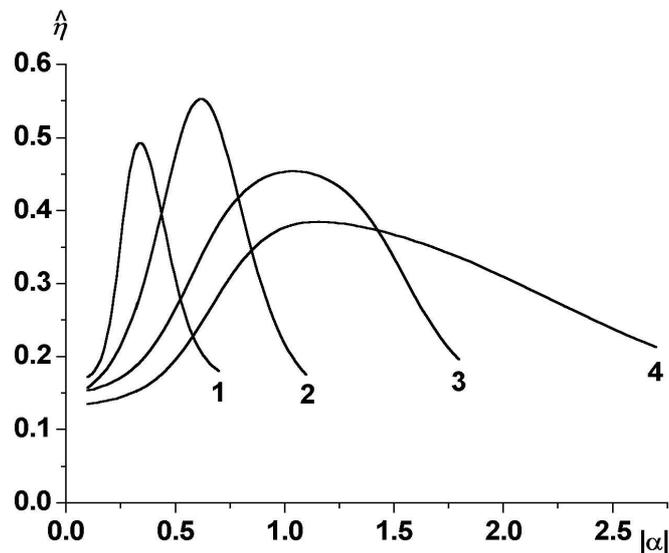


Рис. 1 Оптимизированный по длине ЗС и фазе модуляции КПД генератора ($\hat{\eta}$) в зависимости от параметра амплитуды модуляции для нескольких значений нормированного тока пучка: 1 - $I = 1$; 2 - $I = 0.3$; 3 - $I = 0.1$; 4 - $I = 0.05$.

В **П. 2.5** рассмотрена самосогласованная модель генератора с предмодуляцией электронного потока (параметр фазы модуляции не является свободным параметром задачи). Показано, что эффекты снижения стартовой длины и зависимости расстройки синхронизма от фазы модуляции сохраняются и в рамках самосогласованной модели генератора.

В **П. 2.6** на основе гидродинамической модели рассмотрено влияние высших гармоник пространственного заряда на процесс энергообмена. Показано, что увеличение количества гармоник пространственного заряда, учитываемых в расчётах, может приводить как к росту, так и падению максимальной эффективности генератора. При этом важную роль играют взаимные фазировки высших гармоник ВЧ-тока и поля синхронной волны на протяжении всей длины пространства взаимодействия. Отмечено, что максимальный расчётный КПД генератора может быть и несколько выше, чем при учёте только одной гармоники пространственного заряда, а оптимальное значение пространственного заряда оказывается в любом случае завышенным.

В **П. 2.7** обсуждены возможные режимы генерации РЛОВ с резонансным рефлексором, реализация которых позволит расширить область применения данного генератора. К ним относятся: возможность увеличения средней мощности и длительности микроволнового излучения, возможность повышения эффективности генерации в магнитных полях ниже области циклотронного поглощения встречной волны, возможность расширения полосы механической перестройки частоты генерации РЛОВ.

В **Третьей главе** приведены результаты оптимизационного численного эксперимента с использованием программы на основе метода матриц рассеяния для расчёта электродинамических параметров ЗС и резонансного рефлексора, и полностью электромагнитного кода KARAT для проведения “горячего” численного эксперимента.

В **П. 3.1** на основе численных расчётов в рамках гидродинамической модели генератора и с помощью программы метода матриц рассеяния проведёны оценки параметров ЗС и рефлексора для эффективного трёхсантиметрового генератора в сильном магнитном поле. С помощью электромагнитного кода KARAT проведено нестационарное численное моделирование процесса генерации РЛОВ с резонансным рефлексором в комплексе с коаксиальным диодом с магнитной изоляцией (КДМИ). Представлен расчёт геометрии генератора с эффективностью преобразования энергии электронного пучка в микроволновое излучение около 40% в большом магнитном поле. Для режимов с высокой эффективностью в расчётах подтверждена возможность развития конкурентного колебания. Показано, что использование ЗС с неоднородным распределением фазовой

скорости синхронной гармонике по длине пространства взаимодействия позволяет повысить в расчёте эффективность генератора до 46%.

В **П. 3.2** представлен результат численной оптимизации геометрии трёхсантиметровой РЛОВ с резонансным рефлектором в относительно слабом магнитном поле. Рассчитана геометрия генератора с эффективностью около 25% при значении ведущего однородного магнитного поля 7кЭ. В рамках численного эксперимента получены зависимости эффективности генерации от величины ведущего магнитного поля и положения резонансного рефлектора (рис. 2). Отмечено отсутствие противоречий с численным моделированием в рамках гидродинамической модели генератора. Для решения конкретной практической задачи проведён расчёт геометрии генератора с эффективностью генерации около 35% при ведущем однородном магнитном поле около 5 кЭ.

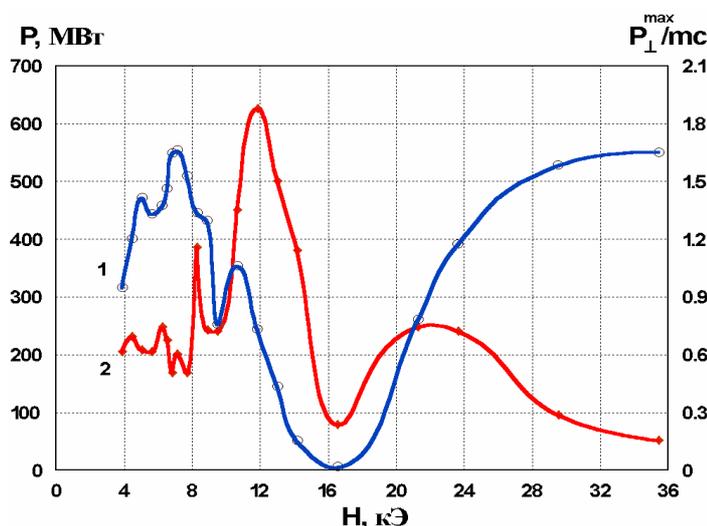


Рис. 2 Зависимости расчётной мощности генерации – кривая 1 и максимального значения нормированного поперечного импульса электронов в режиме установившихся колебаний – кривая 2 от ведущего магнитного поля. Параметры электронного пучка: напряжение на катоде - $U \approx 500$ кВ, ток диода - $I_b \approx 4.4$ кА.

В **П. 3.3** представлен результат численной оптимизации геометрии перестраиваемой по частоте 8-см РЛОВ с резонансным рефлектором в относительно слабом магнитном поле. Перестройка частоты осуществляется при перемещении резонансного рефлектора относительно ЗС генератора, и связана с изменением положения формирующегося на длине участка дрейфа сгустка относительно фазы поля синхронной гармонике на входе в ЗС. Рассчитан режим с механической перестройкой частоты генерации свыше 10% (по уровню -3 dB от максимальной мощности) без изменения параметров ЗС и электронного пучка (рис. 3). Для максимальной частоты генерации в

полосе перестройки начальная кинематическая расстройка синхронизма близка к точному синхронизму между пучком и синхронной волной.

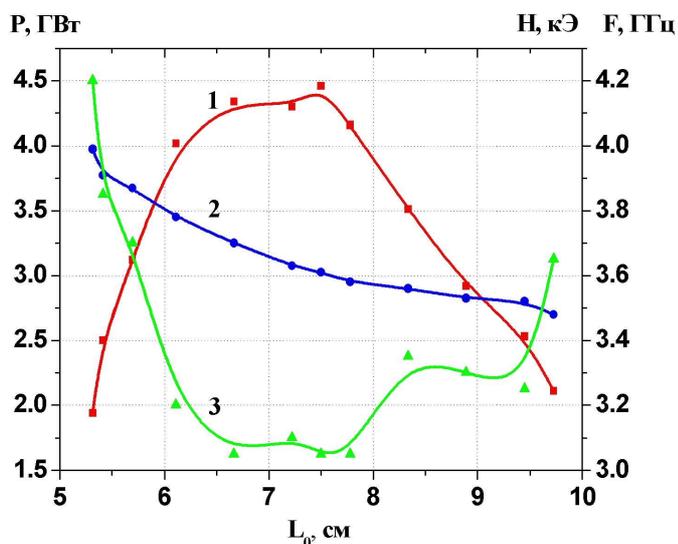


Рис. 3 Расчётные зависимости мощности генерации – кривая 1, частоты генерации – кривая 2 от сдвига резонансного рефлектора относительно ЗС (L_0), полученные в оптимальном магнитном поле – кривая 3. Параметры электронного пучка: напряжение на катоде - $U \approx 1.2$ МВ, ток диода - $I_b \approx 12.5$ кА.

В **Четвёртой главе** представлены результаты экспериментальных исследований РЛОВ с резонансным рефлектором. В основе конструкций генераторов лежат расчёты, проведённые в рамках численных оптимизационных экспериментов, представленных во **второй и третьей главах** диссертации.

В **П. 4.1** представлены конструктивная схема ускорителей серии “СИНУС”, конструкция КДМИ с РЛОВ, схема соленоида постоянного тока, состав и элементы измерительного комплекса.

В **П. 4.2** приведены результаты экспериментального исследования трёхсантиметровой РЛОВ с резонансным рефлектором. Представлены зависимости эффективности генератора от величины ведущего однородного магнитного поля и положения резонансного рефлектора. В низком магнитном поле (≈ 7 кЭ) измеренная эффективность генератора составила $\approx 25\%$ (рис. 4). Отмечено хорошее совпадение с результатами численного эксперимента. Для импульсно-периодического режима работы реализован генератор с декомпрессией электронного пучка. Представлены осциллограммы сигнала с лампового СВЧ-детектора, характеризующие высокую эффективность и хорошую стабильность генерации в низких магнитных полях.

В П. 4.3 приведены результаты экспериментального исследования эффективной трёхсантиметровой РЛОВ с резонансным рефлектором в большом магнитном поле. В эксперименте реализован режим генерации с эффективностью около 40% при ведущем магнитном поле 30 кЭ. В режиме с высокой эффективностью, вероятно, наблюдалось существование обратного тока электронов, что также было отмечено и в численном эксперименте. Показано, что росту эффективности генератора препятствует конкуренция со стороны паразитных колебаний.

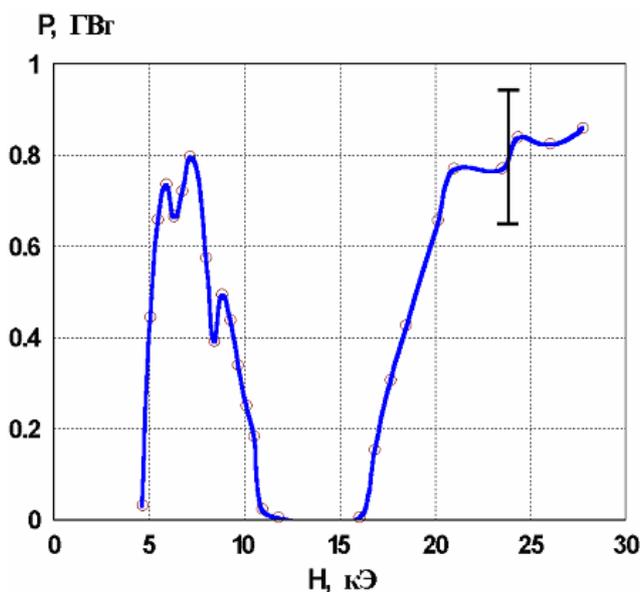


Рис. 4 Экспериментальная зависимость мощности генерации от ведущего магнитного поля. Параметры пучка при магнитном поле $H \approx 7$ кЭ: напряжение на катоде - 600 кВ, ток диода - 5.5 кА.

В П. 4.4 приведены результаты экспериментального исследования РЛОВ 8-см диапазона с резонансным рефлектором. В низком магнитном поле реализован режим с полосой механической перестройки частоты генерации около 10% (рис. 5). При оптимальном положении резонансного рефлектора эффективность генерации составила 25%. Отмечено, что расширению полосы перестройки препятствуют возбуждение конкурентных колебаний и, по-видимому, недостаточная длительность импульса напряжения ускорителя.

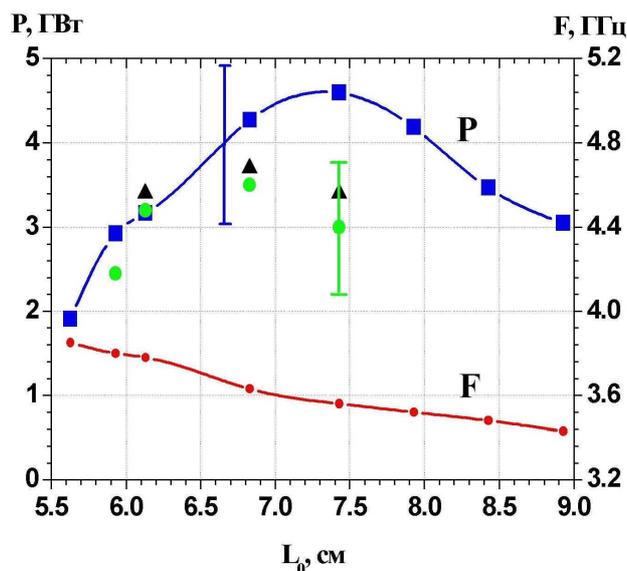


Рис 5. Экспериментальная зависимость пиковой мощности (P) и частоты генерации (F) от положения резонансного рефлектора (L_0). P – измерения пиковой мощности с помощью волноводно–полоскового ответвителя. Треугольник – измерение пиковой мощности с помощью апертурного калориметра. Круг – измерение пиковой мощности с помощью короткого симметричного вибратора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Предложена новая конструкция РЛОВ состоящая из ЗС с поперечным размером, превышающим приблизительно в 1.3÷1.5 раза длину волны излучения, и сосредоточенного резонансного рефлектора для отражения встречной волны E_{01} . Показано, что отражение встречной волны от рефлектора осуществляется вследствие возбуждения в нём запертой моды E_{02} . Показано, что в полосе частот отражения рефлектора имеет место предварительная модуляция пролетающего электронного пучка по энергии. Это создаёт условие для селекции волн в ЗС с увеличенным поперечным размером.
2. В рамках линейной модели генератора показано, что наличие предварительной модуляции видоизменяет стартовые параметры генератора. В зависимости от глубины модуляции и положения рефлектора относительно ЗС возможно существенное снижение стартового тока (стартовой длины) генератора для рабочей моды и изменение стартового значения расстройки синхронизма. Данное поведение стартовых параметров обусловлено изменением степени компактности

- формирующегося сгустка и положения его центра относительно фазы поля синхронной гармонике на входе в ЗС. Отмечено, что с ростом глубины модуляции частиц на входе расширяется диапазон изменения стартовой расстройки синхронизма, а минимальное значение расстройки стремится к точному синхронизму между пучком и синхронной волной. Показано, что поле пространственного заряда электронного пучка обеспечивает разрежение спектра собственных колебаний, различающихся продольной структурой поля.
3. В рамках нелинейной краевой задачи ЛОВ с предварительной модуляцией электронного потока показано, что посредством изменения положения рефлектора относительно ЗС осуществляется регулировка эффективности энергообмена и частоты генерации. Получено условие оптимального энергообмена, которое для режимов с высокой эффективностью устанавливает связь между глубиной модуляции электронного потока и нормированным током пучка. В ультрарелятивистском случае и при малом параметре пространственного заряда максимальный расчётный КПД генератора с однородной ЗС достигает 60%. В зависимости эффективности генератора от параметра пространственного заряда существует оптимум. Показано, что оптимальное значение параметра пространственного заряда снижается с увеличением числа его гармоник в численном моделировании. При этом происходит повышение расчётной эффективности генерации, которое обеспечивается за счёт поддержания более длительной компактности электронного сгустка.
 4. В рамках численного моделирования показано, что в режимах с высоким КПД генерации происходит нарушение условия селективного возбуждения рабочей моды. Это вызвано возрастанием стартового тока (стартовой длины) генератора. Показано, что использование неоднородных ЗС с дополнительной корректировкой оптимальных условий энергообмена обеспечивает получение высоких расчётных значений КПД генерации.
 5. На основе нестационарного численного моделирования с помощью полностью электромагнитного кода KARAT показана возможность реализации эффективного режима генерации РЛОВ с резонансным рефлектором в области магнитных полей ниже циклотронного резонанса. На базе расчётов экспериментально реализованы однократный и импульсно-периодический режимы работы трёхсантиметрового генератора с эффективностью 20-25%, мощностью излучения 450-800 МВт в области магнитных полей 6-7 кЭ.

6. Проведено численное и экспериментальное исследование эффективной трёхсантиметровой РЛОВ с резонансным рефлектором в большом магнитном поле. Максимальная эффективность генерации в эксперименте составила $\approx 37\%$ при мощности генерации 750 МВт и магнитном поле 30 кЭ. Численно и экспериментально показано, что препятствием для повышения эффективности генератора является конкуренция со стороны паразитных колебаний. Экспериментально подтверждено существенное возрастание нестабильности генерации и несимметричности диаграммы излучения, появление сигналов с паразитной частотой вблизи π – вида.
7. Численно и экспериментально подтверждена возможность расширения механической перестройки частоты генерации РЛОВ за счёт перемещения резонансного рефлектора относительно ЗС генератора при фиксированных параметрах гофрировки и электронного пучка. В эксперименте получена 11% полоса перестройки частоты по половинному уровню от максимальной мощности генерации 8-см РЛОВ. В области низких магнитных полей 4-5 кЭ максимальная эффективность генератора составила 25% при мощности генерации около 4 ГВт.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. О возможности снижения магнитного поля в релятивистской ЛОВ // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24, № 10, с. 43.
2. Коровин С.Д., Гунин А.В., Губанов В.П., Климов А.И., Пегель И.В., Полевин С.Д., Ройтман А.М., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. Разработка, создание и исследование мощных эффективных источников СВЧ-излучения на базе сильноточных импульсно-периодических ускорителей. // “Физика микроволн”, Нижний Новгород, ИПФ РАН: 1996, Т.1, с. 43-48.
3. Gubanov V.P., Korovin S.D., Pegel I.V., Rostov V.V., Stepchenko A.S., Totmeninov E.M. Compact Source of high-power microwaves. // Proc. of SPIE «Intense Microwave Pulses IV», Denver, Colorado, 1996, Vol. 2843, p. 228-237.

4. Gunin A. V., Klimov A.I., Korovin S.D., Kurkan I.K., Pegel I.V., Polevin S.D., Roitman A.M., Rostov V.V., Stepchenko A.S., and Totmeninov E.M. X-band 3 GW Relativistic BWO Based on High-Current Repetitive-Pulsed Accelerator. // Proc. 11th Int. Pulsed Power Conf. -Baltimore, June29-July 2,1997, p. 141-146.
5. Gunin A. V., Klimov A.I., Korovin S.D., Kurkan I.R., Pegel I.V., Polevin S.D., Roitman A.M., Rostov V.V., Stepchenko A.S., and Totmeninov E.M. Relativistic X-band BWO with 3 GW Output Power. // IEEE Trans. Plasma Science, vol. 26, № 3, June 1998, p. 326-331.
6. Gunin A.V., Korovin S.D., Kurkan I.K., Pegel I.V., Rostov V.V., and Totmeninov E.M. Relativistic BWO with electron beam pre-modulation. // Proc. of the 12th Int. Conf. on High Power Particle Beams, Haifa, 1998.
7. В.П. Губанов, А.В. Гунин, А.И. Климов, С.Д. Коровин, И.К. Куркан, И.В. Пегель, С.Д. Полевин, В.В. Ростов, Е.М. Тотменинов Разработка, создание и исследование мощных эффективных источников СВЧ-излучения на базе сильноточных импульсно-периодических ускорителей. // Физика микроволн: Сборник отчетов по научным проектам МНТП России «Физика микроволн», Нижний Новгород, 1999. Т. 1, с. 41-44.
8. El'chaninov A. A., Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel' I. V., Polevin S. D., Totmeninov E. M., and Tarakanov V. P. Powerful microwave sources with virtual cathode. Proc. 11th Int. Conf. on High-Power Electromagnetics (EUROEM'98), Tel Aviv, Israel, 14 – 19 June 1998, p. 224
9. Rostov V.V., Gunin A.V., Korovin S.D., Kurkan I.K., Kutenkov O.P., Polevin S.D., Stepchenko A.S., and Totmeninov E.M. Reptitive-pulsed operation of the relativistic BWO. // Proc. 1st International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials, Tomsk, Russia, 24-29 September 2000, V. 2, p. 408- 411.
10. Kitsanov S. A., Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel I. V., Polevin S. D., Rostov V. V., Totmeninov E. M. Broadband frequency tuning in a gigawatt S-band relativistic BWO. // Proc. 14th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS-02), 23 – 28 June 2002, Albuquerque, NM, U.S.A, p. 259–262.

11. Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel I. V., Polevin S. D., Rostov V. V., and Totmeninov E. M. Gigawatt S-band frequency-tunable sources of high-power microwave pulses. // IEEE Trans. Plasma Sci., спецвыпуск 2004.
12. 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.
13. Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. Уточнённые соотношения подобия для высокочастотных приборов с длительной инерционной группировкой электронов. // Изв. Вузов. Радиофизика, 2001, Т. 44, №4, с. 326-344.
14. Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. Релятивистская ЛОВ с сосредоточенным резонансным рефлектором. // Изв. Вузов. Радиофизика, 1999, Т. 42, №12, с. 1189-1196.
15. Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. Волноводно-квазиоптический резонатор для коротковолновых релятивистских генераторов. // Изв. Вузов. Радиофизика, 1993, Т. 36, №2, с. 192-200.
16. 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.
17. Kitsanov S. A., Klimov A.I., Korovin S.D., Rostov V.V., and Totmeninov E.M. Relativistic BWO With Enhanced Frequency Tunability. // IEEE Trans. Plasma Science, vol. 33, № 5, October 2005, p. 1685-1689.
18. Totmeninov E.M, Korovin S.D., Klimov A.I., Rostov V.V., Relativistic BWO with Mechanically Frequency Tuning // Proc. 13th International Symposium on High Current Electronics, Tomsk, Russia, 25-29 July 2004, p. 304- 307.
19. S. Korovin, I. Kurkan, I. Pegel, S. Polevin, V. Rostov, E. Totmeninov. Gigawatt S-band frequency-tunable sources of high-power microwave pulses. // Proc. On the 4th International Symposium on Pulsed Power and Plasma Applications and International Workshop on Applications of Pulsed Power to Nanosized Materials, Nagaoka, Japan, October, 19-22, 2003, p. 70-75.