

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра основ проектирования СВЧ приборов

**Проектирование ЛВВО с выходной мощностью 180 Вт и диапазоном
частот 42,5 – 45,5 ГГц для наземной аппаратуры космических систем
связи**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 421 группы

направления

03.03.03 «Радиофизика»

факультета нелинейных процессов

Симоновой Юлии Васильевны

Научный руководитель

Зав. кафедрой, к. ф.-м. н.,

д.э.н., проф.

Н. А. Бушуев

Заведующий кафедрой

Зав. кафедрой, к. ф.-м. н.,

д.э.н., проф.

Н. А. Бушуев

Саратов 2018 год

Введение. Актуальность. В наземных и спутниковых системах космической связи в качестве активных приборов в выходных каскадах аппаратуры космических связных ретрансляторов используются сверхвысокочастотные (СВЧ) приборы. Наибольшее распространение получили электровакуумные лампы бегущей волны (ЛБВ) со спиральной замедляющей системой. Такие ЛБВ обладают широкой полосой усиливаемых частот (до 120%), высоким КПД (до 65% при использовании многоступенчатых коллекторов), усилением (до 60 дБ), малыми значениями коэффициента амплитудно-фазового преобразования и интермодуляционными составляющими основного сигнала, долговечностью более 15 лет. Космическая связь осуществляется в специально выделенных регламентом диапазонах частот для телекоммуникаций, телевидения, радиовещания, специальной связи и т.д. В настоящее время в РФ освоены диапазоны частот С, X, Ku, Ka, в которых используются полосы до 20%, причем восходящий, земля-спутник, и нисходящий, спутник-земля, каналы разнесены по частотам.

Для увеличения числа каналов связи и увеличения скорости передачи данных необходимо переходить в более коротковолновой диапазон. Следующим по выделенному регламентом связи является Q-диапазон для восходящего канала связи. ЛБВ, работающей в диапазоне 42,5-45,5 ГГц, в настоящее время в РФ нет. В связи с этим основной **целью** выпускной квалификационной работы являлось проектирование ЛБВ с использованием программ, позволяющих исследовать физические процессы, происходящие в ЛБВ, и определить размеры основных узлов, обеспечивающих выходные характеристики ЛБВ (диапазон частот 42,5-45,5 ГГц, выходная мощность не менее 180 Вт, КПД 40%, усиление 45 дБ).

Проектирование включало в себя следующие **задачи**:

- Расчет электродинамических характеристик (ЭДХ) спиральной замедляющей системы (ЗС) с использованием программного кода HFSS;
- Расчет пространства взаимодействия пучка с электромагнитной волной и получение выходных характеристик;
- Расчет электронной пушки и фокусировки пучка в магнитной периодической фокусирующей системе (МПФС);
- Расчет многоступенчатого коллектора;
- Расчетный проект ЛБВ Q-диапазона.

Содержание

Введение

1 Обзор литературы по ЛБВ в Q-диапазоне частот

2 Расчет электродинамических характеристик спиральной замедляющей системы с использованием программного кода HFSS

3 Расчет пространства взаимодействия и выходных характеристик ЛБВ

4 Описание модели электронно-оптической системы

5 Описание программы расчета электронно-оптических систем

5.1. Расчет электронной пушки и фокусировки пучка в магнитных периодических фокусирующих системах

5.2. Расчет многоступенчатого коллектора

Заключение

Список использованной литературы

Основное содержание работы. В главе 1 представлен обзор литературы по ЛБВ в Q-диапазоне частот со средней выходной мощностью. Была изучена литература по соответствующему направлению и составлен обзор по имеющимся аналогичным зарубежным ЛБВ на основе 7 статей, основной интерес исследований которых лежит в области проектирования ЛБВ Q-диапазона частот со средней выходной мощностью. Обзор отражает

современные потребности в усилителях СВЧ-сигнала в коротковолновом диапазоне. Полоса Q в основном используется для спутниковой связи, наземной связи и для радиоастрономических исследований (в частности, телескоп QUIET). Диапазон также используется в автомобильных радарах и в радиолокаторах, исследующих свойства поверхности Земли. Высокоскоростная передача данных, мобильная связь некоторых операторов, широкополосный доступ в Интернет – основные примеры коммерческого применения ЛБВ данного диапазона частот.

Приводится перечень проблем, возникающих при проектировании и производстве, и возможные пути их решения. Так, переход к Q-диапазону частот требует миниатюризации основных размеров лампы (с развитием технологий стало возможным решение данной конструкторской проблемы) и обеспечения сильных магнитных полей в фокусирующей системе прибора. Создание полей, достаточных для фокусировки пучка, требует более сложных расчетов оптической системы, необходимой для приборов данного диапазона частот.

Наряду с этим основными задачами при разработке является достижение средней выходной мощности и высокого значения КПД. Проведен сравнительный анализ различных типов ЗС (спиральной и «свернутый волновод»). Наибольшее распространение для ЛБВ, используемых в спутниковых системах связи, получила спиральная замедляющая система (СЗС). Она отвечает всем требованиям, предъявляемым к лампам Q-диапазона частот со средней выходной мощностью. СЗС обладает широкополостностью, высоким сопротивлением связи и при использовании в качестве спирали Cu либо ее сплава (например, МАГТ-02) малыми ВЧ-потерями. Важную роль играют материал стержней и выбор основных размеров СЗС, которые определяют ВЧ-характеристики. Проводится сравнительный анализ различных материалов стержней, поддерживающих спираль (BeO и BN). Показано, что имеющий меньшее значение

диэлектрической проницаемости BN (4 по сравнению с 6,3 для BeO) позволяет повысить электронный КПД. Материал стержней и их конфигурация оказывают существенное влияние на ВЧ-потери. Одним из недостатков СЗС является ее низкая теплорассеивающая способность. Для ее повышения обычно используют специальные технологии закрепления спирали в стержнях, например, пайка элементов СЗС. Преимущество свернутого волновода перед спиралью заключается в большой теплорассеивающей способности и, следовательно, получении большей выходной мощности, однако данный тип ЗС имеет меньшую полосу усиливаемых частот.

Рассмотрена проблема увеличения выходной мощности. Для увеличения выходной мощности требуется повысить катодный ток или ускоряющее напряжение пушки. При ограничении ускоряющего напряжения, необходимо увеличивать катодный ток – данная проблема решается такой конфигурацией электродов, которая обеспечивает требуемую плотность токоотбора с катода. С другой стороны, с переходом в Q-диапазон необходимо уменьшение диаметра СЗС. Вышеуказанные причины требуют создания совершенно новой конструкции пушки с большой сходимостью электронного пучка и плотностью токоотбора с катода. В обзоре была приведена электронная пушка типа Пирса со степенью сжатия пучка 86.4 и плотностью катодного тока 3.5 А/см^2 . В то время как фокусирующий электрод обеспечивает фокусировку пучка или позволяет запереть лампу, первый анод создает ускоряющее поле, второй анод используется в качестве ионной ловушки.

Рассмотрены задачи, возникающие при проектировании системы формирования и сопровождения электронного пучка. Для достаточного сжатия и сопровождения электронного пучка в приборе используется магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС), представленная набором колец из постоянных магнитов и полюсных наконечников. Задача

согласования пучка с магнитным полем заключается в подборе величин амплитуд магнитных полей первых n колец в МПФС.

Была рассмотрена задача повышения технического КПД. Повысить технический КПД позволяет использование коллекторов с понижающим потенциалом. Возвращение энергии за счет торможения пучка позволяет достигать 65% технического КПД. Моделирование этого функционального узла с использованием существующих на сегодняшний день программных пакетов является одним из основных способов определения конфигурации многоступенчатого коллектора.

В главе 2 проведен расчет электродинамических характеристик спиральной замедляющей системы с использованием программного кода HFSS. В ходе проектирования был проведен выбор основных материалов СЗС и ее конфигурации, при которых могли быть достигнуты оптимальные ЭДХ для данного прибора. Среди материалов спирали были рассмотрены сплав МАГТ-02(99,98% Cu, 0,02% Al, Hf, Ti) и Mo, а также несколько вариантов отношения ширины спирали к ее шагу. Диаметр пролетного канала был равен 0,6 мм. Размер прямоугольных стержней из BeO, утопленных в экран на 0.1 мм, составлял 0.4×0.6 мм. Материалом экрана диаметром 1.7 мм была выбрана Cu. Поскольку на предприятии существуют ряды типов размеров, были выбраны ближайшие из типов, которые не ухудшали параметры.

ЭДХ были получены с использованием программного пакета HFSS, в котором система уравнений Максвелла решается методом конечных элементов. В первую очередь задавалась расчетная модель узла (а именно один период замедляющей системы) с помощью графической программы. Далее осуществлялся выбор материалов спирали, стержней и оболочки, исходя из их проводимости и диэлектрической проницаемости. Вводилась система координат по торцевым плоскостям узла, задавался сдвиг фаз. После получения результатов была проведена их обработка.

Выбор МАГТ-02 в качестве материала спирали обусловлен высоким значением проводимости Cu , составляющей данный сплав на 99,98% (150000 См/см). МАГТ-02 обладает большим сопротивлением связи 18 Ом и меньшим распределенным затуханием 0,214 дБ/см по сравнению с Mo , однако он не способен выдержать высокие рабочие температуры прибора. В связи с этим были рассчитаны ЭДХ Mo , отличающегося тугоплавкостью.

В главе 3 проведен расчет пространства взаимодействия и выходных характеристик ЛБВ по программе предприятия. Процессы взаимодействия бегущей электромагнитной волны с пучком описываются системой интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнения возбуждения, уравнения движения заряженных частиц и уравнения для расчета гармоник тока.

При расчете входными данными являлись значения электродинамических характеристик (замедление, распределенное затухание, сопротивление связи), геометрических размеров (диаметр спирали, длины секций и поглотителей, шаги спирали), ускоряющего напряжения, тока катода и заполнения электронным пучком пролетного канала, выходными – выходная мощность, КПД и коэффициент усиления в полосе частот. Расчет выходных характеристик был проведен на нескольких частотах рабочего диапазона лампы при различных значениях входной мощности. Проведенный анализ температуры для ЭДХ показал, что с ее увеличением растет распределенное затухание. По этой причине был проведен анализ температуры для расчета пространства взаимодействия и выходных характеристик. Сравнительный анализ частотных характеристик показал, что при увеличении температуры выходная мощность упала на 38,9 Вт, КПД – на 1%, коэффициент усиления – на 2,83 дБ.

В главе 4 представлено описание модели электронно-оптической системы (ЭОС). В данной работе при расчете ЭОС используется модель электронного

пучка с ненулевым фазовым объемом. В каждой точке по сечению пучка электроны имеют непрерывное распределение по углам наклона, что может быть объяснено тепловым разбросом электронов по скоростям.

В главе 5 представлено описание программы расчета электронно-оптических систем. После расчета пространства взаимодействия были рассчитаны электронная пушка и МПФС для сопровождения пучка заданного диаметра внутри рассчитанной спиральной ЗС.

Приближенная конфигурация электродов и межэлектродных расстояний получена по программе, в основе которой лежит метод синтеза. Данный метод использует некоторые допущения: электроны не пересекаются, релятивистские эффекты не учитываются, пучки считаются параксиальными. В результате приближенного решения внутренней задачи определены распространение потенциала в пучке, плотность тока и пространственного заряда (ПЗ). В результате решения внешней задачи получено распределение потенциала вне пучка. Входными данными программы являлся ток пучка, ускоряющее напряжение, радиус катода, радиус пучка в кроссовере, выходными – форма электродов. Программа написана на основе уравнений теории формирования электронных пучков. Выбран радиус катода, равный 1 мм. При этом плотность токоотбора с катода равна 5А/см^2 , что является допустимым для обеспечения долговечности ЛБВ, равной 50 тысяч часов. Увеличение радиуса катода нежелательно, так как это приводит к усложнению в создании электронной пушки, формирующей ламинарный электронный поток.

Для уточнения формы электродов и представления ее в виде простых цилиндрических поверхностей была использована программа анализа. Данная программа предназначена для вычисления электростатического потенциала внутри области пушки с заданными потенциалами на границе методом интегральных уравнений, расчета электронных траекторий в пушке

и области пролетного канала и последующего определения токопрохождения, заполнения пролетного канала пучком и величины пульсации, границ трубок тока по длине пролетного канала. Программа расчета пушек и программа расчета электронного пучка в МПФС – две составляющих программы анализа. В основу алгоритма программы анализа положена модель многоскоростного электронного пучка, которая предусматривает разбиение пучка на большое число цилиндрических коаксиальных слоев, образующие которых и есть электронные траектории (находятся из уравнения движения).

В ходе расчета для получения минимальных пульсаций использовались различные значения амплитуды магнитного поля первых двух колец МПФС. По итогам расчета распределение огибающей электронного пучка показывает, что максимальный диаметр пучка равен 0,36 мм при пульсации не более 9% в МПФС с амплитудным значением 4500 Гс и периодом 6 мм.

Проведен расчет многоступенчатого коллектора. В программе расчета коллектора использованы метод интегральных уравнений для решения уравнения Пуассона и метод крупных частиц для моделирования электронного пучка. Входными данными для расчета коллектора являлись данные на выходе из пространства взаимодействия (значения характеристик электронного пучка). По интегральному распределению электронов по энергиям пучка определена эффективность повышения технического КПД и оптимальные значения потенциалов ступеней для данного прибора. Было принято решение выбрать двухступенчатый неосесимметричный коллектор с дополнительным магнитным полем. В ходе проектирования получена приближенная первоначальная конфигурация двухступенчатого коллектора с техническим КПД = 85,4 %. Ступени коллектора изолированы от корпуса с помощью керамических втулок из окиси бериллия. Приближенная конфигурация была получена с помощью различных соотношений и аппроксимационных формул. Соблюдение данных соотношений позволяет

уменьшить обратный поток электронов. Длина ступеней была выбрана исходя из системы охлаждения (воздушная) и удельной мощности токооседания. Примерная конфигурация позволяет получить первоначальный вариант для расчета методом анализа. Для двухступенчатого коллектора был проведен траекторный анализ, в ходе которого было подобрано оптимальное значение магнитного поля на коллекторе для такой фокусировки электронов, при которой они не могли бы вернуться в пространство взаимодействия, будучи отраженными от ступеней.

Заключение. В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были достигнуты все поставленные цели и задачи. Был проведен обзор ЛБВ Q-диапазона частот. Изучены методы и алгоритмы, лежащие в основе программ расчета, освоено современное программное обеспечение, позволяющее получить наиболее приближенные к реальным результаты. Проведено проектирование основных функциональных узлов ЛБВ: электронной пушки, системы формирования и сопровождения электронного пучка в МПФС, спиральной ЗС для распространения электромагнитной волны, пространства взаимодействия электронного пучка с электромагнитной волной и двухступенчатого коллектора с рекуперацией для повышения технического КПД. Проведена обработка результатов на каждом этапе проектирования.

Были рассчитаны ЭДХ для СЗС из плющеной ленты из МАГТ-02 размером $0,16 \times 0,25$ мм и Мо размером $0,1 \times 0,2$ мм, и проведен анализ влияния температуры на ЭДХ. Показано, что СЗС из МАГТ-02 обладает большим сопротивлением связи и меньшим распределенным затуханием по сравнению с Мо. Однако использование МАГТ-02 при температуре спирали 1000°C не представляется возможным в силу сравнительно низкой температуры плавления данного сплава.

На основе расчетов по одномерной нелинейной модели ЛБВ проведена оптимизация основных геометрических размеров пространства взаимодействия (длин секций и поглотителей), позволяющая получить требуемые выходные характеристики.

Был проведен расчет пушечного узла по программе, использующей метод синтеза, и получена более точная конфигурация пушки и электродов по двумерной программе, использующей метод анализа. Проведен расчет фокусировки электронного пучка в МПФС, подобрано оптимальное распределение магнитного поля и получен электронный пучок в пролетном канале с заполнением 0,5 и пульсациями 9%.

По интегральному распределению электронов по энергиям, полученному из расчета взаимодействия, была определена эффективность повышения технического КПД. Была проведена оптимизация конфигурации двухступенчатого неосесимметричного коллектора с целью получения максимального технического КПД и минимального обратного потока электронов.

В результате работы получен расчетный проект ЛБВ с выходной мощностью 180 Вт, диапазоном частот 42,5 – 45,5 ГГц, коэффициентом усиления 45 дБ и техническим КПД 49,8%.