

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

На правах рукописи

УДК 621.385.6

КОЗЛОВСКИЙ
Алексей Павлович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГИРОТРОНА МОЩНОСТЬЮ
1 МВТ В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ 70-170 ГГц**

АВТОРЕФЕРАТ

магистерской диссертации на соискание степени
магистра техники и технологии

по специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии
проектирования электронных систем»

Научный руководитель
д-р физ.-мат.наук, профессор
ГРЕМЕНОК Валерий Феликсович

Минск 2015

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

Гременок Валерий Феликсович,
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Физики твердого тела» Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Рецензент:

Захаров Александр Георгиевич,
кандидат физико-математических наук, начальник управления подготовки кадров высшей квалификации учреждения образования «Белорусский государственный университет»

Защита диссертации состоится «23» января 2015 г. года в 9³⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 415, тел.: 293-20-88, e-mail: kafpiks@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение объема взаимодействия электронов с электромагнитным полем, что необходимо для создания мощных генераторов и усилителей миллиметрового диапазона, было получено в 50-х годах А.В. Гапоновым-Греховым и его сотрудниками в НИРФИ (г. Нижний Новгород). Ими была предложена и развита идея аналогии между индуцированным излучением возбужденных атомов и молекул в оптических квантовых генераторах и индуцированным излучением электронов, совершающих осциллирующее движение. Они считали, что указанная аналогия может быть использована для создания в миллиметровом диапазоне генераторов и усилителей с высокими параметрами. Возбужденные электронные осцилляторы могут излучать значительную часть колебательной энергии. Поэтому КПД таких генераторов может быть большим. В то же время объем системы, в которой осуществляется индуцированное излучение электронных осцилляторов, принципиально не ограничен, и, следовательно, более легко решаются такие проблемы, как охлаждение и др.

Созданные генераторы получили название мазеров на циклотронном резонансе (МЦР). В дальнейшем их стали называть гиротронами (усилители и генераторы). В этих приборах получение электронных сгустков обеспечивается за счет использования релятивистского эффекта зависимости циклотронной частоты от энергии электронов. Были созданы генераторы и усилители с вращением электронов в продольном магнитном поле. Эти генераторы обеспечивают выходную мощность несколько десятков киловатт при работе в непрерывном режиме в миллиметровом диапазоне длин волн; КПД таких генераторов превышает 40%.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Гирорезонансные приборы могут оказаться весьма конкурентоспособными и даже быть вне конкуренции в различных областях современной радиоэлектроники, радиоастрономии, высококачественной и специфической радиолокации (в том числе наносекундной) а также в будущих космических солнечных энергосистемах и разнообразных трактах передачи-энергии СВЧ-пучком наземного и космического базирования.

Постоянное развитие гиротронов и возрастание интереса к ЭЦН, как оперативному и эффективному методу диагностики и контроля плазмы, предъявляют все возрастающие требования к используемым гиротронам, тем самым стимулируя разработку гиротронов для международных проектов совместно с иностранными специалистами.

Гиротрон, как по принципу действия, так и по уникальности характеристик и перспективам развития остается наиболее привлекательным

для разработчиков, исследователей и пользователей в широкой области техники миллиметровых и субмиллиметровых волн. В разработках супергиротронов классической конструкции используются все последние научные, технические и технологические достижения в области электронной оптики, электродинамики и теплотехники.

Степень разработанности проблемы

Основным достоинством гиротронов является возможность достижения высокого уровня мощности в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Работа на высоком уровне мощности требует развитого пространства взаимодействия, однако при этом возникает необходимость селективного возбуждения рабочего типа колебаний, т.е. проблема конкуренции мод в сверхразмерных резонаторах, представляющих собой систему с числом степеней свободы, равным количеству возбуждаемых мод.

Уже в ближайшее время при мегаваттном уровне мощности гиротроны должны работать с длительностью импульса 10 с, а в перспективе (программа ITER) - в непрерывном режиме. С учетом этих требований базовая конструкция гиротрона нуждается в модификации. Это влечет за собой в первую очередь разработку: конструкции прибора с рекуперацией энергии электронного пучка на коллекторе; катода, обеспечивающего стабильную эмиссию и длительный срок службы в непрерывном режиме; окна вывода энергии на основе алмазного диска, который на сегодняшний день является единственно перспективным для непрерывного режима; адекватного охлаждения всех теплонагруженных элементов прибора.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации являлось моделирование построения модели движения электронов гиротрона, а также оптимизация гиротрона с заданными параметрами: мощностью 1 МВт и частотой 70-170 ГГц.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие задачи:**

- Определение целесообразности использования гиротрона, перспективности разработки данного направления.
- Определение наилучшей областью применения гиротронов в заданном диапазоне частот, определения наилучшего значения выходной мощности при оптимальном КПД, определения перспективной области применения гиротрона.
- Определение достоинств применения гиротронов, особенности конструкция и разновидностей гиротронов.
- Определение основных нюансов, возникающих при проектировании гиротронов.
- Выбор и построения модели с помощью программного комплекса.
- Проведение сравнительного анализа моделей движения электронов реального и гиротрона и проектируемого.

– Выполнение оптимизации гиротрона, исходя из значения изначально заданной достаточно высокой мощности в 1 МВт.

Решение поставленных задач основывается на использовании результатов и методов уравнений математической физики, экспериментов, численных методов, программных комплексов на ЭВМ.

Объектом исследования является гиротрон – электровакуумный СВЧ прибор, с электронным пучком, вращающимся с циклотронной частотой в сильном магнитном поле. Представляет собой разновидность мазера на свободных электронах.

Предметом работы выступает модель распределения интенсивности поля движения электронов в окне гиротрона.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли результаты известных исследований российских и зарубежных учёных в области исследования явления циклотронного резонанса.

Для получения исходных данных для анализа и построения модели использовались параметры разработанных гиротронов, полученные в экспериментальных условиях.

Построение модели распределения интенсивности поля движения электронов в окне гиротрона осуществлены в пакете MathLab. Обработка статистических данных проводилась с использованием MS Excel и MathCAD.

Информационная база исследования для сравнительного и результирующего анализа сформирована на основе научных разработок.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке модели распределения интенсивности поля движения электронов в окне гиротрона с помощью современных программных комплексов.

Основные положения, выносимые на защиту

Современный этап развития вакуумных гирорезонансных приборов СВЧ характеризуется следующими основными параметрами:

1. Увеличением рабочей частоты гирорезонансных приборов СВЧ.
2. Увеличением выходной мощности (как импульсной, так и постоянной).
3. Увеличением КПД приборов.

Все вышеперечисленные параметры являются важнейшими параметрами также и в целом систем, где применяются гирорезонансные приборы. К примеру для РЛС повышение мощности ведёт к увеличению дальности, повышение рабочей частоты ведёт к повышению разрешающей способности (точности радиолокации), повышение КПД ведёт к снижению энергопотребления, количества выделяемого тепла и пр.

Для расчёта параметров гиротронов необходимо проведение моделирования исследуемого класса приборов, при этом очевидно, что чем более достоверной будет модель, тем более эффективной будет оптимизация.

При построении модели распределения интенсивности поля движения электронов в окне, выходе гиротрона для дальнейшего целесообразного использования полученной модели необходимым требованием для оптимизации является:

- синтез систем зеркал для гиротронных квазиоптических преобразователей;
- синтеза поверхности сверхразмерного волновода для формирования требуемого распределения поля на его срезе;
- согласования волновых пучков приборов ЭБМ с линиями передачи; приближенный численный метод расчета поля бегущей волны.

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что в ней предложен подход к иному анализу протекающих процессов внутри гиротрона. Представлена математическая модель, описывающая траекторию движения электронов в поперечном сечении гиротрона (модель распределения интенсивности поля движения электронов в окне гиротрона) с помощью программного комплекса Matlab 2009.

Практическая значимость изложенных в диссертационной работе научных результатов состоит в использовании построенной модели для упрощения проектирования крупных исследовательских комплексов.

Публикации

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в двух опубликованных работах общим объемом 11,0 страниц. (авторский объем 11,0 страниц).

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложения. Общий объем диссертации – 64 страниц. Работа содержит 10 таблиц, 22 рисунка. Библиографический список включает 64 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы моделирования и проектирования гирорезонансных приборов, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

Увеличение объема взаимодействия электронов с электромагнитным полем, что необходимо для создания мощных генераторов и усилителей миллиметрового диапазона, было получено в 50-х годах А.В. Гапоновым-Греховым и его сотрудниками в НИРФИ (г. Нижний Новгород). Ими была предложена и развита идея аналогии между индуцированным излучением возбужденных атомов и молекул в оптических квантовых генераторах и индуцированным излучением электронов, совершающих осциллирующее дви-

жение. Они считали, что указанная аналогия может быть использована для создания в миллиметровом диапазоне генераторов и усилителей с высокими параметрами. Возбужденные электронные осцилляторы могут излучать значительную часть колебательной энергии. Поэтому КПД таких генераторов может быть большим. В то же время объем системы, в которой осуществляется индуцированное излучение электронных осцилляторов, принципиально не ограничен, и, следовательно, более легко решаются такие проблемы, как охлаждение и др.

Созданные генераторы получили название мазеров на циклотронном резонансе (МЦР). В дальнейшем их стали называть гиротронами (усилители и генераторы). В этих приборах получение электронных сгустков обеспечивается за счет использования релятивистского эффекта зависимости циклотронной частоты от энергии электронов. Были созданы генераторы и усилители с вращением электронов в продольном магнитном поле. Эти генераторы обеспечивают выходную мощность несколько десятков киловатт при работе в непрерывном режиме в миллиметровом диапазоне длин волн; КПД таких генераторов превышает 40%. В импульсном режиме гиротроны дают полезную мощность в импульсе сотни киловатт.

Вскоре после своего изобретения в 1966 г. гиротроны зарекомендовали себя как наиболее мощные приборы коротковолновой части СВЧ-диапазона, способные работать в режиме непрерывной генерации или длинных импульсов. Достигнутый гиротронами уровень СВЧ-мощности позволил уже в начале 70-х годов XX века использовать эти приборы в качестве источников мощного электромагнитного излучения в проводимых по программе управляемого термоядерного синтеза экспериментах по нагреву квазистационарной плазмы в условиях электронно-циклотронного резонанса (так называемый электронно-циклотронный нагрев - ЭЦН - плазмы). До появления гиротронов возможности данного способа нагрева плазмы исследовались только теоретически.

Как известно, основным препятствием для освоения гиротронами диапазона субмиллиметровых волн является отсутствие магнитных систем, способных создавать в достаточно больших объемах стационарные магнитные поля с индукцией B несколько десятков тесла. Вообще говоря, такие магнитные поля могут быть получены с помощью импульсных соленоидов, что позволяет разрабатывать импульсные гиротроны субмиллиметрового диапазона. Тем не менее для освоения субмиллиметрового диапазона гиротронами, способными работать в режиме непрерывной генерации, наиболее реальным выходом является возбуждение ВЧ-колебаний, резонансных с высшими гармониками циклотронной частоты электронов: согласно условию циклотронного резонанса $\omega \approx n\omega_H$, при ограниченной максимальным значением магнитного поля циклотронной частоте электронов ω_H диапазон частот ω , который может быть освоен гиротронами, растет пропорционально номеру резонансной гармоники n .

В общей характеристике работы сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объеме исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, опубликованность результатов диссертации, а также, структура и объем диссертации.

В первой главе рассматриваются наилучшая область применения гиротронов, определение перспективной области применения гиротрона.

Вся история сверхвысокочастотной электроники, начиная с самого начала (двадцатые годы XX века) — это, в первую очередь, поиск путей повышения частоты и мощности генерируемого электромагнитного излучения. До 60-х годов XX века электровакуумные электронные СВЧ-приборы использовали преимущественно излучение электронов, движущихся прямолинейно. Даже если траектории частиц и не были строго прямолинейны, то это отличие не являлось существенным для механизма излучения. Несмотря на постоянное совершенствование приборов, их выходная мощность падала с ростом частоты. Так, наиболее коротковолновые генераторы того времени — ЛОВ О-типа – в диапазоне длин волн короче одного миллиметра (до 0,2 мм) имели выходную мощность от одного до долей милливатта.

Гиротроны считаются наиболее перспективными генераторами и усилителями сверхбольших мощностей в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн, но еще не нашли широкого применения в обыденной жизни, так как для их создания требуются большие магнитные поля, особенно, в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн. Однако достигнутые значения мощностей этих приборов позволяют говорить о перспективности разработки данного направления. Наилучшей областью применения гиротронов будет применение его в качестве генератора СВЧ большой мощности в диапазоне 20-170 ГГц. В данном диапазоне частот этот класс приборов даёт наилучшие значения выходной мощности при оптимальном КПД. Предполагается, что такими областями могут стать системы ПВО, термоядерные реакторы, тропосферная связь, беспроводные системы передачи энергии.

В настоящее время конструкции гиротронов совершенствуются с целью увеличения частоты и мощности. Так как повышение частоты связано с увеличением магнитной индукции или с использованием взаимодействия на второй гармонике циклотронной частоты, то для повышения мощности используют высшие типы волн в круглых волноводах с большими диаметрами.

Современные гирорезонансные приборы имеют несколько разновидностей, среди которых основными являются гиротрон, гироклистрон и гиролБВ.

Гиротрон – генератор с одним резонатором (рисунок 1.2). Как правило, используют резонатор 4 на основе отрезка круглого волновода. Резонатор открытый, с некоторыми сужениями на концах для обеспечения отражений. Инжектором электронов служит с кольцевым эмиттером в коническом катоде 1. Пушка формирует трубчатые электронные потоки со спиральными траек-

ториями электронов – 2, закрученными вокруг магнитных силовых линий. Вывод энергии 3 обычно объединяют с коллектором и выполняют тоже в виде круглого волновода, в котором распространяется волна H01.

Гироклистрон – усилитель СВЧ-колебаний – имеет два резонатора 4: входной и выходной, в которых могут быть использованы различные виды колебаний.

Так, в импульсном гироклистроне (см. таблицу 1.2) входной резонатор имеет длину $1,5\lambda$ и настраивается на колебания вида H011 а выходной длиной 2λ - на колебания вида H021. Гироклистроны обеспечивают высокий коэффициент усиления (более 30 дБ) в узкой полосе частот (менее 1%).

Гиро-ЛБВ – широкополосным усилитель, в котором спиральные электронные потоки взаимодействуют с бегущими волнами в согласованных линиях передачи.

В настоящее время конструкции гиротронов совершенствуются с целью увеличения частоты и мощности. Так как повышение частоты связано с увеличением магнитной индукции или с использованием взаимодействия на второй гармонике циклотронной частоты, то для повышения мощности используют высшие типы волн в круглых волноводах с большими диаметрами.

Гиротроны считаются наиболее перспективными генераторами и усилителями сверхбольших мощностей в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.

Во второй главе приведен анализ области применения гиротронов. Рассмотрен пример использования гиротронов в различных технологических комплексах. Уделено внимание супергиротронам для разогрева термоядерной плазмы.

Проблематика создания подобных приборов в первую очередь связана с созданием электронно-оптической систем. В качестве источника винтового электронного потока обычно используется диодная магнетронная пушка с металлопористым катодом. Плотность тока эмиссии с катода около 5 А/см^2 , рабочее напряжение 70...80 кВ, рабочий ток 25...40 А. Средний диаметр эмиссионной полоски на катоде - 83 мм. Для достижения необходимых параметров прибора требуется, чтобы разброс поперечных скоростей электронов в пучке не превышал 30 %.

Последние десятилетия характеризуются широким использованием электровакуумных источников когерентного электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн в различных областях физики и техники. По уровню выходной мощности в этом диапазоне несомненное лидерство принадлежит гирорезонансным генераторам (гиротроны, гиро-ЛОВ) и усилителям (гироклистроны, гиро-ЛБВ), основанным на взаимодействии винтового потока электронов с высокочастотными полями электродинамических систем, не содержащих малых, по сравнению с длиной волны, элементов. Последнее обстоятельство позволяет избежать миниатюризации пространства взаимодействия и относительно просто реализовать системы с большой запасенной энергией активной среды (электронный пучок) и приемлемыми тепловыми нагрузками на элементы прибора. Не-

смотря на значительные успехи в развитии гиротронов, достигнутые за время исследований, проблемы повышения КПД гиротронов и освоение гиротронами субмиллиметрового диапазона длин волн продолжают оставаться актуальными.

В настоящий момент можно выделить несколько основных областей использования гирорезонансных приборов:

- технологические комплексы;
- управляемый термоядерный синтез;
- спектроскопия и диагностика различных сред;
- системы радиолокации и радиопоражения.

Если пик интенсивного развития традиционных СВЧ-приборов приходился на 80-е годы, то стремительное развитие гиротронных приборов идет с начала 90-х годов в связи с потребностями в источниках нагрева плазмы. В соответствии с программами модернизации существующих установок по нагреву плазмы и создания новых токамаков и стеллараторов потребовались источники СВЧ-колебаний мощностью 1 МВт и КПД не менее 50 % на частотах 110...170 ГГц. Причем, если в 1992 г. первый промышленный гиротрон на частоте 140 ГГц обеспечивал мощность 580 кВт в течение 1,5 с, то уже к 1998 г. примерно аналогичная мощность обеспечивалась уже в 6-секундном импульсе, а в течение 80 с удавалось получить мощность 100 кВт. Работы по гиротронным приборам проводились совместно с НПФ РАН (г. Нижний Новгород) и РНЦ «Курчатовский институт».

В **третьей главе** представлены результаты математического моделирования, в частности, программа для описания траектории движения электронов в гиротроне. Уделен вопрос оптимизации гиротрона.

Для построения была выбрана модель движения электронов в поперечном сечении гиротрона (модель распределения интенсивности поля движения электронов в окне гиротрона) с помощью программного комплекса Matlab 2009 на частоте 70 – 170 ГГц. Произведено сравнение моделей движения электронов реального и гиротрона и проектируемого. Для дальнейшего использования полученных данных, полученных в процессе моделирования необходимо произвести оптимизацию гиротрона, исходя из значения изначально заданной достаточно высокой мощности в 1 МВт.

На основе единой базовой конструкции созданы гиротроны мегаваттного уровня мощности в диапазоне 110...170 ГГц с длительностью импульса 1...3 с, эксплуатирующиеся в установках по исследованию управляемого термоядерного синтеза. Постоянное развитие этих установок и возрастание интереса к ЭЦН, как оперативному и эффективному методу диагностики и контроля плазмы, предъявляют все возрастающие требования к используемым гиротронам. Уже в ближайшее время при мегаваттном уровне мощности они должны работать с длительностью импульса 10 с, а в перспективе (программа ITER) - в непрерывном режиме. С учетом этих требований базовая конструкция гиротрона нуждается в модификации. Это влечет за собой в первую очередь разработку:

- конструкции прибора с рекуперацией энергии электронного пучка

на коллекторе;

- катода, обеспечивающего стабильную эмиссию и длительный срок службы в непрерывном режиме;
 - окна вывода энергии на основе алмазного диска, который на сегодняшний день является единственно перспективным для непрерывного режима;
 - адекватного охлаждения всех теплонагруженных элементов прибора.
- В приложении приведен графический материал, в виде презентации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последние десятилетия отмечены интенсивным развитием электроники больших мощностей (ЭБМ) и, прежде всего технологий, связанных с проектированием, производством и применением гиротронов. Гиротроны являются наиболее мощными источниками когерентного излучения миллиметрового диапазона длин волн. Выходная мощность гиротронов достигает 1 МВт при длительности импульса в сотни секунд. Эти качества обуславливают широкое применение гиротронов для электронно-циклотронного нагрева плазмы в экспериментах, проводимых в рамках программ по управляемому термоядерному синтезу (УТС), а также их использование в технологических процессах, основанных на СВЧ нагреве. Поэтому, актуальна задача разработки эффективных методов анализа и синтеза волновых полей в электродинамических системах гиротронов и системах передачи их излучения.

Материалы магистерской диссертации указывают на перспективность использования гиротрона в качестве источника мощного электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн. В этом приборе может быть решена основная проблема гиротронов традиционной конструкции, где наблюдается динамическое расслоение электронного потока в поперечно-неоднородном поле резонатора.

Работа гиротронов на кратных гармониках гирочастоты представляет интерес с точки зрения снижения уровня магнитостатического поля, что позволило бы снизить критические требования к конструкции прибора. В работе приводятся параметры, при которых будет выполняться условие синхронизма для гиротрона в котором электронный поток проходит наклонно относительно зеркал открытого резонатора. Конструкции всех гирорезонансных приборов являются далеко не исчерпывающими и результатом дальнейших исследований должны стать повышение мощности, рабочей частоты, КПД этих приборов, а, следовательно, и расширение области их применения. Современные методы трёхмерного моделирования позволяют говорить о возможности создания класса приборов с совершенно уникальными характеристиками.

Результатом исследований гиротрона явилась данная магистерская диссертация, в которой была построена модель распределения интенсивности

поля движения электронов в окне гиротрона с помощью программного комплекса Matlab 2009 и описан процесс оптимизации такого гиротрона.

Список опубликованных работ

[1–А.] Козловский, А.П. Моделирование движения электронов в гиротроне с помощью системы «MATLAB» / Козловский А. П. // Материалы второй международной заочной научно-практической конференции «Информационные системы и технологии: управление и безопасность» / Тольятти, декабрь 2013 г – С . 221-225

[2–А.] Козловский, А.П. Численный траекторный анализ неадиабатической электронно-оптической системы (ЭОС) малогабаритного гиротрона в режиме ограничения тока пространственным зарядом в системе "MATHCAD" / Козловский А. П. // Материалы второй международной заочной научно-практической конференции «Информационные системы и технологии: управление и безопасность» / Тольятти, декабрь 2013 г – С. 226-233