

Применение лазерных технологий для изготовления компонентов вакуумных электронных приборов миллиметрового диапазона

© Д.А. Ножкин,^{1,2} Д.А. Бессонов,^{1,3} И.А. Навроцкий,^{1,4} Р.А. Торгашов,^{1,2} В.Д. Чурикова,² С.Ю. Молчанов,⁵ И.С. Ожогин,² А.А. Ростунцова,^{1,2} Н.М. Рыскин^{1,2}

¹ Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
410019 Саратов, Россия

² Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия

³ Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,
410054 Саратов, Россия

⁴ АО „НПП „Алмаз“,
410033 Саратов, Россия

⁵ Институт физики твердого тела РАН,
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия
e-mail: torgashovra@gmail.com

Поступило в Редакцию 14 декабря 2025 г.

В окончательной редакции 14 декабря 2025 г.

Принято к публикации 14 декабря 2025 г.

Представлены результаты изготовления микроразмерных структур для приборов вакуумной электроники миллиметрового диапазона с помощью микрообработки лазерными импульсами наносекундной длительности. Обсуждены особенности технологии лазерной резки тонких пластин из различных материалов (медь, молибден). Изготовлены макеты прямоугольных волноводов W-диапазона (75–110 GHz) и замедляющих систем V-диапазона (50–65 GHz). Представлены результаты морфологического анализа и экспериментального исследования S-параметров изготовленных образцов. Разработана конструкция микроразмерной электронной пушки и представлены результаты изготовления ее компонентов (катод, фокусирующие электроды).

Ключевые слова: лазерная микрообработка, лампа бегущей волны, замедляющая система, электронная пушка, прямоугольный волновод.

DOI: 10.61011/JTF.2026.05.62763.329-25

Введение

В последние годы происходит активное освоение коротковолновой части миллиметрового диапазона для различных приложений, прежде всего, для беспроводных информационных и телекоммуникационных систем [1–3]. Для таких приложений требуются источники когерентного излучения, обеспечивающие выходную мощность порядка 10–100 W на частотах 0.1 THz и выше. Подобные характеристики могут быть достигнуты с использованием вакуумных электронных приборов [4–6]. Особый интерес представляют приборы типа ламп бегущей волны (ЛБВ) и ламп обратной волны (ЛОВ). Однако изготовление компонентов таких приборов (электронно-оптические системы, электродинамические системы и т.д.) представляет собой сложную задачу, поскольку характерные размеры структур имеют порядок сотен микрон и менее. Решение этой задачи требует использования современных технологий микрообработки. Наибольшее распространение получили технология фотолитографии и ее модификации (например, LIGA-технология), глубокое реактивное ионное травление, прецизионное микрофрезерование, электроискровая обработка (см., например, [6–10]). Однако у них есть

и ряд недостатков, в частности, высокая себестоимость, трудоемкость и большая длительность процесса, в ряде случаев — необходимость использования агрессивных химических реагентов.

Ранее нами была развита технология изготовления микроразмерных электродинамических структур на основе лазерной абляции импульсами нано- и пикосекундной длительности (см., например, [8,11–13]). К ее достоинствам следует отнести высокую скорость производства (полный цикл изготовления может занимать менее одного рабочего дня), низкую себестоимость, а также гибкость в плане быстрого внесения изменений в конструкцию изготавливаемых структур. С помощью данной технологии были, в частности, разработаны и изготовлены планарные микрополосковые периодические замедляющие системы (ЗС) на диэлектрических подложках коротковолновой части миллиметрового диапазона (вплоть до 170 GHz) [11–13]. Экспериментальное исследование их электродинамических характеристик показало, что они имеют низкие потери на прохождение и отражение. Например, ЗС V-диапазона имели ослабление 0.17–0.39 dB на период структуры, коэффициент отражения менее –10 dB в диапазоне частот 45–70 GHz и менее dB в полосе шириной 15 GHz [13]. Такие

параметры делают их привлекательными для использования в миниатюрных низковольтных ЛБВ. Планарная конструкция, очевидно, способствует миниатюризации поперечных размеров прибора, тогда как высокий коэффициент замедления позволяет работать при низких ускоряющих напряжениях, что приводит к уменьшению продольного размера.

Однако ЗС на диэлектрических подложках имеют и определенные недостатки, связанные с возможным разрушением тонкопленочных (единицы микрон) металлических покрытий и оседанием электронного пучка на диэлектрическую подложку. В связи с этим были предложены конструкции цельнометаллических электродинамических структур в виде наборного пакета металлических пластин [14], свободные от указанных недостатков. В настоящей работе исследуются возможности создания подобных структур с помощью лазерной микрообработки. Представлены результаты изготовления регулярных прямоугольных волноводов и периодических ЗС миллиметрового диапазона. Также представлены результаты изготовления компонентов микроразмерной электронной пушки (катод, фокусирующий электрод).

1. Технология изготовления

В настоящей работе использовались две системы прецизионной лазерной микрообработки. Для изготовления структур в виде наборного пакета пластин из бескислородной меди толщиной $150\text{ }\mu\text{m}$ использовалась установка МикроСЕТ РА (ООО „Лазерный центр“, Россия) на основе иттербиевого импульсного волоконного лазера IPG-Photonics (НТО „ИРЭ–Полус“, Россия) с длиной волны 1064 nm . Лазерный пучок фокусируется в пятно диаметром $20\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$. Точность позиционирования составляет $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$. На первом этапе на поверхности медной пластины формируется аккуратный канал, образующий контур структуры. Для этого используется „деликатный“ режим лазерной микрообработки со следующими параметрами: длительность импульса не более 8 ns , энергия в импульсе не более 80 mJ , скорость и частота следования импульсов не более 4 mm/s и 20 kHz соответственно. Такой режим позволяет уменьшить наплывы и сформировать более ровный край зоны абляции. Далее по сформированному каналу происходит вырезание структуры из медной пластины. При этом длительность импульса и энергия импульса могут быть повышены до 14 ns и 135 mJ соответственно.

Далее изготовленные пластины подвергались постобработке с целью очистки поверхности, удаления оксидов металла и других загрязнений, а также снижения шероховатости поверхности. Постобработка состояла из химической чистки и лазерной шлифовки. Химическая чистка проводится с использованием ультразвуковой ванны и химических реагентов. Сначала образцы помещаются в раствор ортофосфорной кислоты. На данном шаге удаляются образовавшиеся в процессе резки ок-

сиды и наплывы материала. Затем следует обработка структур в щелочном растворе гидрокарбоната натрия, при которой нейтрализуются остатки ортофосфорной кислоты и удаляются органические загрязнения. Далее образцы промываются в деионизированной воде, что обеспечивает удаление остатков химических реагентов. Завершающим шагом чистки является обработка структур в изопропиловом спирте. Благодаря этому поверхность структур обезжиривается, а также ускоряется их сушка, что способствует минимизации образования оксидных пленок на поверхности.

После химической чистки для сглаживания неровностей кромок проводится лазерная шлифовка боковых стенок структуры в шающем режиме: длительность импульса не более 4 ns , энергия в импульсе не более 28 mJ , скорость перемещения лазерного луча не более 800 mm/s , частота следования импульсов не более 200 kHz . Затем следует повторение всех этапов химической чистки.

Возможно последующее гальваническое покрытие макета медью с целью уменьшения омических потерь.

Для изготовления структур из медных пластин большей толщины ($200\text{--}400\text{ }\mu\text{m}$) и молибденовых пластин использовалась лазерная установка BY-100GS на основе иттербиевого импульсного волоконного лазера JPT YDFLP-E-100-M7-M-R (Китай) с длиной волны 1064 nm , средней мощностью излучения до 100 W , энергия в импульсе до 2 mJ . Лазерный пучок фокусируется в пятно диаметром $\sim 22\text{ }\mu\text{m}$, точность позиционирования составляет $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$, поле обработки — $50 \times 50\text{ mm}$.

Для обработки пластин из молибдена толщиной $150\text{ }\mu\text{m}$ в качестве оснастки использовалась специальная металлическая рамка-зажим, позволяющая растянуть лист материала в зоне обработки. В основном использовался режим обработки импульсной очереди (burst-mode) со следующими параметрами: в одной пачке было 14 импульсов, средняя мощность излучения 70 W , частота следования импульсов 45 kHz , длительность импульса 500 ns , период следования импульсов $\sim 2\text{ ms}$, шаг между пачками импульсов $15\text{ }\mu\text{m}$. При обработке более толстых заготовок мощность увеличивали до 80 W , количество импульсов в пачке также увеличивали до 30.

Наиболее трудоемким процессом является изготовление периодических ЗС, которые имеют сложную форму, включая участки в виде тонких (менее $100\text{ }\mu\text{m}$) щелей (разд. 2). В ходе проведения экспериментов было обнаружено, что такие участки необходимо фрезеровать множественными проходами лазера с уменьшенным шагом ($9\text{ }\mu\text{m}$ и менее). Для снижения побочных эффектов, связанных с термическим расширением материала, которые неизбежно образуются при обработке столь малых объектов, в зону обработки подавался поток холодного воздуха через специальное сопло. Для вырезания остальных структурных элементов ЗС использовался описанный выше основной технологический режим. После лазерной обработки применялась механическая шлифовка,

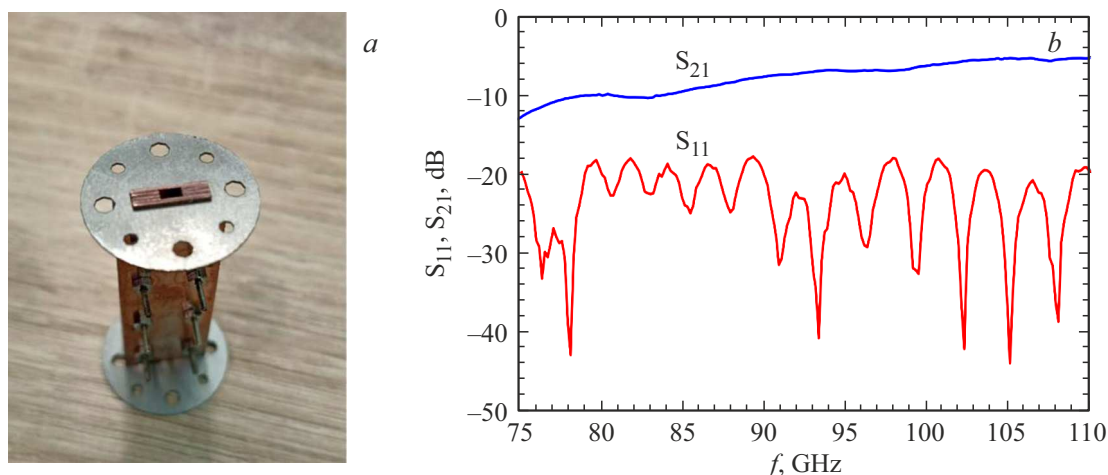


Рис. 1. Фотография макета прямоугольного волновода в сборке с фланцами (а) и экспериментальные зависимости S-параметров от частоты f (b).

позволяющая удалить продукты лазерной обработки с поверхности материала, а также химическая обработка.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Прямоугольный волновод W-диапазона

Макет прямоугольного волновода сечением 2.54×1.3 mm был изготовлен с помощью системы МикроСЕТ РА. Данные размеры близки к сечению стандартного волновода WR-10, однако высота волновода несколько отличается от стандартного (1.27 mm), поскольку структура изготавливается из пластин толщиной $150 \mu\text{m}$. Конструкция включает пятнадцать пластин: девять формируют боковые стенки, а остальные шесть — верхнюю и нижнюю части, в которых предусмотрены отверстия для сборки и юстировки. Пластины пакета позиционировались между собой при помощи цилиндрических посадочных штифтов. Точность позиционирования обеспечивалась подбором диаметра штифтов, которые измерялись точным микрометром, прошедшим метрологическую аттестацию. Последующая сборка пакета производилась при помощи механического скрепления винтами. В дальнейшем для создания вакуумно-плотного пакета предполагается применение лазерной пайки и сварки.

Собранный макет изображен на рис. 1, а. Он имеет общие поперечные габариты 2.54×2.25 mm; продольная длина составляет 42 mm. Для интеграции с измерительным стендом была изготовлена монтажная фланцевая пластина из молибденовых листов толщиной $400 \mu\text{m}$, для чего также использовалась лазерная микрообработка.

Экспериментальное исследование S-параметров изготовленных макетов W-диапазона проводилось с использованием векторного анализатора цепей ZVA40 и двух преобразователей частоты ZVA-Z110 (Rohde&Schwarz,

Германия), которые преобразуют частотный диапазон анализатора в диапазон 75–110 GHz. Измерения показали коэффициент отражения не более -17 dB и ослабление от -5 до -10 dB (рис. 1, б).

2.2. Макет прямоугольного волновода W-диапазона с поворотами

Также была разработана более сложная структура в виде прямоугольного волновода W-диапазона с поворотами (рис. 2, а). Центральная секция имела сечение 1.95×0.7 mm, соответственно частота отсечки основной моды составляла 76.9 GHz, что позволяло наблюдать ее на анализаторе цепей. Входной и выходной волноводы имели сечение 2.55×1.27 mm. Отметим, что, в отличие от прямой волноводной секции, в данной конструкции пластины ориентированы не поперек направления поляризации электрического поля основного типа волны, а параллельно ему, т.е. так же, как и в разрабатываемой конструкции ЗС (разд. 2.3). Соответственно в данном случае имело место незначительное отличие от стандарта WR-10 не по узкой, а по широкой стенке волновода.

Изготовленный макет представляет собой наборный пакет молибденовых пластин толщиной $150 \mu\text{m}$: 13 пластин формируют центральный участок волновода, 17 — входной и выходной волноводы. В пластинах также предусмотрены отверстия для юстировки и последующей сборки.

Измерения S-параметров изготовленного макета волновода проводились на упомянутой выше установке на основе векторного анализатора цепей ZVA40 (Rohde&Schwarz). Фотография измерительной установки с макетом волновода показана на рис. 2, б, а результаты измерений представлены на рис. 2, в. Частота отсечки составляет ~ 76 GHz, что хорошо согласуется с расчетным значением. Потери на отражение не превышают dB в полосе частот 77–90 GHz, что также

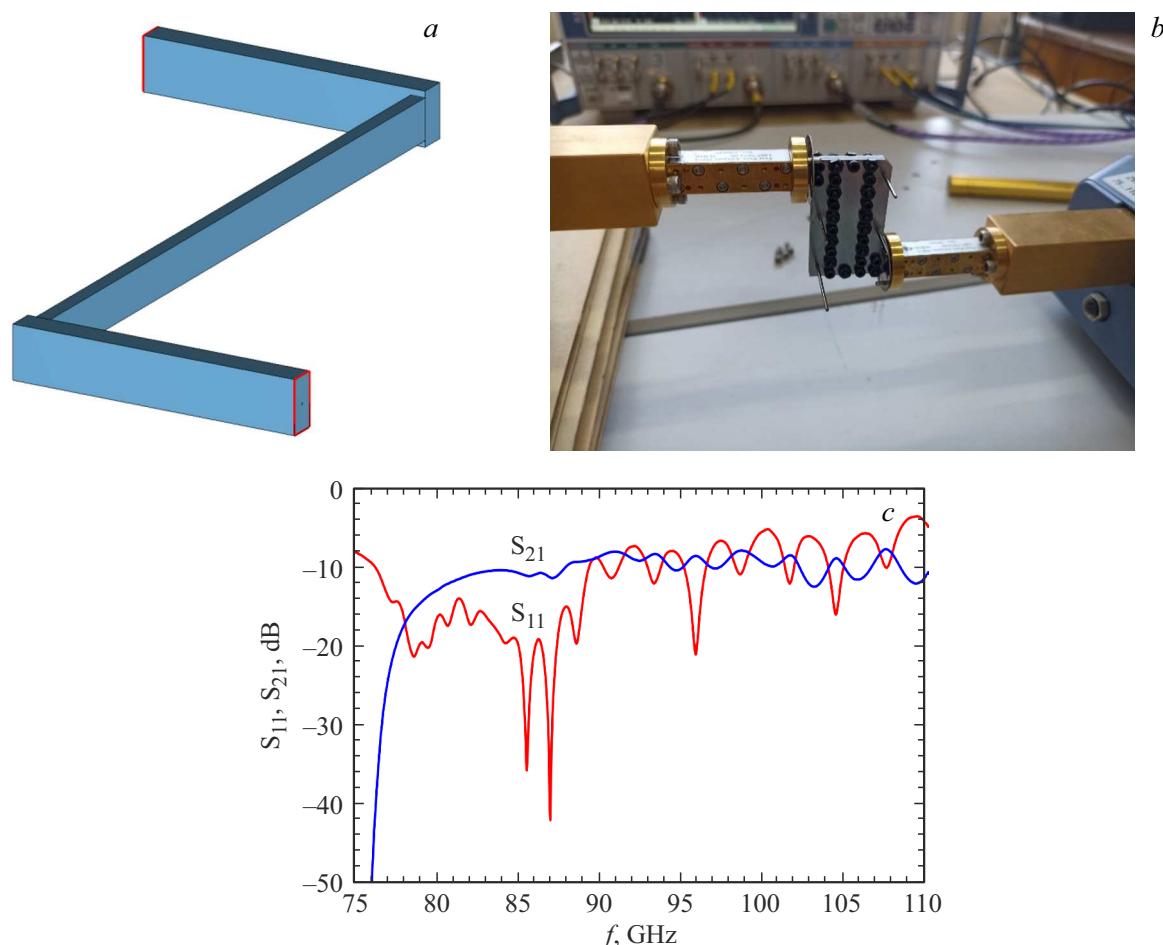


Рис. 2. 3D-модель прямоугольного волновода с поворотами (а), фотография измерительной установки (b) и экспериментальные частотные зависимости S-параметров (с).

хорошо согласуется с численным моделированием. Относительно высокие значения потерь на прохождение (порядка -10 dB) обусловлены недостаточно плотным прилеганием пластин друг к другу и шероховатостью поверхности стенок волновода. Для снижения потерь в дальнейшем предполагается покрытие стенок волновода медью и пайка пакета пластин.

2.3. Замедляющая система V-диапазона

После отработки технологии на примере прямоугольных волноводов перешли к изготовлению периодических замедляющих структур. В качестве конкретного примера была выбрана ЗС лестничного типа с гантелеобразными щелями, предложенная в работе [15]. Схема одного периода ЗС представлена на рис. 3, а. Важно отметить, что данная ЗС демонстрирует свойства дважды отрицательного метаматериала. Подобные структуры представляют интерес с точки зрения миниатюризации, а также широких возможностей управления дисперсионными характеристиками [16,17]. Как показывают результаты компьютерного моделирования, на основе данной ЗС могут быть созданы ЛБВ средней и короткой части

миллиметрового диапазона с выходной мощностью до 100 W и полосой усиливаемых частот свыше 5 GHz [15].

Разработана и оптимизирована конструкция ЗС V-диапазона со следующими размерами: $a = 400 \mu\text{m}$, $b = 650 \mu\text{m}$, $l = 70 \mu\text{m}$, $w = 550 \mu\text{m}$, $p = 800 \mu\text{m}$. Центральная пластина ЗС помещалась в волновод сечением 1.0×1.0 mm.

Была изготовлена серия прототипов ЗС V-диапазона из медных и молибденовых пластин различной толщины 200–400 μm (рис. 3, b). Каждая структура содержала 18 гантелеобразных щелей и имела согласующие элементы в виде штырей длиной 725 μm и шириной 200 μm на концах.

Анализ изготовленных структур проводился с помощью оптического микроскопа Olympus MX51 (Япония). Результаты измерений приведены в таблице (используемые обозначения поясняются на рис. 3, а). Как видно из таблицы, точность изготовления оказывается достаточно высокой. Отклонение от проектных значений в основном не превышает 10–20 μm , т.е. порядка диаметра лазерного пятна (за исключением ширины зазора w , для которого оно примерно в два раза больше). Как уже

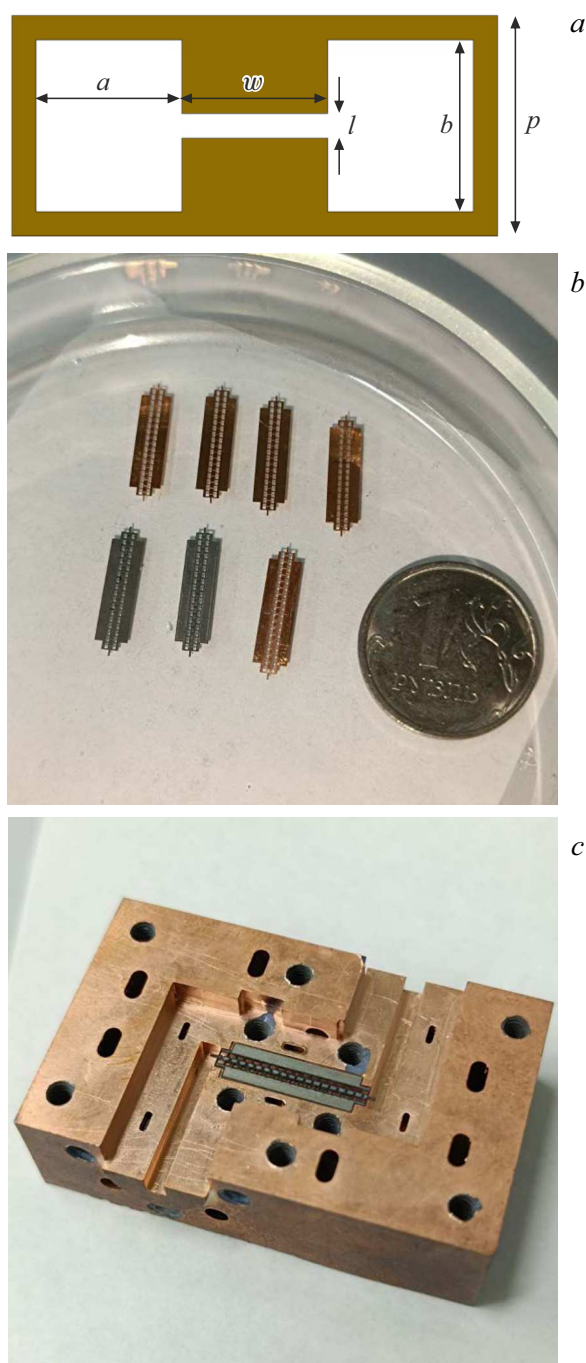


Рис. 3. Схема одного периода ЗС лестничного типа с гантелеобразными щелями (а), фотографии изготовленных ЗС (b) и фотография одного из макетов ЗС в измерительной оснастке (с).

отмечалось выше, наибольшую сложность представляет изготовление миниатюрного зазора. Соответственно наибольшая относительная погрешность (свыше 20 %) наблюдается для его длины l . Изготовленные структуры являются достаточно однородными: разброс значений параметров для каждой из структур составляет не более $5 \mu\text{m}$. В дальнейшем точность изготовления может

быть повышена за счет корректировки режимов работы лазерной установки.

Следует отметить, что изготовленные образцы имеют малую конусность сечения, которая определялась исходя из сравнения размеров щелей на лицевой и обратной поверхностях обрабатываемых пластин. Для медных пластин конусность составила менее 3° , для молибденовых — около 1° .

Для проведения измерений S-параметров была использована специальная измерительная оснастка, изготовленная с применением технологии 3D-печати из термостойкой фотополлимерной смолы и последующей металлизации методом магнетронного распыления [18]. Конструкция оснастки содержит продольный паз под ЗС и согласующие переходы на волноводный тракт стандарта WR-15. На рис. 3, с приведена фотография ЗС в оснастке.

На рис. 4 приведены результаты измерений электродинамических характеристик ЗС. Для проведения измерений использовался векторный анализатор цепей PNA N5227A Keysight Technologies (США). Наилучшие результаты были получены для ЗС, изготовленных из медной пластины толщиной $400 \mu\text{m}$. Ввиду отклонения размеров оснастки от проектных значений, не удалось обеспечить хорошее согласование, вследствие чего прохождение волны носит выраженный резонансный характер (рис. 4, а). Тем не менее, несмотря на достаточно сильные отражения, потери на прохождение не превышали -10 dB , а измеренная полоса пропускания ЗС находилась в хорошем согласии с расчетными данными.

Также на основе частотной зависимости фазы параметра S_{21} была восстановлена дисперсионная кривая структуры с использованием известной методики, описанной, например, в [19–21]. Как видно из рис. 4, b, экспериментальные измерения хорошо согласуются с расчетной дисперсионной характеристикой после корректировки размеров ЗС в соответствии с результатами микроскопического анализа (см. таблицу).

2.4. Компоненты электронной пушки

Развиваемая технология лазерной микрообработки была использована для изготовления не только высокочастотных электродинамических структур, но и компонентов электронной пушки. Была разработана конструкция, представленная на рис. 5. Пушка содержит катод диаметром 1.26 mm , фокусирующий электрод, находящийся под потенциалом катода, и анод. Фокусирующий электрод состоит из нескольких параллельных пластин (диафрагм) с отверстиями различного диаметра. Подбирая диаметры отверстий соответствующим образом, можно аппроксимировать сложную криволинейную форму фокусирующего электрода. Как показало численное моделирование, для фокусировки пучка достаточно использовать три пластины толщиной $200 \mu\text{m}$. Анод имеет круглые входное и выходное отверстия диаметром 0.54 и 0.33 mm соответственно.

Размеры ЗС с гантелеобразными щелями V-диапазона по данным оптической микроскопии					
Медь, 200 μm					
№	<i>a</i> , μm	<i>b</i> , μm	<i>l</i> , μm	<i>w</i> , μm	<i>p</i> , μm
1	399.40 ± 3.48	653.83 ± 4.70	87.74 ± 2.52	506.01 ± 3.09	780.34 ± 1.46
2	401.06 ± 1.98	655.29 ± 2.56	89.14 ± 1.83	508.00 ± 2.56	783.37 ± 1.65
3	403.04 ± 2.67	652.72 ± 2.63	85.93 ± 2.12	507.76 ± 1.92	783.70 ± 1.95
Медь, 400 μm					
1	398.71 ± 4.79	652.41 ± 2.47	85.53 ± 4.38	504.20 ± 4.28	784.08 ± 2.14
2	396.97 ± 3.15	649.38 ± 4.55	79.42 ± 4.08	512.58 ± 5.47	785.20 ± 1.69
Молибден, 400 μm					
1	393.38 ± 2.99	646.01 ± 4.19	84.71 ± 1.91	514.46 ± 2.45	784.97 ± 2.22
2	405.54 ± 3.89	660.33 ± 3.22	87.81 ± 3.14	504.57 ± 4.46	782.10 ± 3.24

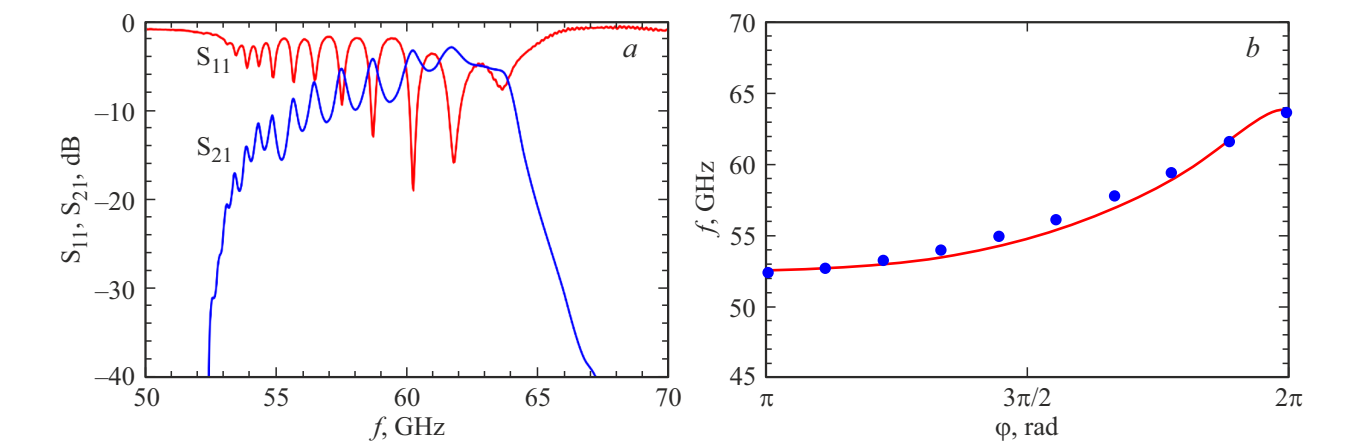


Рис. 4. Частотные зависимости S-параметров (а); экспериментальная (кружки) и расчетная (сплошные линии) дисперсионная характеристика ЗС (b).

Моделирование электронной пушки проводилось в пакете COMSOL Multiphysics. Использовалась модель термоэлектронной эмиссии, причем работа выхода составляла $\phi = 2.055$ eV, а температура катода $T = 1473$ K. Такие значения были выбраны исходя из результатов экспериментального исследования электронной пушки, представленных в работе [22]. Была построена вольт-амперная характеристика электронной пушки при различных значениях напряжения анода вплоть до 15 kV. При таких напряжениях обеспечивается прохождение пучка сквозь анодное отверстие, причем в диапазоне анодных напряжений 10–15 kV ток пучка составляет 80–150 mA. На рис. 5 представлена картина формирования пучка при рабочем значении напряжения 12.4 kV. Диаметр пучка на выходе из анодного отверстия равен 260 μm. Средняя плотность тока по сечению пучка на выходе из электронной пушки составляет примерно 200 A/cm² при плотности тока на катоде 8 A/cm². Компрессия пучка по площади составляет примерно 25 единиц. Такие значения удовлетворяют требованиям для использования в миниатюрных ЛБВ миллиметрового диапазона.

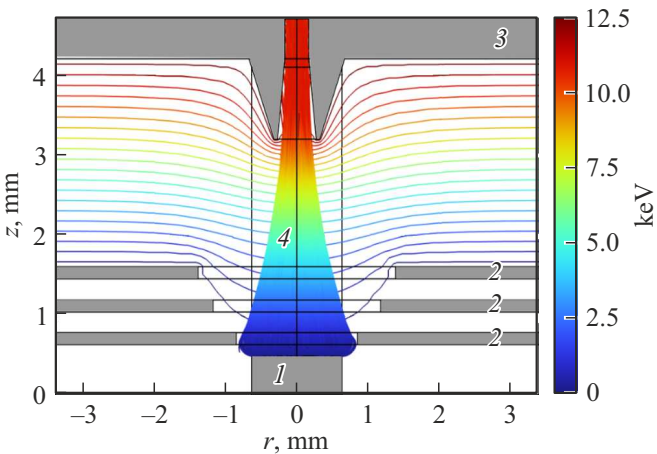


Рис. 5. Картина формирования электронного пучка и распределение электростатического потенциала в пушке при ускоряющем напряжении 12.4 kV: 1 — катод, 2 — фокусирующие электроды, 3 — анод, 4 — электронный пучок.



Рис. 6. Фотография заготовки в виде крестовины с изготовленным катодным выступом.

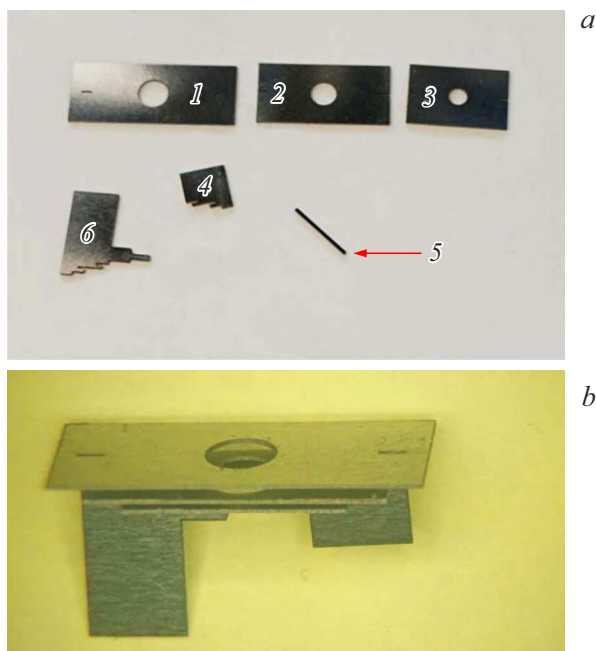


Рис. 7. Фотографии изготовленных элементов электронной пушки (а) и собранного макета фокусирующего электрода (b). 1–3 — фокусирующие диафрагмы, 4, 6 — элементы крепления, 5 — ножка подогревателя.

Катоды были изготовлены из таблеток гексаборида лантана LaB_6 диаметром 3 мм. Каждый катод включал прямоугольное основание и цилиндрический эмиссионный выступ, обеспечивающий интеграцию в сборку электронной пушки. Предварительно с использованием лазерной системы BY-60GS на основе иттербиевого импульсного волоконного лазера JPT YDFLP-E-60-M7-M-R мощностью до 60 W из таблетки вырезалась крестообразная заготовка. Последующая высокоточная микрообработка катодных выступов проводилась на установке МикроСЕТ РА с мощностью до 20 W. Фотография

заготовки с катодным выступом приведена на рис. 6. После формирования выступов заготовка разделялась на четыре отдельных катода.

Диафрагмы, образующие фокусирующий электрод, элементы крепления в виде пластин-держателей и подогреватель катода изготавливались из молибденовых пластин толщиной $200\text{ }\mu\text{m}$ (рис. 7, а) с помощью установки МикроСЕТ РА. Для соединения держателей с фокусирующими электродами использовались микроразмерные пазы, которые позволяли точно соединить детали. Применение технологии лазерной резки позволяет изготовить серию идентичных электродов с минимальным разбросом размеров. Собранный прототип фокусирующего электрода показан на рис. 7, б. На следующем этапе планируется проведение экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик пушки и процессов фокусировки электронного пучка.

Заключение

Проблема миниатюризации электровакуумных приборов СВЧ является ключевой при переходе в коротковолновую часть миллиметрового диапазона. В работе продемонстрированы возможности применения технологии лазерной микрообработки импульсами наносекундной длительности для изготовления миниатюрных электродинамических структур миллиметрового диапазона. К преимуществам данной технологии следует отнести относительную простоту технологического маршрута, универсальность, низкую себестоимость и высокую скорость изготовления.

Изготовлены макеты прямоугольных волноводов W-диапазона в виде наборных пакетов из медных и молибденовых пластин толщиной $150\text{ }\mu\text{m}$. Выполненные измерения их S-параметров показали значения коэффициента отражения не более -17 dB и потерь на передачу в пределах $5\text{--}10\text{ dB}$.

Также на основе разработанной технологии из медных и молибденовых пластин различной толщины ($150\text{--}400\text{ }\mu\text{m}$) изготовлены образцы миниатюрной периодической структуры V-диапазона — ЗС лестничного типа с гантелеобразными щелями. Морфологический анализ показал, что отклонения размеров от проектных значений не превышают $10\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$, что сопоставимо с диаметром лазерного пятна. Наибольшая относительная погрешность наблюдается для миниатюрных емкостных зазоров с характерным размером менее $100\text{ }\mu\text{m}$, однако структура в целом сохраняет высокую однородность (разброс менее $5\text{ }\mu\text{m}$). Дисперсионная характеристика ЗС, восстановленная по результатам измерений набега фазы коэффициента прохождения сигнала, хорошо согласуется с результатами расчетов. Потери на передачу в полосе частот шириной порядка 10 GHz составляют не более -10 dB .

Кроме того, разработана конструкция миниатюрной электронной пушки, формирующей сходящийся элек-

тронный пучок с током до 150 mA и диаметром менее 300 μm . Фокусирующий электрод пушки состоит из нескольких параллельных пластин с отверстиями. С помощью развиваемой технологии лазерной микрообработки из молибденовой фольги толщиной 200 μm были изготовлены тестовые образцы конструктивных элементов пушки: фокусирующие электроды, оснастка для крепления, подогреватель. Также были изготовлены катоды из таблеток LaB₆.

Таким образом, предложенная технология микрообработки лазерными импульсами наносекундной длительности позволяет с достаточно высокой точностью изготавливать из различных материалов микроразмерные электродинамические и электронно-оптические компоненты для электровакуумных приборов миллиметрового диапазона. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию технологических режимов для повышения точности изготовления и улучшения качества микрообработки.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00181-П).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.M. Mittleman. J. Appl. Phys., **122** (23), 230901 (2017). DOI: 10.1063/1.5007683
- [2] T.S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb, G.C. Trichopoulos. IEEE Access, **7**, 78729 (2019). DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2921522
- [3] T. Kürner, D.M. Mittleman, T. Nagatsuma (eds.). *THz Communications. Paving the Way towards Wireless Tbps*. Springer Series in Optical Sciences. (Springer, Cham, Switzerland, 2022), v. 234, DOI: 10.1007/978-3-030-73738-2
- [4] А.Д. Григорьев. *Терагерцевая электроника* (Физматлит, М., 2020)
- [5] Г.Г. Денисов, М.Ю. Глявин, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.Г. Литвак, Н.Ю. Песков, Н.М. Рыскин, А.В. Савилов. *Вакуумная СВЧ-электроника: освоение терагерцового диапазона часто*. В кн. В.Я. Панченко (ред.). *Терагерцовая фотоника и оптоэлектроника* (РАН, М., 2024), с. 374–463.
- [6] G.-S. Park, M. Tani, J.-S. Rieh, S.Y. Park (eds.). *Advances in terahertz source technologies* (Jenny Stanford Publishing, Singapore, 2024)
- [7] Е.А. Богомолова, А.В. Галдецкий, Г.В. Рувинский, И.Г. Солдатенко. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ техника*, **3** (546), 66 (2020).
- [8] А.В. Стародубов, Д.А. Ножкин, И.И. Расулов, А.А. Сердобинцев, И.О. Кожевников, В.В. Галушка, В.К. Сахаров, Д.А. Бессонов, А.Д. Галкин, И.Ш. Бахтеев, С.Ю. Молчанов, С.В. Герман, Н.М. Рыскин. *Радиотехника и электроника*, **67** (10), 935 (2022). DOI: 10.31857/S0033849422100126
- [9] R.L. Ives. IEEE Trans. Electron Devices, **70** (6), 2693 (2023). DOI: 10.1109/TED.2023.3268629
- [10] X. Li, J. Feng. *Micromachines*, **15** (11), 1357 (2024). DOI: 10.3390/mi15111357
- [11] Р.А. Торгашов, Н.М. Рыскин, А.Г. Рожнев, А.В. Стародубов, А.А. Сердобинцев, А.М. Павлов, В.В. Галушка, И.Ш. Бахтеев, С.Ю. Молчанов. *ЖТФ*, **90** (4), 686 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.04.49096.294-19
- [12] N.M. Ryskin, R.A. Torgashov, A.V. Starodubov, A.G. Rozhnev, A.A. Serdobintsev, A.M. Pavlov, V.V. Galushka, D.A. Bessonov, G. Ulisse, V. Krozer. *J. Vacuum Sci. Technol. B*, **39** (1), 013204 (2021). DOI: 10.1116/6.0000716
- [13] D.A. Nozhkin, A.V. Starodubov, R.A. Torgashov, V.V. Galushka, I.O. Kozhevnikov, A.A. Serdobintsev, A.D. Lebedev, A.A. Kozyrev, N.M. Ryskin. *IEEE Trans. Electron Devices*, **72** (1), 453 (2025). DOI: 10.1109/TED.2024.3507759
- [14] D.A. Nozhkin, A.V. Starodubov, A.A. Serdobintsev, I.O. Kozhevnikov, V.V. Galushka, R.A. Torgashov, I.S. Ozhogin, A.A. Rostuntsova, V.V. Emelyanov, S.Yu. Molchanov, N.M. Ryskin. *Fabrication and characterization of millimeter-band planar slow-wave structures by using laser microprocessing*. 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC) (Moscow, November 25–29, 2024), p. 422–425. DOI: 10.1109/RMC62880.2024.10846876
- [15] A.A. Rostuntsova, R.A. Torgashov, N.M. Ryskin. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **53** (6), 1134 (2025). DOI: 10.1109/TPS.2025.3567304
- [16] Z. Duan, M.A. Shapiro, E. Schamiloglu, N. Behdad, Y. Gong, J.H. Booske, B.N. Basu, R.J. Temkin. *IEEE Trans. Electron Devices*, **66** (1), 207 (2019). DOI: 10.1109/TED.2018.2878242
- [17] Z. Duan. *Metamaterial-Based Electromagnetic Radiations and Applications* (Springer, Singapore, 2025) DOI: 10.1007/978-981-97-8108-9
- [18] А.В. Стародубов, И.С. Ожогин, А.А. Сердобинцев, И.О. Кожевников, В.Н. Титов, В.В. Галушка, И.Ш. Бахтеев, С.Ю. Молчанов, Н.М. Рыскин. *Изв. вузов. Радиофизика*, **68** (2), 121 (2025). DOI: 10.52452/00213462_2025_68_02_121
- [19] C.-W. Baik, H.Y. Ahn, Y. Kim, J. Lee, S. Hong, C.J. Hee, S. Kim, L.S. Hun, J.S. Yeon, S. Yu. *Appl. Phys. Lett.*, **104** (2), 021118 (2014). DOI: 10.1063/1.4862324
- [20] G. Shu, J. Liao, J. Ren, J. He, J. Deng, Z. Chang, B. Xu, G. Wang, C. Ruan, W. He. *IEEE Trans. Electron Devices*, **68** (11), 5826 (2021). DOI: 10.1109/TED.2021.3110183
- [21] A.V. Starodubov, R.A. Torgashov, V.V. Galushka, A.M. Pavlov, V.N. Titov, N.M. Ryskin, A. Abhishek, N. Kumar. *Electronics*, **11** (18), 2858 (2022). DOI: 10.3390/electronics11182858
- [22] I.A. Navrotsky, A.A. Burtsev, V.V. Emelyanov, V.N. Titov, N.M. Ryskin. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **68** (2), 798 (2021). DOI: 10.1109/TED.2020.3041425