

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

кафедра радиотехники и
электродинамики
наименование кафедры

Замедляющие системы ТГц-диапазона

наименование темы выпускной квалификационной работы

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 4033 группы

направление (специальности) 03.03.03 «Физика и техника электронных средств»
код и наименование направления (специальности)

Институт физики

наименование факультета

Гребенникова Павла Алексеевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

Профессор по кафедре
радиотехники и
электродинамики,
д. ф. - м. н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

 10.06.26

М.В. Давидович

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой радиотехники

и электродинамики

д.ф.- м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

 10.06.26

О.Е. Глухова

инициалы, фамилия

Саратов 2026

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Терагерцовый (ТГц) диапазон частот (0,1–3 ТГц) интенсивно осваивается для задач сверхскоростной беспроводной связи, спектроскопии, радиовидения и медицинской диагностики. Одним из главных препятствий для массового внедрения ТГц-систем остаётся нехватка компактных и мощных источников когерентного излучения. Лампа бегущей волны (ЛБВ) является практически единственным типом вакуумного прибора, способным сочетать высокий уровень выходной мощности и широкую полосу усиления в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Ключевым элементом ЛБВ, определяющим её основные параметры (коэффициент усиления, выходную мощность, полосу рабочих частот и электронный КПД), служит **замедляющая система (ЗС)**, в которой формируется замедленная электромагнитная волна, синхронно взаимодействующая с электронным потоком.

При продвижении в коротковолновую часть миллиметрового диапазона и далее в ТГц-область классические спиральные ЗС становятся труднореализуемыми: их размеры уменьшаются до десятков микрометров, резко возрастают омические потери, а технология прецизионной намотки спиралей становится критически сложной. В связи с этим активное развитие получили альтернативные типы ЗС — гребенчатые (одиночные и сдвоенные) структуры, меандровые линии на диэлектрических подложках, цепочки связанных резонаторов (ЦСР), фотонно-кристаллические и металлодиэлектрические системы. Каждая из них обладает индивидуальным набором электродинамических характеристик (дисперсия, сопротивление связи, потери), технологических достоинств и ограничений.

Несмотря на значительное число публикаций, посвящённых отдельным типам ЗС, комплексный сопоставительный анализ существующих конструкций, их характеристик и методов расчёта практически отсутствует. Это затрудняет

выбор оптимальной ЗС на этапе эскизного проектирования ТГц-ЛБВ. Настоящая работа призвана восполнить этот пробел.

Целью данной выпускной квалификационной работы является сравнительный анализ современных замедляющих систем для ЛБВ терагерцового диапазона, выявление их достоинств, ограничений и перспективных направлений развития.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Провести обзор литературы по конструкциям ЗС для ЛБВ ТГц-диапазона.
2. Систематизировать основные типы ЗС и методы их электродинамического моделирования.
3. Сопоставить ключевые электродинамические характеристики ЗС (дисперсию, сопротивление связи, полосу пропускания, потери, технологичность).
4. Выявить преимущества и недостатки различных конструкций и подходов к их анализу.
5. Сформулировать рекомендации по выбору ЗС для конкретных приложений и определить направления дальнейших исследований.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые на основе обобщения и систематизации данных, опубликованных ведущими научными группами в 2010–2023 гг., проведён комплексный сопоставительный анализ замедляющих систем шести основных типов, предназначенных для работы в ТГц-диапазоне. Разработана система критериев сравнения, включающая электродинамические, энергетические и технологические параметры.

Практическая значимость результатов заключается в возможности их использования при проектировании новых конструкций ЛБВ ТГц-диапазона, в частности — при выборе оптимального типа ЗС на начальном этапе разработки, а также при подготовке учебно-лабораторных курсов по радиофизике и вакуумной микроэлектронике.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 «Современные замедляющие системы для ЛБВ ТГц-диапазона (обзор)» содержит описание и анализ шести основных классов ЗС, наиболее перспективных для работы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.

Спиральные ЗС (helix) исторически являются первыми и наиболее изученными широкополосными системами. Они обеспечивают рекордную полосу усиления (более октавы) и высокое сопротивление связи в СВЧ-диапазоне. В ТГц-области их применение сдерживается малыми поперечными размерами, высокой плотностью омических потерь и сложностью изготовления прецизионных спиралей с диэлектрическими опорами. Перспективным направлением является использование биспиралей в азимутально-проводящем экране, что позволяет вдвое уменьшить период и поднять рабочее напряжение пучка при сохранении полосы [1, 16].

Гребенчатые ЗС (single/double vane) — в настоящее время наиболее распространённый класс планарных структур для ЛБВ с ленточным электронным пучком. ЗС типа «сдвоенная гребенка» со сдвигом гребней на полпериода обладает плоскостью скользящей симметрии, благодаря чему запрещённая зона при фазе π исчезает, что позволяет существенно расширить рабочую полосу (до 20–50 %). Изготовление гребенчатых структур хорошо совместимо с технологиями глубокого реактивного ионного травления (DRIE) и LIGA [2, 9, 12, 13].

Меандровые линии (meander-line) представляют собой полосковые проводники зигзагообразной формы, расположенные на диэлектрической подложке или подвешенные в вакуумном зазоре. Такие ЗС компактны, позволяют получать высокие значения замедления ($n = 3–30$) при сравнительно низких ускоряющих напряжениях, что упрощает конструкцию источника питания. Применение подвешенной подложки из CVD-алмаза с высокой теплопроводностью решает

проблему теплоотвода. Планарная технология (лазерная резка, вакуумное напыление) делает меандровые ЗС одними из наиболее технологичных для W-диапазона и выше [14, 15].

Цепочки связанных резонаторов (ЦСР) традиционно применяются в мощных ЛБВ сантиметрового диапазона. Их отличает высокое сопротивление связи вблизи низкочастотной отсечки (π -вида) и хороший теплоотвод за счёт цельнометаллической конструкции. Главными недостатками являются узкая полоса пропускания (5–10 %), сложность сборки и пайки, а также быстро растущие с частотой потери. В ТГц-диапазоне ЦСР, как правило, уступают место гребенчатым и меандровым структурам [18, 19, 20].

Фотонно-кристаллические и металлодиэлектрические ЗС рассматриваются как наиболее перспективные для верхней части ТГц-диапазона и инфракрасной области. В фотонно-кристаллических структурах используются двумерно-периодические решётки, позволяющие управлять дисперсией и добиваться низких потерь за счёт отсутствия металлических элементов. Металлодиэлектрические ЗС на основе гребёнок на диэлектрической подложке не имеют низкочастотной отсечки, что принципиально расширяет полосу пропускания [11, 22, 23, 26].

Глава 2 «Электродинамические характеристики замедляющих систем» посвящена детальному анализу ключевых параметров ЗС, определяющих эффективность электронно-волнового взаимодействия.

Дисперсионная характеристика — зависимость замедления n или фазового сдвига на период $\varphi = kzd$ от частоты. Именно она определяет условия синхронизма между замедленной волной и электронным потоком. В современных работах дисперсия представляется в виде диаграммы Бриллюэна, которая наглядно показывает полосы пропускания и запираения. Для расширения полосы пропускания используют сдвиг гребней на полпериода, при котором запрещённая зона для основной моды исчезает.

Сопротивление связи R_c количественно характеризует эффективность взаимодействия продольной компоненты электрического поля волны с электронным пучком. Величина $R_c = |E_z|^2 / (2kz^2P)$ (P — переносимая мощность) должна быть как можно выше в рабочей полосе. Для ТГц-приборов характерны сравнительно низкие значения R_c (единицы–десятки Ом), что заставляет увеличивать длину пространства взаимодействия или плотность тока пучка.

Затухание и потери в ТГц-диапазоне становятся критически важными. Рост омических потерь, аномальный скин-эффект и шероховатость поверхности ($R_a \sim 100\text{--}300$ нм) приводят к тому, что холодное затухание может достигать 0,2–0,5 дБ на период. В ряде работ показана возможность компенсации потерь за счёт использования плазмонных эффектов в наноструктурированных металлических плёнках [28].

Пространственные гармоники играют ключевую роль в приборах с длительным взаимодействием. Помимо традиционного синхронизма с прямой (+1)-й гармоникой, в гребенчатых и меандровых ЗС возможно взаимодействие с обратной (–1)-й гармоникой, что создаёт риск паразитного самовозбуждения и требует тщательного проектирования секционированных систем [20, 19].

Глава 3 «Методы моделирования замедляющих систем» содержит обзор основных аналитических, полуаналитических и численных подходов, применяемых для расчёта электродинамических параметров ЗС.

Метод частичных областей (МЧО) предполагает разбиение пространства ЗС на регулярные подобласти, в каждой из которых поля раскладываются по полным ортогональным системам функций. Сшивка полей на границах областей приводит к интегральным уравнениям или функционалам, решение которых даёт дисперсию и распределения полей. МЧО чрезвычайно эффективен для гребенчатых структур и диафрагмированных волноводов [2, 9].

Метод интегральных уравнений (ИУ) и функций Грина (ФГ) позволяет выразить поля непосредственно через поверхностные токи на проводниках, используя тензорные ФГ периодических структур. Такой подход строго учитывает условия Флоке и позволяет сформулировать дисперсионное уравнение в компактной форме. Метод успешно применяется для анализа меандровых ЗС на подложках и диафрагмированных прямоугольных волноводов [22, 23].

Приближённые модели на основе эквивалентных линий и четырёхполюсников незаменимы на этапе быстрой оценки и предварительной оптимизации. Погонные параметры эквивалентной длинной линии (L_0 , C_0) вычисляются из геометрических соображений или аналитических формул. Несмотря на полуэмпирический характер, такие модели дают погрешность не более нескольких процентов при расчёте дисперсии спиральных и меандровых ЗС [16, 17].

Дискретный подход и разностная теория возбуждения (школа В.А. Солнцева) трактует взаимодействие электронов с полем ЗС как дискретный процесс в отдельных зазорах взаимодействия, что позволяет единообразно описывать усиление как в полосах пропускания, так и в полосах запирания. Универсальное характеристическое уравнение четвёртой степени допускает аналитическое решение в ряде практически важных случаев, что крайне ценно для понимания физики внеполосного усиления [19, 20].

Трёхмерное моделирование в коммерческих пакетах (CST Studio Suite, ANSYS HFSS, COMSOL Multiphysics) служит, главным образом, инструментом верификации и финальной оптимизации. Прямое решение уравнений Максвелла методом конечных элементов или конечных интегралов позволяет учесть реальную геометрию (скругления, шероховатость) и потери, но требует значительных вычислительных ресурсов [14, 15, 24].

Статистические методы (планирование эксперимента) используются для построения быстрых регрессионных моделей электродинамических характеристик ЗС по данным предварительных численных или физических экспериментов. Симплекс-суммируемые планы высоких порядков позволяют сократить число необходимых дорогостоящих 3D-расчётов без потери точности [31].

Глава 4 «Сравнительный анализ и рекомендации по выбору ЗС» обобщает изложенный материал и формулирует практические рекомендации.

На основе анализа, проведённого в главах 1–3, составлена сводная таблица характеристик шести рассмотренных типов ЗС. Установлено, что **сдвоенные гребенчатые системы** являются оптимальным компромиссным решением для диапазона 0,2–0,5 ТГц, обеспечивая полосу пропускания в десятки процентов при приемлемом сопротивлении связи и хорошей технологичности. **Планарные меандровые линии на подвешенных подложках** (CVD-алмаз, кварц) обладают высоким сопротивлением связи и низким ускоряющим напряжением, что делает их предпочтительными для компактных усилителей W-диапазона. Для высокочастотной части ТГц-диапазона (выше 0,5 ТГц) целесообразен переход к металлодиэлектрическим и фотонно-кристаллическим ЗС, потери в которых минимальны. **ЦСР** сохраняют лидирующие позиции в мощных ЛБВ сантиметрового диапазона, однако в ТГц-области их применение признаётся бесперспективным. **Спиральные ЗС** в ТГц-диапазоне могут найти применение лишь в специальных малошумящих усилителях при условии освоения технологий прецизионной литографии.

Сформулированы критерии выбора ЗС в зависимости от приоритетной задачи: максимальная полоса, максимальная мощность, минимальное напряжение пучка, предельно высокая частота, технологическая простота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы получены следующие основные результаты:

1. Проведён систематический обзор современного состояния исследований в области замедляющих систем для ламп бегущей волны ТГц-диапазона. Подробно рассмотрены шесть основных классов ЗС: спиральные, гребенчатые, меандровые, цепочки связанных резонаторов, фотонно-кристаллические и металлодиэлектрические.
2. Проанализированы ключевые электродинамические характеристики (дисперсия, сопротивление связи, потери) для каждой из перечисленных структур. Выявлены факторы, ограничивающие их применение в ТГц-диапазоне, — рост омических потерь, технологические трудности микрообработки, шероховатость поверхности.
3. Систематизированы основные методы моделирования ЗС: метод частичных областей, метод интегральных уравнений и функций Грина, приближённые эквивалентные схемы, дискретный подход (разностная теория возбуждения), трёхмерное численное моделирование и статистические методы. Определены области применимости каждого метода.
4. На основе сопоставительного анализа сформулированы практические рекомендации по выбору типа ЗС для различных частотных диапазонов и функциональных назначений. Показано, что сдвоенные гребенчатые структуры и планарные меандровые линии являются наиболее сбалансированными решениями для диапазона 0,1–0,3 ТГц, тогда как на частотах свыше 0,5 ТГц предпочтение следует отдавать фотонно-кристаллическим и металлодиэлектрическим системам.
5. Определены перспективные направления дальнейших исследований: снижение потерь за счёт использования плазмонных эффектов и новых материалов,

разработка многолучевых и пространственно-развитых ЗС, создание гибридных твердотельно-вакуумных усилителей на основе графеновых слоёв, развитие методов многопараметрической оптимизации с привлечением алгоритмов машинного обучения.

Таким образом, поставленные задачи решены в полном объёме, цель работы достигнута.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Алехин, Ю. В.** Сверхширокополосные лампы бегущей волны. Исследование в СВЧ-, КВЧ- и ТГЧ-диапазонах. Внедрение в производство / Ю. В. Алехин, М. П. Апин, А. А. Бурцев [и др.] ; под ред. Н. А. Бушуева. – М. : Радиотехника, 2015. – 480 с.
2. **Бушуев, Н. А.** Перспективные замедляющие системы терагерцового диапазона для ЛБВ / Н. А. Бушуев, М. В. Давидович, П. А. Шиловский // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. – 2012. – Т. 12, вып. 2. – С. 64–75.
3. **Вайнштейн, Л. А.** Лекции по сверхвысокочастотной электронике / Л. А. Вайнштейн, В. А. Солнцев. – М. : Советское радио, 1973. – 392 с.
4. **Вайнштейн, Л. А.** Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1988. – 440 с.
5. **Галдецкий, А. В.** Исследование распространения электромагнитных волн в миллиметровом диапазоне в планарной замедляющей системе типа «меандр» на подложке из CVD алмаза / А. В. Галдецкий, А. Н. Савин, Е. А. Богомоллова // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – Т. 15, № 9. – С. 46–53.
6. **Гинзбург, Н. С.** Использование двумерно-периодических замедляющих структур на основе сверхразмерных цилиндрических волноводов для генерации импульсов черенковского сверхизлучения большой пиковой мощности / Н. С. Гинзбург, В. Ю. Заславский, А. М. Малкин, А. С. Сергеев // Письма в Журнал технической физики. – 2017. – Т. 43, вып. 16. – С. 61–68.

7. **Давидович, М. В.** Возбуждение цилиндрического резонатора током спирали и осевым током электронного пучка / М. В. Давидович, Н. А. Бушуев // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, вып. 7. – С. 135–148.
8. **Давидович, М. В.** Возможность создания усилителей и генераторов на поверхностных плазмонах / М. В. Давидович, Н. А. Бушуев // XXIV Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). – Севастополь, 2015. – С. 110–113.
9. **Давидович, М. В.** Дисперсия и потери в замедляющей системе «меандр на подложке в прямоугольном экране» / М. В. Давидович // XXV Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2021). – Севастополь, 2021. – С. 180–181.
10. **Давидович, М. В.** Замедляющая система «двойная сдвинутая импедансная гребенка» / М. В. Давидович // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89, вып. 2. – С. 280–297.
11. **Давидович, М. В.** Замедляющая система типа диафрагмированный прямоугольный волновод / М. В. Давидович // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 108–118.
12. **Давидович, М. В.** Меандровая ЗС для твердотельной ЛБВ с графеновым слоем / М. В. Давидович // XXIV Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). – Севастополь, 2015. – С. 114–116.
13. **Каретникова, Т. А.** Моделирование лампы бегущей волны субтерагерцового диапазона с замедляющей системой типа сдвоенной гребенки и ленточным электронным пучком / Т. А. Каретникова, А. Г. Рожнев, Н. М. Рыскин [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 1. – С. 54–60.
14. **Качаев, Х. Д.** Расчет характеристик замедляющей системы усилителя прямой волны М-типа / Х. Д. Качаев, М. А. Фурсаев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 1, № 1. – С. 131–136.
15. **Коломийцева, Н. М.** Проектирование замедляющей системы типа «петляющий волновод» для разработки промышленной базовой технологии изготовления

- ЛБВ в W диапазоне / Н. М. Коломийцева, Г. В. Бакунин, Т. И. Полянская [и др.] // V Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – СПб., 2017. – С. 149–154.
16. **Комаров, Д. А.** Анализ электродинамических характеристик мощных ламп бегущей волны на цепочке связанных резонаторов за границей полосы пропускания замедляющей системы / Д. А. Комаров, С. П. Морев, А. В. Гудович // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56, № 4. – С. 500–506.
17. **Кравченко, Н. П.** Анализ замедляющих систем, используемых в приборах миллиметрового диапазона / Н. П. Кравченко, С. В. Мухин, С. А. Пресняков, А. Д. Касаткин // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9, № 6. – С. 57–63.
18. **Левин, Л.** Современная теория волноводов / Л. Левин ; пер. с англ. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1954. – 216 с.
19. **Марков, Г. Т.** Возбуждение электромагнитных волн / Г. Т. Марков, А. Ф. Чаплин. – М. : Радио и связь, 1983. – 296 с.
20. **Назарова, М. В.** Исследование усиления в полосах пропускания и запираения замедляющих систем мощных ламп бегущей волны / М. В. Назарова, В. А. Солнцев, Р. П. Колтунов, Д. С. Шабанов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – № 10. – С. 76–80.
21. **Накрап, И. А.** Электродинамические характеристики многорядной встречно-штыревой замедляющей системы / И. А. Накрап, А. Н. Савин // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2015. – Т. 23, № 1. – С. 62–75.
22. **Пирс, Дж. Р.** Лампа с бегущей волной / Дж. Р. Пирс ; пер. с англ. под ред. В. Т. Овчарова. – М. : Советское радио, 1952. – 228 с.
23. **Пчельников, Ю. Н.** Связанные замедляющие системы / Ю. Н. Пчельников, А. Ю. Мирошниченко, А. Г. Пчельников // Радиотехника и электроника. – 2014. – Т. 59, № 5. – С. 494–507.
24. **Ракова, Е. А.** Проектирование и исследование технологии изготовления перспективной замедляющей системы для ЛБВ W-диапазона / Е. А. Ракова, А.

- В. Галдецкий, Г. Ф. Корепин [и др.] // V Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – СПб., 2016. – С. 339–347.
25. **Рожнёв, А. Г.** Исследование характеристик замедляющей системы лампы бегущей волны миллиметрового диапазона с ленточным электронным пучком / А. Г. Рожнёв, Н. М. Рыскин, Т. А. Каретникова [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. – 2013. – Т. 56, № 8–9. – С. 601–613.
26. **Савин, А. Н.** Метод построения симплекс-суммируемого плана n -го порядка проведения эксперимента для моделирования электродинамических характеристик замедляющих систем / А. Н. Савин, Д. М. Доронин, И. А. Накрап, И. Н. Салий // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13, № 3. – С. 70–76.
27. **Сивяков, Б. К.** Теория спиральной замедляющей системы с азимутально-неоднородным экраном / Б. К. Сивяков, Ю. А. Беляева // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 1, № 1. – С. 112–120.
28. **Силин, Р. А.** Замедляющие системы / Р. А. Силин, В. П. Сазонов. – М. : Советское радио, 1966. – 632 с.
29. **Солнцев, В. А.** К теории электронных волн и дискретного электронно-волнового взаимодействия в полосах запирающих замедляющих систем / В. А. Солнцев // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2013. – Т. 21, № 1. – С. 53–69.
30. **Торгашов, Р. А.** Разработка и исследование замедляющей системы для миниатюрной многолучевой лампы бегущей волны W -диапазона / Р. А. Торгашов, Д. А. Ножкин, А. В. Стародубов, Н. М. Рыскин // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68, № 10. – С. 935–942.
31. **Трубецков, Д. И.** Лекции по СВЧ электронике для физиков. Т. 1 / Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов. – М. : Физматлит, 2003. – 496 с.
32. **Патент № 2653573 Российская Федерация, МПК H01J 23/24.** Замедляющая система планарного типа / А. В. Галдецкий, Е. А. Богомолова ; заявитель и патентообладатель АО «НПП «Исток» им. Шокина». – № 2017107127 ; заявл. 06.03.2017 ; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 13.