

02,08

## Экспериментальное исследование гармонического смесителя на основе последовательной цепочки YBaCuO бикристаллических джозефсоновских переходов в режиме нулевого смещения

© В.А. Анфертьев<sup>1</sup>, Д.В. Мастеров<sup>1</sup>, А.Е. Парафин<sup>1</sup>, Л.С. Ревин<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
Нижний Новгород, Россия

\* E-mail: rls@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 18 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2024 г.

Принята к публикации 8 мая 2024 г.

Рассчитаны, изготовлены и измерены последовательные цепочки ВТСП джозефсоновских переходов с оптимизированной лог-периодической антенной, работающие в режиме смещения ТГц-сигналов. Показано, что синхронная работа переходов приводит к увеличению интегральной поглощенной мощности и, как следствие, увеличению динамического диапазона. Обнаружены два режима: при низких температурах наблюдается рассогласованное возбуждение переходов в цепочке, при высоких температурах возникают „гигантские“ ступени Шапиро, свидетельствующие о синхронизации переходов. Проведены исследования характеристик смесителя с использованием операции смещения с высшими гармониками гетеродинного сигнала. Для оптимального уровня накачки частотой 3 GHz обнаружена ненулевая амплитуда промежуточной частоты при смещении с сигналом 120 GHz на 40 гармонике. Показано, что в оптимальном режиме работы смесителя конфигурация последовательной цепочки позволяет использовать режим нулевого смещения.

**Ключевые слова:** высокотемпературный сверхпроводник, джозефсоновский переход, гармонический смеситель, последовательная цепочка.

DOI: 10.61011/FTT.2024.06.58234.9NH

### 1. Введение

Сверхпроводящие устройства, основанные на эффектах Джозефсона, обладают уникальными свойствами генерации и смешивания гармоник, которые используются в экспериментах с конца 1960-х годов. Известно, что в джозефсоновских переходах возможны различные режимы работы гармонического смесителя [1–3]. При этом смещение на джозефсоновской нелинейности рассматривалось ранее как паразитный эффект, приводящий к дополнительным шумам, поэтому в смесителях сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник критический ток подавляется. Но в недавних работах была показана возможность преобразования в джозефсоновском режиме без существенного увеличения шумов [4–6].

Хотя высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) уже давно считаются перспективными материалами для создания высокочастотных джозефсоновских устройств, недавние впечатляющие результаты в этой области [7,8] дают новый толчок данному направлению.

Одним из основных недостатков технологии ВТСП является достаточно низкий импеданс джозефсоновских переходов (JJ). Нормальное сопротивление  $R_N$  перехода обычно составляет несколько  $\Omega$  для стандартной геометрии переходов шириной 2–3  $\mu\text{m}$ , что не соответствует характерному импедансу антенн или копланарных линий порядка 50  $\Omega$ .

Один из возможных способов решения данной проблемы состоит в замене одного перехода на последовательную цепочку переходов. Мощность принимаемого сигнала и импеданс можно увеличить до уровня практического применения, если все переходы в последовательном массиве работают в режиме синхронизации. Кроме того, массив JJ может также решить проблему насыщения гармонического смесителя, возникающую с увеличением частоты сигнала или порядка гармоник. В работе [9] было получено повышение отношения сигнал/шум на выходе промежуточной частоты (IF) на 5 dB при смещении 11-й гармоники. В работе [10] было замечено, что амплитуда IF очень слабо зависит от точки смещения цепочки ВТСП переходов. Таким образом, для смесителя с джозефсоновским переходом возможна работа с нулевым смещением, и это имеет большое преимущество, заключающееся в том, что не требуется источник постоянного тока, и, следовательно, в переходе не возникает эффекта нагрева или дробового шума из-за постоянного тока.

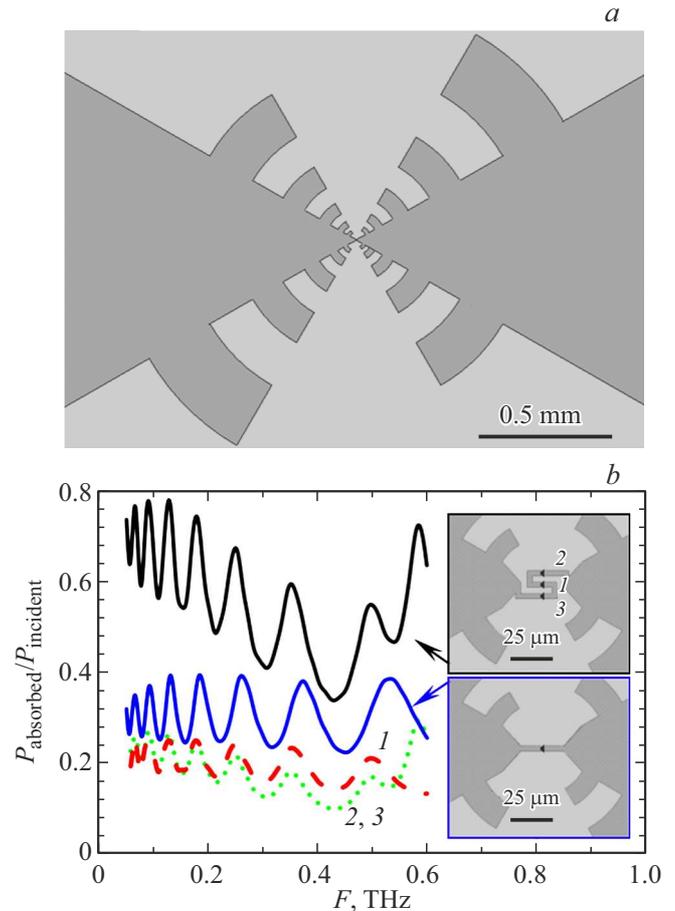
В данной работе демонстрируется джозефсоновский смеситель с нулевым смещением, состоящий из трех последовательных YBaCuO бикристаллических переходов, соединенных меандром и интегрированных в лог-периодическую антенну. Проведены исследования ступеней Шапиро при различных температурах образца для разных частот GHz-сигнала. Обнаружены два режима:

при низких температурах наблюдается рассогласованное возбуждение переходов в цепочке, при высоких температурах возникают „гигантские“ ступени Шапиро, свидетельствующие о синхронизации переходов. Продемонстрировано смешение сигналов на высоких гармониках.

## 2. Электромагнитное моделирование

На первом этапе было проведено электромагнитное моделирование смесителя с лог-периодической антенной (рис. 1, *a*) для получения эффективного приема сигнала в частотном диапазоне 50–600 GHz [11]. Моделирование было выполнено в программе CST Microwave Studio. В качестве численного метода использовался метод конечных разностей. Параметры подложки были выбраны в соответствии с экспериментальными данными: толщина подложки — 0.5 mm; диэлектрическая проницаемость — 24, тангенс потерь — 0.0045. Исследованы амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) системы и диаграмма направленности. Для случая использования одиночного джозефсоновского перехода в качестве приемного элемента получена плавная амплитудно-частотная характеристика во всем диапазоне частот с максимальным откликом  $0.39P_{incident}$  и величиной главного лепестка диаграммы направленности 15.7 dBi при угловой ширине  $15^\circ$ . Чтобы улучшить согласование между приемной системой и антенной была рассмотрена конструкция с тремя последовательными джозефсоновскими переходами. На рис. 1, *b* видно, что интегральная мощность, поглощаемая тремя переходами, больше, чем мощность, поглощаемая одним переходом, в 2.3 раза. Кроме того, видно, что положения резонансов амплитудно-частотной характеристики для случая последовательной цепочки отличаются от резонансов для одиночной полоски. И чем больше частота, тем сильнее отличия. Более того, АЧХ для „крайних“ портов начинает заметно отличаться от АЧХ центрального порта от 500 GHz. Выше 500 GHz появляются дополнительные резонансы. Это связано с индуктивностью меандра, импеданс которого по оценкам составляет примерно 30 Ohm на 500 GHz. Поэтому при работе на высоких частотах становится важным уменьшение длины меандра. В модели не учитывалась кинетическая индуктивность ВТСП сверхпроводника, которая для определенных задач является ключевой. В данном случае мы оценили кинетическую индуктивность по формуле [12]  $L^k$  (на квадрат)  $= \mu_0/2\lambda_L = 10^{-13}$  H, где  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\lambda_L = 0.15 \mu\text{m}$  — лондоновская глубина проникновения в YBaCuO сверхпроводнике. Таким образом, кинетическая индуктивность составляла  $2 \cdot 10^{-12}$  H, а импеданс на 500 GHz — 6 Ohm. Значение близко к импедансу геометрической индуктивности, и в дальнейшем должно быть учтено в модели.

Хотя интегральная принимаемая мощность цепочки увеличивается из-за лучшего согласования с антенной, каждый отдельный переход в массиве получает меньшую мощность, чем в случае с одним JJ в антенне. За

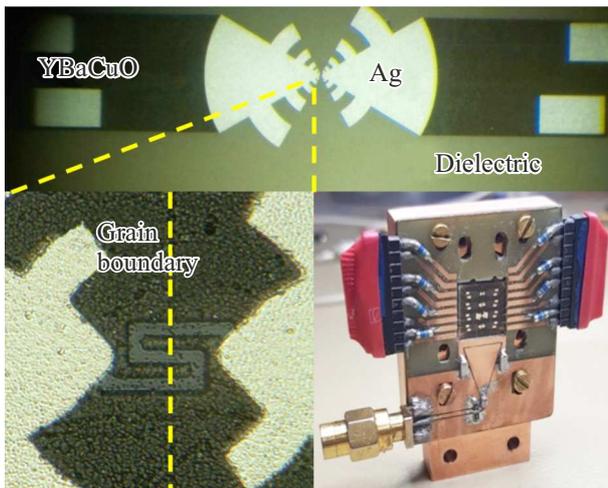


**Рис. 1.** *a* — лог-периодическая антенна, *b* — отношение поглощенной мощности к падающей для двух разных случаев. Синяя кривая — один переход в антенне; черная кривая — три последовательных перехода. Красная пунктирная линия — поглощение в центральном переходе цепочки. Зеленые точки — поглощение в крайних переходах цепочки. На вставках — геометрия центральной части смесителя для двух случаев.

счет последовательного соединения в общую приемную систему элементы распределяют мощность между собой. Чем больше элементов, тем меньше мощности поступает на каждый отдельный переход. Это позволяет также увеличить динамический диапазон приемника.

## 3. Схема измерений

Смешение сигнала осуществлялось на основе эффекта Джозефсона в ВТСП сверхпроводнике. Пленка YBaCuO сверхпроводника толщиной  $0.1 \mu\text{m}$  была напылена методом задающей маски [13] на поверхность бикристаллической  $Zr_{1-x}Y_xO_2$  подложки с углом разориентации  $24^\circ$  в плоскости [001]. Мостик пересекал границу бикристалла 3 раза, так, что в результате получалась цепочка джозефсоновских переходов, каждый из которых имел ширину  $3 \mu\text{m}$ . Цепочка была интегрирована в лог-



**Рис. 2.** Фотография ВТСП гармонического смесителя. Сверху — пленка YBaCuO с антенной и контактными площадками из серебра. Снизу слева — область вблизи бикристаллической границы. Снизу справа — образец, смонтированный на держатель.

периодическую планарную антенну для широкополосной связи с внешним излучением (рис. 2).

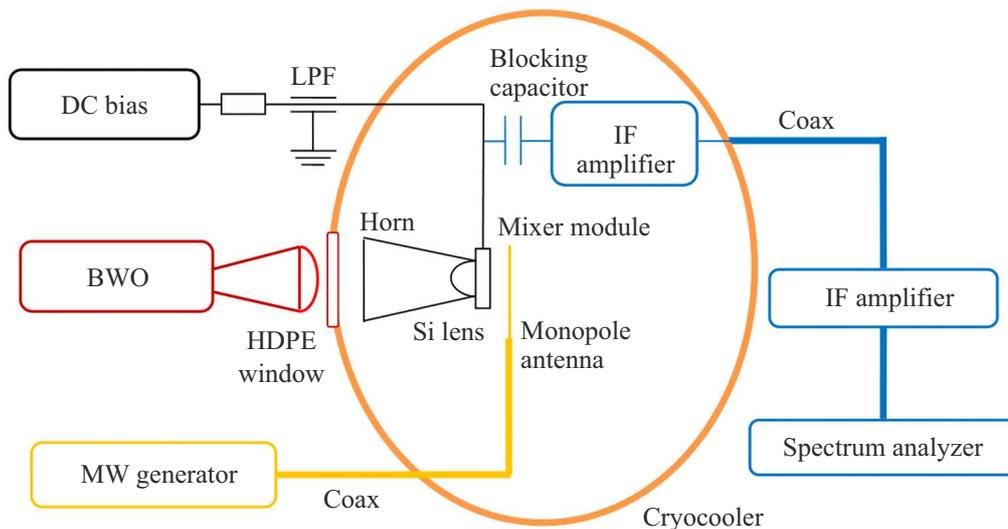
ВТСП смеситель был установлен на кремниевую линзу в криоохладитель Гиффорда–Мак-Магона, рис. 3. Полезный сигнал от лампы обратной волны (ЛОВ) передавался по квазиоптической схеме с фторопластовой линзой, инфракрасными фильтрами и сверхразмерным волноводом.

Сигнал на промежуточной частоте получался с использованием операции смешения с высшими гармониками гетеродинного сигнала, который излучался с помощью монополярной антенны и принимался смесителем. Длина монополярной антенны составляла 4 mm,

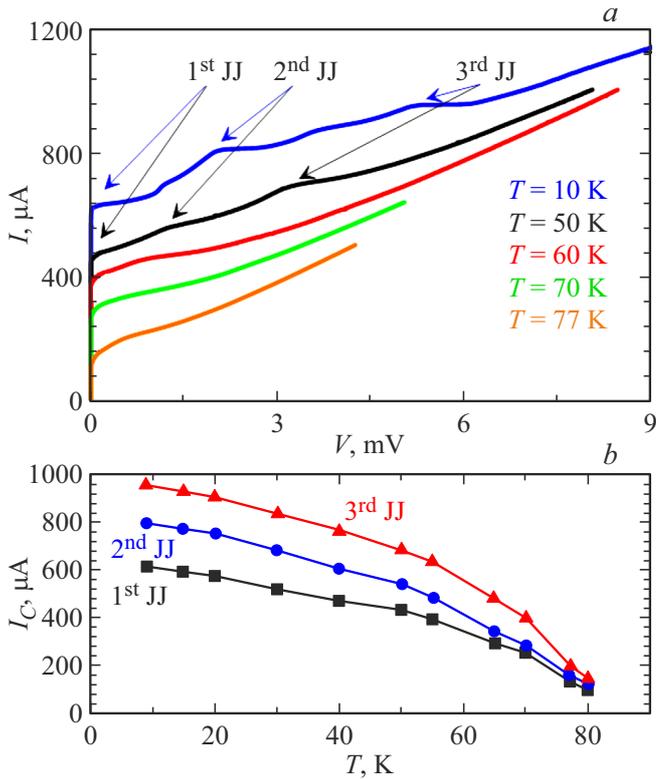
а расстояние до образца — 2 mm. Источником гетеродинного сигнала являлся микроволновый генератор R&S SMB100A с частотным диапазоном от 100 kHz до 20 GHz. Для передачи сигнала гетеродина использовалась одна и та же антенна. Из-за этого амплитудно-частотная характеристика была сильно изрезана, а потери составляли 20–30 dB. Благодаря тому, что для накачки ВТСП-смесителя не требуется большая мощность, мы могли выбрать оптимальную мощность гетеродина для каждой частоты. Тем не менее, такой способ передачи опорного сигнала является неоптимальным, поэтому в настоящее время реализована другая схема, в которой с помощью диплексера сигнал гетеродина передается по коаксиальному кабелю на плату смесителя. Сигнал промежуточной частоты регистрировался анализатором спектра Gratten GA. Предварительный усилитель SBB5089Z, расположенный на холодной плите криостата, вместе с комнатным усилителем давали усиление 52 dB при шуме  $-64$  dBm в диапазоне частот 1–3 GHz в полосе 3 MHz. Шум самого анализатора спектра составлял примерно  $-90$  dBm в полосе 3 MHz и давал малую добавку к шуму системы. Источник постоянного тока с батарейным питанием использовался для управления смесителем.

## 4. Результаты

На рис. 4, а показаны измеренные вольт-амперные характеристики (ВАХ) смесителя в зависимости от температуры. Для низких температур 50–10 K видны резкие изменения наклонов ВАХ, обусловленные выходом из сверхпроводящего состояния в резистивное каждого из переходов в отдельности. На рис. 4, b изображен критический ток  $I_C$  в зависимости от температуры. Разброс по критическому току среди переходов составил  $\sim 20\%$ . При этом, как и ожидалось,  $R_N(3JJ) \sim 3 \times R_N(1JJ)$ .



**Рис. 3.** Схема спектральных измерений.



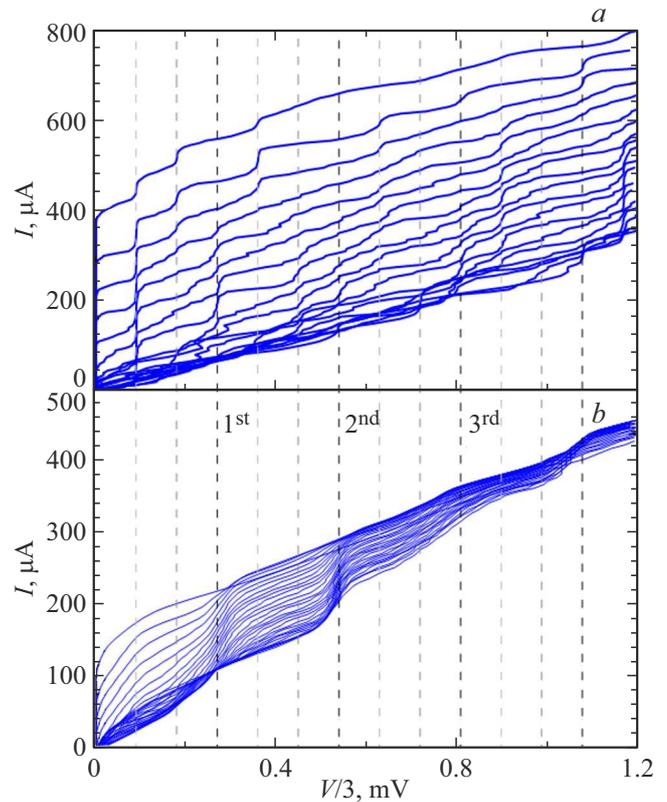
**Рис. 4.** *a* — Вольт-амперные характеристики смесителя при различных температурах. Стрелочками показан выход из сверхпроводящего состояния каждого перехода в цепочке. *b* — зависимость критического тока от температуры для каждого перехода в цепочке.

Несмотря на существенный разброс параметров переходов, для высоких температур массив демонстрирует ВАХ, близкую к предсказаниям резистивной модели, и можно ожидать, что переходы будут синхронизованы внешним излучением.

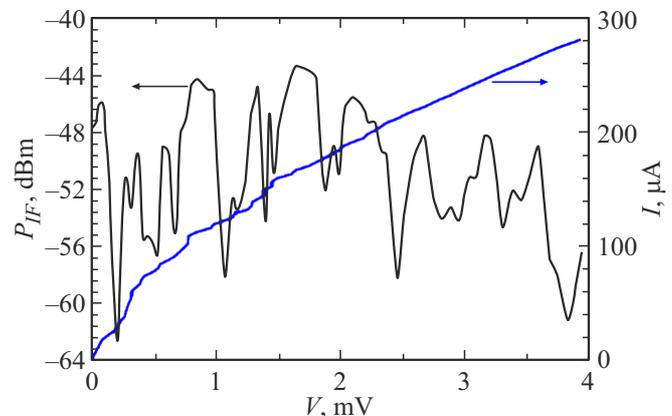
На рис. 5 показаны ВАХ смесителя под действием внешнего высокочастотного излучения  $f_{\text{THZ}} = 130\text{ GHz}$  разной мощности для двух температур. Для исследования синхронных состояний последовательных переходов напряжение было нормировано на один переход, то есть измеряемое значение  $V$  делилось на 3. Для низкой температуры  $10\text{ K}$  на ВАХ появляются множество ступеней Шапиро. Черными пунктирными линиями отмечены напряжения, удовлетворяющие джозефсоновской зависимости напряжения от частоты, серыми пунктирными линиями — напряжения при  $2/3$  напряжений ступени, светло серыми пунктирными линиями — напряжения при  $1/3$  напряжений. Все ступени Шапиро, соответствующие состояниям с синхронизацией [14], находятся при напряжениях, удовлетворяющих джозефсоновскому соотношению  $V/3 = n\Phi_0 f_{\text{THZ}}$ , где  $n$  — номер целой ступени Шапиро,  $\Phi_0$  — квант потока. Под состоянием синхронизации здесь понимается синхронизация, возникающая в результате резонанса с высокочастотным воздействием. Ступень, находящаяся при напряжении  $\Phi_0 f_{\text{THZ}}/3$ ,

свидетельствует о том, что синхронизируется только один переход, ступень при напряжении  $2\Phi_0 f_{\text{THZ}}/3$  — два перехода, и так далее.

При температуре  $77\text{ K}$  на вольт-амперной характеристике видны „гигантские“ ступени Шапиро только при



**Рис. 5.** Вольт-амперные характеристики смесителя под действием внешнего сигнала  $130\text{ GHz}$ . Черные пунктирные линии — положение первой ступени Шапиро в нормировке на один переход. *a* — температура смесителя  $T = 10\text{ K}$ . *b* — температура смесителя  $T = 77\text{ K}$ .



**Рис. 6.** Вольт-амперная характеристика смесителя под действием внешнего сигнала  $175\text{ GHz}$  и опорного сигнала  $21.6\text{ GHz}$ . Левая ось — амплитуда линии промежуточной частоты, правая ось — постоянный ток на смесителе.

напряжениях  $n\Phi_0 f_{\text{THz}}$ , что говорит о синхронной работе всех трех переходов.

Были проведены эксперименты по гармоническому смешиванию при температуре 77 К. На рис. 6 показана вольт-амперная характеристика под действием высокочастотного сигнала 175 GHz малой мощности и сигнала накачки частотой  $\sim 21.6$  GHz. Величина линии на промежуточной частоте  $P_{\text{IF}}$  (левая ось на рис. 6) как правило имеет максимум в центре ступени Шапиро. Такое поведение наблюдалось для одиночного перехода [16,17]. Но, в отличие смесителя с одиночным переходом, массив демонстрирует максимум IF около нулевого тока, сравнимый с абсолютным максимумом амплитуды промежуточной частоты для данных условий.

Дальнейшие исследования позволили обнаружить амплитуду линии промежуточной частоты при смешении сигнала 120 GHz и 40 гармоники опорного сигнала частотой 3 GHz. Кроме того, исследована зависимость амплитуды IF от мощности накачки при смешении сигнала 170.22 GHz и 17 гармоники опорного сигнала 9.973 GHz; а также 33 гармоники опорного сигнала 5.137 GHz.

## 5. Заключение

В результате работы рассчитаны, изготовлены и измерены последовательные цепочки ВТСП джозефсоновских переходов с оптимизированной лог-периодической антенной. Показано, что синхронная работа переходов приводит к увеличению интегральной поглощенной мощности и, как следствие, увеличению динамического диапазона. Проведены исследования характеристик смесителя с использованием операции смешения с высшими гармониками гетеродинного сигнала. В результате удалось обнаружить ненулевую амплитуду IF при смешении сигнала 120 GHz и 40 гармоники опорного сигнала частотой 3 GHz. Показано, что в оптимальном режиме работы смесителя конфигурация последовательной цепочки позволяет использовать режим нулевого смещения, а также достичь смешения на высокой гармонике опорного сигнала.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-10384-П.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] B. Leridon, P. Febvre, S. George, P. Feautrier, W.R. McGrath. J. Appl. Phys. **82**, 3024 (1997).
- [2] H. Wang. Appl. Phys. Lett. **66**, 370 (1995).
- [3] H.B. Wang, Y. Aruga, T. Tachiki, Y. Mizugaki, J. Chen, K. Nakajima, T. Yamashita, P.H. Wu. Appl. Phys. Lett. **75**, 2310 (1999).
- [4] K.V. Kalashnikov, A.V. Khudchenko, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. J. Commun. Technol. Electron. **56**, 699 (2011).
- [5] К.В. Калашников, А.А. Артанов, Л.В. Филиппенко, В.П. Кошелец. ФТТ **58**, 2117 (2016).
- [6] K.V. Kalashnikov, A.A. Artanov, G. de Lange, V.P. Koshelets. IEEE Transact. Appl. Superconductivity **28**, 2400105 (2018).
- [7] M. Yu, H. Geng, T. Hua, D. An, W. Xu, Z.N. Chen, J. Chen, H. Wang, P. Wu. Supercond. Sci. Technol. **33**, 025001 (2020).
- [8] D. Cunnane, J.H. Kawamura, N. Acharya, M.A. Wolak, X.X. Xi, B.S. Karasik. Appl. Phys. Lett. **109**, 112602 (2016).
- [9] T. Matsui, B. Komiyama, H. Ohta. IEEE Trans. Mag. **25**, 1072 (1989).
- [10] J. Konopka, I. Wolff, S. Beuven, M. Siegel. IEEE Trans. Appl. Supercond. **5**, 2443 (1995).
- [11] E.I. Glushkov, A.V. Chiginev, L.S. Kuzmin, L.S. Revin. Beilstein J. Nanotechnol. **13**, 325 (2022).
- [12] В.В. Шмидт. Введение в физику сверхпроводников. Изд. 2-е. МЦМНО, М. (2000). 402 с.
- [13] D.V. Masterov, A.E. Parafin, L.S. Revin, A.V. Chiginev, E.V. Skorokhodov, P.A. Yunin, A.L. Pankratov. Superconductor Sci. Technology **30**, 025007 (2017).
- [14] D. Dominguez, H.A. Cerdeira. Phys. Rev. Lett. **20**, 3359 (1993).
- [15] A. Klushin, W. Prusseit, E. Sodtke, S.I. Borovitskii, L.E. Amantuni, H. Kohlstedt. Appl. Phys. Lett. **69**, 1634 (1996).
- [16] M. Malnou, A. Luo, T. Wolf, Y. Wang, C. Feuillet-Palma, C. Ulysse, G. Faini, P. Febvre, M. Sirena, J. Lesueur, N. Bergeal. Appl. Phys. Lett. **101**, 233505, (2012).
- [17] M. Malnou, C. Feuillet-Palma, C. Ulysse, G. Faini, P. Febvre, M. Sirena, L. Olanier, J. Lesueur, N. Bergeal. J. Appl. Phys. **116**, 074505, (2014).

Редактор Т.Н. Василевская