

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

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Планарные микрополосковые структуры из медно-молибденовых
сплавов на твердых диэлектрических подложках: создание методом
импульсной лазерной абляции, исследование морфологии и
электродинамических характеристик**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4031 группы
направления 03.03.03 «Радиофизика»
Института Физики
Ножкина Дмитрия Андреевича

Научный руководитель
доцент кафедры физики
открытых систем, к.ф.-м.н.

01.06.23

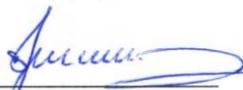


дата, подпись

А.Б. Адилова

Заведующий кафедрой
электроники, колебаний и волн.
к.ф.-м.н., доцент

01.06.23



дата, подпись

С.В. Гришин

Саратов 2023 год

Введение

Актуальность темы работы. Высокомощные и портативные вакуумные микроэлектронные устройства, типа ЛБВ, ЛОВ и т.д., крайне необходимы для различных промышленных и научных применений [1,2]. Данный интерес обусловлен тем, что электромагнитные волны в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах обладают свойствами, которые обеспечивают их широкое применение. Главная проблема в генерации и усилении электромагнитных волн в данных диапазонах частот, ведь с увеличением частоты все элементы устройства уменьшаются пропорционально уменьшению длины волны.

Высокоточные процессы микрообработки [3,4] необходимы для производства микроразмерных элементов вакуумной СВЧ электроники, таких как линии передачи, антенны, волноводы и т.д. Сегодня набор технологий микрообработки, позволяющих изготавливать электромагнитные структуры микронных размеров с микронной и субмикронной точностью, включает в себя сложные технологии [5] например, фотолитография, глубокое реактивное ионное травление, 3D-печать, нанofрезерование с ЧПУ и лазерная микрообработка.

На одном из методов был построен технологический подход, основанный на наносекундной лазерной микрообработке и магнетронном распылении [6–8] для микрообработки двумерных плоских микрополосковых замедляющих структур для работы в V-диапазоне (50-75 ГГц). Обратим внимание на главные преимущества микрообработки на основе лазерной абляции:

- Малое количество стадий процесса;
- Гибкость процесса;
- Бесконтактность процесса;
- Отсутствие опасных химикатов.

С развитием технологий изготовления полупроводниковых лазерных источников интерес к лазерной микрообработке наносекундными, пикосекундными и фемтосекундными импульсами существенно возрос.

Целью данной работы является формирование и исследование планарных микрополосковых структур на твердой диэлектрической подложке из медно-молибденовых сплавов.

Для достижения указанной цели, необходимо решить следующие конкретные научные **задачи**:

1. Ознакомление с методом микрообработки материалов на основе лазерной абляции;
2. Обзор экспериментальных методов исследования морфологии структур: оптическая микроскопия, электронная микроскопия, стилусная профилометрия;
3. Создание планарных проводящих структур из меди и медно-молибденовых покрытий на твердой диэлектрической подложке;
4. Исследование морфологии планарных проводящих структур на твердой диэлектрической подложке;
5. Анализ полученных результатов с формулировкой наиболее оптимальных режимов микрообработки лазерными импульсами наносекундной длительности;
6. Создание полноразмерного макета планарной проводящей структуры из меди и медно-молибденовых сплавов на твердой диэлектрической подложке;
7. Исследование морфологии полноразмерного макета проводящей структуры из меди и медно-молибденовых сплавов на твердой диэлектрической подложке;
8. Исследование электродинамических параметров с помощью векторного анализатора цепей и последующий анализ полученных результатов;
9. Анализ полученных результатов.

Основное содержание работы.

В первой главе описывается процесс вынужденной генерации и использовании его в оптических квантовых генераторах (ОКГ). Сфера применения ОКГ довольно обширна: наука, промышленности, культура, медицина, вооружение, быт, информационные технологии. В настоящее время применяются лазеры, которые излучают в ультрафиолетовом (от 153 нм до ~400 нм), видимом (от ~ 400 нм до ~750 нм), инфракрасном (от ~800 нм до ~ 11 мкм) диапазонах [9].

В главе 2 говорится о лазерной микрообработке материалов. Микрообработка подразделяется на фрезеровка, маркировка, прецизионная нано- и микрообработка, прецизионная резка, скрайбирование, гравировка.

Также необходимо отметить, что у каждого материала имеются определенные свойства, которые оказывают существенное влияние на процесс микрообработки, такие как коэффициент отражения, коэффициент пропускания и коэффициент поглощения. Помимо этого, лазерное излучение можно классифицировать по виду воздействия – импульсное и непрерывное. В свою очередь импульсное воздействие можно разбить на 3 группы:

- Мили- и микросекундные используют для сварки и резки толстых (толщиной $>0,2$ мм) материалов и прошивки отверстий соответственно;
- Наносекундные лазеры применяют для микрообработки: гравировки изделий или их маркировки, удаления пленок и фрезеровки [10];
- Пико- и фемтосекундные находят применение в прецизионной нано- и микрообработке, обработке прозрачных материалов [10,11].

Кроме этого, возможно разделить импульсное лазерное излучение по типу следования импульсов – последовательность одиночных импульсов и последовательность пакетов импульсов [12].

Глава 3 описывает применение лазерной микрообработки. Процесс лазерной микрообработки основан на эффекте лазерной абляции [13]. Импульсная лазерная абляция – это процесс удаления или разрушения вещества с поверхности материала лазерными импульсами. В данной работе

лазерная микрообработка используется для изготовления микроразмерных электромагнитных структур для высокомошных и портативных микроэлектронных вакуумных устройств.

В главе 4 описывается используемое в работе оборудование:

- Лазерная технологическая установка - МиниМаркер 2-20А4;
- Ультразвуковая ванна;
- Оптическая микроскопия - Olympus MX51;
- Сканирующая электронная микроскопия - Tescan Mira II LMU;
- Стилусная профилометрия - Veeco Dektak 150;
- Векторный анализатор цепей.

В главе 5 описывается технологический маршрут создания структур. Технологический маршрут создания ЗС можно описать следующим образом. Вначале производится создание макета — траекторий движения лазерного луча. Создание макета осуществляется с помощью векторного графического редактора. Специализированное программное обеспечение лазерной технологической установки преобразует данный макет в набор команд, управляющих положением лазерного пучка.

Далее производится лазерная микрообработка. Данный этап можно подразделить на следующие шаги:

1. Лазерное излучение проходит по контуру структуры, при этом используется наименьшая длительность лазерного импульса и наименьшая низкая частота следования импульсов.
2. Лазерное излучение удаляет материал внутри структуры с теми же параметрами микрообработки, что и на предыдущем шаге.
3. Лазерное излучение удаляет материал вокруг структуры. Используется более быстрый режим микрообработки.
4. Лазерное излучение повторно проходит по контуру и внутри структуры для удаления продуктов абляции от предыдущего шага.

Затем производится ультразвуковая химическая чистка полученных структур с помощью ультразвуковой ванны и химических реагентов, таких

как ортофосфорная кислота и спирт. Удаляются окислы металла и продукты процесса лазерной абляции по краям зона реза.

На заключительном этапе осуществляется детальный морфологический анализ полученных структур с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии. Производится сопоставление размеров изготовленных структур ЗС с численной моделью.

Далее, в главе 6, описывается численная модель заданной структуры – микрополосковая замедляющая система меандрового типа на диэлектрической подложке. Описываются ее геометрические размеры. На основе геометрических размеров численной модели создаются макеты для лазерной установки, которая через специализированное ПО преобразует макет в набор команд, управляющих положением лазерного луча.

Также приведено описание образцов, которые были использованы в работе. Образец представляет с собой твердую диэлектрическую подложку из кварца толщиной 200 мкм. На подложку нанесен титановый адгезионный подслоя толщиной 30-40 нм, а на него нанесено покрытие из меди или сплава меди и молибдена. Все покрытия наносились с помощью метода магнетронного распыления [8].

Металлическая пленка представляет с собой медь или сплав меди и молибдена. Главный недостаток меди – высокий коэффициент теплового расширения. Поэтому было принято решение работать со сплавом меди и молибдена. Он совмещает в себе такие свойства как низкий коэффициент теплового расширения, высокая теплопроводность материала и высокая электропроводность материала. Также ранее было выявлено, что адгезия покрытия к подложке недостаточна [14]. Решением данной проблемы стало нанесение дополнительного адгезионного подслоя из титана.

В главе 7 описываются результаты работы. Для того чтобы создавать сложные структуры, для начала необходимо простые элементы данных структур. Для этого были изготовлены структуры в виде линий. С шириной

полос от 10 до 50 мкм, представлены на Рисунке 1. Удалось достичь минимальной ширины полосы 16 мкм [14].

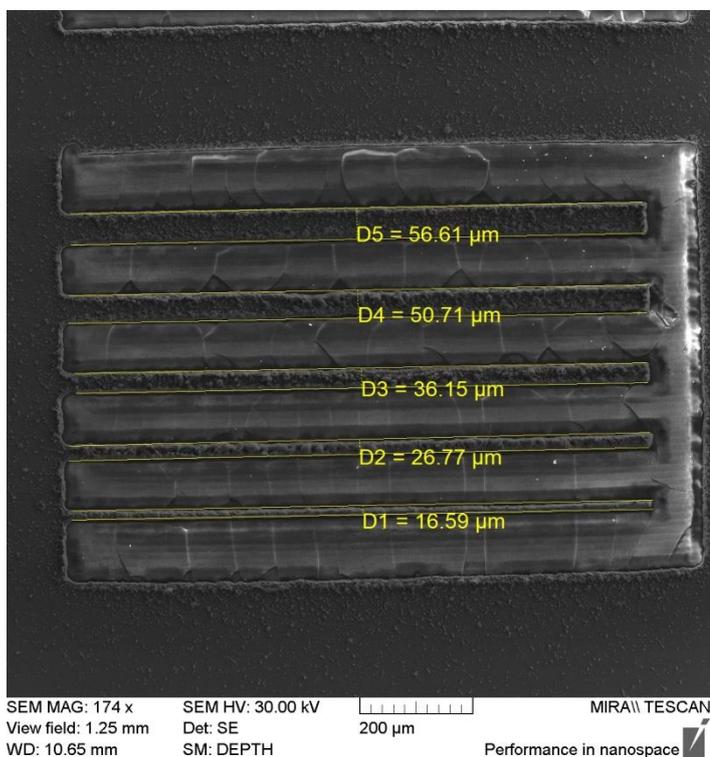
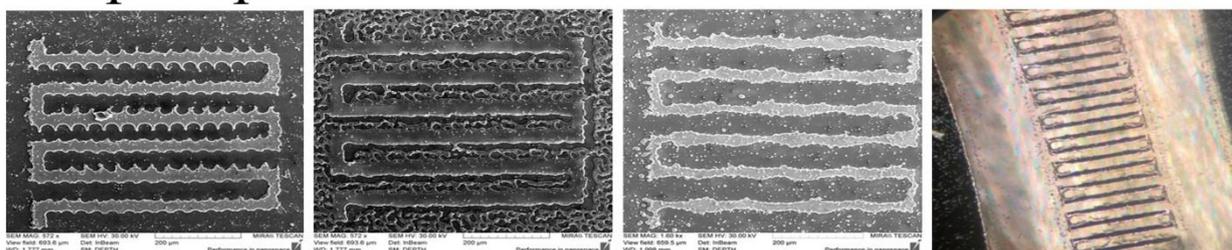


Рис. 1 Фотографии со сканирующего электронного микроскопа структуры из полос.

При неверно заданном режиме микрообработки, полученная структура может получиться с дефектами, как показано на Рисунке 2.



Скорость движения лазерного пятна слишком высока (SEM)

Скорость движения лазерного пятна недостаточна (SEM)

Мощность лазерного импульса слишком высокая (SEM)

Мощность лазерного импульса слишком высокая (оптическая микроскопия)

Рис. 2 Результаты микрообработки при различных параметрах.

Как можно увидеть из фотографий, наблюдается изрезанность краевой зоны абляции, а также большая шероховатость поверхности после

микрообработки. Также химическая чистка не позволяла качественно убрать продукты лазерной абляции. Данный технологический подход не подходит для создания подобных структур.

При новом технологическом подходе, удалось изготовить 15 полноразмерных макетов планарной замедляющей системы из меди на твердой диэлектрической подложке. Погрешность в изготовлении не превышает 4%.

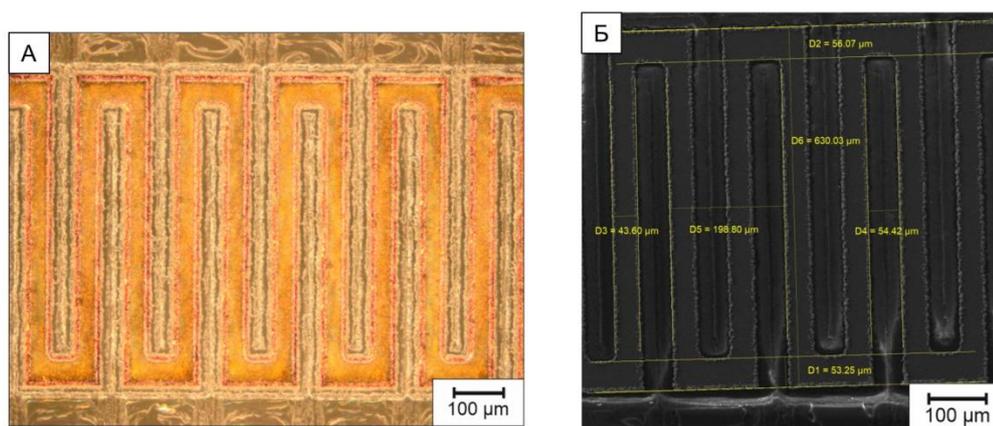


Рис. 3 Фотографии полученных структур. А – фотография, полученная с помощью оптической микроскопии, Б – фотография, полученная с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Помимо этого, был модернизирован этап химической чистки. В новом технологическом подходе химическая чистка осуществляется с помощью ультразвуковой ванны.

Были изготовлены тестовые образцы из сплава меди и молибдена. При изготовлении структур из сплава меди и молибдена использовался тот же технологический маршрут, что и при создании структур из меди.

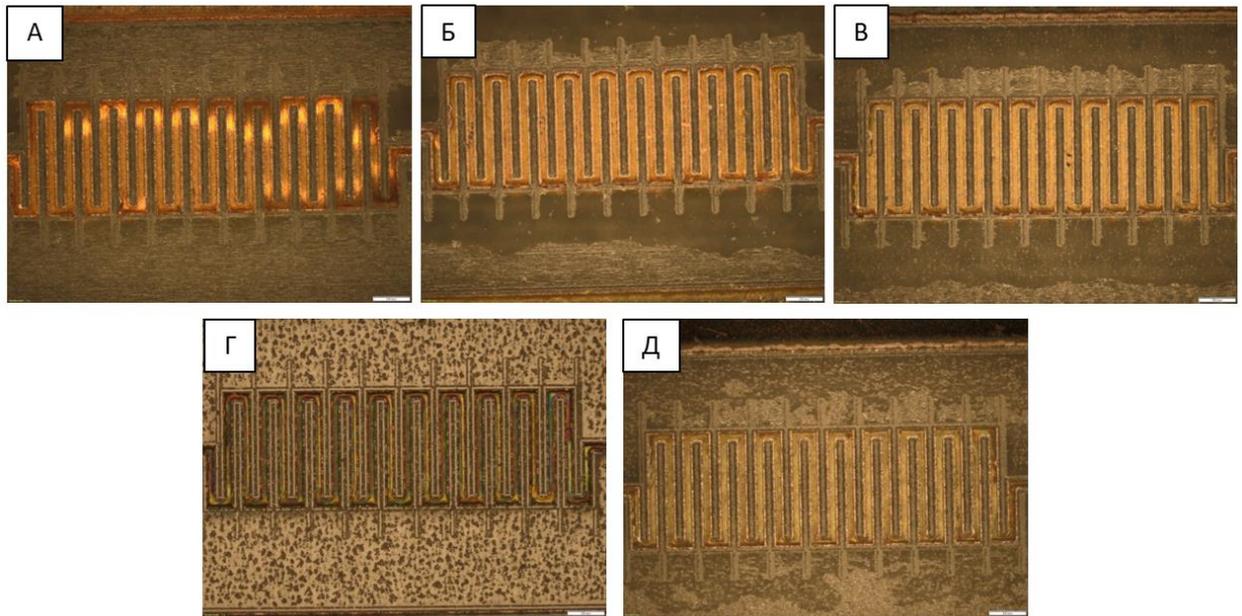


Рис. XXX Фотографии тестовых структур при различном содержании молибдена в сплаве.

Результаты медно-молибденовых структур отличаются от медных. При анализе структур были выявлены отслоения покрытия от подложки, сколы структур, на структуре оставались продукты лазерной абляции и уменьшение геометрического размера полученных структур пропорционально содержанию молибдена в сплаве.

Кроме изготовления структур проводилось исследование их электродинамических характеристик. Были исследованы структуры из меди с помощью векторного анализатора цепей.

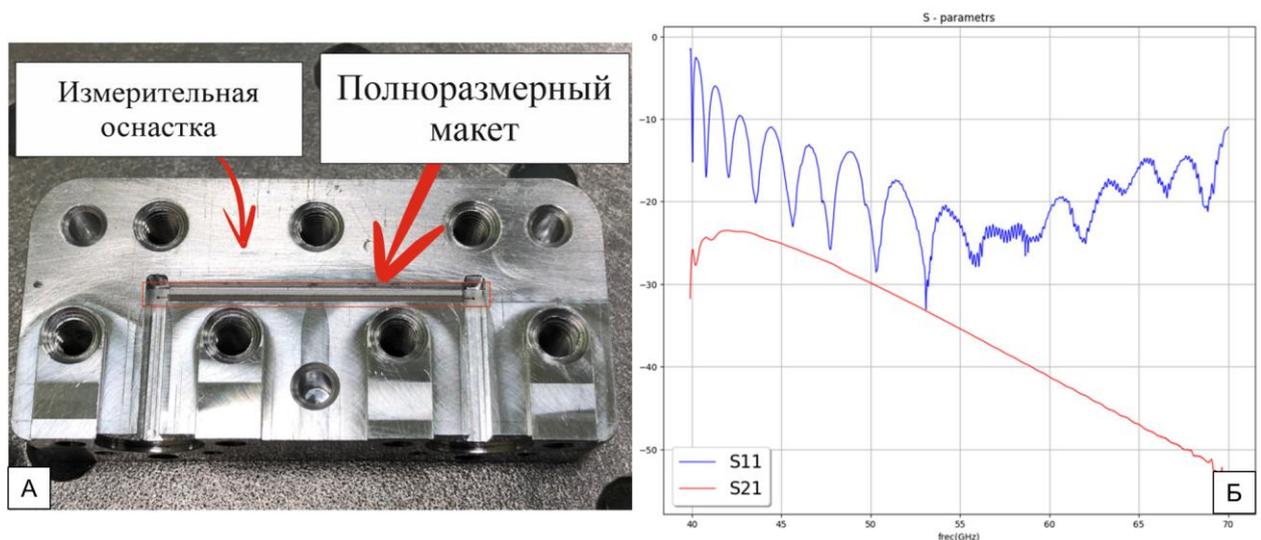


Рис. 5 А – фотография полноразмерного макета в измерительной оснастке, Б – экспериментально снятые S-параметры.

Полученные результаты в ходе эксперимента соответствуют результатам численного моделирования. Потери за период составили 0,17 - 0,39 дБ/период.

Заключение. В данной работе улучшен и оптимизирован технологический маршрут изготовления планарных замедляющих систем типа меандр из меди и сплава меди и молибдена на твердой диэлектрической подложке, проведено экспериментальное исследование электродинамических характеристик. Сформированы простые элементы в виде линий с минимальной шириной 16 мкм. Также было выявлено, что адгезия медно-молибденового покрытия к подложке недостаточна и решением данной проблемы стало нанесение дополнительного адгезионного подслоя из титана. Изготовлены полноразмерные макеты планарных замедляющих систем из меди на твердой диэлектрической подложке, предложен технологический маршрут изготовления данных структур с уменьшением передаваемой энергии металлической пленке и модернизированным этапом химической чистки. Исследованы электродинамические параметры (S-параметры) полноразмерных макетов, результаты соответствуют результатам численного моделирования. Изготовлены тестовые образцы из сплава меди и молибдена,

выявлены проблемы отслоения покрытия от подложки, сколов структур и уменьшения геометрического размера при добавлении молибдена в сплав. Требуется оптимизация технологического маршрута для каждого состава сплава.

Список литературы.

1. Akyildiz I.F., Kak A., Nie S. 6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 133995–134030.
2. Rappaport T.S. et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: Opportunities and challenges for 6g and beyond // *IEEE Access*. IEEE, 2019. Vol. 7. P. 78729–78757.
3. Starodubov A. et al. Technological Approaches to the Microfabrication of Planar Slow-Wave Structures for Millimeter- and THz-Band Vacuum Electron Devices // *2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. IEEE, 2020. P. 256–261.
4. Starodubov A. V. et al. Technologies for Forming Electrodynamic Structures for Millimeter-Wave and Terahertz Vacuum Microelectronic Devices (Review) // *J. Commun. Technol. Electron*. 2022. Vol. 67, № 10. P. 1189–1197.
5. Yang R. et al. Design and Experiment of 1 THz Slow Wave Structure Fabricated by Nano-CNC Technology // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2022. Vol. 69, № 5. P. 2656–2661.
6. Starodubov A. V. et al. A novel microfabrication technology of planar microstrip slow-wave structures for millimeter-band traveling-wave tubes // *2018 IEEE Int. Vac. Electron. Conf. IVEC 2018*. 2018. P. 333–334.
7. Torgashov R.A. et al. Theoretical and Experimental Study of a Compact Planar Slow-Wave Structure on a Dielectric Substrate for the W-Band Traveling-Wave Tube // *Tech. Phys*. 2020. Vol. 65, № 4. P. 660–665.
8. Ryskin N.M. et al. Development of microfabricated planar slow-wave structures on dielectric substrates for miniaturized millimeter-band traveling-wave tubes // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2021. Vol. 39, № 1. P. 013204.

9. Парфенов В. А. Лазерная Микрообработка Материалов. Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
10. 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.
11. Dausinger F. Femtosecond technology for precision manufacturing: fundamental and technical aspects / ed. Miyamoto I. et al. 2003. P. 471.
12. Bruneel D. et al. Micromachining using pulse bursts: Influence of the pulse duration and the number of pulses in the burst on the specific removal rate // *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXIII* / ed. Neuenschwander B. et al. SPIE, 2018. P. 4.
13. Russo R.E. et al. Laser Ablation // *Laser-Induced Break. Spectrosc.* 2007. P. 49–82.
14. Nozhkin D.A. et al. On the laser micromachining of thin copper-molybdenum alloy films // *Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling* / ed. Derbov V.L. SPIE, 2022. P. 38.