

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра нелинейной физики

Методы моделирования замедляющих систем ЛБВ

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2211 группы

направления 03.04.01 Прикладные математика и физика

Института физики

Минаева Артема Алексеевича

Научный руководитель
доцент кафедры электроники,
колебаний и волн, к.ф.-м.н.



подпись, дата

А.В. Титов

Зав. кафедрой
нелинейной физики
к.ф.-м.н., доцент



подпись, дата

Е.Н. Бегинин

Саратов 2026 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Обзор актуальных статей, посвященных ЗС.....	4
1.1 Анализ лампы бегущей волны W-диапазона на основе щелевой синусоидальной замедляющей волноводной структуры	4
1.1.1 Свойства в области передовой волны	5
1.2 Лампа с перелетающей волной частотой 220 ГГц, основанная на модифицированном двойном гофрированном волноводе с пошаговым расположением.....	6
1.2.1. Методы и модели.....	6
1.3 Проектирование низковольтной ЛБВ W-диапазона на основе ЗС с поверхностным плазмонным поляритоном с двойным ленточным пучком .	7
Вывод	7
1.4 Замедляющая система типа «скрещенная лестница»	8
Заключение по главе	8
Глава 2. Детальное построение модели ЗС типа «скрещенная лестница» для миллиметрового диапазона	9
2.1 Описание программного пакета.....	9
2.2 Построение модели.....	9
Глава. 3 Расчет электродинамических характеристик в Ansys HFSS.....	10
3.2 Построение модели ЗС типа «скрещенная лестница»	10
Заключение.....	12
Литература.....	13

ВВЕДЕНИЕ

Первый образец лампы бегущей волны был разработан Рудольфом Компфнером в 1943 году. В устройствах типа О кинетическая энергия электронов преобразуется в энергию СВЧ-поля благодаря их торможению данным полем. Магнитное поле, направленное вдоль траектории движения пучка, выполняет исключительно функцию его фокусировки.

Разработка новых типов замедляющих систем (ЗС) для ламп бегущей волны (ЛБВ) сохраняет свою актуальность и представляет собой перспективное направление радиотехнических исследований. Углубление научных изысканий в этой области позволит создавать более эффективные и компактные решения, функционирующие в расширенном частотном диапазоне.

Цель настоящей работы исследование выбранной на основе обзора замедляющей системы для ЛБВ. Какая интрига – можно раскрыть виды? Для этого выполнены следующие **задачи**:

1. Обзор актуальных работ, посвященных ЗС ЛБВ.
2. Построение масштабируемого макета ЗС типа «скрещенная лестница» в программном пакете Ansys HFSS
3. Расчет электродинамических характеристик на основе построенного макета для серии ЗС, полученной путем варьирования геометрических параметров.

ГЛАВА 1. ОБЗОР АКТУАЛЬНЫХ СТАТЕЙ, ПОСВЯЩЕННЫХ ЗС

Принцип действия ламп бегущей волны – не надо повторять, это сокращение уже ввели во введении заключается в продолжительном обмене энергией между электронным потоком и электромагнитной волной, распространяющейся по специальной структуре. Электронная пушка создает направленный пучок электронов, чья скорость определяется приложенным ускоряющим напряжением. Для поддержания стабильной формы пучка на всем его пути используется система фокусировки, создающая продольное магнитное поле. Основные элементы ЛБВ – электронная пушка, спиральная замедляющая система и коллектор – заключены в герметичный баллон, в то время как фокусирующий соленоид расположен снаружи.

1.1 Анализ лампы бегущей волны W-диапазона на основе щелевой синусоидальной замедляющей волноводной структуры

В этой [1] работе представлена лампа бегущей волны для W-диапазона, разработанная на основе синусоидального волновода со щелями и цилиндрического электронного пучка. Было обнаружено, что импедансы взаимодействия значительно выше в пределах всего рабочего диапазона частот. Высокочастотная часть системы, включая соединитель и аттенюатор, была соответствующим образом спроектирована.

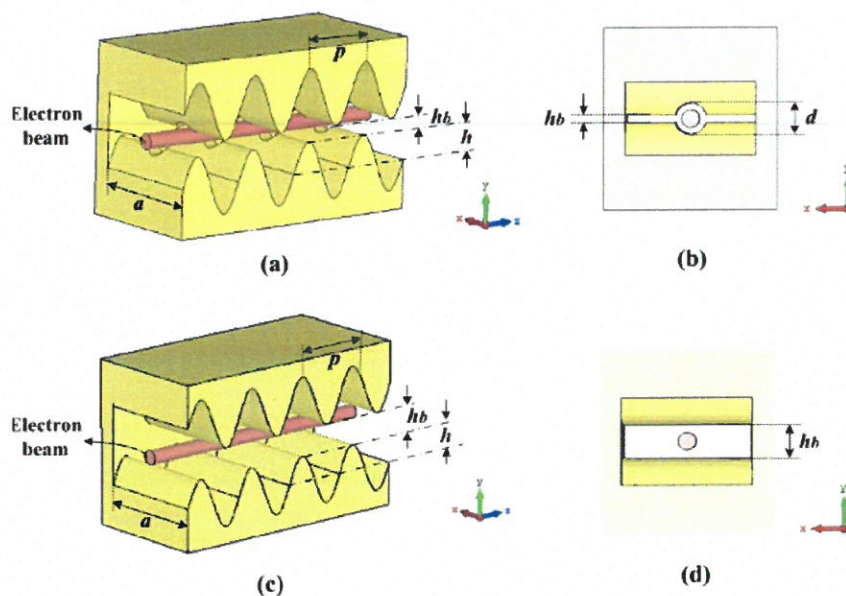


Рис. 1 Эскиз и габаритные параметры (а) перспективный вид и (b) поперечный разрез, (c) перспективный вид и (d) поперечный разрез.

Сравнение импедансов взаимодействия на частоте 94 ГГц. На Рис. 2 показано сравнение импедансов взаимодействия. В частности, импедансы взаимодействия вычисляются на центральной оси туннеля пучка.

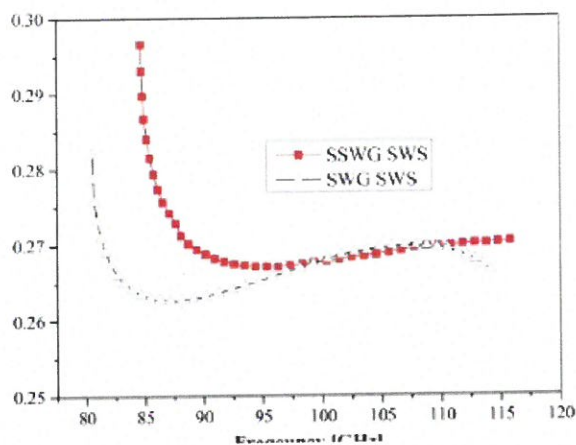


Рис. 2 Сравнение нормированной фазовой скорости

1.1.1 Свойства в области передовой волны

Характеристики замедления волны, включая дисперсионные свойства и значения сопротивления связи, могут быть проанализированы с помощью программного обеспечения для 3D электромагнитного моделирования Ansoft HFSS.

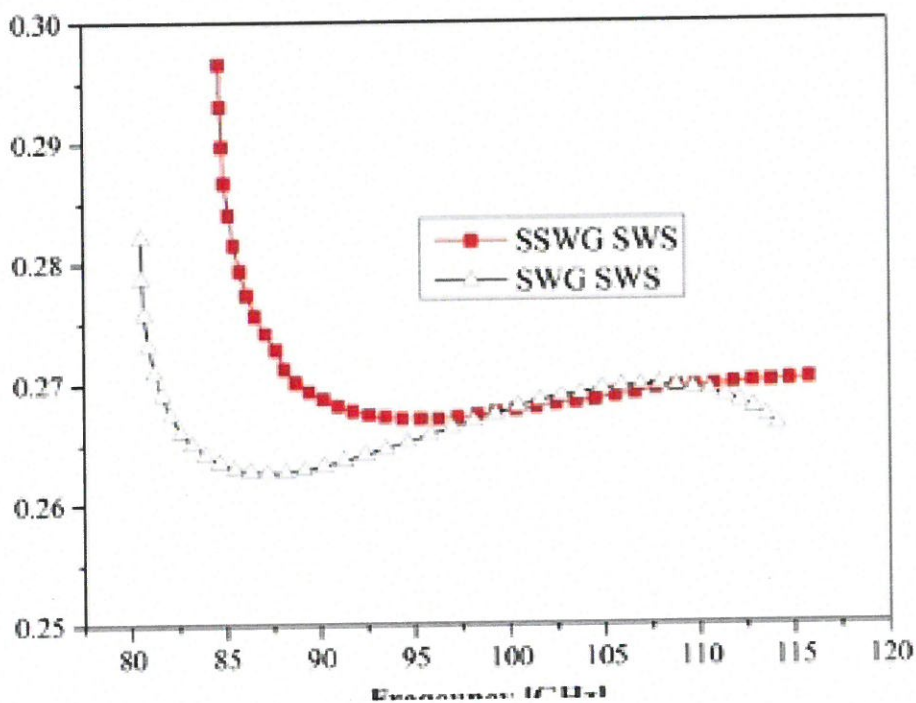


Рис. 3 Сравнение нормированной фазовой скорости

Благодаря улучшению сопротивления связи, лампа бегущей волны с одноволновым генератором (SSWG TWT) должна обладать более высокой эффективностью взаимодействия пучка и волны, чем лампа бегущей волны с одноволновым генератором (SWG TWT).

1.2 Лампа с перелетающей волной частотой 220 ГГц, основанная на модифицированном двойном гофрированном волноводе с пошаговым расположением

Существующие двухрешётные ЗС (SDG-SWS), используемые в мощных терагерцовых лампах бегущей волны (TWT), легко изготавливаются и обеспечивают широкий диапазон частот. Однако их низкое сопротивление связи ограничивает увеличение выходной мощности. В данном [2] исследовании впервые представлена модифицированная ступенчатая двойная гофрированная структура (MSDCW), основанная на предыдущей (SDCW). MSDCW-SWS сочетает в себе широкую полосу пропускания и повышенное сопротивление связи

1.2.1. Методы и модели

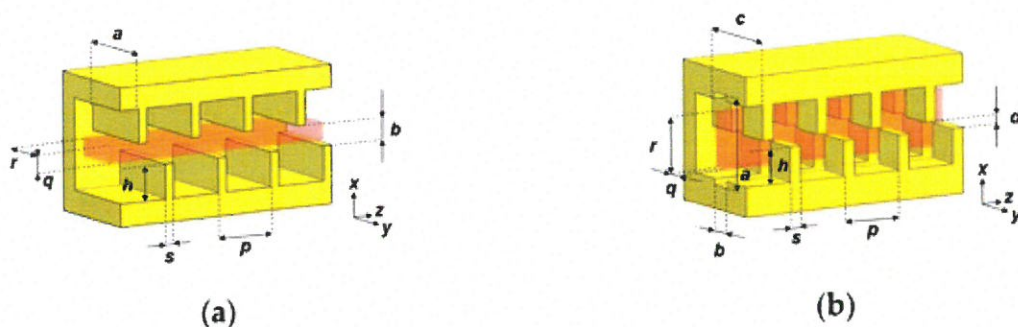


Рис. 4 Схематические схемы с листовыми лучами (красными областями) (а) традиционного ЦУР-SWS; (б) предлагаемый SDCW-SWS

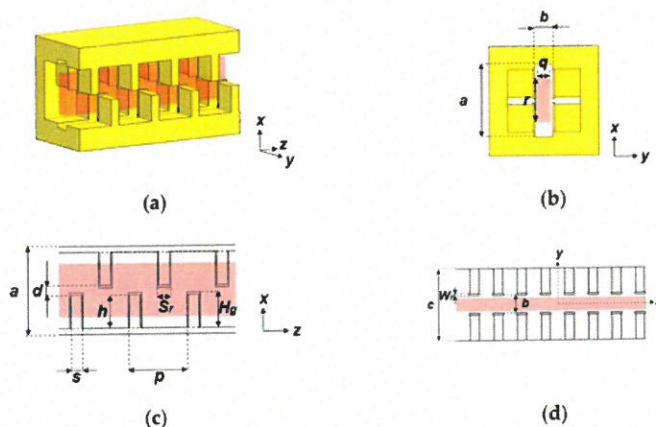


Рис. 5 (а) схематическая схема; (б) вид слева; (с) вид спереди; (д) вид сверху с листовым лучом (красная область) MSDCW-SWS.

Ключевой особенностью конструкции MSDCW-SWS является смещение гофрировок верхней стороны относительно нижних. Это смещение приводит к концентрации электромагнитной энергии преимущественно внутри туннеля пучка, снижая потери и облегчая передачу энергии.

1.3 Проектирование низковольтной ЛБВ W-диапазона на основе ЗС с поверхностным плазмонным поляритоном с двойным ленточным пучком

В данной [3] статье описана лампа бегущей волны для W-диапазона, работающая при низком напряжении. Ее ключевые компоненты включают поверхностный плазмонный поляритон (SSPP), замедляющую структуру (SWS) и двухслойный электронный пучок. Замедляющая структура на основе SSPP имеет особую периодическую конструкцию с двойными F-образными канавками.

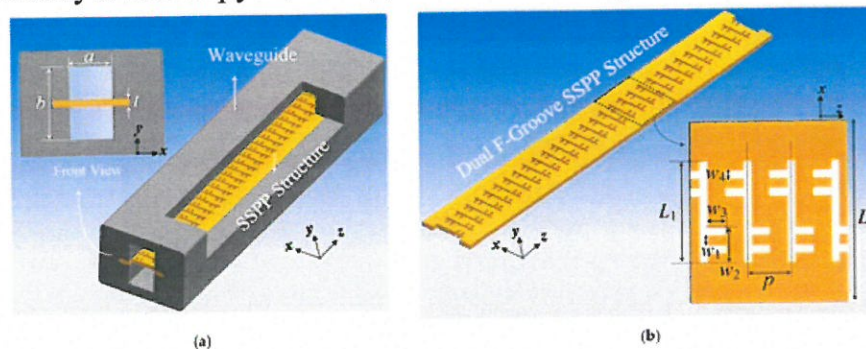


Рис. 6 Структура SWS на основе SSPP: (а) Вид предлагаемого SWS с вырезанной оболочкой; (б) Структура SSPP с двойным F-образным канавкой

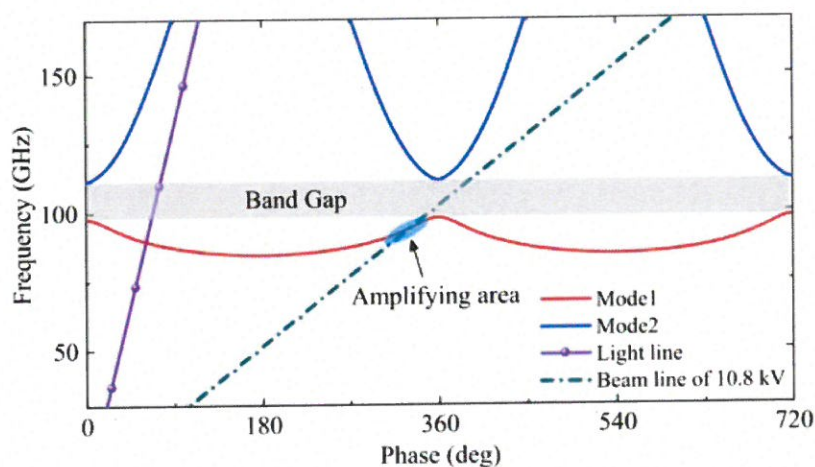


Рис. 7 Схема предлагаемого SWS на базе SSPP

Был разработан и проанализирован низковольтный TWT в диапазоне W, основанный на двухлистовом пучке и SWS на основе SSPP. SWS на базе SSPP обеспечивает сильное осевое удержание, высокий импеданс взаимодействия и сниженное синхронизационное напряжение, что позволяет эффективно работать при напряжении ниже 12,0 кВ. Двухлистовая конфигурация луча увеличивает выходную мощность без увеличения площади поперечного сечения устройства, что делает его подходящим для компактных и лёгких систем.

Вывод

Был разработан и проанализирован низковольтный TWT в диапазоне W, основанный на двойном ленточном пучке и ЗС на основе SSPP. ЗС на базе SSPP

обеспечивает сильное осевое удержание, высокое сопротивление связи и сниженное синхронизационное напряжение, что позволяет эффективно работать при напряжении ниже 12,0 кВ. Двухслойная конфигурация пучка увеличивает выходную мощность без увеличения площади поперечного сечения устройства, что делает его подходящим для компактных и лёгких систем.

1.4 Замедляющая система типа «скрещенная лестница»

Для значительного уменьшения напряжения питания лампы и плотности тока на катоде, исследователи разработали многолучевую конструкцию замедляющей системы для миниатюрных мощных лампы бегущей волны с перекрещенной лестницей, работающих в миллиметровом диапазоне [4].

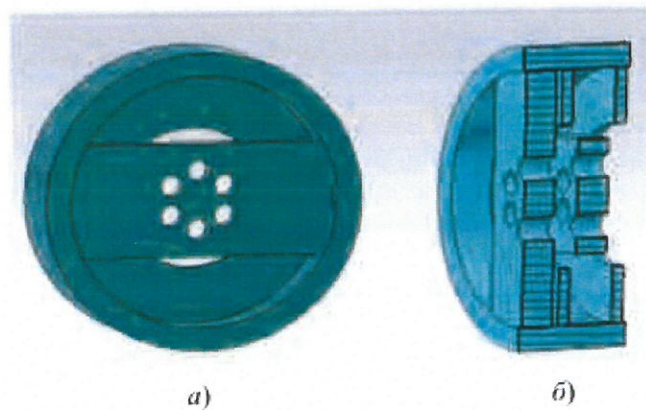


Рис. 8 Вид спереди (а) и разрез одного периода (б) ЗС типа «скрещенная лестница»

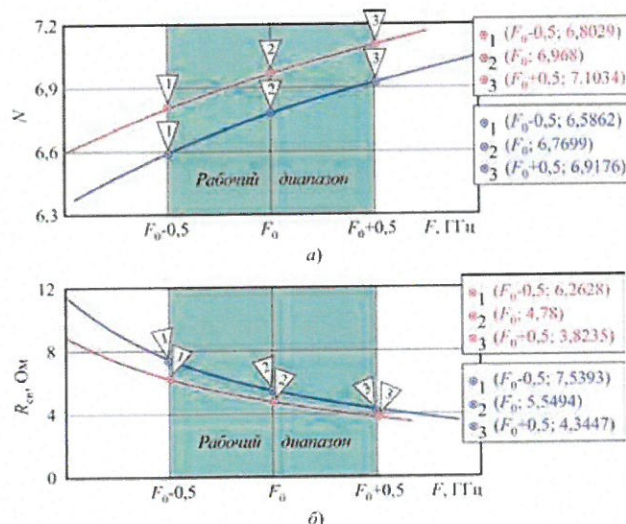


Рис. 9 Дисперсионная характеристика (а), сопротивление связи (б) ЗС типа «скрещенная лестница»

Заключение по главе

В рамках данной главы был представлен всесторонний обзор. Мы детально рассмотрели значимые и современные типы замедляющих структур, находящихся в фокусе текущих исследований. Основное внимание в изученных публикациях было

уделено анализу моделей с использованием программных пакетов CST и ANSYS, а также исследованию соответствующих электродинамических свойств.

ГЛАВА 2. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ЗС ТИПА «СКРЕЩЕННАЯ ЛЕСТНИЦА»

2.1 Описание программного пакета

Трехмерная модель состоит из следующих элементов: кольца, экран и вакуум, сформированные путем булевой операции вычитания одного цилиндра из другого (операция "Subtract"); а также две пластины, представленные в виде параллелепипедов.

2.2 Построение модели

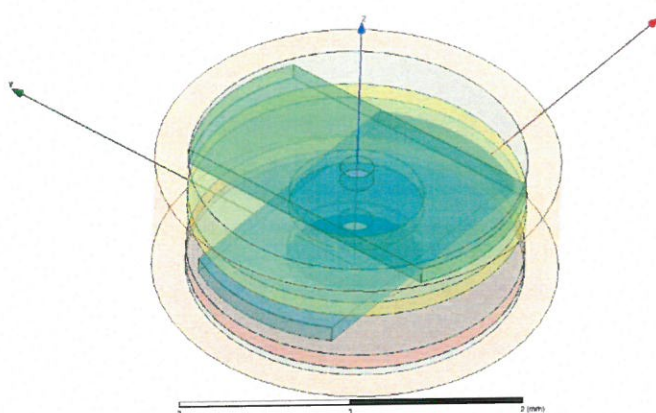


Рис. 10 Модель ЗС типа «скрещенная лестница» одного периода.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
\$Period	0.1	mm	0.1mm
\$Rkol	10*\$Rch		1mm
\$Vkol	0.1	mm	0.1mm
\$Rkol1	4*\$Rch		0.4mm
\$Vkol1	0.1	mm	0.1mm
\$Dpl	\$Rkol		1mm
\$Shpl	0.1	mm	0.1mm
\$Vpl1	\$Rkol		1mm
\$Rsc	12*\$Rch		1.2mm
\$Vscr	4*\$Period+2*\$Vkol+2*\$Shpl		0.8mm
\$Rch	0.1	mm	0.1mm
\$Cx	0	mm	0mm
\$Cy	0	mm	0mm

Таблица 1 Параметры модели

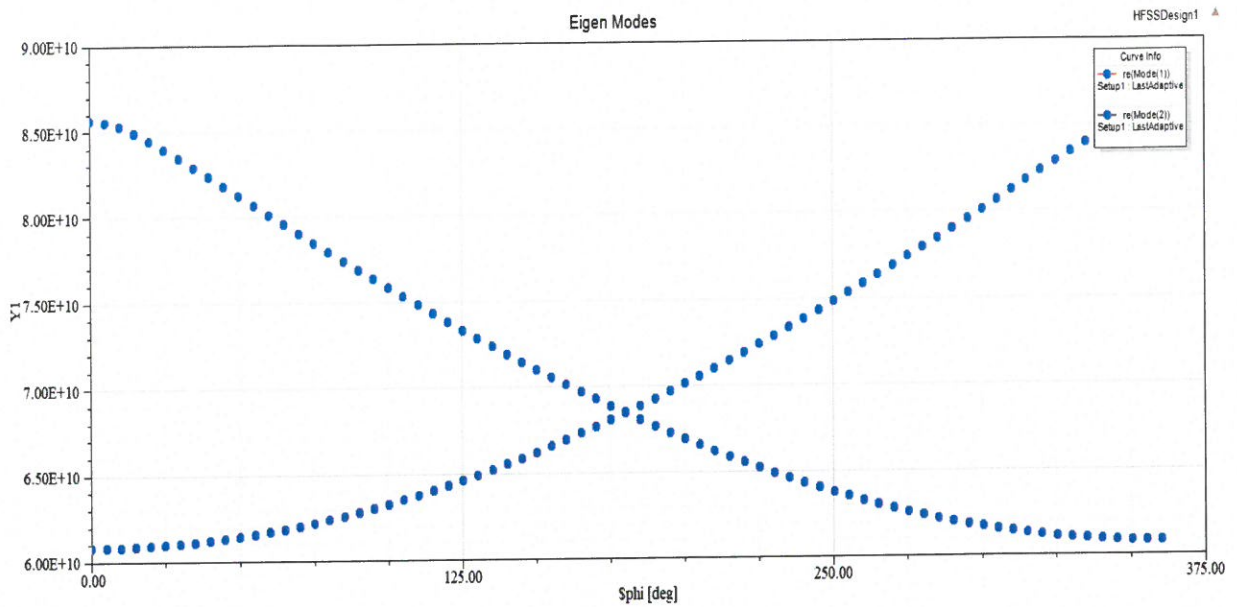


Рис. 11 Дисперсионная характеристика ЗС типа «скрещенная лестница».

ГЛАВА. 3 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ANSYS HFSS

Построение модели ЗС типа «скрещенная лестница» :

Параметры модели были подобраны таким образом, чтобы попасть в нужный частотный диапазон около 80 ГГц.

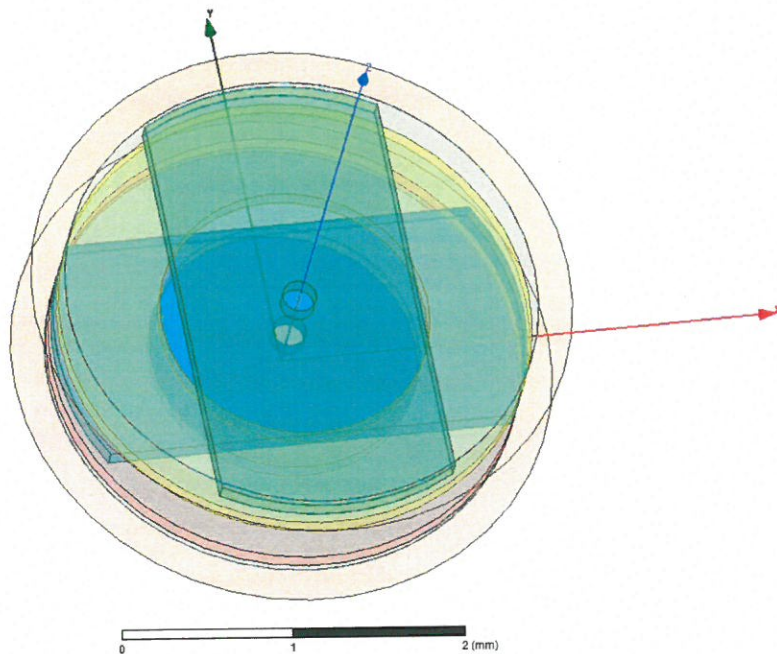


Рис. 12 ЗС типа «скрещенная лестница»

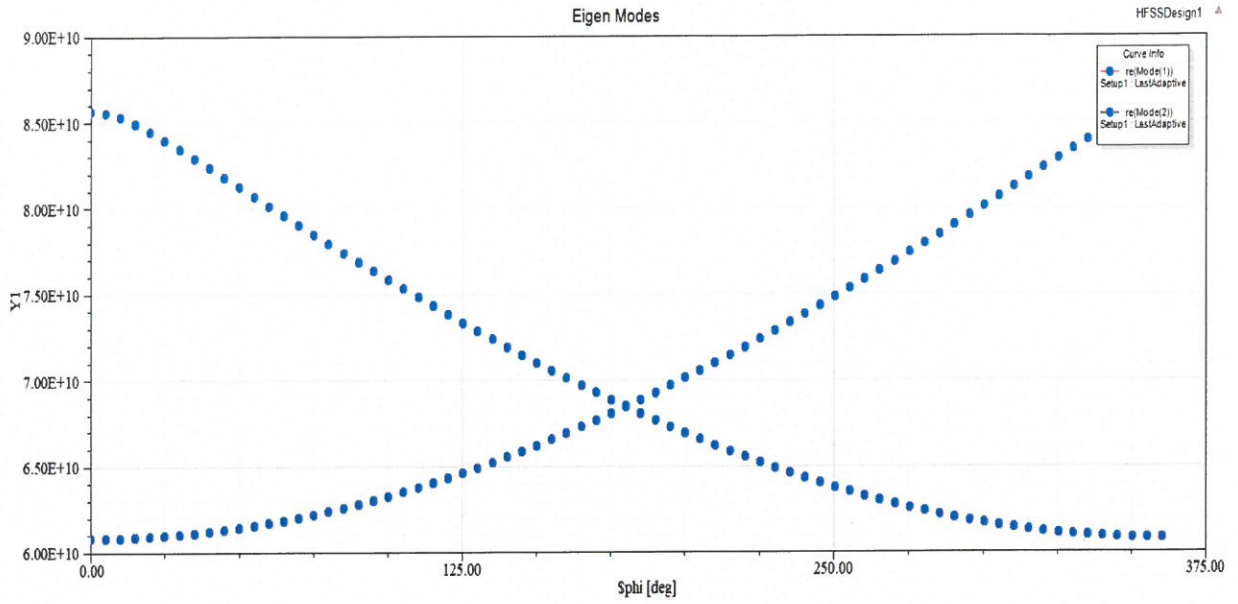


Рис. 13 Дисперсионная характеристика ЗС типа «скрещенная лестница».

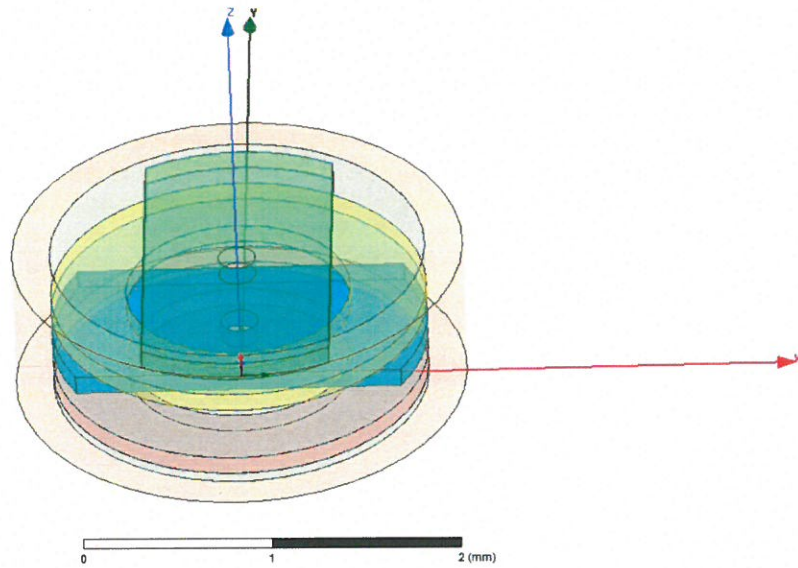


Рис. 14 ЗС типа «скрещенная лестница»

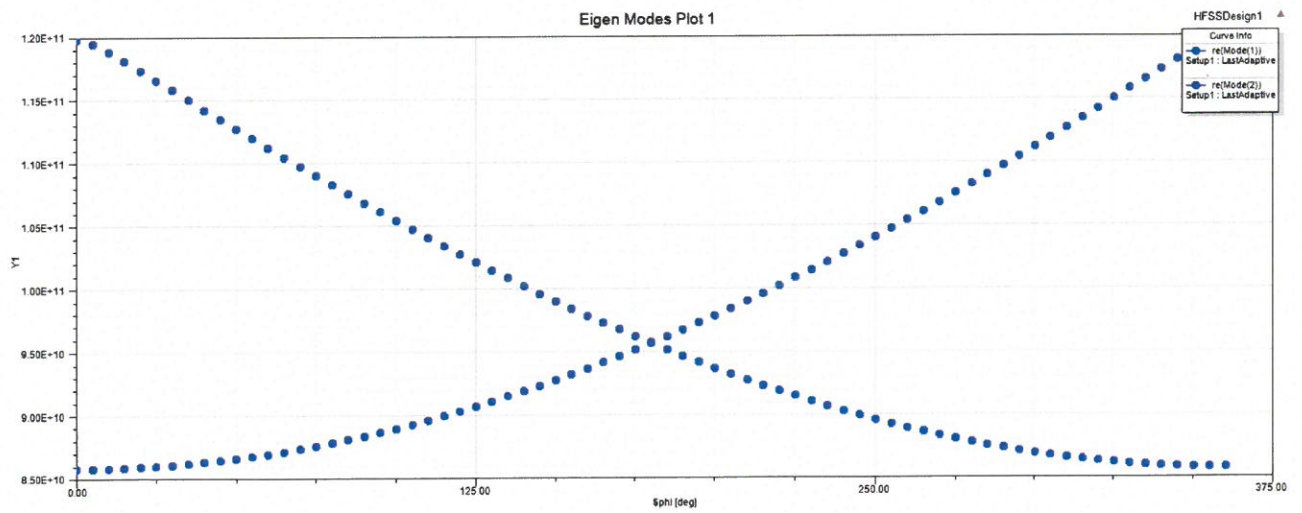


Рис. 15 Дисперсионная характеристика ЗС типа «скрещенная лестница».

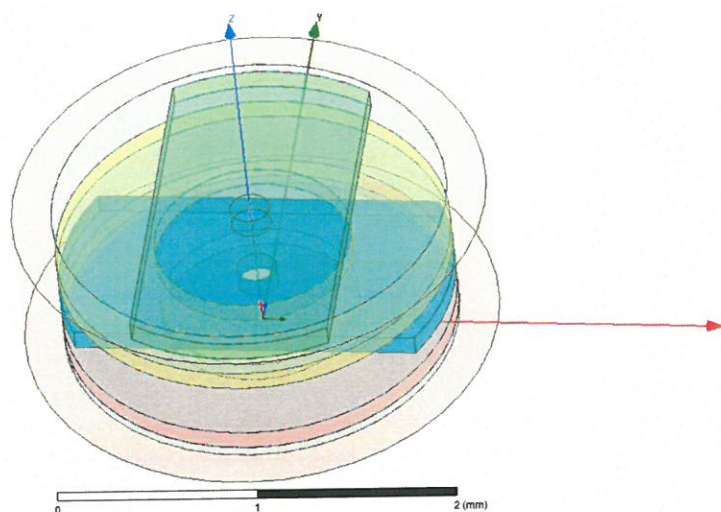


Рис. 16 ЗС типа «скрещенная лестница»

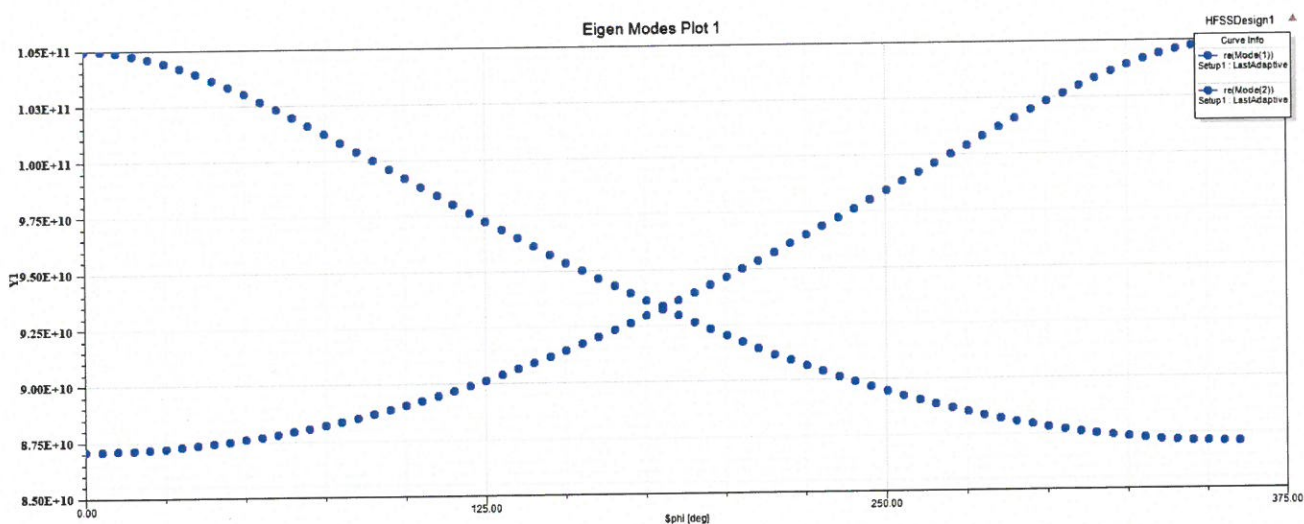


Рис. 17 Дисперсионная характеристика ЗС типа «скрещенная лестница».

Выводы к главе

В данной главе на основе разработанного масштабируемого макета замедляющей системы типа «скрещенная лестница» проведен расчет дисперсионных характеристик для ряда конфигураций ЗС, полученных путем варьирования геометрических параметров системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы был проведен анализ ряда замедляющих систем для ЛБВ миллиметрового диапазона волн. В программном пакете Ansys HFSS был разработан масштабируемый макет замедляющей системы типа «скрещенная лестница». На его основе был проведен расчет дисперсионных характеристик для ряда конфигураций ЗС, полученных путем варьирования геометрических параметров системы.

ЛИТЕРАТУРА

1 - A 220 GHz Traveling-Wave Tube Based on a Modified Staggered Double Corrugated Waveguide / W. Ge, S. Yu // Electronics. – 2024. – Vol. 13, no. 22. – Art. 4483. – URL: mdpi.com– DOI: 10.3390/electronics13224483

2 - Школа электронных наук и инженерии, Университет электронных наук и технологий Китая, Чэнду 611731, Китай

3 - Wu G., Jiang R., Shi J. Design of a W-Band Low-Voltage TWT utilizing a spoof surface plasmon polariton slow-wave structure and dual-sheet beam // Sensors. 2025. Vol. 25, No. 18. P. 5641.

4 - Ракова Е.А., Галдецкий А.В. Многолучевая «прозрачная» ЛБВ миллиметрового диапазона // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 2015. № 1 (524). С. 54-67.