



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 4. С. 414–424

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 4, pp. 414–424

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-414-424>, EDN: IKBCSO

Научная статья

УДК 537.311.6:621.793

Разработка прототипа гибкой антенны с пассивирующим слоем для электроимпедансных сенсоров



А. А. Сердобинцев[✉], И. О. Кожевников, Е. А. Рябов, О. И. Гуслякова, Е. С. Прихожденко

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Алексей Александрович Сердобинцев, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, serdobintsevaa@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3281-8352>, AuthorID: 238828

Илья Олегович Кожевников, заведующий лабораторией полупроводниковой электроники кафедры твердого тела, kozhevnikov_io@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8911-3084>, AuthorID: 683534

Евгений Александрович Рябов, инженер учебной лаборатории полупроводниковой электроники кафедры физики твердого тела, ryabovaea@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4777-7346>, AuthorID: 1045631

Ольга Игоревна Гуслякова, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Биомедицинская фотоакустика», olga.gusliakova17@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8387-0711>, AuthorID: 1051902

Прихожденко Екатерина Сергеевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры инноватики, prikhozhenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2700-168X>, AuthorID: 850345

Аннотация. Потребность в гибкой электронике для нужд мониторинга параметров жизнедеятельности человека с помощью носимых устройств дала толчок развитию гибких антенн. Материалы, используемые для создания антенн разнообразны, однако остается потребность в определении оптимальной конструкции, обеспечивающей как долговечность, так и высокую эффективность. В настоящей работе приведены результаты исследований по обоснованию конструкции и технологии изготовления прототипов гибких петлевых рамочных антенн на полиимидной подложке с помощью магнетронного напыления и лазерной абляции. Установлено, что абляция медного слоя затруднена, что приводит к неполной деметаллизации полиимидной подложки и короткому замыканию формируемых антенн. Кроме того, медь подвержена окислению, что приводит к ухудшению параметров гибких антенн со временем. Это послужило причиной добавления дополнительного пассивирующего металлического слоя из никеля или титана поверх слоя меди. Влияние пассивирующего слоя на качество лазерной деметаллизации (абляции) медного тонкопленочного покрытия гибких подложек из полиимида было оценено экспериментально. Пассивирующий слой никеля значительно улучшил качество деметаллизации, в то время как при использовании титана для пассивации наблюдается большое количество остаточного металла в виде застывших микрокапель в деметаллизированных областях. На основе металлизированного полиимида с никелевым пассивирующим слоем изготовлены прототипы петлевых рамочных антенн с частотой резонанса 3.75 ГГц. Результаты экспериментов с готовыми антеннами продемонстрировали значительную чувствительность частоты резонанса к изгибу в диапазоне углов от -60° до $+60^\circ$, что открывает возможности для использования таких антенн в качестве датчиков микроперемещений. При этом разработанные и реализованные прототипы антенн имеют коэффициент отражения не выше -17 дБ в диапазоне углов изгиба от -100° до $+100^\circ$, что позволяет использовать их в качестве основы электроимпедансных сенсоров.

Ключевые слова: гибкие антенны, лазерная абляция, электроимпедансные сенсоры, пассивация меди

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10270, <https://rscf.ru/project/22-79-10270/>)

Для цитирования: Сердобинцев А. А., Кожевников И. О., Рябов Е. А., Гуслякова О. И., Прихожденко Е. С. Разработка прототипа гибкой антенны с пассивирующим слоем для электроимпедансных сенсоров // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 4. С. 414–424. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-414-424>, EDN: IKBCSO

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Development of a prototype of flexible antennas with a passivation layer for electrical impedance sensors

A. A. Serdobintsev[✉], I. O. Kozhevnikov, E. A. Ryabov, O. I. Gusliakova, E. S. Prikhodzhenko

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

© Сердобинцев А. А., Кожевников И. О., Рябов Е. А., Гуслякова О. И., Прихожденко Е. С., 2025



Alexey A. Serdobintsev, serdobintsevaa@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3281-8352>, AuthorID: 238828

Ilya O. Kozhevnikov, kozhevnikov_io@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8911-3084>, AuthorID: 683534

Evgenii A. Ryabov, ryabovaea@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4777-7346>, AuthorID: 1045631

Olga I. Gusliakova, olga.gusliakova17@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8387-0711>, AuthorID: 1051902

Ekaterina S. Prikhozhenko, prikhozhenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2700-168X>, AuthorID: 850345

Abstract. Background and Objectives: The need for flexible electronics for biomedical and communications applications has completely transformed the field of antenna design and has given rise to the development of flexible antennas. The materials used to create antennas are diverse, but there remains a need to define a design that provides both durability and high performance. **Materials and Methods:** The test samples were flexible polyimide substrates 500 μm thick, on which layers of Cu and Ti or Ni were formed by vacuum magnetron sputtering. A Robvac VSM300 vacuum setup equipped with three magnetron sources with 50 mm diameter disk targets was used for this purpose. The Cu layer thickness on all samples was 1 μm . The thickness of the Ti and Ni layers was 100 nm. Demetallization was performed using a pulsed laser of a Minimarker 2 setup. The main characteristics of the laser: the wavelength of laser radiation is 1064 μm , the maximum laser pulse energy is 1 mJ, the software and hardware resolutions are 2.5 μm , the scanning device is a 2-axis galvanoscanner. The parameters of the laser demetallization mode were as follows: power 2.6 W, beam speed 1000 mm/s, pulse frequency 99 kHz, pulse duration 8 ns. The demetallization template, which is a flexible loop antenna with the geometry optimized for resonance in the 3.75 GHz range. Two versions of the antenna were manufactured with the conductor line width d equal to 1 mm and 3 mm. **Results:** It has been found that an additional layer of metal on the surface of the Cu thin-film coating of flexible polyimide substrates improves the quality of demetallization. Without it, areas with defects in the form of an unremoved Cu film short-circuiting individual antenna elements are observed. On samples with an additional passivation metal layer, demetallization occurs exactly according to the template without defects. It has also been found that significantly fewer drops of molten metal remain on samples with a passivation Ni layer. The results of experiments with ready-made antennas have demonstrated a significant sensitivity of the resonance frequency to bending in the range of angles from -60 to $+60^\circ$, which opens up the possibility of using such antennas as micro-displacement sensors. At the same time, the developed antenna prototypes have a reflection coefficient less than -17 dB in the bending angle range from -100 to $+100^\circ$. **Conclusion:** The work has assessed the influence of an additional layer of passivating metal on the quality of laser demetallization (ablation) of a Cu thin-film coating of flexible polyimide substrates. The experimental results obtained allow us to count on the applicability of the developed antennas as micro-displacement sensors. At the same time, the low reflection coefficient of flexible antennas in a wide range of bending angles allows them to be used as the basis of electroimpedance sensors.

Keywords: flexible antennas, laser ablation, electroimpedance sensors, copper passivation

Acknowledgments: This study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-79-10270, <https://rscf.ru/project/22-79-10270/>).

For citation: Serdobintsev A. A., Kozhevnikov I. O., Ryabov E. A., Gusliakova O. I., Prikhozhenko E. S. Development of a prototype of flexible antennas with a passivation layer for electrical impedance sensors. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 4, pp. 414–424 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-414-424>, EDN: IKBCSO

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Последние десятилетия развития электронной техники были посвящены значительному снижению размеров устройств. Но в настоящее время появилась новая тенденция к обеспечению еще и гибкости как отдельных элементов, так и устройств в целом. Гибкие электронные устройства зачастую отличаются малым весом и формой, портативностью, меньшей стоимостью и экологичностью [1]. Гибкие электронные системы требуют интеграции гибких антенн, работающих в определенных частотных диапазонах и способных обеспечивать работу носимых устройств, инфраструктуры интернета вещей, устройств для оказания помощи на месте, платформ персонализированной медицины, технологии 5G, беспроводных сенсорных сетей и устройств связи [2].

Рынки гибких беспроводных устройств быстро растут отчасти из-за спроса на носимые и имплантируемые устройства для систем мониторинга здоровья и повседневных беспроводных устройств (сотовых телефонов, ноутбуков и др.). Потреб-

ность в гибких антеннах возросла в последние годы, особенно для применения в области биомедицины [3, 4]. В частности, гибкие антенны являются основным компонентом при реализации *in vivo* мониторинга жизненно важных показателей работы органов, нейронных интерфейсов, непрерывного анализа походки, внутричерепных датчиков, систем доставки лекарств и множества других функций [5]. Для интеграции устройств в человеческое тело, характеризующееся наличием изгибов и активной подвижностью отдельных частей, устройство должно быть конформным, т. е. физически гибким или даже растягиваемым.

Гибкие антенны изготавливаются с использованием различных проводящих материалов и диэлектрических подложек. Подложка выбирается на основе ее диэлектрических свойств, устойчивости к механическим деформациям (изгиб, скручивание), возможности миниатюризации, стойкости к условиям внешней среды и долговечности. Материал подложки, используемый в миниатюрной гибкой антенне, должен обладать минимальными



диэлектрическими потерями, высокой диэлектрической проницаемостью, низким коэффициентом теплового расширения и высокой теплопроводностью [6]. При изготовлении гибких антенн часто используются три типа подложек: тонкое стекло, металлическая фольга и полимерные материалы [2]. Хотя тонкое стекло гнется, присущая ему хрупкость ограничивает его полезность. Металлическая фольга может выдерживать высокие температуры и обеспечивать осаждение на ней неорганических материалов, но шероховатость поверхности и высокая стоимость материалов ограничивают ее применение [7]. Лучшими кандидатами для гибких антенн являются полимерные материалы, к которым относятся: (i) термопластичные полукристаллические полимеры (полиэтилентерефталат и полиэтиленнафталат); (ii) термопластичные некристаллические полимеры (поликарбонат и полиэфирсульфон); (iii) материалы с высокой температурой стеклования (полиимид) [8].

Выбор проводящего материала (на основе электропроводности) определяет эффективность излучения. Реализация проводящих схем с хорошей электропроводностью в беспроводных устройствах имеет важное значение для обеспечения высокого усиления, эффективности и пропускной способности. Кроме того, устойчивость к деградации из-за механической деформации является еще одной желаемой характеристикой для проводящего материала. Проводящий рисунок наиболее часто выполняется из серебра или меди, в том числе и из чернил на основе наночастиц данных металлов [9] из-за их высокой электропроводности [10]. Помимо наночастиц, в гибких антеннах обычно используются электротекстильные материалы с различными покрытиями, такими как Ni/Ag-покрытия, медное покрытие нейлоновой ткани и нетканые проводящие материалы. Также активно используются проводящие полимеры, такие как полианилин [11], полипиррол [12] и поли(3,4-этилендиокситиофен) полистиролсульфонат [13]. Низкая проводимость проводящих полимеров может быть улучшена путем добавления углеродных наноматериалов – нанотрубок [14] или графена [15, 16].

Эффективность гибких антенн в значительной степени зависит от качества изготовления проводящих дорожек, их устойчивости к деформации при сохранении электропроводности. Большое значение придается диапазонам, поддерживаемым конструкцией антенны. Основными требованиями к антенне для любого применения и диапазона частот являются коэффициент отражения

($S_{11} \leq -10$ дБ), пиковое усиление (> 3 дБ), хорошие излучательные характеристики, заданная полоса рабочих частот, эффективность и поляризация (линейная для большинства применений и круговая для спутниковых применений) [17].

Эффективность гибкой антенны определяется методом изготовления, который отличается для разных подложек. Распространенными методами изготовления гибких антенн являются мокрое травление [18], струйная печать [19, 20], трафаретная печать [21] и другие специальные методы [22–24].

Ранее авторами был разработан и представлен в ряде работ уникальный метод получения проводящих дорожек на гибких подложках методом магнетронного напыления и лазерной абляции [25, 26]. Метод магнетронного напыления используется для нанесения тонкого слоя металла (меди) на гибкую (полиимидную) подложку. Затем лазерная абляция используется для формирования антенной структуры из медного слоя. Данная технология имеет значительные преимущества по стоимости, скорости и гибкости по сравнению с процессами литографии.

В настоящей работе представляются усовершенствованные технология и конструкция гибкой антенны на полиимидной подложке, предотвращающие окисление медной основы проводящей дорожки с целью увеличения длительности эксплуатации и стабильности работы. Часто гибкие антенны, как отмечалось выше, используются для биомедицинских целей и имеют непосредственный контакт с биологическими жидкостями, что приводит к быстрому окислению медных элементов сенсоров и потери их функциональности. Нами было рассмотрено влияние пассивирующего слоя из Ni или Ti на качество деметаллизации полиимидной подложки, определены зависимости изменения резонансной частоты и коэффициента отражения от углов изгиба готовой гибкой антенны.

Материалы и методы

Металлические покрытия формировались на гибкой полиимидной пленке толщиной 500 мкм методом магнетронного напыления на постоянном токе. Напыление осуществлялось в установке VSM 300 (Robvac, Россия) с полностью безмасляной откачкой. В вакуумной камере установки смонтировано три магнетронных источника, что позволяет формировать трехслойные металлические покрытия без развакуумирования камеры. Такой подход обеспечивает хорошую адгезию



покрытый к гибкой полимерной подложке и исключает формирование окисных пленок на границах между металлическими слоями.

Вакуумная камера откачивалась до давления не выше $5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Затем производился напуск аргона чистотой 99.993% до давления $3 \cdot 10^{-3}$ Торр, при котором осуществлялось напыление. В качестве источника напыляемого материала использовались дисковые мишени диаметром 50 мм (Гирмет, Россия). Адгезионный подслои формировался распылением хрома (толщина мишени 6 мм, чистота 99.95% – здесь и далее по массе), толщина подслоя составляла 100 нм. Затем для всех образцов напылялся основной токопроводящий слой меди толщиной 1 мкм (толщина мишени 6 мм, чистота 99.995%). Финальный пассивирующий слой из титана (толщина мишени 6 мм, чистота 99.7%) или никеля (толщина мишени 3 мм, чистота 99.5%) имел толщину 100 нм и наносился лишь на часть образцов. Образцов каждого типа было изготовлено не менее трех штук. Таким образом, было создано три типа образцов: без пассивирующего слоя, с пассивирующим слоем титана и с пассивирующим слоем никеля.

Из подготовленного файла векторного рисунка с помощью лазерной установки МиниМаркер 2 (Лазерный центр, Россия) на базе волоконного лазера производилась деметаллизация топологии поверхности образцов по заданным параметрам. Основные характеристики лазерной установки: длина волны лазерного излучения 1064 мкм; максимальная энергия лазера в импульсе 1 мДж; программно-аппаратное разрешение 2.5 мкм; сканирующее устройство – двухосевой сканатор (Cambridge Technology, Великобритания). Параметры режима лазерной деметаллизации были подобраны ранее [27]: мощность 2.6 Вт, скорость движения луча 1000 мм/с, частота импульсов 99 кГц, длительность

импульса 8 нс. Мощность лазерного импульса была скорректирована в связи с меньшей толщиной покрытия.

В процессе лазерной обработки возможна деформация полиимидных пленок с напыленными металлическими слоями, что приводит к выходу поверхности образца из фокуса лазера. Для предотвращения этого явления металлизированные пленки наклеивались на предметные стекла. После деметаллизации образцы отделялись пинцетом от клейкой основы силиконовой ленты путем прогрева до $\sim 200^\circ$ паяльным феном. После формирования топологии антенны к ее выводам припаивался стандартный SMA-разъем. Так как температура стеклования полиимида составляет порядка 360° [28], обе упомянутые операции не приводили к какому-либо изменению свойств полимерной подложки.

Определение зависимости электрического сопротивления от ширины металлических полосок проводилась с помощью цифрового мультиметра Fluke 27 II (США).

Оценка влияния пассивирующих слоев металла на качество лазерной обработки производилась на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) MIRA 2 LMU (Tescan, Чехия) с системой энерго-дисперсионного микроанализа (ЭДС) AztecLive Advanced Ultim Max 40 (Oxford Instruments, Великобритания).

Для изучения влияния механических деформаций на параметры антенны была разработана экспериментальная методика. Измерения проводились с использованием векторного анализатора цепей LiteVNA64 (Zeenko Tech, Китай), настроенного на измерение спектров коэффициента отражения. Антенна фиксировалась в специализированной оснастке [29], позволяющей задавать угол изгиба от 0° (плоское состояние) до 100° с ша-

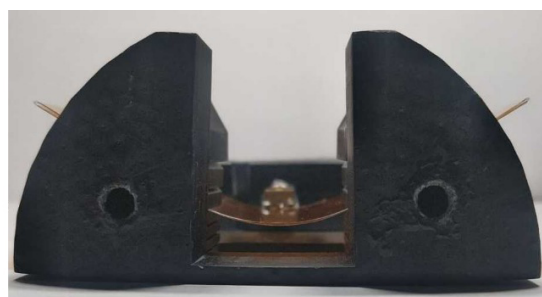
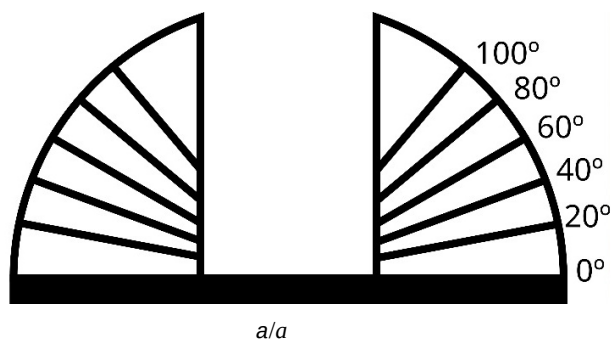


Рис. 1. Измерительная оснастка: схематическое изображение (а); вид, демонстрирующий изгиб антенны на угол 60° (б) (цвет онлайн)

Fig. 1. Measuring equipment: schematic image (a); view showing the bending of the antenna at an angle of 60 degrees (b) (color online)



гом 20° (рис. 1, а). Для измерения от 0° (плоское состояние) до -100° с шагом 20° антенна поворачивалась на 180° . Ось изгиба проходила через ось SMA разъема. Диапазоны углов изгиба были определены таким образом, что при положительных значениях углов антенна испытывала сжатие, а при отрицательных – растяжение. На рис. 1, б демонстрируется изгибание антенны на 60° .

Результаты и их обсуждение

На первом этапе шаблоном для деметаллизации выступало инвертированное изображение полосок длиной 18 мм и шириной 0.1–0.5 мм с шагом 0.1 мм. С помощью этих полосок оценивалось влияние пассивирующего слоя на электрическую проводимость многослойного покрытия на постоянном токе (рис. 2).

объяснить пассивацией слоя Cu, предотвращающей окисление меди. Слой Ni в процессе лазерной обработки, по-видимому, образует сплав с Cu, так как система Cu–Ni характеризуется непрерывным рядом твердых растворов [30]. Можно предположить, что формирование сплава приводит к росту электрического сопротивления.

Для выявления влияния пассивирующего слоя на долговременную стабильность характеристик напыленных слоев электрическое сопротивление полосок было повторно измерено спустя 5 месяцев хранения образцов в атмосферных условиях. Результаты измерений показали, что за это время сопротивление полосок без пассивирующего слоя увеличилось в среднем на 15%, что говорит об окислении незащищенной меди. Сопротивление полосок с пассивирующим слоем титана увеличилось в среднем на 12%, из чего можно сделать

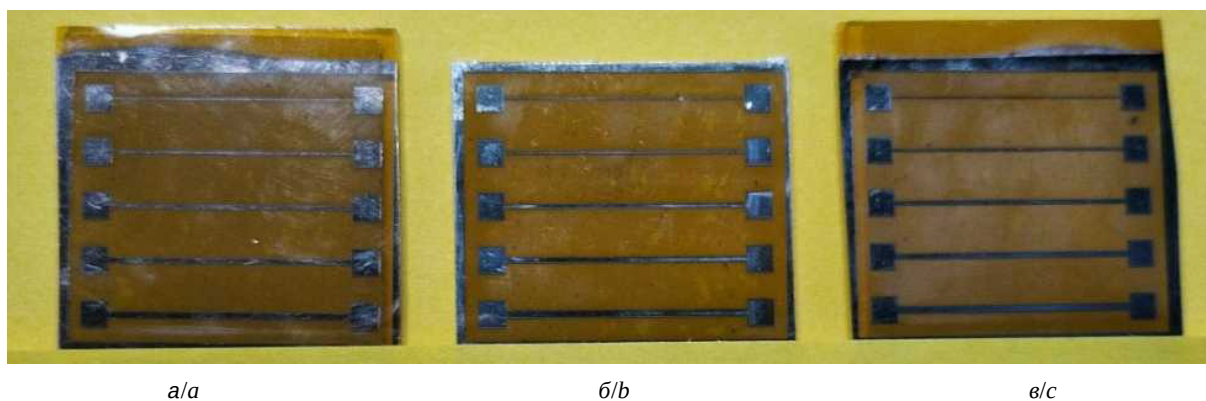


Рис. 2. Изготовленные полоски металла: без пассивирующего слоя (а); со слоем Ni (б); со слоем Ti (в) (цвет онлайн)

Fig. 2. Measuring equipment: without passivating layer (a); with the Ni layer (b); with the Ti layer (c) (color online)

Электрическое сопротивление полосок с покрытием Ti – наименьшее (рис. 3), что можно

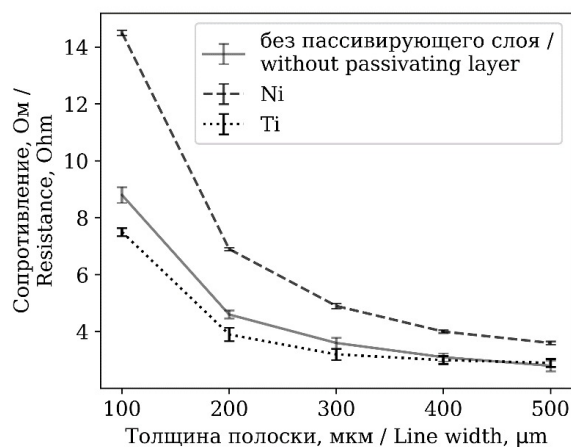


Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления от толщины полосок металла

Fig. 3. Dependence of the electrical resistance on the thickness of metal strips

вывод о незначительном положительном влиянии слоя титана на стабильность проводимости наносимых покрытий. Однако сопротивление полосок с пассивирующим слоем никеля изменилось всего на 0.4%. Следовательно, никелевый слой обеспечивает наилучшую стабильность проводимости металлических слоев на гибкой подложке в течение длительного времени.

Шаблон для деметаллизации, представляющий собой гибкую петлевою рамочную антенну, представлен на рис. 4, а. Геометрия антенны оптимизирована для резонанса в диапазоне 3.75 ГГц, при этом длина стороны квадрата a составляет 20 мм, что соответствует четверти длины волны на рабочей частоте. Было изготовлено два варианта антенны с шириной линии проводника d , равной 1 и 3 мм. На рис. 4, б представлена готовая гибкая антенна с шириной линии 3 мм.

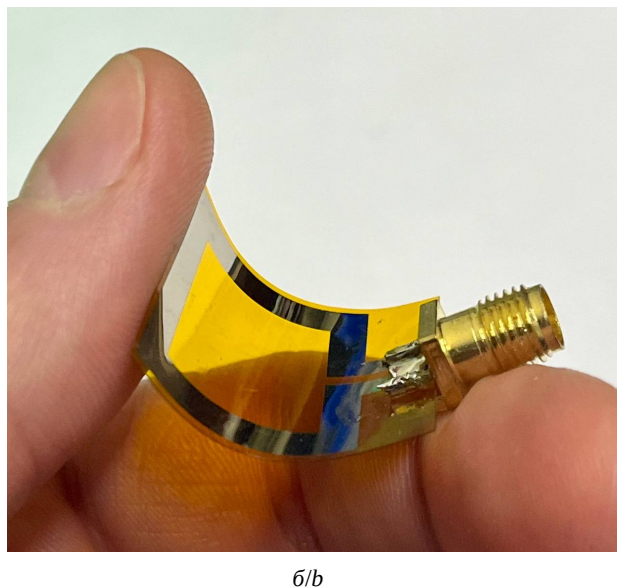
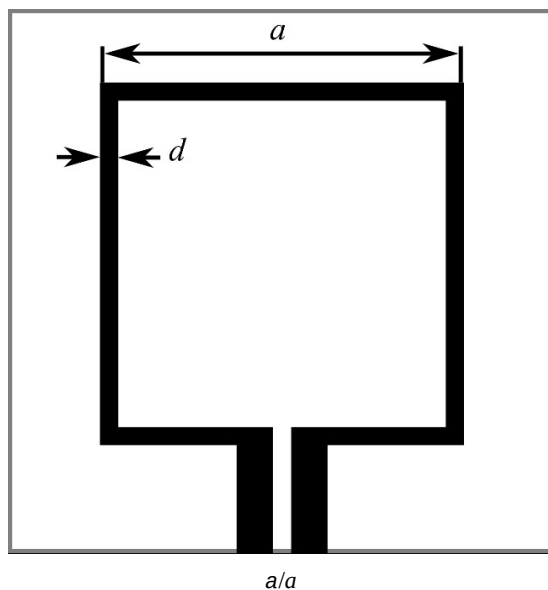


Рис. 4. Шаблон для деметаллизации (изображение гибкой петлевой рамочной антенны) (а). Готовая гибкая антенна с припаянным SMA разъемом (б) (цвет онлайн)

Fig. 4. A template for demetallization (image of a flexible loop antenna) (a). A flexible antenna with a soldered SMA connector (b) (color online)

На рис. 5 представлены изображения угла деметаллизированной полосы для различных образцов.

На образце без пассивирующего слоя (рис. 5, а), и в особенности на образце со слоем титана (рис. 5, в) видны яркие частицы, которые, по-видимому, являются осевшими каплями расплавленного металла. На образце без пассивирующего слоя их количество умеренно, они имеют размер 5–10 мкм. Для образца со слоем титана характерно наличие большего количества мелких частиц, имеющих размеры порядка 1–5 мкм. На образце со слоем никеля частиц зна-

чительно меньше, причем сами частицы мельче, чем на образце со слоем титана.

Существенным недостатком образца без пассивирующего слоя является наличие не полностью деметаллизированных областей (рис. 6). Подобных участков на образцах с пассивирующим слоем не обнаружено. Такой результат можно объяснить высоким коэффициентом отражения меди (99%) на длине волны 1064 нм [31]. При этом коэффициенты отражения для использованных металлов для пассивирующего слоя (никеля и титана) на этой длине волны заметно ниже: для никеля – 86% [32], для титана –

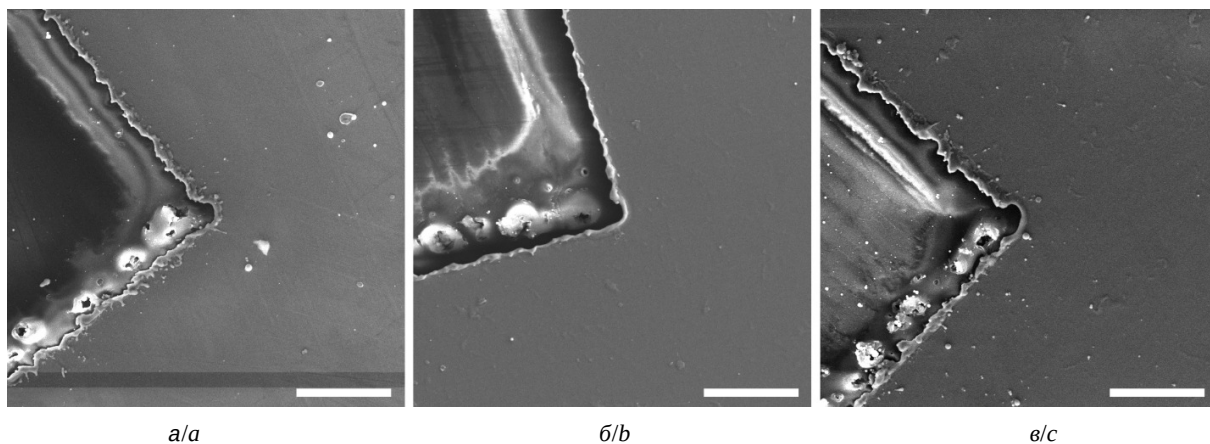


Рис. 5. СЭМ-изображения: без пассивирующего слоя (а); со слоем Ni (б); со слоем Ti (в). Масштабный отрезок – 50 мкм

Fig. 5. SEM images: without passivating layer (a); with the Ni layer (b); with the Ti layer (c). Scalebar is 50 μm



49% [33]. В результате в слое пассивирующего металла поглощается больше энергии лазерного излучения, чем в слое чистой меди, что приводит к более качественной деметаллизации.

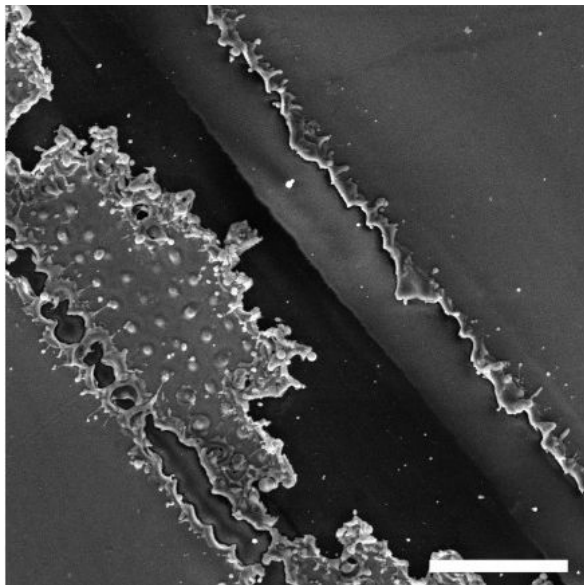


Рис. 6. СЭМ-изображение участка образца без пассивирующего слоя с неполной деметаллизацией. Масштабный отрезок – 50 мкм

Fig. 6. SEM image of a sample section without passivating layer with incomplete demetallization. Scalebar is 50 μm

Качество деметаллизации количественно оценивалось с помощью ЭДС анализа. Для этого определялся состав деметаллизированных участков. Для каждого образца определялось остаточное содержание меди на деметаллизированном участке. Результаты представлены в таблице.

**Остаточное содержание атомов меди
после деметаллизации, %**

Residual copper atoms content after demetallization, %

Без пассивирующего слоя / Without passivating layer	Слой Ni / Ni layer	Слой Ti / Ti layer
1.14	0.08	1.31

Повышенное содержание меди для образца без пассивирующего слоя и со слоем титана можно объяснить наличием в деметаллизированной области конденсированных частиц аблированного металлического покрытия, которые были визуальны обнаружены на СЭМ изображениях. Таким образом, пассивирующий слой никеля способствует наиболее полному удалению меди из деметаллизированных областей. Основываясь на этом результате, а также на результатах экспериментов по определению долговременной стабильности проводимости металлических покрытий, формирование гибких антенн и их измерения в СВЧ диапазоне осуществлялись только на образцах с никелевым пассивирующим слоем.

На рис. 7, 8 представлены спектры коэффициента отражения антенн с $d = 1$ мм и $d = 3$ мм, соответственно, при различных углах изгиба. Экспериментальные данные демонстрируют выраженную зависимость резонансных характеристик антенны от механического изгиба.

На рис. 9 представлены графики резонансной частоты и коэффициента отражения в зависимости от угла изгиба для обеих антенн.

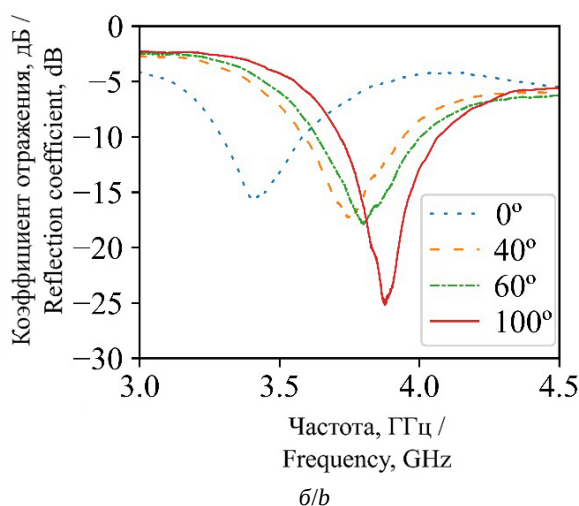
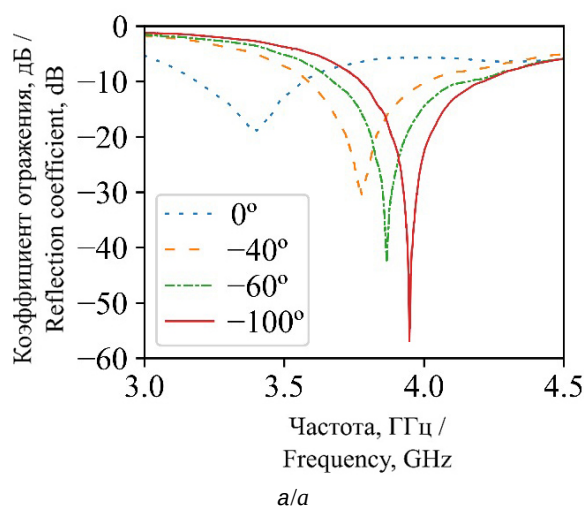


Рис. 7. Спектр коэффициента отражения антенны при $d = 1$ мм при углах изгиба: от 0° до -100° (а); от 0° до 100° (б) (цвет онлайн)

Fig. 7. Antenna reflection coefficient spectrum at $d = 1$ mm at bending angles: from 0° to -100° (a); from 0° to 100° (color online)

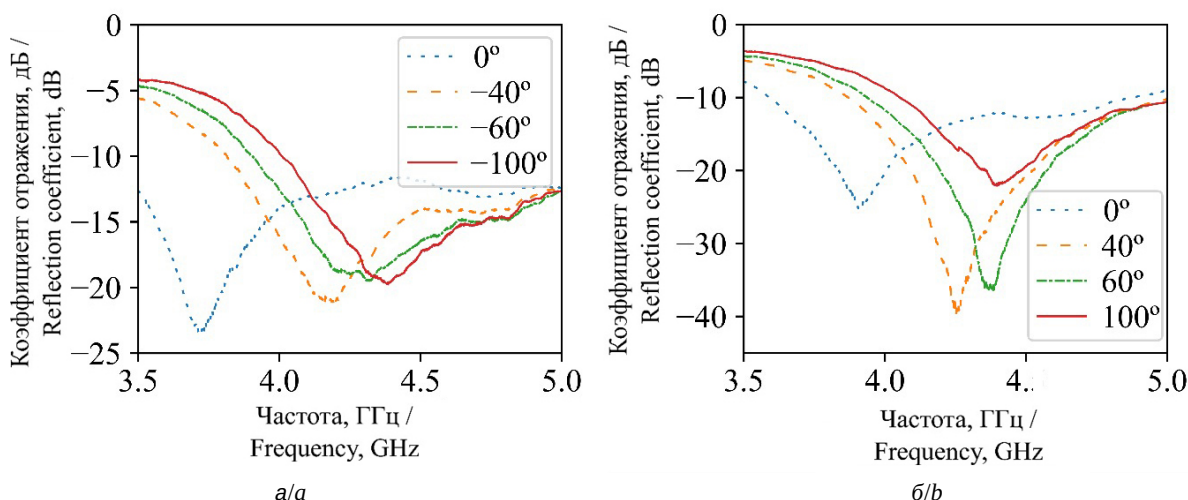


Рис. 8. Спектр коэффициента отражения антенны при $d = 3$ мм при углах изгиба: от 0° до -100° (а); от 0° до 100° (б) (цвет онлайн)

Fig. 8. Antenna reflection coefficient spectrum at $d = 3$ mm at bending angles: from 0° to -100° (a); from 0° to 100° (b) (color online)

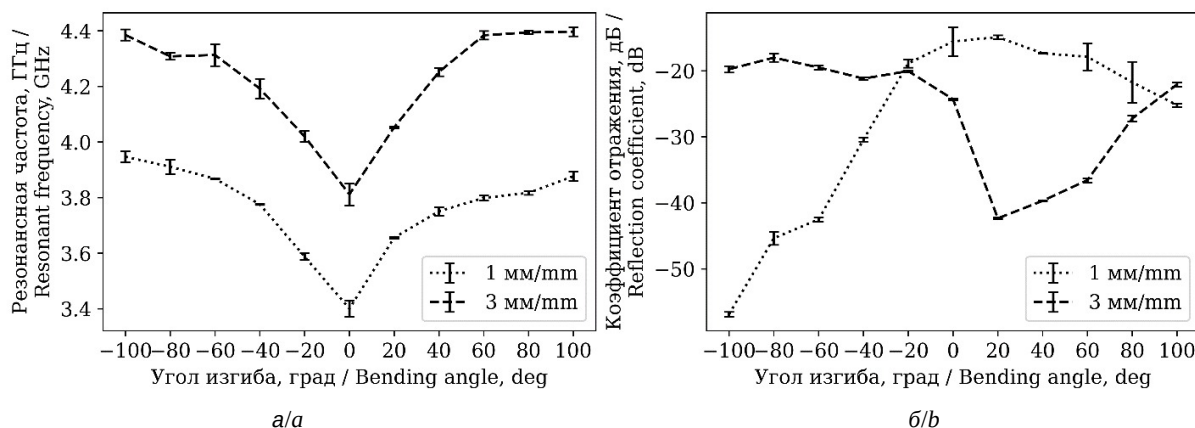


Рис. 9. Зависимости резонансной частоты (а) и коэффициента отражения (б) от угла изгиба антенн с различной шириной линии d

Fig. 9. Dependences of the resonant frequency (a) and the reflection coefficient (b) on the bending angle of antennas with different line widths d

Для антенны с шириной линии $d = 1$ мм резонансная частота варьируется в диапазоне 3.4–3.95 ГГц, достигая минимального значения 3.4 ГГц при 0° . При изгибе в отрицательную и положительную стороны наблюдается симметричное смещение частоты в сторону увеличения. В отличие от этого, антенна с шириной линии $d = 3$ мм демонстрирует несколько асимметричное поведение: при изгибе в положительную сторону частота резонанса быстро возрастает до 4.4 ГГц и остается практически неизменной, тогда как в отрицательную сторону рост более плавный (рис. 9, а), а явного насыщения не наблюдается. Стоит отметить, что частота резонанса на антенне с $d = 3$ мм также мини-

мальна при отсутствии изгиба, а ее значение составляет 3.8 ГГц, что близко к расчетной частоте 3.75 ГГц (отклонение 1.33%). В то же время антенна с $d = 1$ мм при нулевом угле изгиба демонстрирует заметное отклонение от расчетной частоты (14.67%).

Физической причиной такого поведения является изменение эквивалентной индуктивности L и емкости C антенны. Узкая линия ($d = 1$ мм) обладает большей индуктивностью из-за меньшей эффективной площади поперечного сечения проводника, что смещает резонанс в низкочастотную область. Вероятно, этот эффект усиливается в результате малой толщины проводящего слоя. Увеличение ширины d до 3 мм снижает L



и повышает резонансную частоту, приближая результаты эксперимента к расчетным.

Коэффициент отражения для антенны с линией $d = 1$ мм достигает оптимального значения -56.85 дБ при изгибе на угол -100° градусов что свидетельствует о почти идеальном согласовании с фидером. Однако в плоском состоянии (угол изгиба 0°) наблюдается значительное ухудшение коэффициента отражения -17.22 дБ, связанное с рассогласованием импеданса в результате малой толщины линии, что согласуется с рассуждениями выше (рис. 9, б). Для антенны с линией $d = 3$ мм наилучшее согласование (коэффициент отражения -42.34 дБ) достигается при изгибе на угол 20° , тогда как при угле изгиба -100° параметр ухудшается до -19.76 дБ.

Наблюдаемые изменения коэффициента отражения в гибкой петлевой рамочной антенне объясняются компенсацией исходной реактивной составляющей импеданса антенны противоположными по характеру паразитными реактивными элементами (L или C), возникающими при изгибе, и изменением площади антенны, приводящим к сдвигу резонансной частоты. Для узкой линии ($d = 1$ мм) сильный изгиб (-100°) резко уменьшает площадь, снижая индуктивность и увеличивая емкость, что смещает резонансную частоту до рабочего значения, обеспечивая улучшение согласования. Для широкой линии ($d = 3$ мм) малый изгиб ($+20^\circ$) вносит небольшую емкость, компенсирующую исходную индуктивную реактивность, достигая оптимального согласования. Дальнейшее увеличение изгиба уменьшает площадь, снижая индуктивность и увеличивая емкость, что приводит к плавному ухудшению согласования с ростом угла изгиба.

Заключение

Установлено, что дополнительный пассивирующий слой на поверхности медного тонкопленочного покрытия гибких подложек из полиимида улучшает качество деме­тализации. Без него наблюдаются участки с дефектами в виде неудаленной медной пленки, закорачивающей отдельные элементы антенны. На образцах с дополнительным пассивирующим слоем деме­тализация проходит точно по шаблону без дефектов. При этом никель обеспечивает более полное удаление меди, чем титан, что послужило основной причиной выбора никеля в качестве металла пассивирующего слоя при изготовлении гибких антенн.

Результаты экспериментов с готовыми антеннами показали высокую чувствительность частоты резонанса к изгибу в области малых углов (от -60° до $+60^\circ$). Это позволяет рассчитывать на применимость таких антенн в качестве датчиков микроперемещений. В то же время, изгиб необходимо учитывать при использовании петлевых антенн в качестве измерителей ди­электрической проницаемости биологических объектов, так как он существенно влияет на результаты измерений. При углах изгиба более 80° в обоих направлениях частота резонанса антенн слабо зависит от изгиба. При этом разработанные прототипы антенн имеют коэффициент отражения не выше -17 дБ в диапазоне углов изгиба от -100° до $+100^\circ$, что позволяет использовать их в качестве основы электроимпедансных сенсоров.

Список литературы / References

1. Zhan Y., Mei Y., Zheng L. Materials capability and device performance in flexible electronics for the Internet of Things. *J. Mater. Chem. C*, 2014, vol. 2, iss. 7, pp. 1220–1232. <https://doi.org/10.1039/C3TC31765J>
2. Kirtania S. G., Elger A. W., Hasan M. R., Wisniewska A., Sekhar K., Karacolak T., Sekhar P. K. Flexible antennas: A review. *Micromachines*, 2020, vol. 11, iss. 9, art. 847. <https://doi.org/10.3390/mi11090847>
3. Sethi P., Sarangi S. R. Internet of things: Architectures, protocols and applications. *J. Electr. Comput. Eng.*, 2017, vol. 2017, art. 9324035. <https://doi.org/10.1155/2017/9324035>
4. Gao W., Zhu Y., Wang Y., Yuan G., Liu J. M. A review of flexible perovskite oxide ferroelectric films and their application. *J. Materiomics*, 2020, vol. 6, iss. 1, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2019.11.001>
5. Huang S., Liu Y., Zhao Y., Ren Z., Guo C. F. Flexible electronics: Stretchable electrodes and their future. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, vol. 29, iss. 6, art. 1805924. <https://doi.org/10.1002/adfm.201805924>
6. Park J., Park S., Yang W., Kam D. G. Folded aperture coupled patch antenna fabricated on FPC with vertically polarised end-fire radiation for fifth-generation millimetre-wave massive MIMO systems. *IET Microwaves, Antennas Propag.*, 2019, vol. 13, iss. 10, pp. 1660–1663. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2018.5952>
7. Thielens A., Deckman I., Aminzadeh R., Arias A. C., Rabaey J. M. Fabrication and characterization of flexible spray-coated antennas. *IEEE Access.*, 2018, vol. 6, pp. 62050–62061. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2876286>
8. Khaleel H. R., Al-Rizzo H. M., Rucker D. G., Mohan S. A Compact Polyimide-Based UWB Antenna for Flexible Electronics. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2012, vol. 11, pp. 564–567. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2199956>
9. Mo L., Guo Z., Wang Z., Yang L., Fang Y., Xin Z., Li X., Chen Y., Cao M., Zhang Q., Li L. Nano-silver ink of



- high conductivity and low sintering temperature for paper electronics. *Nanoscale Res. Lett.*, 2019, vol. 14, art. 197. <https://doi.org/10.1186/s11671-019-3011-1>
10. Sharma P. K., Chung J.-Y. Poly-flex-antennas: Application of polymer substrates in flexible antennas. *Express Polym. Lett.*, 2024, vol. 18, iss. 4, pp. 371–390. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2024.28>
11. Lee J. S., Kim M., Oh J., Kim J., Cho S., Jun J., Jang J. Platinum-decorated carbon nanoparticle/polyaniline hybrid paste for flexible wideband dipole tag-antenna application. *J. Mater. Chem. A*, 2015, vol. 3, iss. 13, pp. 7029–7035. <https://doi.org/10.1039/C4TA07064J>
12. Ali Khan M. U., Raad R., Tubbal F., Theoharis P. I., Liu S., Foroughi J. Bending analysis of polymer-based flexible antennas for wearable, general IoT applications: A Review. *Polymers*, 2021, vol. 13, iss. 3, art. 357. <https://doi.org/10.3390/polym13030357>
13. Guerchouche K., Herth E., Calvet L. E., Roland N., Loyez C. Conductive polymer based antenna for wireless green sensors applications. *Microelectron. Eng.*, 2017, vol. 182, pp. 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.08.007>
14. Zhou Y., Bayram Y., Du F., Dai L., Volakis J. L. Polymer-Carbon Nanotube Sheets for Conformal Load Bearing Antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2010, vol. 58, iss. 7, pp. 2169–2175. <https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2048852>
15. Zhang J., Song R., Zhao X., Fang R., Zhang B., Qian W., Zhang J., Liu C., He D. Flexible graphene-assembled film-based antenna for wireless wearable sensor with miniaturized size and high sensitivity. *ACS Omega*, 2020, vol. 5, iss. 22, pp. 12937–12943. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00263>
16. RF Patent No. RU 2778215 C1. IPC H01L 21/56, H01L 51/50, B82Y 30/00. Technologies for producing flexible and transparent electronic components based on graphene-like structures in polymer for electronics and microelectronics. Declared November 8, 2021, published August 15, 2022. Shiversky A. V., Abaimov S. G., Akhatov I. Sh. Patent Holder: Skolkovo Institute of Science and Technology. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2778215C1/ru> (accessed September 21, 2025) (in Russian).
17. Gharode D., Nella A., Rajagopal M. State-of-art design aspects of wearable, mobile, and flexible antennas for modern communication wireless systems. *Int. J. Commun. Syst.*, 2021, vol. 34, iss. 15, art. e4934. <https://doi.org/10.1002/dac.4934>
18. Locher I., Klemm M., Kirstein T., Troster G. Design and characterization of purely textile patch antennas. *IEEE Trans. Adv. Packag.*, 2006, vol. 29, iss. 4, pp. 777–788. <https://doi.org/10.1109/TADVP.2006.884780>
19. AbuTarboush H., Farooqui M., Shamim A. Inkjet-printed wideband antenna on resin-coated paper substrate for curved wireless devices. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2015, vol. 15, pp. 20–23. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2425797>
20. Arsenov P. V., Sobolev A. S., Efimov A. A., Ivanov V. V. Double slot aerosol jet printed antenna for X-band applications. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2086, art. 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2086/1/012047>
21. Roshni S. B., Jayakrishnan M. P., Mohanan P., Surendran K. P. Design and fabrication of an E-shaped wearable textile antenna on PVB-coated hydrophobic polyester fabric. *Smart Mater. Struct.*, 2017, vol. 26, iss. 10, art. 105011. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa7c40>
22. El Gharbi M., Fernández-García R., Ahyoud S., Gil I. A Review of flexible wearable antenna sensors: Design, fabrication methods and applications. *Materials*, 2020, vol. 13, iss. 17, art. 3781. <https://doi.org/10.3390/ma13173781>
23. Agasieva S. V., Sedankin M. K., Leushin V. Y., Gudkov A. G., Zhuravleva K. V., Porokhov I. O., Gudkov G. A., Vesnin S. G. Conformal medical antenna based on a flexible substrate. *Biomedical Engineering*, 2022, vol. 6, iss. 6 (336), pp. 1–4 (in Russian). EDN: CWNGEN
24. Artemova T. K., Artemov K. S. An analysis of deformed flexible wearable patch antenna parameters. Rodionov A., ed. *2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, Novosibirsk, September 18–22, 2017. IEEE, 2017, pp. 382–385. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON.2017.8109911>
25. Starodubov A. V., Galushka V. V., Serdobintsev A. A., Pavlov A. M., Korshunova G. A., Ryabukho P. V., Gorodkov S. Y. A novel approach for fabrication of flexible antennas for biomedical applications. *2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Istanbul, Turkey, 1 October – 02 November 2018*. IEEE, 2018, pp. 303–306. <https://doi.org/10.1109/MMS.2018.8612092>
26. Starodubov A. V., Serdobintsev A. A., Galushka V. V., Ryabukho P. V., Kozhevnikov I. O., Pavlov A. M. Study of flexible monopole antenna with coplanar feeding structure fabricated by magnetron sputtering and laser ablation technologies. *Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC)*, 2019, St. Petersburg Russia, 16–18 October 2019. IEEE, 2019, pp. 138–140. <https://doi.org/10.1109/ADMInC47948.2019.8969323>
27. Ozhogin I. S., Serdobintsev A. A., Kozhevnikov I. O., Chistyakov I. A., Galushka V. V., Pavlov A. M., Starodubov A. V. On the optimal operational mode of a CNC-controlled laser machine for ablation of thin metal layers on flexible dielectric substrates. *Proc. SPIE*, 2020, vol. 11846, art. 1184607. <https://doi.org/10.1117/12.2591939>
28. Liu L., Li L., Zhang S., Xu W., Wang Q. Polyimide-based dielectric materials for high-temperature capacitive energy storage. *Electron. Mater.*, 2024, vol. 5, pp. 303–320. <https://doi.org/10.3390/electronmat5040019>
29. Serdobintsev A. A., Venig S. B., Kozlowsky A. V., Volkovoyanova L. D. Influence of bending on the structural properties of crystallized silicon films on flexible substrates. *Izv. Saratov Univ. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 3, pp. 290–296. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-3-290-296> (in Russian).



30. Chikova O. A., Tkachuk G. A., V'yukhin V. V. Viscosity of Cu–Ni melts. *Russ. J. Phys. Chem.*, 2019, vol. 93, pp. 198–203. <https://doi.org/10.1134/S0036024419020067>
31. McPeak K. M., Jayanti S. V., Kress S. J. P., Meyer S., Iotti S., Rossinelli A., Norris D. J. Plasmonic films can easily be better: Rules and recipes. *ACS Photonics*, 2015, vol. 2, iss. 3, pp. 326–333. <https://doi.org/10.1021/ph5004237>
32. Werner W. S. M., Glantschnig K., Ambrosch-Draxl C. Optical constants and inelastic electron-scattering data for 17 elemental metals. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2009, vol. 38, iss. 4, pp. 1013–1092. <https://doi.org/10.1063/1.3243762>
33. Palm K. J., Murray J. B., Narayan T. C., Munday J. N. Dynamic optical properties of metal hydrides. *ACS Photonics*, 2018, vol. 5, iss. 11, pp. 4677–4686. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b01243>

Поступила в редакцию 06.05.2025; одобрена после рецензирования 27.06.2025;
принята к публикации 10.07.2025; опубликована 28.11.2025

The article was submitted 06.05.2025; approved after reviewing 27.06.2025;
accepted for publication 10.07.2025; published 28.11.2025