

02,08

Экспериментальное исследование влияния серебра на характеристики бикристаллического перехода ВТСП детектора

© В.Ю. Сафонова^{1,2}, А.Е. Парафин², Д.В. Мастеров², С.А. Павлов², Л.С. Ревин^{1,2}

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия

² Институт физики микроструктур РАН,
Нижний Новгород, Россия

E-mail: rls@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 6 марта 2025 г.

В окончательной редакции 6 марта 2025 г.

Принята к публикации 5 мая 2025 г.

Исследование направлено на изучение влияния пленки серебра на характеристики бикристаллического перехода в высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) детекторах на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO). В работе проанализированы пять чипов, изготовленных в разных технологических циклах. На каждом чипе расположены три типа структур джозефсоновских детекторов с лог-периодическими антеннами разной конфигурации. Основное внимание уделено сравнению критического тока, нормального сопротивления и характерного напряжения при температурах 4 и 77 К. Результаты показали, что структуры с одинаковыми геометрическими размерами джозефсоновского перехода демонстрируют значительные различия в параметрах. Установлено, что основной причиной отклонений параметров является близость слоя серебра к бикристаллической границе, что приводит к загрязнению барьера и изменению свойств перехода.

Ключевые слова: YBaCuO, джозефсоновский переход, лог-периодическая антенна, серебро.

DOI: 10.61011/FTT.2025.06.60959.13NN-25

1. Введение

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) представляют значительный интерес для разработки современных детекторов [1,2] и смесителей [3,4], используемых в различных областях, включая радиоастрономию, квантовую электронику и системы связи. В отличие от низкотемпературных детекторов, имеющих рекордную чувствительность [5,6], интерес к ВТСП связан, в первую очередь, с увеличением энергетической щели в спектре возбуждения сверхпроводников, а также с возможностью оптимизации рабочих параметров в более широком интервале температур. Это позволяет детектировать внешние сигналы частотой в единицы ТГц при температуре 50 К [2].

Одним из ключевых элементов таких устройств являются джозефсоновские переходы, благодаря которым достигается высокая чувствительность и широкополосное детектирование сигналов. Нелинейная вольт-амперная характеристика (ВАХ) такого перехода, точно также как и полупроводникового $p-n$ -перехода, может быть использована как с целью выпрямления переменных сигналов, так и смещения. Кроме того, в связи с наличием специфической джозефсоновской генерации, в такой системе будут наблюдаться и другие типы взаимодействия с внешним переменным сигналом, на чем основан целый ряд приемных устройств. Для связи чувствительного элемента детектора с внешним окружением и эффективным приемом высокочастотного излучения, джозефсоновский переход обычно интегрируется

в планарную антенну и устанавливается на кремниевую линзу. В зависимости от применения детектора может использоваться как узкополосная [3], так и широкополосная антенна [4]. Для улучшения приема антенны на высоких частотах, ее покрывают серебром, золотом или платиной.

Однако параметры ВТСП переходов могут существенно различаться в технологии изготовления и используемых материалов [7,8]. Практическое использование таких структур осложняется значительными вариациями их параметров при изготовлении: от чипа к чипу характеристики могут существенно различаться, что удручает их воспроизводимость.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния пленки серебра на характеристики бикристаллического перехода ВТСП детектора. Серебро часто используется для создания омических контактов и антенн, но его диффузия в пленку YBCO может приводить к изменению локального химического состава и структуры материала, что негативно сказывается на сверхпроводящих свойствах. Это особенно важно для областей слабых связей, где даже незначительные изменения могут привести к изменению характеристик перехода.

Исследования проводились на пяти чипах, изготовленных в разных технологических циклах, что позволило получить статистически значимые результаты и сделать обоснованные выводы о влиянии различных факторов на свойства джозефсоновских переходов. Особое внимание уделялось изучению зависимости критического тока и

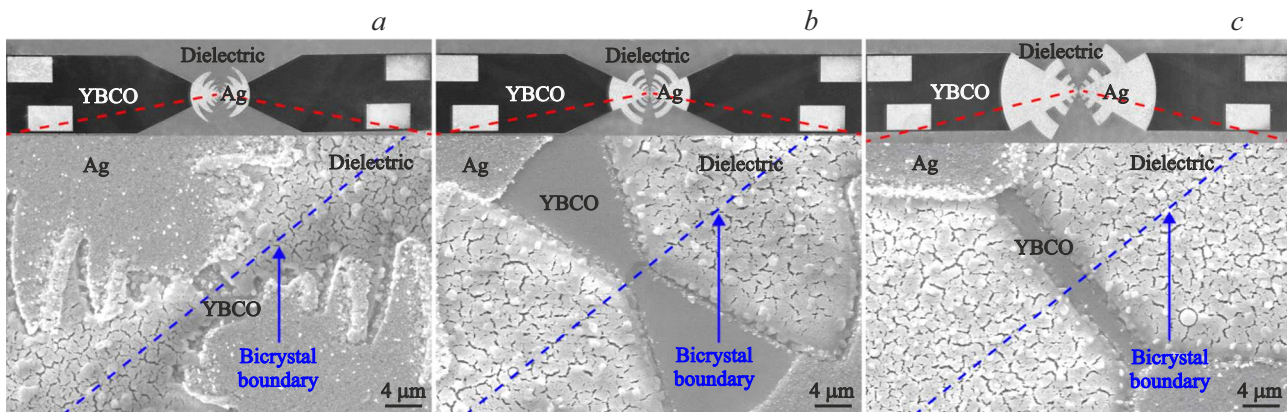


Рис. 1. Фотографии трех типов структур джозефсоновских детекторов. Сверху — полное изображение детектора с антенной и контактными площадками. Снизу — изображение джозефсоновских переходов вблизи границы, полученное на сканирующем электронном микроскопе.

нормального сопротивления от типа структуры и особенностей ее изготовления.

Целью работы является определение ключевых факторов, вызывающих изменения в свойствах бикристаллического перехода, и разработка рекомендаций по оптимизации конструкции ВТСП детекторов для повышения воспроизводимости их параметров.

2. Особенности изготовления структур и методика измерений

Чипы с несколькими структурами бикристаллических джозефсоновских переходов были изготовлены путем магнетронного напыления пленки YBCO на бикристаллическую подложку $Zr_{1-x}Y_xO_2$ с углом разориентации 24° в плоскости [001] с использованием метода задающей маски [9]. Для широкополосной связи с внешним излучением каждый переход интегрирован с логопериодической планарной антенной [10].

Структуры формировались на подложке из фианита, на которую методом лазерного напыления наносился буферный эпитаксиальный слой CeO_2 для согласования кристаллических решеток и снижения химического взаимодействия между пленкой YBCO и подложкой. Топология рисунка создавалась с помощью задающей маски: сначала создавалась фоторезистивная маска, затем методом лазерного распыления осаждался аморфный CeO_2 без нагрева подложки, после чего фоторезист и лежащий на нем аморфный CeO_2 удалялся (lift-off), оставляя окна для роста пленки YBCO. Пленка YBCO напылялась при температуре $800\text{--}850^\circ\text{C}$ и давлении смеси $Ag(50\%)/O_2$ 75 Па [9]. Металлизация антенн детекторов и омические контакты изготавливались взрывной фотолитографией с использованием оптического фоторезиста и термического испарения серебра. Затем структура подвергалась отжигу при 500°C в кислородной среде. Джозефсоновский переход формировался на границе монокристаллов подложки, где сверхпроводящая пленка имеет пониженные

значения критической плотности тока J_C и критической температуры T_C .

Применение метода задающей маски позволило избежать деградации свойств пленки YBCO, минимизируя воздействие травления или ионной имплантации, что особенно важно для областей слабых связей. Таким образом, были созданы высокоточные сверхпроводящие элементы с размерами в единицы микрон, интегрированные в логопериодические антенны для широкополосного детектирования сигналов.

На рис. 1 представлены фотографии трех различных типов джозефсоновских приемников, представляющих собой лог-периодические антенны различной геометрии с интегрированными в них джозефсоновскими переходами. Три структуры изготовлены на одном чипе (на одной подложке) в едином технологическом процессе.

Различия в геометрии антенн были обусловлены областью применения джозефсоновских приемников: частотный диапазон (амплитудно-частотная характеристика антенны, [10]); использование в качестве прямого детектора [11] или смесителя [12,13], ограничения на размер антенной системы и др. При этом размеры джозефсоновского перехода (сверхпроводящего мостика, пересекающего бикристаллическую границу) были одинаковы для всех типов структур с точностью до технологического разрешения ($\sim 3\mu\text{m}$). Поэтому ожидалось, что транспортные характеристики джозефсоновских переходов будут одинаковыми.

Структура на рис. 1, а имела синусоидальную лог-периодическую антенну с плавными линиями лепестков самых малых размеров по сравнению с другими антеннами. У этой структуры слой серебра (Ag) находился довольно близко к бикристаллической границе, показанной на рис. 1 синими пунктирными линиями. На фотографии видны некоторые локальные повреждения пленки серебра на границе с диэлектриком вблизи бикристаллической границы.

Структура на рис. 1, б имела антенну больших размеров, чем для структуры на рис. 1, а. При этом грани-

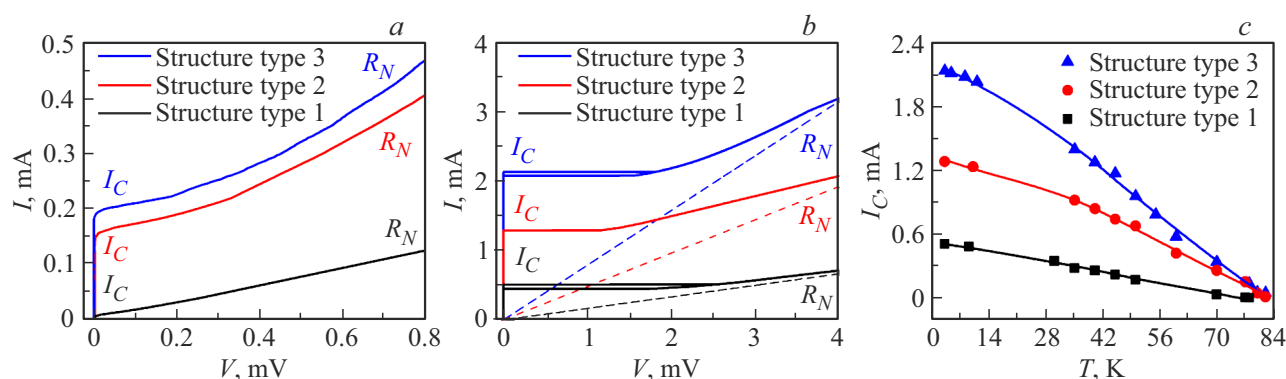


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики трех типов структур чипа №2, полученные при 77 К (а) и 4 К (б). с — Зависимость критического тока от температуры.

цы слоев на ней более четкие, видимых повреждений нет, диэлектрический слой и сверхпроводник YBCO сохраняют свою целостность, что делает эту структуру подходящей для практического использования.

Структура на рис. 1, с оснащена антенной большего размера, с более короткими, но и более широкими лепестками. Эта структура по качеству слоев похожа на структуру на рис. 1, б, но может иметь небольшие различия в ширине перехода из-за технологических ограничений.

Для удобства дальнейшего обсуждения и наглядно различия этих структур присвоим им обозначения: структура на рис. 1, а будет соответствовать типу 1, структура на рис. 1, б — типу 2, структура на рис. 1, с — типу 3.

Транспортные свойства структур измерялись в криоохладителе Гиффорда–МакМагона, позволяющем исследовать характеристики в широком диапазоне температур от 4 до ~80 К. Вольт-амперные характеристики были измерены четырехзондовым методом.

3. Анализ полученных результатов

На рис. 2 представлены результаты исследования транспортных свойств трех типов структур джозефсоновских переходов для чипа №2 (см. таблицу 1).

При температуре 77 К (рис. 2, а) критический ток I_C структуры типа 1 значительно меньше относительно двух других типов структур и составляет около 0.02 мА. Структура типа 2 имеет критический ток, близкий к 0.15 мА, а критический ток структуры типа 3 немного меньше 0.2 мА. Нормальное сопротивление R_N структур второго и третьего типов на первый взгляд обладает весьма близкими значениями, в то время как структура 1 типа демонстрирует более крутой наклон вольт-амперной характеристики, что указывает на ее большее нормальное сопротивление.

На рис. 2, б показаны ВАХ, измеренные при температуре 4 К. Для наглядности, сопротивление структур всех трех типов в нормальном состоянии показано

на рисунке пунктирными линиями. Критический ток структуры типа 1 составил 0.52 мА, структуры типа 2 — 1.30 мА, структуры типа 3 — 2.15 мА. При более низкой температуре становится более заметна разница в критическом токе между структурами 2 и 3 типов.

На рис. 2, с представлены зависимости значений критического тока структур всех типов от температуры. Зависимость аналогична экспериментальным наблюдениям для других подобных структур [14,15]. Видно, что критическая температура структуры типа 1 меньше, чем у структур 2 и 3 типа. Кроме того, при высоких температурах погрешность измерения критического тока вследствие высоких флуктуаций и наводок возрастает, и разница в значениях уменьшается, особенно это касается структур 2 и 3 типа. Для более детального анализа измерений целесообразно исследовать ВАХ при низкой температуре.

По измерениям вольт-амперных характеристик были рассчитаны плотность критического тока (J_C); нормальное сопротивление, нормированное на площадь поперечного сечения (r_N); и характерное напряжение $I_C R_N$ для четырех чипов с целью проведения более детального анализа. Данные характеристики нормированы на размер джозефсоновского перехода, что позволяет проводить сравнение структур с технологическим разбросом геометрических размеров. Экспериментально полученные данные для всех чипов при температуре 4 К представлены в таблице 1.

На основе этих данных на рис. 3 представлены графики зависимостей J_C (рис. 3, а), r_N (рис. 3, б) и $I_C R_N$ (рис. 3, с) для трех типов структур.

На рис. 3, а четко прослеживается следующая зависимость: плотность критического тока возрастает в зависимости от типа структуры — от типа 1 к типу 3. Рис. 3, б также демонстрирует зависимость, но уже обратную: удельное сопротивление уменьшается от структуры типа 1 к структуре типа 3. На рис. 3, с значения $I_C R_N$ для структур типов 2 и 3 демонстрируют близкие значения. В то же время для структуры типа 1 наблюдается заметный разброс значений от чипа к чипу.

Таблица 1. Характеристики всех исследованных структур разных типов. L — длина Джозефсоновского перехода, H — толщина сверхпроводящей пленки; I_C — критический ток; R_N — нормальное сопротивление; J_C — плотность критического тока; r_N — нормальное сопротивление, нормированное на площадь поперечного сечения; $I_C R_N$ — произведение критического тока на нормальное сопротивление

Чип	Тип структуры	L , μm	H , μm	I_C , mA	R_N , Ohm	J_C , MA/cm ²	r_N , mOhm · cm ²	$I_C R_N$, mV
№ 1	1	2.85	0.12	0.14	12.1	0.04	2.76	1.70
	2	3.00	0.12	1.15	2.20	0.32	0.53	2.53
№ 2	1	3.10	0.19	0.52	7.16	0.09	2.81	3.72
	2	3.17	0.19	1.30	1.95	0.22	0.78	2.53
	3	3.07	0.19	2.15	1.32	0.37	0.51	2.84
№ 3	2	3.10	0.20	2.05	1.20	0.33	0.50	2.46
№ 4	3	3.10	0.15	2.32	1.20	0.50	0.37	2.78

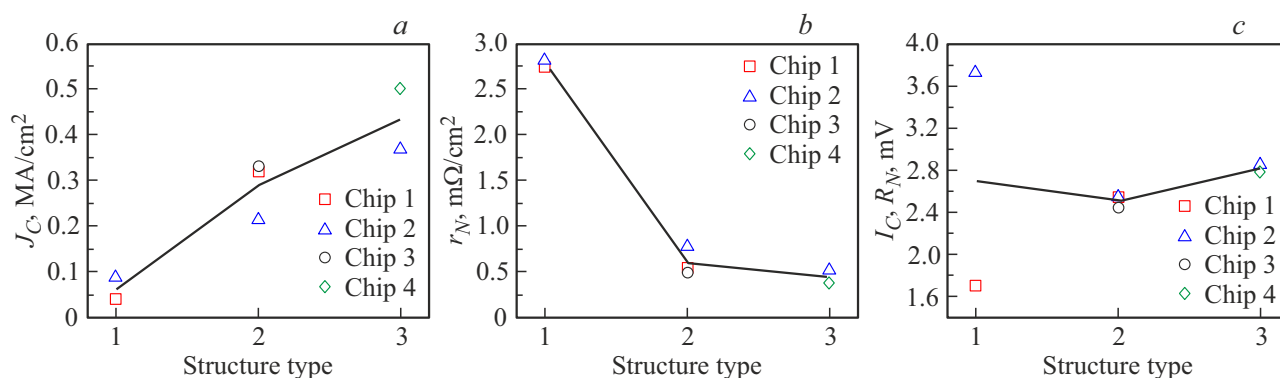


Рис. 3. Зависимости плотности критического тока (а), удельного сопротивления (б) и характерного напряжения $I_C R_N$ (с) для трех типов структур на различных чипах. Символы — экспериментальные данные. Линии — среднее значение.

Несмотря на то, что геометрические размеры джозефсоновских переходов трех типов близки, их характеристики существенно различаются, особенно для структуры типа 1. Кроме того, структура типа 1 характеризуется наибольшим разбросом параметров по сравнению с другими типами структур. Этот факт требует более детального рассмотрения и анализа, поскольку понимание причин данных различий может оказаться ключевым для оптимизации характеристик структур. В частности, необходимо выяснить, обусловлены ли наблюдаемые отклонения технологическими особенностями изготовления структуры, влиянием внешних условий или спецификой ее функционирования.

4. Влияние серебра на характеристики бикристаллического перехода

В результате анализа и рассмотрения возможных причин наблюдаемого отклонения параметров была выдвинута гипотеза, согласно которой данное поведение обусловлено влиянием покрытия из серебра, нанесен-

ного на часть пленки YBCO вблизи бикристаллической границы.

Из рис. 1, а можно заметить, что у структуры типа 1 слой серебра (Ag) расположен в непосредственной близости к бикристаллической границе, в отличие от двух других типов структур. Так, расстояние от бикристаллического перехода до серебряного слоя для структуры типа 1 составляет примерно $4\mu\text{m}$, а для структур типа 2 и 3 — $20\text{--}30\mu\text{m}$. Кроме того, для структуры типа 1 наблюдается частичное разрушение и неоднородное распределение слоя серебра, что может быть обусловлено технологическими дефектами или внешними воздействиями.

Серебро обладает высокой диффузионной способностью и при определенных условиях его атомы могут активно проникать в прилегающие слои, в частности, в пленку YBCO [16]. Это может приводить к формированию несверхпроводящих фаз, толстых границ зерен, образованию структур, препятствующих движению вихрей. Диффузия серебра может также вызывать деградацию слабой связи на границе монокристаллов, снижая ее однородность и увеличивая концентрацию дефектов.

Таблица 2. Характеристики структур трех типов без серебра

Чип	Тип структуры	$L, \mu\text{m}$	$H, \mu\text{m}$	I_C, mA	R_N, Ohm	$J_C, \text{MA/cm}^2$	$r_N, \text{mOhm} \cdot \text{cm}^2$	$I_C R_N, \text{mV}$
№ 5	1	3.00	0.08	1.02	2.86	0.42	0.46	2.90
	2	3.80	0.08	1.20	2.51	0.50	0.40	3.00
	3	3.00	0.08	1.38	2.35	0.46	0.48	3.24

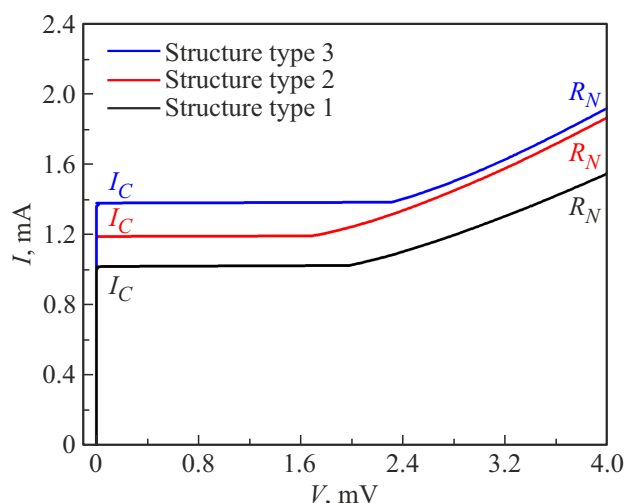


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики трех типов структур на чипе без серебра при 4 К.

На основании данного предположения был изготовлен пятый чип со структурами идентичными предыдущим, но без покрытия антенн серебром. На рис. 4 представлены ВАХ структур без слоя серебра, измеренные при температуре 4 К. Анализ таблицы 2 показывает, что транспортные характеристики для всех трех структур близки, а разброс плотности тока и нормированного сопротивления составляет в среднем 10 %. Это позволяет сделать вывод о том, что исключение серебра способствовало нормализации как значений критического тока и нормального сопротивления, так и характерного напряжения джозефсоновского перехода.

5. Заключение

Проведенные исследования показали, что конфигурация ВТСП детекторов, включая геометрию лог-периодической антенны, может оказывать значительное влияние на характеристики бикристаллического перехода. Было установлено, что образцы с одинаковыми геометрическими размерами джозефсоновского перехода могут демонстрировать существенные различия в критическом токе и нормальном сопротивлении, что связано с дизайном структуры и технологическими особенностями изготовления. Основное влияние на параметры перехода оказывает пленка серебра, нанесенная

на антенну и расположенная вблизи границы бикристалла. Серебро может вызывать загрязнение барьера и изменение характеристик перехода, что подтверждается экспериментальными данными.

Исключение слоя серебра при изготовлении новых структур позволило улучшить воспроизводимость характеристик. Значения критического тока и нормального сопротивления для различных типов структур показали в процессе измерений близкие значения, что подтвердило выдвинутую гипотезу о влиянии серебра.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что контроль за геометрией детектора и исключение влияния серебра являются ключевыми факторами для улучшения стабильности характеристик бикристаллических переходов. С другой стороны, использование серебра может быть в некоторой степени полезным, так как позволяет изменять характеристики перехода без существенного ухудшения качества (параметра $I_C R_N$) при низких температурах. Так, повышение нормального сопротивления для структуры типа 1 дает лучшее согласование с внешней электро-динамической средой, и лучшие приемные характеристики в режиме широкополосного детектирования согласно результатам работы [11].

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-79-10384-Р.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] O. Volkov, V. Pavlovskiy, I. Gundareva, R. Khabibullin, Y. Divin. IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. **11**, 330 (2021).
- [2] V.V. Pavlovskiy, I.I. Gundareva, O.Y. Volkov, Y.Y. Divin. Appl. Phys. Lett. **116**, 082601 (2020).
- [3] J. Du, A.R. Weily, X. Gao, T. Zhang, C.P. Foley, Y.J. Guo. Supercond. Sci. Technol. **30**, 024002 (2017).
- [4] D. Cunnane, J.H. Kawamura, N. Acharya, M.A. Wolak, X.X. Xi, B.S. Karasik. Appl. Phys. Rev. **109**, 112602 (2016).
- [5] I.I. Soloviev, N.V. Klenov, S.V. Bakurskiy, A.L. Pankratov, L.S. Kuzmin. Appl. Phys. Lett. **105**, 202602 (2014).

- [6] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, A.M. Baryshev, P.R. Wesselius, J. Mygind. *Supercond. Sci. Technol.* **14**, 1040 (2001).
- [7] I.I. Gundareva, O.Y. Volkov, M.V. Lyatti, Y.Y. Divin, V.N. Gubankov, V.V. Pavlovskiy. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21**, 147–150 (2011).
- [8] M.A. Tarasov, E.A. Stepantsov, M. Naito, A. Tsukada, D. Winkler, A.S. Kalabukhov, M.Yu. Kupriyanov. *J. Exp. Theor. Phys.* **105**, 636641 (2007).
- [9] D.V. Masterov, A.E. Parafin, L.S. Revin, A.V. Chiginev, E.V. Skorokhodov, P.A. Yunin, A.L. Pankratov. *SUST* **30**, 2, 025007 (2017).
- [10] E.I. Glushkov, A.V. Chiginev, L.S. Kuzmin, L.S. Revin. *Beilstein J. Nanotechnol.* **13**, 325–333 (2022).
- [11] Е.А. Матрозова, Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, Л.С. Ревин. *Журнал радиоэлектроники* **12**, 1–11 (2022).
- [12] М.А. Галин, Л.С. Ревин, А.В. Самарцев, М.Ю. Левичев, А.И. Елькина, Д.В. Мастеров, А.Е. Парафин. *ЖТФ* **94**, 7 (2024).
- [13] В.А. Анфертьев, Д.В. Мастеров, А.Е. Парафин, Л.С. Ревин. *ФТТ* **66**, 6 (2024).
- [14] E. Il'ichev, V. Zakosarenko, R.P.J. IJsselsteijn, H.E. Hoenig, H.-G. Meyer, M.V. Fistul, P. Müller. *Phys. Rev. B* **59**, 11502–11505 (1999).
- [15] J. Du, A.R. Weily, X. Gao, T. Zhang, C.P. Foley, Y.J. Guo. *SUST* **30**, 024002 (2017).
- [16] J. Joo, J.P. Singh, R.B. Poeppe, A.K. Gangopadhyay, T.O. Mason. *J. Appl. Phys.* **71**, 2351 (1992).

Редактор А.Н. Смирнов