

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

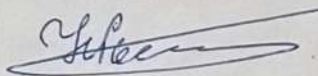
Кафедра нелинейной физики

Теоретическое и экспериментальное исследование микроразмерных
структур вакуумной микроэлектроники миллиметрового диапазона,
создаваемых с помощью технологии лазерной микрообработки

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

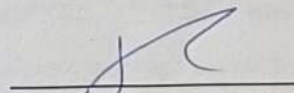
Студента 2 курса 2211 группы
направления 03.04.01 «Прикладные математика и физика»
Института Физики
Ножкина Дмитрия Андреевича

Научный руководитель
Зав. кафедрой динамических систем,
д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. ст., уч. зв.
фамилия


личная подпись, дата

Н.М. Рыскин
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 год

Введение

Актуальность работы. В последнее время наблюдается активное развитие беспроводных информационно-коммуникационных систем, работающих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [1]. Для этих приложений требуются источники когерентного излучения с мощностью порядка 100 Вт в диапазоне 0.1 ТГц и выше. Подобным требованиям удовлетворяют приборы вакуумной СВЧ электроники [2]. Особый интерес вызывают приборы типа лампы бегущей волны (ЛБВ) и лампы обратной волны (ЛОВ) [2-3]. ЛБВ представляет собой широкополосный усилитель, а ЛОВ — генератор с электронной перестройкой частоты в широком диапазоне. Однако на частотах свыше 0.1 ТГц характерные размеры ключевых элементов этих приборов уменьшаются настолько, что требуются новые конструкции приборов и новые технологии их изготовления, которые обеспечивали бы высокую скорость, низкую стоимость и высокую точность [4].

Среди ключевых элементов вакуумных электронных приборов можно выделить электронную пушку: устройство, формирующее электронный пучок с заданными размерами и характеристиками (ток пучка, плотность тока, энергия электронов), а также замедляющую систему (ЗС), обеспечивающую эффективное взаимодействие пучка с высокочастотным электромагнитным полем [2,3]. В субтерагерцовом (суб-ТГц) диапазоне особый интерес представляют приборы с ленточными электронными пучками и пространственно-развитыми ЗС, что позволяет повысить эффективность работы устройства при сохранении компактности прибора [5].

Для создания таких миниатюрных компонентов используются технологии прецизионной микрообработки, такие как фотолитография, глубокое реактивное ионное травление, 3D-печать, нанofрезерование с ЧПУ и лазерная микрообработка. В последнее время значительное распространение получила лазерная микрообработка, основанная на использовании наносекундных, пикосекундных и фемтосекундных лазерных импульсов. Этот метод обладает рядом преимуществ, включая малое количество стадий

технологического процесса, гибкость, бесконтактность обработки и отсутствие необходимости в использовании агрессивных химических реагентов. В частности, в работе [8] была разработана технология, использующая магнетронное напыление и лазерную микрообработку, с помощью которой изготовлены микрополосковые планарные ЗС на диэлектрических подложках в V ($40 \div 75$ ГГц), W ($75 \div 110$ ГГц) и D ($110 \div 170$ ГГц) диапазонах. Однако в случае приборов с мощностью порядка 100 Вт и выше целесообразно отказаться от тонкопленочных структур на диэлектрических подложках.

Целью настоящей работы является разработка компонентов миниатюрных приборов вакуумной СВЧ-электроники (электронная пушка, замедляющая система) и их изготовление с помощью технологии лазерной микрообработки.

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

1. Разработка конструкции электронной пушки для ЛБВ W-диапазона и ее моделирование с помощью пакета COMSOL Multiphysics;
2. Изготовление конструктивных элементов электронной пушки с помощью технологии лазерной микрообработки;
3. Отработка технологии микрообработки лазерными импульсами наносекундной длительности для создания планарных электродинамических компонентов миллиметрового диапазона из медных пластин толщиной $0.15 \div 0.2$ мм;
4. Верификация результатов с помощью оптической микроскопии, исследование морфологии поверхности изготовленных структур;
5. Изготовление ЗС W-диапазона;
6. Анализ полученных результатов с формулировкой оптимальных режимов микрообработки.

Таким образом, представленное исследование охватывает как экспериментальные, так и теоретические аспекты разработки современных

миниатюрных вакуумных приборов, что в перспективе позволит значительно повысить эффективность беспроводных систем связи и других приложений суб-ТГц диапазона.

Результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

- IX Всероссийская микроволновая конференция, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва (2025);
- XVIII и XIX Всероссийские конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», СФИРЭ РАН, г. Саратов (2024, 2025);
- Ежегодный молодёжный научно-технический семинар (ЕМНТС–2024) АО «НПП «АЛМАЗ» (2024);
- Студенческие научные конференции Института физики СГУ (2024, 2025).

Результаты, полученные в ходе выполнения выпускной квалификационной работы, опубликованы в 8 научных работах.

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

Основное содержание работы.

В первой главе описывается технология лазерной микрообработки материалов. Лазерная микрообработка подразделяется на фрезерование, маркировку, прецизионную нано- и микрообработку, прецизионную резку, скрайбирование и гравировку.

Помимо этого, источники лазерного излучения можно разделить на два класса: импульсные и непрерывные. В свою очередь импульсное воздействие можно разделить на 3 группы:

- Мили- и микросекундные используют для сварки и резки толстых (толщиной $>0,2\text{мм}$) материалов и прошивки отверстий соответственно;
- Наносекундные лазеры применяют для микрообработки: гравировки изделий или их маркировки, удаления пленок и фрезеровки;

- Пико- и фемтосекундные находят применение в прецизионной нано- и микрообработке, обработке прозрачных материалов.

Описываются параметры, которыми характеризуется энергия лазерного излучения, а также процесс наносекундной лазерной абляции — это высокоточный физический процесс удаления материала с поверхности образца путем воздействия на него лазерными импульсами ультракороткой длительности [7].

Также описывается принцип работы лазерной установки и другое используемое в работе оборудование:

- Лазерная технологическая установка – «МикроСЕТ РА»;
- Ультразвуковая ванна;
- Оптическая микроскопия - Olympus MX51;
- Сканирующая электронная микроскопия - Tescan Mira II LMU.

В главе 2 в пункте 2.1 описываются конструкции исследуемых ЗС. Первой ЗС представляет собой металлический полосок в форме меандра с боковыми опорами для V-диапазона и W-диапазона. Вторая исследуемая структура представляет собой лестничную ЗС с щелями гантелеобразной формы для W-диапазона. Также приведены их геометрические параметры.

В главе 2 пункте 2.2 говорится о технологическом маршруте изготовления ЗС из листовой меди толщиной 200 мкм. Технологический маршрут можно описать следующим образом. На первом этапе происходит создание макета для лазерной установки. На данном этапе важно учитывать как особенности геометрии структуры, так и радиус лазерного пятна. Приведены схематические изображения макетов исследуемых структур.

После создания макета проводится лазерная резка. Данный этап делится на следующие шаги:

1. Лазерное излучение проходит по внешнему контуру структуры, при этом используется наименьшая длительность лазерного импульса и наименьшая низкая частота следования импульсов. Создается

предварительный канал в виде аккуратного углубления на поверхности медного листа с целью улучшения качества дальнейшей лазерной резки

2. Лазерное излучение с большей мощностью в импульсе многократно проходит по ранее сформированному каналу и прорезает металл по контуру внутри структуры.

3. Сформированная структура ЗС вырезается из тонкого листа меди.

Затем проводится ультразвуковая химическая очистка изготовленных структур с помощью ультразвуковой ванны и химических реагентов: раствор ортофосфорной кислоты, щелочной раствор гидрокарбоната натрия, изопропиловый спирт и деионизированная вода. Данный комплекс позволяет качественно очистить структуру от оксидов, наплывов и органических загрязнений.

На заключительном этапе проводится верификация полученных результатов с помощью методов оптической (Olympus MX51, Япония) и сканирующей электронной микроскопии (MIRA II LMU, Tescan, Чехия).

В главе 2 пункте 2.3 описываются результаты изготовления ЗС из листовой меди. Были изготовлены тестовые образцы лестничной ЗС (рис). Анализ морфологии структуры, что наблюдается трапецевидное сечение профиля, то есть размеры с лицевой и обратной стороны отличаются.

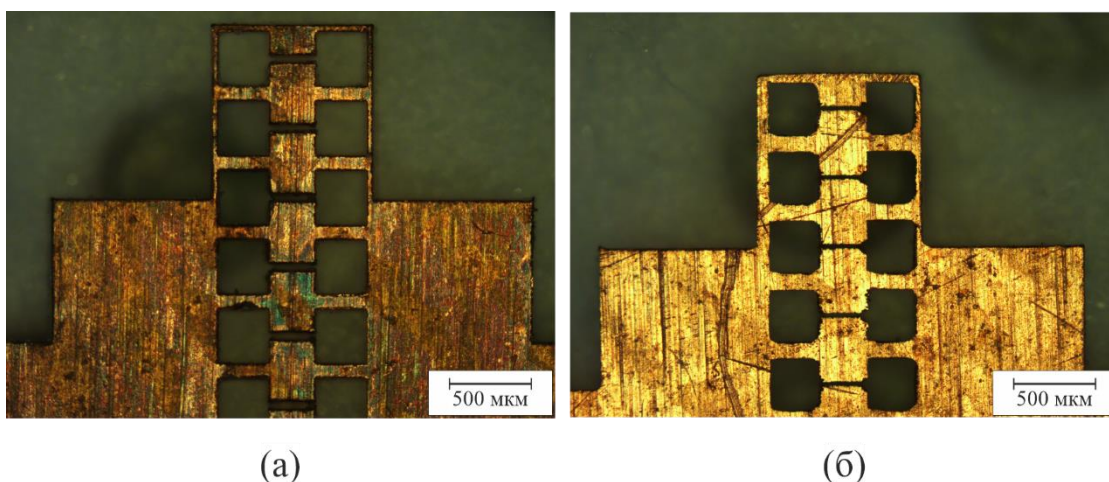


Рис. 2.13. Фотография структуры с оптической микроскопии. А – верхняя сторона структуры, Б – нижняя сторона структуры.

Также были изготовлены ЗС меандрового типа для V-диапазона (рис) и W-диапазона (рис).

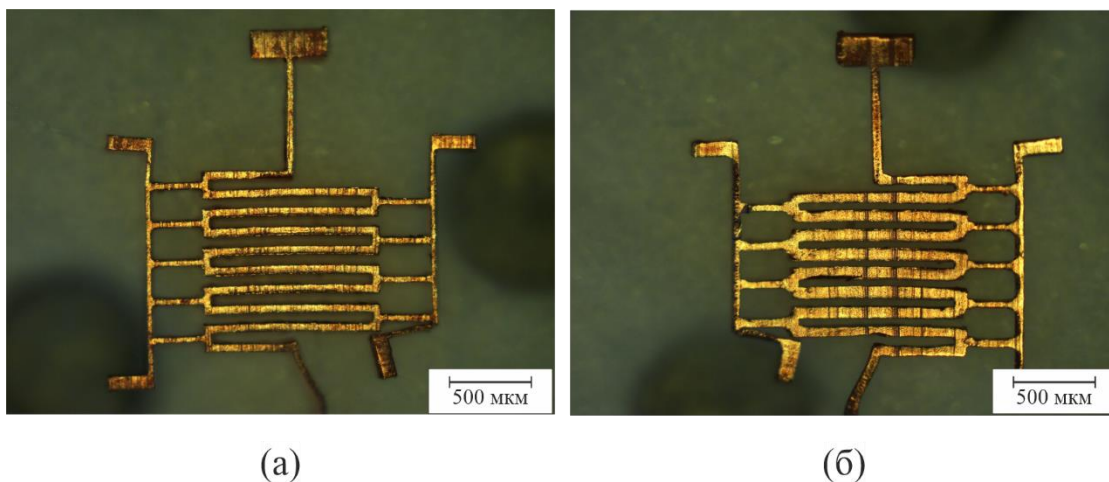


Рис. 2.14. Фотография меандровой ЗС для V-диапазона с оптической микроскопии. А – верхняя сторона структуры, Б – нижняя сторона структуры.

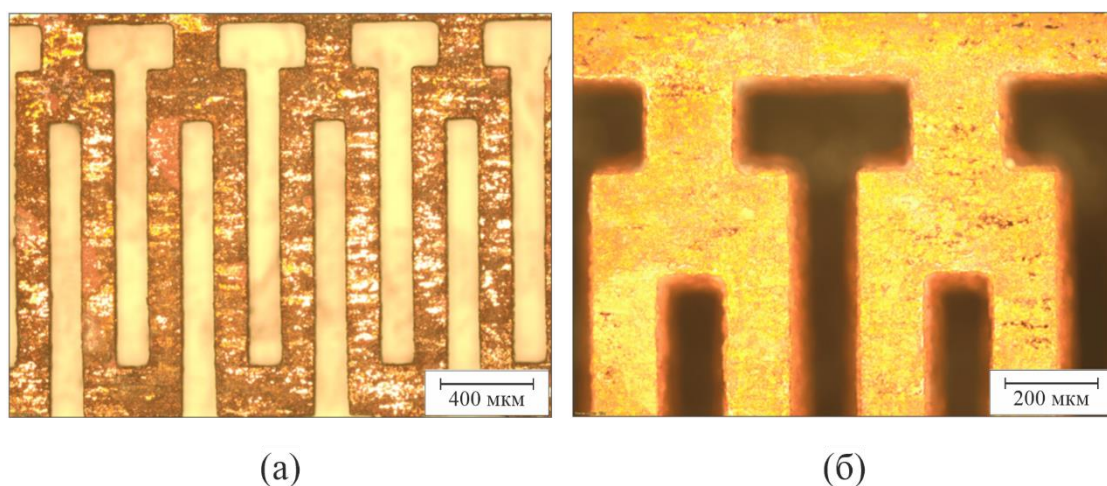


Рис. 2.15. Фотографии меандровой ЗС для W-диапазона с оптической микроскопии. А – общий вид, Б – увеличенный фрагмент структуры.

Была рассчитана погрешность изготовления основных элементов указанной структуры ЗС. Для этого в пяти точках осуществлялся замер латеральных размеров, после чего осуществлялся расчет доверительного интервала. Погрешность в изготовлении не превышает 9 мкм.

В главе 3 пункте 3.1 описывается разработка электронной пушки для миллиметрового диапазона. В рамках данной работы рассматриваются методы моделирования электронной пушки, формирующей цилиндрический

электронный пучок при напряжениях не более 15 кВ и токе пучка ~100-150 мА, с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics. Представлена геометрия и размеры электронной пушки. Моделирование проводилось для модели термоэлектронной эмиссии в режиме ограничения пространственным зарядом и модели термоэлектронной эмиссии в режиме ограничения тепловым током.

В пункте 3.1.1. говорится о методике численного моделирования для модели термоэлектронной эмиссии в режиме ограничения пространственным зарядом.

В пункте 3.1.2. приводятся результаты численного моделирования двухмерной модели. Была выявлена зависимость численного параметра построенной модели, сильно влияющим на результаты расчета. Данный параметр является расстоянием между поверхностью катода и виртуальным катодом. Было выявлено, что при значениях параметра от 0.025 до 0.035 мм находится область, где анодный ток принимает близкие значения порядка 100 мА при напряжении 12.4 кВ. Построены картины распределения электрического поля и потенциала, плотности тока. Показаны иллюстрации траекторий движения электронов.

На выходе из анодной области радиус электронного пучка составляет ~0.114 мм, а электроны долетают до анода за время ~0.175 нс при напряжении на аноде 12.4 кВ при этом. анодный ток составляет ~115 мА. Средняя плотность тока в области влета в пространство взаимодействия составляет порядка 200-300 А/см².

Далее была построена вольт-амперная характеристика электронной пушки при изменении напряжения на аноде в диапазоне от 2 до 15 кВ. Результаты моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics были сопоставлены с результатами численного моделирования в программном пакете CST Studio Suite. Результаты, полученные с использованием разных программных пакетов, хорошо соответствуют друг другу, и полученная зависимость имеет характер закона степени 3/2.

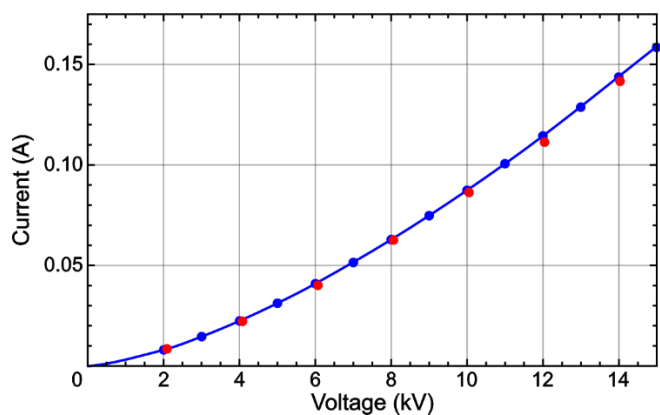


Рис. 3.15. Вольт-амперная характеристика электронной пушки. Синим цветом обозначены результаты моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics, красным цветом – CST Studio Suite.

В пункте 3.1.3. описывается методика численного моделирования для модели термоэлектронной эмиссии в режиме ограничения тепловым током.

В пункте 3.1.4. приводятся результаты численного моделирования трехмерной модели. Построены картины распределения электрического поля и потенциала, также были построены графики зависимости электрического потенциала от расстояния вблизи катода. Построены картины распределения плотности тока. Показаны иллюстрации траекторий движения электронов. Траектории движения электронов были наложены на эквипотенциальные линии. Видно, что электроны движутся преимущественно нормально к эквипотенциальным поверхностям и заметно влияние пространственного заряда, вызывающее искривление траекторий и изменение формы эквипотенциалей.

На выходе из анодной области радиус электронного пучка составляет ~ 0.114 мм, а электроны долетают до анода за время ~ 0.175 нс при напряжении на аноде 12.4 кВ при этом. анодный ток составляет ~ 115 мА. Средняя плотность тока в области влета в пространство взаимодействия составляет порядка 200-300 А/см².

На выходе из анодной области радиус электронного пучка составляет ~ 0.130 - 0.135 мм и электроны долетают до анода за время ~ 0.4 нс, при этом анодный ток составляет ~ 105 мА при напряжении анода 12.4 кВ. Также было

выявлено, что в системе наблюдается токооседание на поверхности фокусирующих электродов и на анод, которое составляет порядка 3-4 мА. Средняя плотность тока принимает аналогичные значения порядка 300 А/см².

Далее была построена вольт-амперная характеристика электронной пушки при изменении напряжения на аноде в диапазоне от 7 до 15 кВ, которая приведена на рис. 3.24. Красная линия соответствует результатам моделирования двумерной модели. Синими точками показан полный ток с катода, красными точками — ток, прошедший сквозь анод в пролетный канал. Из полученных зависимостей видно, значения полного тока, полученные с использованием различных методик, находятся в очень хорошем соответствии в рабочем диапазоне напряжений. Однако трехмерная модель предсказывает оседание на поверхность анода в пределах 15÷25 мА. Отличие обусловлено использованием более строгой модели, учитывающей разброса электронов по скоростям на поверхности катода. Отметим, что в расчетах учитывалась только электростатическая фокусировка, тогда как в реальной электронно-оптической системе предполагается использование внешнего магнитного поля, создаваемого магнитной фокусирующей системой. Таким образом, можно ожидать более высокого токопрохождения.

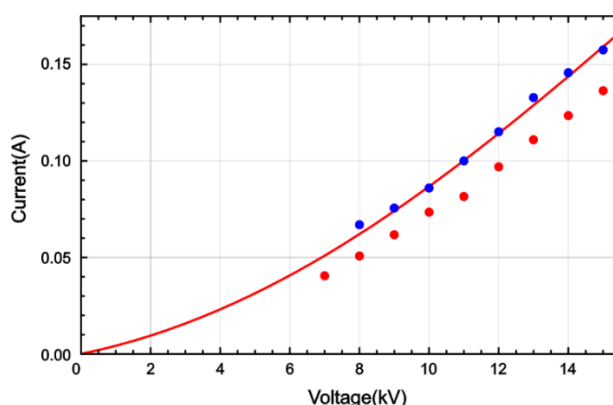


Рис. 3.27. Вольт-амперная характеристика электронной пушки. Красная линия соответствует результатам двумерной модели в программном пакете COMSOL Multiphysics. Синими точками обозначен полный ток с катода, красными точками показан ток, прошедший анод в пролетный канал.

В пункте 3.2 описываются результаты изготовления элементов электронной пушки. Ранее предложенный технологический маршрут лазерной резки медной фольги был адаптирован для работы с другими материалами (молибден и гексаборид лантана).

Из гексаборида лантана были изготовлены катоды. Для оптимизации процесса применялась альтернативная лазерная установка большей мощности. С ее помощью была сформирована крестовина из катодной таблетки. Далее из крестовины вырезался катодный выступ с использованием установки «МикроСЕТ РА».

Помимо изготовления катода, были изготовлены фокусирующие электроды, элементы крепления и подогреватель из молибдена толщиной 200 мкм. После чего, все изготовленные компоненты были собраны в макет электронной пушки.

Заключение.

Разработан технологический маршрут изготовления планарных замедляющих систем (ЗС) V- и W-диапазона методом лазерной резки медной фольги (0.15–0.2 мм) на установке «МикроСЕТ РА». Изготовлены меандровые и лестничные ЗС, пригодные для применения в миниатюрных электровакуумных приборах. Установлено, что точность резки достигает 9 мкм.

Выполнено моделирование и сборка макета электронной пушки с катодом диаметром 1.26 мм, фокусирующим электродом (три пластины) и анодом с отверстием 0.33 мм. Расчёты в COMSOL Multiphysics (2D и 3D модели) показали формирование электронного пучка диаметром ~0.26 мм, током 80–150 мА при напряжении 10–15 кВ и плотностью тока на катоде 8 А/см². 3D-моделирование дало более точные результаты, учитывая разброс скоростей и минимум потенциала у катода. Отмечено токооседание на аноде до 25 мА. Полученные ВАХ согласуются с теорией Чайльда–Ленгмюра–Богуславского и моделями CST Studio Suite.

Также выполнена адаптация технологии для резки молибдена и LaB₆. Изготовлены элементы пушки и катоды. Завершена сборка, планируются экспериментальные исследования и оптимизация технологии для повышения качества.

Список литературы

1. O'Hara J.F. et al. A perspective on terahertz next-generation wireless communications // *Technologies*. 2019. Vol. 7, № 2. P. 43.
2. Григорьев А.Д. Терагерцевая электроника. // Физматлит. 2020. 292 с.
3. Цимринг Ш.Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012. 576 с.
4. Стародубов А.В., Ножкин Д.А., Расулов И.И., Сердобинцев А.А., Кожевников И.О., Галушка В.В., Сахаров В.К., Бессонов Д.А., Галкин А.Д., Бахтеев И.Ш., Молчанов С.Ю., Герман С.В., Рыскин Н.М. Технологии формирования электродинамических структур для устройств вакуумной микроэлектроники миллиметрового и терагерцевого диапазонов (обзор) // *Радиотехника и электроника*. 2022. Т. 67, № 10. С. 935–945. DOI: 10.31857/S0033849422100126.
5. Zhang, C. Demonstration of a PCM-focused sheet beam TWT amplifier at G-Band / C. Zhang, P. Pan, J. Cai, X. Chen, H. Tian, S. Su, K. Zhou, W. Meng, Y. Li, B. Song, Y. Gong, J. Feng // *IEEE Trans. Electron Devices*. – 2023. – V. 70. – P. 2798-2803. DOI: 10.1109/TED. 2022.3233291.
6. Chichkov B.N. et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids // *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process*. 1996. Vol. 63, № 2. P. 109–115.
7. Russo R.E. et al. Laser Ablation // *Laser-Induced Break. Spectrosc*. 2007. P. 49–82.
8. 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 low-voltage V-band traveling-wave tube with a sheet electron beam// *IEEE Electron Device Lett*. 2018. Vol. 39, No. 5. P. 757. DOI: 10.1109/LED.2018.2821770.