

## 02 Эффекты близости и Джозефсона в бислоях из нитрида ниобия и алюминия

© М.Ю. Левичев<sup>1</sup>, А.И. Елькина<sup>1</sup>, Н.Н. Бухаров<sup>2</sup>, Ю.В. Петров<sup>3</sup>, А.Ю. Аладышкин<sup>1,4</sup>,  
Д.Ю. Водолазов<sup>1</sup>, А.М. Клушин<sup>1,¶</sup>

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

<sup>2</sup> Нижегородское научно-производственное объединение им. М.В. Фрунзе,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Россия

¶ E-mail: a\_klushin@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 15 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 22 апреля 2019 г.

Принята к публикации 24 апреля 2019 г.

Исследованы сильно разупорядоченные тонкие пленки из нитрида ниобия и особенности проявления эффекта близости в бислоях NbN (S)–алюминий (N) с большим соотношением их удельных сопротивлений  $\rho_{\text{NbN}}/\rho_{\text{Al}} \gg 1$ . Показано, что магнитное экранирование и критический ток  $I_c$  таких SN структур значительно возрастают по сравнению с S слоем. Наблюдаемый эффект связан с возникновением наведенной сверхпроводимости в N слое за счет эффекта близости. Продемонстрирован эффект Джозефсона в мостиках переменной толщины NbN/Al–NbN–NbN/Al, изготовленных из таких SN бислоев.

**Ключевые слова:** сверхпроводимость, эффект близости, эффект Джозефсона, джозефсоновские контакты.

DOI: 10.21883/FTT.2019.09.48095.24N

### 1. Введение

В недавней работе [1] теоретически и экспериментально изучался эффект близости в бислоях из нормального металла N с малым удельным сопротивлением  $\rho_N$ , осажденного на поверхность сверхпроводника S с большим удельным сопротивлением  $\rho_S$  в нормальном состоянии (рис. 1). Было показано существенное увеличение экранирующих свойств  $\Lambda^{-1}$  всего SN бислоя из материалов с  $\rho_S/\rho_N \gg 1$  по сравнению с  $\lambda$ , глубиной проникновения магнитного поля одиночной сверхпроводящей пленки. Также было обнаружено значительное возрастание критического тока мостика  $I_{c\text{SN}}$  по сравнению с критическим

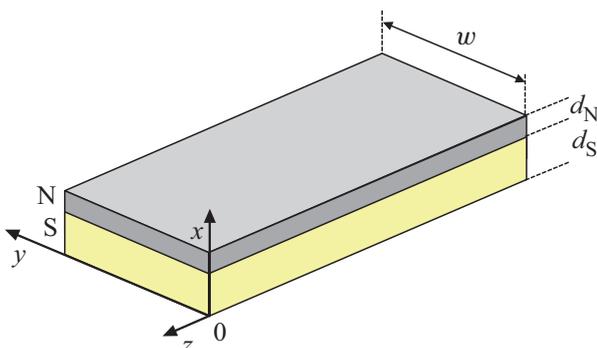


Рис. 1. Схематическое изображение SN бислоя.

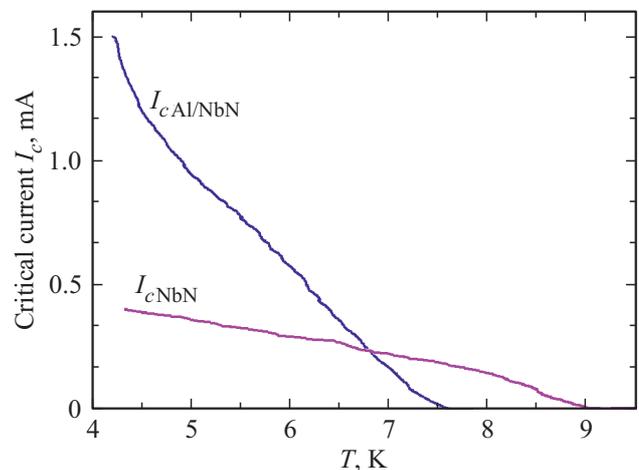


Рис. 2. Зависимость от температуры критического тока  $I_{c\text{NbN}}$  мостика шириной  $4 \mu\text{m}$  из NbN толщиной  $17 \text{ nm}$  и критического тока  $I_{c\text{NbN/Al}}$  бислоя NbN/Al с толщиной алюминия  $34 \text{ nm}$ .

током мостика  $I_{c\text{S}}$ , изготовленного из этого сверхпроводника (рис. 2) с понижением температуры. Указанные эффекты были предсказаны и наблюдались в широком интервале температур в SN структурах, изготовленных из тонких пленок N и S металлов с толщинами  $d_N$  и  $d_S$  равными или менее  $2\xi_S$ . Здесь  $\xi_S = \sqrt{\hbar D_S/k_B T_0}$  длина когерентности в S пленках,  $D_S$  — коэффициент диффузии,

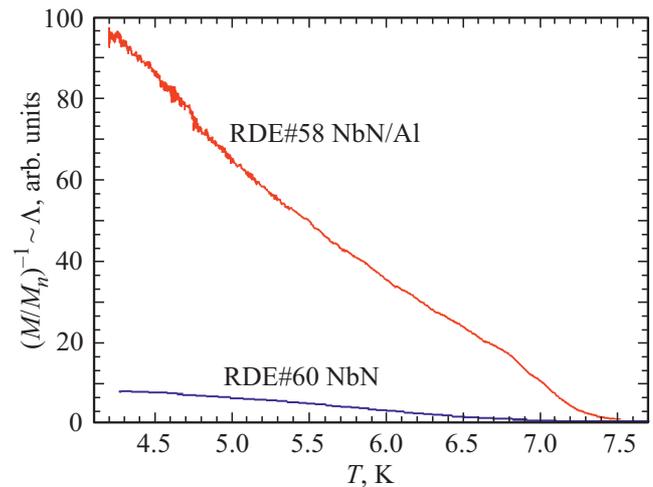
а  $T_{c0}$  — критическая температура S пленки в нулевом магнитном поле при отсутствии эффекта близости.

В статье обсуждаются свойства таких структур из тонких пленок нитрида ниобия и алюминия, а также представлены первые результаты по исследованию в постоянном магнитном и СВЧ полях планарных мостиков переменной толщины (МПП), в которых переемычка длиной  $L \approx 20$  nm изготавливалась из сверхпроводника NbN, а берега из бислоя NbN/Al.

## 2. Эффект близости в бислоях NbN/Al

Бислои NbN/Al изготавливались в высоковакуумной установке с остаточным давлением менее  $10^{-7}$  mbar на сапфировых подложках размером  $10 \times 10$  mm<sup>-2</sup>, находящихся при комнатной температуре. Напыление NbN и Al проходило в одном вакуумной цикле. Тонкие пленки NbN формировались путем магнетронного распыления на постоянном токе ниобиевой мишени в смеси газов Ar (99.999%) и N<sub>2</sub> (99.999%) при давлении  $7 \times 10^{-3}$  mbar. Скорость осаждения слоев NbN была равна 1.3 nm/s. Пленки Al напылялись методом магнетронного распыления на переменном токе в атмосфере Ar при давлении  $2 \times 10^{-2}$  mbar. Скорость осаждения слоев Al изменялась в диапазоне от 1 до 3 nm/s. В дальнейшем будут представлены результаты исследования образца RDE#58 с толщинами пленок NbN и Al равными примерно 15 и 29 nm, соответственно.

Для определения критической температуры и диамагнитного отклика SN слоев мы размещали образец между двумя катушками и измеряли взаимную индуктивность  $M$  между ними в зависимости от температуры в интервале от 300 до 4.2 K [2]. Установка для измерения экранирующих свойств сверхпроводящих пленок в магнитном поле состоит из: криогенного зонда-вставки в транспортный сосуд дьюара СТГ-40, генератора синусоидального сигнала и синхронного детектора SR-830 с измерительным трансформатором SR554 с коэффициентом трансформации 1:100; источника тока для сверхпроводящего магнита СТС-60; а также контроллера температуры Scientific Instruments M9700. В криогенном зонде смонтирована измерительная головка, состоящая из двух медных пластин, в каждой из которых установлены катушки индуктивности диаметром 7 и высотой 6 mm. На одной из пластин установлен термометр и сделано углубление  $10 \times 10 \times 0.7$  mm над центром катушки, в которое устанавливается измеряемый образец. Вторая пластина прикручивается к первой двумя винтами так, что катушки оказываются соосны и образец находится между ними. К входной катушке через аттенюатор подключен генератор, а вторая приемная через трансформатор подключена ко входу синхронного детектора. Уровень сигнала на входной катушке выбирается таким, чтобы критическая температура не менялась при изменении уровня входного сигнала. При переходе образца в сверхпроводящее состояние в



**Рис. 3.** Температурная зависимость нормированной взаимной индукции  $(M/M_n)^{-1} \sim \Lambda$  для бислоя NbN/Al с толщинами  $d_{\text{NbN}} = 15$  nm и  $d_{\text{Al}} = 29$  nm, а также пленки NbN с  $d_{\text{NbN}} = 13.5$  nm.  $M_n$  — взаимная индукция при температуре незначительно выше  $T_c$ .

результате экранировки сигнал на приемной катушке падает. Однако на толстых сверхпроводящих пленках было обнаружено, что после падения сигнала примерно в 200 раз он выходит на константу. Так же этот остаточный сигнал виден, если разнести приемную и передающую катушку далеко друг от друга. Уровень паразитного сигнала определяется наводкой через провода. Было также обнаружено, что при подключении входной катушки без трансформатора, уровень наводки примерно в 500 раз меньше начального уровня сигнала. Однако в этом случае хуже отношение сигнал—шум, и приходится добавлять уровень входного сигнала от генератора по мере падения принимаемого сигнала для снятия характеристик с малым шумом и в тоже время избежать индукционного разогрева образца вблизи критической температуры. Фаза полезного сигнала и фаза наводки как правило отличаются и в эксперименте, когда сигнал становится меньше наводки изменяется фаза принимаемого сигнала.

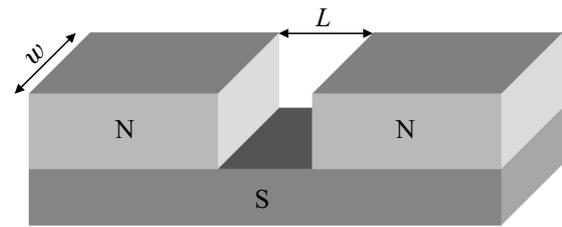
В нашем случае можно считать, что при  $T < T_c$  обратная величина взаимной индукции  $M^{-1} \sim \Lambda$ . На рис. 3 приведены температурные зависимости обратной величины нормированной взаимной индукции  $(M/M_n)^{-1} \sim \Lambda$  для бислоя NbN/Al, а также пленки NbN. Здесь  $M_n$  — взаимная индукция при температуре немного выше  $T_c$ . Толщина пленки NbN была равна  $d_{\text{NbN}} = 15$  nm, то есть равнялась примерно  $2\xi_{\text{NbN}}$  в этом материале [3]. Значительное увеличение эффекта экранирования в бислое NbN/Al по сравнению с тонкой пленкой NbN свидетельствует о сильном эффекте близости в исследованной структуре.

### 3. Эффект Джозефсона в бислоях NbN/Al

Эффект Джозефсона в двухслойных структурах нормальный металл — сверхпроводник ранее активно исследовался в мостиках переменной толщины типа SN–N–SN, предложенных в работе [3]. В этих МПТ (VTB — variable thickness bridge) в качестве материала мостика использовался нормальный металл, а берега формировались из сверхпроводника либо легкоплавкого типа Sn [4], либо тугоплавкого типа Nb [5]. Принципиальным условием наблюдения эффекта Джозефсона в таких структурах является наличие эффекта близости между слоями нормального металла и напыленного поверх него слоя сверхпроводника. Следует отметить, что тонкие пленки сверхпроводника ранее использовались в качестве материалов для изготовления мостиков. Например, в работе [6] изучались мостики из Nb. Более того, для уменьшения перегрева мостиков на берега из Nb наносились пленки золота. Однако в бислоях Nb и Au не наблюдался эффект близости и преимущества МПТ реализовать не удалось.

Ниже будут представлены результаты исследования мостиков переменной толщины (рис. 4) типа NS–S–NS, в которых в качестве материала мостика используется сверхпроводник NbN, а берега мостика изготовлены из бислоя NbN/Al. Для наблюдения эффекта Джозефсона мы изготавливали сначала SN мостики из бислоя шириной  $w$  от 3 до  $50 \mu\text{m}$ . Мостики формировались методом ионного травления Al и NbN ионами  $\text{Ar}^+$  в установке Plasmalab 80 plus (Oxford Instruments), оснащенной источниками емкостной (HF) и индуктивной (ICP) плазмы. Затем в этих мостиках были изготовлены поперечные „канавки“ шириной от 10 до  $30 \text{ nm}$ , в которых был полностью или частично удален верхний слой Al. Таким образом были созданы мостики переменной толщины типа NbN/Al–NbN–NbN/Al.

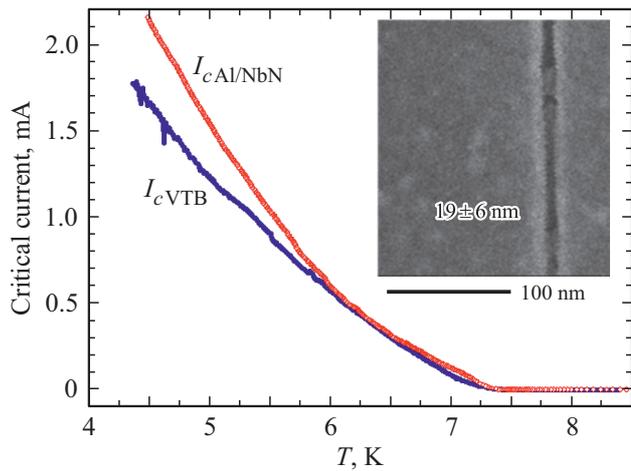
Джозефсоновский переход на основе структур NbN/Al формировался локальным удалением верхнего слоя алюминия путем распыления области размером  $L$  сфокусированным пучком ионов гелия  $\text{He}^+$ . Распыление выполнялось с помощью гелиевого ионного микроскопа Carl Zeiss Orion, оборудованного литографической системой Nanomaker, при энергии ионов  $35 \text{ keV}$  и токе пучка около  $3 \text{ nA}$ . Облучаемая структура представляла собой прямоугольную полосу ориентированную перпендикулярно предварительно сформированному мостику. Ширина прямоугольных полос составляла 5, 15 и  $25 \text{ nm}$ . Облучение производилось растровым заполнением структуры с шагом между точками  $1 \text{ nm}$ . Время воздействия в одной точке соответствовало дозе порядка  $10^{19} \text{ cm}^{-2}$ . Для точного определения дозы, необходимой для распыления, проводились предварительные оценки скорости распыления двухслойной структуры. На первом этапе определялась доза, необходимая для полного удаления структуры с сапфировой подложки. Необходимо отметить, что полученные значения дозы зависели от ширины



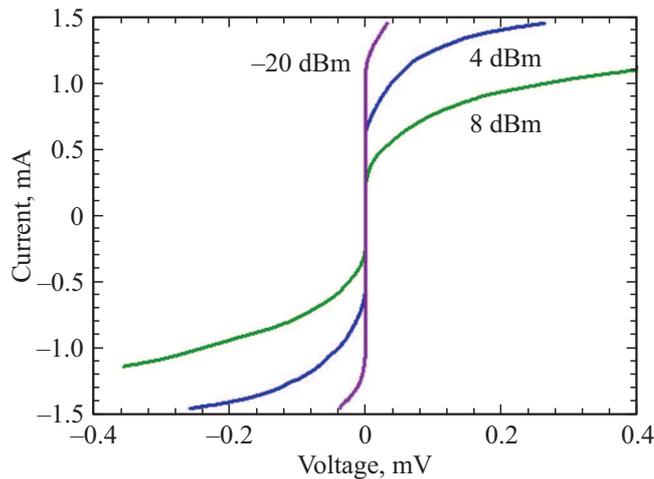
**Рис. 4.** Схематическое изображение мостика переменной толщины шириной  $w$  и длиной  $L$ , в котором в качестве материала мостика  $S$  используется сверхпроводник NbN, а берега мостика изготовлены из SN бислоя NbN/Al.

облучаемой полосы, поскольку размеры области рассеяния ионов гелия в веществе при используемой энергии превышают ширину облучаемой области более чем на порядок. Затем оценивалось время необходимое для удаления верхнего слоя алюминия. При этом учитывалось отношение коэффициентов распыления алюминия и нитрида ниобия, которое, согласно оценке с использованием программного пакета SRIM [7], составляло порядка 1.4. Поликристалличность распыляемых пленок не учитывалась. Контроль получаемых структур осуществлялся с помощью сканирующей ионной микроскопии в режиме регистрации вторичных электронов с использованием детектора Эверхарта–Торнли. Для устранения артефактов, вызванных накоплением электрического заряда в сапфировой подложке, применялась компенсация заряда облучением расфокусированным пучком электронов с энергией  $500 \text{ eV}$  после окончания каждой строки сканирования.

В результате распыления были получены „канавки“, определяющие длину МПТ  $L$  и в среднем равные  $9 \pm 5$ ,  $19 \pm 6$  и  $29 \pm 8 \text{ nm}$  для номинальных ширин облучаемых полос 5, 15 и  $25 \text{ nm}$  соответственно. Увеличение размера  $L$  по сравнению с размерами облучаемой области может быть обусловлено как конечными размерами ионного пучка, связанными с неточностью фокусировки, так и рассеянием ионов в распыляемом материале. Изучение канавок показало, что разброс по  $L$  и неровные края канавок обусловлены, по-видимому, также различной скоростью распыления зерен разной ориентации, которые можно было, в частности, наблюдать внутри наиболее широкой канавки. Более того, в процессе травления мы не могли контролировать степень удаления Al, что явилось дополнительной причиной значительного разброса параметров исследованных структур. В связи с этим в настоящее время не были проведены систематические исследования зависимостей параметров МПТ от длины  $L$  и ширины  $w$ . Ниже будут описаны результаты исследования мостика переменной толщины шириной  $w = 20 \mu\text{m}$  и длиной  $L = 20 \text{ nm}$ . В отдельных SN мостиках верхний слой не удалялся и эти структуры использовались как контрольные. Измерение зависимостей от температуры (рис. 5) критических токов SN мостика  $I_{c\text{Al/NbN}}(T)$  и МПТ  $I_{c\text{VTB}}(T)$  показало, что при



**Рис. 5.** Температурная зависимость критических токов мостика из бислоя  $I_{cAl/NbN}$  и мостика переменной толщины  $I_{cVTB}$  шириной  $w = 20 \mu\text{m}$ , длиной  $L \approx 20 \text{ nm}$ .



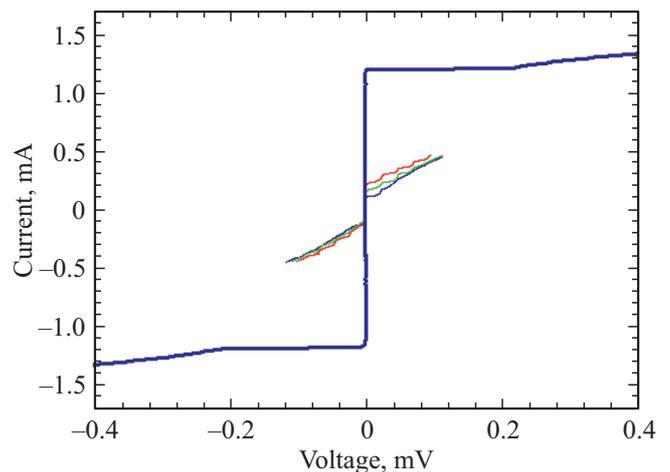
**Рис. 6.** Изменение ВАХ SN мостика шириной  $w = 20 \mu\text{m}$  при температуре 5.5 K в результате нагрева под действием СВЧ с относительной мощностью равной  $-20 \text{ dBm}$ ,  $4 \text{ dBm}$  и  $8 \text{ dBm}$ .

температурах ниже 6 K  $I_{cVTB}(T)$  становится меньше  $I_{cAl/Nb}(T)$  и реализуется одно из условий для создания джозефсоновской слабой связи.

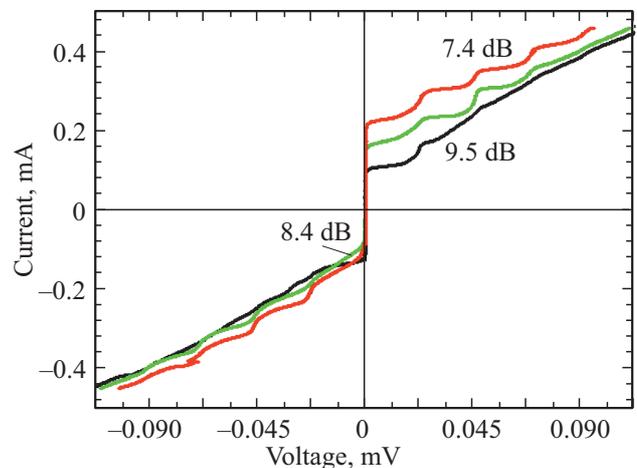
Для доказательства существования эффекта Джозефсона мостики облучались СВЧ сигналом с частотой 11–12 GHz. При облучении сплошных SN мостиков ступени Шапиро не наблюдались при всех температурах. Было зафиксировано только изменение ВАХ в результате нагрева мостиков под действием СВЧ (рис. 6). При температуре 4.2 K нам также не удалось наблюдать ступени Шапиро и соответственно эффект Джозефсона в исследованных мостиках переменной толщины. Однако при незначительном повышении температуры до 5.5 K были зафиксированы ступени тока, показанные на рис. 7. При облучении МПТ ступени тока проявлялись при приложении небольшой мощности СВЧ. Их амплитуда

осциллировала с изменением относительной мощности  $P$  внешнего сигнала (рис. 8). Действительно, при  $P = 7.8 \text{ dB}$  мы наблюдаем примерно равные по амплитуде ступени тока. Возрастание  $P$  до 8.5 dB приводит к подавлению нечетных 1-й и 3-й ступеней тока и подрастанию 2-й ступени. С ростом  $P$  до 9.5 dB на вольтамперной характеристике видна наиболее четко только 1-я ступень тока. Таким образом, мы можем говорить об осцилляции ступеней тока в зависимости от внешнего сигнала. Это является следствием существования эффекта Джозефсона в исследованных коротких ( $L \approx 3\xi_{NbN}$ ) МПТ. Упомянутое выше повышение температуры от 1.3 K до 5.5 K позволило уменьшить влияние джоулевого разогрева и, соответственно, усилить джозефсоновские свойства.

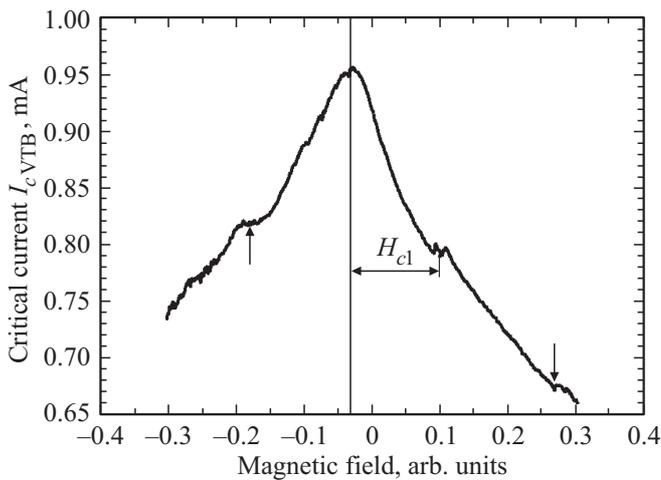
Как следует из рис. 8 нормальное сопротивление  $R_N$  МПТ, определенное по наклону ВАХ при воздействии СВЧ поля, равно  $R_N \approx 0.6 \Omega$ . Следовательно, при оптимальной ширине контакта  $w \leq 1 \mu\text{m}$  оно может легко превысить  $10 \Omega$ , что очень важно для высокочастотных



**Рис. 7.** ВАХ мостика переменной толщины в автономном режиме и при воздействии СВЧ сигнала при температуре 5.5 K.



**Рис. 8.** ВАХ мостика переменной толщины при воздействии СВЧ сигнала при температуре 5.5 K.



**Рис. 9.** Зависимость критического тока мостика переменной толщины  $I_{cVTB}$  шириной  $w = 20 \mu\text{m}$  от магнитного поля.

применений рассматриваемых МПТ в качестве детекторов, смесителей и источников электромагнитного излучения. Учитывая, что при незначительном уменьшении  $L$  критический ток МПТ может достигать 2 мА при 4.2 К, можно ожидать повышения характерного напряжения таких контактов до значений  $V_c \geq 1 \text{ mV}$  и соответственно характерной частоты до 500 GHz. Это открывает возможности применения исследованных МПТ в частном диапазоне до 1 THz.

Важным признаком существования эффекта Джозефсона являются осцилляции  $I_c$  в зависимости от приложенного магнитного поля. Мы исследовали наши контакты в очень слабом магнитном поле (рис. 9). Магнитное поле, перпендикулярное плоскости контакта генерировалось небольшой катушкой с током. Зависимость  $I_{cVTB}(H)$  характерна для очень широких джозефсоновских контактов с  $w \gg \lambda_J$ , где  $\lambda_J$  — джозефсоновская глубина проникновения магнитного поля. По нашим оценкам  $w/\lambda_J > 100$ . Из рис. 9 видно, что с ростом тока, пропускаемого через магнитную катушку,  $I_{cVTB}(H)$  спадает линейно с полем до достижения некоторого критического поля  $H_{c1}$ , при котором разрушается способность контакта экранировать внешнее поле и в него проникают джозефсоновские вихри [8]. Стрелками на рис. 9 отмечены точки, соответствующие проникновению джозефсоновских вихрей в контакт.

#### 4. Заключение

Были изготовлены и исследованы бислои NbN/Al с сильным эффектом близости. В структурах из таких слоев были созданы мостики переменной толщины типа Al/NbN–NbN–Al/NbN, в которых наблюдался эффект Джозефсона. Одно из проявлений этого эффекта связано с наблюдением ступенек тока под действием внешнего СВЧ сигнала и осцилляциями их амплитуды с мощно-

стью внешнего воздействия. Второе проявление джозефсоновского эффекта связано с зависимостью  $I_{cVTB}(H)$  и наблюдением на ней особенностей, вызванных разрушением мейснеровского состояния и проникновением джозефсоновского вихря в МПТ. Однако наблюдаемые ступени имели малый, по сравнению с джозефсоновской резистивной моделью [8], размах по току, а также малую глубину модуляции критического тока от магнитного поля. Оба этих факта могут свидетельствовать о сильном отличии ток-фазового соотношения в исследованных МПТ от синусоидальной зависимости [9].

#### Благодарности

Авторы благодарят Н.В. Рогожкину за поведение фотолитографии, ионного и плазмо-химического травления тонких пленок NbN и Al при изготовлении SN мостиков. Результаты получены с использованием оборудования Междисциплинарного ресурсного центра по направлению „Нанотехнологии“ Научного парка СПбГУ, а также оборудования ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“.

#### Финансирование работы

Авторы благодарят за финансовую поддержку Российский научный фонд, грант № 15-12-10020 (исследование эффекта Джозефсона в бислоях NbN и Al) и Программу фундаментальных исследований Президиума РАН № 12 „Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости“.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] D.Yu. Vodolozov, A.Yu. Aladyshkin, E.E. Pestov, S.N. Vdovichev, S.S. Ustavshikov, M.Yu. Levichev, A.V. Putilov, P.A. Yunin, A.I. El'kinal, N.N. Bukharov, A.M. Klushin. *Supercond. Sci. Technol.* **31**, 115004 (2018).
- [2] J.H. Claassen, J.M. Byers, S. Adrian. *J. Appl. Phys.* **82**, 3028 (1997).
- [3] D. Hazra, N. Tsavdaris, S. Jebari, A. Grimm, F. Blanchet, F. Mercier, C. Chapelier, M. Hofheinz. *Supercond. Sci. Technol.* **29**, 105011 (2016).
- [4] К.К. Лихарев. *ЖЭТФ* **61**, 1700 (1971).
- [5] В.Н. Губанков, В.П. Кошелец, Г.А. Овсянников. *ЖЭТФ* **71**, 348 (1976).
- [6] R.W. Moseley, W.E. Booij, E.J. Tarte, M.G. Blamire. *Appl. Phys. Lett.* **75**, 262 (1999).
- [7] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **268**, 1818 (2010). doi: 10.1016/j.nimb.2010.02.091.
- [8] К.К. Лихарев, Б.Т. Ульрих. *Системы с джозефсоновскими контактами*. Изд-во МГУ, М. (1978).
- [9] A.A. Golubov, M.Yu. Kupriyanov, E. Ilichev. *Rev. Mod. Phys.* **76**, 411 (2004).

Редактор Т.Н. Василевская