

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 538.975

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИНИС-СТРУКТУР
НА ОСНОВЕ Nb, NbN и Al

©2026 г. М. А. Маркина^{a, b}, А. М. Чекушкин^a,
М.А. Тарасов^a, М. Ю. Фоминский^a

^a Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук

Россия, 125009, ул. Моховая, 11

^b Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”
Россия, 123056, ул. Мясницкая, 20

Поступила в редакцию 01.10.2025 г.

После доработки 08.10.2025 г.

Принята к публикации 17.11.2025 г.

Разработаны новые технологии изготовления структур типа сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (СИНИС) из Nb, NbN и Al, выполняющих функции чувствительного элемента приемников излучения в терагерцевом и субтерагерцевом диапазонах. Двухэтапная технология изготовления методом селективного травления ниобия и модернизированная технология изготовления методом сухого селективного травления и анодизации ниобия с дополнительным жертвенным слоем SiO₂ позволили создать структуры с узкими абсорберами из нормального металла шириной менее 10 мкм. Изготовленные структуры имеют характеристики, близкие к теоретически ожидаемым. Результаты работы могут быть использованы для разработки и изготовления методами оптической фотолитографии сверхчувствительных детекторов терагерцевых и субтерагерцевых диапазонов с рабочими температурами от 1.5 до 9.0 К, что позволяет использовать их в более доступных криогенных системах, чем криостаты растворения He³–He⁴, которые применяются в работе с классическими СИНИС-структурными с рабочими температурами в диапазоне 100–300 мК, где Al является сверхпроводником.

1. ВВЕДЕНИЕ

Детектор терагерцевого и субтерагерцевого излучений с чувствительным элементом на основе структуры сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС) обладает высокой чувствительностью и способен

регистрировать слабые электромагнитные сигналы в широком диапазоне частот [1]. Излучение принимается антенной, спроектированной на нужную центральную частоту, затем поглощается в абсорбере, выполненном из нормального металла. В абсорбере энергия излучения вызывает локальный нагрев, который изменяет величину тока, протекающего через туннельные переходы.

Малый объем нормального металла в абсорбере СИНИС-структур играет важную роль в повышении чувствительности детектора: чем меньше теплоемкость абсорбера, тем быстрее он нагревается под действием излучения, так как приемники на основе СИНИС-структур с малым абсорбера способны регистрировать сигналы с мощностью порядка 1 пВт [2, 3]. Для эффективной работы устройства необходимо также согласование сопротивлений антенны и абсорбера, поскольку это определяет, какая часть мощности излучения будет передана в детектор и преобразована в полезный сигнал [4]. Характерная толщина пленок абсорбера, изготавливаемых в работе структур, обычно не превышает 100 нм. Для таких пленок величина характерного сопротивления на квадрат составляет $R_{\square} = 0.31$ Ом, поэтому для согласования абсорбера СИНИС-структуры с антенной необходимы длинные абсорбера с шириной менее 10 мкм. Таким образом, при грамотном проектировании структуры детектор на основе СИНИС-элемента сочетает в себе высокую чувствительность и возможность работы в широком диапазоне частот, что делает его перспективным инструментом для применения в радиоастрономии, медицинской диагностике и системах безопасности.

Классическими СИНИС-детекторами являются структуры на основе туннельных переходов $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Al}+\text{Fe}/\text{AlO}_x/\text{Al}$, где сверхпроводником является Al, а абсорбер выполнен из Al, напыленного на тонкий (1.5–2 нм) слой Fe, за счет чего он не проявляет сверхпроводящих свойств [5]. Для создания таких структур применяется метод теневого напыления (мостики Долана) [6]. В этом методе используется маска фоторезиста, которая подвешивается над подложкой. Маска может быть сформирована из двух или более слоев резиста, что позволяет создать необходимые по глубине канавки с навесными мостами. В зависимости от угла напыления теневое изображение маски проецируется в разные места на подложке, таким образом, возможно проецирование соседних отверстий в маске в одно и то же положение, т. е. наложение двух тонких пленок на подложке с четко определенной геометрией. Описанные структуры являются рабочими ниже критической температуры алюминия 1.2 К, а при температурах ниже 300 мК устройства достигают чувствительности $10^{-17}–10^{-18}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ [5], однако для достижения и поддержания столь низких температур необходимы сложные криогенные системы. Также при наблюдениях из наземных

обсерваторий столь высокая чувствительность становится избыточной из-за поглощения и переизлучения принимаемого излучения атмосферным водяным паром.

В настоящей работе предложено изготовить СИНИС-структуры на основе NbN/AlN/Al/AlN/NbN или Nb/AlO_x/Al/AlO_x/Nb, где роль сверхпроводника выполняет Nb или NbN, а Al использован как нормальный металл. Такие СИНИС-структуры имеют преимущество работы при более высоких температурах (1.5–9.0 К), а их чувствительности по оценкам, проведенным ранее [7], будет достаточно для наземных измерений.

Высококачественный NbN можно изготовить только с помощью метода магнетронного напыления, что, в свою очередь, не позволяет использовать метод теневого напыления. Ранее в работе [8] был исследован процесс формирования трехслойной структуры Al/AlO_x/Nb без разрыва вакуума с помощью магнетронного напыления и окисления в стационарном режиме с последующим формированием областей переходов по технологии селективного травления и анодизации ниобия (Selective Niobium Etching and Anodization Process, SNEAP) [9]. В работе проводилось исследование переходов типа нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (НИС) с помощью анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ). Параметром качества таких структур является отношение дифференциального сопротивления перехода к асимптотическому значению нормального сопротивления [10],

$$\frac{R_d}{R_n} = \sqrt{\frac{kT}{2\pi\Delta}} \exp\left(\frac{\Delta}{kT}\right) \operatorname{ch}\left(\frac{eV}{kT}\right)^{-1},$$

где Δ – величина энергетической щели сверхпроводника, T – температура электронной подсистемы структуры. В приведенной работе [8] полученное на тестовых структурах Al/AlO_x/Nb значение параметра R_d/R_n ($T=4.2$ К, $V=0$) = 8.6 оказалось близким к теоретически ожидаемому, что свидетельствует о высоком качестве изготовленных туннельных переходов.

Изготовление СИНИС-структур по опробованной технологии приводит к подтраву нормального металла (Al) из-за особенностей технологических процессов: при проявлении в 1-процентном водном растворе KOH маски из фоторезиста, сформированной поверх трехслойной структуры с Al, наблюдался подтрав алюминия примерно на 7 мкм вглубь от края металла. Стоит отметить, что качество структур в работе [8] осталось высоким, так как туннельные переходы диаметрами 1.6–5.4 мкм формировались в центре электрода размером 100×100 мкм², и коррозия Al у края не влияла на качество (рис. 1), но это делает невозможным создание абсорберов относительно малой ширины (менее 10 мкм), поэтому необходима модернизация технологии изготовления СИНИС-структур.

Рис. 1.

В настоящей работе предложено несколько технологических приемов для создания СИНИС-структур с узким абсорбером алюминия в качестве нормального металла. Один из них – технология создания СИНИС-структур в два основных этапа, на первом создается трехслойная структура, в том числе узкий абсорбер, а на втором формируется верхний замыкатель таким образом, что алюминий в области абсорбера не взаимодействует с водным раствором щелочи и, следовательно, не подвергается коррозии. Еще одним технологическим решением является модернизация технологии изготовления методом SNEAP с помощью добавления жертвенного слоя SiO_2 . Предложенная модернизация технологии позволила создать СИНИС-структуры с узким абсорбером, которые могут быть интегрированы в антенны и впоследствии могут быть чувствительными элементами СИНИС-детекторов, способными работать при температуре кипения жидкого гелия (4.2 К).

2. ДВУХЭТАПНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ

В этой технологии на первом этапе задается геометрия абсорбера и формируется трехслойная структура в одном вакуумном цикле, а на втором этапе методом контактной фотолитографии и селективного травления ниобия формируется верхний замыкатель.

2.1. Первый этап

На подложке методом фотолитографии формируется маска из фоторезиста, определяющая геометрию базового электрода, после чего за один вакуумный цикл изготавливается трехслойная структура. Нижний слой из алюминия толщиной 100 нм осаждался методом магнетронного напыления в плазме аргона на постоянном токе. Барьерный слой производился термическим окислением поверхности алюминия в чистом кислороде при постоянном давлении 1 мбар и комнатной температуре (20 °C) в течение 10 мин. После окисления алюминия методом магнетронного напыления был нанесен верхний слой Nb толщиной 80–100 нм (рис. 2а). После напыления трехслойной структуры на подложку образец помещается в диметилформамид, где резист сильно разбухает (в 5–10 раз), затем растворяется и, таким образом, поднимает часть напыленной пленки. Технология называется взрывной литографией (lift-off).

Рис. 2.

2.2. Второй этап

Верхний электрод был сформирован методом контактной фотолитографии (рис. 2б), а геометрия переходов задавалась за счет перекрытия абсорбера с формируемым верхним электродом (рис. 3б). При применении двухэтапной технологии после проявления фоторезиста на трехслойную структуру осаждался ниобий толщиной 240 нм, и методом взрывной фотолитографии формировался верхний электрод (рис. 2в,г). Затем образец подвергался плазмохимическому травлению в плазме CF_4 (рис. 2д), и слой Nb толщиной 80 нм стравливался во всех областях структуры, кроме областей перекрытия с верхним электродом (рис. 2е). Микрофотография изготовленной структуры приведена на рис. 3а, коррозия Al в области абсорбера действительно не наблюдается.

Рис. 3.

Такой метод формирования позволяет создать структуры с узким абсорбером без подтравов, однако он имеет недостатки: на шаге проявления литографии верхнего электрода алюминий в области сформированных переходов взаимодействует со щелочным проявителем (рис. 2б), что может приводить к его подтравам непосредственно в области самих туннельных переходов и уменьшать реальную площадь туннелирования по сравнению с оптически наблюдаемой. Обеспечить точный контроль степени коррозии Al при изготовлении структур невозможно.

По описанной в этой главе технологии изготовлены СИНИС-структуры с абсорберами шириной 3–5 мкм. В тестовой серии из 8 структур на одной подложке рабочими оказалось 60%. Причиной этого является то, что технология имеет ряд проблем: подтравы Al могут быть не в абсорбере, а в области самих туннельных переходов, формируемых за счет перекрытия слоя верхнего электрода с абсорбером, также отсутствие анодизации может привести к микрозакороткам, которые могут шунтировать переходы.

3. МОДЕРНИЗАЦИЯ SNEAP-ТЕХНОЛОГИИ

Для создания абсорберов шириной менее 10 мкм без коррозии алюминия с хорошим качеством туннельных переходов было предложено после изготовления трехслойной структуры наносить на нее жертвенный слой SiO_2 для защиты алюминия от травления щелочью и формировать области переходов поверх защитного слоя методом селективного травления и анодизации ниобия. Благодаря описанному выше шагу алюминий не взаимодействовал с KOH, и его коррозия не наблюдалась ни в области абсорбера, ни в области туннельных переходов. Более подробное описание ключевых технологических шагов представлено ниже.

3.1. Первый этап

Методом контактной фотолитографии была сформирована маска из фоторезиста, определяющая геометрию базового электрода, после за один вакуумный цикл была изготовлена трехслойная структура Al/AlN/NbN (слой Al толщиной 100 нм был нанесен методом магнетронного напыления, барьер AlN сформирован при помощи нитридизации [11], т. е. использовался плазменный разряд в атмосфере чистого азота в течение 90 с, затем верхний слой NbN толщиной 50 нм был нанесен методом магнетронного напыления), рис. 4а,б. Далее для защиты узких абсорберов от подтравов поверх сформированного нижнего электрода на всю площадь подложки был осажден жертвенный слой SiO₂ (рис. 4в). Это стало новым технологическим шагом изготовления СИНИС-структур из Al и Nb/NbN. Поверх слоя SiO₂ методом контактной фотолитографии (рис. 4г) были заданы геометрия и размеры переходов. Стоит отметить, что для улучшения адгезии поверхность SiO₂ была очищена в кислородной плазме перед нанесением на нее резиста.

Рис. 4.

3.2. Второй этап

С помощью плазмохимического травления в химически активной среде CF₄ были удалены слои жертвенного SiO₂ и верхнего NbN многослойной структуры (рис. 4д,е). В плазме CF₄ слой AlN является стоп-слоем. Аналогично методу SNEAP далее проводилась анодизация тестовой структуры (рис. 4ж). Затем методом RF-магнетронного напыления был нанесен слой SiO₂ толщиной 250 нм (рис. 4з), обеспечивающий изоляцию между базовым и верхним подводящим электродами. Вскрытие контактов к переходам осуществляется методом взрывной литографии (рис. 4и).

3.3. Третий этап

Шаг формирования замыкателя является одним из критичных в предложенной технологии. Важной задачей является удаление слоя SiO₂ с помощью плазмохимического травления с поверхности НИС-перехода (рис. 4к) с минимальным воздействием на находящийся под ним NbN. Необходимо стравить слой SiO₂ толщиной 120 нм, остановиться на NbN (рис. 4л) и оставить достаточную толщину (более 30 нм) слоя NbN для того, чтобы верхний электрод проявлял свойства сверхпроводящего NbN. Для решения этой задачи отдельно был подготовлен контрольный образец, на котором была отработана скорость RIE-ICP-травления SiO₂ в плазме CF₄, которая составила 0.71–0.73 нм/с. Контроль травления рабочей структуры осуществлялся по отраженной мощности

интерферометра, а также по времени. Затем магнетронным DC-напылением в плазме аргона был нанесен слой NbN толщиной 300 нм (рис. 4м). Контактные площадки толщиной 100 нм из Al формировались также методом взрывной контактной фотолитографии и изготавливались DC-напылением в плазме аргона.

Для апробации предложенных технологий было разработано несколько дизайнов СИНИС-структур.

4. ДИЗАЙН ДЛЯ АПРОБАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИНИС-СТРУКТУР. ДВУХЭТАПНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

На рис. 3б представлен дизайн структуры, изготовленной по двухэтапной технологии. Красным цветом обозначен абсорбер из нормального металла, синим – подводящие сверхпроводящие электроды, на схеме также отмечены области перекрытия электродов с абсорбером – таким перекрытием задаются площади НИС-переходов. По дизайну получаем 2 НИС-перехода, соединенные абсорбером из нормального металла со сверхпроводящими проводами для измерений, ведущими к контактным площадкам.

5. ДИЗАЙН СТРУКТУР

Стоит отметить, что в геометрии базового электрода закладывались и формировались узкие абсорбера шириной 9 мкм и 3 мкм. На рис. 5 представлена микрофотография изготовленной структуры.

Рис. 5.

СИНИС-структуры спроектированы так, что сопротивление абсорберов, на которых расположены НИС-переходы, может быть измерено по четырехконтактной схеме. В отношение R_d/R_n входит асимптотическое сопротивление образца R_n , которое в случае СИНИС-структуры складывается из сопротивления барьера и сопротивления абсорбера из Al. Наличие дополнительного сопротивления понижает величину параметра R_d/R_n . Сопротивление абсорбера из Al толщиной 100 нм приблизительно равно 5–10 Ом в зависимости от выбранной ширины, при том что асимптотическое сопротивление структуры NbN/AlN/Al/AlN/NbN составляет 20 Ом, поэтому для корректного расчета параметра качества R_d/R_n необходимо вычесть сопротивление абсорбера из R_d/R_n .

6. РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИНИС-СТРУКТУР

По предложенным технологиям были изготовлены СИНИС-структуры $\text{Nb}/\text{AlO}_x/\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Nb}$ и $\text{NbN}/\text{AlN}/\text{Al}/\text{AlN}/\text{NbN}$. Обе технологии позволили изготовить абсорбера шириной 3 мкм без подтравов (рис. 3, 5). Минимальным размером НИС-перехода $\text{Al}/\text{AlN}/\text{NbN}$ был выбран диаметр в 1.5 мкм, что позволило использовать в рабочей структуре СИНИС абсорбер шириной 3 мкм. По модернизированной технологии SNEAP с жертвенным слоем SiO_2 на тестовой матрице абсорбера минимальное значение ширины абсорбера составляет 1.7 мкм (рис. 6), ограничением на уменьшение ширины абсорбера на данный момент является возможность контактной фотолитографии. На абсорбере такой ширины коррозия Al также не наблюдалась. Таким образом, предложенные технологии позволяют создание СИНИС-структур с дизайнами, пригодными для создания детекторов излучения.

Рис. 6.

7. КАЧЕСТВО СТРУКТУР

Исследования проводились посредством измерения ВАХ изготовленных структур по четырехконтактной схеме при температуре 4.2 К в жидким гелием с помощью погружного зонда. Также по четырехконтактной схеме отдельно было измерено сопротивление абсорбера структур $\text{NbN}/\text{AlN}/\text{Al}/\text{AlN}/\text{NbN}$ из нормального металла, и на графиках представлены ВАХ и отношение сопротивлений, из которых предварительно было вычленено сопротивление, вносимое абсорбером.

На рис. 7 приведены зависимости параметра R_d/R_n от приложенного напряжения V СИНИС-структур $\text{Nb}/\text{AlO}_x/\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Nb}$, изготовленных по двухэтапной технологии (красные точки и зеленая штриховая линия) в одном вакуумном цикле на одной подложке. Данная технология показала принципиальную возможность изготовления структур с узким абсорбером, однако значительное различие значений параметра качества $R_d/R_n(V=0)$ свидетельствует о ненадежности применяемой технологии: лучшее значение параметра $R_d/R_n(V=0, T=4.2\text{K}) = 8.4$ при теоретически достижимом 8.7. На этом же рисунке приведена зависимость параметра $R_d/R_n(V=0, T=4.2 \text{ K})$ СИНИС-структуры $\text{NbN}/\text{AlN}/\text{Al}/\text{AlN}/\text{NbN}$ (черная кривая). Изначально верхний подводящий электрод (не верхний электрод НИС-структуры) был сделан из Nb (рис. 8). На рис. 7 приведены ВАХ (синяя кривая) и зависимость $R_d/R_n(V)$ (черная кривая) СИНИС-структуры $\text{NbN}/\text{AlN}/\text{Al}/\text{AlN}/\text{NbN}$ с подводящими электродами из Nb. На зависимости $R_d/R_n(V)$ видны

пики на $V \approx 1.4$ мВ, а при напряжениях, по модулю меньших $\Delta(\text{Nb})$, зависимость $R_d/R_n(V)$ структуры NbN/AlN/Al/AlN/NbN совпадает с зависимостью $R_d/R_n(V)$ структуры Nb/AlO_x/Al/AlO_x/Nb.

Рис. 7.

Рис. 8.

На рис. 9 приведены результаты измерения ВАХ одиночного НИС-перехода Al/AlN/NbN с подводящим ниобиевым электродом, изготовленным на одной подложке вместе с СИНИС-структурой, измерения для которой приведены выше. На рис.9 видно, что при более медленном измерении пики принимают большие числовые значения. Мы полагаем, что причина существования этих пиков в том, что верхний электрод из ниобия толщиной 300 нм оказывал влияние на нитрид ниобия, толщина которого менее 50 нм.

Рис. 9.

Для того чтобы избавиться от влияния ниобиевого подводящего электрода, было предложено изготовить структуры с верхними подводящими электродами из NbN. Результаты исследования СИНИС-структур NbN/AlN/Al/AlN/NbN с верхним подводящим электродом из NbN (схема приведена на рис. 10) приведены на рис. 11.

Рис. 10.

Рис. 11.

Максимальное наблюдаемое при нулевом напряжении значение $R_d/R_n(V=0)$ составляет 48.9; R_nS полученной серии равняется 10 ± 3 Ом·мкм²; значение R_nS для полученных структур тестового образца равно 8.5 ± 0.5 Ом·мкм². Лучшее отношение $R_d/R_n(V=0)$ составляет 48.9. Использование NbN в качестве верхнего электрода позволило убрать паразитные пики на дифференциальном сопротивлении.

На рис. 12 приведены отношения $R_d/R_n(V)$ для СИНИС-структур на основе Al/AlO_x/Nb и Al/AlN/NbN при температуре 4.2 К. Более высокое значение энергетической щели NbN обуславливает более высокое отношение $R_d/R_n(V=0)$ при одной температуре по сравнению с Nb-содержащими структурами.

Рис. 12.

8. ВЫВОДЫ

Предложенные новые технологические приемы позволили изготавливать СИНИС-структуры на основе Nb, NbN и Al, способные работать в диапазоне температур 1.5–9.0 К. Использование двухэтапной технологии позволило изготавливать СИНИС-структуры с абсорбером из нормального металла Al шириной 3 мкм без подтравов. Предложенный способ модернизации технологии изготовления SNEAP с помощью дополнительного слоя жертвенного SiO_2 позволил создать СИНИС-структуры NbN/AlN/Al/AlN/NbN с узким абсорберами из Al шириной до 1.7 мкм, не оказывая негативного влияния на качество НИС-переходов. Использование NbN в качестве верхнего электрода для NbN/AlN/Al/AlN/NbN позволило улучшить дифференциальное сопротивление СИНИС-структуры: R_d/R_n выросло с 8.4 до 48.9, убраны паразитные пики на зависимости $R_d/R_n(V)$. Исследования ВАХ изготовленных структур при температуре 4.2 К показывают, что достигнуты отношения $R_d/R_n = 48.9$ у NbN/AlN/Al/AlN/NbN и $R_d/R_n = 8.4$ у Nb/AlO_x/Al/AlO_x/Nb, что близко к теоретическим пределам для каждого из сверхпроводников.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-538). Изготовление образцов выполнено с использованием уникальной научной установки “Криоинтеграл” (УНУ № 352529) Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Clarke J., Hoffer G.I., Richards P.L., Yeh N.-H.* // *J. Appl. Phys.* 1977. V. 48. P. 4865. <https://doi.org/10.1063/1.323612>
2. *Golubev D., Kuzmin L.* // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89. P. 6464. <https://doi.org/10.1063/1.1351002>
3. *Тарасов М.А., Эдельман В.С., Фоминский М.Ю., Юсупов Р.А., Юргенс А.А.* // *Журнал радиоэлектроники.* 2016. № 1. С. 1. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25630486>
4. *Nahum M., Richards P.L., Mears C.A.* // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1993. V. 3. № 1. P. 2124. <https://doi.org/10.1109/77.233921>
5. *Tarasov M., Gunbina A., Chekushkin A. et all.* // *Appl. Sci.* 2022. V. 12. P. 10525. <https://doi.org/10.3390/app122010525>
6. *Dolan, G.J.* // *Appl. Phys. Lett.* 1977. V. 31. No. 5. P. 337. <https://doi.org/10.1063/1.89690>
7. *Маркина М.А., Тарасов М.А., Юсупов Р.А. и др.* // *ЖТФ.* 2025. Т. 95. № 9. С. 1800.

8. *Маркина М.А., Чекушикин А.М., Тарасов М.А. и др.. // ЖТФ. 2024. Т. 94. № 7. С. 1079. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=72709688>*
9. *Koshelets V.P., Kovtonyuk S.A., Serpuchenko I.L., Filippenko L.V., Shchukin A.V. // IEEE Trans. Magn. 1991. V. 27. P. 3141. <https://doi.org/10.1109/20.133877>*
10. *Golubev D., Kuzmin L. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 6464. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1351002>*
11. *Khudchenko A., Baryshev A., Rudakov K. et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2016. V. 6. P. 127. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2504783>*

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Микрофотография: НИС-переход, вид сверху. Подтрав Al.

Рис. 2. Двухэтапная технология изготовления: **а** – формирование трехслойной структуры, **б** – формирование маски по топологии верхнего электрода, **в, г** – напыление Nb и lift-off, **д** – плазмохимическое травление верхнего Nb, **е** – изготовленная структура.

Рис. 3. **а** – Микрофотография СИНИС-структуры, вид сверху, абсорбер из Al, сверхпроводящие электроды из Nb, **б** – схема дизайна СИНИС-структуры, изготавливаемой по двухэтапной технологии.

Рис. 4. Этапы технологии изготовления: **а** – формирование маски по топологии нижнего электрода и напыление трехслойной структуры, **б** – взрывная литография для удаления металла, **в** – напыление жертвенного слоя SiO₂, **г** – фотолитографическое формирование области НИС-перехода, **д** – плазмохимическое травления жертвенного слоя SiO₂, **е** – плазмохимическое травления верхнего слоя NbN, **ж** – анодизация структуры, **з** – напыление изоляции, **и** – lift-off; **к, л** – плазмохимическое травление жертвенного SiO₂ в области туннельного перехода, **м** – напыление верхнего подводящего электрода.

Рис. 5. Микрофотография СИНИС-структуры с абсорбером шириной 3 мкм.

Рис. 6. Микрофотография абсорбера из Al, изготовленного по технологии SNEAP с жертвенным слоем SiO₂.

Рис. 7. BAX (синяя кривая) и $R_d/R_n(V)$ (черная кривая) для структуры NbN/AlN/Al/AlN/NbN, изготовленной по модернизированной технологии, с верхним подводящим электродом из Nb; $R_d/R_n(V)$ (красные точки и зеленые звезды) для структур Nb/AlO_x/Al/AlO_x/Nb, изготовленных на одной подложке в одном вакуумном цикле по двухэтапной технологии.

Рис. 8. Схема структуры Al/AlN/NbN с верхним подводящим электродом из Nb.

Рис. 9. ВАХ (зеленая кривая) и $R_d/R_n(V)$ при быстром и медленном измерениях (черная и синяя кривые соответственно) для структуры Al/AlN/NbN.

Рис. 10. Схема структуры Al/AlN/NbN с верхним подводящим электродом из NbN.

Рис. 11. ВАХ (синяя кривая) и $R_d/R_n(V)$ (черная) для СИНИС-структурь NbN/AlN/Al/AlN/NbN при $R_n = 6.9$ Ом, $d_{\text{перехода}} = 4.3$ мкм, $w_{\text{абсорбера}} = 9.6$ мкм.

Рис. 12. Зависимость $R_d/R_n(V)$ для СИНИС-структурь NbN/AlN/Al/AlN/NbN (голубые квадраты) и Nb/AlOx/Al/AlOx/Nb (черные треугольники).

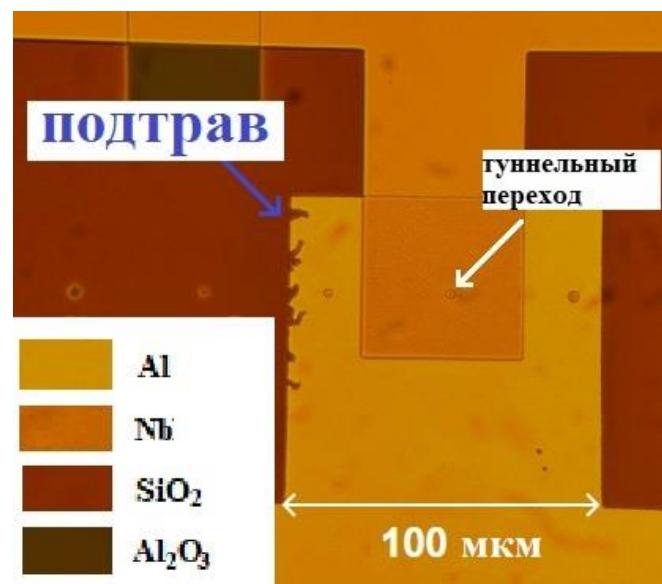


Рис. 1.

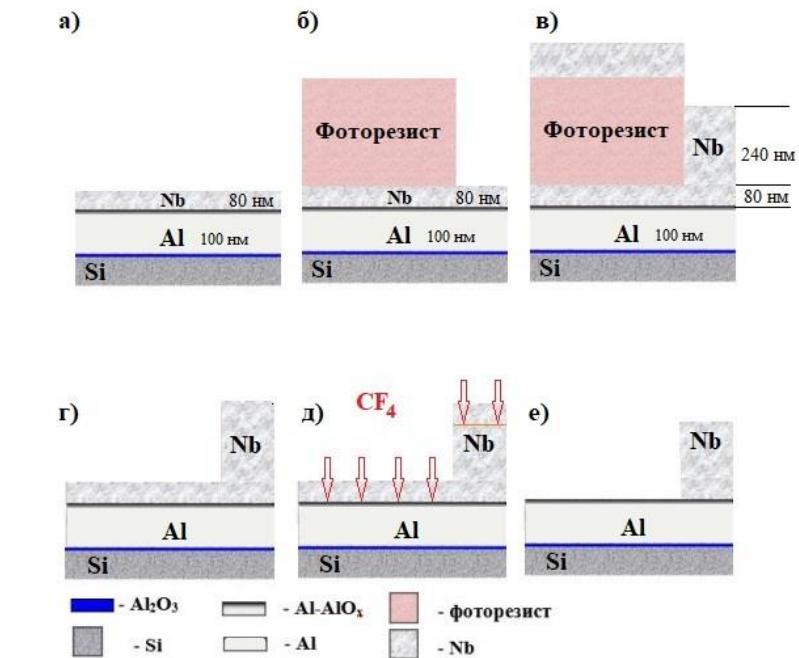


Рис. 2.

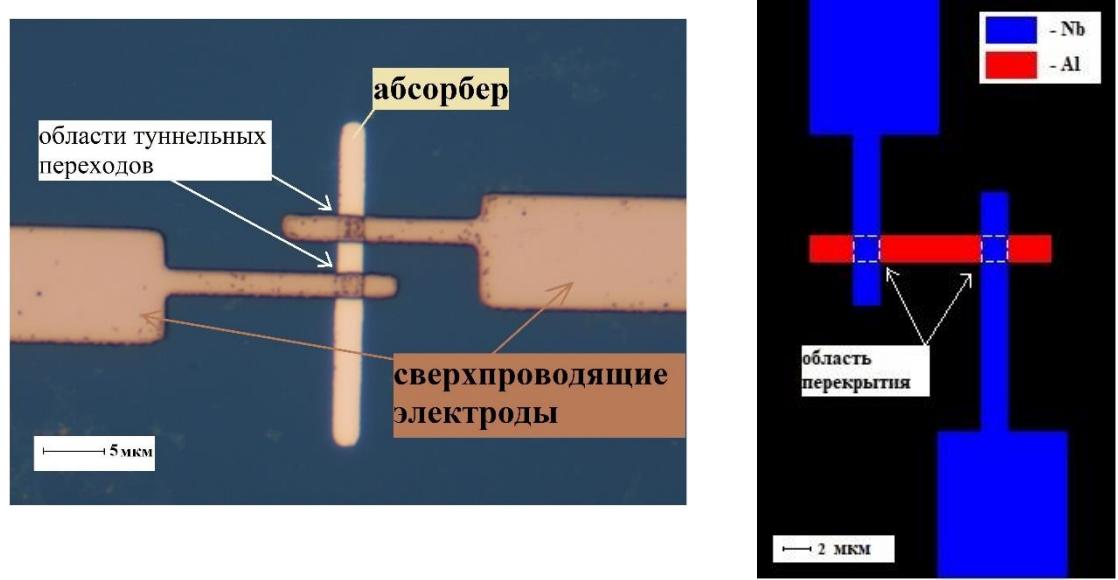


Рис. 3.

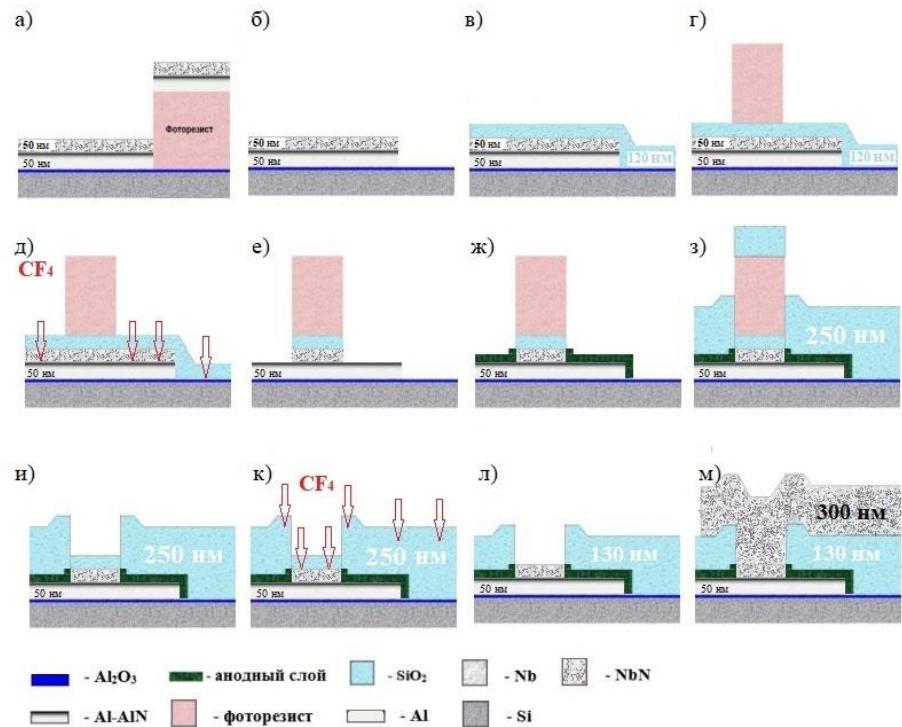


Рис. 4.

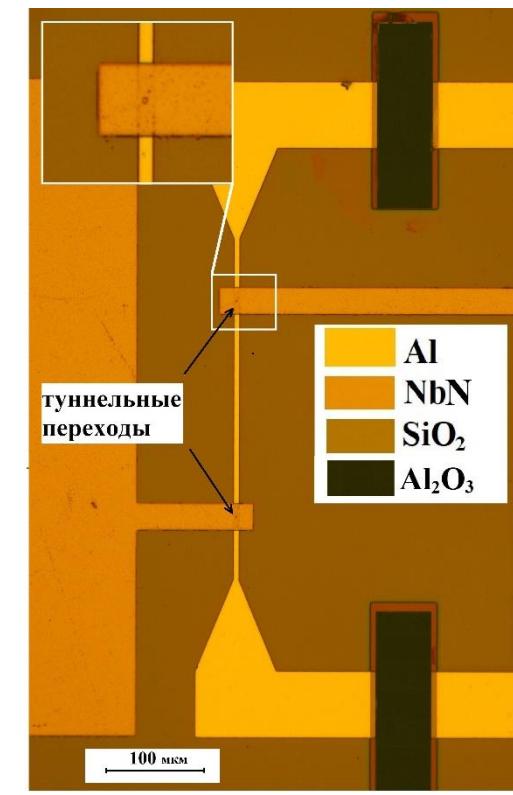


Рис. 5.

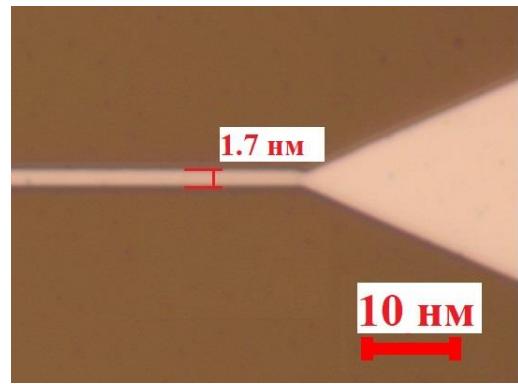


Рис. 6.

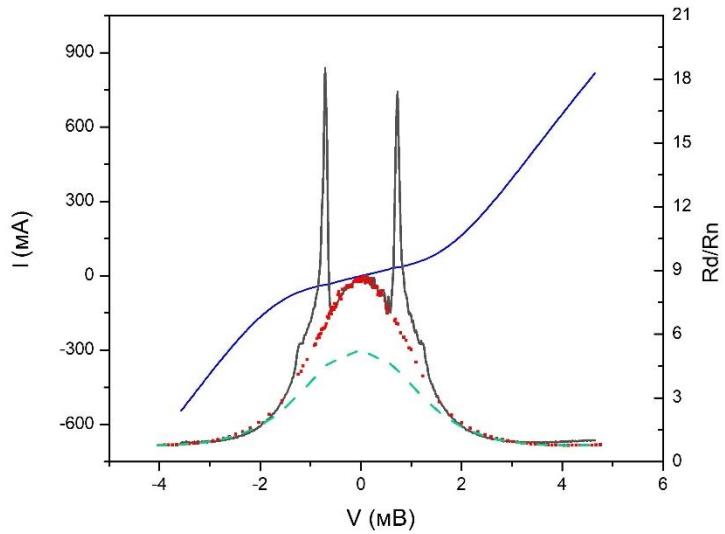


Рис. 7.

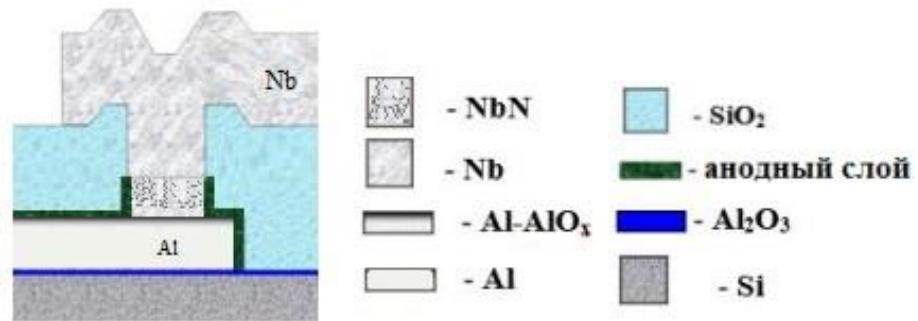


Рис. 8.

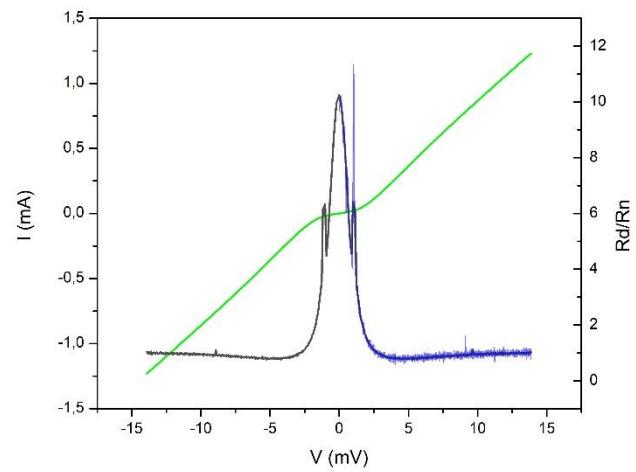


Рис. 9.

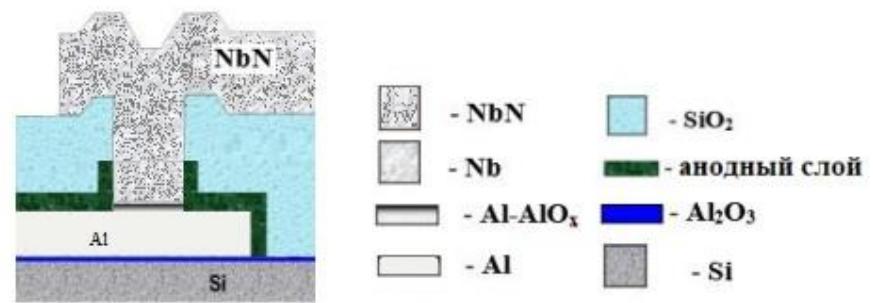


Рис. 10.

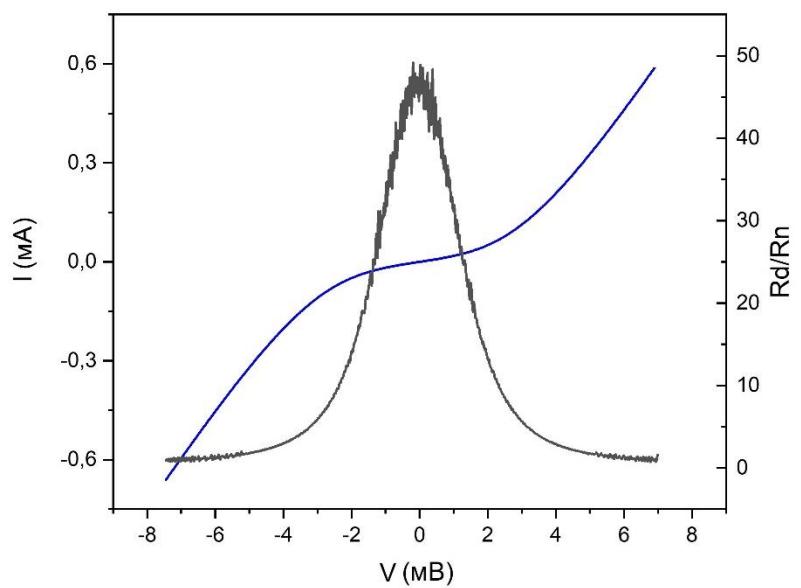


Рис. 11.

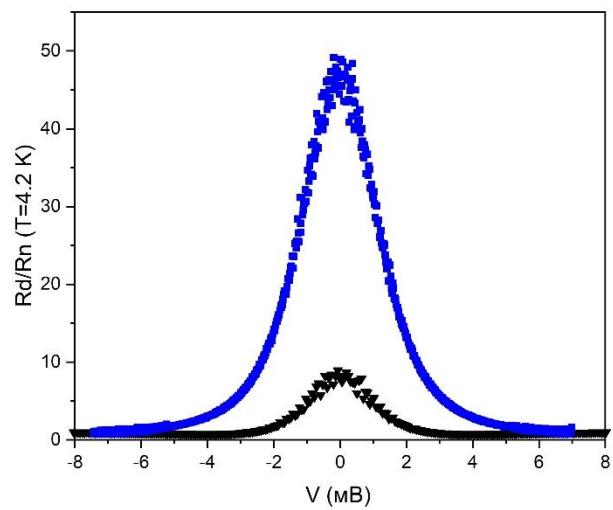


Рис. 12.