

02,13

Подстройка параметров туннельного барьера СИС-перехода путем варьирования состава верхнего электрода

© А.М. Чекушкин, М.Е. Парамонов, В.П. Кошелёц

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия

E-mail: chekushkin@hitech.cplire.ru

Поступила в Редакцию 18 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2024 г.

Принята к публикации 8 мая 2024 г.

Рассмотрено влияние верхнего электрода нитрида ниобия в многослойной структуре Nb|Al-AlN|NbN на параметры туннельного барьера (AlN). Показано, что повышение концентрации азота в газовой смеси Ar/N₂ при формировании NbN методом магнетронного распыления приводит к уменьшению туннельной прозрачности барьера AlN.

Ключевые слова: Сверхпроводниковые устройства, туннельный переход сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник, туннельный барьер AlN, плазмохимическое травление.

DOI: 10.61011/FTT.2024.07.58370.39NH

1. Введение

Параметры туннельного барьера в переходе сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) являются критически важными при изготовлении приемных устройств терагерцового диапазона. Для большинства приемных устройств используются туннельные СИС-переходы на основе ниобия [1–4]. Считается, что определяющим фактором прозрачности барьера является способ его формирования: окисление или нитридизация. Независимо от способа, в качестве параметров формирования барьера выступают время (окисления или нитридизации) и давление рабочего газа (кислорода либо азота), а для нитридизации еще мощность магнетрона и расстояние между магнетроном и подложкой [5]. В настоящей работе показано, что еще одним важным фактором является состав и материал верхнего электрода в СИС-переходе, в частности, слой металла, непосредственно осаждаемый на поверхность барьера (тонкий прибарьерный слой). Были изготовлены образцы с разным содержанием азота в верхнем электроде СИС-перехода Nb–Al–AlN–Nb(N). Показано, что чем выше содержание азота, тем ниже прозрачность туннельного барьера при одном и том же способе формирования перехода AlN–Nb(N). Уменьшение прозрачности также подтверждается тенденцией роста основных параметров туннельного барьера (высоты потенциального барьера и его ширины), рассчитанных в соответствии с теорией Дж. Симмонса [6]. Такая зависимость связана с диффузией азота между слоями Al, AlN и Nb(N).

2. Изготовление образцов

Технология изготовления СИС-структур на основе ниобия и его соединений методом селективного трав-

ления и анодизации ниобия (нитрида ниобия) является развитой и хорошо воспроизводимой [3–5]. Важной особенностью этой технологии изготовления является тот факт, что тонкий слой алюминия выравнивает столбчатую структуру поверхности ниобия [3,4], смачивая его. Это позволяет обеспечить гладкую поверхность алюминия, на основе которой будет формироваться туннельный барьер. Этот барьер может быть оксидным (AlO_x) или нитридным (AlN). Тип барьера подбирается в зависимости от поставленных задач: барьер из AlN позволяет достичь более высоких плотностей тока (до 100 kA/cm²) [5,7,8] в сравнении с барьерами из AlO_x (до 15 kA/cm²), что, в свою очередь, дает возможность существенно расширить входную полосу приемника.

Формирование рабочей структуры СИС происходит в несколько этапов: осаждение трехслойной структуры СИС, травление верхнего электрода в этой структуре для формирования площади СИС-перехода, осаждение изоляции, формирование замыкателя и контактных площадок.

Образцы были изготовлены на кремниевых подложках, с ориентацией <100>, на которые методом магнетронного распыления осаждался слой Al₂O₃, толщиной 100 nm — он необходим, чтобы предотвращать травление подложки в последующих технологических операциях. При помощи метода оптической фотолитографии была сформирована маска из резиста, которая определяет геометрию базового электрода. Осаждение СИС-структуры Nb|Al-AlN|NbN с толщинами 200 nm|7 nm-(1–1.5 nm)|100 nm осуществлялось в едином вакуумном цикле в установке магнетронного распыления. Затем методом взрыва в диметилформамиде осуществлялось удаление фоторезиста с трехслойной структурой на нем. После этого на поверхности трехслойной структуры методом фотолитографии происходило

формирование площади СИС-перехода. Для этого по маске из фоторезиста производилось плазмохимическое травление верхнего слоя (Nb(N)) во фторсодержащих газах (CF_4), после чего производилась анодизация, а затем осаждение изоляции (SiO_2 , 250 nm), в конце этого этапа фоторезист с нанесенным на него слоем SiO_2 был удален в диметилформамиде. Замыкатель был изготовлен из слоя Nb толщиной 350 nm при помощи метода фотолитографии. Контактные площадки формировались из золота толщиной 100 nm. Более подробно технология изготовления джозефсоновских переходов на основе Nb|Al-AlN|NbN описана в статье [9].

Все изготовленные и исследованные образцы проходили одни и те же циклы формирования структур. Слои Nb и Al в структуре Nb|Al-AlN|NbN формировались одинаково для всех образцов. Туннельный барьер из AlN формировался при помощи нитридации поверхности Al в плазме чистого азота, которая инициирована на алюминиевом магнетроне. Такой способ нитридации позволяет избежать нежелательной бомбардировки поверхности слоя Al, которая неизбежна, если осуществлять инициирование плазменного разряда при помощи ВЧ-генератора, подающего мощность непосредственно на держатель с образцом.

Параметры формирования барьера, которые оставались неизменными: газ — азот, давление $7.9 \cdot 10^{-3}$ mbar, мощность, подаваемая на ВЧ магнетрон, 50 W, расстояние между образцом и магнетроном 130 mm. Изменяемым параметром было время нитридации: 90 s или 180 s. Важно отметить, что процесс формирования нитрида алюминия на поверхности алюминия не связан с осаждением материала из-за распыления мишени, а связан только с взаимодействием ионов азота с поверхностью алюминия на образце. Верхним электродом СИС-перехода был нитрид ниобия или ниобий. Следующие параметры при формировании этого слоя были постоянными: мощность, подаваемая на магнетрон на постоянном токе, 650 W, расстояние между образцом и мишенью 50 mm, поток аргона 70 sccm. Изменяемым параметром был поток азота: 6, 7, 8, 10 sccm. При отсутствии потока азота формировался чистый ниобий. Давление смеси газов Ag и N_2 в камере в момент осаждения NbN — $9.3\text{--}9.5 \cdot 10^{-3}$ mbar. Верхний ниобий в СИС-структуре формировался таким же образом, как и нижний.

3. Определение основных параметров туннельного барьера

Как отмечалось выше, в процессе формирования барьерного слоя СИС-перехода, тонкая пленка Al подвергается окислению/нитридации с образованием слоя изолятора. Пленка алюминия должна иметь толщину 5 nm и более, чтобы полностью покрыть неровности в слое Nb [4]. Характерные толщины барьеров AlO_x или AlN, сформированных на пленке алюминия, составляют

порядка 1 nm. Описанный ниже метод позволяет оценить параметры туннельного барьера.

Параметрами, характеризующими прозрачность изготовленного туннельного барьера, являются его толщина d и средняя высота φ . Существует универсальная методика определения параметров d и φ из вольт-амперной характеристики (ВАХ) СИС-перехода, измеренной до высоких напряжений ~ 1 В. Методика основана на измерении и аппроксимации зависимости плотности туннельного тока от напряжения, которая была предложена Дж. Симмонсом [6] и обобщена В. Бринкманом [10] для туннельных переходов в пределе напряжений, соответствующих энергиям, не превосходящим высоту барьера φ . Расчетные формулы и методика подробно изложены в работе [11]. Для переходов, исследованных в этой работе, были рассчитаны параметры d и φ , позволяющие дать количественную оценку прозрачности полученного барьера.

4. Измерения

До изготовления каждого образца были проведены напыления контрольных пленок NbN в тех же условиях, которые использовались при изготовлении СИС-переходов, что позволило определить основные параметры пленок (табл. 1, рис. 1).

Для этого была изготовлена маска, по которой методом фотолитографии были сформированы узкие полоски металла (NbN) длиной 1 cm и шириной 200 μm , с контактными площадками. Температурные измерения пленок нитрида ниобия производилось в сосуде Дьюара с жидким гелием по 4-контактной схеме. Погружной зонд с образцом медленно опускался в сосуд Дьюара, сопротивление пленки и сопротивление термометра измерялись с периодом 0.5 s.

Из табл. 1 видно, что параметром, сильно зависящим от количества азота в газовой смеси, является удельное сопротивление, которое растет пропорционально содержанию азота в смеси. Еще одним важным параметром является размытие по температуре в области перехода пленки в сверхпроводящее состояние (ΔT_c). Из рис. 1 и табл. 1 видно, что, например, пленка с большей температурой перехода в сверхпроводящее состояние $T_c = 14.7$ K имеет больший наклон кривой $R(T)$ в районе перехода в сверхпроводящее состояние ($\Delta T_c = 0.2$ K), чем пленка с $T_c = 14.2$ K ($\Delta T_c = 0.14$ K). Это может стать определяющим фактором при выборе необходимых параметров пленки для конкретных приложений, так как размытый переход в сверхпроводящее состояние свидетельствует о неоднородности состава пленки в момент ее роста.

Изготовленные образцы с СИС-переходами были измерены в режиме задания напряжения при температуре 4.2 K при помощи погружного зонда, опускаемого в сосуд Дьюара с жидким гелием. Каждый образец представлял собой общий электрод с 14 СИС-переходами на

Таблица 1. Параметры пленок NbN, в зависимости от потока азота, при постоянном потоке аргона 70 sccm: температура перехода в сверхпроводящее состояние T_c , отношение сопротивления пленок R при температурах 20 и 300 К, удельное сопротивление ρ при 20 К, размытие по температуре перехода в сверхпроводящее состояние

№ образца	Поток N_2 , sccm	T_c , К	R_{20}/R_{300}	ρ_{20} , $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	ΔT_c , К
1	6	14.1	1.08	160	0.35
2	7	14.7	1.215	230	0.2
3	8	14.2	1.245	260	0.14
4	10	13.3	1.22	292	0.58

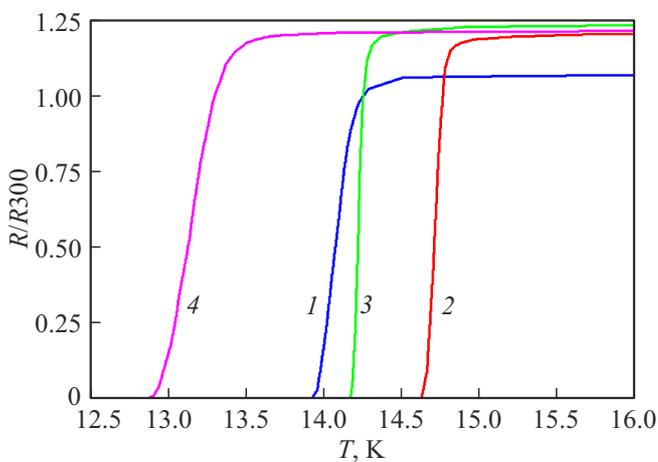


Рис. 1. Графики перехода пленок NbN в сверхпроводящее состояние, зависимость нормированного сопротивления (R/R_{300}) от температуры; нумерация графиков соответствует нумерации образцов в табл. 1.

нем; к каждому переходу был подведен свой замыкатель с контактной площадкой. На образце были представлены СИС-переходы с различными диаметрами, от 1.8 до 5.5 μm . Считая, что параметры туннельного барьера (высота и ширина) одинаковы для каждого СИС-перехода в пределах одной подложки, можно провести расчет значения $R_n S$ (произведение площади СИС-перехода на его нормальное сопротивление после сверхпроводящей щели), которое должно быть одинаковым для каждого перехода. Значение R_n определяется из ВАХ.

Исследовано 4 образца, у которых нижний слой (Nb) и барьер (Al-AlN) в СИС-переходе формировались одинаково, но слой нитрида ниобия формировался при различных условиях напыления: изменялось содержание азота в газовой смеси азот/аргон. Барьер сформирован в плазменном разряде чистого азота в режиме 50 W и 180 с. ВАХ для 4 образцов с различными $R_n S$, измеренными описанным ранее способом, представлены на рис. 2. Несмотря на то, что барьер в каждом образце был сформирован при одинаковых условиях, были получены разные значения $R_n S$, что подтверждает предположение

о влиянии верхнего слоя в СИС-структуре на ее параметры.

Для оценки основных параметров туннельных барьеров изготовленных образцов был проведен цикл измерений. На рис. 3 показана одна из полученных ВАХ и ее производная, представляющая зависимость дифференциальной проводимости перехода $G = dI/dV$ от приложенного напряжения. Зависимость $G(V)$ аппроксимировалась графиком полинома 3-й степени. Далее производился расчет основных параметров барьера в соответствии с методикой, описанной в [11]. Результаты расчетов параметров барьера вынесены в табл. 2.

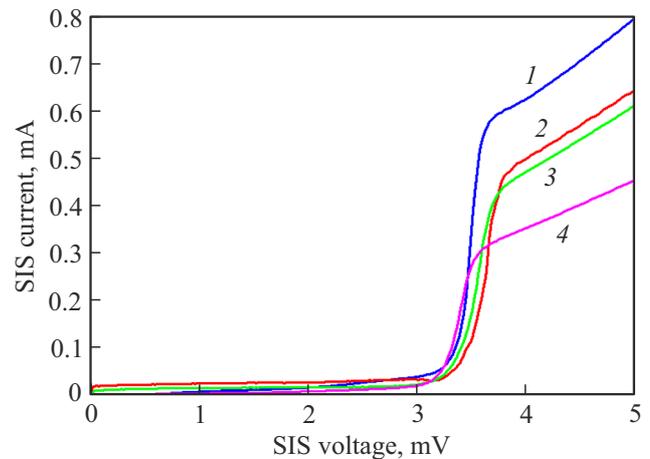


Рис. 2. ВАХ СИС-переходов с разными плотностями тока для барьеров, сформированных одинаково, но имеющих разное количество азота при формировании слоя NbN: кривая 1 — поток $N_2 = 6$ sccm, $R_n S = 7.7 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$; 2 — $N_2 = 7$ sccm, $R_n S = 13.8 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$; 3 — $N_2 = 8$ sccm, $R_n S = 15 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$; 4 — $N_2 = 10$ sccm, $R_n S = 22.2 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$.

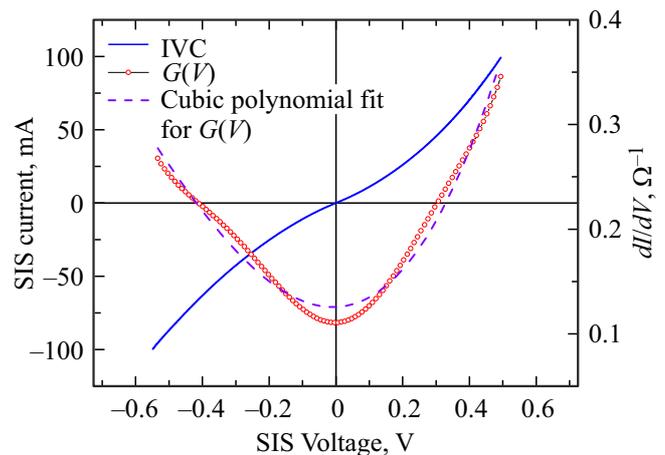


Рис. 3. ВАХ (IVC) СИС-перехода для образца с потоком Ar = 70 sccm, $N_2 = 10$ sccm. Сплошная кривая (левая ось) — ВАХ туннельного СИС-перехода, измеренная в диапазоне напряжений ± 0.5 В. Кривая из кружков (правая ось) — зависимость дифференциальной проводимости перехода от напряжения. Пунктиром (правая ось) показана аппроксимация кубическим полиномом для G .

Таблица 2. Сводная таблица рассчитанных параметров барьера для туннельных переходов с различной концентрацией азота в газовой смеси при нитридации, при одном и том же потоке аргона 70 sccm

Поток N ₂ , sccm	R _n S, Ω · μm ²	φ, eV	d, Å
6	8	0.29	11.9
7	14	0.3	12.6
8	15	0.34	12.5
10	22	0.37	13.8

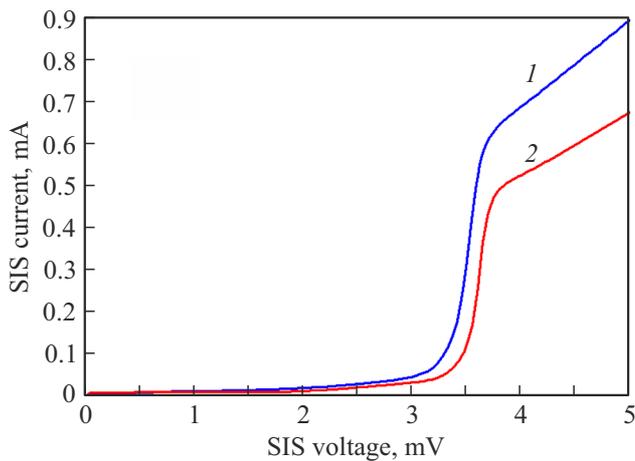


Рис. 4. ВАХ СИС-переходов с одинаковыми электродами из NbN, но с разными барьерами AlN: для обоих графиков мощность, подаваемая на ВЧ-магнетрон, составляла 50 W, кривая 1 — время нитридации 90 s, кривая 2 — время нитридации 180 s.

Как видно из табл. 2, по мере увеличения концентрации азота в смеси газов при нитридации происходит характерный рост как толщины d изоляционного слоя, так и высоты барьера ϕ , что подтверждает уменьшение прозрачности туннельного барьера с ростом R_nS .

Чтобы изучить влияние параметров формирования барьера на свойства СИС-переходов, были изготовлены образцы с одинаковым верхним слоем NbN, с параметрами процесса напыления Ar = 70 sccm, N₂ = 7 sccm, 650 W, но с разным временем нитридации барьера: 90 и 180 s. Их ВАХ, представленные на рис. 4, подтверждают, что процесс формирования туннельного барьера существенно (на 67%) изменяет параметр R_nS ($8.4 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ и $14 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$).

Для случая барьера, сформированного с параметрами 50 W и 90 s, был изготовлен СИС-переход с верхним электродом из Nb вместо NbN, ВАХ такого перехода представлена на рис. 5. Туннельный барьер из AlN формировался одинаковым образом, однако разница в величине R_nS получилась очень большой: $8.4 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ для NbN и $3 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ для Nb. По-видимому, слой ниобия „отбирает“ азот из слоя AlN за счет процессов диффузии, тем самым значительно повышая прозрачность

туннельного барьера. Этот пример иллюстрирует значительное влияние верхнего слоя в СИС-структуре на свойства туннельного барьера.

Были изготовлены образцы с близкими R_nS ($\sim 8 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$, которые имели разные параметры формирования барьера (50 W, 180 s и 50 W, 90 s), разные параметры формирования верхнего нитрида ниобия (Ar = 70 sccm, N₂ = 6 sccm и Ar = 70 sccm, N₂ = 7 sccm). Результаты измерений ВАХ этих образцов приведены на рис. 6. Отличие величины нормального сопротивления R_n выше сверхпроводящей щели обусловлено различием площадей туннельных переходов.

Из рис. 6 видно, что несмотря на разные условия при формировании СИС-перехода, образцы с одинаковым R_nS ($\sim 8 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ имеют близкие параметры: отношение подщелевого сопротивления к нормальному сопротив-

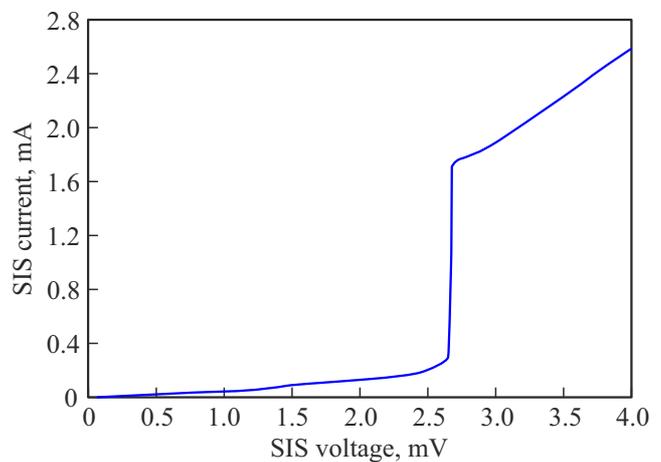


Рис. 5. ВАХ СИС-перехода Nb–Al–AlN–Nb с барьером, сформированным с параметрами 50 W, 90 s.

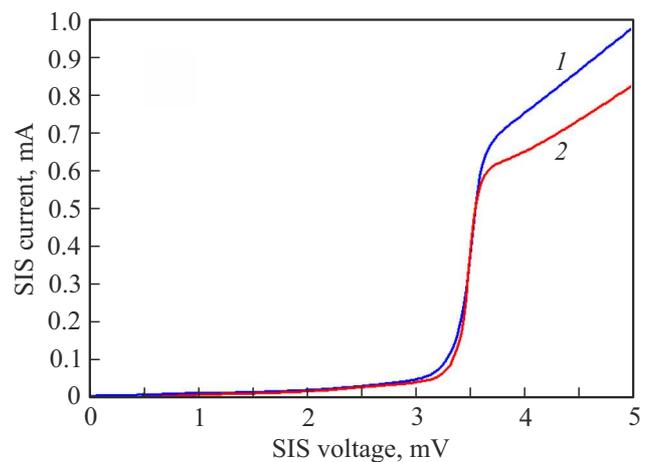


Рис. 6. ВАХ СИС-переходов с одинаковым R_nS , но с различными параметрами изготовления туннельного барьера (AlN) и верхнего электрода (NbN) в СИС-структуре: кривая 1 — время нитридации барьера 180 s, поток азота для NbN 6 sccm, кривая 2 — время нитридации барьера 90 s, поток азота для NbN 7 sccm.

лению (R_j/R_n) 23 и 24.4, размытие целевой особенности 0.418 и 0.355 mV, значение сверхпроводящей щели V_g 3.49 и 3.47 mV. Этот результат позволяет сделать вывод о том, что получение требуемого R_nS может быть достигнуто не только варьированием параметров при формировании барьера, но и при помощи изменения параметров формирования верхнего электрода в СИС-структуре без потери качества самого перехода. Такой вывод может быть особенно полезен, когда требуется сформировать низкие R_nS ($\sim 1 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$), а уменьшение времени нитридации или не позволяет достичь этих значений, или становится слишком коротким (< 10 с), что негативно сказывается на воспроизводимости таких переходов.

5. Заключение

В СИС-переходе варьирование содержания азота в верхнем слое нитрида ниобия позволяет наравне с известными методами (изменение давления, продолжительность формирования барьера и др.) осуществлять тонкую настройку прозрачности туннельного барьера. Показано, что повышение концентрации азота в смеси газов Ag и N_2 при напылении верхнего слоя СИС-структуры приводит к понижению прозрачности туннельного барьера. Варьирование параметров напыления нитрида ниобия вместе с подбором параметров изготовления туннельного барьера позволяет получить СИС-переходы со схожими параметрами, такими, как R_nS , V_g , R_j/R_n , без потери качества самого перехода. Такой подход к формированию СИС-структур открывает новые возможности для управления параметрами туннельных переходов и создания приемных устройств на их основе, сохраняя воспроизводимость процесса изготовления.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта РНФ (№ 23-79-00019, <https://rscf.ru/project/23-79-00019/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [6] A.W. Kleinsasser, R.E. Miller, W.H. Mallison. IEEE Trans. Appl. Supercond. **5**, 2 Part 3, 2318 (1995).
- [7] J.G. Simmons. J. Appl. Phys. **34**, 6, 1793 (1963).
- [8] M.Yu. Torgashin, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, P.A. Yagubov. IEEE Trans. Appl. Supercond. **17**, 2, 379 (2007).
- [9] А.М. Чекушкин, Л.В. Филиппенко, М.Ю. Фоминский, В.П. Кошелец. ФТТ **64**, 10, 1399 (2022). [А.М. Chekushkin, L.V. Filippenko, M.Y. Fominskiy, V.P. Koshelets. Phys. Solid State **64**, 10, 1382 (2022)].
- [10] W.F. Brinkman, R.C. Dynes, J.M. Rowell. J. Appl. Phys. **41**, 5, 1915 (1970).
- [11] М.Е. Парамонов, Л.В. Филиппенко, П.Н. Дмитриев, М.Ю. Фоминский, В.П. Кошелец. Радиотехника и электроника **64**, 10, 1029 (2019). [М.Е. Paramonov, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev, M.Y. Fominskiy, V.P. Koshelets. J. Commun. Technol. Electron. **64**, 10, 1144 (2019)].

Редактор Е.В. Толстякова