

*Е.А. Ракова, А.В. Галдецкий, Г.Ф. Корепин, В.А. Смирнов,  
Н.П. Зубков, Н.А. Лябин, В.С. Парамонов, А.В. Дерябкин,  
Е.Н. Куликов, М.П. Духновский  
АО «НПП "Исток" им. Шокина»*

## **Проектирование и исследование технологии изготовления перспективной замедляющей системы для ЛБВ W-диапазона**

*Рассмотрена замедляющая система на алмазном теплоотводе для ЛБВ W-диапазона. Представлены расчетные характеристики: АЧХ замедления и сопротивление связи, выходная мощность, усиление. Рассмотрены вопросы технологии изготовления данной ЗС.*

**Ключевые слова:** ЛБВ, W-диапазон, ленточный пучок, CVD алмаз, прецизионная лазерная резка, термодиффузионная пайка

В последние годы во всем мире происходит продвижение вакуумных приборов в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны [1-6]. Однако наиболее востребованы, в том числе и в России, Ka- и W диапазоны [7]. В работе рассмотрен проект ЛБВ W-диапазона с замедляющей системой (ЗС) типа меандра, базирующийся на имеющейся технологической базе (выращивание CVD алмазных платин с последующей металлизацией и прецизионная лазерная резка элементов ЗС).

В отличие от известных аналогичных ЗС здесь используется подвешенная тонкая подложка из CVD алмаза для обеспечения хорошего теплоотвода и низкой диэлектрической нагрузки, а также меандр из толстой (50 мкм) фольги, что препятствует токооседанию на диэлектрик. Схематическое изображение одного периода ЗС приведено на рис. 1.

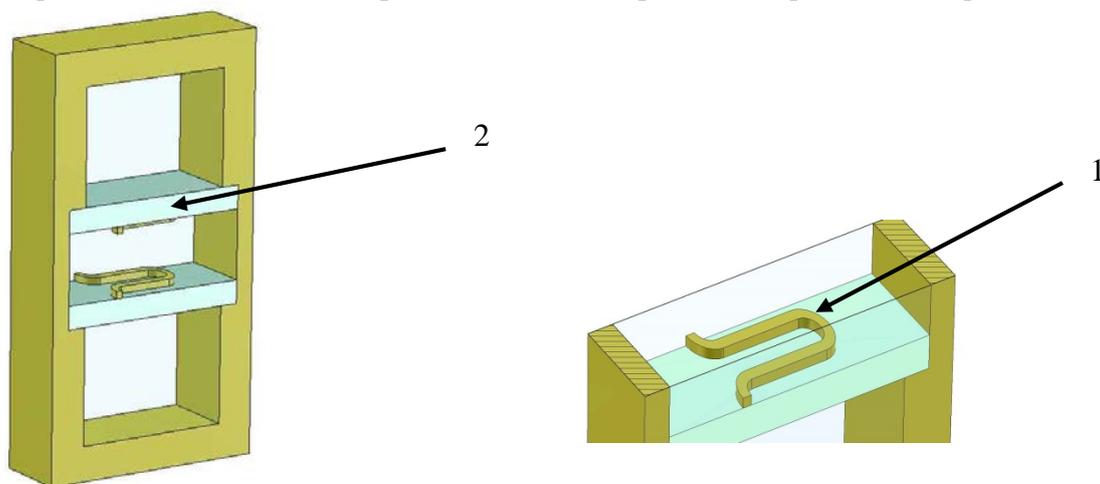


Рис. 1. Эскиз одного периода ЗС. 1 - металлизированный меандр, 2 - алмазная подложка.

Были подобраны оптимальные геометрические размеры ЗС, обеспечивающие широкую полосу пропускания и максимально возможное сопротивление связи (рис. 2-3). Период ЗС

составил 190 мкм. Толщина меандра составляет 50 мкм. Пролетный канал высотой 240 мкм. Рабочее напряжение пучка 15.6 кВ.

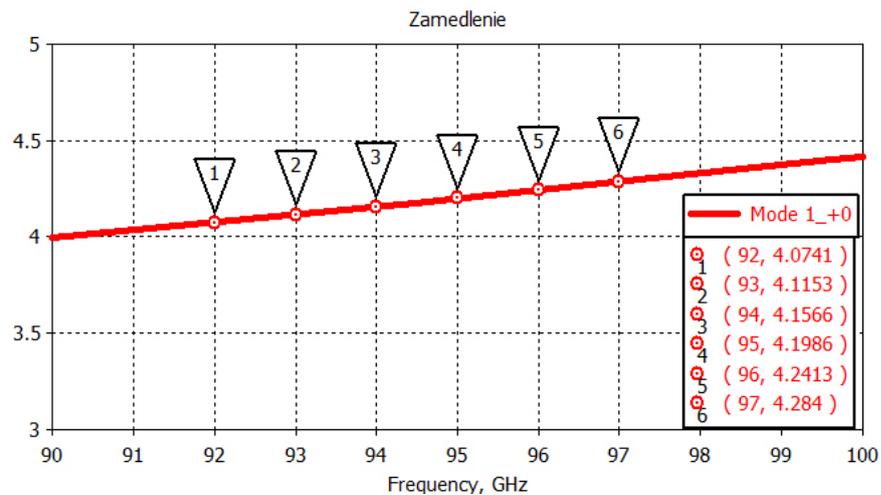


Рис. 2. АЧХ замедления в ЗС

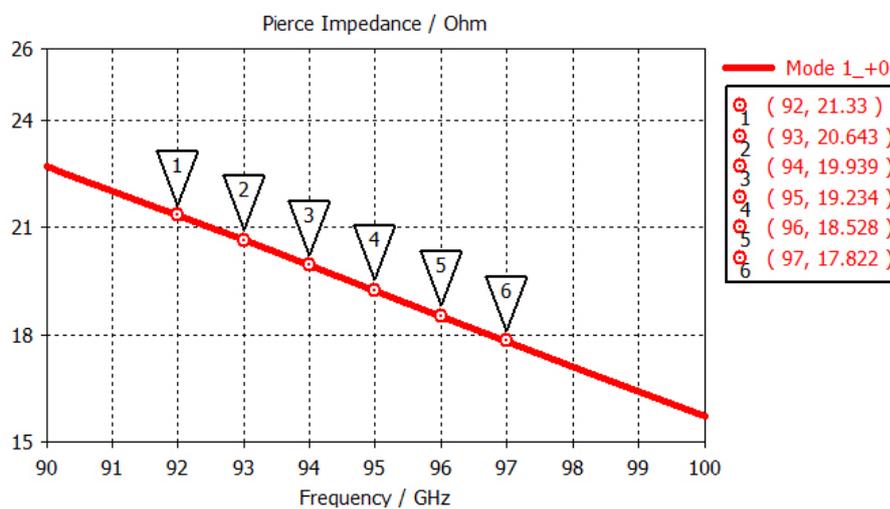


Рис. 3. Сопротивление связи ЗС

Для первых образцов предполагается использовать электронно-оптическую систему без компрессии и иммерсионный металлосплавной катод с высокой плотностью тока 100 А/см<sup>2</sup>, используемые для субмиллиметровых ЛОВ. На рис. 4 представлены результаты моделирования электронно-оптической системы, формирующей ленточный пучок с сечением 400\*108 мкм с током 43 мА.

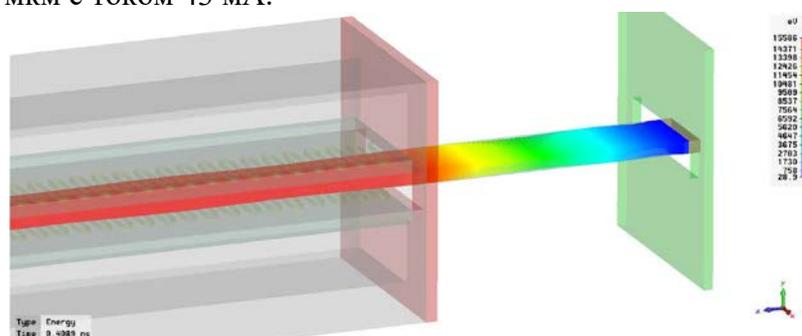


Рис. 4. Электронно-оптическая система

Фокусировка электронного потока осуществляется магнитной системой на постоянных магнитах, обеспечивающей магнитное поле 0.8 Тл. Превышение величины магнитного поля

в 8.8 раз по сравнению с бриллиантовым дает возможность «заморозить» ленточный пучок в канале, что позволяет избежать известной проблемы S-образного загиба краев (рис. 5).

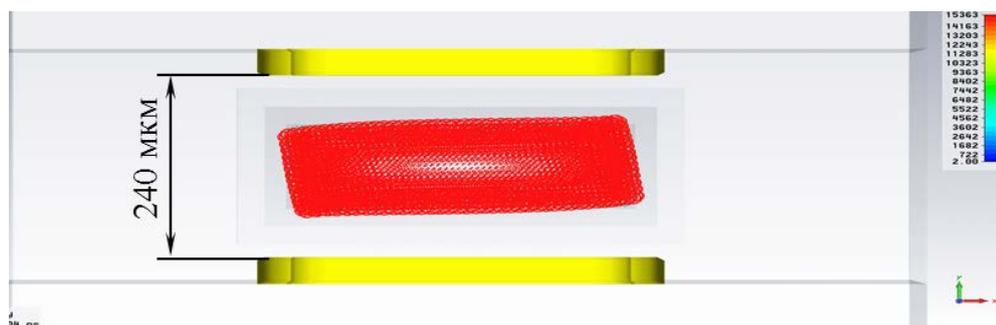


Рис. 5. Прохождение ленточного пучка в канале

Впоследствии планируется переход на более сложную оптику с экранированным катодом и компрессией пучка.

В работе рассмотрен вариант «прозрачной» ЛБВ (без поглотителя), что реализуемо при сравнительно короткой лампе и небольшом усилении (< 16 дБ). В одномерной программе по расчету взаимодействия были получены выходные характеристики лампы, представленные на рис. 6.

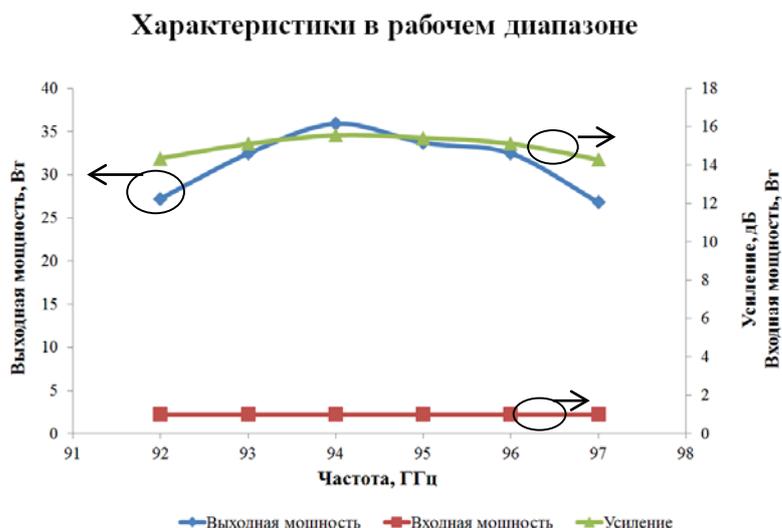


Рис. 6. Расчетная выходная мощность и усиление ЛБВ

При длине области взаимодействия 24.6 мм и рабочем напряжении 15.6 кВ, входной мощности 1 Вт, выходная мощность в полосе 5 ГГц достигает 27 Вт, что в 3 раза превышает мощность разработанной ранее лампы традиционной конструкции.

В данной работе исследовалась технология изготовления данной ЗС. Основными показателями технологии являются точность изготовления и качество поверхности.

Методы создания заданного рисунка металлизации известны из техники печатных плат, однако, перенос этих технологий на мелкоструктурные топологии на алмазе невозможен из-за низкой точности и специфических свойств алмаза, низкой адгезии металлической пленки и большой разницы КТР. Фотолитографические методы, применяемые при создании интегральных схем, не обеспечивают достаточной толщины металлизации для предотвращения токооседания на диэлектрик. Поэтому нами была сделана попытка создания тонкой металлизации в виде меандра на поверхности алмаза с последующей рецессией остальной поверхности алмаза. Для создания рецессии на алмазе с требуемым рисунком

использовалось развитая на «Истоке» уникальная технология ионной имплантации с последующей графитизацией алмаза [8]. На рис. 7 представлена фотография нескольких периодов ЗС, изготовленной по данной технологии.

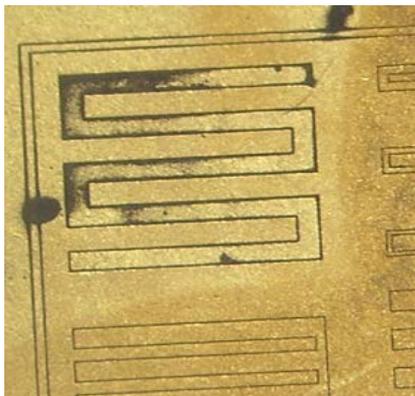


Рис. 7 . Фотография экспериментального образца подложки с двумя периодами ЗС

Разработанная технология позволяет формировать на поверхности алмазной пластины высокоадгезионную металлизацию по заданному шаблону с достаточной для создания приборов миллиметрового диапазона точностью. Однако толщина металлизации в данной технологии не превышает 5-7 мкм, что недостаточно для предотвращения оседания пучка на диэлектрик и его зарядки.

Поэтому был рассмотрен другой технологический маршрут, который включает в себя следующие этапы:

- Изготовление меандра из фольги толщиной 50 мкм
- Технологическая очистка меандров
- Изготовление алмазных подложек со сплошной металлизацией золотом
- Термодиффузионная пайка медного меандра на металлизированную поверхность алмазной подложки
- Травление золота с поверхности алмазной подложки с использованием медного меандра в качестве маски

Для изготовления ЗС в виде меандра выбрана технология прецизионной лазерной резки, которая хорошо освоена на «Истоке» и гарантирует точность до  $\pm 5$  мкм (рис. 8а).

После лазерной резки проводилась технологическая очистка. Рассматривались два варианта: химическая очистка в щелочном растворе при высокой температуре (рис. 8б) и отжиг в восстановительной среде (водородная печь) (рис.8в).

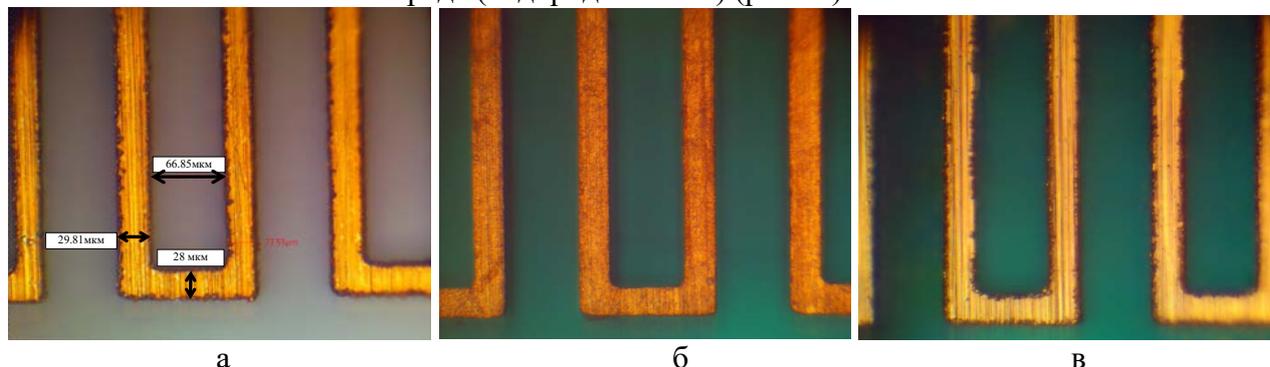


Рис. 8. Медный меандр.а - после лазерной резки, б - после химической очистки в щелочном растворе, в - после отжига в водородной печи

При сравнении результатов видно, что существенной разницы в качестве поверхности нет. Однако, после отжига в восстановительной среде, медные элементы ЗС становятся очень

пластичными, что легко приводит к деформации деталей. Для дальнейшего использования был выбран вариант химической очистки.

После очистки производилась термодиффузионная пайка медного меандра и алмазной подложки, металлизированной золотом толщиной 0,5-3мкм (рис. 9).

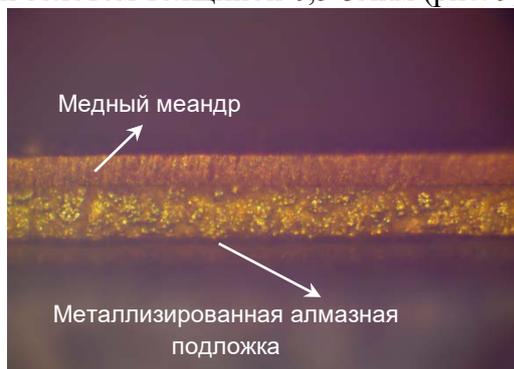


Рис. 9. Фотография спаянных медных элементов ЗС и металлизированной алмазной подложки

Пайка прошла успешно без растрескивания алмаза и коробления подложки благодаря малой толщине и благоприятной топологии меди. Травление золота осуществляется в аргоновой плазме.

Предложенная конструкция ЗС согласно расчетам позволяет получить высокое сопротивление связи и необходимую дисперсионную характеристику в 3-мм диапазоне длин волн с полосой рабочих частот в 5 ГГц. Использование новой конструкции позволит существенно увеличить выходную импульсную мощность при рабочем напряжении не более 15.6кВ. Продемонстрирована технологичность и изготовляемость новой конструкции ЗС. Следует отметить высокие технологические показатели обработки (точность и качество поверхности) с помощью лазерной резки, при этом проводники ЗС сохраняют качество (плотность и сопротивление) монолитного материала.

#### Библиографический список

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. Shin Y.-M., Baig A., Barnett L.R., Tsai W.-C., Luhmann N.C., Pasour J., Larsen P. Modeling investigation of an ultrawideband terahertz sheet beam traveling-wave tube amplifier circuit // IEEE Trans. Electron Devices. 2011. Vol. 58. No. 9. P. 3213-3219.
3. Shin Y.-M., Baig A., Barnett L.R., Tsai W.-C., Luhmann N.C. System design analysis of a 0.22-THz sheet-beam traveling-wave tube amplifier // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. Vol. 59. No. 1. P. 234-240.
4. Joye C. D., Cook A. M., Calame J. P. // et al. Demonstration of a High Power, Wideband 220-GHz Traveling Wave Amplifier Fabricated by UV-LIGA // IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 61, no. 6, 2014, p. 1672-1678.
5. Jinjun Feng, Jun Cai, Yinfu Hu // et al. Development of W-band Folded Waveguide Pulsed TWTs. IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 61, no. 6, 2014, p. 1721-1725
6. Huarong Gong, Yubin Gong, Tao Tang // et al. Experimental Investigation of a High-Power Ka-Band Folded Waveguide Traveling-Wave Tube. IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 58, no. 7, 2011, p.2159-2163
7. Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Каретникова Т.А., Торгашов Г.В., Сеницын Н.И., Шалаев П.Д., Бурцев А.А. Исследование характеристик замедляющей системы лампы бегущей волны миллиметрового диапазона с ленточным электронным пучком // Изв. Вузов. Радиофизика. 2013. Т.56, № 8-9. С.601-613.
8. А.В. Дерябкин, Е.Н. Куликов Технология создания толсто пленочной металлизации алмазных пластин по заданному рисунку для нового типа ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов // Тезисы докладов IV научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ОАО «НПП «Исток» им. Шокина». 2014. С.31.