

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

Кафедра нелинейной физики

**Исследование замедляющих систем для миниатюрных
приборов О-типа миллиметрового диапазона**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 214 группы

направления 03.04.01 «Прикладные математика и физика»

код и наименование направления

Факультета нелинейных процессов

наименование факультета, института, колледжа

Торгашова Романа Антоновича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

зав. кафедрой динамических систем,

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание



дата, подпись

Н.М. Рышкин

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой нелинейной физики

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание



дата, подпись

Е.Н. Бегинин

инициалы, фамилия

Саратов 2020 год

ВВЕДЕНИЕ

Создание источников когерентного излучения терагерцевого и субтерагерцевого диапазонов частот является бурно развивающейся областью современной вакуумной СВЧ-электроники. Подобный интерес связан с характеристиками электромагнитного излучения такого частотного диапазона: широкий диапазон частот используется в системах передачи информации, колебательные спектры различных веществ лежат в близком диапазоне, высокая проникающая способность электромагнитного излучения данного диапазона. Применение таких приборов возможно в различных областях современной науки и техники: в системах беспроводной высокоскоростной передачи данных нового поколения, в радиолокационных системах, системах безопасности и противодействия терроризму, в радиоастрономии и др. [1-3].

Особый интерес среди устройств вакуумной СВЧ-электроники представляют классические устройства О-типа: лампа бегущей волны (ЛБВ) и лампа обратной волны (ЛОВ). Основной проблемой при разработке устройств ТГц-диапазона является необходимость использования пучков с высокой плотностью тока, что связано с уменьшением поперечных размеров устройств с ростом частоты. Поэтому для повышения эффективности электронно-волнового взаимодействия в подобных системах целесообразно использовать пространственно-развитые замедляющие системы (ЗС), а также электронные пучки с большим поперечным сечением, например, ленточные или многолучевые пучки.

Одним из принципиальных вопросов при создании миниатюрных генераторов и усилителей суб-ТГц диапазона является вопрос снижения ускоряющего напряжения, что приводит к снижению продольных размеров устройств и, следовательно, их массы. Перспективными в этом плане являются ЗС на диэлектрических подложках, которые впервые были предложены в работе [4]. В последнее несколько лет интерес к подобным устройствам не уменьшается, о чем свидетельствует рост публикационной активности

различных научных групп, связанный с разработкой низковольтных источников излучения с планарными электродинамическими структурами на диэлектрических подложках [5-8]. В последние несколько лет в СФ ИРЭ РАН совместно с СГУ возобновилось исследование микрополосковых замедляющих систем на диэлектрических подложках. Были разработаны и изготовлены образцы ЗС типа меандр на диэлектрической подложке из кварца для ЛБВ V- (50-70 ГГц), W- (75-110 ГГц) и D-диапазонов (110-170 ГГц) [19-21].

Как уже было отмечено выше, для повышения мощности и эффективности электронно-волнового взаимодействия в приборах О-типа перспективным является использование многолучевых систем. За последние несколько лет был опубликован ряд статей, направленных на исследование систем с несколькими электронными пучками [9-13]. Однако в основном в них обсуждается взаимодействие многолучевого пучка с высшей поперечной модой ЗС, имеющей такое же число вариаций поля, что и число пучков. В этом случае проблему представляет паразитное самовозбуждение низших мод. Альтернативный подход представляют так называемые многоэтажные или многоканальные ЗС. В частности, ЗС типа многоэтажный меандр была предложена в [14]. В такой ЗС пучок взаимодействует с основной поперечной модой ЗС.

При разработке электровакуумных приборов ТГц диапазона существенной является проблема фокусировки электронных пучков высокой плотности. Поэтому привлекли интерес приборы с псевдоискровым разрядом и ионной фокусировкой пучка [15,16]. На их основе предполагается создание мощных импульсных СВЧ генераторов. При этом отпадает необходимость разработки магнитных фокусирующих систем, которые зачастую составляют большую часть массы устройства. Использование ионной фокусировки позволяет осуществить транспортировку пучка с ультравысокими значениями плотности тока (до нескольких сотен А/см²) на большие расстояния до нескольких сантиметров. В основном в качестве подобных устройств

рассматриваются приборы типа клистронов с распределенным взаимодействием [17,18]. Однако подобные приборы с резонансными колебательными системами являются узкополосными. Поэтому интерес представляют и приборы типа ЛОВ, в которых можно осуществить электронную перестройку частоты генерации.

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

Целью выпускной работы является разработка конструкций и теоретическое исследование новых типов ЗС для приборов О-типа в короткой части миллиметрового диапазона с ленточными электронными пучками, а также моделирование выходных характеристик таких приборов.

Основными **задачами** в ходе выполнения работы для достижения поставленной цели были:

- Разработка конструкций ЗС и моделирование их электродинамических параметров (дисперсионная характеристика, частотные зависимости замедления, сопротивления связи и затухания);
- Разработка устройств широкополосного согласования и моделирование S-параметров исследуемых ЗС;
- Компьютерное моделирование приборов с исследуемыми ЗС и расчет их выходных характеристик;

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана конструкция ЗС типа меандр на диэлектрической подложке для низковольтной миниатюрной ЛБВ W-диапазона с ленточным электронным пучком. Исследованы режимы усиления ЛБВ с планарной ЗС на диэлектрической подложке.

2. Разработана конструкция ЗС типа двухэтажный меандр с согласующими устройствами, подобраны оптимальные геометрические размеры. Подобраны оптимальные параметры пучка для достижения максимальной выходной мощности.

3. Разработана конструкция ЗС типа усеченный \sin -волновод для мощной импульсной ЛОВ V-диапазона с электронной пушкой с псевдоискровым разрядом.

Научно-практическая значимость работы обусловлена тем, что на основе проведенных исследований возможно создание новых типов источников излучения суб-ТГц диапазона: низковольтных относительно узкополосных ЛБВ-усилителей с планарными ЗС малой мощности, мощных многолучевых ЛБВ с ЗС типа многоэтажный меандр, мощных импульсных ЛОВ с ЗС типа усеченный \sin -волновод и ионной фокусировкой пучка.

Апробация работы и публикации. Результаты, полученные в ходе выполнения выпускной квалификационной работы, опубликованы в работах [19-39], а также были представлены на ряде конференций и конкурсов:

- Всероссийские конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», СФ ИРЭ РАН, г. Саратов, 2018-2019 гг.;
- 15-й и 16-й Молодежный конкурс имени Ивана Анисимкина, ИРЭ РАН, г. Москва, 2018-2019 гг, 3-е и 1-е место;
- «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2018», СГУ, г. Саратов, 2018 г.;
- Студенческая конференция факультета нелинейных процессов, СГУ, г. Саратов, 2019 г., 1-е место;
- Итоговая студенческая конференция, СГУ, г. Саратов, 2019 г.;
- Электроника и микроэлектроника СВЧ-2019, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, 2019 г.;
- Школа молодых ученых "Актуальные проблемы мощной вакуумной электроники СВЧ: источники и приложения", ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, 2019 г.;
- Saratov Fall Meeting – 2019, СГУ, г. Саратов, 2019 г.;

- 7th ITG International Vacuum Electronics Workshop (IVEW) 2020 and 13th International Vacuum Electron Sources Conference (IVeSC) 2020, Германия, Бад Хоннеф, 2020 г.

Результаты работы были использованы при выполнении государственного задания № 0030-2015-0185, НИР, поддержанных грантами РФФИ (№16-08-00450, № 19-58-45040, № 20-57-12001) и РНФ (№17-12-01160 и №20-12-18034).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описывается актуальность работы, перечислены основные цели и задачи, представлена научная новизна и научно-практическая значимость работы.

Глава 1 посвящена исследованию ЗС типа меандр на диэлектрической подложке из кварца для ЛБВ W-диапазона с ленточным электронным пучком.

В п. 1.1 представлено схематичное изображение ЗС, геометрические параметры. Проведено моделирование электродинамических параметров ЗС в программном пакете COMSOL Multiphysics. Представлены дисперсионная характеристика ЗС, частотные зависимости напряжения синхронизма и сопротивления связи, усредненного по поперечному сечению пучка.

П. 1.2 посвящен исследованию S-параметров ЗС. Представлена схема согласования ЗС с прямоугольным волноводом, проведено численное моделирование распространения электромагнитных волн в системе. Проведено сравнение результатов, полученных численным и экспериментальным методом, которые показывают хорошее согласование между собой.

В п. 1.3 представлены результаты моделирования выходных характеристик ЛБВ с планарной ЗС типа меандр на диэлектрической подложке и ленточным электронным пучком. В случае использования пучка током 100 мА при длине системы в 1 см коэффициент усиления в режиме работы малого входного сигнала может достигать значений 20 дБ (рис. 1,а). Получены

частотные зависимости выходной мощности при тех же значениях тока и длины системы и при напряжении 5 кВ, которая может достигать 80 Вт при входной мощности порядка 4-6 Вт (рис. 1,б). Рассмотрен случай использования пучка с током 10 мА. Подобные значения соответствуют пучку, созданному с помощью электронных пушек с холодной полевой эмиссией. В данном случае коэффициент усиления в линейном режиме работы достигает 20 дБ, а выходная мощность может достигать значений 4-5 Вт при входной мощности порядка 150-300 мВт (рис. 2). В рассмотренных случаях полоса усиления по уровню -3 дБ оказывается довольно узкой (2-5 ГГц), однако возможна перестройка полосы усиления за счет изменения значений ускоряющего напряжения.

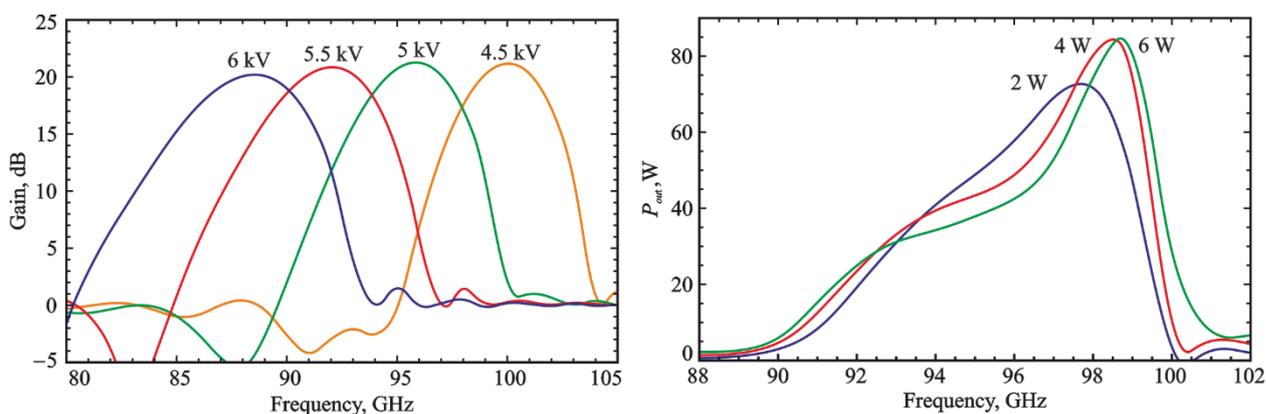


Рис. 1. Выходные характеристики ЛБВ W-диапазона с планарной ЗС на диэлектрической подложке и ленточным электронным пучком при длине системы 1 см и токе пучка 100 мА: *а* – зависимость коэффициента усиления от частоты при различных значениях напряжения пучка; *б* – зависимость выходной мощности от частоты при различных значениях входной мощности и напряжении пучка 5 кВ.

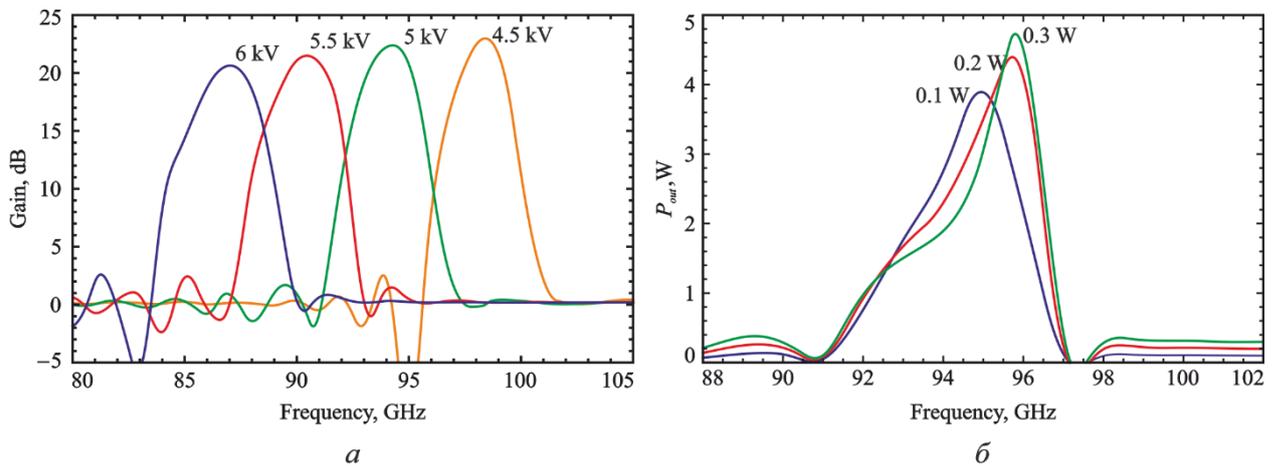


Рис. 2. Выходные характеристики ЛБВ W-диапазона с планарной ЗС на диэлектрической подложке и ленточным электронным пучком при длине системы 2 см и токе пучка 10 мА: *a* – зависимость коэффициента усиления от частоты при различных значениях напряжения пучка; *б* – зависимость выходной мощности от частоты при различных значениях входной мощности и напряжении пучка 5 кВ.

Глава 2 посвящена исследованию ЗС типа двухэтажный меандр с двумя пролетными каналами для мощной двухпучковой ЛБВ V-диапазона.

В п.2.1 представлено описание ЗС, рассмотрена геометрия системы и представлены геометрические параметры ЗС. Проведено моделирование электродинамических параметров. Показано, что в подобной системе реализуются высокие значения сопротивления связи.

В п.2.2 представлена полноразмерная модель ЗС с согласующими устройствами. Проведено моделирование распространения электромагнитных волн в подобной электродинамической структуре. Получены частотные зависимости S-параметров системы длиной 200 периодов.

П. 2.3 посвящен исследованию выходных характеристик ЛБВ с ЗС типа двухэтажный меандр и двумя ленточными электронными пучками. Моделирование электронно-волнового взаимодействия проводилось с помощью современного программного пакета CST Studio Suite с применением PIC-модуля. Показано, что максимальное достижимое значение коэффициента усиления при общем токе 200 мА и напряжении 18 кВ составляет 29.5 дБ на частоте 65.5 ГГц (рис. 3,а). Максимальная мощность в 250 Вт получена на

частоте 68.1 ГГц при входной мощности 1.5-2 Вт (рис. 3,б). Электронный КПД при этом составляет 6.94%.

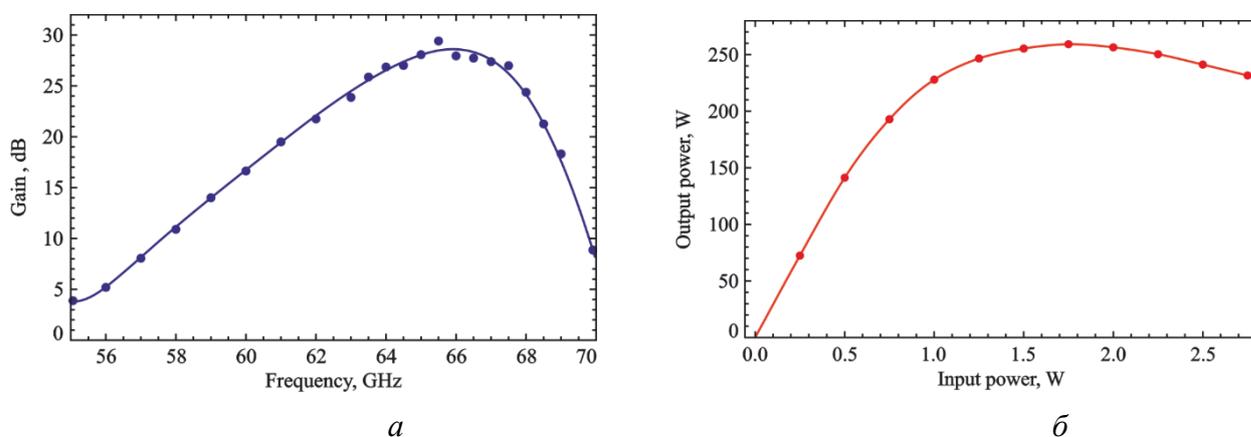


Рис. 3. Выходные характеристики ЛБВ с ЗС типа двухэтажный меандр: а – зависимость коэффициента усиления от частоты при общем токе 200 мА и напряжении 18 кВ при входной мощности 10 мВт; б – зависимость выходной мощности от входной при общем токе 200 мА, напряжении 18 кВ на частоте входного сигнала 68.1 GHz.

Глава 3 посвящена исследованию ЗС типа усеченный \sin -волновод для мощной импульсной ЛОВ V-диапазона с ионной фокусировкой ленточного электронного пучка.

В п. 3.1 представлена новая ЗС типа усеченный \sin -волновод V-диапазона. Представлена геометрия системы и ее электродинамические параметры.

В п.3.2 обсуждается разработка полноразмерной системы с участками согласования ЗС и прямоугольного волновода. Проведено моделирование S-параметров в программном пакете CST Studio Suite.

П 3.3. посвящен исследованию выходных характеристик ЛОВ с представленной ЗС. Проведено моделирование при токе пучка 10 А и различных значениях длины системы и показано, что оптимальным для достижения максимальных значений выходной мощности является длина 10 периодов (рис. 4). Максимальная мощность достигается при напряжении пучка 39 Вт. В случае пучка размерами $1.25 \times 0.25 \text{ мм}^2$ (рис. 5) максимальная

выходная мощность составляет 55.9 кВт. В данном случае генерация происходит на частоте 52.92 ГГц, а электронный КПД составляет 14.35%. В случае пучка размерами 1.8×0.25 мм² (рис. 6) максимальная выходная мощность составляет 68.5 кВт. В данном случае генерация происходит на частоте 53.28 ГГц, а электронный КПД составляет 17.5%.

В заключении представлены основные результаты.

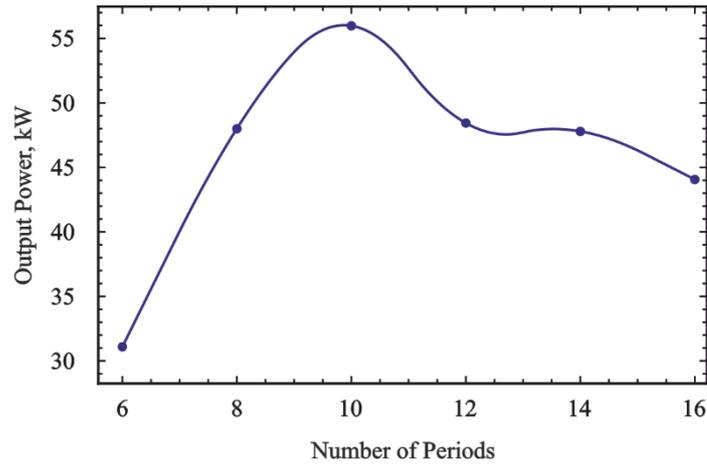


Рис. 4. Зависимость выходной мощности ЛОВ от числа периодов ЗС при токе пучка 10 А и напряжении 39 кВ.

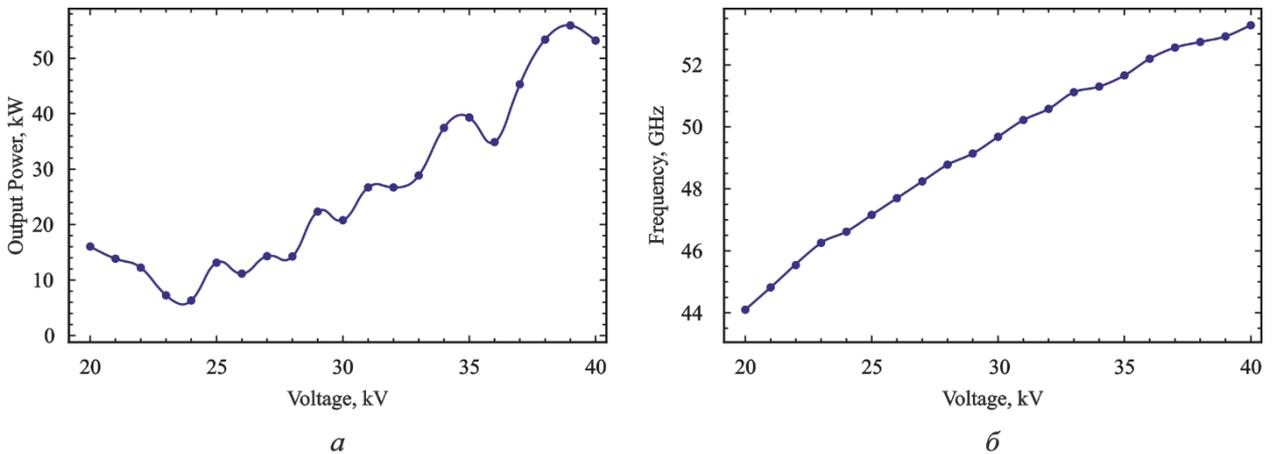


Рис. 5. Выходные характеристики ЛОВ при длине системы в 10 периодов, токе пучка 10 А и различных значениях напряжения в случае пучка размерами 1.25×0.25 мм²: *a* – зависимость выходной мощности от напряжения пучка; *б* – зависимость частоты генерации от напряжения пучка.

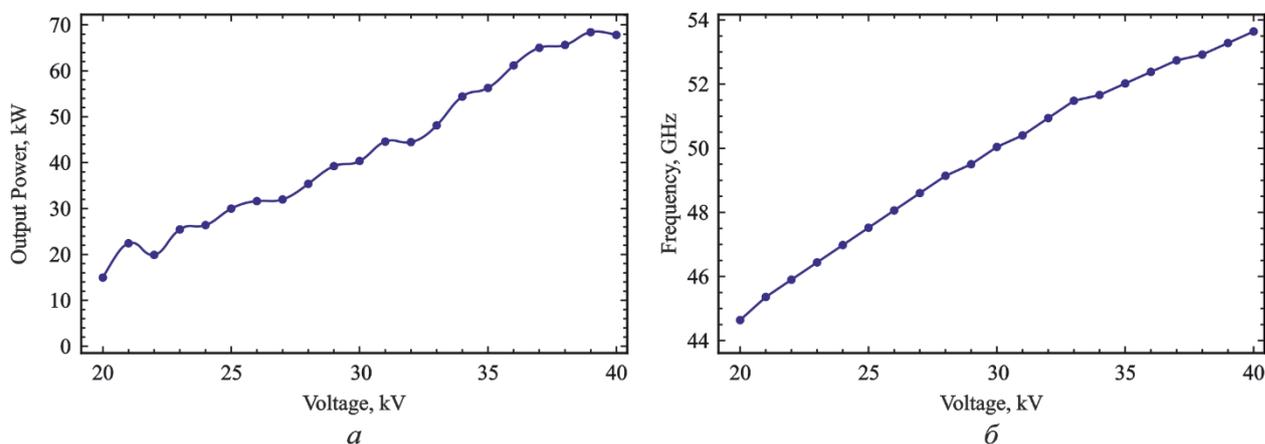


Рис. 6. Выходные характеристики ЛОВ при длине системы в 10 периодов, токе пучка 10 А и различных значениях напряжения в случае пучка размерами $1.8 \times 0.25 \text{ мм}^2$: *a* – зависимость выходной мощности от напряжения пучка; *б* – зависимость частоты генерации от напряжения пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы магистра были получены следующие основные результаты:

1. Разработана конструкция и подобраны оптимальные геометрические параметры ЗС типа меандр на диэлектрической подложке из кварца для ЛБВ W-диапазона с ленточным электронным пучком. Рассчитаны основные электродинамические характеристики: дисперсионная характеристика, зависимости сопротивления связи и напряжения синхронизма от частоты. Разработана система согласования ЗС с прямоугольным волноводом и рассчитаны S-параметры. В частотном диапазоне 70–110 ГГц ослабление не превышает 10 дБ, а потери на отражение — не более 5 дБ. Подобные характеристики представляются приемлемыми для использования в ЛБВ W-диапазона.
2. Исследованы режимы усиления ЛБВ W-диапазона с планарной ЗС типа меандр на диэлектрической подложке. При токе пучка 100 мА и длине системы 1 см коэффициент усиления в линейном режиме работы может превышать 20 дБ. Моделирование выходных характеристик в нелинейном режиме работы показывает, что максимальная выходная

мощность в режиме насыщения может достигать 80 Вт. Также рассмотрено усиление в ЛБВ при токе пучка 10 мА, который может быть получен в электронной пушке с полевой эмиссией. При увеличении длины ЗС до 2 см коэффициент усиления также превышает 20 дБ, а выходная мощность достигает 5 Вт.

3. Подобраны оптимальные размеры ЗС типа двухэтажный меандр с двумя пролетными каналами для ленточных электронных пучков для применения в ЛБВ V-диапазона. Рассчитаны основные электродинамические параметры ЗС и показано, что в подобной системе сопротивление связи принимает довольно большие значения, что свидетельствует о возможности получения довольно высоких выходных мощностей. Разработана система согласования для подобной ЗС и получены частотные зависимости S-параметров. Показано, что в V-диапазоне затухание составляет 3-6 дБ/см, а потери на отражение не превышают 10 дБ.
4. Исследованы режимы усиления ЛБВ с ЗС двухэтажный меандр. Получена зависимость коэффициента усиления от частоты при токе пучка 200 мА и напряжении 18 кВ. Максимально достижимое значение коэффициента усиления при подобных параметрах пучка составляет 29.5 дБ на частоте 65.5 ГГц. Максимальная мощность в 250 Вт получена на частоте 68.1 ГГц при входной мощности 1.5-2 Вт. Электронный КПД при этом составляет около 7%. Исследован процесс фокусировки электронного пучка постоянным магнитным полем и найдено минимальное значение магнитного поля 0.6 Тл, при котором не происходит оседание пучка на поверхность ЗС.
5. Разработана конструкция новой ЗС типа усеченный sin-волновод для применения в импульсной ЛОВ V-диапазона с ленточным электронным пучком и ионной фокусировкой пучка. Исследованы электродинамические характеристики и разработаны согласующие устройства для ЛОВ с подобной ЗС. Показано, что в широком частотном

диапазоне затухание в подобной системе не превышает 2 дБ в широком диапазоне частот, а коэффициент отражения не превышает -10 дБ.

6. Проведена оптимизация конструкции ЛОВ с ЗС типа усеченный \sin -волновод. Проведено исследование режимов генерации ЛОВ. Показано, что при выбранных параметрах электронного пучка (ток 10 А, напряжение 20-40 кВ) максимальная выходная мощность достигается для ЗС, состоящей из 10 периодов волновода. Рассмотрены случаи различных размеров пучка. Максимальная мощность может достигать 68.5 кВт. При этом частота генерации составляет около 53 ГГц, а электронный КПД превышает 17%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.S., Park J.H., Temkin R.J.* Vacuum electronic high power terahertz sources // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1. No. 1. P. 54-75.
2. *Srivastava V.* THz vacuum microelectronic devices // *J. Physics: Conf. Series.* 2008. Vol. 114. No.1. 012015.
3. *Dhillon S.S., Vitiello M.S., Linfield E.H., et al.* The 2017 terahertz science and technology roadmap // *J.Phys D Appl Phys.* 2017; 50:043001–043001.
4. *Гуляев Ю.В., Жбанов А.И., Захарченко Ю.Ф., Нефедов И.С., Сеницын Н.И., Торгашов Г.В.* Планарные замедляющие системы миниатюрных электровакуумных СВЧ приборов // *Радиотехника и электроника.* 1994. Т. 39. № 12. С. 2049-2058.
5. *Ulisse G., Krozer V.* W-band traveling wave tube amplifier based on planar slow wave structure // *IEEE Electron Device Lett.* 2017. Vol. 38. No. 1. P. 126-129.
6. *Bai N, Feng C., Liu Y., Fan H., Shen C., Sun X.* Integrated microstrip meander line traveling wave tube based on metamaterial absorber // *IEEE Trans. Electron Devices* 2017. Vol. 64. No. 7. P. 2949-2954.
7. *Wang S., Aditya S., Xia X., Ali Z., Miao J.* On-wafer microstrip meander-line slow-wave structure at Ka-band // *IEEE Trans. Electron Devices* 2018. Vol. 65. No. 6. P. 2142–2148.
8. *Wang S., Aditya S., Xia X., Ali Z., Miao J., Zheng Y.* Ka-Band Symmetric V-Shaped Meander-Line Slow Wave Structure // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2019. Vol. 47. No. 10. P. 4650-4657
9. *Shin Y.M.* Superimposed coherent terahertz wave radiation from mono-energetically bunched multi-beam // *Phys. Plasmas.* 2012. Vol. 19. No. 6. 063115.
10. *Shu G., Liu G., Chen L., Bambarandage H., and Qian Zh.* Terahertz backward wave radiation from the interaction of high-order mode and double sheet electron beams // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. Vol. 51. No. 5. 055107.

11. *Gee A., Shin Y. M.* Gain analysis of higher-order-mode amplification in a dielectric-implanted multi-beam traveling wave structure. // *Phys. Plasmas*, 2013. Vol. 20. No. 7. 073106.
12. *Navrotsky I.A., Burtsev A.A., Danilushkin A.V., Karetnikova T.A., Ryskin N.M., and Shumikhin K.V.* Developing of EOS model with elliptical beams for THz devices // *Proc. International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. 2018. Vol. 1. P. 170-174.
13. *Плоских А. Э., Рыскин Н. М.* Моделирование лампы бегущей волны суб-ТГц диапазона с многолучевым ленточным электронным пучком // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*. 2019. Т. 19, Вып. 2. С. 113–121.
14. *Торгашов Г.В., Рыскин Н.М., Шалаев П.Д.* Замедляющая система для лампы бегущей волны // *Патент RU 183912 U1*. 2018.
15. *Gurjar N., Hossain A. M., Singh R., Sharma R. K., Anitha V. P., Singh R. and Kumar N.* Design Approach for a Miniaturized Pseudospark-Based High-Current-Density Sheet Electron Beam Source // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2018. Vol. 65. No. 6. P. 2129–2134.
16. *Cross A.W., Yin H., He W., Ronald K., Phelps A. D. R., Pitchford L. C.* Generation and application of pseudospark-sourced electron beams // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. Vol. 40, No. 7, P.1953-1956.
17. *Shu G. X. et al.* Demonstration of a Planar W-Band, kW-Level Extended Interaction Oscillator Based on a Pseudospark-Sourced Sheet Electron Beam // *IEEE Electron Device Letters*. 2018. Vol. 39, No. 3, P. 432-435.
18. *Xie J. et al.* Study of a 0.35 THz Extended Interaction Oscillator Driven by a Pseudospark-Sourced Sheet Electron Beam // *IEEE Trans. on Electron Devices*. 2020. Vol. 67. No. 2. P. 652-658.
19. *Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Benedik A.I., Torgashov R.A., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I.* Planar microstrip slow-wave structure for a low-voltage V-band traveling-wave tube with a sheet electron beam // *IEEE Electron Device Letters*. 2018. Vol. 39. No. 5. P. 757-760.

20. *Torgashov G.V., Torgashov R.A., Titov V.N., Rozhnev A.G., Ryskin N.M.* 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.
21. *Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Павлов А.М., Галушка В.В., Бахмеев И.Ш., Молчанов С.Ю.* Теоретическое и экспериментальное исследование миниатюрной планарной замедляющей системы на диэлектрической подложке для лампы бегущей волны W-диапазона // *ЖТФ*. 2020. Т. 90. № 4. С. 686-692.
22. *Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Рожнёв А.Г., Торгашов Г.В.* Исследование планарных замедляющих систем на диэлектрической подложке для лампы бегущей волны миллиметрового диапазона // *Нелинейный мир*. 2019. Т. 17. № 1. С. 64-66.
23. *Торгашов Р.А., Торгашов Г.В., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г.* Новая меандровая замедляющая система для лампы бегущей волны миллиметрового диапазона с двумя электронными пучками // *Нелинейный мир*. 2020. Т. 18. № 1. С. 73-75.
24. *Benedik A.I., Karetnikova T.A., Torgashov R.A., Terentyuk A.G., Rozhnev A.G., Torgashov G.V., Ryskin N.M.* Simulation and development of novel slow-wave structures for miniaturized THz-band vacuum-tube devices // *Proc. SPIE*. Vol. 10717, Saratov Fall Meeting 2017: Laser Physics and Photonics XVIII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data IV. 2018. Art. no. 107171A.
25. *Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Kozhevnikov I.O., Pavlov A.M., Galushka V.V., Sakharov V.K., Torgashov R.A., Bessonov D.A., Galkin A., Ryskin N.M.* Comparison of nanoseconds and picoseconds laser ablation for microfabrication of planar slow-wave structures for D-band vacuum electronic devices with sheet electron beam // *Proc. SPIE*. 2020. Vol. 11458,

Saratov Fall Meeting 2018: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling.

26. *Рыскин Н.М., Рожнёв А.Г., Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Павлов А.М., Галушка В.В., Кожевников И.О., Бурцев А.А., Данилушкин А.В., Навроцкий И.А., Плоских А.Э., Терентюк А.Г., Торгашов Р.А., Торгашов Г.В., Синицын Н.И.* Разработка ламп бегущей волны миллиметрового и терагерцевого диапазонов с пространственно-развитыми замедляющими системами // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 126-130.
27. *Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Galushka V.V., Ryabukho P.V., Rozhnev A.G., Torgashov R.A., Torgashov G.V., Ryskin N.M.* Experimental and numerical study of electromagnetic parameters of V-band planar meander slow-wave structure // 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). 1-4 Aug. 2018, Toyama, Japan. P. 926-929.
28. *Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Torgashov R.A., Galushka V.V., Pavlov A.M.* Development of planar slow-wave structures for low-voltage millimeter-band vacuum tubes // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Nagoya. 2018. P. 1-2.
29. *Starodubov A.V., Galushka V.V., Torgashov R.A., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Torgashov G.V., Ryabukho P.V., Rozhnev A.G., Ryskin N.M.* Planar slow-wave structures for low-voltage millimeter-band vacuum devices (novel approach for fabrication, numerical and experimental measurements) // 2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS). 31 Oct.-2 Nov. 2018. Istanbul, Turkey. P. 128-131.
30. *Starodubov A.V., Pavlov A.M., Galushka V.V., Bakhteev I.Sh., Serdobintsev A.A., Torgashov G.V., Ryabukho P.V., Molchanov S.Yu., Torgashov R.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M.* Study on a microfabrication W-band planar

- meander-line slow-wave structure // 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Busan, South Korea, April 28 – May 1, 2019.
31. *Starodubov A.V., Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Pavlov A.M, Serdobintsev A.A., Torgashov R.A., Galushka V.V., Kozhevnikov I.O., Bahteev I.Sh., Ulisse G., Krozer V.* Microfabrication and study of planar slow-wave structures for low-voltage V-band and W-band vacuum tubes // 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 1-6 Sept. 2019, Paris, France. P. 1-2.
32. *Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Галушка В.В., Торгашов Г.В., Бахтеев И.Ш., Молчанов С.Ю.* Исследование миниатюрной замедляющей системы на диэлектрической подложке для низковольтной лампы бегущей волны миллиметрового диапазона // *Электроника и микроэлектроника СВЧ-2019. Сборник статей VIII Всероссийской конференции.* СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. С. 117-121.
33. *Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Синицын Н.И., Торгашов Г.В.* Исследование планарных замедляющих систем на диэлектрических подложках для лампы бегущей волны миллиметрового диапазона // *«Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: сборник трудов XIII Всерос. конф. молодых ученых.* Саратов: Издательство «Техно-Декор», 2018. С. 320-321.
34. *Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Галушка В.В., Торгашов Г.В., Бахтеев И.Ш., Молчанов С.Ю.* Исследование планарной замедляющей системы типа меандр на диэлектрической подложке для ЛБВ миллиметрового диапазона // *«Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: сборник трудов XIV Всерос. конф. молодых ученых.* Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2019. С. 261-262.
35. *Торгашов Р.А.* Исследование замедляющей системы усеченный sin-волновод для ЛБВ миллиметрового диапазона // *«Наноэлектроника,*

- нанофотоника и нелинейная физика»: сборник трудов XIV Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2019. С. 263-264.
36. *Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Павлов А.М., Галушка В.В., Синев И.В., Бахтеев И.Ш., Молчанов С.Ю., Рожгнев А.Г., Торгашов Г.В., Торгашов Р.А., Рыскин Н.М.* Разработка, изготовление и исследование планарных замедляющих структур для устройств вакуумной микроэлектроники миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн // Тезисы докладов. 25-28 февраля 2019 г. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2019. С. 63-64.
37. *Torgashov R.A., Ryskin N.M., Starodubov A.V., Ulisse G., Krozer V, Pavlov A.M., Galushka V.V., Serdobintsev A.A., Kozhevnikov I.O., Rozhnev A.G.* Simulation and Experimental Study of Planar Slow-wave Structures on Dielectric Substrates for Microfabricated Traveling-Wave Tubes // Books of Abstract ITG-IVEW & IVE SC 2020, Germany, 2020
38. *Ryskin N.M., Torgashov R.A., Ploskih A.E., Torgashov G.V., Titov V.N., Rozhnev A.G.* Studies on High-Power Millimeter-band traveling-wave tube amplifiers with multiple sheet electron beams // Books of Abstract ITG-IVEW & IVE SC 2020, Germany, 2020
39. *Starodubov A.V., Torgashov R.A., Ryskin N.M., Pavlov A.M., Galushka V.V., Rozhnev A.G., Kumar N., Vishant, Jain S., Gurjar N., Singhal K., Sharma R. K.* Development of the pseudospark-source electron gun and a slow wave structure for a millimeter-band backward-wave oscillator // Books of Abstract ITG-IVEW & IVE SC 2020, Germany, 2020