

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

Кафедра физики открытых систем

**Создание и исследование радиоэлектронных компонентов на гибкой
диэлектрической подложке (гибкие линии передачи, гибкие антенны)**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4041 группы
направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии»
Института Физики
Ожогина Ивана Сергеевича

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

дата, подпись

А.Б. Адилова

Заведующий кафедрой
физики открытых систем
д.ф.-м.н., профессор

дата, подпись

А.А. Короновский

Саратов 2023 год

Введение

Актуальность работы обусловлена бурным развитием гибкой электроники за последние десятилетия^{1,2,3} и широчайшим спектром её применения в телекоммуникационных системах, медицине, разнообразных датчиках и носимых устройствах и др. Вместе с этим возникает проблема при формировании электронных компонентов (линии передачи, антенны, и т.п.) на гибкой диэлектрической подложке.

В настоящее время существуют несколько методов⁴ создания проводящих структур на гибких диэлектрических подложках. Среди них фотолитография, струйная печать и трафаретная печать. Каждый из этих методов предлагает свой подход к формированию проводящих элементов на подложках и имеет свои преимущества и недостатки. При формировании схем с использованием фотолитографии сначала наносят фоторезист, который чувствителен к ультрафиолету. Затем пластина с фоторезистом освещается через маску, пропускающую ультрафиолетовое излучение. После этого химическими веществами вытравливается рисунок на фоторезисте, а оставшийся фоторезист удаляется. Фотолитография обеспечивает точность и разрешение в создании тонких проводников, но требует сложной обработки, дорогостоящего оборудования и активной химии. Для струйной печати в электронике используется распыление проводящей краски из наночастиц серебра или золота на подложку. Для надежной фиксации краски на поверхности требуется высокая температура в течение длительного времени. Хотя струйная печать более доступна и экономически эффективна, у нее есть ограничения в разрешении, точности и совместимости с некоторыми типами подложек. Трафаретная печать включает создание структур с помощью

¹ Nathan, A. *et al.* Flexible Electronics: The Next Ubiquitous Platform. *Proceedings of the IEEE* **100**, 1486–1517 (2012).

² Zhu, J. & Cheng, H. Recent development of flexible and stretchable antennas for bio-integrated electronics. *Sensors (Switzerland)* **18**, 1–22 (2018).

³ Dahiya, R., Akinwande, D. & Chang, J. S. Flexible electronic skin: From humanoids to humans. *Proceedings of the IEEE* **107**, 2011–2015 (2019).

⁴ Godlinski, D., Zichner, R., Zöllmer, V. & Baumann, R. R. Printing technologies for the manufacturing of passive microwave components: antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation* **11**, 2010–2015 (2017).

масок, изготовленных из растягивающихся серебряных чернил. Она обеспечивает приемлемое разрешение и возможность массового производства. Однако она может ограничиваться в создании сложных микроструктур, требующих более высокой точности и разрешения.

В данной работе рассматривается еще один подход, основанный на комбинации магнетронного распыления и наносекундной лазерной абляции^{5,6,7}. Этот процесс включает удаление материала с поверхности с использованием лазерных импульсов, которые разрушают межатомные связи. Этот подход обладает преимуществами, такими как высокая точность, контроль при формировании структур на гибких диэлектрических подложках и минимальное воздействие на окружающую среду. Этот подход представляет перспективы для промышленного масштабирования и производства радиоэлектронных компонентов на гибких диэлектрических подложках.

Цель данной работы заключалась в разработке метода формирования с помощью импульсной лазерной абляции сверхвысокочастотных электродинамических структур на гибких диэлектрических подложках (линии передачи, антенны).

Для достижения данной цели были поставлены следующие научные задачи:

1. Детальное исследование взаимодействия импульсного лазерного излучения наносекундной длительности с тонкими медными пленками на гибкой диэлектрической подложке.
2. Изготовление и экспериментальное исследование малогабаритных планарных гибких антенн, размер которых $20 \times 30 \text{ mm}$ и копланарных линий передачи $30 \times 10 \text{ mm}$.

⁵ Starodubov A. V. et al. A Novel Approach for Fabrication of Flexible Antennas for Biomedical Applications // 2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS). IEEE, 2018. P. 303–306.

⁶ Starodubov A. V. et al. Study of flexible monopole antenna with coplanar feeding structure fabricated by magnetron sputtering and laser ablation technologies // 2019 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC). IEEE, 2019. P. 138–140.

⁷ Starodubov A. V. et al. Laser ablation and other manufacturing approaches for flexible antenna fabrication // Saratov Fall Meeting 2019: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling / ed. Derbov V.L. SPIE, 2020. Vol. 1145804, № April 2020. P. 40

3. Исследование режимов лазерной абляции медных покрытий разной толщины от $3 \div 4 \text{ }\mu\text{m}$ до $6 \div 7 \text{ }\mu\text{m}$.
4. Исследование лазерной абляции на новой технологии напыления многослойной металлизации Cr-Cu-Cr.
5. Формирование макетов копланарных линий передачи и малогабаритных планарных антенн на полиимидной подложке с напылением многослойной металлизации Cr-Cu-Cr.

Основное содержание работы

1. Лазерная абляция. Абляция является основным процессом удаления материала при использовании лазерных импульсов. Конкретный механизм абляции зависит от материала, с которым взаимодействуют фотоны лазерного излучения. Когда лазерный импульс попадает на поверхность материала, фотоны оказывают определенное воздействие на межатомные связи материала.

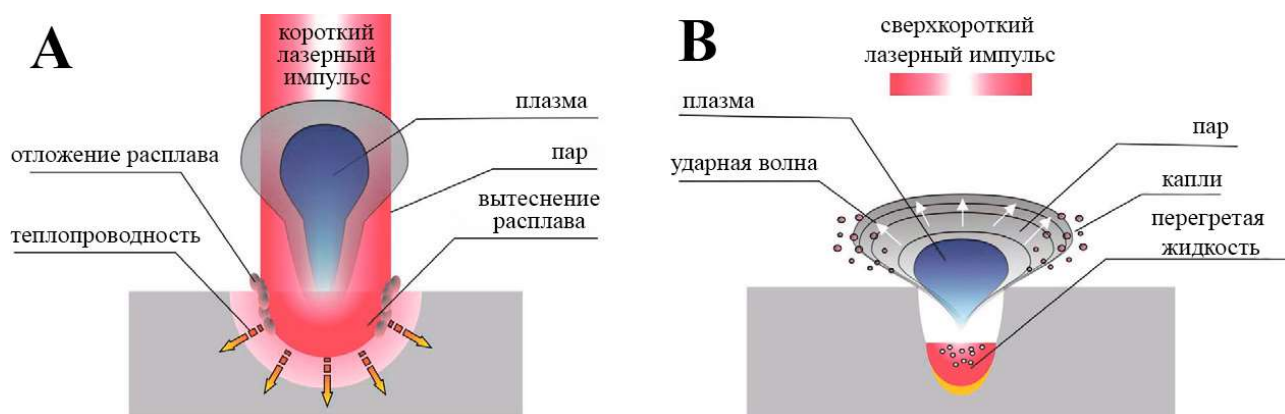


Рисунок 1.1. Классическое взаимодействие короткого (А) и сверхкороткого (В) лазерного импульса и вещества.

Лазерная микрообработка материалов мощными короткими и ультракороткими импульсами имеет ряд следующих преимуществ по сравнению с другими используемыми подходами:

- бесконтактная обработка,
- менее строгие требования к производственной среде, включая вакуумные и чистые помещения,

- гибкое распространение технологии лазерной микрообработки на любые 3D поверхности,
- широкая вариативность технологических параметров, которые можно легко регулировать, что приводит к созданию индивидуальных структур и геометрических моделей.

Для коротких лазерных импульсов в микросекундном и наносекундном диапазоне в абляционном процессе преобладают теплопередача⁸, плавление и испарение (рис.1.2). Для ультракоротких пико- и фемтосекундных лазерных импульсов из-за короткого времени взаимодействия металл переходит сразу из твердого состояния в парообразное, минуя жидкую фазу.



Рисунок 1.2 Блок-схема состояния металла на протяжении одного наносекундного импульса.

Наносекундная лазерная система микрообработки является рентабельным и быстрым методом формирования токопроводящих структур. Однако, этот процесс имеет ограничение в виде большой зоны термического воздействия и требует тщательной настройки параметров.

2. Формирование тонких металлических слоев на гибких подложках. В качестве подложки для осаждения металла использовалась полиимидная (PI) пленка толщиной $100 \mu m$, которая известна как достаточно термостойкий полимер (до $300 \text{ }^\circ\text{C}$). Металлические покрытия из бескислородной меди были нанесены магнетронным способом на подложки размером $100 \times 100 \text{ } mm$ с помощью установки VSM 300 (RobVac, Россия).

⁸ Dowding C. Laser ablation // Adv. Laser Mater. Process. Technol. Res. Appl. 2010. P. 575–628

Для улучшения адгезии меди перед осаждением меди на PI наносился адгезионный подслоя титана толщиной 20 nm . Медная пленка напылялась сразу после осаждения адгезионного слоя без вакуумного перерыва. Напыление обоих слоев проводилось в атмосфере аргона в режиме постоянного тока. Полученная толщина медной пленки составляла $3 \div 4 \text{ }\mu\text{m}$, которая легла в основу для формирования макетов линии передачи и компактной антенны. В дальнейшем с целью снижения потерь при передаче сигнала толщина медного покрытия была увеличена до $6 \div 7 \text{ }\mu\text{m}$.



Рисунок 2.1. Пример гибкой диэлектрической подложки с нанесенными в процессе магнетронного распыления слоями хром-медь-хром (1) и гибкая подложка с нанесенными в процессе магнетронного распыления слоями титан-медь (2).

В данном исследовании впервые было применено многослойное покрытие гибкой подложки из полиимида. В процессе магнетронного распыления на подложку был нанесен адгезионный подслоя хрома толщиной около 30 nm , за ним последовал основной слой меди толщиной около $6 \div 7 \text{ }\mu\text{m}$, и завершающий слой хрома толщиной около 150 nm .

Этот метод нанесения обладает несколькими преимуществами. Во-первых, он защищает медь от окисления, сохраняя ее проводимость. Во-вторых, такой метод позволяет снизить отражательную способность в сравнении с обычной медью. Это достигается за счет того, что Cr обладает более высоким коэффициентом поглощения энергии по сравнению с Cu при длине волны лазерного излучения в $1.064 \text{ }\mu\text{m}$.

3. Эффективный режим лазерной абляции. Режим абляции считается эффективным, если обработанная поверхность не проводит электричество,

при этом гибкая диэлектрическая подложка не имеет термических повреждений.

На рисунке 3.1 приведена схема расположения лазерных импульсов., которая была построена для поиска эффективного режима работы станка. При скорости перемещения лазерного луча – 1000 mm/s , ширины зоны абляции в фокусе порядка $20\text{ }\mu\text{m}$ и плотности линий в поперечном направлении 100 линий на миллиметр, при котором расстояние между центрами импульсов как в продольном, так и в поперечном направлении составляет $10\text{ }\mu\text{m}$, а значит не перекрывает лишнюю область и при этом имеет хорошую разрушающую способность в обработанном участке.

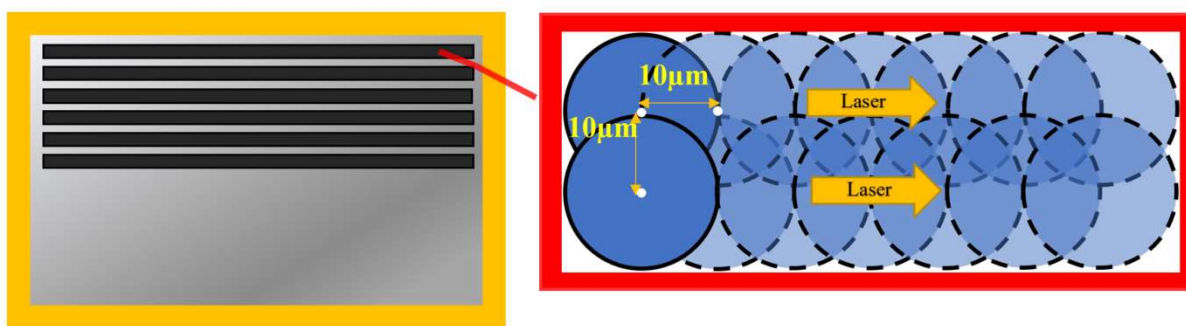


Рисунок 3.1. Схема расположения лазерных импульсов.

Результаты исследования воздействия лазерного излучения подложку с толщиной медного покрытия $3\div 4\text{ }\mu\text{m}$ (рис. 3.2.) при длительности лазерного импульса 8 ns и средней мощности лазерного излучения в диапазоне от 20% ($19,2\text{ }\mu\text{J}$) до 90% ($86,4\text{ }\mu\text{J}$) с шагом 10% ($9,6\text{ }\mu\text{J}$). В скобках указана соответствующая энергия лазерного излучения в импульсе.

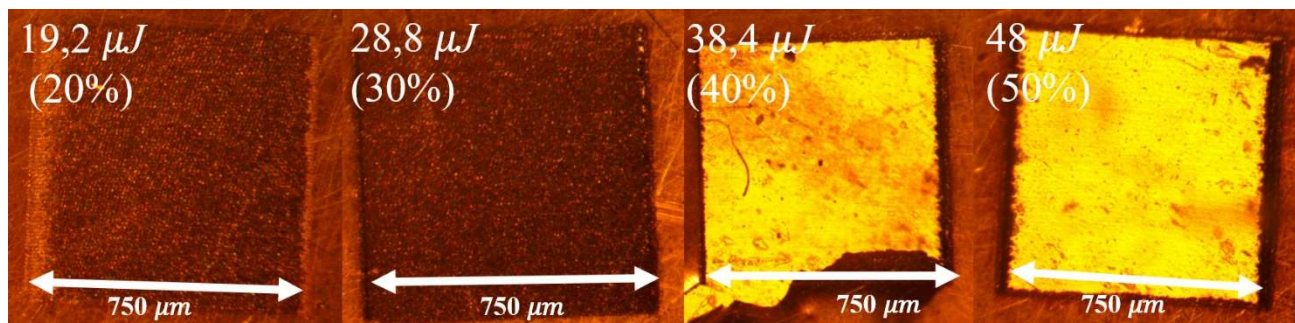


Рисунок 3.2. Режим работы: 100 lines/mm и скоростью лазера 1000 mm/s . Изменение мощности 20%, 30%, 40%, 50% от максимального значения.

Для определения оптимального режима на гибкой подложке обработке подвергалась область размером $0,75 \times 0,75 \text{ mm}$ для измерений с использованием микроскопии, и $10 \times 10 \text{ mm}$ для измерений с использованием мультиметра. До 40% ($38,4 \text{ }\mu\text{J}$) медь всё ещё в большом количестве оставалась на полиимидной подложке. При 40% ($38,4 \text{ }\mu\text{J}$) и 50% ($48 \text{ }\mu\text{J}$) медь хорошо удалялась с поверхности.

Результаты исследования воздействия лазерного излучения приведены на рисунке 3.3. при 60% ($57,6 \text{ }\mu\text{J}$), 70% ($67,2 \text{ }\mu\text{J}$), 80% ($76,8 \text{ }\mu\text{J}$) и 90% ($86,4 \text{ }\mu\text{J}$) видно, что медь была удалена полностью, но на месте обработки пленка полиимида испытала тепловое воздействие. Поэтому, чтобы определить эффективный режим лазерного станка было решено, начать с 40% ($38,4 \text{ }\mu\text{J}$) и каждый следующий проход увеличивать на 1% ($0,96 \text{ }\mu\text{J}$) энергии.

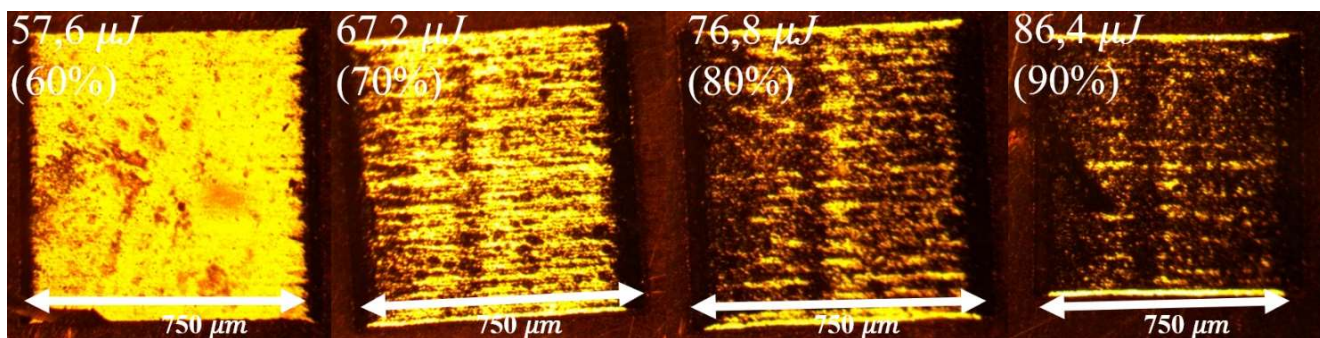


Рисунок 3.3. Режим работы: 100 lines/mm и скоростью лазера 1000 mm/s . Изменение мощности 60%, 70%, 80%, 90% от максимального значения.

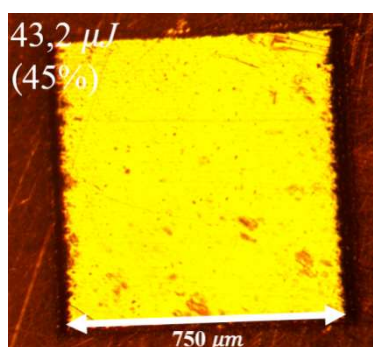


Рисунок 3.4. Эффективный режим работы 100 lines/mm, скоростью лазера 1000 mm/s . мощность 45% от максимального значения.

Таким образом, чтобы определить эффективный режим лазерного станка было решено, начать с 40% ($38,4 \text{ }\mu\text{J}$) и каждый следующий проход увеличивать на 1% ($0,96 \text{ }\mu\text{J}$) энергии. На рисунке 3.4. видно, что данный

режим работы лазера эффективно удаляет медь с гибкой диэлектрической подложки при скорости перемещения лазерного луча – 1000mm/s и мощности 45% ($43,2\ \mu\text{J}$).

Таким образом, медное покрытие толщиной $3\div 4\ \mu\text{m}$ было полностью удалено, в результате чего обработанный участок стал полностью лишен свойств проводимости.

4. Линия передачи и компактная антенна. Схема СВЧ линии передачи копланарного⁹ типа показана на рисунке 4.1.А. Геометрические параметры линии передачи, следующие: толщина полиимидной подложки $t_{\text{substrate}} = 100\ \mu\text{m}$; толщина медной тонкой плёнки $t_{\text{copper}} = 4\ \mu\text{m}$; ширина сигнальной линии $s = 2\ \text{mm}$; расстояние между сигнальной и заземлённой линией $w = 130\ \mu\text{m}$; Длина СВЧ линии передачи $L = 30\ \text{mm}$.

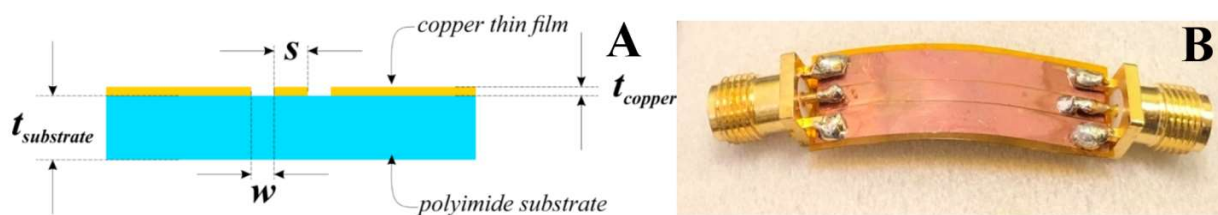


Рисунок 4.1. Схема линии передачи (А) и сформированная линия передачи в СВЧ диапазоне копланарного типа на гибкой подложке полиимида (В).

На основе выбранного режима были изготовлены структуры в виде копланарной линии передачи (рис. 4.1.В.) и компактной антенны (рис. 4.2.В.) с СВЧ разъемами типа SMA. Коннекторы припаивались для проведения дальнейших экспериментальных исследований с помощью векторного анализатора СВЧ цепей.

Схема компактной антенны показана на рисунке 4.2.А. Геометрические параметры компактной антенны, следующие: толщина полиимидной подложки $t_{\text{substrate}} = 100\ \mu\text{m}$; толщина медной тонкой плёнки $t_{\text{copper}} = 4\ \mu\text{m}$; ширина сигнальной линии $s = 4\ \text{mm}$; расстояние между сигнальной и заземлённой линией $w = 130\ \mu\text{m}$; длина компактной антенны $L = 30\ \text{mm}$;

⁹ Leitz K.H. et al. Metal ablation with short and ultrashort laser pulses // Phys. Procedia. 2011. Vol. 12, № PART 2. P. 230–238.

ширина компактной антенны $W = 20 \text{ mm}$; параметры: $l_1 = 8 \text{ mm}$, $l_2 = 7 \text{ mm}$, $l_3 = 3,5 \text{ mm}$; ; $l_4 = 0,5 \text{ mm}$; $l_5 = 2,5 \text{ mm}$.

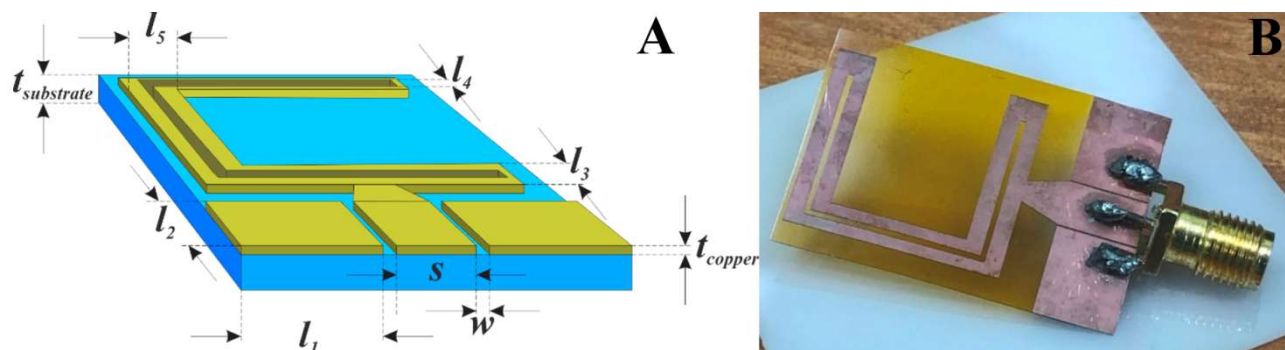


Рисунок 4.2. Схема компактной антенны (А) и сформированная компактная антенна на гибкой подложке полиимида (В).

5. Экспериментальное исследование. Экспериментальное исследование линии передачи на анализаторе цепей представлено на рисунке 5.1.

Экспериментальное исследование линии передачи (рис. 5.2.А) показало, что в диапазоне частот до 6 GHz возвратные потери находятся на уровне не хуже 10 dB , что приемлемо для работы большинства радиоэлектронных устройств.

У экспериментального образца антенны можно выделить три диапазона рабочих частот, которые по уровню возвратных потерь не хуже 10 dB с диапазоном частот: $2,53 - 2,71 \text{ GHz}$; $5,20 - 6,02 \text{ GHz}$; и $6,72 - 7,10 \text{ GHz}$.



Рисунок 5.1. Экспериментальное исследование изготовленной линии передачи на векторном анализаторе цепей СВЧ диапазона.

Потери на передачу также в основном не превышают 1 dB , за исключением частот около $4,5 \text{ GHz}$, что означает хорошую передачу и высокие потери на отражение в СВЧ диапазоне.

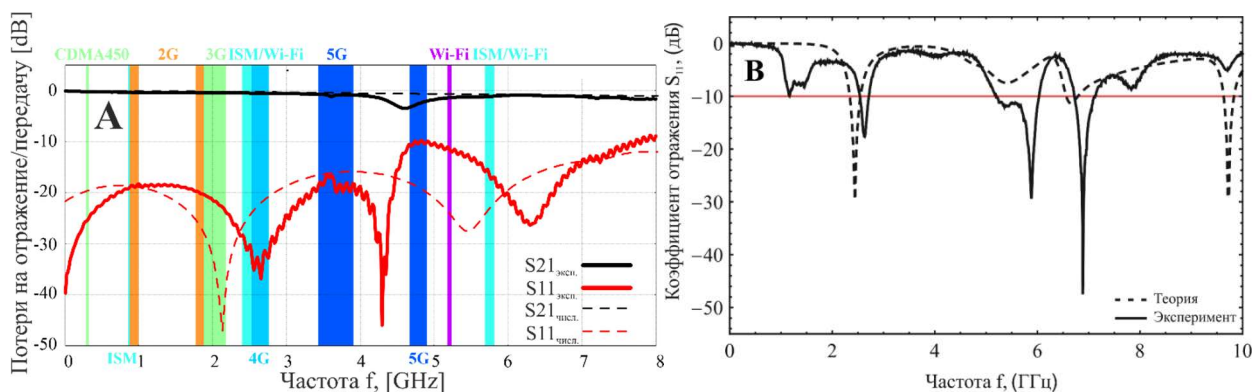


Рисунок 5.2. Результаты численного и экспериментального исследования: (А) копланарной линии передачи: на возвратные потери S_{11} и потери на передачу S_{21} ; (В) компактной антенны на возвратные потери S_{11} .

На графике (рис. 5.2.А) отмечены рабочие спектры частот основных стандартов передачи данных для сетей сотовой связи и беспроводных телекоммуникаций разнообразного назначения. Таким образом, можно сделать вывод, что представленная линия передачи может с успехом использоваться в указанных частотных диапазонах.

6. Формирование структур на многослойном покрытии. Для поиска нового эффективного режима лазерной абляции на подложках были составлены матрицы режимов (рис. 6.1) для длительности лазерного импульса 4 ns, 8 ns и 14 ns. Матрица режимов – это сформированная таблица характеристик лазерной абляции, изменяющаяся по одному или двум параметрам. Параметры матрицы режимов: длительность одиночного импульса; количество проходов; частота следования импульсов; скорость перемещения лазерного луча; средняя мощность излучения в % от максимального значения; положение сканатора по оси Z; количество линий на миллиметр.

Наиболее эффективным оказался режим с параметрами длительностью лазерного импульса 8 ns, скоростью луча 800 mm/s, 180 lines/mm, 60% от максимальной мощности и 2 прохода. На основе этого режимы сформированы новые макеты гибких линии передачи и антенн.



Рисунок 6.1. Матрица режимов на многослойной полиимидной подложке Cr-Cu-Cr с параметрами: 100 kHz, 14 ns, 100 lines/mm, энергия в лазерном импульсе при 100% мощности 60 μ J, 2 повторения.

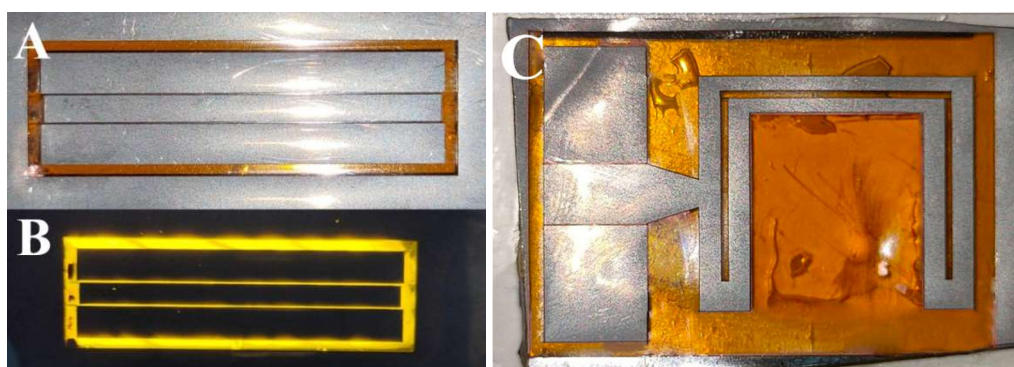


Рисунок 6.2. Копланарная линия передачи, сформированная на подложке с металлизацией Cr-Cu-Cr, изображена на рисунке в двух видах: сверху (А) и на просвете (В). Сформированная компактная антенна на подложке с металлизацией Cr-Cu-Cr (С).

Заключение.

При выполнении ВКР изучены основы процесса селективного удаления материала с использованием импульсного лазерного излучения. Установлен эффективный режим лазерной абляции на гибкой диэлектрической подложке с толщиной медного покрытия 3÷4 μ m. Произведено успешное формирование копланарной линии передачи и компактной антенны на подложках с толщиной меди 3÷4 μ m. В ходе экспериментального исследования были получены приемлемые результаты потерь на передачу и на отражение сформированной копланарной линии передачи и планарной гибкой антенны. Показан рабочий спектр частот основных стандартов передачи данных, которые входят в рабочий диапазон линии передачи, таким образом показано широкое практическое применение изготовленной линии

передачи. Исследование показало, что компактная антенна работает в трех диапазонах с центральными частотами 2.64, 5.88 и 6.88 ГГц. Экспериментальные результаты показали смещение центральной частоты диапазона ISM на 210 МГц, уменьшение относительной ширины полосы на 1.4% и увеличение коэффициента отражения на 6.82 дБ. С целью снижения потерь при передаче сигнала толщина медного покрытия была увеличена до $6\div 7 \mu\text{m}$. Установлены новые эффективные режимы с длительностью лазерного импульса 8 и 14 *ns* селективного удаления металлизированного слоя с гибкой диэлектрической подложки с толщиной металлизации $6\div 7 \mu\text{m}$. Также в данном исследовании впервые было применено многослойное покрытие с использованием хрома и меди на гибкой подложке из полиимида с толщиной покрытия $6\div 7 \mu\text{m}$. Микрообработка многослойного покрытия показала результаты, сравнимые с однослойным медным покрытием. Более того, успешно удалось создать копланарную линию передачи и компактную антенну на подложках с многослойной металлизацией.

Материалы исследования были представлены на 8 Всероссийских и одной международной научных конференциях, также данная работа заняла первое место на конкурсе «XI Саратовского салона изобретений, инноваций и инвестиций» и прошла в финал конкурса «УМНИК – 2021». Все полученные результаты опубликованы в 6 тезисах докладов в сборниках конференций, 2 статьях в сборнике конференции ADMInC 2021 и 3 статьях в журнале SPIE Proceedings.