

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

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Методы моделирования замедляющих систем ЛБВ миллиметрового
диапазона частот**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2231 группы
направления 03.04.03 «Радиофизика»
Института Физики
Левенцова Александра Николаевича

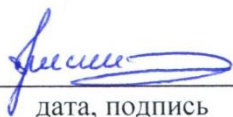
Научный руководитель
доцент кафедры электроники,
колебаний и волн, к.ф.-м.н.



дата, подпись

А.В. Титов

Заведующий кафедрой
электроники, колебаний и волн
к.ф.-м.н., доцент



дата, подпись

09.06.2025г.

С.В. Гришин

Саратов 2025 год

Введение

Актуальность. В настоящее время происходит интенсивный процесс освоения миллиметрового диапазона частот. Электровакуумные усилители миллиметрового диапазона превосходят твердотельные по уровню выходной мощности, радиационной стойкости, стоимости ватта мощности, широкополосности и помехозащищенности. Наиболее перспективными усилителями миллиметрового диапазона длин волн являются клистроны и лампы бегущей волны.

Продвижение в коротковолновую часть миллиметрового диапазона в значительной мере связано с поиском и реализацией эффективных конструкций замедляющих систем. В связи с мелкой структурой элементов замедляющих систем требуется разработка новых технологий и материалов для их реализации в мощных широкополосных ЛБВ миллиметрового диапазона.

Цель: Расчет параметров замедляющих систем и получение зависимостей электродинамических характеристик с помощью программного обеспечения Ansys HFSS.

Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие **задачи:**

1. Обзор актуальных статей, посвященных ЗС.
2. Анализ представленных ЗС, выбор и построение конкретной модели в программе HFSS.
3. Расчет электродинамических характеристик выбранной ЗС.

Основное содержание работы

В первой главе были рассмотрены актуальные замедляющие системы для ламп бегущей волны. Всего в обзоре использовано 5 статей. На их основе был проведен обзор и анализ ЗС.

В первой статье предложена лампа бегущей волны W-диапазона (TWT) на основе структуры замедления синусоидального волновода с прорезями (SSWG SWS). SSWG SWS обладает более высоким импедансом взаимодействия, чем обычные SWS синусоидальных волноводов, имеет более плоскую кривую дисперсии и более высокую нормированную фазовую скорость по сравнению с SWG SWS, а также оптимизирован для диапазона рабочих частот 90-98 ГГц.

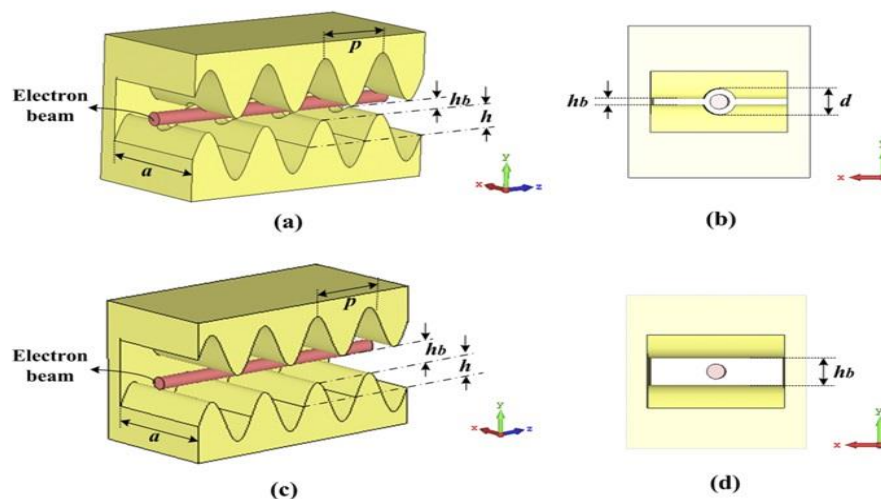


Рис. 1. Эскиз и размерные параметры SSWG SWS и SWG SWS: (а) вид спереди и (б) вид в разрезе SSWG SWS, (в) вид спереди и (г) вид в разрезе SWG SWS

В следующей статье ответитель использует новую идею прямого подключения микроволнового излучения из Н-плоскости замедляющей системы В рабочей полосе частот (90-100 ГГц) длина периодов SWC около 5,33 мм, длина разъема около 7,73 мм..

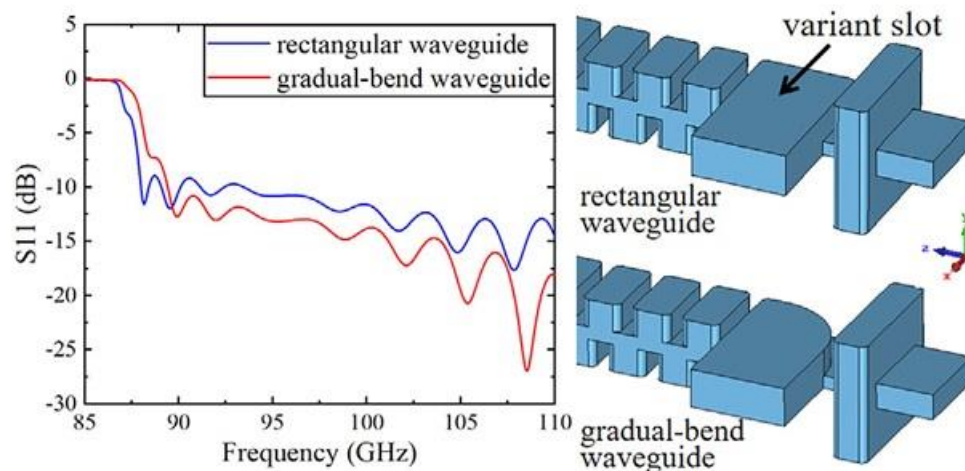


Рис. 2. Модель CST и S11 исходной схемы

В третьей статье представлена замедляющая структура с нагрузкой в Н- и Е-плоскостях для W-полосного TWT. Спиральная замедляющая структура (SWS) не подходит для частот выше 60 ГГц. HEL SWS основан на прямоугольном волноводе с металлическими гофрами в Н- и Е-плоскостях. Тестовая структура HEL SWS с входными и выходными ответвителями была построена в диапазоне 91-98 ГГц.

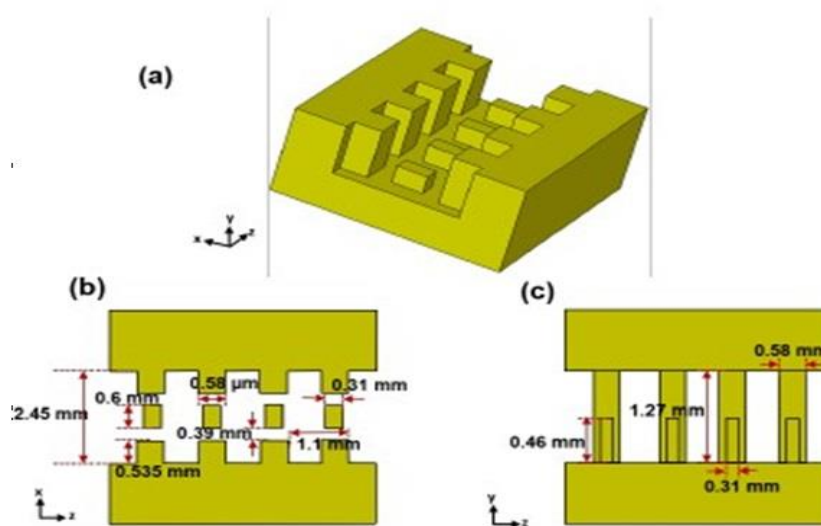


Рис. 3. Схема нагруженных SWS в плоскостях Н и Е: (а) трехмерный вид (снимаемый верхний металлический лист), (б) вид в верхнем сечении (исключая верхний металлический лист), и, (в) вид в боковом сечении (исключая боковую стенку)

В четвертой статье представляет собой исследование взаимодействия пучка с волной в субтерагерцовом диапазоне. Проведено имитационное

исследование DSG SWS с дисперсией и импедансом связи.

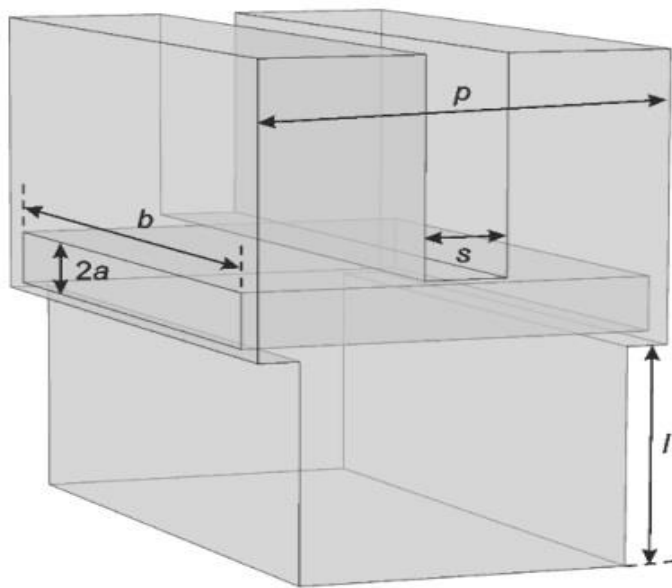


Рис. 4. Схема элементарной ячейки DSG SWS

В следующей статье - исследование волноводных элементов для миллиметровой лампы бегущей волны. Низкая шероховатость поверхности является проблемой при изготовлении элементов системы взаимодействия. Электроэрозионная обработка (EDM) уступает фрезерованию в точности обработки, но позволяет изготавливать детали более сложной формы. Для оценки шероховатости поверхности была изготовлена экспериментальная модель в виде латунной пластины с прорезью шириной 350 мкм. Толщина темного слоя на внутренней стороне щели позволяет визуально оценить максимальную глубину поверхностного слоя. Электрохимическая полировка уменьшила шероховатость, но величина потерь осталась высокой. Трехмерные модели поверхности позволили изучить рельеф поверхности. Моделирование омических потерь в 40-периодном свернутом волноводе выполнено в CST Studio Suite. Использовалась градиентная модель поверхностных потерь с учетом шероховатости поверхности. Результаты моделирования показали, что увеличение потерь за счет шероховатости не превышает на порядок величины максимального значения коэффициента увеличения потерь.

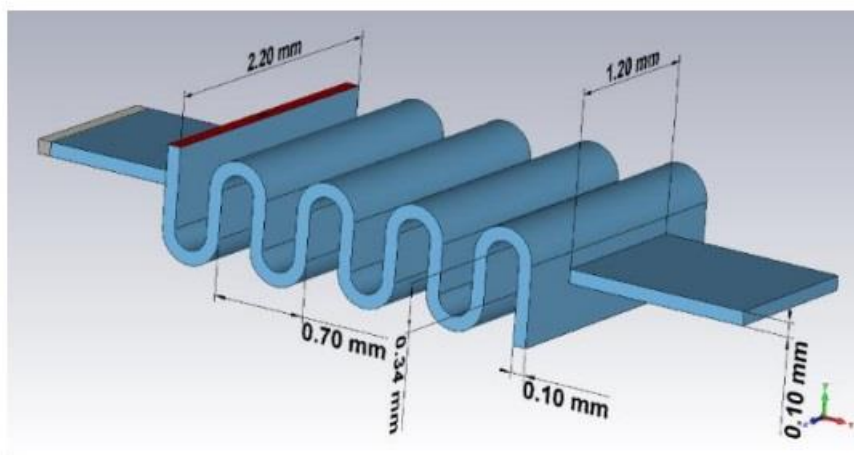


Рис. 5. Геометрия четырёх периодов сложенного волновода с каналом для электронного луча

В данной главе был проведен обзор актуальных статей, посвященных замедляющим системам. Анализ различных типов замедляющих систем позволил выявить их особенности и преимущества, что является важным шагом в развитии радиотехники. Проведенный обзор подтвердил актуальность темы.

Во второй главе был произведен анализ представленных ЗС, выбор и построение конкретной модели в программе HFSS.

В рамках данного исследования были проанализированы представленные замедляющие системы для ламп бегущей волны и выбрана оптимальная ЗС.

В ходе тщательного обзора статей, особое внимание было уделено статье «Анализ лампы бегущей волны W-диапазона на основе щелевого синусоидального волновода замедляющей структуры», где выбранная модель отличилась наилучшими характеристиками.

На этапе построения конкретной модели ЗС в программе HFSS был подробно описан процесс моделирования. Этот процесс включал в себя построение самой модели, задание граничных условий, начальных параметров, а также проверку на соответствие требуемым критериям.

После выполнения данных этапов получаем готовую модель ЗС:

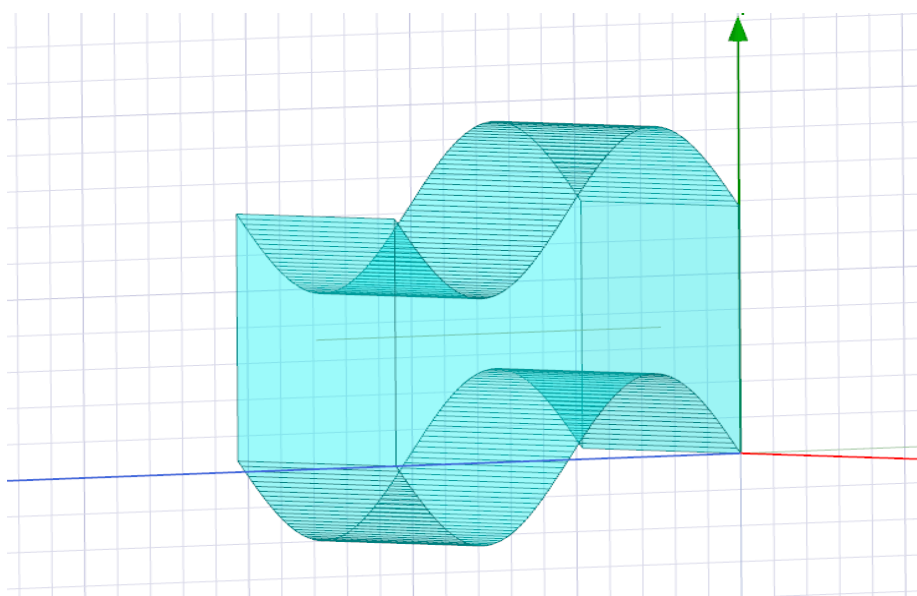


Рис 6. Готовая модель ЗС типа «синусоидальный волновод»

Результатом данного исследования стало успешное моделирование ЗС в программе HFSS. Построенная модель обладает высокой степенью реалистичности и может быть использована в дальнейших исследованиях.

В третьей главе был проведен расчет электродинамических характеристик выбранной замедляющей системы. Этот этап исследования позволил получить более глубокое понимание работы ЗС и ее потенциала в радиотехнических системах.

Пример результата расчета дисперсионной характеристике приведен ниже (Рис 7).

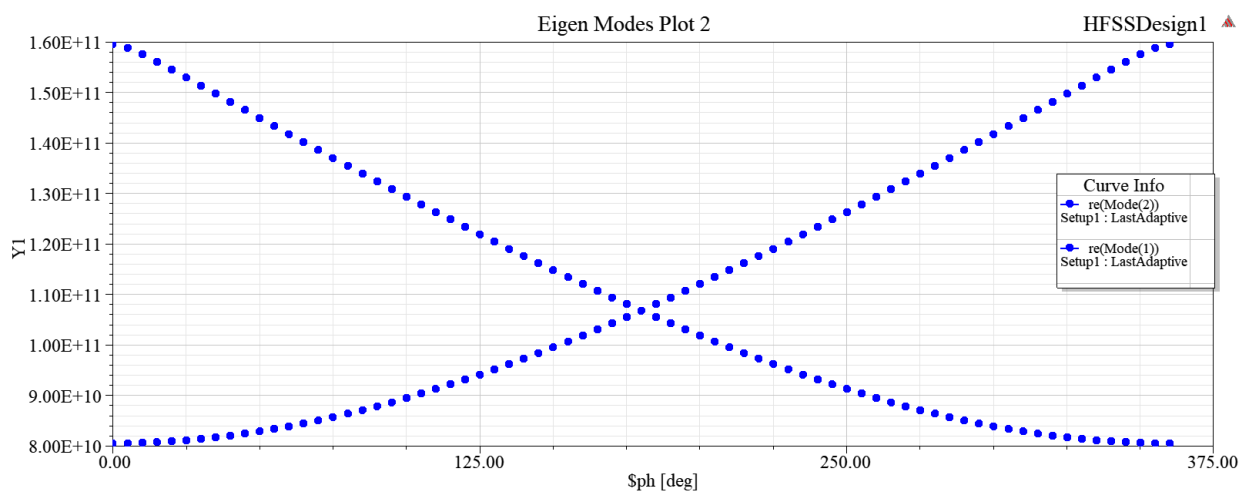


Рис 7. Дисперсионная характеристика ЗС.

В этой главе были получены электродинамические характеристики выбранной замедляющей системы с использованием программного пакета Ansys HFSS. Был построен график зависимости частоты от сдвига фазы.

Заключение

В ходе исследования был проведен обзор статей, посвященных замедляющим системам. Данный обзор выявил основные тенденции и направления развития в области ЗС.

Далее был проведен анализ представленных ЗС с целью выбора конкретной модели для последующего построения. Была выбрана оптимальная модель, выделяющаяся среди других моделей благодаря своим отличных характеристикам.

После выбора модели было осуществлено построение данной ЗС в программном обеспечении Ansys HFSS, что позволило провести расчет характеристик выбранной модели.

Таким образом, проведенное исследование позволило не только углубить знания в области замедляющих систем, но и смоделировать и проверить конкретную модель, что открывает новые перспективы для дальнейших исследований в данной области науки и техники.

Литература

1. Z. Luqi, Y. Jiang, W. Lei, R. Song. Analysis of W-band traveling-wave tube based upon slotted sine waveguide slow wave structure. AIP Advances 11, 125214 (2021)/ doi: 10.1063/5.0075447
2. Z. Guo, C. Zhang, J. Cai, J. Feng. Design of an ultrashort H-plane coupler without transition structure for sheet beam traveling-wave tube amplifier at W-band. ELECTRONICS LETTERS. September 2023 Vol. 59 No. 18/ DOI:[10.1049/ell2.12945](https://doi.org/10.1049/ell2.12945)
3. Laxma R. Billa, M. Nadeem Akram, C. Paoloni, X. Chen. H- and E-plane loaded Slow-wave structure for W-band TWT. IEEE Transactions on Electron Devices 67(1):1-5/ DOI:[10.1109/TED.2019.2955825](https://doi.org/10.1109/TED.2019.2955825)
4. V. Titov, A. Ploskih, N. Ryskin. Study of Beam–Wave Interaction in a Sub-THz Traveling Wave Tube with a Converging Sheet Electron Beam Focused by a Uniform Magnetic Field. Electronics 2022, 11, 4208. <https://doi.org/10.3390/electronics11244208>
5. A.S. Ivanov, O.N. Mikhailova, V.N. Titov, A.D. Tupitsyn. Study of the waveguide elements for mm-wave traveling wave tube. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 387 (2018) 012028/[doi:10.1088/1757-899X/387/1/012028](https://doi.org/10.1088/1757-899X/387/1/012028).