08

Термометры на основе НИС переходов диапазона температур 1.5–9.0 K

© М.А. Маркина,[1,2] М.А. Тарасов,[1] Р.А. Юсупов,[1] Ф.В. Хан,[1,3] М.Ю. Фоминский,[1] Р.К. Козулин,[1] А.М. Чекушкин[1]

[1] Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009 Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
109028 Москва, Россия
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия
e-mail: markina_ma@hitech.cplire.ru

Поступило в Редакцию 13 мая 2025 г.
В окончательной редакции 13 мая 2025 г.
Принято к публикации 13 мая 2025 г.

Представлены результаты исследования структур на основе туннельных переходов нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (НИС) Al/AlO$_x$/Nb и Al/AlN/NbN, в которых роль сверхпроводника выполняет ниобий (Nb) или нитрид ниобия (NbN), способных работать в качестве термометров в диапазоне температур 1.5–10 K. Для формирования туннельных переходов использована технология SNEAP (Selective Niobium Etching and Anodization Process). Получены зависимости отношения дифференциального сопротивления переходов к асимптотическому от температуры тестовых образцов, экспериментальные данные согласуются с теоретической моделью. Измерены значения флуктуационной чувствительности порядка $1\,\mu\mathrm{K}/\sqrt{Hz}$, близкие к теоретически ожидаемым. Структуры типа нормальный металл–изолятор–сверхпроводник и сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник на основе Al и Nb или Al и NbN могут быть использованы в качестве on chip термометров. На основе исследованных структур могут быть разработаны болометры, системы электронного охлаждения, а также термометры на чипах, интегрированные непосредственно в рабочие структуры или размещенные рядом с ними для точного мониторинга тепловых эффектов.

Ключевые слова: туннельный переход, термометр, нормальный металл–изолятор–сверхпроводник, цепочки НИС контактов, SNEAP (Selective Niobium Etching and Anodization Process), флуктуационная чувствительность.

DOI: 10.61011/JTF.2025.09.61241.112-25

Введение

Существует несколько фундаментальных способов определения температуры. Газовые [1,2], шумовые [3–5] и ядерно-ориентационные [6] термометры успешно используются в качестве первичных. Однако их использование в прикладных задачах зачастую ограничено. Так, в случае низких температур газы ожижаются, а уровень тепловых шумов существенно снижается, что значительно влияет на точность калибровки. В связи с этим более предпочтительными оказываются некоторые вторичные термометры. Выигрышными параметрами вторичных термометров являются широкий рабочий диапазон с простой и монотонной зависимостью от температуры, низкий самонагрев, быстрый отклик и время измерения, простота эксплуатации, устойчивость к внешним параметрам. Так, в диапазоне температур от 1.5 до 10 K широко применяются калиброванные полупроводниковые резисторы [7] и другие типы термометров. Эти устройства демонстрируют увеличение сопротивления при понижении температуры, что делает их удобными для использования в широком диапазоне температур. В настоящей работе представлено исследование НИС (нормальный металл–изолятор–сверхпроводник) структур в качестве термометра. Преимуществом этого устройства по сравнению с термометрами, приведенными выше, является то, что он является on chip термометром. Исследуемые в настоящей работе туннельные НИС переходы могут быть помещены в непосредственной близости от рабочего элемента, что повышает точность измерений.

Устройства на основе НИС переходов получили применение в детекторах рентгеновского излучения [8], болометрах дальнего инфракрасного диапазона [9,10] и в электронных охладителях при низких температурах [11]. В работе [12] НИС структуры служили термометром: авторы оценивали нагрев электронного газа в структуре за счет изменения вольт-амперной характеристики (ВАХ) туннельного перехода даже при небольшом изменении электронной температуры. Авторы отмечали, что метод измерения температуры с помощью НИС переходов оказался чувствительнее способов определения температуры на основе эффекта Шубникова–де Гааза.

В статье [13] рассмотрен принцип работы НИС переходов в качестве термометров и приведены способы оценки температуры, при которой находилась структура в зависимости от кривизны измеренной ВАХ.

Кроме того, НИС термометры могут быть использованы в сочетании с другими наноразмерными устройствами, такими как одноэлектронные транзисторы или сверхпроводящие квантовые интерференционные устройства (СКВИДы), для создания комплексных систем измерения и управления температурой в квантовых вычислениях, в квантовых процессорах на основе сверхпроводниковых кубитов, где температура играет ключевую роль в поддержании сверхпроводящего состояния, НИС термометры позволяют измерять температуру в режиме реального времени.

В работе [14] термометры на основе переходов $Fe + Al/AlO_x/Al$ свидетельствовали о наличии или отсутствии нагрева металлического абсорбера болометра на горячих электронах (приемник на основе СНС (сверхпроводник–нормальный металл–сверхпроводник) структуры) вследствие тепловых шумов или наводок. Изготавливаемые в настоящей работе туннельные переходы предполагается использовать в дальнейших исследованиях для определения температуры подложки при исследовании отклика приемного элемента на основе НИС переходов на внешнее излучение, а для изучения эффекта электронного охлаждения в сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС) структурах.

1. Теория

В основе работы переходов типа НИС лежит явление туннелирования электронов через тонкий изолирующий слой между нормальным металлом и сверхпроводником. Вероятность туннелирования сильно зависит от температуры. Чувствительность перехода к температуре связана с тем, что при конечной температуре фермиевское распределение электронов в металле размывается, и даже малые изменения температуры приводят к заметному изменению туннельного тока из-за разницы в заполнении электронных состояний по обе стороны перехода. Это позволяет использовать НИС структуры для температурных измерений в области ниже критической температуры сверхпроводника.

Зависимость тока одночастичного туннелирования от напряжения при условиях $T \ll T_c$, $V < \Delta/e$, где T_c — критическая температура сверхпроводника структуры, [15] описывается формулой:

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

где T — температура электронов нормального металла, R_n — асимптотическое сопротивление туннельного перехода и Δ — величина энергетической щели сверхпроводника. Стоит отметить, что в классических НИС термометрах из Al принято считать щель постоянной, начиная с некоторых температур (300 mK), а за T брать электронную температуру металла [15]. В диапазоне исследуемых нами температур 1.5–10 K нельзя считать величину щели в сверхпроводнике постоянной и равной щели при нулевой температуре, это приводит к тому, что выше 3 K между теорией и экспериментом будут наблюдаться сильные расхождения. Поэтому необходимо учитывать зависимость $\Delta(T)$ от температуры сверхпроводника Nb. Электрон-фононное взаимодействие в Al еще не ослабевает, и фононная система нормального металла связана с электронной, при измерениях мы не наблюдаем эффекта электронного охлаждения, поэтому считаем, что температура электронной системы нормального металла равна температуре сверхпроводника.

Продифференцировав силу тока (1) по напряжению, получим выражение для дифференциальной проводимости перехода при условиях $T \ll T_c$, $U < \Delta/e$. Из нее находим дифференциальное сопротивление туннельного перехода:

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

В случае $V = 0$ R_d будет максимальным

$$R_d(V=0) = R_n\sqrt{\frac{kT}{2\pi\Delta}}\exp\left(\frac{\Delta}{kT}\right). \quad (3)$$

Можно выполнить нормировку дифференциального сопротивления на асимптотическое сопротивление при напряжениях много выше щели — R_n, что позволит получить безразмерный параметр R_d/R_n, значения которого при $V = 0$ зависят только от температуры, при которой находится исследуемая структура, это позволяет использовать НИС переходы в качестве термометров. Более того, зависимость $R_d/R_n(T)$ универсальна для всех структур с одним и тем же сверхпроводником для случаев, где Δ не зависит от толщины сверхпроводника, а параметр $R_d/R_n(V = 0, T)$ при фиксированной температуре является целевым для всех изготавливаемых структур из одинакового материала сверхпроводника, поэтому он служит параметром качества, по которому в случае отсутствия шумов измерительной установки, утечек и перегревов можно оценивать, какой из туннельных переходов с разным R_n изготовлен лучше.

В настоящей работе представлены результаты изготовления и сравнительного анализа туннельных переходов на основе двух различных структур: $Al/AlO_x/Nb$ и Al/AlN/NbN. Ключевое различие между ними заключается в материалах сверхпроводящего электрода (NbN с $T_c = 12.0$–15.0 K и $\Delta(T = 0) = 2.16$–3.05 mV или Nb с $T_c = 9.2$ K и $\Delta(T = 0) = 1.4$ mV), а также в прозрачности изготовленного туннельного барьера. Прозрачность барьера в работе не измеряется напрямую, а оценивается косвенно через параметр R_nS, где R_n — асимптотическое сопротивление НИС перехода, а S — площадь туннельного

перехода. Теоретически, для переходов, изготовленных на одной подложке, значение R_nS должно оставаться постоянным независимо от геометрических размеров. Отсутствие значительных флуктуаций этого параметра свидетельствует о высокой однородности туннельного барьера. Проведtнные оценки показывают, что барьер AlN примерно в 40 раз прозрачнее, чем барьер AlO_x (см. разд. 3, табл. 1). Последнее различие существенно влияет на транспортные свойства переходов — в частности, через структуру с AlO_x протекает значительно меньший ток по сравнению со структурой с AlN барьером при одинаковых условиях.

Таким образом, у структур на основе переходов Al/AlN/NbN более прозрачный туннельный барьер, что подходит для изучения эффекта электронного охлаждения, поскольку высокая прозрачность AlN обеспечивает больший ток и эффективный вынос горячих электронов. А структуры на основе Al/AlO_x/Nb подходят для создания СИНИС болометров, так как их менее прозрачный барьер AlO_x минимизирует потери мощности принятого излучения в сверхпроводящие электроды, и большая часть энергии остается в области абсорбера из нормального металла. Это позволяет повысить эффективность детектирования слабых сигналов. Таким образом, выбор материала барьера (AlO_x или AlN) определяет не только величину тока через переход, но и возможности его функционального использования.

Мы учли зависимость значения величины щели сверхпроводника Nb ($T_c = 9.2\,\mathrm{K}$) от температуры (рис. 1) и посчитали теоретически ожидаемую зависимость параметра R_d/R_n ($V = 0$) от температуры с учетом $\Delta(T)$, а также сравнили ее с расчетом R_d/R_n ($V = 0$) (рис. 2), где взяли постоянное значение сверхпроводящей щели $\Delta = \mathrm{const}$, равное $\Delta(\mathrm{Nb})$ при $T = 4.2\,\mathrm{K}$.

Так же была рассчитана теоретическая зависимость флуктуационной чувствительности от температуры НИС структур со сверхпроводником Nb и сверхпроводником NbN. Для расчета использовалась формула

$$S = \frac{dT}{dV} N_{\mathrm{amplifier}},$$

где dV/dT — температурная чувствительность по напряжению, а шум используемого усилителя, работающего при комнатной температуре, $N_{\mathrm{amplifier}}$ — определяющий шум, так как дробовой ($\sim 10^{-11}\,\mathrm{V}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$) и тепловой шум ($\sim 10^{-10}\,\mathrm{V}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$) оказались меньше шума усилителя по напряжению ($\sim 10^{-9}\,\mathrm{V}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$), известного из технической спецификации. На рис. 3 приведены зависимости $S(T)$ структур на основе Nb и NbN. Поскольку чувствительность туннельных переходов существенно зависит от их нормального сопротивления R_n, для корректного сравнения характеристик были использованы экспериментально измеренные значения этого параметра: $6.1\,\Omega$ для Al/AlN/NbN и $13.4\,\Omega$ для Al/AlO_x/Nb структур. Эти реальные параметры образцов легли в основу построенных теоретических зависимостей.

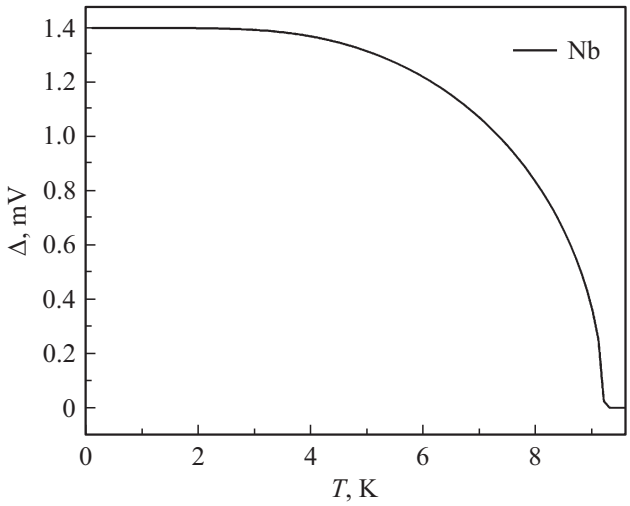

Рис. 1. Зависимость энергетической щели сверхпроводника Nb от температуры.

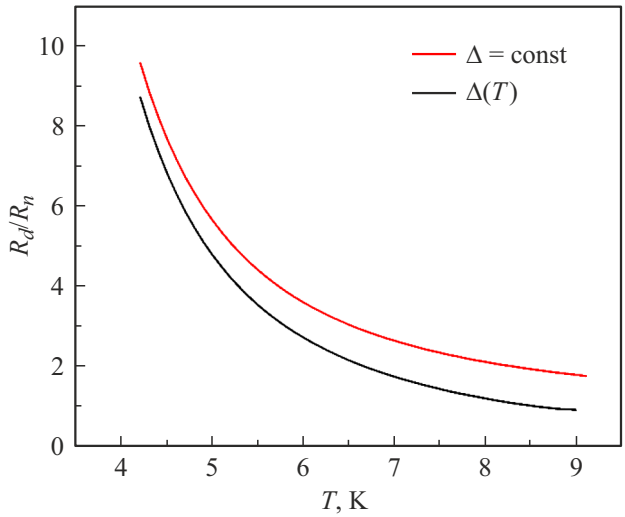

Рис. 2. Зависимость $R_d/R_n(T)$ для перехода типа НИС с Nb в качестве сверхпроводника с учетом зависимости величины щели Δ от температуры (черная кривая) и без, где $\Delta = \mathrm{const}$.

Видно, что чувствительность зависит линейно от температуры в области $T < T_c/2$. Эту область можно считать рабочей областью температур чувствительной структуры, так как в этой области dS изменяется пропорционально dT.

Экспериментальные данные показывают, что структуры на основе NbN демонстрируют более широкий температурный диапазон линейной зависимости чувствительности по сравнению с переходами, содержащими Nb. Такое поведение объясняется тем, что энергетическая щель NbN составляет $\Delta = 2.16-3.05\,\mathrm{mV}$ (при критической температуре $T_c = 12.0-15.0\,\mathrm{K}$), что значительно превышает аналогичный параметр для Nb ($\Delta = 1.4\,\mathrm{mV}$ при $T_c = 9.2\,\mathrm{K}$). Это различие в сверхпроводящих характеристиках приводит к нескольким важным следствиям. Во-первых, повышенное значение энергетической

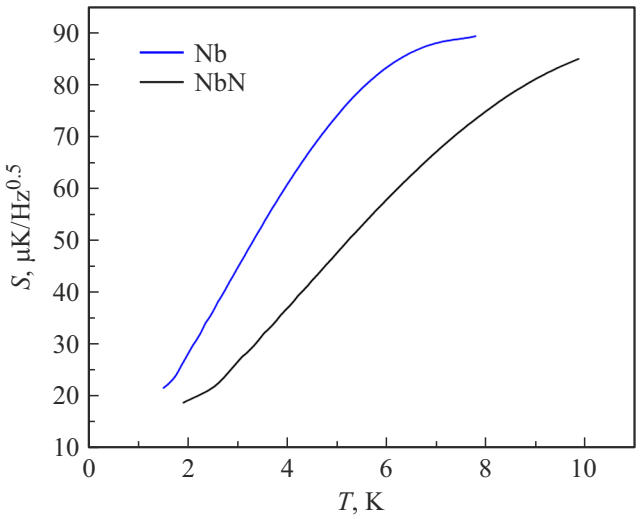

Рис. 3. Теоретическая зависимость флуктуационной чувствительности структур типа НИС на основе Nb (синяя кривая) и NbN (черная кривая) в диапазоне температур 2.7–10 K.

щели NbN обусловливает более высокое отношение R_d/R_n $(V = 0)$ при одинаковых рабочих температурах по сравнению с Nb-содержащими структурами. Во-вторых, описанное выше увеличение области линейности температурной зависимости $S(T)$.

2. Технология изготовления и методы измерения НИС структур

Технология изготовления исследуемых образцов подробно описана в статье [16]. Были изготовлены одиночные НИС переходы, а также СИНИС структуры: два последовательных перехода, соединенных металлическим абсорбером.

Чтобы предотвратить коррозию подложки при последующих этапах травления, с помощью магнетронного ВЧ напыления на кремниевую пластину осаждалось 100 nm Al_2O_3. Трехслойная структура была сформирована в одном вакуумном цикле. Нижний слой из алюминия толщиной 100 nm осаждается методом магнетронного напыления на постоянном токе в плазме аргона. Барьер AlN туннельного перехода Al/AlN/NbN формировался методом нитридизации — имплантации азота в алюминиевую пленку в плазменном разряде высокочастотного магнетрона на алюминиевой мишени в атмосфере азота в течение 90 s. Барьер AlO_x структуры Al/AlO_x/Nb формировался методом термического окисления в чистом кислороде при постоянном давлении 10 mbar в течении 10 min. После формирования туннельного барьера верхний слой NbN или Nb толщиной 80 nm наносился методом DC (Direct current) магнетронного напыления.

Площадь туннельных переходов задавалась методом контактной фотолитографии, затем переходы формировались методом селективного травления и анодизации ниобия (SNEAP: от англ. — Selective Niobium Etching and Anodization Process). Изоляцию между базовым и верхним подводящим электродами обеспечивал слой SiO_2, нанесенный методом RF-магнетронного напыления толщиной 200 nm. Технология формирования верхнего ниобиевого электрода из алюминия включает два последовательных процесса: контактную фотолитографию и DC напыление металлов. Таким же способом изготавливались контактные площадки из алюминия.

ВАХ одиночных переходов измерен по четырехконтактной схеме в парах ^{4}He в диапазоне температур 4.2–10.0 K с помощью погружного зонда. Для определения температуры использовался промышленный термометр 31Ц-08, находящийся непосредственно на погружном зонде. Положение зонда задавалось вручную, далее выжидалось 1–3 min для термической релаксации и стабилизации показаний калибровочного термометра, а затем проводилось измерение ВАХ исследуемого образца. Такая методика обеспечивала высокую воспроизводимость результатов и минимальное влияние тепловых нестабильностей на точность измерений. Особое внимание уделялось стабилизации температуры образца, что критически важно для получения достоверных данных о температурной зависимости параметров туннельных переходов.

ВАХ СИНИС структур в диапазоне температур 2.4–10.0 K измерялись в криостате замкнутого цикла Гиффорда–Мак–Магона с дополнительной азотной рубашкой, рабочая температура 2.4 K. Образец в держателе помещался на нижнюю ступень криостата. На этой же ступени был установлен термометр сопротивления R151K0N001 для определения температуры ступени. После того как в криостате устанавливалась предельно низкая температура, компрессор отключался и производились измерения ВАХ образцов по мере постепенного отогревания ступени.

С помощью ЦАП АЦП платы ввода–вывода NI-6289 на образцы через переключаемые балластные сопротивления подавалось симметричное напряжение в диапазоне −10–10 V, тем самым задавалась величина измерительного тока в пределах 1 nA – 1 μA. Напряжение на структуре при проведении измерений составляло 0–1 mV с шумом меньше 1 μV, усиливалось в 100 раз операционным усилителем с ультранизким уровнем шума и поступало на аналоговый вход цифрового преобразователя (АЦП) платы. Шумы усилителя (AD743) по напряжению достигают $1.5 \cdot 10^{-9}$ V/$\sqrt{\text{Hz}}$.

3. Экспериментальные результаты и обсуждения

Основные характеристики и параметры созданных туннельных структур, включая дифференциальное сопротивление в сверхпроводящем состоянии R_d и нормальное сопротивление перехода R_n, а также важные

Таблица 1. Основные параметры НИС структур

Образец	d, μm	R_nS, $\Omega \cdot \mu m^2$	R_d/R_n $(V = 0, T = 4.2\,K)$
Al/AlN/NbN	1.7	21.6	48.9
Al/AlO$_x$/Nb	4.2	800	8.4

производные характеристики параметр качества перехода $R_d/R_n(V)$ и параметр прозрачности и однородности барьера R_nS, определяются в результате анализа ВАХ тестовых образцов. Измерения ВАХ позволяют получить значения всех указанных параметров, которые являются критически важными для оценки качества и рабочих характеристик изготовленных туннельных переходов.

По технологии, описанной в разд. 2, были изготовлены тестовые образцы с туннельными переходами Al/AlO$_x$/Nb и Al/AlN/NbN. Основные параметры произведенных структур приведены в табл. 1.

На рис. 4, 5 представлены температурные зависимости ВАХ туннельных переходов в диапазоне 4.2–10 K, и при температурах, выше критических.

Для измеренных кривых были рассчитаны зависимости дифференциального сопротивления от приложенного напряжения и для каждой температурной точки найдено отношение R_d/R_n $(V = 0)$. Для структуры Al/AlO$_x$/Nb параметр R_d/R_n $(V = 0, T = 4.2\,K) = 8.4$ при ожидаемом 8.7; для структуры Al/AlN/NbN параметр $R_d/R_n = 48.9$ при нулевом смещении по напряжению и температуре жидкого гелия. Зависимость $R_d/R_n(T)$ для перехода Al/AlO$_x$/Nb, а также ее сравнение с расчетной приведена на рис. 6. Данные хорошо согласуются с теоретической моделью. На графике квадратами и треугольниками показаны результаты термометрических измерений в разные даты (числа подписаны на легенде).

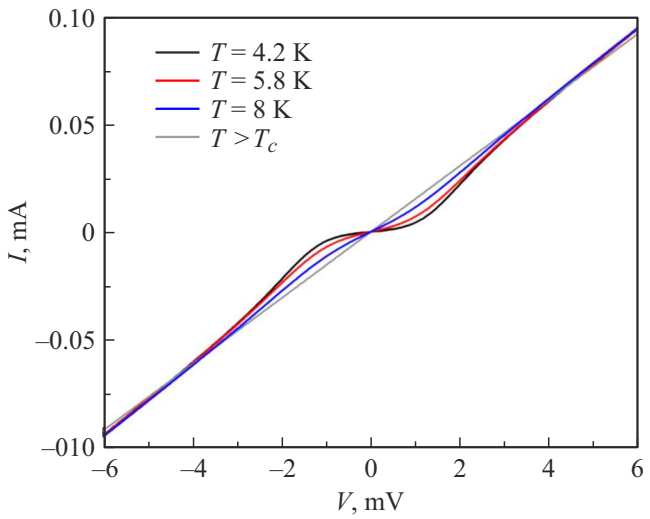

Рис. 4. ВАХ НИС перехода Al/AlO$_x$/Nb при температурах выше (серая кривая) и ниже (цветные кривые) критической.

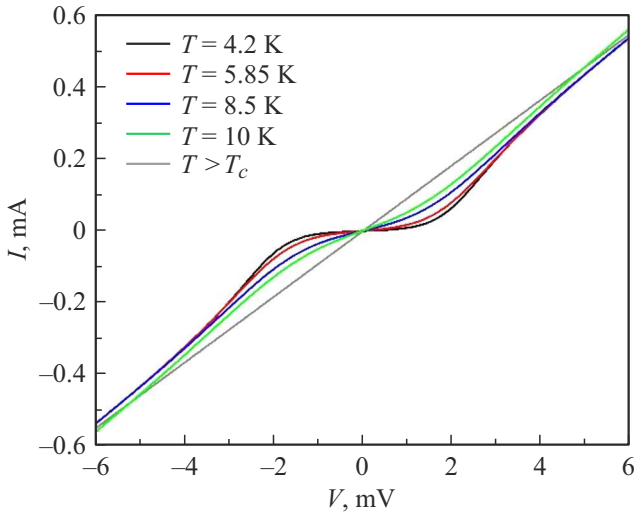

Рис. 5. ВАХ НИС перехода Al/AlN/NbN при температурах выше (серая кривая) и ниже (цветные кривые) критической.

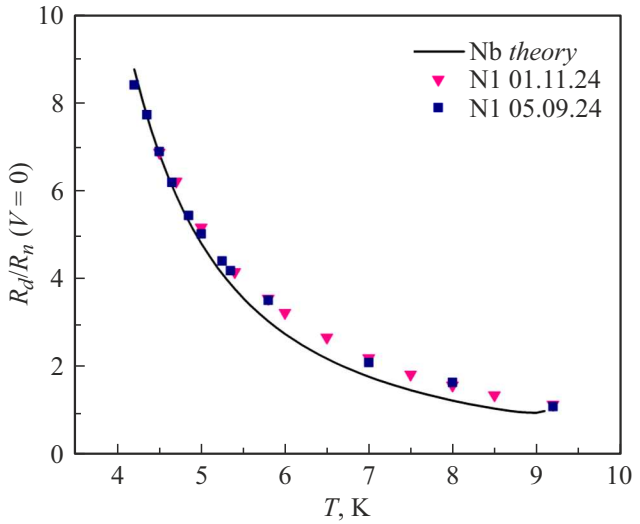

Рис. 6. Зависимость R_d/R_n $(V = 0, T)$ НИС перехода Al/AlO$_x$/Nb (квадраты и треугольники для измерений в разные даты) и теоретическая зависимость R_d/R_n $(V = 0, T, \Delta(T))$ — черная кривая.

В период между 05.09.24 и 01.11.24 было проведено несколько циклов температурных измерений ВАХ тестовой структуры. Из данных видно, что характер зависимости R_d/R_n $(V = 0, T)$ и значения параметра, измеренные в разные даты при одинаковых температурах, совпадают (например, в точках $T = 4.5\,K$, $T = 8.0\,K$ и т.п.), что говорит о том, что изготавливаемые структуры устойчивы к термоциклированию. Значения параметра $R_d/R_n(T)$ структуры Al/AlN/NbN приведены на рис. 7.

На рис. 8 приведены значения полученных флуктуационных чувствительностей на основе измеренных данных в температурных точках, соответствующих области теоретически линейной зависимости чувствительности от температуры, и расчетные кривые $S(T)$. На графике

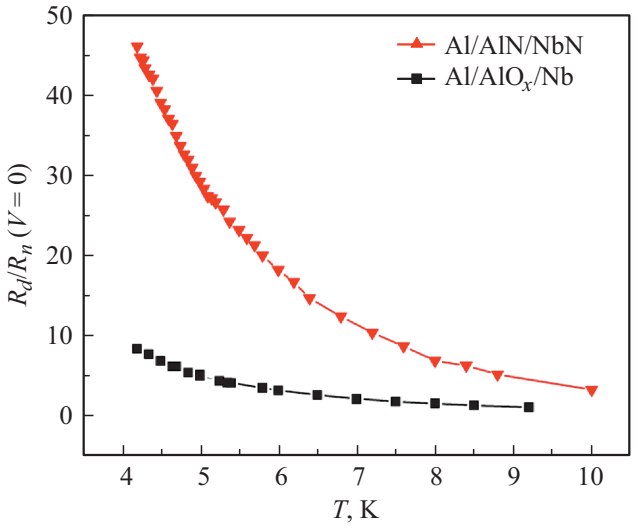

Рис. 7. Зависимости R_d/R_n $(V = 0,\ T)$ НИС переходов Al/AlO$_x$/Nb (черные прямоугольники) и СИНИС структуры NbN/AlN/Al/AlN/NbN (красные треугольники) при различных температурах в диапазоне 4.2–10.0 K.

видно, что экспериментальные данные демонстрируют линейную зависимость.

Значения чувствительностей перехода не достигают теоретических пределов: при возможной флуктуационной чувствительности $39\,\mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ для перехода Al/AlN/NbN, мы получили значения $61\,\mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$, для перехода Al/AlO$_x$/Nb полученные значения чувствительности — $80\,\mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ при возможной флуктуационной чувствительности $64\,\mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ при $T = 4.2$ K. С учетом погрешностей измерений экспериментальные данные все же не достигают теоретических, расхождение может быть объяснено несколькими взаимосвязанными факторами.

Ключевой причиной наблюдаемого расхождения, вероятно, является неидеальность измерительной системы. Реальные шумовые характеристики используемого усилителя, по-видимому, превышают заявленные в технической документации параметры. Одновременно с этим существенное влияние оказывают паразитные тепловые наводки и недостаточная эффективность фильтрующих элементов измерительной цепи. Эти факторы в совокупности приводят к ухудшению реально достижимой чувствительности структур.

При более детальном рассмотрении выявляется закономерность — степень расхождения между экспериментом и теорией существенно зависит от типа исследуемой структуры. Для Al/AlO$_x$/Nb-переходов разница составляет порядка 25 %, в то время как для Al/AlN/NbN-структур этот показатель достигает 57 %. Значения $S(T)$ приведены в табл. 2. Такая значительная вариация может быть связана с особенностями взаимодействия измерительной системы с образцами различного сопротивления, а также с возможным наличием дополнительных, неучтенных в модели источников шума.

Таблица 2. Значения чувствительности НИС структур

Образец	S $(T = 4.2\,\text{K})$, $\mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$	Теория S $(T = 4.2\,\text{K})$, $\mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$
Al/AlN/NbN	61	39
Al/AlO$_x$/Nb	80	64

Важно отметить, что на результаты измерений могут влиять и другие факторы: неидеальность электромагнитной экранировки, термоэлектрические эффекты в контактной системе. Каждый из этих аспектов вносит свой вклад в наблюдаемое расхождение между теоретическими предсказаниями и экспериментальными данными. Для минимизации указанных эффектов в перспективе необходимо провести комплекс мероприятий по модернизации измерительной установки. Это включает в себя тщательную проверку реальных шумовых характеристик усилительного тракта, усиление электромагнитной экранировки, оптимизацию системы фильтрации питающих напряжений. Такие усовершенствования позволят приблизить экспериментальные результаты к теоретически предсказанным значениям.

Несмотря на выявленные расхождения, полученные результаты убедительно демонстрируют принципиальную пригодность разработанных структур для использования в качестве термометров. Дальнейшая работа по устранению выявленных недостатков измерительной системы открывает перспективы для полного раскрытия потенциала этих устройств. Особое значение имеет тот факт, что все измерения демонстрируют хорошую воспроизводимость, что подтверждает надежность разработанной технологии изготовления структур.

На рис. 9 представлены разности по напряжению ВАХ, измеренных в двух температурных точках $T_1 = 4.2$ K и $T_2 = 6.9$ K, структур Al/AlO$_x$/Nb и Al/AlN/NbN соответственно, а также показаны разности по напряжению для теоретически рассчитанных ВАХ (формула (1)) НИС переходов со сверхпроводником Nb и NbN. На графике приведены полученные экспериментально чувствительности и ожидаемые значения S $(\Delta T = T_2 - T_1)$, где $T_1 = 4.2$ K и $T_2 = 6.9$ K.

Опираясь на полученные значения чувствительности, можем сделать оценку МЭШ (мощности эквивалентной шуму) приемной структуры на НИС переходах из Nb и Al. Для алюминиевого абсорбера стандартного размера $1 \times 5 \times 0.03\,\mu\text{m} = 0.15\,\mu\text{m}^3$ МЭШ будет равна $3 \cdot 10^{-17}\,\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ при флуктуационной чувствительности туннельного перехода $80\,\mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$, что сравнимо с результатами, полученными для алюминиевых болометров на 0.3 K [17]. Таким образом, значения характерных параметров исследуемых структур позволят использовать их для приемников излучения в радиоастрономических применениях.

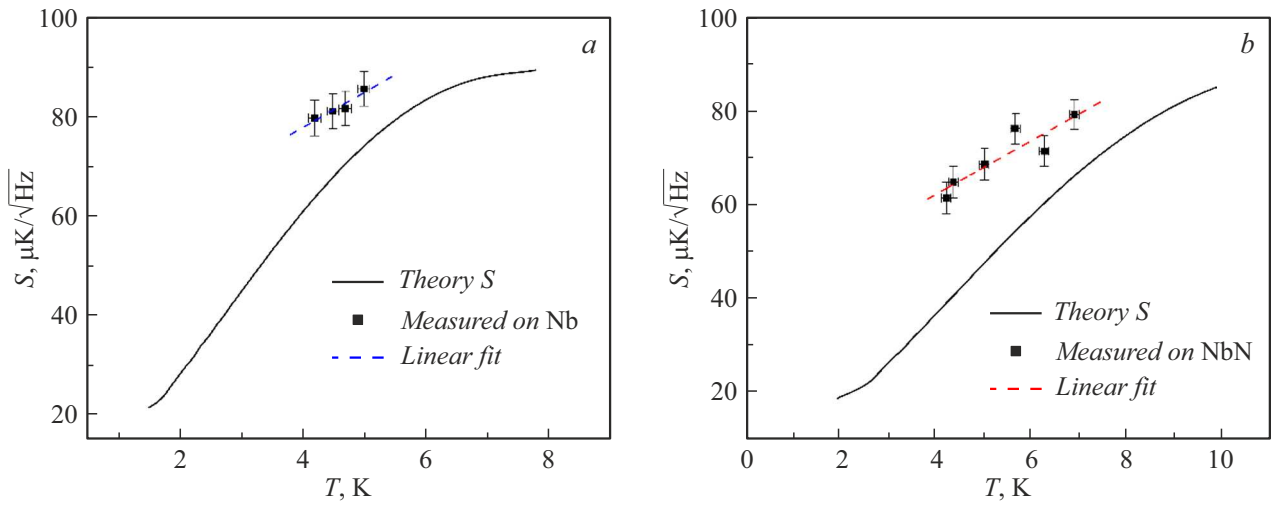

Рис. 8. *a* — зависимость флуктуационной чувствительности перехода Al/AlO$_x$/Nb от температуры, полученная из экспериментальных данных (точки), линейная аппроксимация (штрих) и теоретически рассчитанная кривая (сплошная линия); *b* — зависимость флуктуационной чувствительности перехода Al/AlN/NbN от температуры, полученная из экспериментальных данных (точки), линейная аппроксимация (штрих) и теоретически рассчитанная кривая (сплошная линия).

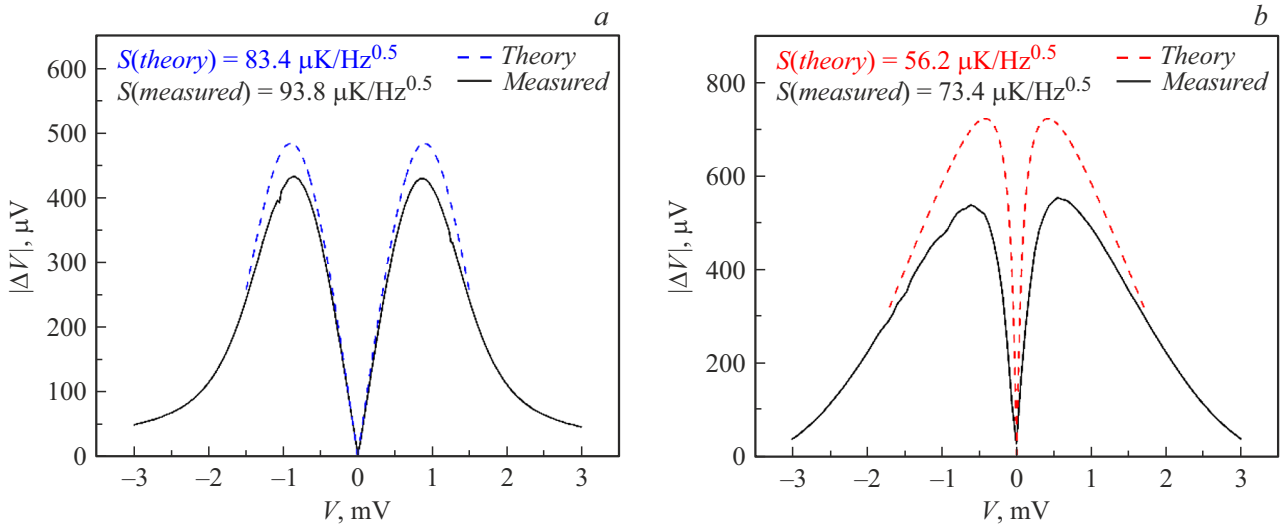

Рис. 9. *a* — отклик $|\mathrm{delta}\,V|(V)$ на изменение температуры с $T_1 = 4.2$ K до $T_2 = 6.9$ K перехода Al/AlO$_x$/Nb, измеренный (черная кривая) и рассчитанный теоретически (синий штрих); *b* — отклик $|\mathrm{delta}\,V|(V)$ на изменение температуры с $T_1 = 4.2$ K до $T_2 = 6.9$ K перехода Al/AlN/NbN, измеренный (черная кривая) и рассчитанный теоретически (красный штрих).

Выводы

Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы структуры НИС и СИНИС типов, предназначенные для использования в качестве on chip термометров в диапазоне температур 1.5–10 K. Экспериментальные данные подтвердили исключительную стабильность характеристик разработанных структур при многократных тепловых циклах, что делает их перспективными для практического применения в криогенных системах. Образцы показали зависимости $R_d/R_n(T)$, близкие к теоретически ожидаемым: у структур Al/AlO$_x$/Nb R_d/R_n $(V = 0,\ T = 4.2\,\mathrm{K}) = 8.4$, у структур Al/AlN/NbN R_d/R_n $(V = 0,\ T = 4.2\,\mathrm{K}) = 49.8$. Получены значения флуктуационной чувствительности: на структурах Al/AlO$_x$/Nb S $(T = 4.2\,\mathrm{K}) = 80\,\mu\mathrm{K}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ при теоретически рассчитанном $64\,\mu\mathrm{K}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$, для структур Al/AlN/NbN $S(T = 4.2\,\mathrm{K}) = 61\,\mu\mathrm{K}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ при теоретически ожидаемом $39\,\mu\mathrm{K}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$. Измеренные значения флуктуационной чувствительности позволяют использовать такие структуры в качестве on chip термометров.

Перспективы практического применения разработанных структур включают их интеграцию в системы электронного охлаждения и использование при исследованиях приемных элементов на основе НИС переходов на основе ниобия и алюминия. Полученные результа-

ты представляют значительный интерес для развития криогенной электроники, открывая новые возможности для создания компактных и надежных измерительных систем, способных работать при гелиевых температурах. Особую ценность представляет продемонстрированная стабильность характеристик при многократных тепловых циклах, что критически важно для практического применения в реальных криогенных установках.

Благодарности

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

Финансирование работы

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 23–79-10262 (https://rscf.ru/project/23-79-10262/).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] H. Preston-Thomas. Metrologia, **27** (1), 3 (1990).
[2] A.H. Woodcock. Canad. J. Res. **16** (7), 133 (1938).
[3] R.A. Webb, R.P. Giffard, J.C. Wheatley. J. Low. Temp. Phys., **13**, 383 (1973).
[4] J. Engert, J. Beyer, D. Drung, A. Kirste, M. Peters. Intern. J. Thermophys., **28**, 1800 (2007). https://doi.org/10.1007/s10765-007-0269-9
[5] J. Qu, S. Benz, H. Rogalla, W.L. Tew, D.M. White, K.L. Zhou. Measurement Sci. Technol., **30** (11), 112001 (2019). DOI: 10.1088/1361-6501/ab3526
[6] P.M. Berglund, H.K. Collan, G.J. Ehnholm, R.G. Gylling, O.V. Lounasmaa. J. Low. Temp. Phys., **6**, 357 (1972). https://doi.org/10.1007/BF00628318
[7] T.H. Herder, R.O. Olson, J.S. Blakemore. Rev. Sci. Instrum. **37** (10), 1301 (1966). https://doi.org/10.1063/1.1719964
[8] M. Nahum, J.M. Martinis, S. Castles. J. Low. Temp. Phys., **93**, 733 (1993). https://doi.org/10.1007/BF00693504
[9] J. Mees, M. Nahum, P.L. Richards. Appl. Phys. Lett., **59**, 2329 (1991).
[10] H. Pothier, S. Guéron, N.O. Birge, D. Esteve, M.H. Devoret. Z. Phys. B, **104**, 178 (1997).
[11] M. Nahum, T.M. Eiles, J.M. Martinis. Appl. Phys. Lett., **65**, 3123 (1994).
[12] R.A. Webb, R.P. Giffard, J.C. Wheatley. J. Low. Temp. Phys., **13**, 383 (1973).
[13] B. Karimi, Y.C. Chang, J.P. Pekola. J. Low. Temp. Phys., **207**, 220 (2022).
[14] D. Chouvaev, L. Kuzmin, M. Tarasov. Supercond. Sci. Technol., **12**, 985 (1999).
[15] D. Golubev, L. Kuzmin. J. Appl. Phys., **89** (11), 6464 (2001).
[16] М. Маркина, А. Чекушкин, М. Тарасов. ЖТФ, **94** (7), 1079 (2024).
[17] M. Tarasov, A. Gunbina, A. Chekushkin, R. Yusupov, V. Edelman, V. Koshelets. Appl. Sci., **12** (20), 10525 (2022). DOI: 10.3390/app122010525