

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

Кафедра нелинейной физики

Исследование многолучевой лампы бегущей волны миллиметрового  
диапазона с лестничной замедляющей системой

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 2211 группы

направления

03.04.01 «Прикладная математика и физика»

института физики

Колесниченко Евгении Евгеньевны

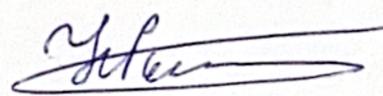
Научный руководитель

Зав. кафедрой динамических систем,

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. ст., уч. зв.

фамилия



личная подпись, дата

Н.М. Рышкин

инициалы,

Зав. кафедрой нелинейной физики,

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. ст., уч. зв.

фамилия



личная подпись, дата

Е.Н. Бегинин

инициалы,

Саратов 2025 г.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы работы.** На сегодняшний день особый интерес представляет освоение коротковолновой части миллиметрового диапазона. Этот диапазон частот (0.1-0.3 ТГц) называют также субтерагерцевым (суб-ТГц). Среди различных источников когерентного излучения суб-ТГц диапазона особый интерес представляют приборы вакуумной электроники, поскольку они позволяют получить наиболее высокие уровни мощности в данном диапазоне частот [1,2]. Одним из перспективных направлений является разработка миниатюрных усилителей на основе лампы бегущей волны (ЛБВ). Основными достоинствами ЛБВ являются высокий коэффициент усиления, широкая полоса усиливаемых частот и достаточно высокая выходная мощность (порядка десятков и сотен ватт). Подобные приборы могут найти применение прежде всего в системах наземной и космической беспроводной передачи данных нового поколения [3]. В частности, беспроводные сети в суб-ТГц диапазоне представляются перспективным решением в условиях плотной городской застройки, в аэропортах, торговых центрах и др.

Еще одна сфера применения суб-ТГц излучения — медицина [4]. Этот диапазон открывает новые горизонты для диагностики и лечения заболеваний. Например, его можно использовать для раннего выявления раковых клеток и даже для лечения некоторых видов рака, таких как рак кожи. Также суб-ТГц излучение может быть использовано для создания новых материалов и устройств. Например, оно может применяться в производстве полупроводниковых материалов, которые находят широкое применение в электронике и солнечных батареях. Также представляет интерес разработка новых сенсорных устройств, таких как датчики газа и влаги, в суб-ТГц диапазоне. Таким образом, освоение этого диапазона является важным шагом к новым достижениям в различных сферах.

Однако при разработке приборов суб-ТГц диапазона возникают трудности, связанные с повышением плотности тока электронного пучка (ЭП) до чрезвычайно высоких значений (сотни А/см<sup>2</sup>). Формирование и

фокусировка подобных пучков представляет сложную проблему. Поэтому привлекли внимание приборы многолучевыми ленточными ЭП (см., например, [5]). Использование таких пучков позволяет получить высокую выходную мощность устройства, одновременно снижая плотность тока каждого пучка по сравнению с однолучевой конструкцией. Это, в свою очередь, увеличивает срок службы катода и упрощает фокусировку пучка.

Таким образом, актуальной задачей является разработка новых пространственно-развитых замедляющих систем (ЗС) для ЛБВ суб-ТГц диапазона с многолучевыми ленточными ЭП. Подобные ЗС должны обеспечивать широкую полосу усиливаемых частот (5-10 ГГц), достаточно высокое замедление ( $n = c/v_{ph} \sim 4\div 5$ ) и сопротивление связи (порядка 1 Ом).

Среди различных вариантов ЗС для многолучевых суб-ТГц ЛБВ представляют интерес ЗС лестничного типа (см., например, [6-8]). Простейший вариант лестничной ЗС представляет собой медную пластину, в которой вырезаны периодически расположенные щели прямоугольной формы, помещенную в прямоугольный металлический волновод. Достоинствами данной ЗС являются широкая полоса пропускания и высокое сопротивление связи. Однако ее недостатком является малое замедление основной гармоники и сильная дисперсия, вследствие чего ее затруднительно использовать для создания широкополосного ЛБВ усилителя. Поэтому были предложены ее различные модификации. Одной из таких модификаций является лестничная ЗС в волноводе, нагруженном продольными канавками [6-8]. Отметим, что у такой ЗС происходит изменение типа дисперсионной характеристики: основная гармоника становится обратной, а широкополосное усиление можно реализовать на +1-й пространственной гармонике. При этом ЗС начинает проявлять свойства «дважды отрицательного» метаматериала с отрицательными эффективными диэлектрической и магнитной проницаемостями.

**Цель данной работы** состоит в разработке конструкции и теоретическом анализе выходных характеристик ЛБВ W-диапазона лестничного типа в волноводе с продольными канавками.

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

1. Моделирование электродинамических характеристик ЗС. Оптимизация геометрических параметров для получения наибольшей полосы пропускания и рабочего диапазона около 10 ГГц.

2. Разработка системы согласования для полученной конструкции ЗС. Оптимизация геометрических параметров системы согласования для получения минимального коэффициента отражения в рабочем диапазоне.

3. Расчёт коэффициента усиления в режимах малого и большого сигнала полученной конструкции ЛБВ. Определение мощности в режиме насыщения. Нахождение способов подавления паразитного самовозбуждения.

**Методы исследования.** Для численного моделирования использовались программные пакеты COMSOL Multiphysics и CST Studio. Пакет COMSOL использует моделирование в частотной области методом конечных элементов. В пакете CST моделирование проводится во временной области с использованием варианта метода конечных разностей, который носит название метода конечного интегрирования.

Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- XXXI Всероссийская научная конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых». СГУ, Саратов, 2024.
- XVIII Всероссийская конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, 2023.
- XIX Всероссийская конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, 2024.

- Студенческая научная конференция института физики. СГУ, Саратов, 2024.
- Студенческая научная конференция института физики. СГУ, Саратов, 2025.
- XXXII Всероссийская научная конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых». СГУ, Саратов, 2025.

Результаты, полученные в ходе выполнения выпускной квалификационной работы опубликованы в работах [10-13].

Полученные результаты использованы при выполнении НИР, поддержанной грантом Российского научного фонда № 22-12-00181.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены электродинамические характеристики лестничных ЗС. В разделе 1.1 рассмотрен наиболее простой вариант ЗС, которая представляет собой пластину с периодически расположенными щелями, помещенную в прямоугольный волновод (см. рис.1).

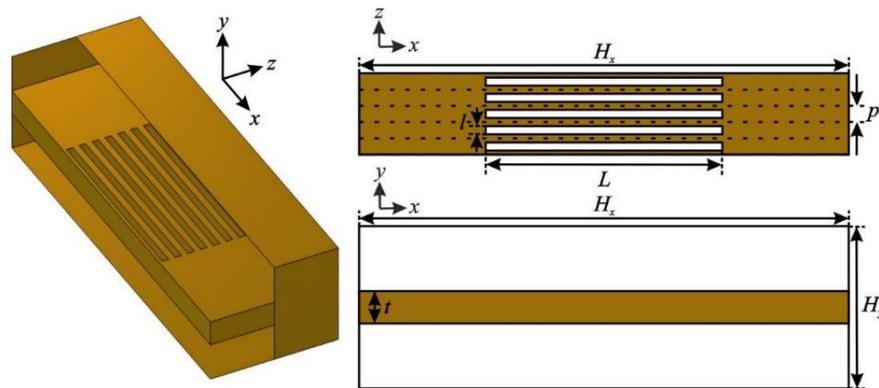


Рис. 1. Схема лестничной ЗС, помещенной в прямоугольный волновод

Для данной ЗС в пакете численного моделирования COMSOL Multiphysics построены дисперсионная характеристика и зависимость коэффициента замедления от частоты. Анализ этих графиков показал, что система обладает сильной дисперсией. А высокое замедление волны, наблюдается в узком частотном диапазоне вблизи верхней границы

пропускания. Такая структура является недостаточно широкополосной для создания ЛБВ-усилителей.

Для того, чтобы адаптировать лестничную ЗС для использования в ЛБВ усилителе, необходимо модифицировать ее конструкцию таким образом, чтобы частота щелевого резонанса была ниже частоты отсечки волновода,  $f_s < f_c$ . При этом вид дисперсионной характеристики качественно изменяется: основная гармоника становится обратной, а нормальная дисперсия будет иметь место для +1-ой пространственной гармоники.

Одним из возможных способов достижения условия  $f_s < f_c$  является повышение критической частоты волновода. Такая ситуация имеет место, например, в волноводе, нагруженном продольными канавками. Схема такой ЗС показана на рис. 2. Геометрические параметры системы представлены в таблице 1.

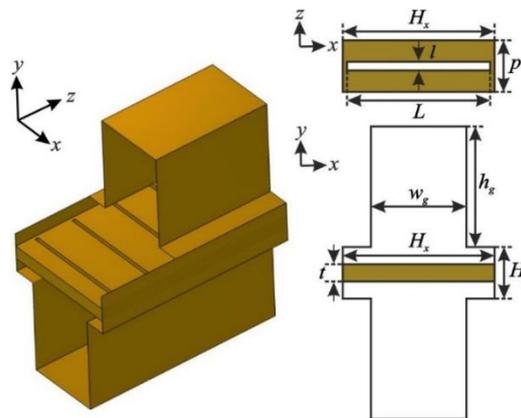


Рис. 2. Схема лестничной ЗС в волноводе с продольными канавками.

Таблица 1. Значения геометрических параметров системы в волноводе с канавками

Геометрический параметр	Значение (мм)
Размеры волновода, $H_x \times H_y$	1.75×0.60
Толщина пластины, $t$	0.20
Период, $p$	0.6
Высота пролетного канала, $(h-t)/2$	0.20
Размеры прямоугольной щели, $L \times l$	1.65×0.10
Размеры канавки, $w_g \times h_g$	1.10×1.40
Размеры пучка, $h_{beam} \times w_{beam}$	0.10×1.00

В разделе 1.2 представлены результаты расчетов электродинамических характеристик. В пакете COMSOL Multiphysics была построена модель одного периода структуры. На рис. 3 представлена дисперсионная диаграмма. Наибольший интерес представляет мода, дисперсионная характеристика которой на рис. 3 показана красным цветом. Для нее основная гармоника имеет аномальную дисперсию, а +1-я гармоника — нормальную.

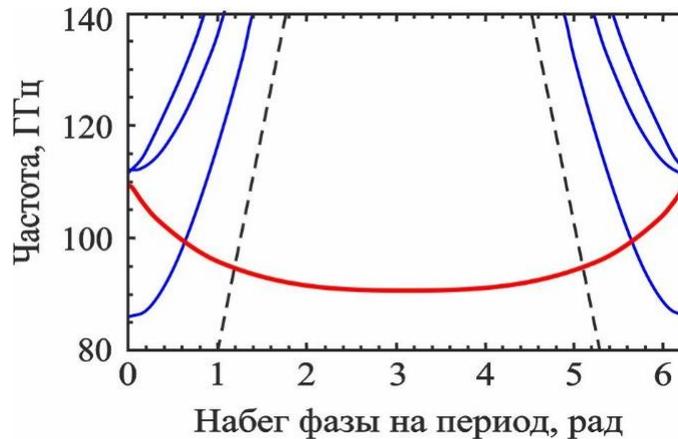


Рис. 3. Дисперсионная характеристика для нескольких мод замедляющей системы. Пунктиром показаны линии  $f = c\varphi/(2\pi r)$  и  $f = c(2\pi - \varphi)/(2\pi r)$ .

Для данной ЗС с помощью пакета COMSOL были рассчитаны ее основные электродинамические характеристики такие как коэффициент замедления, сопротивление связи, а также коэффициент затухания. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Глава 2 посвящена разработке согласующих устройств ввода-вывода. Разработаны две конструкции системы согласования.

В разделе 2.1 была разработана система согласования, представленная на рис. 8. Она включает прямоугольный волновод, ориентированный в вертикальной плоскости, в который выступает центральная пластина лестничной ЗС. По оси  $y$  с одной стороны волновода находится закорачивающая стенка, с другой — согласованный порт.

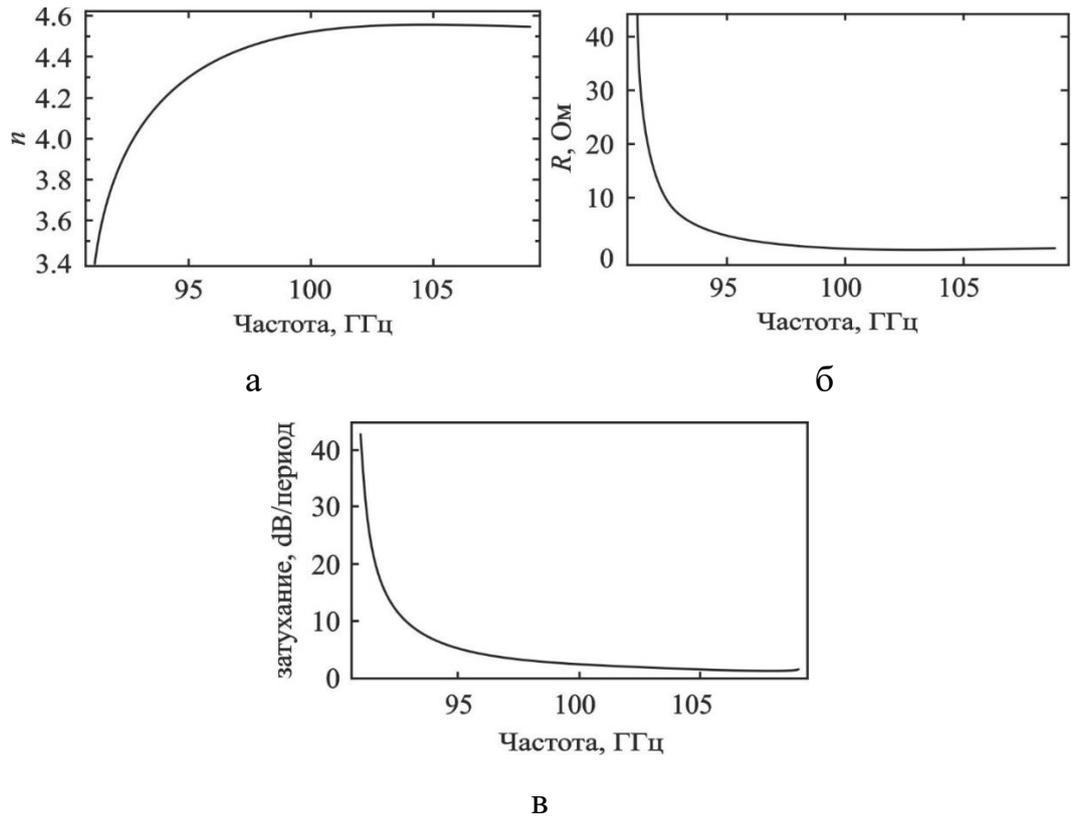


Рис. 4. Зависимости замедления (а), сопротивления связи (б) и затухания (в) от частоты.

Основными параметрами, которые влияют на S-параметры системы, являются:

- Расстояние от центральной оси пластины ЗС до нижней стенки волновода системы согласования,  $w_y$ ;
- Ширина волновода системы согласования,  $w_x$ ;
- Длина волновода системы согласования,  $w_z$ ;
- Выход ЗС из волноведущей системы,  $dz$ .

Пункт 2.2 посвящен расчету S-параметров ЗС. Расчеты S-параметров ЗС проводились в пакете COMSOL Multiphysics. Также было проведено сопоставление с моделированием в пакете CST Studio. Для моделирования была разработана полноразмерная модель ЛБВ, включающая в себя 40 периодов ЗС, с устройствами ввода-вывода на обоих концах, которая

представлена на рис. 6. Результаты моделирования были использованы для оптимизации конструкции замедляющей системы и прогнозирования характеристик готового устройства.

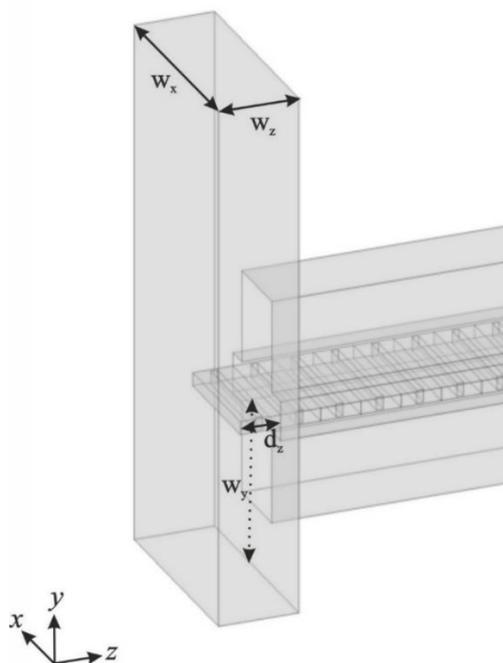


Рис. 5. Схема согласующего устройства ввода-вывода энергии.

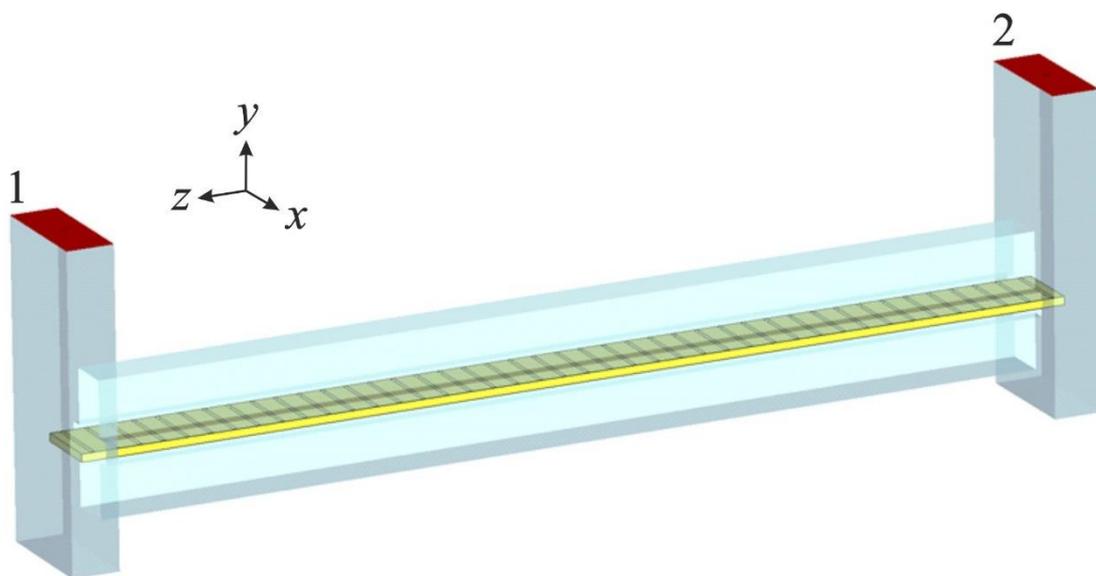


Рис. 6. Схема полноразмерной модели ЗС с устройствами ввода-вывода энергии.

В пунктах 2.2.1 – 2.2.3. исследуется влияние основных геометрических параметров на зависимости S-параметров. Была проведена оптимизация

геометрии волновода. Полученные оптимальные значения для системы представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения геометрических параметров системы согласования для волновода с канавками

Геометрический параметр	Значение (мм)
Расстояние от оси пластины ЗС до закорачивающей стенки выходного волновода, $w_y$	2.65
Ширина выходного волновода, $w_x$	3.1
Высота выходного волновода, $w_z$	1.2
Расстояние, на которое ЗС выступает в волновод, $d_z$	0.6

В разделе 2.3 был разработан альтернативный вариант системы согласования, в виде штырей на концах ЗС, которые выступают во входной/выходной волноводе. Схема системы согласования представлена на рис. 7. Основными геометрическими параметрами, которые влияют на S-параметры, являются длина стержня  $k_l$ , ширина стержня  $k_x$ , а также расстояние  $d_z$ , на которое ЗС выступает из волновода в согласующее устройство. Аналогично системе в разделе 2.1 была проведена оптимизация геометрических параметров системы. Полученные результаты представлены в таблице 3.

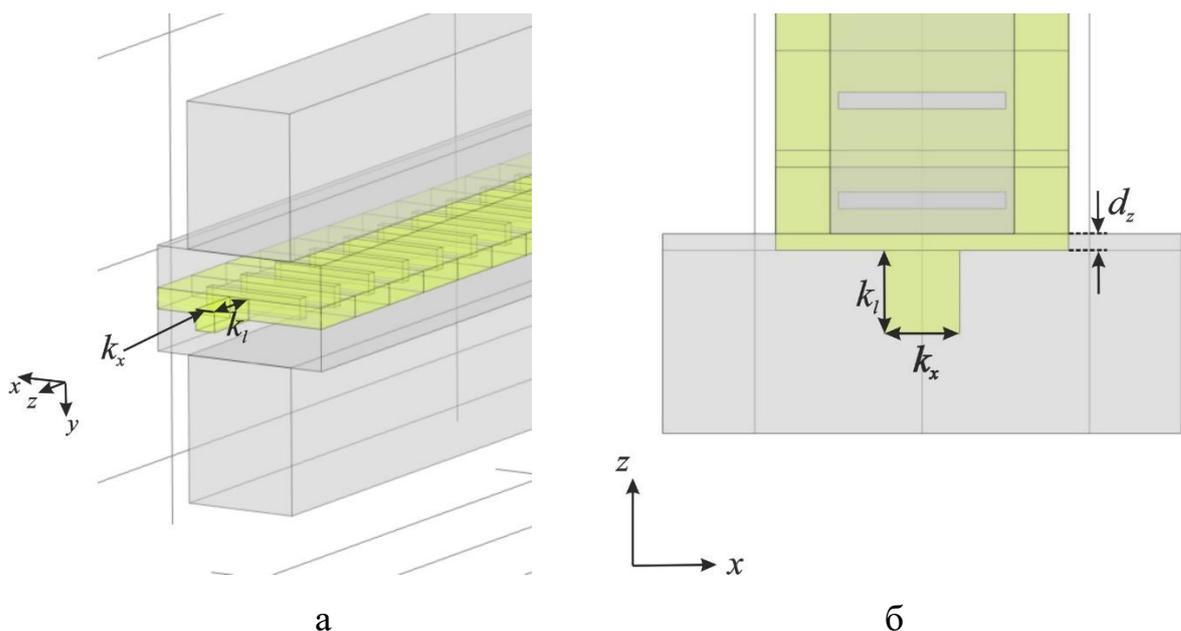


Рис. 7. Схема согласующего устройства ввода-вывода энергии

Таблица 3. Значения геометрических параметров устройства ввода-вывода энергии в системе со стержнем

Геометрический параметр	Значение (мм)
Ширина стержня, $k_x$	0.45
Длина стержня, $k_l$	0.40
Длина выступающей части ЗСв волновод, $d_z$	0.10
Общая длина выступающей части в волновод, $k_l + d_z$	0.50

Основными результатами главы 2 являются: определение оптимальных размеров согласующих элементов, исследование влияния геометрических параметров на характеристики согласования и сравнение результатов моделирования в разных программных пакетах.

В третьей главе работы представлен детальный анализ расчета коэффициента усиления ЛБВ. Исследование базируется на нелинейной одномерной теории ЛБВ О-типа, которая позволяет провести численное моделирование работы прибора [9]. В рамках этой теории используется уравнение движения электронов в переменных Лагранжа

Основные результаты численного моделирования демонстрируют следующие характеристики усилителя: при длине пространства взаимодействия, соответствующей 80 периодам ЗС, выходная мощность в режиме насыщения может достигать около 100 Вт. При этом коэффициент усиления в линейном режиме превышает 30 дБ в диапазоне 97-103 ГГц. Характер зависимости выходной мощности от входной показывает, что с увеличением частоты возрастает величина мощности насыщения. На рис. 8а показаны зависимости выходной от входной мощности при различных частотах сигнала, а на 8б зависимости коэффициента усиления при различной входной мощности от частоты. При умеренных значениях входной мощности порядка 100 мВт на частотах около 100 ГГц выходная мощность может достигать 80 Вт. С ростом входной мощности происходит уменьшение коэффициента усиления, однако при этом расширяется полоса усиления по уровню -3 дБ. Полученные результаты демонстрируют возможность создания

эффективного усилителя субтерагерцевого диапазона с высокими выходными характеристиками, что подтверждает правильность выбранного направления исследований и разработанной конструкции ЛБВ.

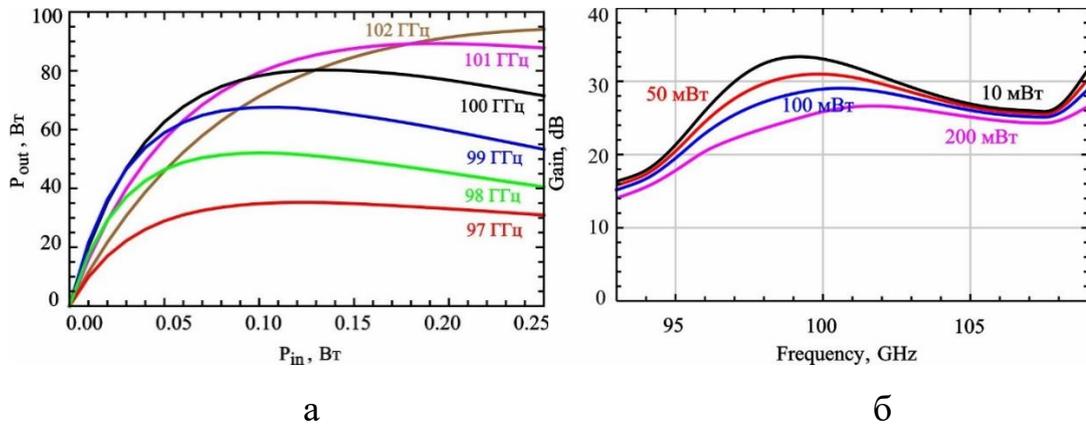


Рис. 8. (а) Зависимости выходной мощности от входной при различных частотах входного сигнала. (б) Зависимости коэффициента усиления от частоты при различной входной мощности.

Таким образом, проведенное моделирование позволило определить оптимальные параметры работы усилителя и подтвердить возможность достижения требуемых характеристик: высокой выходной мощности, большого коэффициента усиления и широкой полосы пропускания в заданном диапазоне частот.

В Заключении представлены основные результаты и выводы.

Проведен подробный анализ и конструкции лестничной замедляющей системы в волноводе с продольными канавками. Определены и оптимизированы все ключевые геометрические размеры устройства. Особое внимание было уделено разработке и оптимизации систем согласования, что обеспечило эффективное взаимодействие между замедляющей системой и устройством ввода-вывода энергии. Проведенное моделирование в программных пакетах COMSOL Multiphysics и CST Studio подтвердило корректность выбранных решений и показало высокую степень согласованности полученных результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А.Д. Терагерцевая электроника. М.: Физматлит, 2021. 308 с.
2. Advances in Terahertz Source Technologies. Park G.-S, Tani M., Rieh J.-S, Park S.Y.(eds.). Jenny Stanford Publ., Singapore,2024. 752 p.
3. THz Communications. Paving the Way Towards Wireless Tbps. Kürner T., Mittleman D.M., Nagatsuma T (eds.). Springer, 2022. 531 p.
4. Siegel P.H. Terahertz technology in biology and medicine // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2004. Vol. 52, No. 10. P. 2438-2447.
5. Рыскин Н.М., Торгашов Р.А., Титов В.Н., Навроцкий И.А., Стародубов А.В., Плоских А.Э., Рожнев А.Г. Исследование миниатюрных ламп бегущей волны миллиметрового диапазона длин волн с многолучевыми ленточными электронными пучками // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2022. Т. 65. № 5-6. С. 494-504.
6. Pierce J. Propagation in linear arrays of parallel wires // Trans. IRE on Electron Devices 1955. Vol. 2, No. 1. P. 13-24.
7. Butcher R. A theoretical study of propagation along tape ladder lines // Proc. IEE. 1957. Vol 104, Pt. B, No. 14. P. 169-176.
8. Альтшулер Ю.Г., Татаренко А.С. Лампы малой мощности с обратной волной. М.: Советское радио, 1963. 296 с.
9. Кац А.М., Ильина Е.М., Манькин А.И. Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием. М. Сов. радио, 1975.
10. Колесниченко Е.Е. Компьютерное моделирование электродинамических характеристик замедляющих систем лестничного типа для ЛБВ миллиметрового диапазона // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: Докл. XVIII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2023. С. 84-85.
11. Колесниченко Е.Е., Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. Моделирование системы согласования для лампы бегущей волны субтерагерцевого диапазона с лестничной замедляющей системой // «Наноэлектроника,

нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XIX Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2024. С. 59-60.

12. Torgashov R.A., Rostuntsova A.A., Kolesnichenko E.E., Navrotskiy I.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Study of slow-wave structures for multiple-beam miniaturized millimeter-band traveling-wave tubes // В книге: The 5-th International Conference “Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications” (TERA-2023). Abstract book. Moscow, 2023. С. 144. DOI: 10.59043/9785604953914\_144
13. Torgashov R.A., Rostuntsova A.A., Nozhkin D.A., Starodubov A.V., Kolesnichenko E.E., Ozhogin I.S., Ryskin N.M. Development and fabrication of slow-wave structures for miniaturized double-beam W-band traveling-wave tubes // 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). 21-25 April 2024. Chengdu, China. P. 1-7. DOI: 10.1109/PIERS62282.2024.10618425.