

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра нелинейной физики

**Моделирование процессов распространения электромагнитных волн в
замедляющих системах типа цепочки связанных резонаторов**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 4011 группы

направления 03.03.01 Прикладные математика и физика

Института физики

Юриной Татьяны Александровны

Научный руководитель

доцент кафедры динамических систем

на базе СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,

к.ф.-м.н.



подпись, дата

А.А. Ростунцова

Зав. кафедрой

нелинейной физики

к.ф.-м.н., доцент



подпись, дата

Е.Н. Бегинин

Саратов 2026 г.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день СВЧ электроника является одной из самых объёмных и актуальных сфер науки и техники. СВЧ приборы используются во многих научных и практических приложениях, включая высокоскоростные системы беспроводной передачи данных, разработку космических телекоммуникаций, ускорительную технику, радиоастрономию, термоядерный синтез и многое другое [1-2]. В настоящее время исследования в области СВЧ электроники направлены на уменьшение размеров приборов, увеличение мощностей и освоение более высоких диапазонов частот [3,4]. Развитию в данных направлениях способствуют новые исследования в области теории поля и электронно-волнового взаимодействия, а также появление и стремительный прогресс компьютерного моделирования.

Одними из важнейших приборов СВЧ электроники являются лампы бегущей волны (ЛБВ), способные усиливать сигнал в широком диапазоне частот [2,5-8]. Коэффициент усиления и диапазон усиливаемых частот варьируются в зависимости от конструкции прибора. В том числе, ключевое влияние оказывает выбор замедляющей системы (ЗС). ЗС – это узел ЛБВ, в котором происходит взаимодействие электромагнитной волны с пучком электронов [9]. Основная цель ЗС – уменьшение фазовой скорости волны таким образом, чтобы выполнялись условия синхронизма, когда скорость электронов приблизительно равна фазовой скорости волны.

В настоящее время активно ведётся разработка ЛБВ W-диапазона (75-110 ГГц), которые могут найти применение для передачи большого объема данных в космических и наземных телекоммуникационных системах, в том числе, для межспутниковой связи [3,4]. Однако при продвижении в область более высоких частот уменьшаются характерные размеры ключевых элементов ЛБВ, что значительно усложняет разработку и производство таких устройств в силу ограниченной точности известных на данный момент технологий. В том числе, уменьшаются поперечные размеры электронных пучков, с которыми происходит взаимодействие, из-за чего значительно

увеличиваются плотности тока, необходимые для достижения тех же самых уровней мощности, что и в низкочастотных диапазонах. Однако высокие плотности тока довольно трудно реализовать в силу сложности теплоотвода и фокусировки электронного пучка. Для решения этой проблемы актуальна разработка пространственно-развитых ЗС, в которых осуществляется взаимодействие с одним или несколькими ленточными электронными пучками [10,11].

Одной из известных конструкций ЗС, использующихся в ЛБВ-усилителях, является цепочка связанных резонаторов (ЦСР) [5-9]. Достоинствами ЦСР являются высокое сопротивление связи, простота изготовления и устойчивость к нагрузкам. ЦСР появились и начали активно использоваться ещё в середине прошлого века. В частности, в работе [12] была представлена конструкция ЛБВ типа М4040, которая предназначена для работы в С-диапазоне (4-8 ГГц) и была разработана в 1960-х годах для проекта «Телстар» по созданию первых космических активных спутников связи.

Однако для того, чтобы использовать ЗС типа ЦСР в W-диапазоне, требуется модификация структуры, позволяющая улучшить её электродинамические характеристики при продвижении в более высокий диапазон частот, адаптировать конструкцию для использования многолучевых ленточных электронных пучков и учесть особенности потенциально возможных технологий сборки таких систем. Более того, теоретический анализ ЛБВ с ЦСР чаще всего проводился с помощью приближенных аналитических методов, в то время как сейчас существуют средства компьютерного моделирования, позволяющие проводить более точные вычисления. К числу таких средств относится программа компьютерного моделирования полей различной физической природы COMSOL Multiphysics, в которой есть модуль моделирования электромагнитных полей СВЧ диапазона, использующий метод конечных элементов [13]. Результаты компьютерного моделирования в COMSOL упрощают задачу оптимизации конструкций ЗС в целях улучшения выходных параметров ЛБВ.

Таким образом, тема выпускной квалификационной работы является **актуальной**.

Целью работы является моделирование распространения волн в ЗС типа ЦСР, на основе которых возможно создание мощных ЛБВ-усилителей.

Основными **задачами** для достижения поставленной цели являлись:

- Моделирование в COMSOL Multiphysics электродинамики ЦСР для ЛБВ-усилителя типа М4040 и сопоставление с известными результатами;
- Разработка модифицированной конструкции ЛБВ с ЦСР с целью продвижения в W -диапазон частот;
- Исследование влияния геометрических параметров на основные характеристики ЗС: структуру мод, дисперсию и др.

Результаты выпускной квалификационной работы докладывались на студенческой научной конференции Института физики СГУ (2026).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, описаны сферы применения ЛБВ-усилителей, перечислены преимущества ЗС типа ЦСР, а также сложности при разработке ЗС в W -диапазоне, указаны современные методы исследования ЗС, сформулированы цель и задачи работы.

Глава 1 посвящена теоретическим основам электродинамики ЛБВ, а также методикам моделирования электродинамических параметров ЗС в программном пакете COMSOL Multiphysics.

В **Разделе 1.1** приведены физические принципы, лежащие в основе работы ЛБВ-усилителей, описана цель использования ЗС, перечислены основные электродинамические характеристики ЗС (дисперсия, коэффициент замедления, сопротивление связи) и представлены формулы для их расчёта. В **Разделе 1.2** рассмотрена ЗС типа ЦСР, её типичная конструкция и основные свойства. В **Разделе 1.3** описана методика использования COMSOL для

расчёта электродинамических характеристик ЗС на основе модели одного периода с периодическими граничными условиями Флоке.

Глава 2 посвящена моделированию ЗС типа ЦСР для ЛБВ-усилителя типа М4040 [12].

В **Разделе 2.1** представлена схема одного периода ЗС, построенная в COMSOL (рис. 1), и её геометрические размеры.

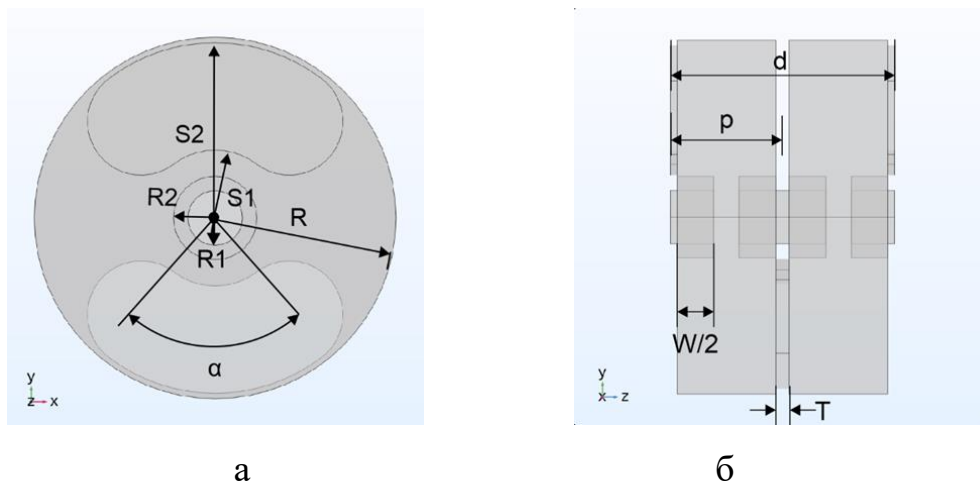


Рис. 1. Схема одного периода ЗС типа ЦСР для ЛБВ М4040 в проекциях (а) – xy (поперечное сечение) и (б) – yz (электронный пучок распространяется вдоль оси z).

В **Разделе 2.2** приведены результаты расчёта электродинамических характеристик ЗС.

Показано, что полоса пропускания первых двух мод ЗС находится в диапазоне от 5 до 6.2 ГГц (см. рис. 2). На дисперсионную диаграмму наложены линии пучка с учётом и без учёта релятивистских поправок при ускоряющем напряжении 12 кВ, которые демонстрируют возможность синхронизма с +1-ой пространственной гармоникой. Показано, что релятивистские эффекты оказывают заметное влияние на положение линии пучка.

Продемонстрировано, что для +1-ой гармоники существует диапазон частот, в котором коэффициент замедления n слабо зависит от частоты и принимает значения 4-5 (см. рис. 3, а), что соответствует ускоряющим напряжениям порядка 10 кВ. Также представлены результаты расчёта

сопротивления связи на оси системы (рис. 3, б). Показано, что для прямой гармоники оно составляет свыше 10 Ом, тогда как для обратной гармоники близко к нулю, что исключает риск паразитного самовозбуждения ЛБВ.

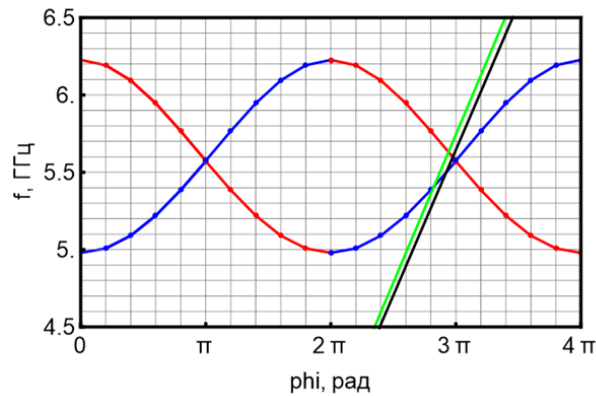


Рис. 2. Результаты расчёта дисперсионной характеристики для первых двух мод ЗС с ЦСР для ЛБВ типа М4040. Прямые линии – линии пучка при ускоряющем напряжении 12 кВ. Зелёная линия – нерелятивистский случай, чёрная линия – с учётом релятивистских поправок.

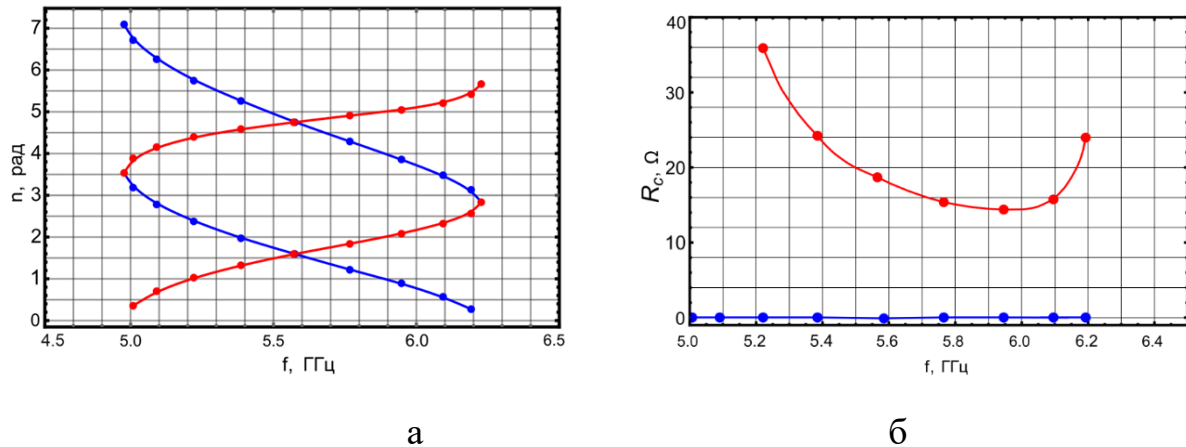


Рис. 3. Зависимости коэффициента замедления (а) и сопротивления связи (б) от частоты, полученные в численном моделировании. Красным цветом показаны прямые гармоники, синим – обратные.

Таким образом, продемонстрировано хорошее соответствие результатов расчёта в COMSOL с данными, известными из литературы [12]: полоса пропускания ЗС лежит в С-диапазоне (4-8 ГГц) и взаимодействие

осуществляется на +1-ой пространственной гармонике, что соответствует ускоряющим напряжениям порядка 10 кВ.

В *Разделе 2.3* исследуется структура мод ЗС, а также её трансформация при варьировании угла раскрыва щели связи (параметр α на рис. 1).

Рассчитаны две более высокие собственные моды одного периода ЗС. Показано, что качественно они выглядят идентично двум первым модам, однако лежат в более высоком диапазоне частот от 11 до 12.2 ГГц. Продемонстрировано, что две низшие моды являются резонаторными, поскольку E_z -компонента электрического поля в основном сосредоточена в резонаторах и, в том числе, в пролётном канале (см. рис. 4, а), в то время как две следующие моды являются щелевыми, у которых E_z сосредоточено в щелях (см. рис. 4, б). Поскольку взаимодействие с щелевой модой будет довольно слабым из-за отсутствия поля в канале, это исключает риск её паразитного самовозбуждения.

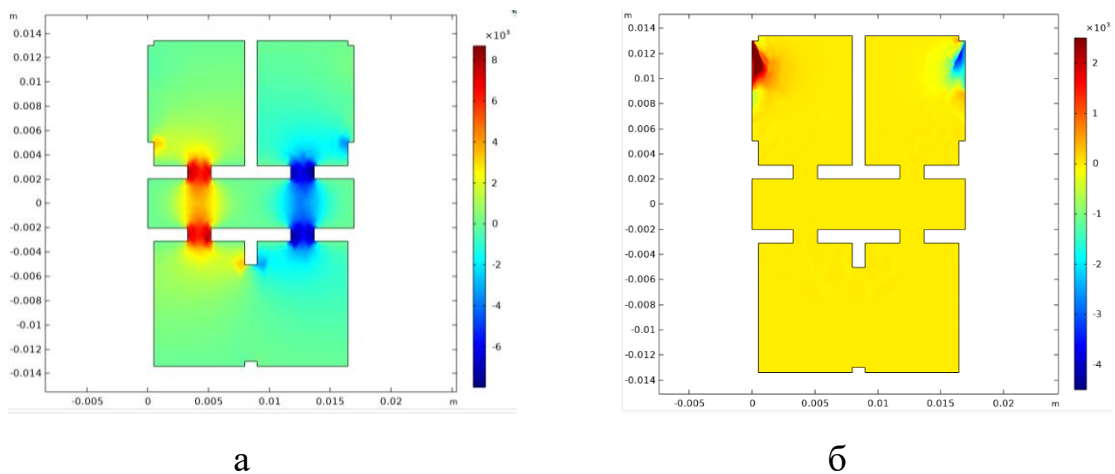


Рис. 4. Распределение E_z -компоненты электрического поля в сечении zy : (а) – резонаторная мода, (б) – щелевая мода.

Показано, что при увеличении угла раскрыва щели связи α верхняя отсечка практически не меняется, т.к. в основном определяется диаметром волновода (R_c на рис. 1), а нижняя отсечка плавно уменьшается, что означает расширение полосы пропускания (см. рис. 5). Проведено сопоставление с теоретической формулой [12]:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \sqrt{\frac{180}{180 - \alpha}}, \quad (1)$$

где ω_1 – частота нижней отсечки, ω_2 – частота верхней отсечки. Продемонстрировано, что при малых углах α соответствие между кривыми достаточно хорошее (см. рис. 5), однако с увеличением α теоретическая оценка начинает работать хуже. Также показано, что щелевая мода с увеличением α смещается вниз по частоте.

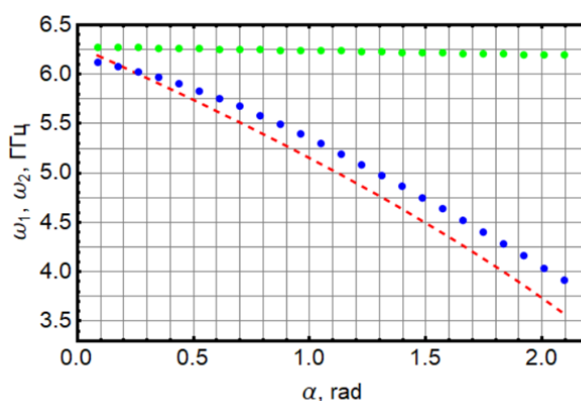


Рис. 5. Частоты верхней (зелёные точки) и нижней (синие точки) частот отсечек и линия теоретических значений частот нижней отсечки (красный пунктир).

Глава 3 посвящена разработке модифицированной ЗС на основе ЦСР с целью продвижения в W-диапазон (75-110 ГГц).

В **Разделе 3.1** описывается методика модификации ЗС. За основу была взята геометрия ЗС для лампы М4040. Для модификации были сделаны следующие шаги:

- Размеры ЗС были уменьшены в 20 раз, чтобы основная мода передвинулась в W-диапазон, и оптимизированы так, чтобы рабочие частоты лежали в окрестности 100 ГГц, а коэффициент замедления был порядка 4-5;
- Круглые элементы ЗС были заменены прямоугольными, что необходимо для возможности использования ленточных электронных пучков и упрощает моделирование и изготовление;

- Размеры канала для электронного пучка были увеличены так, чтобы ширина совпадала с шириной волновода, что может позволить использование пучков с большей площадью сечения.

Схема модифицированной конструкции ЗС представлена на рис. 6. Изготовление предложенной ЗС возможно на основе лазерной микрообработки импульсами наносекундной длительности [14].

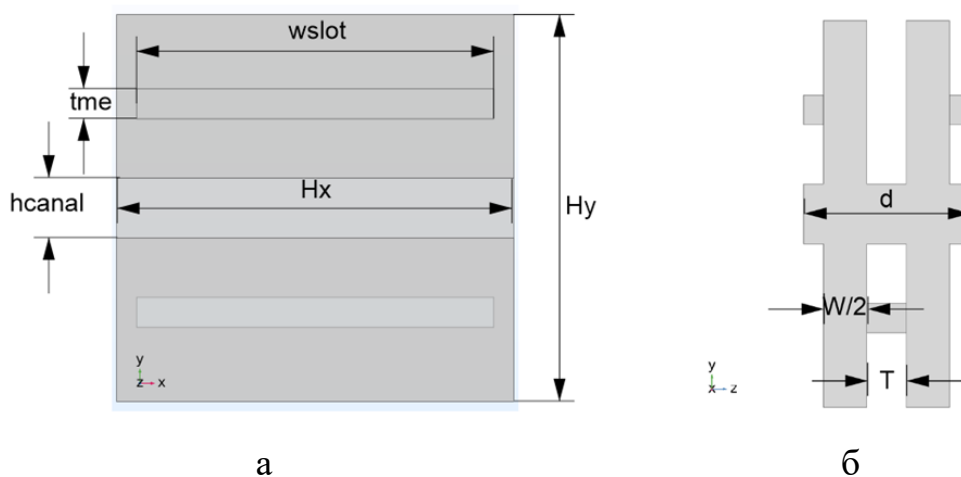


Рис. 6. Модифицированная модель ЗС с ЦСР в проекциях (а) – xy (поперечное сечение) и (б) – yz (электронный пучок распространяется вдоль оси z).

В *Разделе 3.2* приведены результаты расчёта электродинамических характеристик модифицированной ЗС. Рассчитано четыре первых собственных моды (рис. 7) и показано, что нижняя мода является щелевой (см. рис. 8, а), а верхняя (рабочая) мода – резонаторной (см. рис. 8, б).

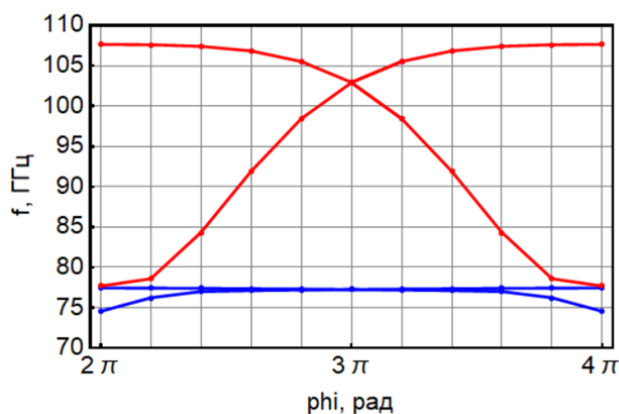


Рис. 7. Дисперсионная характеристика модифицированной ЗС.

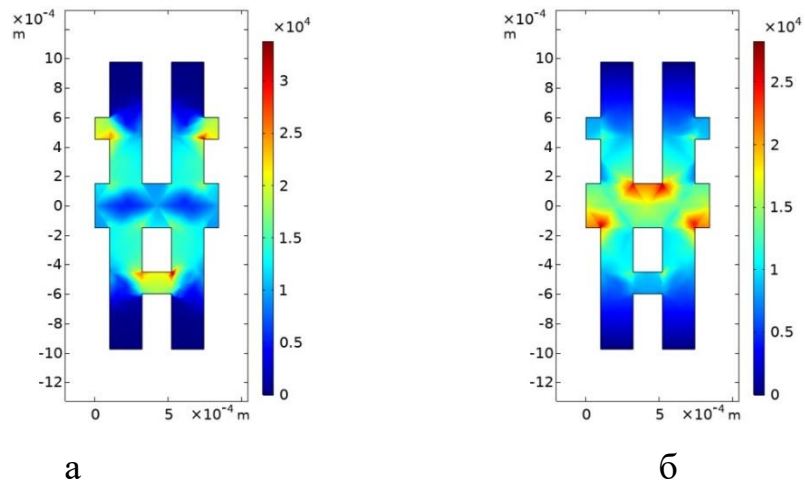


Рис. 8. Распределение E_z -компоненты электрического поля в сечении zy : (а) – щелевая мода, (б) – резонаторная мода.

Моды смыкаются на частоте 77 ГГц на 0π -виде колебаний. Поскольку щелевая мода является узкополосной, она обладает высоким сопротивлением связи, что увеличивает риск её самовозбуждения.

В *Разделе 3.3* исследуется влияние геометрии на электродинамические параметры ЗС. Рассмотрена структура мод при увеличении эффективной ширины щели связи, что возможно за счёт изменения её формы. Была исследована ЗС с П-образной щелью (рис. 9). Выявлено, что с ростом ширины щели щелевая мода смещается вниз по частоте, тогда как резонаторная остаётся на месте, и её полоса пропускания не меняется (75-107 ГГц).

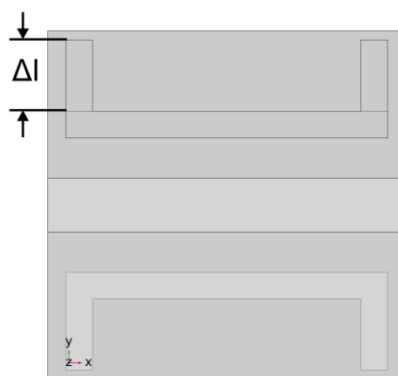


Рис. 9. Поперечное сечение модифицированной ЗС с П-образными щелями.

Показано, что при уменьшении ширины прямоугольной щели структура мод ЗС усложняется. На дисперсионной диаграмме (рис. 10) также существуют две ветки, которые сближаются в окрестности 95 ГГц. При этом все четыре собственных частоты лежат в области от 75 до 107 ГГц. Были проанализированы распределения E_z -компоненты поля при $\varphi = 13\pi/5$ для разных собственных мод. Для нижних мод поле в пролётном канале практически отсутствует, тогда как для верхних мод ситуация имеет противоположный характер. Во всех случаях поле в щелях отсутствует и в основном сосредоточено в резонаторах. Также рассчитано сопротивление связи на оси пучка и показано, что для прямой гармоники верхней моды оно превышает 1.8 Ом, в то время как для прямой гармоники нижней моды составляет менее 1 Ом.

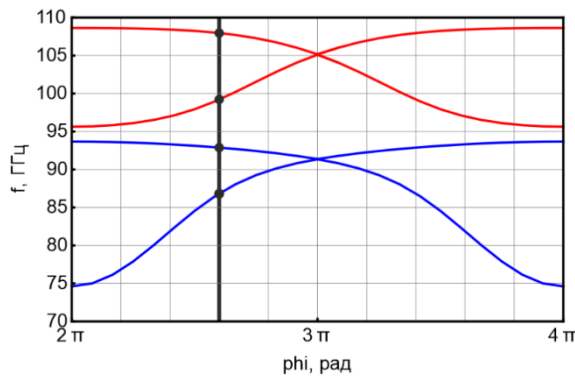


Рис. 10. Дисперсионная диаграмма для модифицированной ЗС при ширине щели $w_{slot} = 1200$ мкм. Прямая вертикальная линия - $\varphi = 13\pi/5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы получены следующие результаты:

1. Проведено моделирование ЗС с ЦСР для ЛБВ типа М4040 с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics.
2. Рассчитаны основные электродинамические характеристики ЗС с ЦСР для ЛБВ М4040 и проведено сравнение полученных результатов с

результатами аналитических расчётов. Показано, что полоса пропускания ЗС действительно лежит в С-диапазоне (от 5 до 6.2 ГГц) и для того, чтобы взаимодействие происходило при ускоряющих напряжениях порядка 10 кВ, взаимодействие осуществляется на +1-ой пространственной гармонике. Проведены расчёты сопротивления связи. Показано, что сопротивление связи обратных гармоник близко к нулю, что исключает риск их паразитного самовозбуждения, в то время как сопротивление связи прямых гармоник в полосе пропускания превышает 10 Ом.

3. Исследована структура собственных мод ЗС с ЦСР для ЛБВ М4040. Построены распределения электрического поля различных мод. Показано, что в системе могут существовать резонаторные и щелевые моды. Эффективное электронно-волновое взаимодействие возможно только с резонаторными модами, у которых электрическое поле в канале для электронного пучка отлично от нуля. Поле щелевых мод в основном сосредоточено в щелях связи.

4. Исследовано влияние угла раскрытия щели α на положение собственных мод ЗС с ЦСР для ЛБВ М4040. Показано, что с увеличением α полоса пропускания рабочей резонаторной моды растёт за счёт того, что её нижняя частота отсечки смещается вниз. Продемонстрировано хорошее соответствие с теоретической оценкой. Также выявлено, что щелевая мода с ростом α смещается вниз, однако всегда лежит в области более высоких частот, чем резонаторная мода.

5. Предложена модифицированная конфигурация ЗС с ЦСР, позволяющая продвижение в W-диапазон частот и использование ленточных электронных пучков. Кроме того, предложенная модель обладает меньшим числом управляющих параметров и удобна для изготовления, например, из наборного пакета металлических пластин с помощью лазерной резки наносекундными импульсами.

6. Рассчитаны дисперсионные характеристики модифицированной ЗС с ЦСР. Также показано наличие резонаторной и щелевой моды. Взаимодействие предполагается осуществлять с резонаторной модой.

7. Исследовано влияние ширины щели связи на дисперсионную характеристику. Рассмотрена вариация конструкции с П-образной щелью, эффективная ширина которой больше, чем в случае прямоугольной щели. Показано, что при увеличении ширины щели щелевая мода смещается вниз по частоте, а резонаторная не меняется и остаётся в диапазоне 75-107 ГГц. Рассмотрена ситуация, когда ширина щели, наоборот, уменьшается. Получено, что структура мод усложняется, однако по-прежнему существуют моды с ненулевым полем в канале для электронного пучка, с которыми возможно эффективное взаимодействие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Armstrong C.M., Snively E.C., Shumail M. et al. *Frontiers in the Application of RF Vacuum Electronics // IEEE Transactions on Electron Devices*. 2023. Vol. 70, no. 6. P. 2643-2655.
2. Григорьев А.Д., Иванов В.А., Молоковский С.И. *Микроволновая электроника*. СПб.: Издательство «Лань». 2016. 496 с.
3. Tani M., Rieh J.-S., Park S.Y. *Advances in Terahertz Source Technologies*. S.: Jenny Stanford Publishing. 2024. 773 p.
4. Kurner T., Mittleman D.M., Nagatsuma T. *THz Communications. Paving the Way Towards Wireless Tbps*. Cham, Switzerland: Springer. 2022. 531 p.
5. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. *Лекции по сверхвысокочастотной электронике*. М.: Сов. радио. 1973. 400 с.
6. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. *Лекции по СВЧ электронике для физиков в 2-х т.* М.: Физматлит. 2003. 495 с.
7. Гилмор А. С. (мл.). *Лампы с бегущей волной*. М.: Техносфера. 2013. 616 с.
8. Paoloni C., Gamzina D., Letizia R. et al. *Millimeter wave traveling wave tubes for the 21st century // Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2021. Vol. 35, № 5. P. 567-603.

9. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. М.: Сов. радио, 1966. 632 с.
10. Torgashov G.V., Torgashov R.A., Titov V.N. et al. Meander-line slow-wave structure for high power millimeter-band traveling-wave tubes with multiple sheet electron beam // IEEE Electron Device Letters. 2019. Vol. 40, no. 12. P. 1980–1983.
11. Lu Z., Ding K., Wen R. et al. Novel double tunnel staggered grating slow wave structure for 0.2 THz traveling wave tube // IEEE Electron Device Letters. 2020. Vol. 41, no. 2. P. 284–287.
12. Collier R.J., Helm G.D., Laico J.P., Striny K.M. The Ground Station High-Power Traveling-Wave Tube // Bell System Technical Journal. 1963. Vol. 42, no. 4. P. 1829–1861.
13. Comsol Multiphysics Engineering Simulation Software (COMSOL Inc., Burlington, MA, 2020), see <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
14. Ножкин Д.А., Бессонов Д.А., Навроцкий И.А. и др. Применение лазерных технологий для изготовления компонентов вакуумных электронных приборов миллиметрового диапазона // ЖТФ. 2026. Т. 96, № 5. С. 1042-1049.