

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ЛВВ ДЛЯ
ДИАПАЗОНА 90-120 ГГц**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 4031 группы

направления

03.03.03 «Радиофизика»

Института физики

Евлушиной Олеси Алексеевны

Научный руководитель

доцент кафедры ЭКиВ, к.ф.-м.н.

 01.06.23 Титов А.В.

Зав. кафедрой электроники, колебаний и волн

доцент, к.ф.-м.н.

 Гришин С.В.
01.06.2023 г.

Саратов 2023 г.

ВВЕДЕНИЕ

Замедляющие системы применяются в усилительных и генераторных вакуумных устройствах для регулировки фазовой скорости распространяющихся электромагнитных волн и получения режима синхронизации, необходимого для генерации или усиления. Существуют различные по устройству типы замедляющих систем.

Актуальность темы дипломной работы обусловлена большим спросом на ЛБВ миллиметрового диапазона в разных сферах (линии связи, космические линии связи, связь земля-космос, телекоммуникация, радиолокация и т.д.). Также, с точки зрения вакуумной электроники, данный диапазон достаточно плохо освоен, и разработка систем для него остается актуальной задачей.

Цель: проанализировать замедляющую систему (ЗС), выбранную на основе обзора с помощью программного пакета Ansys HFSS.

Задачи:

- краткий обзор актуальных работ;
- анализ предложенных в работах типов ЗС;
- расчет характеристик ЗС с помощью Ansys HFSS.

СТРУКТУРА РАБОТЫ

В первой главе были рассмотрены актуальные замедляющие системы (ЗС) для ламп бегущей волны миллиметрового диапазона. Замедляющие системы были выбраны из статей, представленных за последние 10 лет (2011 – 2021 годы). Всего в обзоре использовано 9 статей. На их основе был проведен обзор и анализ ЗС.

Во избежание некоторых негативных факторов учеными было предложено множество методов создания и сборки прибора, в том числе использование технологии сварки, применение материалов с высокой теплопроводностью (алмаз) и использование надлежащих методов сборки.

В 2012 году в научно-технической лаборатории вакуумной электроники Китайского университета электронных наук и технологий для того, чтобы избежать негативного влияния тепла, предложили новую спиральную ЗС для широкополосной лампы миллиметрового диапазона с высоким коэффициентом усиления и высокой мощностью. Эта структура являлась усовершенствуемой версией традиционной спиральной ЗС с тремя параллельными прямоугольными или другой произвольной формы стержнями, выполненными снаружи спирали.

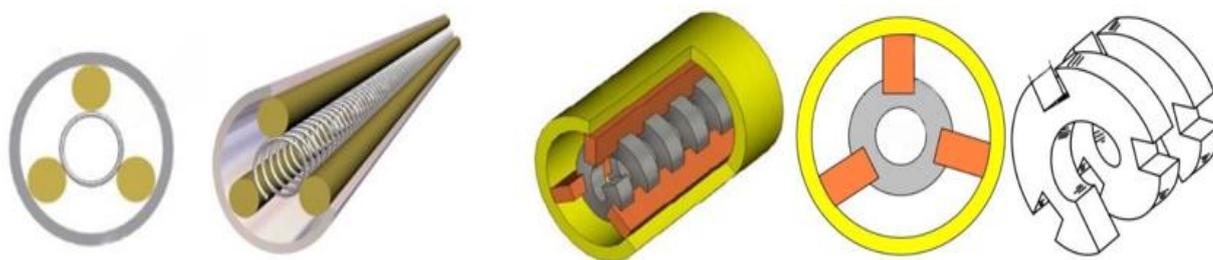


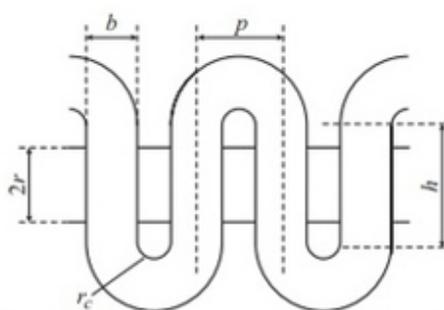
Рисунок 1. Модель традиционной и предложенной авторами спиральной замедляющей системы.

В 2016 году группа ученых в США опубликовала статью о разработке широкополосной лампы бегущей волны высокой мощности миллиметрового диапазона на основе твердотельного (полупроводникового) вакуумного устройства, которая охватывала полосу частот 81 – 86 ГГц с мощностью около 90 Вт.

Они использовали ЗС, обладающую хорошей полосой пропускания. Она представляла собой механически прочную структуру в виде цепочки связанных резонаторов (ЦСР) и обеспечивала высокую эффективность в высокочастотной области миллиметрового диапазона.

Лампа бегущей волны была рассчитана на напряжение 16 кВ и имела коэффициент усиления 25 дБ за счет одноступенчатой структуры взаимодействия пучка с волной без разделения. Она была разработана таким образом, чтобы обеспечить линейную выходную мощность 50 Вт. В результате длина цепи ВЧ-взаимодействия ЗС составляла всего 72 мм.

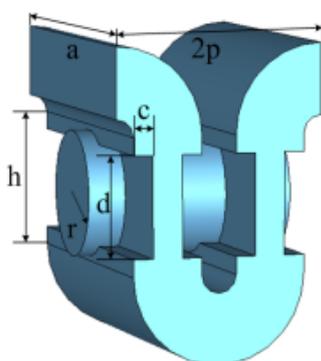
В 2011 году была представлена замедляющая система типа петляющий волновод, работающая в диапазоне 220 ГГц. Петляющий волновод имеет много преимуществ по сравнению с другими ЗС: его относительно простая конструкция совместима с технологией микрообработки, а его цельнометаллическая основа обеспечивает механически прочную конструкцию с хорошей термостойкостью. Доказано как теоретическим, так и экспериментальным анализом, что ЗС типа петляющий волновод имеет широкую полосу пропускания, умеренное усиление и малые потери в миллиметровом диапазоне (Рисунок 2).



поперечный размер, a	0.852 mm
продольная толщина стенок, b	0.12 mm
период структуры, p	0.28 mm
высота прямой части, h	0.27 mm
радиус канала пучка, r	0.14 mm

Рисунок 2. Схема ЗС типа петляющий волновод.

В 2016 году ученые из национальной научно-технической лаборатории вакуумной электроники Китайского университета электронных наук и технологий представили петляющий волновод с возможностью теплового рассеивания на частоте 140 ГГц (Рисунок 3).

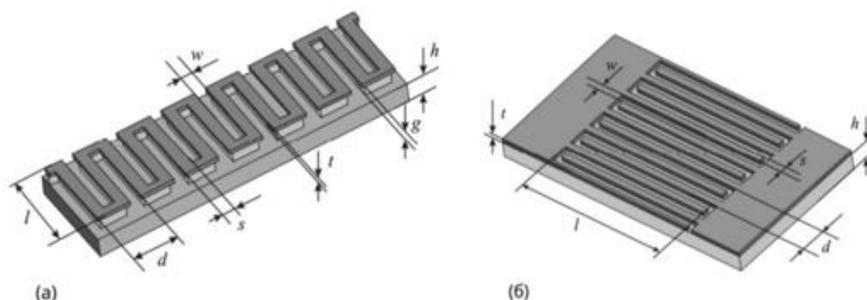


(Units: mm)						
Parameters	a	b	h	r	c	d
Values	1.28	0.28	0.54	0.25	0.03	0.46

Рисунок 3. Схема замедляющей системы типа петляющий волновод с возможностью теплового рассеивания, и таблица параметров.

В 2017 году вышла работа научной группы из Саратовского филиала Института Радиотехники и Электроники РАН, посвященная планарным

замедляющим системам, работающим в диапазоне 50 – 70 ГГц, изготовленных с использованием металлизированной меандровой микрополосковой линии на диэлектрической подложке. Были представлены схемы микрополосковой меандровой линии и встречно-гребенчатой ЗС, предназначенных для использования в ЛБВ и лампе обратной волны (ЛОВ) соответственно.



Substrate material	Silica	Polycor
Waveguide cross section, $a \times b$ (mm)	3.6 × 2.3	3.6 × 2.3
SWS period, d (μm)	100	100
Pin length, l (μm)	825	575
Pin width, s (μm)	25	25
Etched strip width, w (μm)	25	25
Metallized strip thickness, t (μm)	1	1
Substrate thickness, h (μm)	500	500

Рисунок 4. Принципиальные схемы меандровой (а) и встречно-гребенчатой (б) планарной замедляющей системы, и таблица размеров.

В 2018 году в лаборатории микро- и наноэлектроники предложили новую технологию изготовления таких планарных микрополосковых ЗС миллиметрового диапазона. Технология основывалась на методах магнетронного напыления и лазерной абляции (метод удаления вещества с поверхности лазерным импульсом). Методом магнетронного напыления наносили тонкий слой металла (меди) на кварцевую подложку. А с помощью лазерной абляции формировали узоры микрополосковой меандровой линии ЗС. Далее подложку разрезали на отдельные образцы заданных размеров. Для контроля толщины полученного медного покрытия и размеров изготовленных замедляющих систем использовали сканирующий электронный микроскоп и оптический микроскоп.

В 2017 году в исследовательском университете имени Гете Франкфурта в Германии представили две новые планарные замедляющие структуры,

которые предназначались для усилителя ЛБВ и генератора ЛОВ с кольцевым электронным пучком. Кольцевой электронный пучок предпочтительнее из-за возможности легкой фокусировки и простого изготовления электронной пушки. Они разработаны для диапазона от 75 до 110 ГГц, но их геометрические размеры можно настроить на более высокие рабочие частоты.

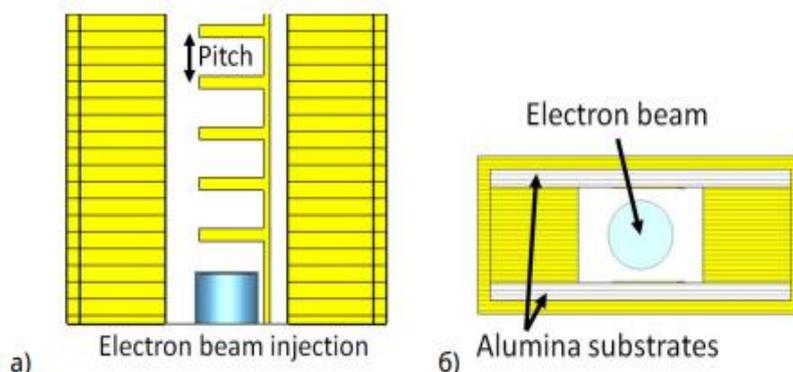


Рисунок 5. а) вид сверху ЗС на подложке из оксида алюминия; б) поперечное сечение усилителя на лампе бегущей волны.

Большой интерес вызвали ЛБВ с широкими ленточными электронными пучками. Такие лампы могли обеспечить выходную мощность более 50 Вт в G-диапазоне (4 – 8 ГГц). Выходная мощность могла быть еще больше увеличена за счет использования нескольких ленточных электронных пучков.

Проведенный обзор на замедляющие системы для ЛБВ миллиметрового диапазона подтвердили актуальность темы. Появляется более высокий спрос на простые и недорогостоящие конструкции замедляющих систем в разных сферах (линии связи, космические линии связи, связь земля-космос, телекоммуникация, радиолокация и др.).

Во второй главе описана методика построения модели в Ansys HFSS.

В ней была выбрана замедляющая система типа петляющий волновод, разработан ее макет и рассчитана характеристика. Петляющий волновод представлял собой тестовую задачу, которая помогла более точно построить макет планарной ЗС с кольцевым электронным пучком.

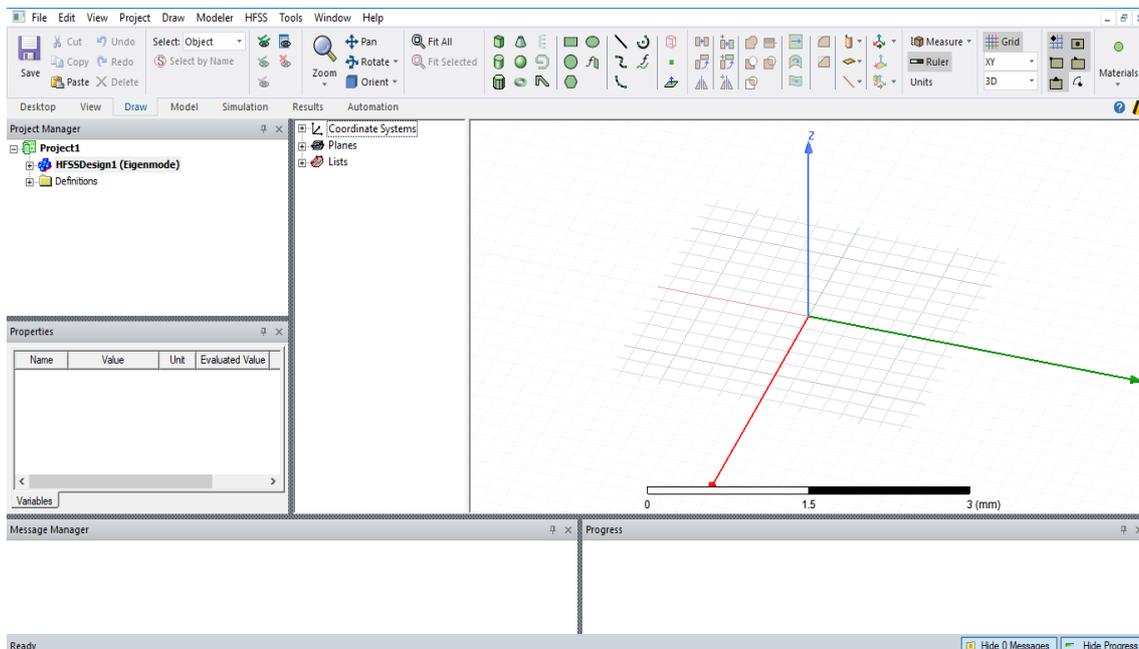


Рисунок 6. Рабочее окно Ansys HFSS.

В третьей главе проведено моделирование выбранной планарной замедляющей системы. В ходе моделирования разработан масштабируемый макет для семейства подобных ЗС.

На основе обзора была выбрана планарная замедляющая система с кольцевым электронным пучком, для которой был построен макет.

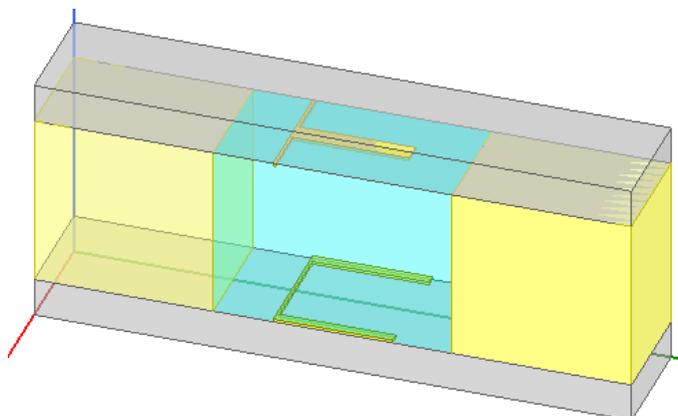


Рисунок 7. Планарная ЗС с кольцевым электронным пучком (толщина микрополосковой линии – 0,005 мм, ширина – 0,033 мм и толщина подложки – 0.067 мм).

Благодаря масштабируемости макета возможно быстрое изменение геометрических параметров системы с её автоматической перестройкой без

искажения общей структуры и потери работоспособности. Пример результата расчета дисперсионной характеристики приведен ниже (Рисунок 8).

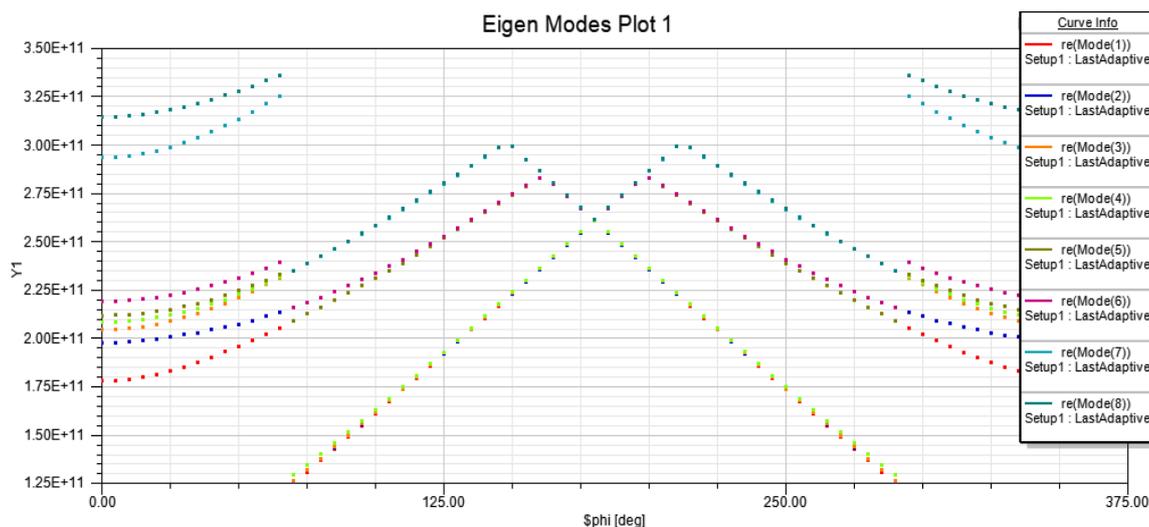


Рисунок 8. Дисперсионная характеристика планарной ЗС с кольцевым электронным пучком при изменении толщина микрополосковой линии на 30% (толщина микрополосковой линии = 0,0035 мм).

Таким образом, разработанный масштабируемый макет планарной замедляющей системы позволяет проанализировать на собственные моды целый класс подобных замедляющих систем благодаря возможности быстрого изменения геометрии без потери работоспособности макета. В дальнейшем данный макет следует дополнить опцией расчета сопротивления связи и коэффициента замедления для данного типа замедляющих систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был проведен краткий обзор актуальных статей за 2011–2021 годы, посвященных замедляющим системам ламп бегущей волны диапазона 90-120ГГц. На основе обзора выбрано две конструкции перспективных замедляющих систем, для которых в программном пакете Ansys HFSS сконструированы масштабируемые макеты с целью проведения исследования дисперсионных характеристик указанных замедляющих систем.

Особое внимание заслуживает макет планарной замедляющей системы. Разработанный масштабируемый макет планарной замедляющей системы позволяет проанализировать на собственные моды целый класс подобных

замедляющих систем благодаря возможности быстрого изменения геометрии без потери работоспособности макета. В дальнейшем данный макет возможно дополнить опцией расчета сопротивления связи и коэффициента замедления для данного типа замедляющих систем.