

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 ЛБВ миллиметрового  
диапазона длин волн**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 4 курса 4031 группы  
направления 03.03.03 «Радиофизика»  
Института Физики  
Найденова Даниила Сергеевича

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



04.06.26

подпись, дата

А.В. Титов

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



подпись, дата

04.06.26г.

С.В. Гришин

Саратов 2026 г.

## **Введение**

Развитие современных радиолокационных систем, телекоммуникационных комплексов и средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) требует постоянного совершенствования приборов сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники. Особое внимание уделяется освоению миллиметрового диапазона частот, который занимает промежуточное положение между микроволновым и оптическим диапазонами.

Переход в миллиметровый диапазон открывает принципиально новые возможности: значительное увеличение скорости передачи данных, повышение разрешающей способности радиолокационных станций (РЛС), а также создание новых средств РЭБ с повышенной скрытностью и помехозащищённостью. Однако физические особенности распространения сигналов в миллиметровом диапазоне обуславливают необходимость поиска новых технических решений [1]. Одним из ключевых типов усилительных приборов в этом диапазоне является лампа бегущей волны (ЛБВ). С переходом в миллиметровую область требования к конструкции ЛБВ существенно возрастают, и ключевое значение приобретает задача обеспечения эффективного взаимодействия электронного пучка с электромагнитным полем.

Ключевым узлом ЛБВ, определяющим эффективность этого взаимодействия, является замедляющая система (ЗС). Именно геометрия ЗС задаёт дисперсионную характеристику, сопротивление связи, нормированную фазовую скорость и замедление – параметры, от которых напрямую зависят выходная мощность, коэффициент усиления и рабочий диапазон частот ЛБВ. Перспективной для использования в ЛБВ миллиметрового диапазона является замедляющая система на основе сдвоенной гребенчатой структуры с шевронными выступами (англ. Chevron-Shape Double-Staggered Grating Waveguide), известная в англоязычной литературе как C-DSGW.

В рамках данной выпускной квалификационной работы проведено компьютерное моделирование ЗС типа С-DSGW в программе Ansys HFSS [2]. Были исследованы её дисперсионные характеристики, замедление, нормированная фазовая скорость и сопротивление связи в миллиметровом диапазоне частот.

Цель работы: численное моделирование и анализ характеристик замедляющей системы С-DSGW для ЛБВ миллиметрового диапазона с помощью программного обеспечения Ansys HFSS [2].

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести обзор актуальных публикаций ЗС посвящённых ЛБВ;
2. Построить 3D-модель одного периода С-DSGW в программе Ansys HFSS;
3. На основе обзора научных публикаций рассчитать характеристики выбранной ЗС.

## Основное содержание работы

В первой главе рассмотрены современные научные публикации, посвящённые проектированию замедляющих систем для ламп бегущей волны, работающих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.

Сопоставление различных подходов, представленных в этих работах, позволяет выделить основные тенденции развития в данной области: переход к более сложным трёхмерным моделям, использование последовательной оптимизации на основе расчёта характеристик и учёт технологических ограничений при проектировании.

Далее проанализированы работы [3-7], в которых исследуются следующие типы замедляющих систем: синусоидальная ЗС с плоской верхушкой, петляющий волновод с прямоугольным пазом и гребневой нагрузкой, петляющий волновода W-диапазона, ЗС на основе имитации поверхностных плазмон-поляритонов и шевронный сдвоенный встречно-штыревой волновод.

Обзор научной литературы позволил оценить текущее состояние исследований в этой области, а также его дальнейшее направление – создание новых геометрических моделей замедляющих систем, которые направлены на улучшение электродинамических характеристик.

Во второй главе была выбрана модель для дальнейших исследований в рабочей программе HFSS [2]. Из представленных мною научных публикаций [3-7] особое внимание было решено уделить статье [7]. Важным фактором выбора данной статьи является то, что она содержит достаточное количество геометрических параметров, необходимых для построения и анализа периода модели ЗС, что позволяет провести детальное исследование выбранной структуры. Кроме того, предложенная в работе [7] замедляющая система типа C-DSGW представляет собой модификацию классического волновода с двойной шахматной решёткой, в которой прямоугольные штыри заменены на шевронные выступы с углом наклона  $\alpha$ .

Целью моделирования являлось получение масштабируемой модели одного периода замедляющей системы, предназначенной для работы в миллиметровом диапазоне частот, и последующий численный расчёт её электродинамических характеристик.

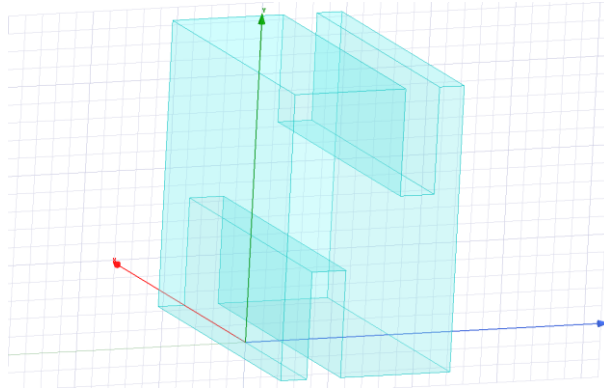


Рис. 1 – Итоговая модель периода ЗС типа C-DSGW при  $\alpha$  и  $\beta = 0^\circ$ .

Помимо случая при  $\alpha$  и  $\beta = 0^\circ$  построены параметрические модели периода замедляющей системы C-DSGW для всех исследуемых значений угла наклона. Внешний вид полученных моделей представлен на Рис. 2.



Рис. 2 – Параметрические модели периода ЗС C-DSGW при различных значениях углов наклона: (а)  $\alpha = 2.5^\circ$  и  $\beta = -2.5^\circ$ , (б)  $\alpha = 5^\circ$  и  $\beta = -5^\circ$ , (в)  $\alpha = 7.5^\circ$  и  $\beta = -7.5^\circ$ , (г)  $\alpha = 10^\circ$  и  $\beta = -10^\circ$ .

В данной главе построена и подготовлена к расчёту трёхмерная параметрическая модель периода замедляющей системы типа C-DSGW в программном комплексе Ansys HFSS [2]. Построенные модели полностью готовы к проведению численных расчётов.

В третьей главе выполнялся расчёт электродинамических характеристик замедляющей системы (при разных значениях параметра угла наклона) используя формулы взятые из [8-9]. Результаты представлены ниже.

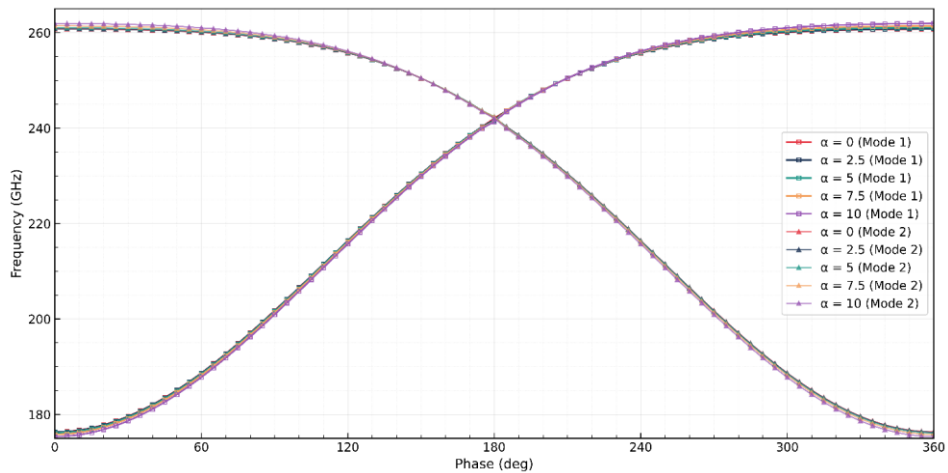


Рис. 3 – Дисперсионные характеристики ЗС при разных значениях угла наклона.

Затем была построена зависимость замедления от частоты при нулевой пространственной гармонике при различных значениях угла наклона  $\alpha$  (Рис. 4).

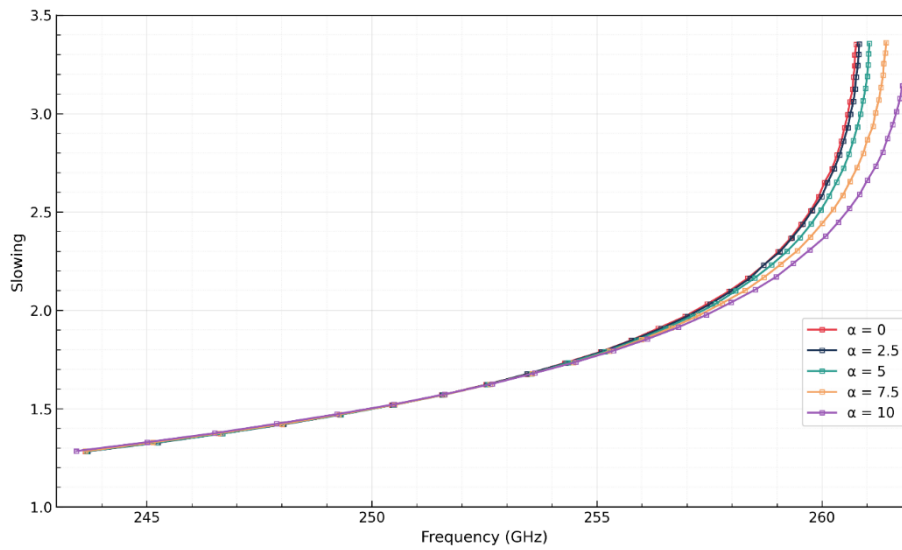
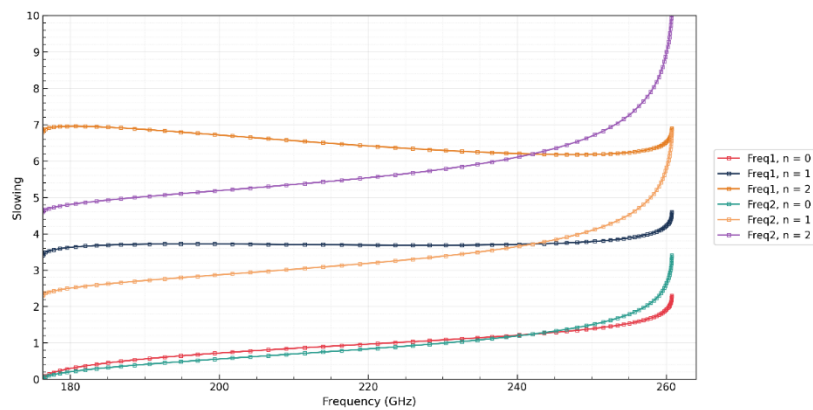
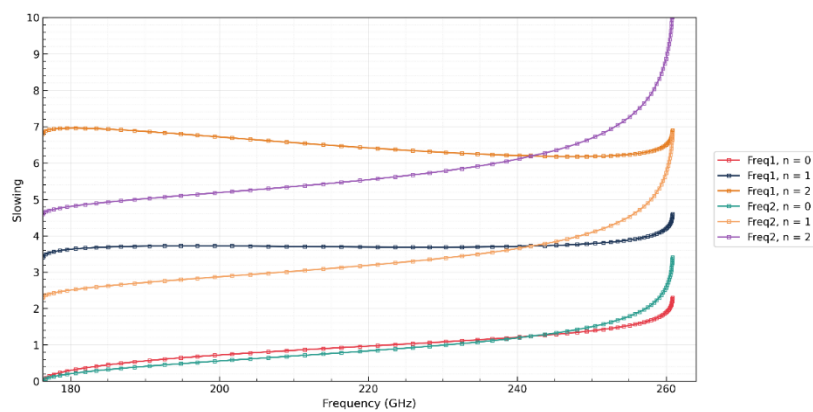


Рис. 4 – Зависимость замедления от частоты.

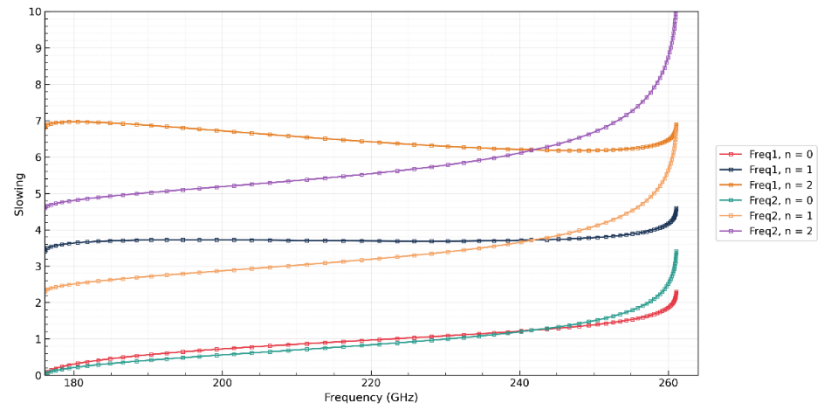
Также был проведён расчёт других пространственных гармоник, включающих нулевую. Результаты численного расчёта представлены на Рис.5.



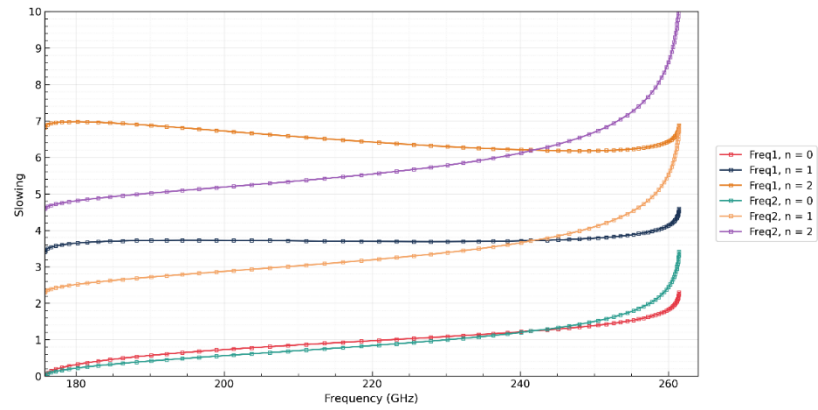
(a)



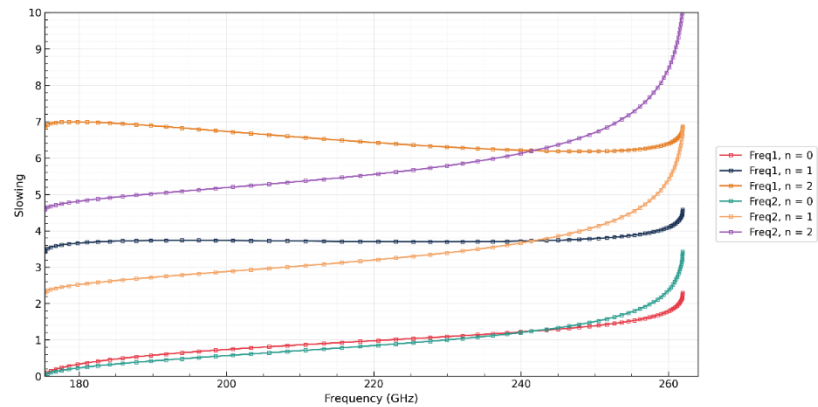
(б)



(B)



(Г)



(Д)

Рис. 5 – Зависимость замедления от частоты для пространственных гармоник  $n = 0, 1, 2$  при различных углах наклона: (а)  $\alpha = 0^\circ$ , (б)  $\alpha = 2.5^\circ$ , (в)  $\alpha = 5^\circ$ , (г)  $\alpha = 7.5^\circ$ , (д)  $\alpha = 10^\circ$

На Рис. 6 представлена зависимость нормированной фазовой скорости от частоты для различных значений угла наклона.

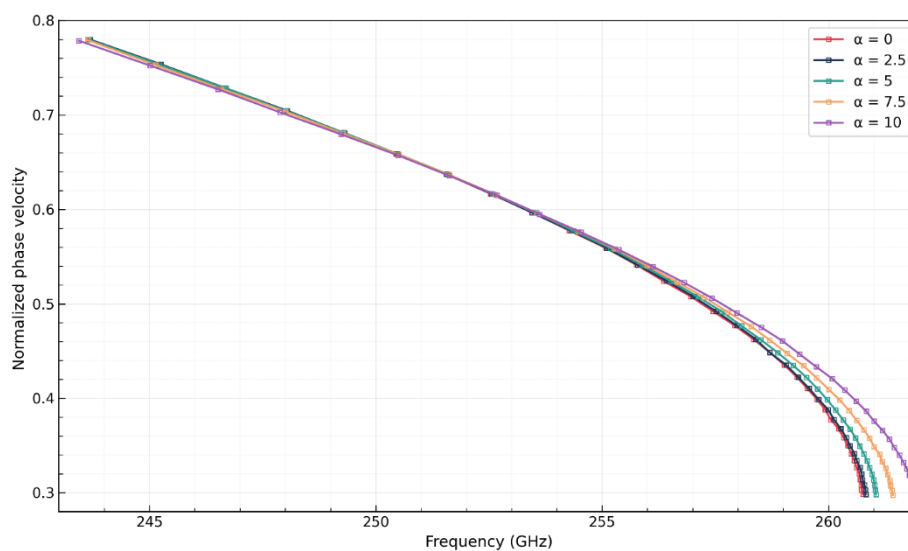


Рис. 6 – Зависимость нормированной фазовой скорости от частоты.

На Рис. 7 представлена зависимость сопротивления связи от частоты для различных значений угла наклона, полученная в результате численного моделирования в Ansys HFSS.

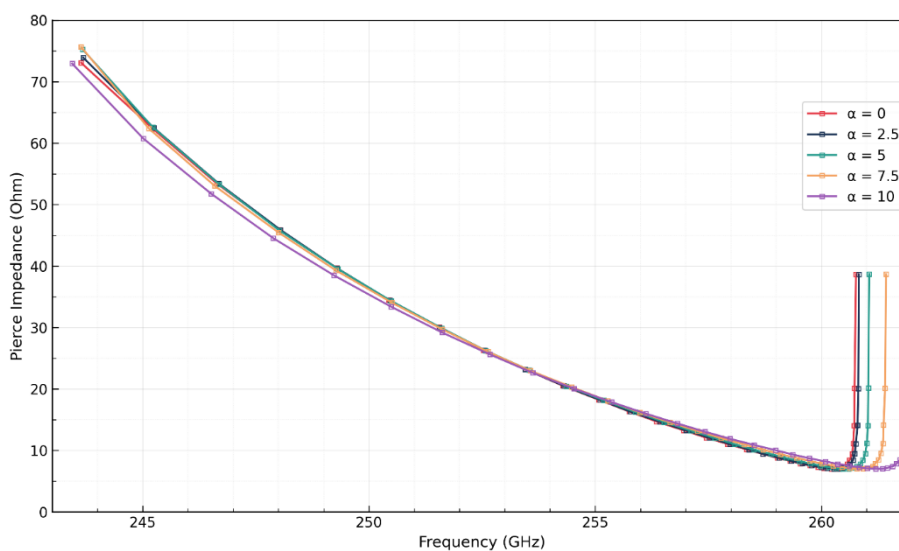


Рис. 7 – Зависимость сопротивления связи от частоты.

## Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы проведено численное моделирование и анализ электродинамических характеристик замедляющей системы типа C-DSGW для ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн с использованием программного комплекса Ansys HFSS.

В первой главе проведён обзор современных публикаций, посвящённых замедляющим системам для ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Проведённый обзор показал, что ни одна замедляющая система не является универсальной и имеет как свои преимущества, так и недостатки.

Во второй главе на основе обзора научных публикаций [3-7] была выбрана ЗС представленная в статье [7]. Затем было описано её пошаговое построение используя различные инструменты программы HFSS.

В третьей главе рассчитаны дисперсионные характеристики, замедление, нормированная фазовая скорость и сопротивление связи. Сравнение полученных результатов с данными статьи [7] подтвердило качественное совпадение: увеличение угла наклона ведёт к снижению нормированной фазовой скорости и повышению сопротивления связи. Количественные различия объясняются разницей в методиках расчёта (интегрирование по линии против усреднения по площади пучка).

Таким образом, все поставленные задачи выполнены. Подтверждено, что замедляющая система C-DSGW является перспективной для ЛБВ миллиметрового диапазона, а варьирование угла наклона позволяет эффективно управлять её характеристиками.

## Библиографический список

1. Singh R., Ahmad I., Abbasi M. A. B., Kokkonieni J. A Survey on Security of Terahertz Communications // 2024 IEEE Future Networks World Forum (FNWF). 2025.
2. Банков С.Е, Гутцайт Э.М, Курушин А.А. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS. М.: Оркада, 2012, 242 с.
3. Fang S., Xu J., Yin H., Lei X., Jiang X., Yin P., Wu G., Yang R., Li Q., Guo G., Yue L., Zhao G., Wang W., Xu X., Shen F., Wei Y. Experimental verification of the low transmission loss of a flat-roofed sine waveguide slow-wave structure // IEEE Electron Device Lett. 2019. Vol. 40, No. 5. P. 808–811.
4. Tian Y., Yue L., Wang H., Zhou Q., Wei Y., Hao B., Wei Y., Gong Y. Investigation of ridge-loaded folded rectangular groove waveguide slow-wave structure for high-power terahertz TWT // IEEE Trans. Electron Devices. 2018. Vol. 65, No. 4. P. 1–7.
5. Галдецкий А.В., Богомолова Е.А., Натура И.П., Соколова И.М., Сапрынская Л.А. Проектирование лампы бегущей волны W-диапазона // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Т.1. 2017 — С. 123–127.
6. 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.
7. Babaeihaselghobi A., Akram M. N., Ghavifekr H. B., Billa L. R. A novel chevron-shape double-staggered grating waveguide slow wave structure for terahertz traveling wave tubes // IEEE Trans. on Electron Devices. 2020. Vol. 67, No. 8. P. 1–7.
8. Лебедев И. В.; под ред. Н. Д. Девяткова. Техника и приборы СВЧ: учебник для вузов по специальности «Электронные приборы». Т. I: Техника сверхвысоких частот — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М: Высш шк 1970. С. 370–414.

9. Золотых Д. Н., Роговин В. И. Проектирование замедляющих систем электровакуумных приборов СВЧ с длительным взаимодействием и анализ электродинамических характеристик СГУ Саратов: Наука, 2016. 68 с.