

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 приборов СВЧ

Исследование возможности создания СВЧ-усилителя W-диапазона

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 421 группы

направления

03.03.03 «Радиофизика»

Факультета Нелинейных Процессов

Шаповала Виктора Владимировича

Научный руководитель

Доцент, к.ф-м.н.

В.И. Роговин

Зав. кафедрой основ проектирования приборов СВЧ

к.ф-м.н., д.э.н., проф.

Н.А. Бушуев

Саратов 2018 год

Введение

Лампа бегущей волны является СВЧ усилителем с превосходными характеристиками: высокий технический КПД, широкая полоса частот – до нескольких октав, большим усилением – десятки децибел, низким уровнем шумов и искажений.

Актуальность. Использование ЛБВ в диапазоне 90ГГц является перспективным в СВЧ приборостроении, т.к. данный диапазон используется в спутниковых системах связи, радарх, военных системах поиска и отслеживания целей.

Характеристики электровакуумного прибора в значительной степени определяются его замедляющей системой. От её электродинамических характеристик зависит рабочая полоса частот, электронный КПД и ВЧ-потери. Различные замедляющие системы имеют различные характеристики, но самое широкое распространение получила спиральная замедляющая система. Она имеет широкую полосу рабочих частот и большое сопротивление связи. Также она проста в изготовлении. Однако с переходом в миллиметровый диапазон частот геометрические размеры спирали сильно уменьшаются. Малые размеры означают сложности при изготовлении, а также ограничение выходной мощности из-за невозможности отведения большого количества тепла, из-за чего спираль может разрушиться. В связи с этим был также поставлен вопрос о рассмотрении петляющего волновода в качестве замедляющей системы для ЛБВ усилителя диапазона 90ГГц, т.к. её возможности по отводу тепла выше.

Цель работы. Целью работы является исследование возможности создания ЛБВ усилителя W-диапазона с применением спиральной замедляющей системы и замедляющей системы типа «петляющий волновод».

Задачи. Провести проектирование ВЧ-пакета ЛБВ-усилителя в диапазоне 90 ГГц со спиральной замедляющей системой и с замедляющей системой типа «петляющий волновод», а также расчёт их электродинамических

характеристик и пространства взаимодействия электромагнитной волны и электронного потока.

В ходе работы было проведено исследование по поиску оптимальных размеров конструкций замедляющих систем и ВЧ-пакета спиральной ЗС и ЗС типа «петляющий волновод». После определения размеров и других параметров конструкций был проведён расчёт их электродинамических характеристик и выходных характеристик ЛБВ с применением вышеназванных замедляющих систем.

Работа состоит из следующих основных разделов:

- Обзор научных работ по исследуемой проблеме
- Поиск оптимальных размеров конструкций замедляющих систем и расчёт их электродинамических характеристик
- Поиск оптимальных размеров конструкций ВЧ-пакета и расчёт выходных характеристик ЛБВ
- Рассмотрение перспективного варианта ЛБВ со спиральной замедляющей системы, расчёт электродинамических и выходных характеристик.

Основное содержание работы

В первом разделе предоставлен обзор работ по теме ВКР. В ходе поиска литературы были найдены научные работы, посвящённые проектированию ЛБВ в W-диапазоне различной мощности и с различной рабочей полосой. В рассмотренных работах были применены различные типы замедляющих систем: встречно-штырьевая, лестничного типа, цепочка связанных резонаторов, петляющий волновод. Однако не было обнаружено научных работ, в которых проводилось бы исследование спиральной замедляющей системы в качестве замедляющей системы для ЛБВ-усилителя W-диапазона.

Во втором разделе описывается процесс поиска размеров конструкций замедляющих систем и расчёт их электродинамических характеристик. Электродинамические характеристики замедляющей системы зависят от её пространственной конфигурации, размеров отдельных элементов и их материалов. Необходимые размеры рассчитываются исходя из частоты, которую необходимо получить, а также рабочего напряжения, если на него заложены какие-либо ограничения. Также используются предыдущие наработки и полученные эмпирическим путём закономерности. Для спиральной замедляющей системы были выбраны следующие размеры: спираль 0,2*0,1 мм прямоугольного сечения, шаг спирали 0,25 мм, диаметр пролётного канала 0,3 мм, ширина диэлектрических стержней 0,4 мм, диаметр экрана 1,7 мм. Для анализа было выбрано два материала спирали – сплав МАГТ (Медь–Алюминий–Гафний–Титан) и молибден. Для диэлектрических стержней был взят материал оксид бериллия, для экрана – медь.

Размеры элементов замедляющей системы типа «петляющий волновод» были подобраны в ходе рассмотрения большого количества вариантов. В итоге были выбраны размеры: диаметр пролётного канала 0,5 мм, ширина и высота волновода 0,2мм, глубина волновода 1,7 мм, период ЗС – 1,1 мм.

Расчёт электродинамических характеристик проводился с помощью программы HFSS. Данная программа позволяет моделировать трёхмерные объекты и определять их электродинамические характеристики путём решения уравнений Максвелла методом конечных элементов. Результатом расчёта являются значение частоты и распределения электромагнитного поля в трёхмерной структуре. По этим данным можно рассчитать значение замедления, сопротивления связи и затухания на данной частоте.

Для спиральной замедляющей системы были получены следующие характеристики: замедление от 4 до 5,3, сопротивление связи от 6,8 до 7,2 Ом для спирали из сплава МАГТ и от 6,3 до 7,2 Ом для спирали из молибдена.

Полоса частот – от 89 до 94 ГГц Затухание для спирали из молибдена оказалось в 2 раза больше.

Для замедляющей системы типа «петляющий волновод» были получены следующие электродинамические характеристики: замедление от 3,1 до 3,9, сопротивление связи от 2 до 20 Ом в полосе частот от 91 до 104 ГГц.

В третьем разделе описывается процесс поиска размеров конструкций ВЧ-пакета ЛБВ и расчёт выходных характеристик ЛБВ. На выходные характеристики ЛБВ влияет длина пространства взаимодействия, внесённые поглотители и их конфигурация, создание скачков шага. Конфигурация поглотителей и скачки шага определяются опытным путём и исходя из полученных эмпирическим путём закономерностей.

Расчёт выходных характеристик проводился на внутренней программе НПП «Алмаз», в которой заложена одномерная нелинейная модель пространства взаимодействия, а для описания электронного пучка используется дисковая модель, в которой пучок представлен набором колец постоянного радиуса, равномерно распределённых по фазе в интервале $0-2\pi$ на входе в пространство взаимодействия.

Для начала расчёта задаётся файл с числовым материалом, в который входят геометрические размеры шага ЗС, электродинамические характеристики ЗС, изменение шага по длине и размеры и параметры поглотителей, если они необходимы. Также задаются ток и напряжение пучка, заполнение пучком пролётного канала, мощность и частота входного сигнала. Электродинамические характеристики берутся из результатов расчётов, проведённых на предыдущем шаге. Напряжение пучка подбирается исходя из замедления ЗС, для получения оптимального параметра несинхронности. Ток пучка подбирается из соображений необходимой выходной мощности и предполагаемого электронного КПД. Также в расчёте учитываются ограничения на электронную пушку (размер катода и ток отбора с катода) и

фокусирующую и сопровождающую системы (значения напряжённостей электрических и магнитных полей, необходимых для фокусировки и поддержания размеров пучка).

Изменение шага по длине и поглотители подбираются перебором, для получения оптимальных выходных характеристик. Берутся в пример предыдущие наработки и на их базе рассматриваются новые варианты.

После окончания расчёта программа выдаёт выходной файл, в котором выводятся зависимости электронного КПД, усиления, выходной мощности и некоторых других характеристик от длины. По этому файлу строится рисунок пространства взаимодействия, на котором можно пронаблюдать полученные зависимости.

Для ЛБВ со спиральной замедляющей системой был выбран вариант пространства взаимодействия с одним поглотителем и определённой конфигурацией скачков шага. Для спирали из сплава МАГТ были получены следующие выходные характеристики: выходная мощность более 70 Вт, усиление до 37 дБ, электронный КПД до 8%. Для спирали из молибдена были получены следующие выходные характеристики: выходная мощность более 50 Вт, усиление до 30 дБ, электронный КПД до 6%. Рабочая полоса усиления в обоих случаях составила 1%.

Для ЛБВ с замедляющей системой типа «петляющий волновод» был выбран вариант пространства взаимодействия без поглотителей и без скачков шага. Были получены следующие характеристики: выходная мощность до 70 Вт, усиление до 48 дБ, электронный КПД до 7%. Рабочая полоса усиления составила 1,7%.

В ЛБВ без поглотителей («прозрачная» ЛБВ) с усилением до 48 дБ будет наблюдаться сильное самовозбуждение. Поэтому такой вариант нельзя рассматривать в качестве готового прибора.

Но если уменьшить длину пространства взаимодействия, сделав её не более 5 электрических длин волн и исключив, таким образом, возможность самовозбуждения, то можно спроектировать прибор без поглотителей. Исходя из этих соображений, было рассмотрено 2 варианта, с длиной пространства взаимодействия 2,35 см и 4,4 см (длина изначального варианта – 7,9 см). Оба из этих ЛБВ-усилителей являются приборами с высокой входной мощностью, более 0,1 Вт. Выходная мощность всех трёх вариантов примерно одинаковая и лежит в диапазоне 60-70 Вт. Усиление варианта с длиной 2,35 см – 10 дБ в рабочей полосе, с длиной 4,4 см – 25 дБ.

Выходную мощность ЛБВ с ЗС типа «петляющий волновод» можно увеличить, повышая ток в пучке. Но увеличение тока пучка потребует увеличения диаметра катода, возрастут, соответственно, требования для фокусирующей системы. Основное ограничение накладывает магнитная система, т.к. технологически ограничена возможная индукция магнитного поля, необходимого для фокусировки пучка. В данный момент возможно создать магнитную систему с индукцией магнитного поля до 7000 Гс. С помощью программы синтеза электронно-оптической системы была посчитана необходимая индукция магнитного поля для заданного тока и напряжения пучка. Было получено, что индукция магнитного поля в 7000 Гс может удерживать пучок с током 400 мА в заданной системе. Такому току пучка соответствует выходная мощность 500 Вт.

В четвёртом разделе описан перспективный вариант ЛБВ со спиральной замедляющей системой. Он был рассмотрен по причине того, что изначально принятый вариант показал очень узкую рабочую полосу усиления (1%), что связано с неоптимальной конструкцией. Чтобы получить оптимальную конструкцию спиральной замедляющей системы в W-диапазоне, необходимо уменьшать размеры элементов. Однако в изначальном варианте уже были взяты минимально возможные размеры элементов, ограниченные технологически и производственно. Поэтому был рассмотрен вариант

спиральной замедляющей системы с такими размерами элементов, каких нельзя достигнуть сейчас, но планируется достигнуть в ближайшем будущем.

Размеры элементов были выбраны следующими: диаметр канала 0,3 мм, размеры спирали 0,05*0,1 мм, расположение спирали плашмя, шаг спирали 0,28 мм, ширина диэлектрических стержней 0,3 мм, диаметр экрана 1,2 мм. Материал спирали – молибден, материал диэлектрических стержней – оксид бериллия, материал экрана – сплав 36НХТЮ (немагнитная сталь).

Для этого варианта также были посчитаны электродинамические и выходные характеристики. Замедление составило от 4,75 до 4,97, сопротивление связи от 6 до 16 Ом в полосе частот от 81 до 108 ГГц. Выходная мощность составила до 50 Вт, усиление до 52 дБ, электронный КПД от 3% до 4% в полосе от 81 до 102 ГГц (23%).

Данный вариант является более удачным в плане ширины рабочей полосы и усиления, однако, выходная мощность и электронный КПД получились меньше, чем в предыдущем варианте.

Заключение

В ходе работы были выполнены поставленные задачи – было проведено проектирование усилителя на ЛБВ W-диапазона с выходной мощностью 60 Вт. Были рассмотрены варианты со спиральной замедляющей системой, и замедляющей системой типа «петляющий волновод».

Для спиральной ЗС было рассмотрено два варианта – один технологически реализуемый на данный и один перспективный, в плане производственных и технологических возможностей. Было показано, что с теми ограничениями на размер, которые имеются сейчас (диаметр пролётного канала 0,3 мм, спираль 0,1*0,2 м, ширина диэлектрических стержней 0,4 мм) можно получить требуемые характеристики, однако полоса усиливаемых частот мала и составляет 1%. Перспективный вариант ЛБВ с СЗС меньшими, однако

потенциально реализуемыми в ближайшем будущем, размерами (диаметр пролётного канала также 0,3 мм, размеры спирали 0,05*0,1 мм, ширина стрижней 0,3 мм) показал требуемые выходные характеристики в более широкой полосе частот - 23%.

Рассмотренный вариант ЛБВ с ЗС типа «петляющий волновод». Размеры замедляющей системы были выбраны следующими: диаметр канала 0,5 мм, ширина и высота волновода 0,2мм, глубина волновода 1,7 мм, период ЗС – 1,1 мм. Были достигнуты следующие выходные характеристики – усиление до 48 дБ, выходная мощность до 70 Вт, электронный КПД до 6%. Рабочая полоса усиления составила 1,7%. Была рассмотрена возможность повышения выходной мощности с помощью увеличения тока пучка. Учитывая возможности фокусирующей системы, можно повысить ток пучка до 400 мА и получить выходную мощность более 500 Вт.