

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

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Компьютерное моделирование электродинамических характеристик  
замедляющих систем лестничного типа для ЛБВ миллиметрового  
диапазона**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 4031 группы  
направления 03.03.03 «Радиофизика»  
Института Физики  
Колесниченко Евгении Евгеньевны

Научный руководитель  
доцент кафедры физики  
открытых систем, к.ф.-м.н.

01.06.23

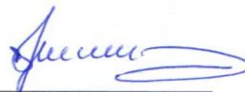


дата, подпись

А.Б. Адилова

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

01.06.23



дата, подпись

С.В. Гришин

Саратов 2023 год

**Актуальность темы работы.** Субтерагерцевый (суб-ТГц) диапазон является промежуточным между миллиметровым и терагерцевым диапазонами в электромагнитном спектре. Он охватывает частоты от 100 ГГц до 300 ГГц (волны длиной от 3 мм до 1 мм). Освоение этого диапазона имеет большую актуальность в настоящее время, так как он обладает рядом перспективных свойств и может быть использован в различных сферах деятельности [1]. Одной из областей применения данного диапазона является телекоммуникация. Этот диапазон может быть использован для создания высокоскоростных беспроводных связей, которые могут передавать данные со скоростью до 100 Гбит/с. Также может быть использован для создания сетей связи в помещениях с высокой плотностью людей, таких как аэропорты и торговые центры. Еще одной областью применения субтерагерцевого диапазона является медицина. Этот диапазон может быть использован для создания новых методов диагностики и лечения заболеваний. Например, излучение может использоваться для обнаружения раковых клеток в ранней стадии, а также для лечения некоторых заболеваний, таких как рак кожи. Также он может быть использован для создания новых материалов и устройств. Он может быть использован для создания новых полупроводниковых материалов, которые могут быть использованы в электронике и солнечных батареях. Помимо этого, он может быть использован для создания новых устройств детектирования, таких как датчики газа и влаги.

Таким образом, освоение субтерагерцевого диапазона имеет большую актуальность и может быть использовано в различных областях, таких как телекоммуникация, медицина и создание новых материалов и устройств.

Среди различных источников когерентного излучения суб-ТГц диапазона частот особый интерес представляют приборы вакуумной электроники, поскольку они позволяют получить уровни мощности в десятки и сотни ватт в сочетании с широким диапазоном рабочих частот [2]. Перспективным направлением является создание малогабаритных

усилителей на основе лампы бегущей волны (ЛБВ) с многолучевыми ленточными электронными пучками, которые взаимодействуют с полями пространственно-развитых замедляющих систем (ЗС). Использование подобных пучков позволяет повысить выходную мощность прибора, уменьшая при этом плотность тока каждого пучка по сравнению с однолучевой конструкцией. Это в свою очередь продлевает время жизни катода, а также облегчает фокусировку пучка.

В данной работе представлены результаты исследования электродинамических характеристик лестничной ЗС, которая представляет собой закрепленную в волноводе металлическую пластину с периодическими вырезами в форме прямоугольных щелей, а также её модификаций. Несмотря на то, что подобные ЗС описывались зарубежными и отечественными учеными с 1950-х годов [3,4], подробное исследование их характеристик с помощью современных пакетов численного моделирования по-прежнему представляет интерес.

**Цель данной работы** состоит в исследовании электродинамических характеристик ЗС лестничного типа суб-ТГц диапазона и определении оптимальных параметров ЗС, при которых возможно широкополосное усиление.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. ознакомиться с существующими моделями и их электродинамическими характеристиками;
2. провести численное моделирование замедляющих систем различного типа.

**Методы исследования.** В данной работе для численного моделирования использовался программный пакет COMSOL Multiphysics [5], основанный на методе конечных элементов. Он позволяет с высокой точностью проводить расчет электродинамических характеристик в трехмерной постановке. Выпускная квалификационная работа состоит из

Введения, четырех глав, списка литературы и заключения.

**Основное содержание работы.** В первой главе описан принцип работы в программном пакете COMSOL Multiphysics, который используется для моделирования физических процессов устройств в различных областях науки и техники, включая комбинированные задачи электротехники и электродинамики, механики жидкости и теплопередачи, динамики и акустики, химии и электрохимии. Весь процесс моделирования можно разделить на несколько основных этапов. Во-первых, определить все геометрические параметры системы для дальнейшего построения геометрической модели. Следующим этапом является описание материалов системы и их свойства. В данной работе исследуются медный прямоугольный волновод и замедляющая система в нём. Пространство между замедляющей системой (ЗС) и волноводом является вакуумом. Также на данном этапе выбираются основные физические и электромагнитные свойства материалов, такие как электрическая и магнитная проницаемости. В-третьих, необходимо задать управляющие уравнения и граничные условия. В данном пункте задаются основные уравнения для расчета электродинамических характеристик системы. При задании уравнений важно учитывать направление распространения волны, так как в зависимости от выбранной координаты будут меняться некоторые компоненты уравнений. В данной работе мы рассматриваем такие электродинамические характеристики как дисперсионные характеристики, замедление и сопротивление связи. Также задаются пространство взаимодействия в системе и периодические граничные условия. Следующим этапом идёт генерация конечно-элементной сетки. Данный процесс заключается в создании сеточной структуры, которая используется для численного решения уравнений, описывающих поведение физической системы. Сетка состоит из узлов и элементов, которые определяют геометрию системы. При генерации сетки необходимо учитывать различные факторы, такие как форма и размеры системы, требуемая точность решения, а также особенности расчетной

методики. Одним из важных аспектов является правильное размещение узлов и элементов, чтобы обеспечить достаточную точность решения при минимальном количестве элементов. Также необходимо учитывать особенности граничных условий и периодических условий, если они используются. Далее идёт изучение системы и её основных характеристик. Последним этапом является визуализация и обработка результатов. Происходит обработка и вывод результатов в различных форматах, в зависимости от требования пользователя. Возможны различные формы обработки результатов от графических до анимационных.

В главе 2 рассматривается простая модель замедляющей системы лестничного типа. С помощью численного моделирования рассчитываются её основные электродинамические характеристики в зависимости от геометрии системы.

Замедляющая система представляет собой пластину с щелями, вид которой представлен на рис. 1.

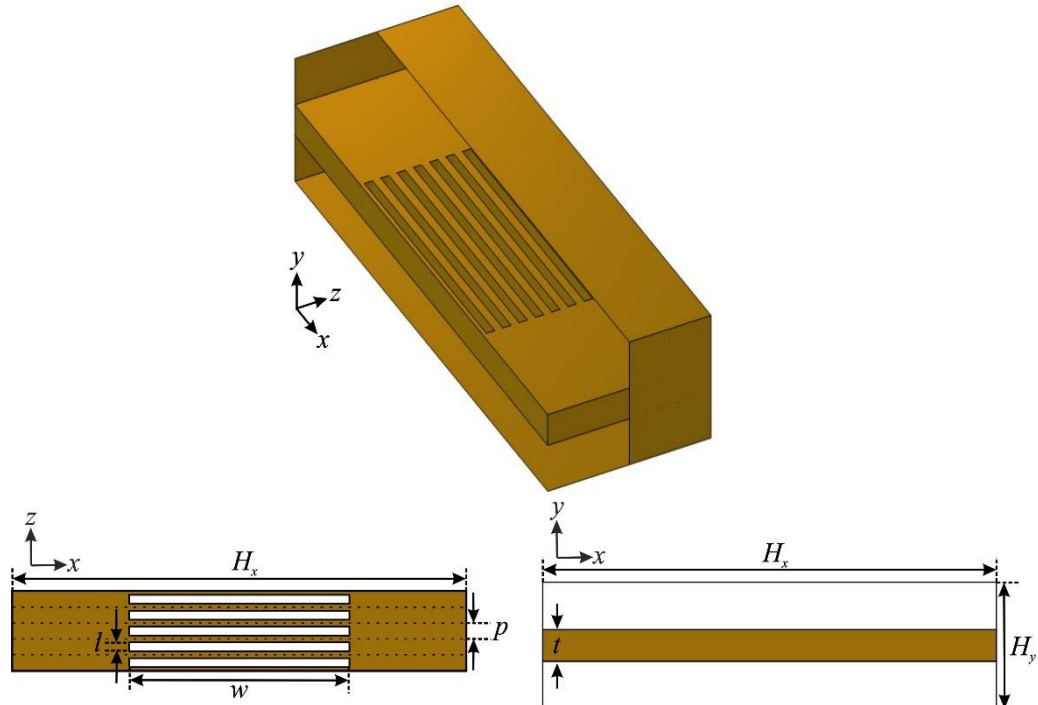


Рис. 1. Геометрическая модель замедляющей системы в прямоугольном волноводе.

Было показано, что изменение геометрических размеров волновода может влиять на ширину полосы пропускания системы. Результаты

численного моделирования показали, что ширина волновода обратно пропорциональна нижней отсечке полосы пропускания, чем шире волновод, тем меньше нижняя отсечка. Стоит отметить, при этом высота волновода не оказывает существенного влияния на дисперсионную характеристику.

В работе проводилось исследование при изменении основных геометрических параметров таких, как длина щели, ширина щели, а также период системы. Было получено, что изменение длины щели не влияет на нижнюю отсечку дисперсионной характеристики, но существенно изменяет верхнюю. При приближении длины щели к длине волновода полоса пропускания становится бесконечно маленькой. Моделирование системы при вариации остальных параметров щели, показало незначительное изменение ширины полосы пропускания.

Также было рассмотрено двадцать мод для оптимальной геометрии системы. Полученные моды можно разделить на две группы: поперечные и объёмные. При этом диапазон частот всех полученных мод лежит в диапазоне от волноводной отсечки первой моды до Брэгговской частоты, которая зависит от периода системы. Изучение структуры электромагнитного поля показало, что большая часть поля сконцентрирована в объёме щели замедляющей системы. В зависимости от моды можно наблюдать несколько значений максимумов амплитуды электрического поля в пространстве щели.

Недостатком данной системы является очень крутая дисперсионная характеристика, что говорит об очень маленьком диапазоне взаимодействия системы. Для изменения вида дисперсионной характеристики модифицируют форму геометрии замедляющей системы в волноводе. Основным влияющим фактором является изменение формы волновода путем добавления в него различных пазов и выступов.

В **главе 3** описывается система с выступами, так называемый Н-образный волновод. Геометрия системы представлена на рис. 2.

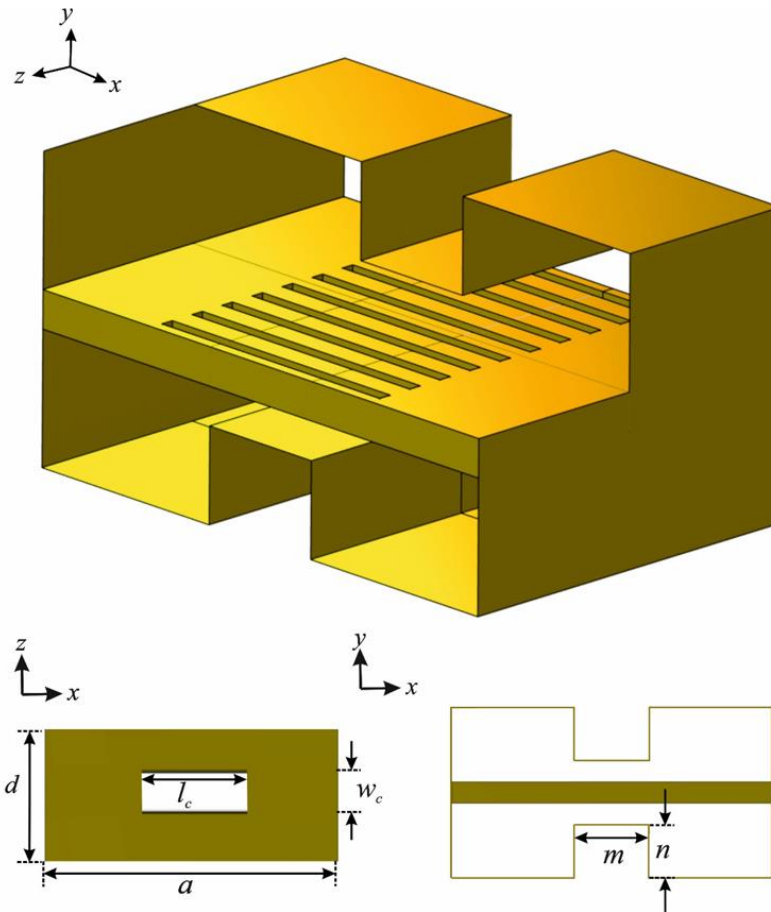


Рис. 2. Геометрическая модель замедляющей системы в H-образном волноводе.

В данной системе основными геометрическими параметрами, влияющими на дисперсионную характеристику системы, являются характеристики гребня: его ширина и глубина.

Результаты численного моделирования показали, что глубина гребня влияет на изменение отсечки. Увеличение глубины гребня повышает нижнюю отсечку дисперсионной характеристики. Отсечка перестаёт изменяться при достижении глубины гребня половины ширины волновода. При изменении ширины гребня можно наблюдать параболическую зависимость, минимум которой, и соответственно самая минимальная отсечка полосы пропускания достигаются при ширине гребня примерно равной ширине волновода. При дальнейшем увеличении ширины гребня происходит рост отсечки, значение которой стремится к значению отсечки волновода без гребня.

Также возможна модификация самой щели в пластине. Её изменения приводят к тем же результатам, полученным во второй главе работы для системы с прямоугольным волноводом.

В главе 4 рассматривается другая модификация волновода, которая осуществляется с помощью пазов в волноводе. Геометрическая модель такой системы представлена на рис. 3.

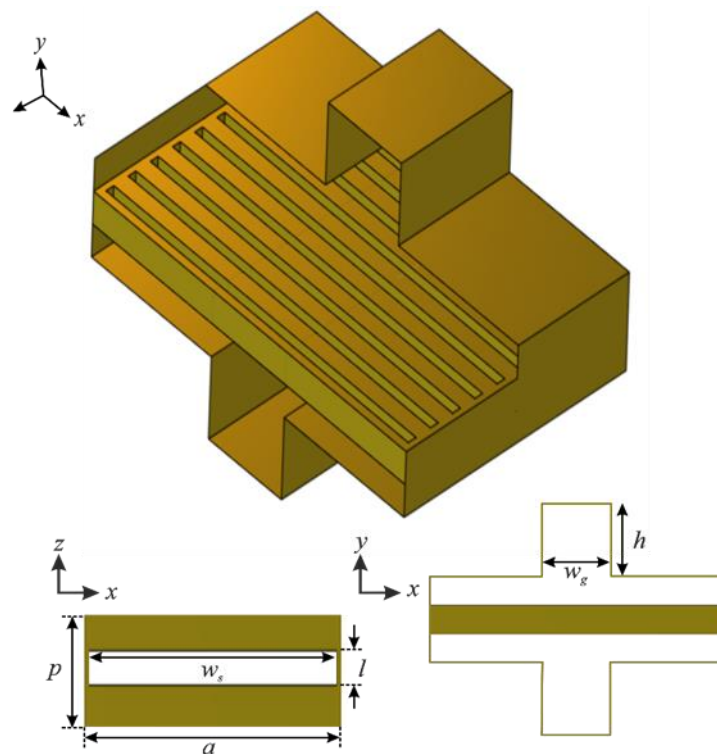


Рис. 3. Геометрическая модель замедляющей системы в волноводе с выступами.

В данной модели существенное влияние на дисперсионную характеристику оказывают такие геометрические параметры, как ширина и глубина паза, а также длина щели в замедляющей системе.

При изменении глубины паза щелевая отсечка возрастает. При достижении глубины паза значения равного примерно половине ширине волновода, значение отсечки перестаёт существенно меняться. При изменении ширины гребня максимальное значение отсечки достигается при ширине равной половине ширине волновода. Далее при увеличении ширины гребня ширина полосы пропускания уменьшается. Также было исследовано влияние на вид дисперсионной характеристики длины щели, поскольку при



её изменении происходит переход от нормальной дисперсии к аномальной. Для получения аномальной дисперсии в данной системе длина щели должна быть примерно равна ширине волновода. При этом резкое изменение щелевой отсечки происходит при равенстве длины щели и ширине гребня, далее происходит плавное уменьшение щелевой отсечки, что и способствует вырождению аномальной дисперсии.

В случае, когда длина щели становится примерно равной ширине волновода, замедляющая система начинает приобретать свойства метаматериала, так как её электрическая и магнитная проницаемости становятся меньше 0.

**Заключение.** В данной работе с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics проведено численное моделирование замедляющих систем лестничного типа с различными модификациями геометрической модели системы. Были рассмотрены три вида замедляющих систем в прямоугольных волноводах.

Была получена дисперсионная характеристика замедляющей системы в прямоугольном волноводе. Ширина полосы пропускания менялась в зависимости от геометрических параметров системы, а именно: при увеличении ширины волновода нижняя отсечка характеристики опускается, а при уменьшении длины щели возрастает верхняя отсечка характеристики.

Для замедляющей системы в волноводе с гребнями увеличение полосы пропускания происходит за счет изменения геометрических параметров гребня. Оптимальными значениями гребня для достижения минимальной волноводной отсечки является равенство ширины и глубины гребня, значения которых равняются половине ширине волновода.

С помощью численного моделирования была получена дисперсионная характеристика замедляющей системы в волноводе с дополнительными пазами. Максимальное значение волноводной отсечки достигается при ширине и глубине паза примерно равными половине волновода. Изменение длины щели приводит к уменьшению щелевого резонанса, что приводит к

изменению типа дисперсионной характеристики. При достижении длины щели ширины волновода происходит вырождение аномальной дисперсии. В случае, когда щелевой резонанс оказывается ниже волноводного, замедляющая система начинает проявлять свойства метаматериала с отрицательными  $\epsilon$  и  $\mu$ .

#### **Список используемых источников**

1. Григорьев А. Д. Терагерцовая электроника. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. 308 с.
2. Сушков А. Д. Вакуумная электроника, М.: Лань, 2004. 464 с.
3. Arthur Karp, Traveling-Wave Tube Experiments at Millimeter Wavelengths with a New, Easily Built, Space Harmonic Circuit. – 1955
4. Альтшулер Ю. Г., Татаренко А. С. Лампы малой мощности с обратной волной. М.: Советское радио, 1963. 296 с.
5. Comsol Multiphysics Engineering Simulation Software (COMSOL Inc., Burlington, MA, 2020), see <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>