

06

## Торцевые джозефсоновские переходы с прослойкой из нитрида кремния

© С.Н. Вдовичев, А.Ю. Климов, Ю.Н. Ноздрин, В.В. Рогов

Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород  
E-mail: vdovichev@ipm.sci-nnov.ru.

Поступило в Редакцию 4 ноября 2003 г.

На стыке двух сверхпроводящих пленок ниобия изготовлены торцевые джозефсоновские переходы с прослойкой из нитрида кремния малой емкости. Приведены основные результаты экспериментальных исследований электрофизических свойств переходов.

Джозефсоновские переходы на основе ниобия являются одними из основных элементов современной криоэлектроники. Данная работа посвящена исследованию торцевых („edge-type“) джозефсоновских переходов Nb–SiN<sub>x</sub>–Nb малой емкости с критическими токами 10–1000  $\mu$ A и нормальным сопротивлением 1–10  $\Omega$ . Подобные переходы могут быть использованы как в СВЧ-технике (смесители, умножители и др.) [1], при построении программируемых эталонов напряжения [2], так и в элементах квантовой логики (при емкостях в диапазоне 10<sup>-15</sup>–10<sup>-16</sup> F и критических токах не более 10  $\mu$ A) [3]. Поперечный разрез контактов Nb–SiN<sub>x</sub>–Nb показан схематически на рис. 1. Отличительной особенностью изготовленных переходов является то, что второй сверхпроводящий электрод подходит в стык к первому электроду, а не покрывает его сверху через слой диэлектрика, как это обычно делается [4,5], что позволяет уменьшить паразитную емкость переходов. Подобная геометрия контактов позволяет их использовать для исследований субмикронных магнитных структур [6,7]. Насколько нам известно, такие торцевые переходы изготовлены впервые. В работе приведены основные результаты исследования электрофизических характеристик изготовленных переходов.

Переходы формировались на стандартных кремниевых пластинах. На подложку магнетронным распылением последовательно наносились пленки Nb<sup>I</sup> (~ 100 nm), аморфный диэлектрический слой SiN<sub>x</sub> (~ 50 nm) и металлическая пленка NiCr (~ 200 nm), из которой затем

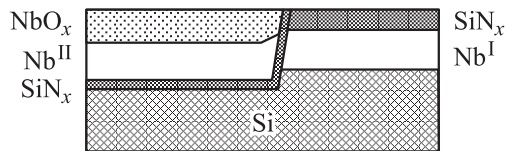


Рис. 1. Поперечный разрез контакта Nb–SiN<sub>x</sub>–Nb.

фотолитографическими методами формировалась маска необходимой формы. Далее открытые участки структуры Nb<sup>I</sup>/SiN<sub>x</sub> удалялись ионно-химическим травлением, при этом открывался торец металлического слоя Nb<sup>I</sup>. Прослойка SiN<sub>x</sub> и вторая пленка Nb<sup>II</sup> наносились магнетронным распылением с предварительной очисткой торцевой поверхности ионным травлением в атмосфере Ar. Отметим, что после напыления прослойки SiN<sub>x</sub>, разделяющей два Nb электрода, проводилось ее окисление для „закрытия“ возможных микропроколов в пленке. Изготовление структуры завершалось анодным травлением пленки NiCr и фотолитографическим формированием рисунка второго электрода. Площадь изготовленных переходов составляла доли квадратного микрона. Методика изготовления торцевых джозефсоновских контактов оказалась хорошо воспроизводимой, переходы показали высокую стабильность во времени, что немаловажно для практических применений.

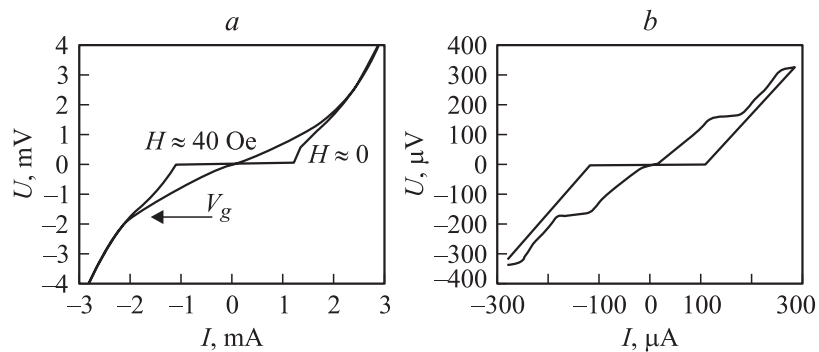
Измерения электрофизических свойств переходов проводились в гелиевом криостате стандартным четырехконтактным методом. Исследовались переходы с толщиной прослойки в диапазоне 1–5 nm. Типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) нескольких изготовленных переходов с прослойками различной толщины с магнитным полем и без него, при СВЧ-облучении приведены на рис. 2. Основными особенностями этих характеристик являются:

безгистерезисное поведение ВАХ, указывающее на малые (меньше единицы) значения безразмерного параметра емкости Маккамбера–Стюарта  $\beta_c = (2e/\hbar)I_c R_N^2 C$ , что позволяет оценить емкость перехода  $C$  менее  $10^{-11}$ – $10^{-12}$  F. Оценки емкости  $C$ , исходя из геометрических размеров перехода и типичных параметров аморфного Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, дают значения порядка  $10^{-15}$ – $10^{-16}$  F;

наличие излома при напряжении  $V_g \sim 1.8$  mV, соответствующем энергии щели для ниобия;

значительный избыточный ток;

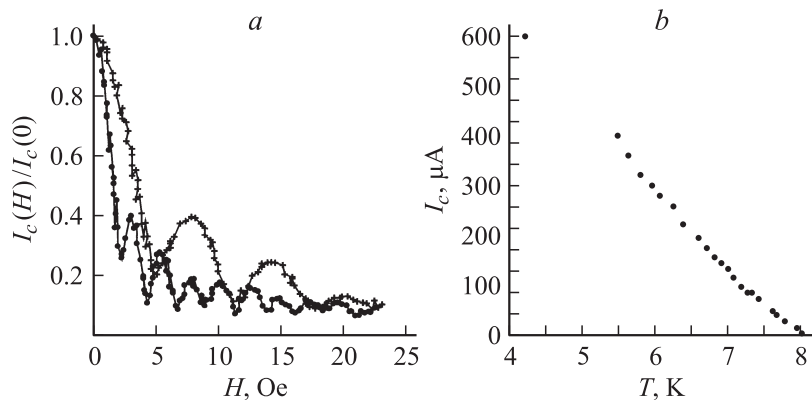
демонстрация постоянного и переменного эффектов Джозефсона.



**Рис. 2.** Влияние на вольт-амперную характеристику переходов: *a* — магнитного поля, *b* — СВЧ-волны ( $f = 80$  GHz).

При облучении переходов интенсивной СВЧ-волной частотой  $f = 80$  GHz на ВАХ видны ярко выраженные джозефсоновские ступени тока. Напряжение, при котором возникают ступеньки, соответствует  $U_n = (h/2e)fn \approx 180 \mu\text{V}$ , где  $n = 1, 2, \dots$ . Величина ступеней, а также критический ток осциллируют с увеличением мощности излучения.

Зависимость критического тока переходов от внешнего магнитного поля  $I_c(H)$  близка к обычной „фраунгоферовой“ с периодом, обратно пропорциональным ширине перехода. Дифракционная картина для переходов различной ширины, изготовленных в одном технологическом цикле, приведена на рис. 3, *a*. Период осцилляций примерно в 5 раз меньше, чем следует ожидать из простого расчета „эффективной“ площади джозефсоновского контакта [8]. Это расхождение можно связать с размагничивающим действием сверхпроводящих берегов перехода, приводящим к эффективному усилению поля в области перехода [9]. Заметим, что теория подобных переходов до конца еще не разработана [10]. Наличие большого числа осцилляций в дифракционной картине говорит об отсутствии закороток в переходе и однородности барьера. По численным оценкам, джозефсоновская глубина проникновения даже при максимальных плотностях тока ( $\sim 10^5$  A/cm<sup>2</sup>) не превышает ширину перехода, т.е. контакты являются малыми. Зависимость критического тока от температуры  $I_c(T)$  для одного из переходов с относительно большим критическим током приведена на рис. 3, *b*. Зависимость близка к линейной во всем измеренном



**Рис. 3.** Зависимости: *a* —  $I_c(H)$  для переходов шириной 5 и  $8 \mu\text{m}$ . *b* —  $I_c(T)$  для перехода шириной  $5 \mu\text{m}$ .

интервале температур. Подобное поведение, как известно, характерно для переходов сверхпроводник–изолятор–металл–сверхпроводник (S–I–N–S) [8] или сверхпроводник–полупроводник–сверхпроводник (S–Sm–S) [11].

На данном этапе работы прямого исследования структуры прослойки не проводилось и о ней можно судить лишь по косвенным данным. Были проведены измерения и определены основные тенденции зависимостей характеристик переходов от толщины прослойки  $\text{SiN}_x$ . За один технологический цикл на одной подложке была изготовлена серия торцевых переходов с прослойкой переменной толщины. Толщина прослойки диэлектрика монотонно менялась от 5 до 1 nm по длине подложки, критические токи переходов при этом изменялись в диапазоне  $10\text{--}1000 \mu\text{A}$  ( $10^2\text{--}10^5 \text{ A/cm}^2$ ), сопротивление от 5 до  $1 \Omega$  соответственно. По нашим оценкам средних скоростей напыления  $\text{SiN}_x$ , критический ток  $500 \mu\text{A}$  (при площади контакта  $0.8 \mu\text{m}^2$ ) соответствует толщине прослойки 2 nm. Зависимость критического тока от толщины прослойки имеет экспоненциальный характер. В то же время с увеличением толщины прослойки сопротивление монотонно растет, примерно по линейному закону. Подобные зависимости критического тока и сопротивления от толщины прослойки часто возникают при использовании в качестве прослойки полупроводниковых материалов [8] и определяются особенностями технологических процессов изготовления.

В дальнейшем мы планируем провести электрофизические исследования переходов ниже 4.2 К; уточнить структуру прослойки  $\text{SiN}_x$  и ее влияние на свойства перехода; изготовить джозефсоновские контакты с критическими токами менее  $10 \mu\text{A}$ .

Авторы выражают благодарность А.А. Фраерману, А.В. Самохвалову за ценные обсуждения полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 03–02–16774) и программы РАН „Квантовая макрофизика“.

## Список литературы

- [1] *Лихарев К.К.* Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985. 320 с.
- [2] *Hamilton C.A.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2000. V. 71. P. 3611.
- [3] *Ioffe L.B., Geshkenbein V.B., Feigelman M.V.* et al. // Preprint. 1998. Condmat/9809116.
- [4] *Broom R.F., Ooesenbrug A., Walter W.* // *Appl. Phys. Lett.* 1980. V. 37. P. 237–329.
- [5] *Гудков А.Л., Куприянов М.Ю., Лихарев К.К.* // *Письма в ЖТФ.* 1985. Т. 11. В. 23. С. 1423–1428.
- [6] *Aladyshkin A.Y., Fraerman A.A., Gusev S.A.* et al. // *JMMM.* 2003. V. 258–259. P. 406–408.
- [7] *Самохвалов А.В.* // *ЖЭТФ.* 2003. Т. 78. В. 6. С. 822–826.
- [8] *Бароне А., Патерно Дж.* Эффект Джозефсона: физика и применения. М.: Мир, 1984. 640 с.
- [9] *Gu J., Cha W., Namba S.* // *J. Appl. Phys.* 1979. V. 50. P. 6437–6442.
- [10] *Kagan V.G., Dobrovitski V.V., Clem J.R.* et al. // *Phys. Rev. B.* 2001. V. 63. P. 144501.
- [11] *Губанков В.Н., Ковтонок С.А., Кошелец В.П.* // *ЖЭТФ.* 1985. Т. 89. В. 4. С. 1335–1341.