

08

Изготовление и исследование структур нормальный металл-изолятор-сверхпроводник Al/AlO_x/Nb

© М.А. Маркина,^{1,2} А.М. Чекушкин,¹ М.А. Тарасов,¹ М.Ю. Фоминский,¹ Т.Д. Пацаев,³ А.Л. Васильев³

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009 Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
109028 Москва, Россия

³Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН,
59119333 Москва, Россия
e-mail: markina_ma@hitech.cplire.ru

Поступило в Редакцию 15 мая 2024 г.

В окончательной редакции 15 мая 2024 г.

Принято к публикации 15 мая 2024 г.

Представлены разработка, изготовление и исследование структур на основе туннельных переходов нормальный металл-изолятор-сверхпроводник. Произведен анализ морфологии трехслойной структуры Al/AlO_x/Nb методами просвечивающей электронной микроскопии, просвечивающей растровой электронной микроскопии и электронной дифракции. Для формирования туннельных переходов использована технология Selective Niobium Etching and Anodization Process. Достигнут параметр качества изготовленных структур — отношение $R_d/R_n(V=0) = 53$ при температуре 2.8 К, теоретически ожидаемое значение составляет 54. Разработан дизайн структур из последовательно-параллельного электрического соединения пар туннельных контактов. Изготовлены интегральные структуры термометров, dR/dT которых в 2.5, 5 и 12.5 раз больше, чем одиночного туннельного перехода.

Ключевые слова: туннельный переход, нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (НИС), цепочки НИС контактов, SNEAP (от англ. „Selective Niobium Etching and Anodization Process“), плазмохимическое травление, просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ).

DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58343.169-24

Введение

Детекторы на основе переходов нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (НИС-переходов) зарекомендовали себя как высокочувствительные приемные устройства в широкой полосе частот от 0.1 до 1 THz [1–3]. Основным материалом при изготовлении таких структур является Al, у которого температура сверхпроводящего перехода 1.2 К, а рабочие температуры этих детекторов — 0.3 К и ниже. В настоящей работе представлены разработка, изготовление и исследование НИС-переходов из Nb и Al при температурах кипения жидкого гелия (4.2 К): металл ниобий ($T_c = 9.2$ К) переходит в сверхпроводящее состояние, а Al ($T_c = 1.2$ К) остается в состоянии нормального металла. Повышение рабочей температуры структур на основе НИС-переходов позволяет избежать использования громоздких и сложных криостатов растворения.

Классическим методом формирования НИС-переходов является метод теневого напыления [4], однако термически осажденный ниобий по своим характеристикам хуже, чем при магнетронном распылении [5]. В работе оптимизирован процесс изготовления трехслойной структуры Al/AlO_x/Nb, ее формирование происходит без разрыва вакуума с помощью магнетронного распыления

с последующим изготовлением НИС-переходов методом контактной фотолитографии.

При измерении отклика приемной структуры на излучение важно знать не только температуру абсорбера, но и понять, повышена ли изначально электронная температура приемной структуры из-за тепловых шумов или электрических наводок. В настоящей работе представлены разработка и изготовление цепочек НИС-переходов, которые могут выполнять функцию термометра, расположенного непосредственно на исследуемом образце.

1. Принцип работы

При температуре ниже T_c Nb переходит в сверхпроводящее состояние, вольт-амперная характеристика (ВАХ) перехода Al/AlO_x/Nb нормальный металл-изолятор-сверхпроводник становится нелинейной. При приложении напряжения, по значению меньшего ширины щели, ток, протекающий через переход, возрастает по экспоненте, а при приложении больших напряжений значение тока стремится к асимптотическому значению V/R_n . При температурах $T \ll T_c$ значение $\Delta(T)$, где Δ — величина энергетической щели в спектре энергии сверхпроводника, T — температура электронной системы структуры, становится постоянным и приближается к значению $\Delta(0)$. Полный туннельный ток через переход

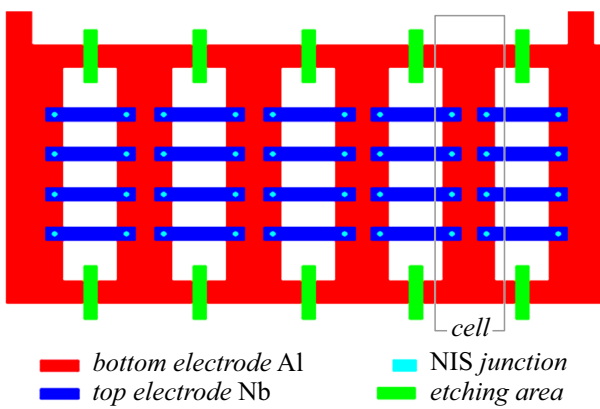


Рис. 1. Схема термометра из 40 НИС-переходов.

сверхпроводник-изолятор-нормальный металл определяется разностью $I_{S \rightarrow N}$ и $I_{N \rightarrow S}$ токов туннелирующих электронов. В случае малых напряжений на переходе и при выполнении условий $T \ll T_c$, $U < \Delta/e$ можно с высокой точностью описать форму ВАХ НИС-перехода с помощью выражения [2,6,7]:

$$I = \frac{1}{eR_n} \sqrt{2\pi kT\Delta} \exp\left(\frac{-\Delta}{kT}\right) \sinh\left(\frac{eV}{kT}\right), \quad (1)$$

где V — напряжение, приложенное к НИС-переходу, e — заряд электрона, k — постоянная Больцмана.

Следовательно, ток одночастичного туннелирования при приложенных напряжениях $U < \Delta/e$ будет зависеть от асимптотического сопротивления перехода и от температуры электронов нормального металла. По результатам измерения ВАХ туннельного перехода мы можем оценить электронную температуру металла с помощью формулы (1), поэтому структуру на основе НИС-переходов можно использовать для термометрии без дополнительной калибровки.

Была разработана конструкция термометров из параллельно и последовательно соединенных переходов типа нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (НИС). Образцы спроектированы из ячеек, каждая из которых представляет собой 8 НИС-переходов, соединенных нижним электродом. НИС-элементы, образованные на разных ячейках, соединяются между собой верхним сверхпроводящим ниобиевым электродом, образуя многоэлементные структуры (рис. 1). Особенностью конструкции является формирование нормального электрода большой площади, что позволяет надежно термализовать электронную систему нормального электрода. В работе мы изучаем структуры из соединенных последовательно и параллельно 40, 80 или 200 НИС-переходов. На рис. 2 приведено фото структуры из 40 НИС-элементов. Такая конструкция приведет к повышению надежности структуры, так как в случае, если один из переходов окажется нерабочим (в результате отсутствия удаления изоляции методом взрывной литографии в случае переходов маленькой площади или разрыва контакта между

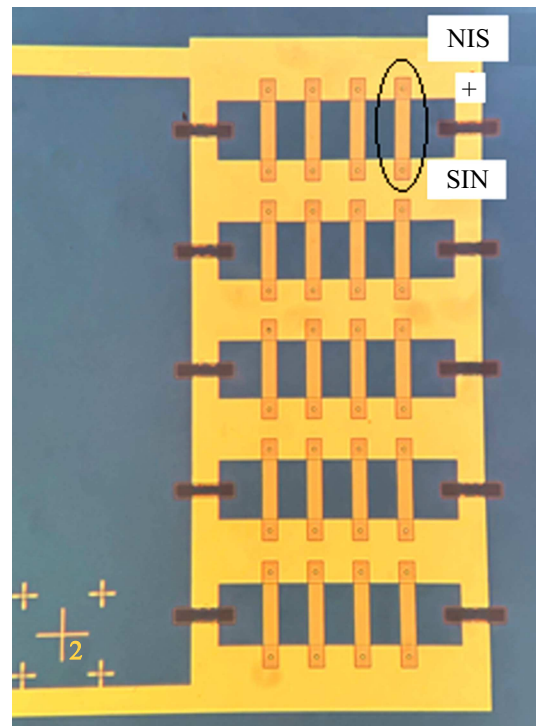


Рис. 2. Фото структуры из 40 НИС-переходов.

соседними НИС переходами и т.п.), то это повлияет на рабочие параметры (изменится R_n , а следовательно, и R_d), но структура останется рабочей — ток пойдет через другие соединения на цепочке. Объединение в последовательно-параллельные цепочки НИС-переходов дает большее асимптотическое и, следовательно, дифференциальное сопротивление образца, что является причиной увеличения значения отклика dR/dT структуры в 2.5, 5 и 12.5 раз соответственно.

2. Целевые параметры

В результате дифференцирования силы тока (1) по напряжению при выполнении вышеописанных условий получим выражение для дифференциальной проводимости. Обратной величиной является дифференциальное сопротивление

$$R_d = \frac{dV}{dI} = R_n \sqrt{\frac{kT}{2\pi\Delta}} \exp\left(\frac{\Delta}{kT}\right) \left\{ \cosh\left(\frac{eV}{kT}\right) \right\}^{-1}, \quad (2)$$

где R_n — асимптотическое сопротивление туннельного перехода при значениях приложенного напряжения, много больших V_g .

Если мы разделим обе части (2) на R_n , то справа получим выражение, значение которого при заданном напряжении V зависит только от температуры электронов в слое нормального металла. Для одиночной структуры при температуре 4.2 К теоретически ожидаемое значение параметра $R_d/R_n = 9.68$. Однако значение этого отношения может быть меньше вследствие

влияния тепловых шумов, электрических наводок или зашунтированности измеряемых структур, возникающей из-за микрозакоротов на формируемых переходах. По значению этого параметра мы можем судить о наличии возможных микрозакоротов или наличие тепловых, а также электрических наводок.

При последовательном и параллельном соединении структур величина R_d/R_n для цепочки переходов останется такой же, как и для одиночного НИС-перехода, поэтому качество многоэлементной структуры мы можем также оценивать по значению этого параметра. Напряжение максимальной нелинейности в формуле (2) будет изменяться кратно количеству переходов, соединенных последовательно в структуре.

Для оценки качества туннельного барьера мы используем параметр $R_n S$, где S — площадь формируемого перехода. На тестовых подложках мы формировали переходы с различным значением диаметров, поэтому R_n для них будет разным, а параметр $R_n S$ в случае идеально изготовленного туннельного барьера должен быть одинаковым. По разбросу параметра $R_n S$ на тестовой подложке можно оценить, насколько однородным вырос слой изолятора и, следовательно, применима ли используемая технология для изготовления многоэлементных структур. Если для конкретного перехода наблюдать значительные отклонения параметра $R_n S$ от среднего значения по подложке, то можно сделать вывод о неоднородности туннельного барьера в области перехода.

3. Описание технологии изготовления

Классическим методом формирования НИС-переходов является метод теневого термического напыления Al под скользящими углами. Однако термически осажденный ниобий по своим характеристикам хуже, чем при магнетронном распылении, поэтому мы исследуем процесс формирования трехслойной структуры Al/AIO_x/Nb без разрыва вакуума с помощью магнетронного распыления с последующим изготовлением НИС-переходов по технологии SNEAP.

На кремниевую подложку с помощью магнетронного высокочастотного (ВЧ) напыления осаждается 100 nm материала Al₂O₃ для защиты подложки от коррозии при последующих этапах плазмохимического травления. Далее на подложке методом фотолитографии формируется маска из фоторезиста, определяющая геометрию базового электрода, после чего происходит изготовление трехслойной структуры за один вакуумный цикл.

Таблица 1. Параметры окисления

Время термического окисления, min	$R_n S$ образца, $k\Omega \cdot \mu m^2$
30	2.25 ± 0.09
10	0.92 ± 0.03

Нижний слой из алюминия толщиной 100 nm осаждается методом магнетронного напыления в плазме аргона на постоянном токе. Барьерный слой формируется термическим окислением поверхности алюминия в чистом кислороде при постоянном давлении 10 mbar и комнатной температуре (20 °C). Время окисления варьировалось, прозрачность барьера и, следовательно, параметр $R_n S$ зависит от времени окисления (табл. 1). После окисления алюминия методом магнетронного напыления наносят верхний слой Nb толщиной 80–100 nm. В разд. 4 приведены изображения структуры нормальный металл-изолятор-сверхпроводник Al/AIO_x/Nb, полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

Площадь НИС-перехода формируется методом SNEAP с помощью плазмохимического травления в химически активной среде CF₄ путем удаления слоя верхнего Nb многослойной структуры по маске из фоторезиста (контактная фотолитография). В плазме CF₄ слой AIO_x не травится и действует как стоп-слой, предотвращая дальнейшее травление структуры. Далее производится анодизация в этиленгликолевом растворе пентабората аммония, в результате которой по периметру НИС-перехода вырастает оксидный слой, который позволяет избежать возникновения возможных микрозакоротов по торцу переходов. Затем методом RF-магнетронного напыления наносят слой SiO₂ толщиной 250 nm, обеспечивающий изоляцию между базовым и верхним подводящим электродами. Вскрытие контактов к переходам осуществляется методом взрывной литографии. Верхний электрод из Nb и контактные площадки из алюминия или золота формируются также методом взрывной контактной фотолитографии и изготавливаются DC-напылением в плазме аргона.

Изготовление цепочек переходов осуществляется по той же технологии: изначально изготавливается трехслойная структура, после чего формируются НИС-переходы. Для проведения процесса анодизации многоэлементной структуры все переходы формируются на общем электроде, тем самым после формирования они имеют общий электрический контакт по нижнему слою базового электрода. После напыления замыкателя и контактных площадок происходит травление трехслойной структуры насквозь для удаления мостиков анодизации (рис. 1). Стоит отметить, что при напылении слоя изоляции SiO₂ области мостиков анодизации закрываются резистом для того, чтобы впоследствии в этих местах было возможно реализовать процесс травления. Травление трехслойной структуры насквозь происходит в два этапа: травление верхнего Nb в течение 65 s в химически активной плазме CF₄, затем химическое травление AIO_x и Al в 1% водном растворе щелочи KOH в течение 80 s. Все изделие, кроме областей, где нужно удалить трехслойную структуру, покрывается резистом, что защищает его от плазмохимического и жидкостного травления. Стоит отметить, что мы наблюдаем уменьшение толщины резиста, но за оба этапа травления

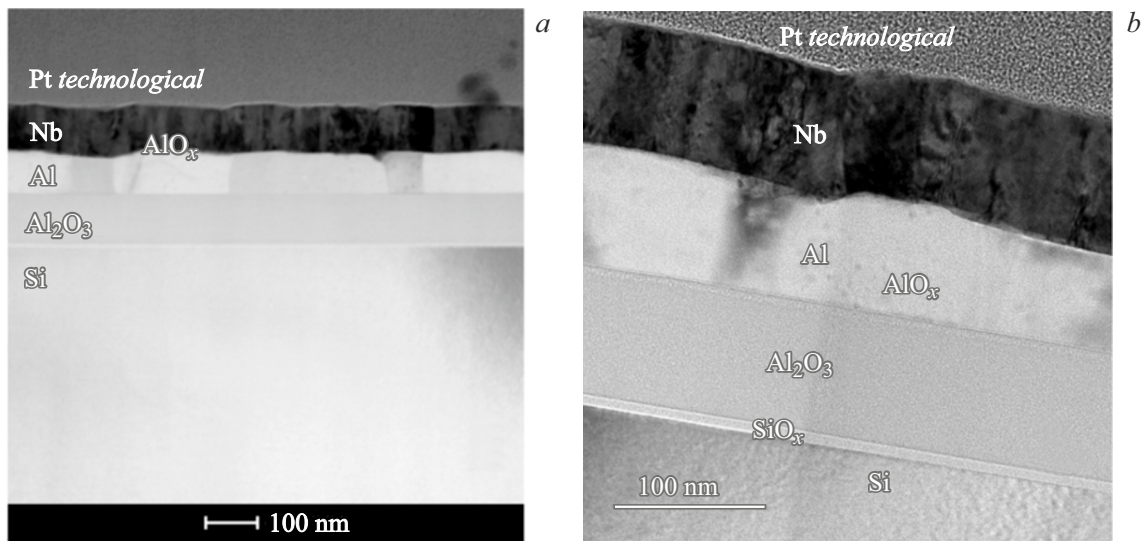


Рис. 3. Изображение Al/AIO_x/Nb на ТЕМ в режиме светлого поля.

остается порядка 1 μm резиста, и этого достаточно, чтобы предотвратить травление всей структуры.

4. Анализ поперечного среза трехслойной структуры Al-AIO_x – Nb

С помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ) и электронной дифракции (ЭД) были исследованы морфология трехслойной структуры и кристаллографические характеристики напыленных материалов. Для исследований методами ПЭМ/ПРЭМ/ЭД был сделан поперечный срез структуры методом фокусированного ионного пучка в двулучевом электронно-ионном микроскопе Versa (ThermoFisher Scientific, США). На поверхность образца был напылен слой Pt. Анализ проводился в просвечивающем/сканирующем электронном микроскопе (П/ПЭМ) Osiris (ThermoFisher Scientific, США) при ускоряющем напряжении 200 kV с темнопольным детектором (Fischione, США) и энергодисперсионным спектрометром SuperX (Bruker, США).

Напыление образца производилось на подложку Si(001). ПЭМ-изображение в режиме светлого поля среза трехслойной структуры Al/AIO_x/Nb представлено на рис. 3, *a*. На рис. 3, *b* приведены срезы всей тестовой структуры: кремниевая подложка, стоп-слой Al₂O₃, исследуемая структура Al/AIO_x/Nb, также присутствует слой технологической платины, необходимый для грамотного проведения исследования структуры методами ПЭМ, ПРЭМ и ЭД.

Можно видеть, что при магнетронном напылении происходит рост пленок Nb и Al кристаллитами, и в пленке нижнего электрода наблюдаются неравномерности. Так как последующие слои дублируют поверхность

нижнего Al, в формируемой далее структуре Al/AIO_x/Nb неровности сохраняются. В работе [8] сказано, что в областях неравномерностей туннельный барьер будет наиболее прозрачен, а значит через них преимущественно потечет туннельный ток. Если на область такой неровности попадет формируемый НИС-переход, то это, возможно, снизит его качество и ухудшит основные характеристики.

На электронно-лучевом снимке (рис. 4, *a*) показан слой Al₂O₃, далее — исследуемая трехслойная структура: слой Al, в котором есть области различной ориентации алюминия, тонкий туннельный барьер AlO_x и верхний электрод Nb. На рис. 4, *b* показана ориентация подложки Si(001), слой естественного окисла подложки и напыленный на нее стоп-слой Al₂O₃. По результатам ПЭМ-анализа можно сделать вывод, что ориентация подложки и напыляемого на нее материала Al различна, а также встречаются области различной ориентации алюминия. Это может оказать влияние на качество изготавливаемых туннельных переходов.

5. Исследование ВАХ образцов

По описанной технологии были изготовлены тестовые образцы одиночных туннельных переходов и структуры с параллельно и последовательно соединенными НИС-цепочками. Образцы измерялись в жидком гелии при температуре $T = 4.2$ К. Также образцы были исследованы в криостате замкнутого цикла Гиффорда-Мак-Магона с рабочей температурой 2.8 К. По четырехточечной схеме были ВАХ структур.

ВАХ одиночной НИС-структуры при измерении в жидком гелии (площадь перехода $\sim 15 \mu\text{m}^2$) и ее аппроксимация теоретической формулой (1) для одиночного тока представлены на рис. 5. Щель ниобия в сверхпро-

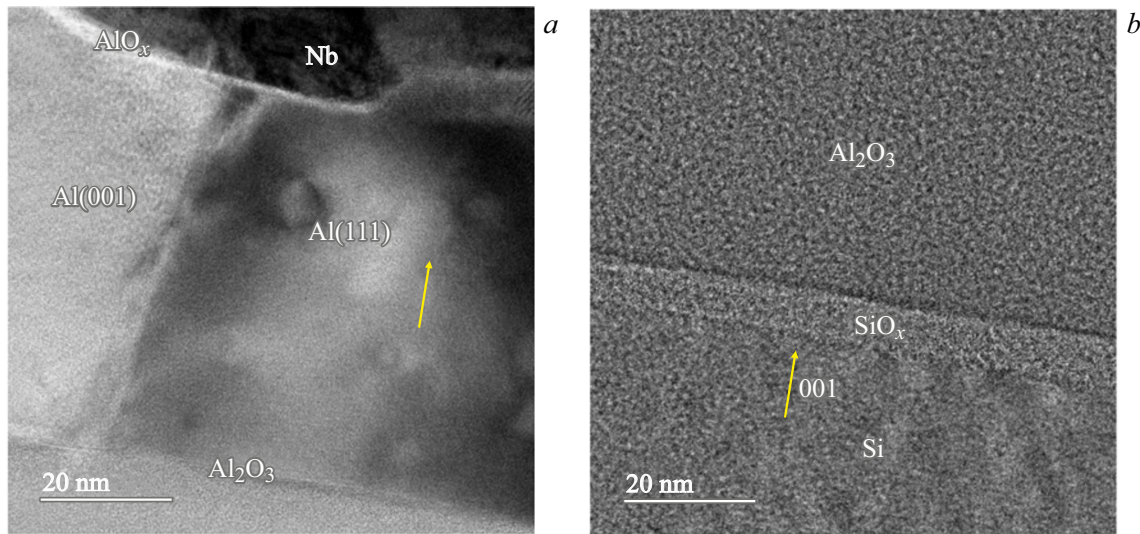


Рис. 4. Электронно-лучевые снимки Al/AIO_x/Nb.

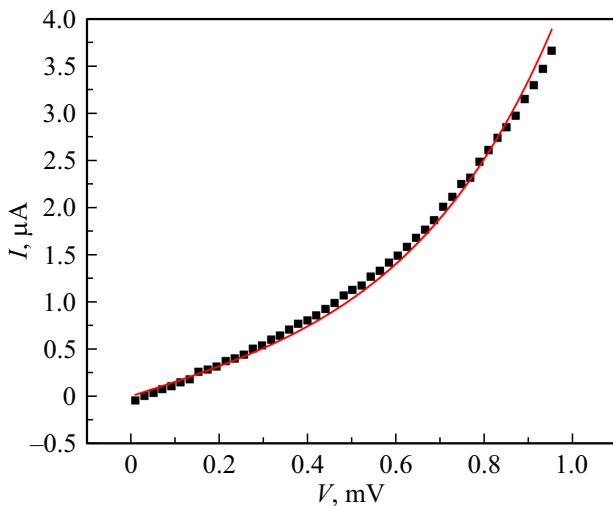


Рис. 5. ВАХ НИС одиночного перехода (квадраты) и ее аппроксимация теоретической кривой (сплошная линия) при $T = 4.2\text{ K}$.

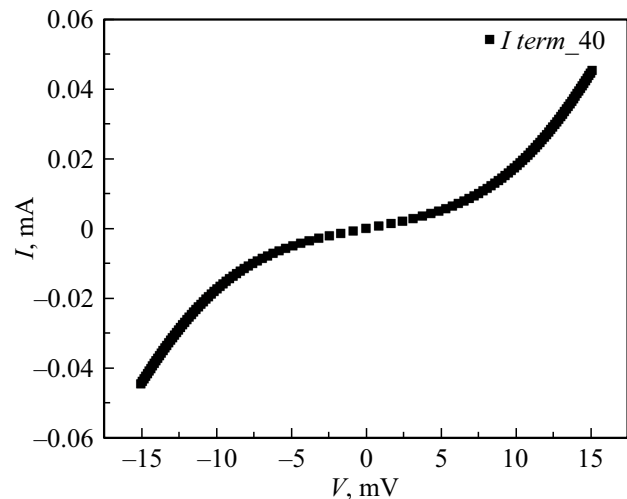


Рис. 6. ВАХ структуры из 40 НИС-переходов.

водящем состоянии $\Delta \approx 1.35 - 1.4\text{ meV}$. На рис. 6 представлена ВАХ структуры из 20 НИС-элементов, наблюдается суммарное значение ширины щели $\Delta \approx 14\text{ meV}$, что согласуется с дизайном конструкции, так как последовательно соединены 10 НИС-переходов.

На рис. 7 приведена экспериментальная зависимость R_d/R_n от напряжения смещения и аппроксимация теоретической кривой. Теоретически ожидаемое при температуре 4.2 К значение R_d/R_n составляет 9.68. Максимальное наблюдаемое на тестовых структурах при нулевом напряжении $R_d/R_n = 9.23$. Мы предполагаем, что отличие наблюдаемого характерного параметра обусловлено как наличием микрозакоротов по периметру НИС-перехода, так электрическими наводками при недо-

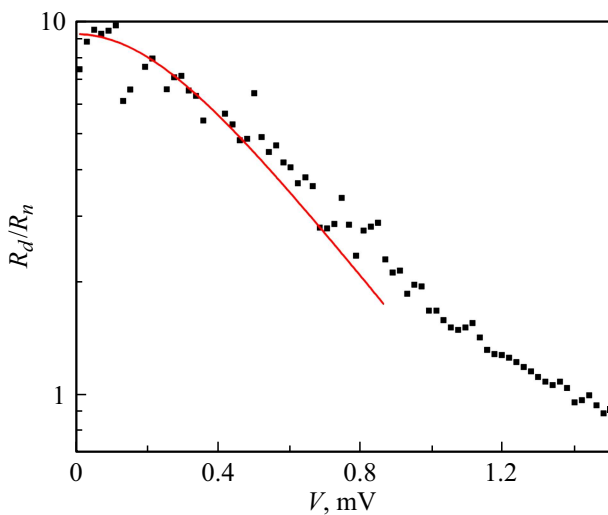
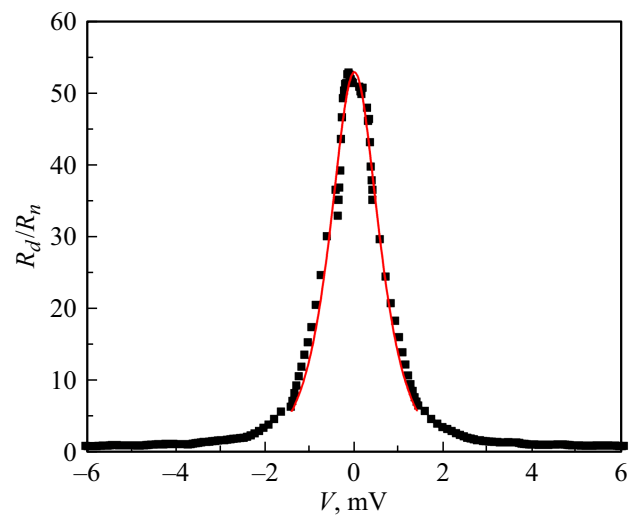
статочной экранировке и фильтрации, что связано с особенностями измерительной системы.

На рис. 8 приведена зависимость параметра R_d/R_n от подаваемого напряжения при температуре 2.8 К на тестовой структуре и ее аппроксимация теоретической кривой. Экспериментально полученный параметр имеет максимальное значение $R_d/R_n = 53.00$. Расчет, согласно формуле (2), приводит к максимальному теоретическому значению $R_d/R_n(V = 0) = 54.58$ при температуре 2.8 К.

На рис. 9 приведены зависимости дифференциального сопротивления $R(V)$ цепочек из 40, 80 и 200 НИС-переходов. Согласно рисунку, мы можем сделать вывод о том, что отклик на изменение подаваемого напряжения по сопротивлению структуры из большего числа элементов больше, чем у одиночного перехода, т.е. $dR_{50}/dV > dR_{10}/dV$.

Таблица 2. Основные характеристики одиночных и многоэлементных НИС-структур

Образец	d одиночного перехода, μm	$R_n S$, $\Omega \cdot \mu\text{m}^2$	Число последовательно соединенных переходов	R_d/R_n	T_{measured} , К
test_21	5.42 ± 0.10	1036.3	2	53.00	2.8
test_11	4.38 ± 0.03	903.3	1	9.23	4.2
test_11	3.35 ± 0.03	901.4	1	8.35	4.2
Term ch1	9.74 ± 0.03	921.4	10	8.33	4.2
			20	8.60	4.2
Term ch2	3.83 ± 0.03	934.3	10	7.33	4.2
			20	7.56	4.2
Term ch3	5.76 ± 0.03	932.8	10	8.51	4.2
			20	8.97	4.2
			50	9.25	4.2

**Рис. 7.** Параметр R_d/R_n НИС-перехода образца test_11. Квадраты — эксперимент, сплошная кривая — аппроксимация. $(R_d/R_n)_{\text{max}} = 9.23$.**Рис. 8.** Параметр R_d/R_n НИС-перехода образца test_21 при температуре 2.8 К. Квадраты — эксперимент, сплошная кривая — аппроксимация. $(R_d/R_n)_{\text{max}} = 53.0$.

В табл. 2 приведены значения параметров $R_n S$ и R_d/R_n для одиночных и многоэлементных структур при различных температурах.

Среднее значение параметра $R_n = 0.92 \pm 0.03 \text{ k}\Omega \cdot \mu\text{m}^2$ при времени окисления 10 min; $R_n = 2.25 \pm 0.09 \text{ k}\Omega \cdot \mu\text{m}^2$ при времени окисления 30 min. Максимальное среднеквадратичное отклонение $R_n S$ по подложке размера $24 \times 24 \text{ mm}$ не превышает 8%, т. е. способ формирования барьерного слоя обеспечивает равномерность толщины окисла и воспроизводимость параметра прозрачности барьера.

Среднее значение параметра R_d/R_n , наблюдаемого на одиночных тестовых структурах, соответствует 8.79 ± 0.47 . Наибольшее отклонение R_d/R_n от сред-

него значения по подложке размера $24 \times 24 \text{ mm}$ не превышает 4%. Отношение R_d/R_n для различных многоэлементных структур приведено в табл. 2. Из данных видно, что для различных термометров параметр R_d/R_n увеличивается с увеличением числа переходов. Мы полагаем, что ухудшению параметра способствует тепловой шум (шум Найквиста) измерительной установки, и одиночный НИС подвержен различным наводкам и шумам, а в случае цепочек большое последовательное сопротивление снижает ток от ЭДС наводок и тепловых шумов, тем самым уменьшая размытие по току. Измеряемое R_d/R_n больших структур выше, так как отношение шум/ток у них оказывается ниже, чем dI/I конструкции с меньшим числом элементов.

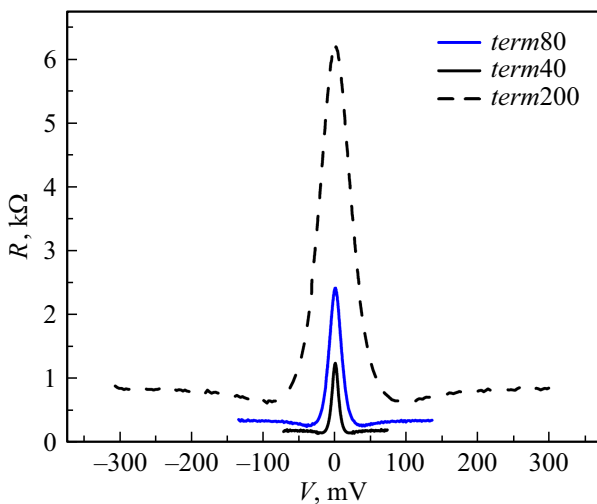


Рис. 9. Зависимость $R(V)$ при $T = 4.2$ К для цепочек НИС-переходов.

В работе [9] для уменьшения тепловых наводок рабочая структура измерялась по четырехточечной схеме через 4 дополнительных НИС-перехода, которые играли роль балластного сопротивления, находящегося при той же температуре, что и исследуемая структура. Такие „холодные“ резисторы вносили меньше теплового шума в измерения, чем резисторы, находящиеся в измерительной схеме при комнатной температуре. Для проверки нашего предположения мы планируем провести измерения с холодными резисторами. Для реализации этого можно добавить элемент сопротивления на структуру, изменив дизайн. Если проводить измерения структур в криостате охлаждения, то можно поместить балластное сопротивление непосредственно на ступень охлаждения внутри установки.

Заключение

Предложена технология изготовления НИС-структур с помощью магнетронного распыления и формирования областей переходов методом SNEAP. Изготовлены образцы с НИС-переходами на основе Nb и Al. Достигнут параметр качества изготовленных структур: для $T = 2.8$ К отношение $R_d/R_n = 53.00$ при теоретически ожидаемом 54.58. Опробованная технология позволяет изготовить качественные НИС-переходы, и может быть использована, например, для создания структур приемных устройств, охладителей и термометров.

На основе НИС-переходов Al/AIO_x/Nb изготовлены структуры, которые могут использоваться для термометрии. Измерения длинных цепочек НИС-переходов по сравнению со структурами из меньшего числа элементов и одиночных НИС показали более высокие значения параметра R_d/R_n , близкие к теоретически ожидаемым. Так как в результате оценки разброса параметров тестовых одиночных переходов, изготовленных на одной подлож-

ке, выявлено, что качество переходов одинаковое по всей подложке, мы считаем, что большинство переходов, из которых состоят НИС-массивы, хорошего одинакового качества, а полученные результаты свидетельствуют о проблемах, связанных с наличием наводок и тепловых шумов при измерениях ВАХ. Для борьбы с тепловыми шумами при измерениях ВАХ планируется проведение измерений с холодным резистором. Также планируется провести измерения отклика по сопротивлению на изменение температуры многоэлементных структур, сравнить температурную чувствительность образцов с разным числом переходов.

В работе [10] показано, что оптимизация роста нижнего слоя алюминия приводит к улучшению однородности толщины формируемого барьера и, следовательно, оптимизации свойств всей изучаемой структуры. Поэтому для повышения качества нижнего электрода и проверки влияния этого фактора на качество изготавливаемых переходов в дальнейшем планируется изготовление Al/AIO_x/Nb-структур методом напыления на горячую (до 400 °С) или холодную (77 К) подложку и исследование морфологии получившихся кристаллов, а также исследование ориентации роста пленок на подложку с другой ориентацией Si(111), предпочтительной для роста Al(111) пленок.

Благодарности

При изготовлении образцов использовано оборудование Уникальной научной установки № 352529 „Криоинтеграл“.

Финансирование работы

Изготовление тестовых образцов и экспериментальные измерения выполнены при поддержке гранта РФ №23-79-10262 (<https://rscf.ru/project/23-79-10262/>). Исследование морфологии изготовленных структур выполнено при поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-538).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

Список литературы

- [1] J. Clarke, G.I. Hoffer, P.L. Richards. Rev. Phys. Appliqué, **9** (1), 69 (1974). DOI: 10.1051/rphysap:019740090106900
- [2] D. Golubev, L. Kuzmin. J. Appl. Phys., **89** (11), 6464 (2001). DOI: 10.1063/1.1351002
- [3] М. Тарасов, Л. Кузьмин, Е. Степанов, И. Агуло, А. Калабухов, М. Фоминский, Z. Ivanov, T. Claeson. Письма в ЖЭТФ, **79** (6), 356 (2004). [M. Tarasov, L. Kuz'min, E. Stepantsov, I. Agulo, A. Kalabukhov, M. Fominskii, Z. Ivanov, T. Claeson. J. Experim. Theor. Phys. Lett., **79** (6), 298 (2004). DOI: 10.1134/1.1759413]

- [4] J. Niemeyer. PTB-Mitt, **84** (4), 251 (1974).
- [5] F.M. Al-Ghamdi, A. Ennawy, R.J. Bennett, A. Vradis. J. King Abdulaziz University-Science, **5** (1), 99 (1993).
DOI: 10.4197/Sci.5-1.9
- [6] I. Giaever. Phys. Rev. Lett., **5** (10), 464(1960).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.5.464
- [7] I. Giaever, K. Megerle. Phys. Rev., **122** (4), 1101(1961).
DOI: 10.1103/PhysRev.122.1101
- [8] L.J. Zeng, S. Nik, T. Greibe, P. Krantz, C.M. Wilson, P. Delsing, E. Olsson. J. Phys. D: Appl. Phys., **48** (39), 395308 (2015). DOI: 10.1088/0022-3727/48/39/395308
- [9] S. Fritz, L. Radtke, R. Schneider, M. Weides, D. Gerthsen. J. Appl. Phys., **125** (16), 165301 (2019).
DOI: 10.1063/1.5089871
- [10] А. Выставкин, Д. Шуваев, Л. Кузьмин, М. Тарасов, Э. Адерстед, М. Вилландер, Т. Клаесон. ЖЭТФ, **115** (3), 1085 (1999).