

Работа выполнена в Институте прикладной физики
Российской академии наук (г. Нижний Новгород)

На правах рукописи

ПЛОТКИН Михаил Ефимович

**УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ
СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН
СВЕРХРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

01.04.03 – радиофизика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2010

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Сергей Владимирович Кузиков

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Сергей Николаевич Власов

доктор физико-математических наук
Элкуно Аврумович Перельштейн

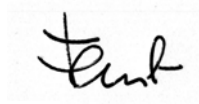
Ведущая организация: Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского

Защита диссертации состоится «__» _____ 2010 г. в __ часов
на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной
физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной
физики РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук, профессор



Ю. В. Чугунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Предмет исследования и актуальность темы

Широкое применение когерентного микроволнового излучения большой мощности обуславливает разнообразие требований к электродинамическим системам, используемым для генерации, транспортировки и преобразования волновых потоков в таких интенсивно развивающихся областях современной физики и техники как нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС), ускорение заряженных частиц, радиолокация и связь, обработка материалов.

При этом ввиду того, что высокочастотный пробой и омические потери зачастую не позволяют использовать микроволновые системы с сечениями порядка длины волны, а оптические аналоги не отвечают требованиям компактности, все более широкое применение находят квазиоптические электродинамические компоненты. С учетом постоянного прогресса как источников, так и потребителей микроволнового излучения создание высокоэффективных квазиоптических систем требует развития новых методов и подходов к задачам управления параметрами колебаний и волн. Этим проблемам, которые включают, в частности, задачи трансформации волн различных типов, обеспечение эффективности и модовой селекции электродинамических систем приборов мощной СВЧ электроники, создание волноводов и резонаторов с наперед заданным спектром частот и мод, посвящена настоящая диссертационная работа.

Цели диссертационной работы

1. Разработка новых модификаций метода синтеза волноводных преобразователей, применимых для широкого класса систем, включая волноводы с нерегулярностями, имеющими размеры, сравнимые с длиной волны. Создание на основе этого метода новых компонентов микроволновой электроники.

2. Создание компонентов источников мощного когерентного излучения, таких как гиротронные резонаторы с высокой электропрочностью и селективностью, вводы мощности и преобразователи излучения гироклистронов, работающих на высших волноводных модах.

3. Исследование способов повышения эффективности устройств, работа которых основана на эффектах интерференции когерентных волновых потоков в сверхразмерных волноводах (эффекты Тальбота). Исследование новых устройств такого типа.

4. Исследование способов увеличения градиента ускорения заряженных частиц в ускорителях линейных электрон-позитронных коллайдеров, основанных на использовании многомодовых резонаторов.

Научная новизна работы

В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

1. Развита модификация итерационного метода синтеза волноводных преобразователей, позволяющая использовать в блоке вычисления электромагнитных полей любые алгоритмы, основанные, например, на методе связанных волн, методе интегральных уравнений, FDTD и других.

2. Рассчитаны новые гиротронные резонаторы на аксиально-симметричных модах, в том числе:

- а) конический резонатор с гофрированной боковой стенкой на моде $TE_{0,3}$;
- б) цилиндрический резонатор на моде $TE_{0,3}$ с широкими (порядка длины волны) щелями в боковой стенке;
- в) ступенчатый резонатор на комбинированной рабочей моде, для гиротрона на второй гармонике циклотронной частоты.

Предложенные резонаторы обладают одновременно высокой селективностью и электропрочностью, что позволяет использовать их для создания импульсных релятивистских гиротронов с высокой мощностью и частотой излучения.

3. Рассчитан и протестирован новый высокоэффективный квазиоптический выходной преобразователь гироклистрона, осуществляющий вывод излучения вдоль оси прибора в виде обладающей низкими потерями моды $TE_{0,1}$. Преобразователь совмещен с коллектором электронов, который выполнен в виде волноводного расширения, имеющего низкие дифракционные потери при транспортировке рабочего СВЧ излучения.

4. Найдены новые методы повышения эффективности устройств, работа которых основана на эффектах интерференции когерентных волновых потоков в сверхразмерных волноводах (повторение пучка, разделение на несколько пучков и др.). Методы основаны на создании оптимальной импедансной гофрировки стенок либо на модификации формы поперечного сечения.

5. Исследованы новые принципы увеличения градиента ускорения частиц в линейных электрон-позитронных коллайдерах. Ускорение последовательности ступок частиц осуществляется с помощью периодической цепочки квазиоптических резонаторов, работающих на нескольких эквиди-

стантно расположенных по частотам собственных модах, что обеспечивает сокращение времени экспозиции структуры сильными СВЧ полями и позволяет повысить ускоряющий градиент.

Практическая значимость диссертационной работы

Развитый итерационный метод синтеза может применяться при создании широкого класса высокоэффективных волноводных и зеркальных линий передачи СВЧ излучения, которые могут представлять интерес для ИРЭ РАН, ИОФ РАН (Москва). Компактный выходной преобразователь был разработан для мультимегаваттного импульсного гироклистрона, создаваемого в ИПФ РАН (Н. Новгород). Новый тип открытого брегговского резонатора для мощного МСЭ был разработан для ОИЯИ (Дубна).

Предложенные методы селекции в резонаторах на электропрочных аксиально-симметричных модах высокого порядка могут быть использованы для создания релятивистских гиротронов с мощностью несколько десятков мегаватт в ИПФ РАН и ЗАО НПП «ГИКОМ» (Н. Новгород).

Исследованные способы повышения эффективности устройств, основанных на эффекте Тальбота, могут быть применены для создания антенн дистанционного сканирования пучка для нагрева плазмы в установках УТС в ITER (Кадараш, Франция), а также для создания элементов мощных ЛСЭ в ИЯФ СО РАН (Новосибирск).

Ускоряющая структура в виде последовательности многомодовых резонаторов с эквидистантным спектром частот может найти применение в линейных лептонных несверхпроводящих суперколлайдерах следующего поколения, создаваемых в CERN (Женева, Швейцария), и SLAC (Стэнфорд, США).

Апробация и публикация результатов

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1а–24а], среди которых 9 статей в реферируемых журналах ([1а], [3а–10а]); результаты докладывались на 31-й и 32-й Международных конференциях по инфракрасным и миллиметровым волнам (2006, Шанхай, КНР; 2007, Кардиф, Великобритания), 22-й и 23-й Международных конференциях по ускорителям частиц (2007, Нью-Мехико, США; 2009, Ванкувер, Канада), 9-й и 10-й Европейских конференциях по ускорителям частиц (2006, Эдинбург, Великобритания; 2008, Генуя, Италия), 7-м рабочем совещании «Интенсивное микроволновое излучение: источники и приложения» (2008, Н. Новгород), 21-й Российской конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC-08 (2008, Звенигород Московской обл.), Всероссийских семинарах по радиоп физике миллиметровых и субмиллиметровых волн (2007 и 2009, Нижегородская обл.), 13-й Нижегородской сессии молодых ученых (2008, Нижегородская обл.), 14-й научной конференции по радиоп физике (2010, Н. Новгород), 9-м, 10-м и 12-м Конкурсах молодых ученых

ИПФ РАН (2007, 2008 и 2010, Н. Новгород) и на внутренних семинарах ИПФ РАН (2006–2010).

Личный вклад автора

Основные результаты диссертационной работы получены либо автором лично, либо при его непосредственном участии. В работах [1а, 16а, 20а, 21а] автору принадлежит расчет ответвителя для одноканального компрессора SLED-II. В работах [2а, 3а, 10а, 11а, 12а, 14а] автором были выполнены расчеты волноводных преобразователей по методу связанных волн, а также экспериментальное исследование компонентов выходного преобразователя гироклистрона на низком уровне мощности. В работах [4а, 5а, 19а] автором была рассмотрена модель тепловой усталости, вызванной градиентом температуры на поверхности металла, а также модель тепловой усталости в приближении длинных СВЧ импульсов. В работах [6а, 22а] автор проводил электродинамические расчеты, моделирование и тестирование селективных резонаторов на моде $TE_{0,3}$. В работе [8а] автором лично были получены результаты, относящиеся к коррекции волновых чисел волновода за счет оптимизации формы поперечного сечения волновода, в работе [9а] – выполнено теоретическое и численное исследование эффекта повторения волнового пучка в изогнутом волноводе. Результаты работ [7а, 13а, 15а, 17а, 18а, 23а] получены автором совместно с научным руководителем. Автор выполнял электродинамические расчеты объемных резонаторов, обеспечивающих эквидистантный спектр мод, а также внес существенный вклад в создание и реализацию идеи повышения градиента ускорения за счет использования мод с ненулевым числом продольных вариаций поля. Работа [24а] выполнена без соавторов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 171 страницу, включая 123 рисунка, 3 таблицы и список литературы из 86 наименований.

Положения, выносимые на защиту

1. Новая разновидность метода синтеза модовых преобразователей, основанная на последовательной коррекции преобразующей поверхности волновода от итерации к итерации с помощью FDTD-алгоритма анализа электромагнитных полей, позволяет рассчитывать высокоэффективные СВЧ компоненты.
2. Улучшение модовой селекции в резонаторах релятивистских гиротронов и гироклистронов, работающих на аксиально-симметричных модах высокого порядка, может быть достигнуто следующими способами:

- посредством широких в масштабе длины волны щелей в поверхности резонатора, запирающих рабочую моду при помощи узкополосных рефлекторов;

- за счет конической геометрии резонатора с неоднородной по длине азимутальной гофрировкой;

- при использовании резонатора с профилем в виде ступенек увеличивающегося диаметра, рассеивающих паразитные моды как вблизи рабочей частоты, так и на гармониках гирочастоты.

3. Повышение степени эквидистантности продольных волновых чисел мод волновода позволяет увеличивать эффективность СВЧ приборов, работающих на принципах интерференции когерентных пучков в сверхразмерных волноводных системах. Необходимая коррекция спектра возможна путем выбора оптимальной импедансной гофрировки стенок либо модификации формы поперечного сечения волновода.

4. Для ускорения частиц в СВЧ резонаторе с несверхпроводящими стенками использование нескольких мод на эквидистантно расположенных частотах позволяет повысить ускоряющий градиент в сравнении с одномодовым режимом за счет повышения порогов высокочастотного пробоя и тепловой усталости. Ускоряющая структура электрон-позитронного коллайдера может быть реализована в виде цепочки таких резонаторов, запитываемых при помощи вспомогательного пучка частиц, сгруппированного с тем же периодом, что и основной пучок.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обоснована актуальность темы, обозначены цели и новизна работы, кратко изложено содержание диссертации, а также приведены данные по апробации и публикациям включенных в диссертацию материалов.

Первая глава посвящена вопросам создания преобразователей волноводных мод. В начале дан краткий обзор существующих методов создания модовых преобразователей. В п. 1.1 рассмотрен метод связанных волн для расчета и оптимизации волноводных систем. Представлены примеры расчета преобразователей мод круглого волновода $TE_{0,1}-TE_{0,3}$ и $TE_{0,1}-TE_{0,4}$; высокоселективного ответвителя для резонатора компрессора СВЧ импульсов типа SLED II; селективного брэгговского резонатора для МСЭ с рабочей модой в виде суперпозиции $TE_{1,1}$ (85 %) и $TM_{1,1}$ (15 %), образующей Гауссов пучок при нулевой разности фаз между модами. В п. 1.2 сформулирован итерационный метод синтеза волноводных преобразователей, являющийся развитием метода, предложенного ранее в [1–2] для случая

слабонерегулярных волноводов. Задача синтеза ставится таким образом, что во входном сечении волновода задается начальная структура поля, а в выходном сечении – желаемая структура поля. Искомой является форма профиля преобразователя, находящегося между входным и выходным сечениями. На каждой итерации синтеза производится вычисление комплексных полей двух решений уравнений Максвелла внутри волновода. Для вычисления первого из решений используется граничное условие, соответствующее заданному полю на входе, для вычисления второго – условие, соответствующее желаемому распределению поля на выходе. На основании полей этих двух распределений составляется поправка к деформации волновода $\Delta l(\mathbf{r})$, обеспечивающая сходимости к искомому профилю:

$$\Delta l(\mathbf{r}) = \alpha \cdot \text{Im} \{ \mathbf{H}_r^{+*}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{H}_r^{-}(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_n^{+*}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}_n^{-}(\mathbf{r}) \},$$

где \mathbf{E}_n и \mathbf{H}_r – соответственно векторы нормальной компоненты электрического и тангенциальной компоненты магнитного поля на поверхности преобразователя, \mathbf{r} – радиус-вектор точки поверхности, α – константа, которая может быть выбрана исходя из результатов теории возмущений [3].

В предложенной форме метод не накладывает ограничений на способ получения упомянутых решений уравнений Максвелла и, таким образом, блок вычисления электромагнитных полей может использовать любые алгоритмы (метод поперечных сечений, метод интегральных уравнений, FDTD и др.). П. 1.2.2 посвящен специфике использования метода FDTD [4–5] применительно к задачам итерационного синтеза, а в п. 1.2.3 приведены примеры синтезированных компонентов с использованием метода FDTD для вычисления полей, а также представлены результаты проверки полученных решений с помощью независимых численных алгоритмов.

Во второй главе рассмотрен ряд задач создания высокоэффективных компонентов для релятивистских гироприборов. В п. 2.1 предложены два варианта высокоселективных гиротронных резонаторов на электропрочной аксиально-симметричной моде $TE_{0,3}$. Первый вариант резонатора, рассмотренный в п. 2.1.2, имеет коническую рабочую область, что обеспечивает существенное (более чем в три раза) снижение добротностей ближайших паразитных мод. Добротность рабочей моды сохраняется благодаря неоднородной гофрировке рабочей области, создающей на стенке модифицированное граничное условие, подобранное так, чтобы скомпенсировать влияние конического участка на рабочую моду. Во втором варианте резонатора (п. 2.1.2) селекция достигается за счет широких в масштабе длины волны щелей в боковой поверхности резонатора, позволяющих существенно разредить спектр добротных колебаний из-за дифракционных потерь. Добротность рабочей моды сохраняется благодаря специальным канавкам в профиле щелей, выступающим в качестве резонансных рефлекторов на частоте рабочего колебания. Приведенные результаты тестирования обоих

типов резонаторов на низком уровне мощности хорошо согласуются с расчетом.

В п. 2.2 и 2.3 предложены варианты резонаторов для giroприборов с селекцией паразитных колебаний на более высоких и более низких по сравнению с рабочей гармониках циклотронной частоты. В качестве способа селекции мод на более высоких гармониках рабочей частоты предложена гофрировка боковой стенки резонатора, вносящая дифракционные потери для высокочастотных мод. Благодаря тому, что период гофрировки выбирается меньше длины волны на рабочей частоте, гофрировка слабо влияет на рабочую моду.

Для подавления колебаний на более низких гармониках циклотронной частоты (в случае, когда резонатор рассчитан на высокую гармонику), предложен ступенчатый резонатор эшелетного типа [6] на комбинированной аксиально-симметричной моде. Диаметры ступенек профиля выбираются таким образом, чтобы в каждой из цилиндрических секций могла существовать аксиально-симметричная мода, радиальный индекс которой на единицу больше, чем в предыдущей секции. Рабочая мода имеет, таким образом, нулевое поле на скачках диаметра. В то же время, предложенный профиль выступает в роли конического с рассеивающими ступеньками как для паразитных мод на рабочей частоте, так и для паразитных мод на гармониках giroчастоты.

П. 2.4 посвящен рассмотрению высокоэффективных компонентов для giroклистрона мультимегаваттного уровня мощности на объемной моде высокого порядка. Исследованы новые типы компактных входных резонаторов на модах $TE_{5,1}$, $TE_{6,1}$, $TE_{5,2}$ и $TE_{6,2}$, ввод мощности в которые осуществляется при помощи волновода, пристыкованного по касательной к боковой стенке резонатора. Такой способ обеспечивает селективное возбуждение моды необходимого вращения.

Рассмотрен квазиоптический выходной преобразователь из моды $TE_{5,3}$, являющейся рабочей модой третьего резонатора giroклистрона, в обладающую низкими омическими потерями и удобную для приложений моду $TE_{0,1}$, а также второй вариант преобразователя, трансформирующий выходное излучение в гауссов пучок. Выходной преобразователь содержит в средней части коллектор электронов в виде участка волновода увеличенного диаметра. Работа коллектора основана на эффекте повторения структуры поля параксиального волнового пучка в сверхразмерном волноводе [7–9]. Поверхность коллектора была синтезирована при помощи итерационного метода, описанного в главе 1. Эффективность преобразователя составила 97 %, что было подтверждено тестированием на низком уровне мощности.

Третья глава посвящена исследованию эффектов интерференции когерентных волновых потоков в сверхразмерном волноводе (повторение пучка, разделение на несколько пучков и др.), являющимися аналогами эффекта Тальбота [7] и получившими теоретическое описание в [8–9].

Эффекты обусловлены приближенной эквидистантностью продольных волновых чисел мод волновода, однако в силу того, что эквидистантность выполняется нестрого, эффекты проявляются тем хуже, чем сильнее степень непараксиальности используемых волновых пучков. Для волновода прямоугольного поперечного сечения показаны способы повышения эффективности повторения структуры поля и расширения диапазона углов встрела волнового пучка путем коррекции спектра волновых чисел, достигаемой за счет оптимизации импедансного граничного условия на стенках волновода либо благодаря модификации формы его поперечного сечения.

В п. 3.3 исследован эффект повторения волнового пучка в изогнутом сверхразмерном волноводе прямоугольного поперечного сечения с постоянной кривизной изгиба. Рассмотрены случаи встрела волнового пучка в плоскости изгиба и перпендикулярно плоскости изгиба. В первом случае показано, что эффективность повторения пучка в изогнутом волноводе падает, прежде всего, при небольших углах встрела. Это объясняется тем, что спектр собственных мод претерпевает наибольшие изменения в области мод с низкими поперечными индексами. В случае сканирования волнового пучка в плоскости, перпендикулярной плоскости изгиба, продемонстрирована возможность сохранения высокой эффективности повторения пучка при оптимизированном соотношении поперечных размеров волновода.

В заключительной четвертой главе предложены принципы создания нового типа высокоградиентной ускоряющей структуры для линейных суперколлайдеров с несверхпроводящими стенками. Новая ускоряющая структура представляет собой периодическую последовательность несвязанных резонаторов, работающих на суперпозиции эквидистантно расположенных по частотам собственных мод. Через резонаторы пролетает канал транспортировки пучка частиц, представляющего собой периодическую цепочку ускоряемых электронных либо позитронных сгустков. Питание резонаторов осуществляется с помощью вспомогательного пучка, пролетающего сквозь структуру вместе с ускоряемым пучком и сгруппированного с тем же пространственным периодом. Благодаря использованию нескольких разночастотных мод концентрация ускоряющего поля на оси пучков в каждом отдельно взятом резонаторе возникает в короткий промежуток времени, когда через резонатор пролетает очередной сгусток частиц. Все остальное время, пока резонатор пуст, поля в нем распределены по всему объему и, следовательно, малы. Тем самым обеспечивается сокращение времени экспозиции стенок структуры сверхсильными СВЧ полями.

Рассмотрены общие принципы построения структур предложенного типа, предложены варианты геометрии ячеек структуры, рассмотрены несколько способов запитки структуры. Выполнено сравнение с традиционными одночастотными структурами по основным критериям, ограничивающим увеличение ускоряющего градиента: высокочастотный пробой и тепловая усталость стенок структуры. Приведены результаты расчетов и

моделирования, из которых следуют преимущества многочастотных структур по сравнению с одночастотными по данным критериям.

Максимально допустимое время нахождения ускоряемого сгустка внутри одного резонатора ограничено обратной разницей частот самой высокочастотной и самой низкочастотной из мод. Это условие вытекает из требования, чтобы сгусток всегда находился не только в ускоряющей фазе суммарного поля, но и парциальные поля каждой из мод могли бы только ускорять его. Увеличение числа мод, таким образом, накладывает ограничение на максимальную длину резонатора. Это, в свою очередь, ограничивает усредненный по длине ускорителя градиент, так как на отрезке между резонаторами, который определяется технологическими соображениями, ускорение отсутствует. В то же время, для сокращения времени экспозиции стенок структуры целесообразно использование достаточно большого числа мод. Компромисс может быть достигнут при использовании резонаторов, работающих на модах с ненулевым числом продольных вариаций поля. Благодаря эквидистантности частот этих мод сгустки частиц в каждый момент времени оказываются в ускоряющей фазе каждой из парциальных мод. На основе этой идеи предложен вариант структуры в виде последовательности двухзеркальных резонаторов с частотным спектром, близким к эквидистантному.

В Заключении сформулированы основные результаты работы и положения, выносимые на защиту.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Развита метод синтеза многомодовых волноводных преобразователей, основанный на коррекции профиля волноводной стенки от итерации к итерации. Метод универсален благодаря тому, что не накладывает ограничений на алгоритм анализа полей в ходе синтеза. Эффективность СВЧ компонентов, синтезированных с использованием алгоритма FDTD, подтверждена с помощью общепризнанных численных кодов (HFSS, метод поперечных сечений) и экспериментально.

2. Рассчитаны высокоэффективные волноводные компоненты: преобразователь мод круглого волновода $TE_{0,4}-TE_{0,1}$ для выходного преобразователя импульсного 30 ГГц гироклистрона; высокоселективный волноводный ответвитель для резонатора компактного компрессора СВЧ импульсов типа SLED-II; селективный брегговский резонатор для МСЭ, работающий на суперпозиции мод круглого волновода $TE_{1,1}$ и $TM_{1,1}$.

3. Численно и экспериментально исследованы способы повышения степени селекции в резонаторах мощных релятивистских гиротронов на

аксиально-симметричных модах. Рассчитан резонатор, использующий для селекции мод широкие щели в боковой стенке, конический резонатор с неоднородной по длине азимутальной гофрировкой и резонатор с профилем в виде последовательности ступенек увеличивающегося радиуса, рассеивающих паразитные моды как вблизи рабочей частоты, так и на гармониках гирочастоты. В предварительных испытаниях 30 ГГц гиротрона с резонатором щелевого типа на моде $TE_{0,3}$ продемонстрирована генерация излучения на рабочей моде.

4. Разработаны ввод мощности и выходной преобразователь для 30 ГГц гироклистрона, работающего на моде $TE_{5,3}$. Выходной преобразователь одновременно решает задачи эффективной транспортировки СВЧ излучения через волноводное расширение, служащее коллектором электронов, и преобразования излучения в удобные для приложений моды $TE_{0,1}$ либо $TM_{0,0}$. В экспериментах на низком уровне мощности показана высокая эффективность рассчитанных СВЧ компонентов.

5. Исследованы способы повышения эффективности СВЧ устройств, работа которых основана на явлении мультипликации поперечной структуры поля в сверхразмерном волноводе. Выигрыш в эффективности достигается благодаря улучшению эквидистантности спектра волновых чисел путем нанесения импедансной гофрировки стенок либо модификации формы поперечного сечения волновода. В частности, для антенны дистанционного сканирования волнового пучка в плазме продемонстрирована возможность расширения углового диапазона на 50 %. Исследован эффект повторения волнового пучка в изогнутой сканирующей антенне для случаев встречи пучка в плоскости изгиба и перпендикулярно к ней. Показана возможность исправления неэквидистантности спектра, вызываемой изгибом, что обеспечивает сохранение высокой эффективности при сканировании пучка в плоскости, перпендикулярной плоскости изгиба волновода.

6. Для ускорителей линейных коллайдеров показана возможность увеличения темпа набора энергии частиц благодаря использованию ускоряющей структуры в виде цепочки резонаторов с эквидистантным по частотам спектром собственных мод. Такая структура способна обеспечить сокращение времени экспозиции стенок структуры сверхсильными СВЧ полями, что позволяет повысить пороговые значения полей, ответственных за развитие СВЧ пробоя и тепловой усталости поверхности металла. Рассмотрены системы с эквидистантным модовым спектром в виде объемных резонаторов, а также открытых резонаторов, работающих на суперпозиции мод с развитой в продольном направлении структурой поля. Рассмотрены способы питания ускоряющей структуры, наиболее перспективным из которых представляется вариант с использованием вспомогательного пучка

частиц, сгруппированного с тем же периодом, что и ускоряемый пучок, и пролетающего сквозь структуру вместе с ним.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Денисов Г.Г., Калынова Г.И., Соболев Д.И.* Метод синтеза волноводных преобразователей // Известия вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47. С. 688–693.
2. *Денисов Г.Г., Самсонов С.В., Соболев Д.И.* Двумерная реализация метода синтеза волноводных преобразователей // Известия вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 9. С. 1056–1062.
3. *Ковалев Н.Ф., Орлова И.М., Петелин М.И.* Трансформация волн в многомодовом волноводе с гофрированными стенками // Известия вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11, № 6. С. 783–786.
4. *Yee K.S.* Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media // IEEE Transactions on antennas and propagation. 1966. V. AP-14, № 8. P. 302.
5. *Taflove A. and Hagness S.C.* Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Boston and London: Artech House, 2000. 854 p.
6. *С.Н. Власов, Е.В. Копосова, А.Б. Павельев, В.И. Хижняк.* Гиротроны с эшелеттными резонаторами // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 6. С. 691–698.
7. *Talbot H.F.*, "Facts relating to Optical Science", London and Edinburgh Phil. Mag. and J. of Science. 1836. V. 9, № 56. P. 401–407.
8. *Ривлин Л.А., Шильдяев В.С.* Полигармонические волноводы для когерентного света // Известия вузов. Радиофизика. 1968. № 11. С. 572–578.
9. *Rivlin L., Semenov A.* Transition of images through optical waveguides, Laser Focus. 1981. V. 17, № 2, P. 82–84.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1а. *Kuzikov S. V., Vikharev A. A., Plotkin M. E., Shegol'kov D. Yu., Hirshfield J. L.* One-channel Ka-band pulse compressor // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2007. V. 10. P. 082001-1–082001-8.
- 2а. *Кузиков С. В., Плоткин М. Е.* Синтез многомодовых волноводных систем на основе метода FDTD: препринт № 731. ИПФ РАН. – Нижний Новгород, 2007. – 27 с.

3а. *Кузиков С. В., Плоткин М. Е.* Синтез модовых преобразователей на основе метода FDTD // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 3. С. 216–230.

4а. *Kuzikov S. V., Plotkin M. E.* Theory of Thermal Fatigue Caused by RF Pulse Heating // Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2007. V. 29, № 3, P. 298–311.

5а. *Кузиков С. В., Плоткин М. Е.* Модель тепловой усталости поверхности меди под действием мощного СВЧ излучения // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 979–987.

6а. *Денисов Г. Г., Зайцев Н. И., Кузиков С. В., Плоткин М. Е.* Повышение селективности резонаторов релятивистских гиротронов, работающих на осесимметричных модах // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 10. С. 837–849.

7а. *Кузиков С. В., Плоткин М. Е.* Использование многомодовых резонаторов с эквидистантным спектром для увеличения темпа набора энергии частиц в линейных суперколлайдерах // Изв. Вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 8. С. 660–670.

8а. *Denisov G. G., Fedorova K. A., Danilov Yu. Yu., Kuzikov S. V., Shmelev M. Yu., Plotkin M. E.* Efficiency Enhancement of Components Based on Talbot Effect // Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2007. V. 28, № 11. P. 923–935.

9а. *Denisov G. G., Kuzikov S. V., Plotkin M. E.* Study of Talbot Effects in a Bent Waveguide with Constant Curvature // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2009. V. 30, № 4. P. 349–356.

10а. *Kuzikov S. V., Plotkin M. E., Zaitsev N. I.* Efficient Output Mode Converter for 30 GHz Gyroklystron at IAP // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2010. V. 31, № 2. P. 121–131.

11а. *Zaitsev N. I., Kulagin I. S., Kuzikov S. V., Plotkin M. E., Syratchev I.* Microwave components for 30 GHz high-power gyroklystron // Conference Digest of the Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 15th International Conference on Terahertz Electronics, Cardiff, UK. 2007. V. 1, P. 369–370.

12а. *Kuzikov S. V., Plotkin M. E.* Synthesis of multi-mode waveguide systems, Conf. Digest of the Joint 32nd IRMMW Conference and 15th International Conference on Terahertz Electronics, Cardiff, UK. 2007. V. 1, P. 781–782.

13а. *Kuzikov S. V., Plotkin M. E.* Quasi-optical accelerating structure operated with a superposition of synchronized modes // Conf. Digest of the Joint

32nd IRMMW Conference and 15th International Conference on Terahertz Electronics, Cardiff, UK. 2007. V. 2, P. 797–798.

14a. *Kuzikov S. V., Plotkin M. E.* Synthesis of Mode Converters for High-Power Microwave Sources, in book VII Int. Workshop Strong Microwaves: sources and applications (July 27–August 2 2008). Nizhny Novgorod, 2008. P. 201–205.

15a. *Kuzikov S. V., Kazakov S., Plotkin M. E., Hirshfield J. L.* High-Gradient Quasi-Optical Accelerating Structure, in book VII Int. Workshop Strong Microwaves: sources and applications (July 27–August 2 2008). Nizhny Novgorod, 2008. P. 235–242.

16a. *Kuzikov S. V., Danilov Yu. Yu., Denisov G. G., Hirshfield J. L., Koshurinov Ya. I., Paveliev V. G., Petelin M. I., Plotkin M. E. et al.* Novel Quasi-Optical Passive Pulse Compressors // Proceedings of 6th International Workshop "Strong Microwaves in Plasmas", Nizhny Novgorod, 2005. / Ed. A. G. Litvak, IAP RAS, N. Novgorod, 2006. V. 1. P. 330–336.

17a. *Kuzikov S. V., Plotkin M. E., Hirshfield J. L., Kazakov S.* High-gradient Multi-mode Two-beam Accelerating Structure // Proceedings of EPAC08, Magazzini del Cotone, Genoa, Italy. 2008. WEPP133. P. 2806–2808.

18a. *S.V. Kuzikov, S. Kazakov, M.E. Plotkin, J.L. Hirshfield.* High-Gradient Two-Beam Accelerating Structure // Proceedings of RuPAC-08 Conf., Zvenigorod. 2008. P. 229–231.

19a. *S.V. Kuzikov, M.E. Plotkin.* Theory of Thermal Fatigue of a Copper Surface under the Action of Pulsed Microwave Heating // Proceedings of RuPAC-08 Conf., Zvenigorod. 2008. P. 232–234.

20a. *Kuzikov S. V., Plotkin M. E., Shegolkov D. Yu., Vikharev A. A., Yakovlev V. P., Hirshfield J. L.* One Channel Multi Mode Active Pulse Compressor // Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007. P. 2460–2462.

21a. *Kuzikov S. V., Plotkin M. E., Vikharev A. A., Hirshfield J. L.* Compact single-channel Ka-band SLED-II pulse compressor // Proceedings of EPAC06, Edinburgh, Scotland, 2006. TUPCH165. P. 1411–1413.

22a. *Kuzikov S. V., Plotkin M. E., Denisov G. G., Kulagin I. S., Zaitsev N. I.* Mode Selectivity Enhancement in Cavities of Relativistic Gyrotrons // Conf. Digest of the Joint 31th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18–20, 2006. P. 68.

23a. *Kuzikov S. V., Plotkin M. E.* Multi-mode accelerating structure with high filling factor // Proceedings of PAC09 Conf., Vancouver, BC, Canada, 2009. WE6RFP068.

<http://trshare.triumf.ca/~pac09proc/Proceedings/papers/we6rfp068.pdf>

24a. *Плоткин М. Е.* Открытый брэгговский резонатор для мощного МСЭ миллиметрового диапазона длин волн. // Труды Научной конференции по радиофизике (11 мая 2010). Н. Новгород, 2010. (В печати).

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. Создание новых преобразователей волноводных мод с использованием методов оптимизации и синтеза.....	14
1.1. Применение метода связанных волн для расчета и оптимизации сверхразмерных волноводных преобразователей	15
1.1.1. Преобразователь мод круглого волновода $TE_{0,1}-TE_{0,3}$	18
1.1.2. Преобразователь мод круглого волновода $TE_{0,4}-TE_{0,1}$	20
1.1.3. Высокоселективный волноводный ответвитель для резонатора компрессора СВЧ импульсов типа SLED-II	22
1.1.4. Селективный брэгговский резонатор для МСЭ на суперпозиции мод $TE_{1,1}$ и $TM_{1,1}$	25
1.2. Итерационная методика синтеза волноводных компонентов	32
1.2.1. Схема итерационного синтеза.....	33
1.2.2. Применение метода FDTD для расчета полей при итерационной процедуре синтеза.....	37
1.2.3. Синтез компонентов для выходного преобразователя гироклистрона	42
ГЛАВА 2. Электродинамические компоненты мощных релятивистских гиротронов и гироклистронов	51
2.1. Повышение селективности резонаторов гиротронов, работающих на осесимметричных модах.....	51
2.1.1. Использование азимутальной гофрировки для селекции мод в коническом резонаторе на моду $TE_{0,3}$	53
2.1.2. Использование щелей в боковой стенке резонатора для улучшения селекции мод.....	61
2.2. Резонатор с гофрированной боковой стенкой для селекции паразитных мод на второй гармонике циклотронной частоты.....	67

2.3. Открытый резонатор эшелеттного типа на комбинированной рабочей моде.....	70
2.4. Компоненты мультимегаваттного гироклистрона на частоту 30 ГГц.....	73
2.4.1. Компактный ввод мощности в гироклистрон.....	74
2.4.2. Квазиоптический выходной преобразователь моды $TE_{5,3}$ в моды с простой поперечной структурой.....	78
ГЛАВА 3. Высокоэффективные СВЧ приборы, основанные на эффектах Тальбота.....	90
3.1. Использование эффекта Тальбота в установках УТС и приборах мощной СВЧ электроники.....	90
3.2. Способы увеличения эффективности и углового диапазона антенны дистанционного сканирования волнового пучка.....	92
3.2.1. Повышение эффективности антенны путем оптимизации поверхностного импеданса.....	93
3.2.2. Коррекция спектра собственных волн за счет выбора оптимальной формы поперечного сечения.....	99
3.2.3. Исправление спектра путем нанесения дополнительной гофрировки боковых стенок.....	103
3.3. Исследование эффектов Тальбота в изогнутом волноводе.....	107
3.3.1. Эффективность изогнутой антенны при сканировании пучка в плоскости изгиба.....	113
3.3.2. Эффективность изогнутой антенны при сканировании пучка перпендикулярно плоскости изгиба.....	115
ГЛАВА 4. Использование резонаторов с эквидистантным спектром мод для создания квазиоптических ускоряющих структур с высоким градиентом ускорения.....	118
4.1. Факторы, препятствующие увеличению градиента в ускорителях электрон-позитронных коллайдеров.....	118
4.1.1. Пристеночный СВЧ пробой.....	118
4.1.2. Эффект тепловой усталости поверхности металла под действием импульсного СВЧ нагрева.....	120
4.2. Возможности увеличения градиента в многочастотных системах резонаторов с эквидистантным спектром.....	132
4.2.1. Сравнение многочастотной и одночастотной структур.....	135
4.3. Резонаторы с эквидистантным спектром мод.....	138

4.3.1. Возбуждение эквидистантного спектра мод в резонаторах квадратного сечения.....	138
4.3.2. Оптимизация поперечного сечения цилиндрического резонатора для обеспечения эквидистантного спектра мод.....	139
4.3.3. Высокоселективный резонатор типа «фотонной ловушки» (photonic band gap) с эквидистантным спектром мод.....	138
4.3.4. Резонатор прямоугольного сечения с соотношением сторон 1:1,29.....	141
4.4. Системы питания ускоряющей структуры.....	141
4.4.1. Система волноводов с диэлектрическими вставками для питания блока ускоряющих резонаторов.....	142
4.4.2. Способ питания, основанный на эффекте повторения структуры поля, при помощи вспомогательного пучка.....	145
4.4.3. Двухпучковая структура с общими резонаторами для пучков.....	148
4.5. Повышение усредненного градиента ускорения в структуре резонаторов на развитых продольных модах.....	149
4.5.1. Возбуждение суперпозиции синхронизованных продольных мод в объемных резонаторах.....	150
4.5.2. Использование квазиоптических резонаторов на продольных модах.....	152
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	161
ЛИТЕРАТУРА.....	164
Список цитируемой литературы.....	164
Список публикаций автора по теме диссертации.....	169

Плоткин Михаил Ефимович

**УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ
СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН
СВЕРХРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Автореферат

Ответственный за выпуск

М. Е. Плоткин

Подписано к печати 26.08.2010 г.

Формат 60 × 90^{1/16}. Бумага офсетная № 1.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 80(2010)

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