

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 миллиметрового
диапазона**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

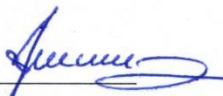
Студентки 2 курса 2231 группы
направления 03.04.03 «Радиофизика»
Института Физики
Степановой Марии Алексеевны

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

01.06.24 
дата, подпись

А.В. Титов

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

01.06.24 
дата, подпись

С.В. Гришин

Саратов 2024 год

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТИПЫ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЛБВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН	4
1.1 Основные результаты исследований ЛБВ мм-диапазона спиральной замедляющей системы.....	4
1.2 Основные результаты исследований ЗС типа «петляющий волновод» мм- диапазона.....	5
1.3 Основные результаты исследований ЗС типа «меандр на диэлектрической подложке из кварца»	6
1.4 Основные результаты исследований ЗС типа «меандр на диэлектрической алмазной подложке»	7
1.5 Основные результаты исследований ЗС типа «ромбовидная меандровая линия с несколькими диэлектрическими опорами и гребнями».....	8
1.6 Основные результаты исследований ЗС типа «концентрическая дуговая меандровая линия».....	9
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗС В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ ANSYS HFSS	11
2.1 Принцип работы программного обеспечения (ПО) ANSYS HFSS.....	11
2.2 Моделирование ЗС типа «ромбовидная меандровая линия с несколькими диэлектрическими опорами и гребнями»	11
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	15
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	16

ВВЕДЕНИЕ

Развитие СВЧ-электроники идет по пути освоения коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, позволяя повысить технические характеристики радиоэлектронной аппаратуры для многочисленных приложений.

Несмотря на длительный срок исследований, посвященных разработке мощных электровакуумных усилителей миллиметрового диапазона, проблемы, связанные с высокими электродинамическими параметрами замедляющих систем, тепловым режимом, прецизионной технологией изготовления миниатюрных узлов прибора, все еще находятся в процессе решения.

Относительно миниатюрные и при этом достаточно мощные источники миллиметрового излучения могут быть разработаны на основе ЛБВ. В настоящее время такие разработки активно ведутся многими компаниями в различных странах. Большой интерес к исследованиям ЛБВ продиктован прежде всего тем, что широкая полоса усиливаемых частот обеспечивает высокую помехоустойчивость и затрудняет обнаружение и подавление ВЧ сигнала по сравнению с узкополосными усилителями. К настоящему времени выпускаемые промышленностью ЛБВ можно разделить на несколько классов по типу используемой ЗС: спиральные ЛБВ, ЛБВ на цепочке связанных резонаторов (ЦСР), с ЗС типа «петляющий волновод», с встречно-штыревой ЗС, с ЗС типа «скрещенная лестница» и с планарной ЗС типа «меандр».

В данной работе представлен краткий обзор современного состояния исследований и разработок замедляющих систем (ЗС) для ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн. На основе обзора выбрана конструкция ЗС типа «ромбовидная меандровая линия с диэлектрическими опорами и гребнями». Для данной ЗС построен масштабируемый макет, позволяющий провести исследования дисперсионных характеристик для целого семейства подобных ЗС.

ГЛАВА 1. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТИПЫ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЛБВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

В данной главе были рассмотрены современные типы замедляющих систем для ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн. Как уже отмечалось во Введении, развитие СВЧ-электроники идет по пути освоения коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, позволяя повысить технические характеристики радиоэлектронной аппаратуры для многочисленных приложений.

Несмотря на длительный срок исследований, посвященных разработке мощных электровакуумных усилителей миллиметрового диапазона, проблемы, связанные с высокими электродинамическими параметрами замедляющих систем, тепловым режимом, прецизионной технологией изготовления миниатюрных узлов прибора, все еще находятся в процессе решения. Таким образом, создание новых конструкций ЗС с улучшенными ЭДХ и теплорассеивающей способностью для низковольтных ЛБВ миллиметрового диапазона является актуальной задачей современной вакуумной СВЧ-электроники, решение которой позволит строить компонентную базу нового поколения для радиоэлектронной аппаратуры специального и двойного назначения.

1.1 Основные результаты исследований ЛБВ мм-диапазона спиральной замедляющей системы

В данном разделе была рассмотрена спиральная замедляющая система для ЛБВ мм-диапазона.

В АО «НПП «Алмаз» разработана и освоена в производстве широкополосная ЛБВ непрерывного действия со спиральной ЗС с пролётным каналом 0,7 мм (см. Рис. 1, Рис. 2) [1].

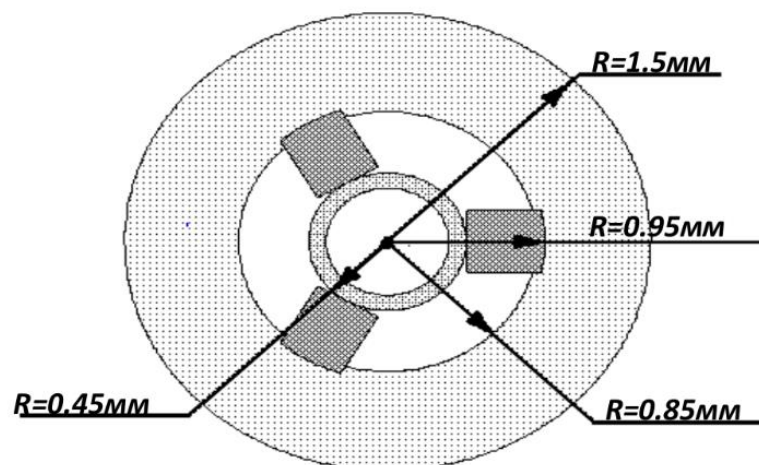


Рис. 1. - Размерная схема спиральной ЗС в поперечном сечении (пролетный канал 0.7 мм) [1]

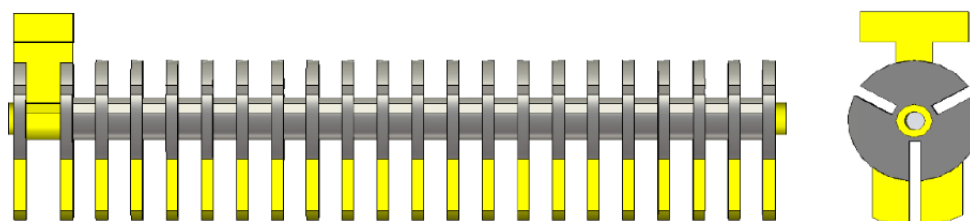


Рис. 2. - Модель оболочки замедляющей системы [1]

Авторы показали, что такая конструкция ЗС обеспечивает надёжную работу ЛБВ с выходной непрерывной мощностью до 86 Вт и коэффициентом усиления порядка 45 дБ, при токе катода 115 мА и ускоряющем напряжении 9,0 кВ.

1.2 Основные результаты исследований ЗС типа «петляющий волновод» мм-диапазона

В данном разделе была рассмотрена ЗС типа «петляющий волновод» для ЛБВ мм-диапазона длин волн.

В 2023 году ученые из Пекинского научно-исследовательского института вакуумной электроники разработали и представили космический ЛБВ с использованием ЗС типа «петляющий волновод» для Е-диапазона на частоте 71-76 ГГц [2], уделяя основное внимание дальнейшему увеличению

выходной мощности и эффективности для удовлетворения требований будущего практического применения (см. Рис. 3).

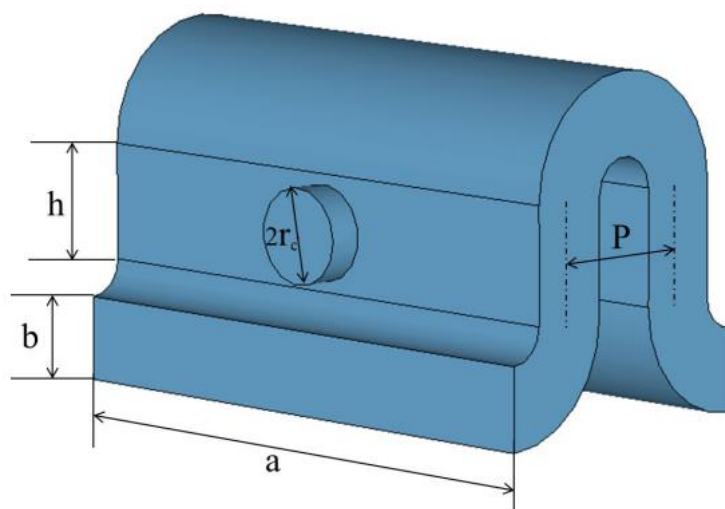


Рис. 3. Модель одного периода ЗС в программном пакете CST [2].

Такая конструкция ЗС обладает широкополосностью, высокой технологичностью, термомеханической устойчивостью внутренних элементов за счет цельнометаллической конструкции.

Результаты экспериментальных измерений показали, что разработанный прототип способен обеспечить выходную мощность до 87 Вт и коэффициент усиления выше 41 дБ.

1.3 Основные результаты исследований ЗС типа «меандр на диэлектрической подложке из кварца»

В данном разделе была рассмотрена ЗС типа «меандр на диэлектрической подложке из кварца» для ЛБВ мм-диапазона.

Научной группой из Саратовского филиала Института Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН была разработана миниатюрная планарная замедляющая система на диэлектрической подложке для низковольтной лампы бегущей волны миллиметрового диапазона (75-110 ГГц) (см. Рис. 4) [3].

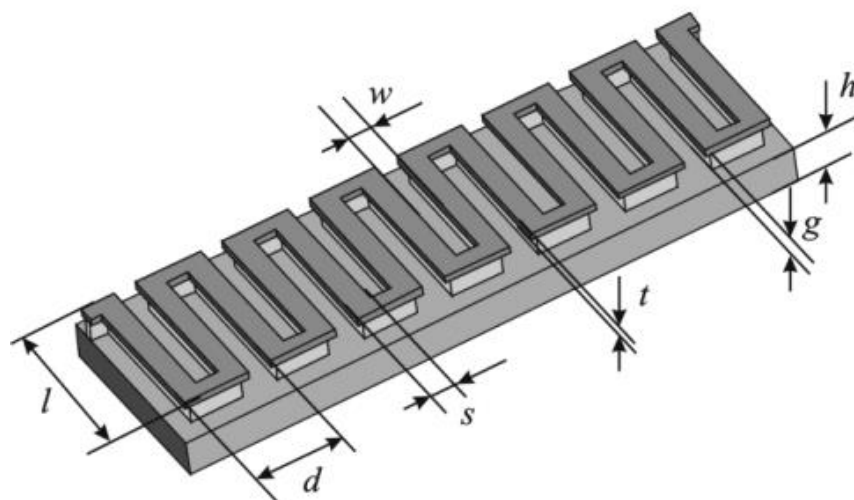


Рис. 4. – Схематичное изображение геометрии ЗС [3]

Результаты моделирования показали, что в силу сильной дисперсии полоса усиления оказывается достаточно узкой (7-10 ГГц), однако возможна перестройка полосы усиления с помощью изменения ускоряющего напряжения пучка. При токе пучка 100 мА в линейном режиме работы коэффициент усиления может превышать 20 дБ. Моделирование в нелинейном режиме показывает, что при таких значениях тока выходная мощность может превышать 80 Вт.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что подобные ЗС обладают большим замедлением и поэтому пригодны для использования в низковольтных приборах (ускоряющее напряжение менее 10 кВ).

1.4 Основные результаты исследований ЗС типа «меандр на диэлектрической алмазной подложке»

В данном разделе была рассмотрена ЗС типа «меандр на диэлектрической алмазной подложке» для ЛБВ мм-диапазона.

В 2020 году Китайские ученые из университета электронной науки и техники представили замедляющую систему типа «меандр на узком прямоугольном алмазном опорном стержне» (см. Рис.5) [4].

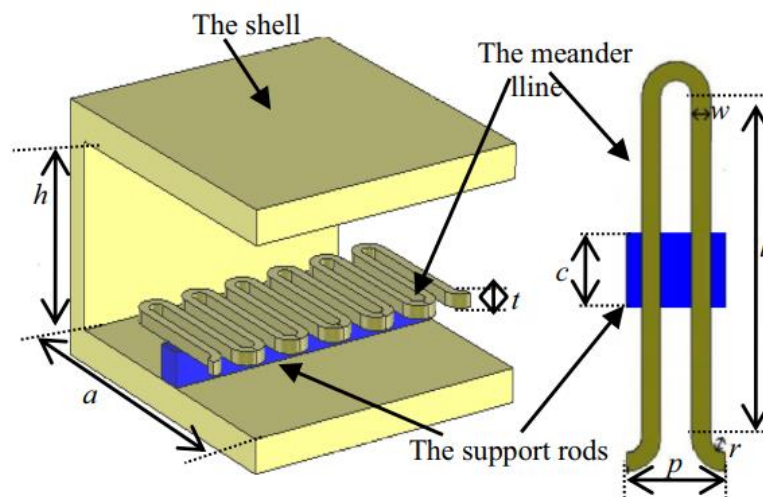


Рис. 5 - U-образная меандровая ЗС поддерживаемая одним алмазным стержнем [4]

Результаты моделирования показали, что отражение составляет менее -15 дБ в диапазоне частот 32-38 ГГц, а выходная мощность может достигать 57 Вт, что соответствует КПД 17,6%. Данная ЗС была изготовлена, а результаты показали, что передача хуже, чем при моделировании. Таким образом, авторы ставят перед собой задачи по улучшению производства и постобработки, для уменьшения потерь в меандровой линии ЗС.

1.5 Основные результаты исследований ЗС типа «ромбовидная меандровая линия с несколькими диэлектрическими опорами и гребнями»

В данном разделе была рассмотрена ЗС типа «ромбовидная меандровая линия с несколькими диэлектрическими опорами и гребнями» для ЛБВ мм-диапазона.

Для широкополосной лампы бегущей волны (ЛБВ) V-диапазона учеными из Китайского университета электронной науки и техники была предложена замедляющая система с несколькими диэлектрическими опорами, нагруженными гребнями и ромбовидными меандровыми линиями (см. Рис. 6) [5]. Такая конструкция делает систему более устойчивой к электронной бомбардировке и решает проблему накопления заряда и короткого замыкания.

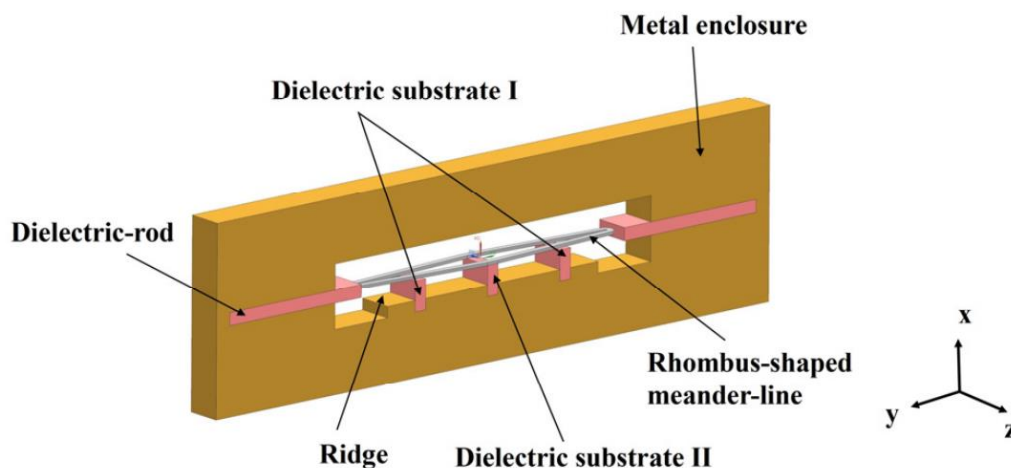


Рис. 6. Модель одного периода ЗС типа «ромбовидная меандровая линия с диэлектрическими стержнями и гребнями» [5]

Такая конструкция делает систему более устойчивой к электронной бомбардировке и решает проблему накопления заряда и короткого замыкания.

Результаты моделирования показали, что ЗС с гребневой нагрузкой обладает преимуществами широкой полосы пропускания и высокого коэффициента усиления при сохранении миниатюрности. Предлагаемая структура имеет более низкое рабочее напряжение при сохранении широкой относительной полосы пропускания.

1.6 Основные результаты исследований ЗС типа «концентрическая дуговая меандровая линия»

В данном разделе была рассмотрена ЗС типа «концентрическая дуговая меандровая линия» для ЛБВ мм-диапазона.

В 2021 году учеными из Китайской академии наук была предложена концентрическая дуговая меандровая система для низковольтной, высокоэффективной и широкополосной лампы бегущей волны (ЛБВ) миллиметрового диапазона, с двойным ленточным пучком (см. Рис. 7) [6].

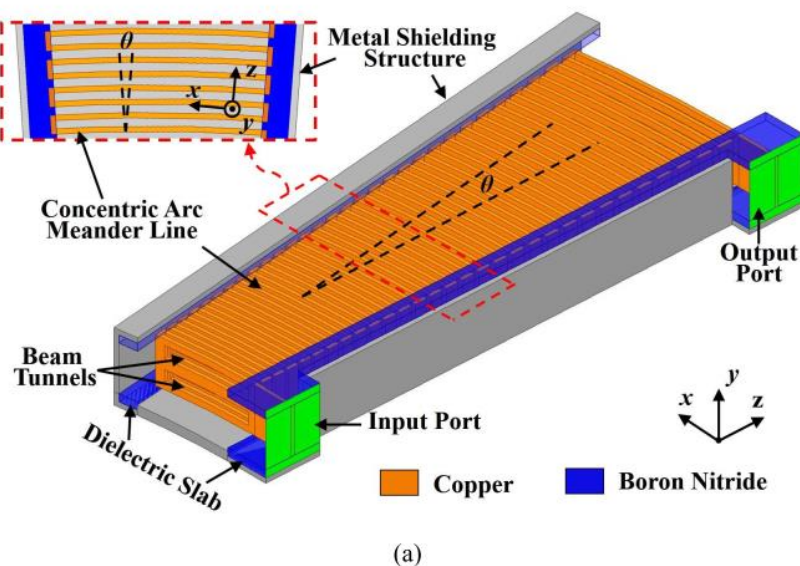


Рис. 7. Конструкция замедляющей системы [6]

Как неперриодическая ЗС, использовалась для получения низкого рабочего напряжения и широкой полосы пропускания. Ленточный пучок использовался для повышения эффективности.

Результаты моделирования показали, что выходная мощность предлагаемого ЛБВ может достигать 58,6 Вт на частоте 60 ГГц при напряжении 940 В и токе каждого ленточного пучка 0,1 А. Кроме того, полоса усиления 3 дБ составляет около 17 ГГц в диапазоне от 51 до 68 ГГц, где выходной сигнал устойчив, а частотный спектр достаточно чист. Таким образом, предложенная ЗС хорошо подходит для низковольтных, высокоэффективных и широкополосных ЛБВ в V-диапазоне.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗС В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ ANSYS HFSS

В данной главе была описана методика построения модели в ANSYS HFSS. На основе обзора была выбрана планарная замедляющая система типа «ромбовидная меандровая линия с несколькими диэлектрическими опорами и гребнями» и построен масштабируемый макет одного периода данной ЗС, для дальнейшего расчета характеристик.

2.1 Принцип работы программного обеспечения (ПО) ANSYS HFSS

Данное ПО позволяет моделировать трехмерные структуры и с высокой степенью точности определять их электродинамические характеристики (ЭДХ) путем решения уравнений Максвелла с определенными граничными условиями методом конечных элементов. Расчет ЗС сводится к шести основным этапам:

1. Начальные установки программы;
2. Построение трехмерной модели;
3. Задание свойств материалов трехмерной модели;
4. Задание граничных условий;
5. Начальные установки и расчет;
6. Обработка полученных данных.

2.2 Моделирование ЗС типа «ромбовидная меандровая линия с несколькими диэлектрическими опорами и гребнями»

В данном разделе был построен масштабируемый макет планарной замедляющей системы типа «ромбовидная меандровая линия с несколькими диэлектрическими опорами и гребнями» представленный на Рис. 8. При построении модели были выбраны размеры параметров взятые из приведенной статьи в обзоре [5].

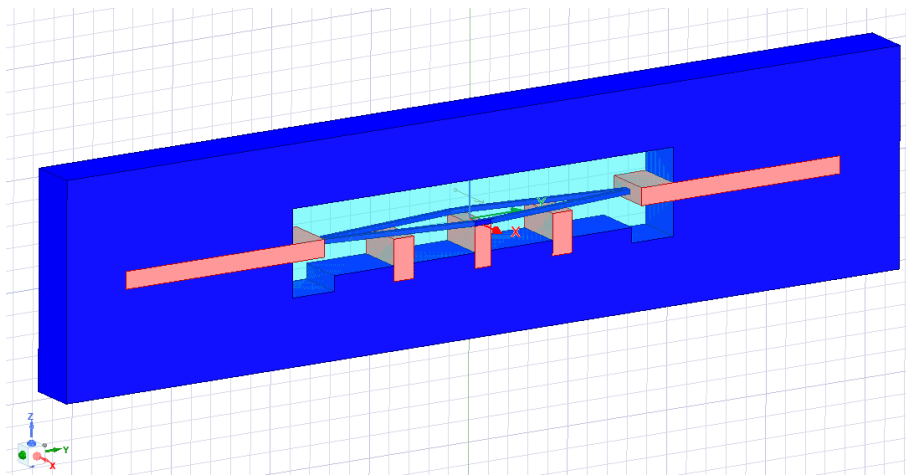


Рис.8 Модель одного периода ЗС полученная в программе ANSYS HFSS.

По результатам расчета в программе ANSYS HFSS была построена дисперсионная характеристика для данной ЗС (см. Рис 9).

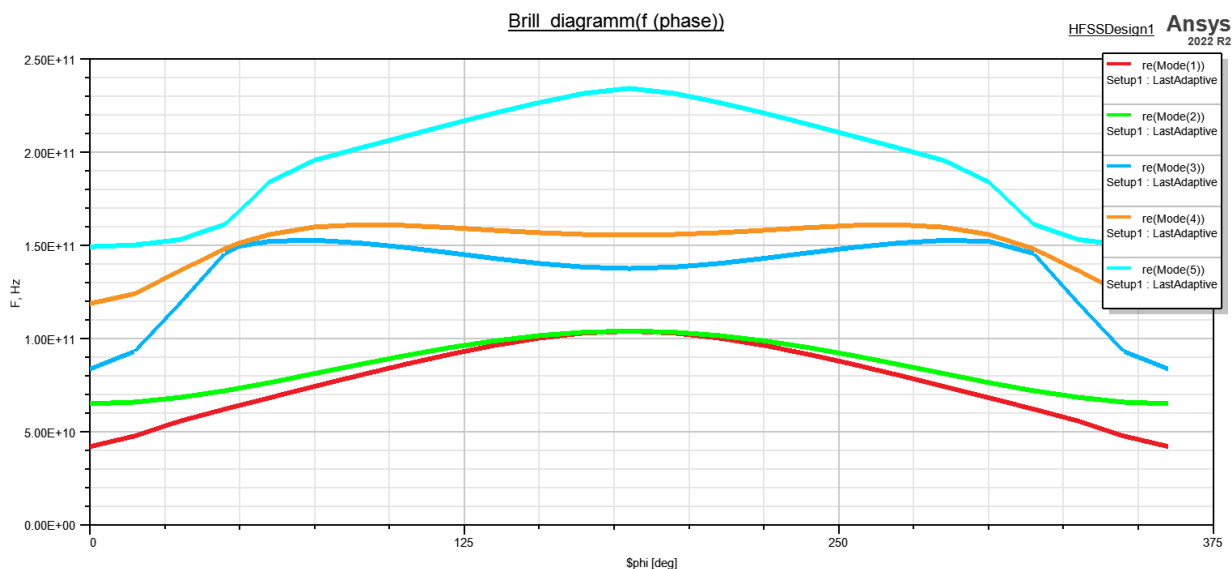


Рис. 9. Дисперсионная характеристика

Из дисперсионной характеристики видно, что синхронизм обеспечивается на +1-й пространственной гармонике. Далее построенный макет ЗС типа «ромбовидная меандровая линия с несколькими диэлектрическими опорами и гребнями» был уменьшен в 1,5 раза относительно исходного. Для уменьшенного макета ЗС была также построена дисперсионная характеристика, представленная на Рис. 10.

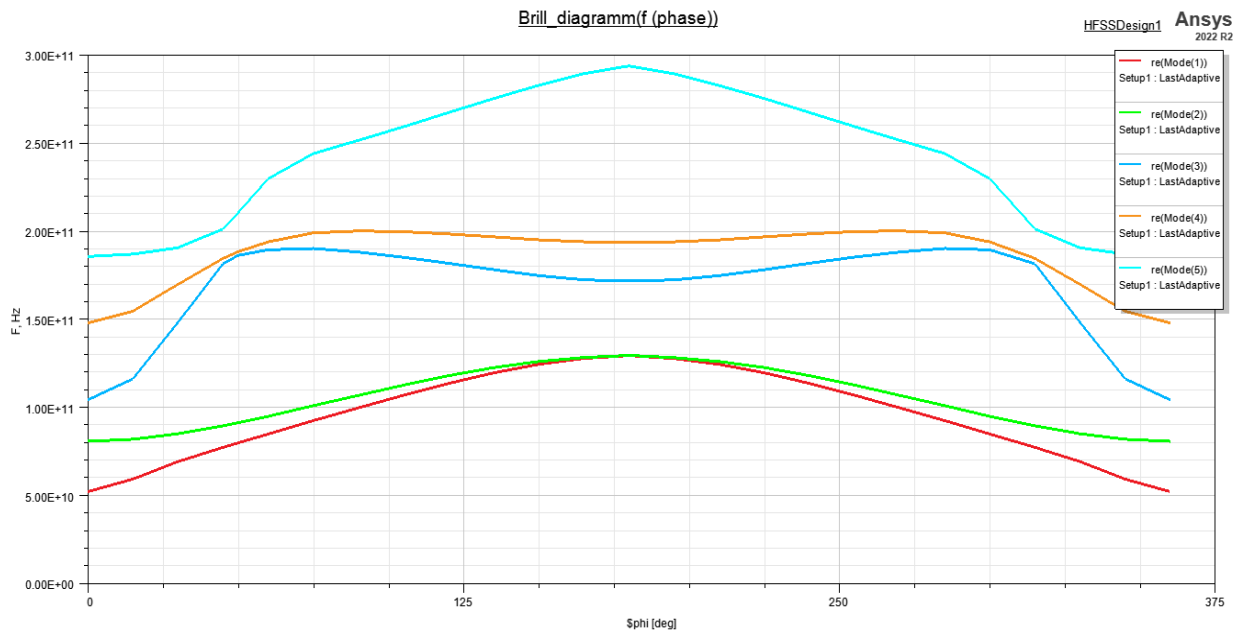


Рис. 10. Дисперсионная характеристика ЗС уменьшенной в 1,5 раза относительно исходного макета

На Рис. 28 представлены результаты расчёта сопротивления связи ЗС в зависимости от частоты.

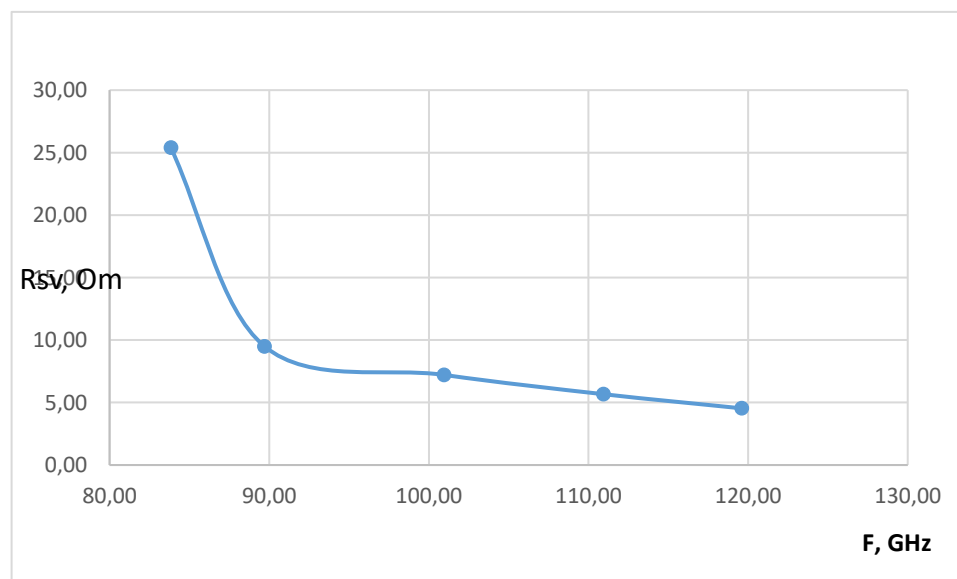


Рис. 28. Зависимость сопротивления связи от частоты

На Рис. 29. представлены результаты расчёта распределённого затухания ЗС в зависимости от частоты.

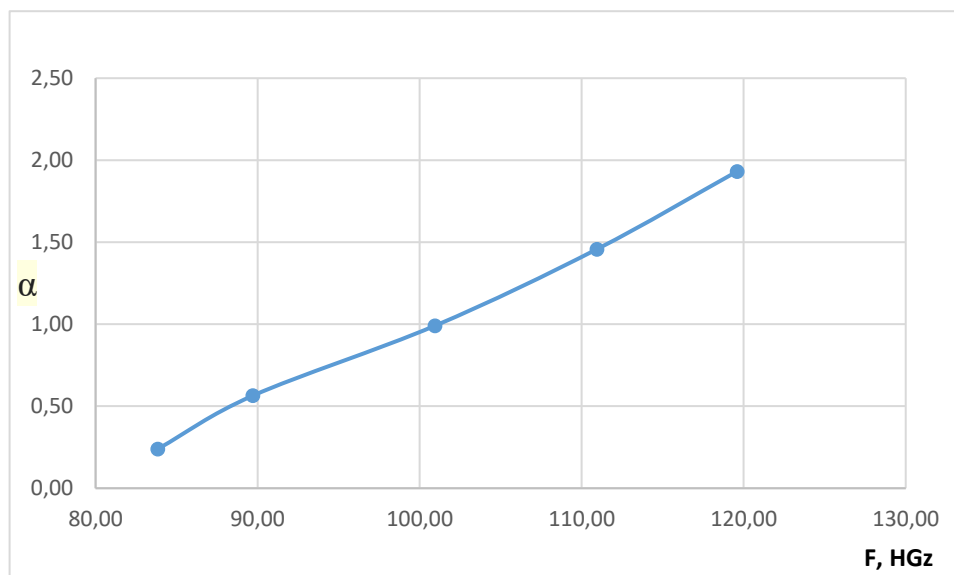


Рис. 29. Зависимость распределенного затухания от частоты

Исходя из этой характеристики можно сделать вывод, что такая конструкция ЗС может работать в частотном диапазоне 60 - 90 ГГц, где основное взаимодействие электронного потока происходит на +1-й пространственной гармонике.

Таким образом в данной главе представлена методика моделирования в программном пакете ANSYS HFSS. На основе данной методики построена масштабируемая модель замедляющей системы типа «ромбовидная меандровая линия с несколькими диэлектрическими опорами и гребнями», позволяющая за счет параметрического вида быстро оптимизировать её под необходимые задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был приведен краткий обзор современного (за последние 7 лет) состояния исследований и разработок ЛБВ мм-диапазона длин волн и проанализированы тенденции их развития.

На основе обзора была выбрана планарная замедляющая система типа «ромбовидная меандровая линия с несколькими диэлектрическими опорами и гребнями», для которой в программном пакете ANSYS HFSS был построен масштабируемый макет с целью проведения исследований дисперсионных характеристик. Разработанный масштабируемый макет планарной замедляющей системы позволяет проанализировать на собственные моды целый класс подобных замедляющих систем благодаря возможности быстрой перестройки геометрии, не прибегая к перерисовке объектов и не теряя работоспособность смоделированной конструкции.

Исследования масштабируемого макета ЗС типа «ромбовидная меандровая линия с несколькими диэлектрическими опорами и гребнями» показали, что данная система может работать в частотном диапазоне 60 - 90 ГГц. На основании проведенных исследований, можно говорить о том, что в дальнейшем данный макет может быть использован для подробного расчета электродинамических характеристик.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 – Бушуев Н.А., Шалаев П.Д., Кириченко Д.И., Бабанов А.Ж. Результаты разработки технологии замедляющих систем ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.
- 2 – Bo Qu, Zhiliang Li и др. Design and Experimental Study of an E-Band CW Space TWT. Article in IEEE Transactions on Plasma Science · April 2023.
- 3 – Р.А. Торгашов, Н.М. Рыскин, А.Г. Рожнев, А.В. Стародубов и др. Исследование миниатюрной замедляющей системы на диэлектрической подложке для низковольтной лампы бегущей волны миллиметрового диапазона. Доклад для конференции июнь 2019 г.
- 4 – Zhanliang Wang, Liangxin Su. Investigation on a Ka Band Diamond-Supported Meander-Line SWS. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (2020).
- 5 – Citation: Wang, Y.; Dong, и др. Multiple Dielectric-Supported Ridge-Loaded Rhombus-Shaped Wideband Meander-Line Slow-Wave Structure for a V-Band TWT. Electronics 2022, 11, 405. [https:// doi.org/10.3390/electronics11030405](https://doi.org/10.3390/electronics11030405).
- 6 – Zheng Wen, Jirun Luo, Ying Li. A Concentric Arc Meander Line SWS for Low Voltage, High Efficiency, and Wide Bandwidth V-Band TWT with Dual Sheet Beam. Article in IEEE Transactions on Plasma Science May 2021.