

02,13

Двухслойные логические элементы для классических криогенных компьютеров

© Б.А. Гурович¹, К.Е. Приходько^{1,2,¶}, Л.В. Кутузов¹, Б.В. Гончаров¹, Д.А. Комаров¹, Е.М. Малиева¹

¹Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

¶ E-mail: prihodko_ke@nrcki.ru

Поступила в Редакцию 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2022 г.

Принята к публикации 12 мая 2022 г.

Впервые изготовлены двухслойные логические элементы „НЕ“, „И“, „ИЛИ“ и „ИЛИ-НЕ“, в которых нагревающий элемент нанопровода в одном слое находится в месте, где находится нагреваемый элемент другого нанопровода в соседнем слое. Для изготовления сверхпроводящих нанопроводов был использован NbN (5–7 nm), а в качестве межслоевого диэлектрика применялся Al₂O₃ (25 nm). В работе показано устройство логических элементов, а также продемонстрирована их работа в импульсном режиме. Применение многослойных структур без гальванической связи между нанопроводами позволяет производить проектирование многоуровневых логических устройств.

Ключевые слова: тонкие сверхпроводящие пленки NbN, бесконтактное переключение состояния сверхпроводника, криоэлектронные устройства, интегрированные криогенные резисторы, логические элементы „НЕ“, „И“, „ИЛИ“, „ИЛИ-НЕ“, криогенные компьютеры.

DOI: 10.21883/FTT.2022.10.53079.47НН

1. Введение

На протяжении последних нескольких лет в НИЦ „Курчатовский институт“ развивается направление, которое посвящено разработке и созданию основных логических элементов классических криогенных компьютеров. Например, в работе [1] создан многокаскадный инвертор сигнала на базе нанопроводников, расположенных в одной плоскости и изготовленных из сверхпроводящего NbN толщиной 5–7 nm.

Основой создаваемых логических элементов являются сверхпроводящие нанопровода, в которые интегрированы области нормального металла (сопротивления). Нормальный металл получается из исходного сверхпроводника путем его облучения ионными пучками различного состава и энергий через маски требуемой формы и геометрии [2]. Основная идея функционирования элементов заключается в принудительном переводе части сверхпроводящего нанопровода в нормальное состояние за счет его локального нагрева резистором, интегрированным в соседний нанопровод [3]. Данный нагрев производится без гальванической связи между затвором и нагреваемым участком нанопровода.

В рамках используемого подхода, все нанопровода подключены к источнику постоянного напряжения, поэтому появление дополнительного сопротивления в области локального нагрева нанопровода увеличивает его суммарное сопротивление, ток через него уменьшается, в результате чего мощность, выделяемая на участке

нормального металла, также уменьшается, и этот нанопровод перестает поддерживать нормальное состояние в следующем нанопроводе, т.е. следующий нанопровод переключится в сверхпроводящее состояние. Этот принцип положен в основу конструирования всех основных логических элементов.

Ранее нами был продемонстрирован трехкаскадный инвертор сигнала, построенный по этому принципу, где все нанопровода располагались в одном слое [1]. Однако расположение нанопроводов в одной плоскости не является оптимальным с точки зрения реализации локального нагрева из-за того, что большие расстояния между затвором и нагреваемым участком нанопровода приводят к большим мощностям тепловыделения на затворе.

Как было показано нами ранее, минимизация мощности переключения возможна при двухслойной геометрии затвора и переключаемого нанопровода, поскольку расстояние между ними определяется толщиной межслоевого диэлектрика и может составлять ~ 10 nm [1].

Ранее, в 70–80-х гг. XX в., создавались криогенные логические устройства на основе криотронов [4], которые представляли собой массивные проволоки из сверхпроводника, переключение которых из сверхпроводящего состояния в нормальное осуществлялось с помощью магнитного поля, создаваемого сверхпроводящим проводником, окружавшим переключаемый сверхпроводник. Из-за больших размеров сверхпроводников время их переключения составляло $\sim 10^{-4}$ s. Дальнейший переход

от массивных сверхпроводников к тонкопленочным позволил уменьшить время переключения до $\sim 10^{-8}$ s [5], а уменьшение ширины тонкопленочного сверхпроводящего элемента до ~ 100 nm позволило уменьшить время переключения до величины $\sim 10^{-12}$ s [6]. В дальнейшем основное направление развития сверхпроводящей электроники пошло по пути формирования схем быстрой одноквантовой логики (RSFQ) [7], использующих джозефсоновские переходы, поскольку энергия переключения единичного элемента в таких устройствах чрезвычайно мала. Несмотря на низкую энергию переключения единичного элемента, резистивные элементы, обеспечивающие функционирование таких схем, сами по себе потребляли много энергии, вследствие чего были разработаны оптимизированные варианты схем питания, которые получили название eRSFQ. На настоящий момент фирмой Hupres [8,9] выпускаются сверхпроводящие логические схемы eRFQ, в которых содержится несколько тысяч джозефсоновских переходов.

Позднее идея использования сверхпроводящих наноразмерных токовых вентилях для создания логических элементов была представлена трехконтактным устройством „n-Tron“ [10], в котором переход основного сверхпроводящего нанопровода в нормальное состояние осуществлялся за счет перегрева узкой области затвора, через который подавался управляющий сигнал. Несмотря на успешное изготовление отдельных логических элементов на основе n-Tron'ов, данная технология не получила существенного развития, вероятно, из-за сложности учета растекания токов и обеспечения их правильного баланса при конструировании сложных логических схем. Были также изготовлены трехконтактные элементы „Y-Tron“ [11], в которых используется особенность перераспределения плотности протекания сверхпроводящего тока, обусловленные геометрическим фактором вблизи резких неоднородностей бокового рельефа нанопровода, обеспечивающих оптимальные условия для образования и распространения вихря в нанопроводе. На основе Y-Tron'ов были изготовлены ячейки памяти [12], но не была сделана попытка создания логических элементов.

В целом можно отметить, что все предложенные классические криогенные схемы на основе управления токовыми устройствами сталкиваются с проблемой растекания токов при большой степени интеграции элементов, что ограничивает возможности создания блоков с большим числом элементов, необходимых для процессоров.

Наиболее близкой работой, использующей аналогичный принцип перекрытия сверхпроводящего канала за счет разогрева затвором из металлического затвора в соседнем слое, является работа [13]. Нагрев сверхпроводящего нанопровода из NbN (толщина 20 nm) металлическим затвором (Ti, толщина 30 nm), расположенным над ним через слой диэлектрика (SiO₂, толщина 20 nm), был использован при создании элемента двухслойного

переключателя „M-hTron“ авторами работы [13], которые позиционировали такой элемент в качестве перспективного для бесконтактной коммуникации криогенных схем с различными выходными нагрузками, в том числе с полупроводниковыми устройствами, работающими при комнатной температуре. Следует отметить, что использованные в [13] параметры структур (толщина и ширина сверхпроводящего провода из NbN, а также толщина межслоевого диэлектрика) очевидно не отвечают требованиям минимизации мощности, выделяемой на затворе, для перевода сверхпроводника в нормальное состояние, поскольку ставилась задача создания выходного каскада для реализации коммуникации сверхпроводниковой схемы с электроникой, которая работает при комнатной температуре. Ранее нами было показано, что уменьшение размеров затвора и переключаемого элемента приводит к существенному уменьшению мощности, необходимой для переключения элемента, и могут быть достигнуты значения 0.3 nW [1]. Для целей уменьшения мощности переключения необходимо уменьшать размеры элементов (до величины менее 100 nm) и толщину диэлектрика, поскольку при большом числе элементов это будет определять общее энерговыделение в процессоре. Одновременно с уменьшением размеров (менее 100 nm) существенно возрастает возможность по увеличению плотности расположения элементов, что является явным преимуществом предлагаемого подхода.

Настоящая работа не предполагала изготовление и демонстрацию создания логических элементов, характеризующихся минимальной мощностью переключения, в связи с чем размеры затворов и нагреваемых сверхпроводников были сделаны больше оптимальных, но при этом они в меньшей степени подвержены влиянию внешних помех в процессе работы.

Представляется, что предлагаемый подход изготовления полнофункциональных логических элементов на основе применения переключения без гальванической связи между затвором и управляемым нанопроводом позволит существенно упростить схемотехнические решения и избежать проблемы растекания и согласования токов при работе большого числа элементов. Поэтому наши усилия направлены на демонстрацию возможности изготовления основных функциональных логических элементов, работающих на данном принципе.

В настоящей работе нами впервые изготовлены демонстрационные двухслойные бесконтактные логические элементы (разработанные в НИЦ „Курчатовский институт“), в которых нагревающий элемент нанопровода (затвор) в одном слое находится над/под нагреваемым элементом другого нанопровода в соседнем слое.

2. Методика эксперимента

Сверхпроводящие пленки NbN толщиной 5–6 nm наносились на подложку из монокристаллического сапфира методом катодного распыления при комнатной

температуре подложки [14,15]. Нанесение межслоевого диэлектрика Al_2O_3 проводилось методом ALD при температуре 200°C . Толщина Al_2O_3 составляла 25 nm.

Изготовление наноструктур проводилось методом электронной литографии с использованием электронного резиста полиметилметакрилат (ПММА) на растровом электронном микроскопе Helios Nanolab 650 (FEI), оснащенный литографической приставкой Raith.

Преобразование сверхпроводящего NbN в металл в требуемых местах наноструктур производилось за счет облучения смешанным ионным пучком через окна в защитной маске [16,17]. Как было показано ранее, облучение NbN до флюенса (1–2) дpa (по азоту) приводит к образованию фазы оксинитрида ниобия NbNO [18], проявляющей металлические свойства при рабочей температуре 4.2 K [16]. Встраивание сегментов нормального металла в сверхпроводящий нанопровод производилось путем облучения участка сверхпроводящего нанопровода смешанным ионным пучком до флюенса ~ 1 дpa через окно в маске из ПММА, созданное методом электронной литографии. После изготовления металлической области в пленке нитрида ниобия под действием облучения через маску, производилось формирование нанопровода посредством стандартной процедуры электронной литографии и последующего реактивного ионного травления.

Многослойные структуры создавались путем последовательного напыления на сформированный первый слой, содержащий наноструктуры и измерительные контакты первого слоя, слоев межслоевого диэлектрика Al_2O_3 , второго слоя нитрида ниобия. После напыления второго слоя нитрида ниобия на нем создавались измерительные контакты второго слоя и проводилась электронная литография для формирования требуемой конфигурации нанопроводов и интегрированных сопротивлений. В случае необходимости создания сопротивлений в нанопроводниках второго слоя проводилось ионное облучение участков второго слоя до флюенса ~ 1 дpa через окно в маске из ПММА, созданное методом электронной литографии.

После изготовления многослойные образцы подвергались однократному отжигу в вакууме при температуре 200°C в течение 1 hour для стабилизации электрофизических характеристик облученных областей, и частично отжигу радиационных дефектов в зоне облучения.

Измерение электрофизических характеристик и демонстрация работы логических элементов проводились с использованием измерительного комплекса Keithley-4200, который предназначен для тестирования схем в низкочастотных режимах. Для демонстрации правильной работы устройств входные сигналы подавались средствами данного измерительного комплекса в квазистационарном режиме, чем и были обусловлены большие величины длительности импульсов. Для уменьшения влияния внешних помех на работу логических устройств их входные и выходные каскады были оснащены пассивными фильтрами, которые не допускали значимого увеличения частоты подачи импульсов на устройства.

Демонстрация работы устройств при больших частотах будет продолжена в будущем совместно с разработкой схем фильтрации сигналов, позволяющих выполнить подобные измерения.

3. Результаты и обсуждение

В работе были изготовлены различные типы двухслойных логических элементов: „НЕ“, „ИЛИ-НЕ“, „И“ и „ИЛИ“.

На рис. 1, *a* показана схема двухслойного логического элемента „НЕ“, а на рис. 1, *b* — растровое изображение созданного элемента во вторичных электронах. Затвор содержит сопротивление R_g (контакты 1–6), а также выходной каскад (контакты 3–4) в нижнем слое. В верхнем слое находится нанопровод (контакты 2–5), подключенный к источнику постоянного напряжения, в котором сформировано интегрированное сопротивление R . Принцип работы элемента состоит в следующем. При отсутствии сигнала на затворе R_g ток, протекающий через верхний нанопровод, максимален, сопротивление R прогревает участок выходного нанопровода (контакты 3–4), и на выходе присутствует высокий уровень сигнала. Как только на затвор подается сигнал, встроенное сопротивление R_g прогревает участки сверхпроводника над ним в верхнем слое, сопротивление нанопроводника (контакты 2–5) в верхнем слое увеличивается, ток через него падает, и встроенное сопротивление R перестает прогревать выходной каскад (контакты 3–4), вследствие чего сигнал на выходе обращается в ноль. На рис. 1, *c* представлена осциллограмма работы логического элемента „НЕ“ в импульсном режиме. Как видно из рис. 1, *c*, логический элемент работает в соответствии с требуемой таблицей истинности: при отсутствии сигнала на входе на выходе наблюдается высокий сигнал; при подаче на вход высокого сигнала на выходе сигнал падает до нуля.

Схема измерения электрических характеристик логического элемента „НЕ“ представлена на рис. 1, *d*. Контакт 2 подключен к источнику постоянного напряжения. На контакт 1 подается входной сигнал. В качестве выходного каскада используется сверхпроводящий нанопровод (3–4), подключаемый к источнику постоянного тока, величина которого выбирается меньше значения критического тока для данного нанопровода.

На рис. 2, *a* показана схема двухслойного логического элемента „ИЛИ-НЕ“, а на рис. 2, *b* — растровое изображение созданного элемента во вторичных электронах. Два затвора R_1 (контакты 1–5) и R_2 (контакты 3–5), а также выходной каскад (контакты 2–5) расположены в нижнем слое. В верхнем слое находится нанопровод (контакты 6–4), подключенный к источнику постоянного напряжения, в котором сформировано интегрированное сопротивление R . Принцип работы элемента состоит в следующем. При отсутствии сигнала на затворах R_1 и R_2 ток, протекающий через верхний нанопровод,

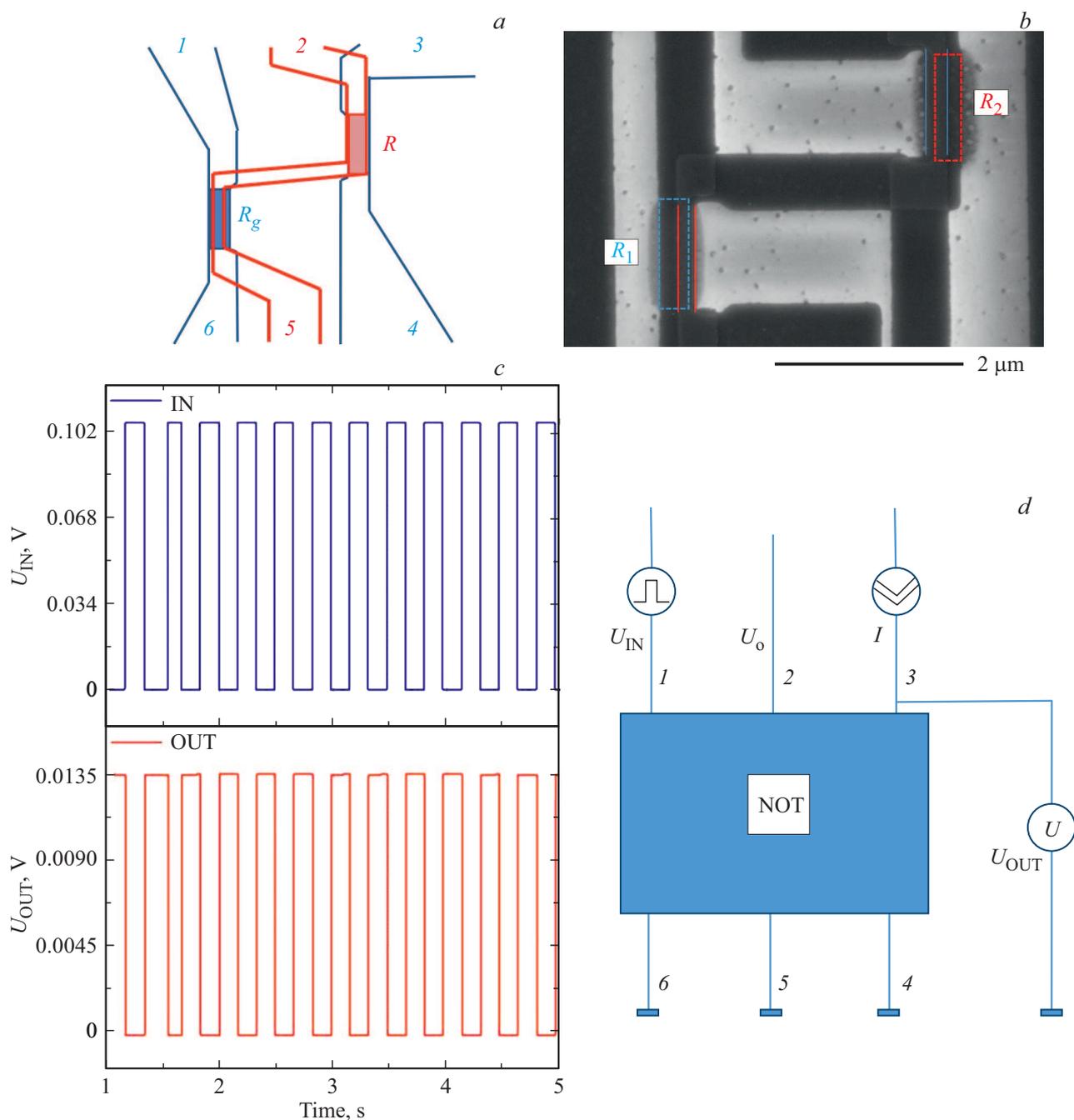


Рис. 1. Двухслойный логический элемент „НЕ (NOT)“. *a*) Принципиальная схема: 1–6 — затвор R_g (нижний слой), 2–5 — R (верхний слой), 3–4 — выход (нижний слой). *b*) СЭМ-изображение элемента во вторичных электронах. *c*) Осциллограммы работы элемента. Вход (IN) — контакты 1–6, выход (OUT) — контакты 3–4. *d*) Схема электрических измерений элемента „НЕ“: контакт 1 — входной сигнал; контакт 2 — опорное напряжение U_0 ; контакт 3 — источник постоянного тока I ; контакты 4–6 — земля.

максимален, сопротивление R прогревает участок выходного нанопровода (контакты 2–5), и на выходе присутствует высокий уровень сигнала. Как только на один или оба затвора подается сигнал, встроенные сопротивления R_1 и/или R_2 прогревают участки сверхпроводника над ними в верхнем слое, сопротивление проводника (контакты 6–4) в верхнем слое увеличивается, ток через

него падает, и встроенное сопротивление R перестает прогревать выходной каскад (контакты 2–5), вследствие чего сигнал на выходе обращается в ноль. На рис. 2, *c* представлена осциллограмма работы логического элемента „ИЛИ-НЕ“ в импульсном режиме. Как видно из рис. 2, *c*, логический элемент работает в соответствии с требуемой таблицей истинности: при отсутствии сиг-

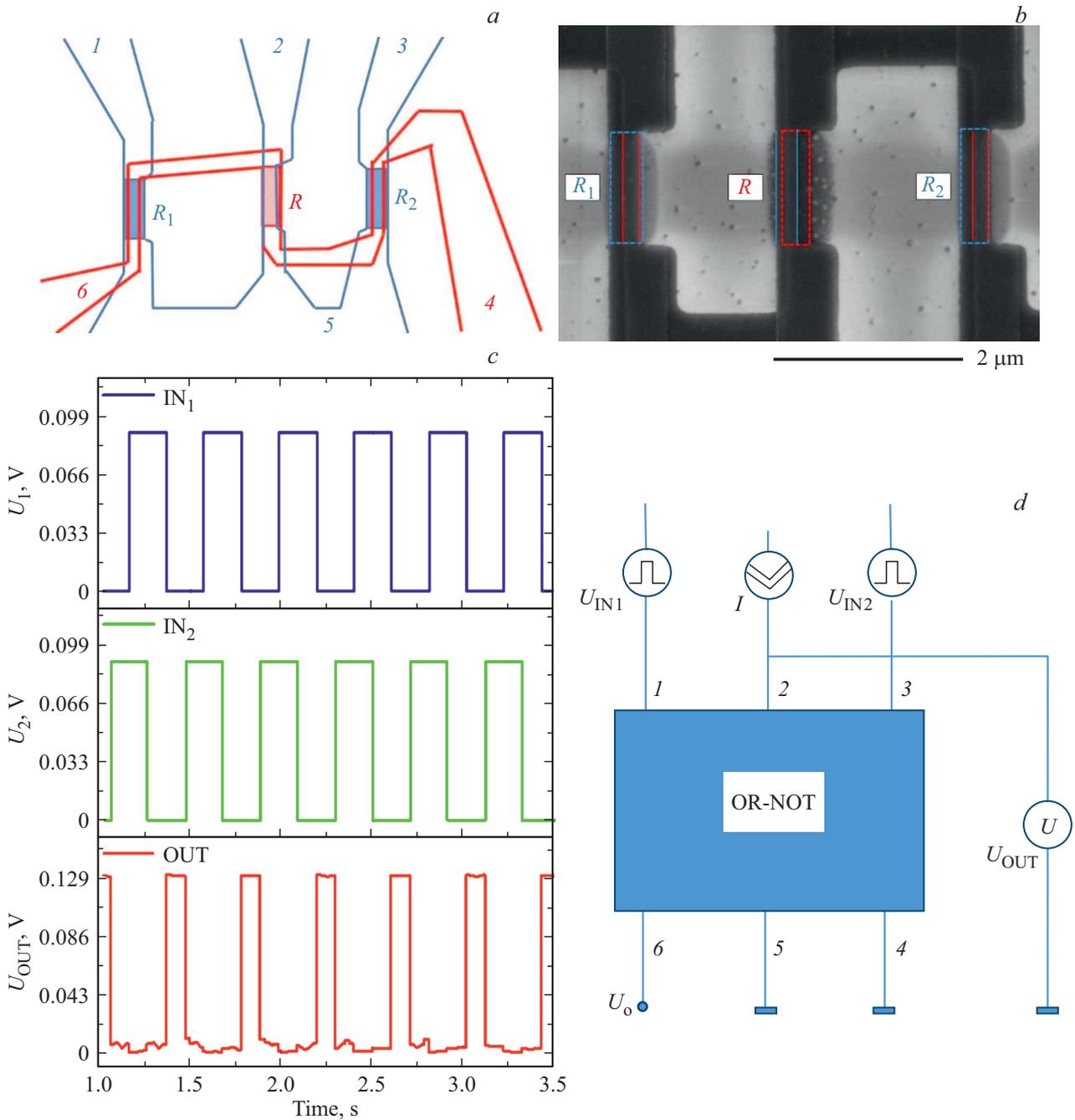


Рис. 2. Двухслойный логический элемент „ИЛИ-НЕ (OR-NOT)“. *a*) Принципиальная схема: первый вход R_1 (1–5) и второй вход R_2 (3–5) (нижний слой), нанопровод с сопротивлением R (6–4) (верхний слой), выход (2–5) (нижний слой). *b*) СЭМ-изображение элемента во вторичных электронах. *c*) осциллограммы работы элемента. Вход 1 (IN_1) (контакты 1–5), вход 2 (IN_2) (контакты 3–5), выход (OUT) (контакты 2–5). *d*) Схема электрических измерений элемента „ИЛИ-НЕ“: контакт 1 — входной сигнал 1; контакт 2 — источник постоянного тока I ; контакт 3 — входной сигнал — 2; контакты 4 и 5 — земля; контакт 6 — опорное напряжение U_0 .

нала на обоих входах на выходе наблюдается высокий сигнал, при подаче на один или оба входа высокого сигнала сигнал на выходе падает до нуля.

Схема измерения электрических характеристик логического элемента „ИЛИ-НЕ“ представлена на рис. 2, *d*. Входные сигналы подаются на контакты 1 и 3 соответ-

ственно. Контакт 6 подключен к источнику постоянного напряжения. В качестве выходного каскада используется сверхпроводящий нанопровод (2–5), подключаемый к источнику постоянного тока, величина которого выбирается меньше значения критического тока для данного нанопровода.

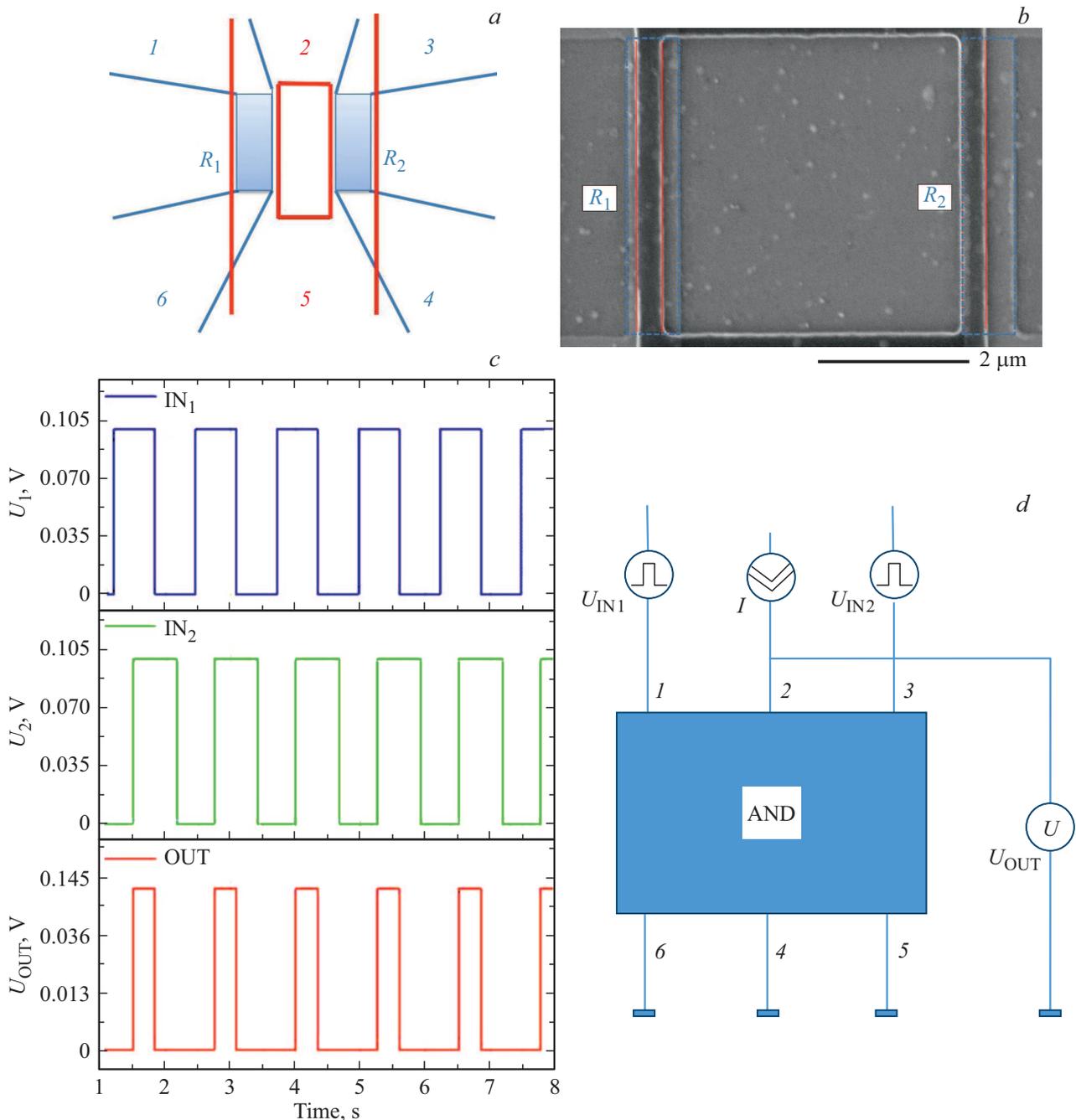


Рис. 3. Двухслойный логический элемент „И (AND)“. *a*) принципиальная схема: первый вход R_1 (1–6) и второй вход R_2 (3–4) (нижний слой), выход (2–5) (верхний слой). *b*) СЭМ изображение элемента во вторичных электронах. *c*) Осциллограммы работы элемента. Вход 1 (IN_1) (контакты 1–6), вход 2 (IN_2) (контакты 3–4), выход (OUT) (контакты 2–5). *d*) Схема электрических измерений элемента „И“: контакт 1 — входной сигнал № 1; контакт 2 — источник постоянного тока I ; контакт 3 — входной сигнал № 2; контакты 4–6 — земля.

На рис. 3, *a* показана схема двухслойного логического элемента „ИЛИ“, а на рис. 3, *b* — растровое изображение созданного элемента во вторичных электронах. Два затвора R_1 (контакты 1–6) и R_2 (контакты 3–4) расположены в нижнем слое. В верхнем слое находится выходной нанопровод (контакты 2–5), разделенный на два сверхпроводящих канала, расположенные над со-

противлениями затворов в нижнем слое, который подключен к источнику постоянного тока. Принцип работы элемента состоит в следующем. При отсутствии сигнала на затворах R_1 и R_2 верхний нанопровод находится в сверхпроводящем состоянии, и напряжение на выходе равно нулю. Когда сигнал подается только на один из затворов, данный затвор начинает прогревать сверхпро-

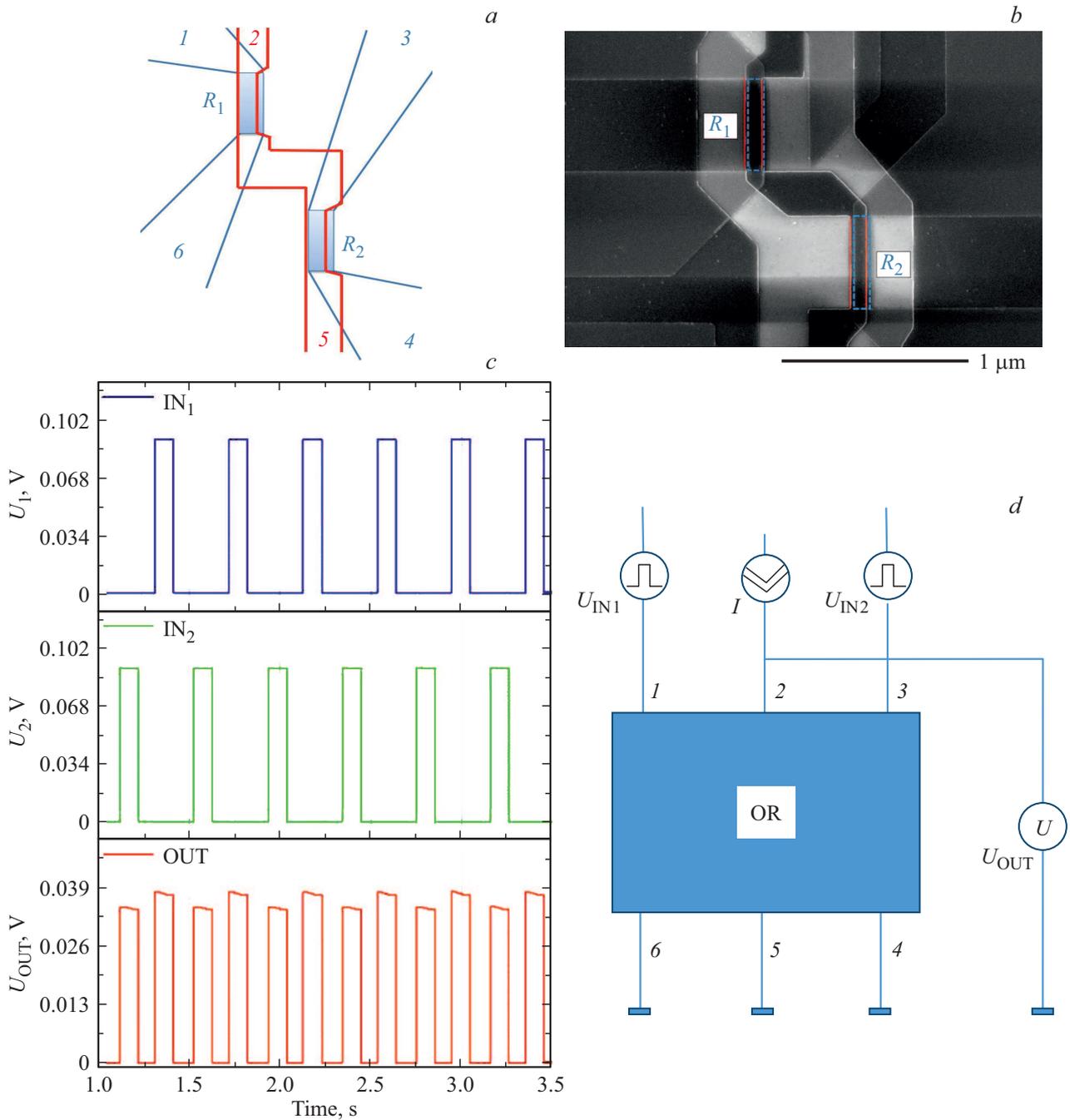


Рис. 4. Двухслойный логический элемент „ИЛИ (OR)“. *a*) Принципиальная схема: первый вход R_1 (1–6) и второй вход R_2 (3–4) (нижний слой), выход (2–5) (верхний слой). *b*) СЭМ-изображение элемента во вторичных электронах. *c*) Осциллограммы работы элемента. Вход 1 (IN₁) (контакты 1–6), вход 2 (IN₂) (контакты 3–4), выход (OUT) (контакты 2–5). *d*) Схема электрических измерений элемента „ИЛИ“: контакт 1 — входной сигнал № 1; контакт 2 — источник постоянного тока I ; контакт 3 — входной сигнал № 2; контакты 4–6 — земля.

водник над ним, и тот переходит в нормальное состояние. Ток, протекающий через верхний раздвоенный нанопровод (2–5), подбирается таким образом, чтобы он был меньше удвоенного критического тока одного узкого участка сверхпроводящего нанопровода. Поэтому переход только одного из узких участков нанопровода в нормальное состояние не вызывает такого же пере-

хода второго узкого участка. Полное перекрытие сверхпроводящего канала (2–5) имеет место только тогда, когда на оба затвора одновременно подается входной сигнал. В последнем случае на выходе (2–5) возникает высокий уровень сигнала. На рис. 3, *c* представлена осциллограмма работы логического элемента „ИЛИ“ в импульсном режиме. Как видно из рис. 3, *c*, логический

элемент работает в соответствии с требуемой таблицей истинности: при отсутствии сигнала на обоих входах или при наличии сигнала только на одном входе на выходе наблюдается низкий сигнал. Высокий сигнал на выходе наблюдается только при одновременной подаче на оба входа высокого сигнала.

Схема измерения электрических характеристик логического элемента „И“ представлена на рис. 3, *d*. Входные сигналы подаются на контакты 1 и 3 соответственно. В качестве выходного каскада используется раздвоенный (состоит из двух параллельных сегментов) сверхпроводящий нанопровод (2–4), подключаемый к источнику постоянного тока, величина которого выбирается меньше значения критического тока одного из узких сегментов. Последнее требование обеспечивает полное перекрытие сверхпроводящего канала только в том случае, когда на обоих входах одновременно присутствует сигнал.

На рис. 4, *a* показана схема двухслойного логического элемента „ИЛИ“, а на рис. 4, *b* — растровое изображение созданного элемента во вторичных электронах. Два затвора R_1 (контакты 1–6) и R_2 (контакты 3–4) расположены в нижнем слое. В верхнем слое находится нанопровод (контакты 2–5), подключенный к источнику постоянного тока. Принцип работы элемента состоит в следующем. При отсутствии сигнала на затворах R_1 и R_2 верхний нанопровод находится в сверхпроводящем состоянии, и напряжение на выходе (2–5) равно нулю. При подаче сигнала на один из затворов или на оба сразу сопротивление затвора (затворов) начинает прогревать участки сверхпроводящего нанопровода (2–5) верхнего слоя, в результате чего на выходе (2–5) появляется напряжение. На рис. 4, *c* представлена осциллограмма работы логического элемента „ИЛИ“ в импульсном режиме. Как видно из рис. 4, *c*, логический элемент работает в соответствии с требуемой таблицей истинности: при отсутствии сигнала на обоих входах на выходе наблюдается низкий сигнал, при подаче на один или оба входа высокого сигнала на выходе появляется высокий сигнал.

Схема измерения электрических характеристик логического элемента „ИЛИ“ представлена на рис. 4, *d*. Входные сигналы подаются на контакты 1 и 3 соответственно. В качестве выходного каскада используется сверхпроводящий нанопровод (2–5), подключаемый к источнику постоянного тока, величина которого выбирается меньше значения критического тока для данного нанопровода.

Создание многослойных структур позволяет существенно увеличить плотность упаковки элементов в криогенном процессе.

Дальнейшая перспектива развития работы связана с уменьшением размеров переключаемых элементов и затворов, уменьшением толщины межслоевого диэлектрика; проведением экспериментов по измерениям работы устройств на больших частотах; созданием более сложных функциональных устройств на базе единичных

логических элементов и демонстрацией их правильной работы. Представляется, что при выполнении данных условий возможно уменьшение мощности переключения до уровня нескольких десятков pW , что позволит изготовить устройства со средней степенью интеграции, потребляющих мощность, приемлемую для таких схем даже с учетом дополнительной мощности, расходуемой на поддержание криогенной температуры устройства, что сделает их конкурентоспособными по сравнению с современными полупроводниковыми аналогами как по потребляемой мощности, так и по максимальным частотам работы.

Поскольку используемый метод бесконтактного нагрева для осуществления переключений элементов включает последовательность физических процессов передачи тепла от нагревателя к сверхпроводнику через межслоевой диэлектрик, не представляется возможным сформулировать простые уравнения, связывающие критические материальные параметры структур с частотными характеристиками устройств на их основе. По-видимому, целесообразно выполнить численные оценки, описывающие распространение тепла от нагревателя к нагреваемому участку сверхпроводящего нанопровода на основе фундаментальных уравнений теплопроводности с учетом последовательного взаимодействия электронной и фононной подсистем нагревателя, разделительного диэлектрика и сверхпроводника, как это детально выполнено в работе [13]. В работе [13] представлены уравнения теплопроводности, описывающие последовательное распространение тепла от электронов нагревателя к фононам нагреваемого сверхпроводника, а также физические константы, необходимые для проведения таких расчетов.

Данные по моделированию, полученные в работе [13], указывают на то, что задача достижения малых времен переключения требует уменьшения размеров элементов как для параметров структур, изготовленных в работе [13], так и для структур, использованных в текущей работе. Уменьшение размеров элементов также приведет к уменьшению энергопотребления устройств [19], что определяет привлекательность такого подхода с учетом известных проблем современных полупроводниковых схем.

В задачи настоящей работы не входило выполнение моделирования временных параметров распространения тепла при осуществлении единичного переключения, что позволило бы оценить предельные частоты работы устройств, поскольку на данную тему планируется отдельная публикация, совместно с проведением измерений работы устройств на высоких частотах. Планируемые высокочастотные измерения потребуют другой техники проведения электрических измерений, включая организацию бездисперсионных СВЧ-волноводов, а также разработки специальной топологии расположения элементов для минимизации перекрестных помех.

4. Заключение

В работе впервые создан полный комплект необходимых базовых логических элементов для классического криогенного компьютера („НЕ“, „ИЛИ-НЕ“, „И“, „ИЛИ“). Элементы изготовлены в двухслойной геометрии, что позволяет минимизировать расстояния между нагревателем и нагреваемым участком сверхпроводящего нанопровода, тем самым уменьшая их энергопотребление. Многослойная компоновка логических элементов и отсутствие гальванической связи между отдельными элементами позволяет упростить схемотехнику устройств и существенно увеличить плотность расположения элементов в криогенном процессоре.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.Л. Столярову, Е.Д. Ольшанскому, В.Н. Мисько и Д.А. Гончаровой за изготовление исходных тонких пленок нитрида ниобия и помощь в изготовлении наноструктур.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Частного учреждения «Наука и инновации» (договор № 774/287-Д/220/1111-21 от 26.07.2021).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Б.А. Гурович, К.Е. Приходько, Л.В. Кутузов, Б.В. Гончаров. ФТТ **62**, 9, 1420 (2020).
- [2] В.А. Gurovich, В.В. Goncharov, М.М. Dementyeva, К.Е. Prikhodko, L.V. Kutuzov, D.A. Komarov, A.G. Domantovsky. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. **699**, 1, 012016 (2019).
- [3] Б.А. Гурович, К.Е. Приходько, А.Г. Домантовский, В.Л. Столяров, Д.А. Комаров, Е.А. Кулешова, Л.В. Кутузов. Способ перевода сверхпроводника в элементах логики наноразмерных электронных устройств из сверхпроводящего состояния в нормальное. Патент РФ 2674063 (2018).
- [4] D.A. Buck. Proc. IRE **44**, 4, 482 (1956).
- [5] V.L. Newhouse, J.W. Bremer. J. Appl. Phys. **30**, 9, 1458 (1959).
- [6] K.K. Likharev. Physica C **482**, 6 (2012).
- [7] K.K. Likharev, V.K. Semenov. IEEE Trans. Appl. Supercond. **1**, 1, 3 (1991).
- [8] M.H. Volkmann, A. Sahu, C.J. Fourie, O.A. Mukhanov. Supercond. Sci. Technol. **26**, 1, 015002 (2013).
- [9] M.H. Volkmann, I.V. Vernik, O.A. Mukhanov. IEEE Trans. Appl. Supercond. IEEE **25**, 3, 1301005 (2015).
- [10] A.N. McCaughan, K.K. Berggren. Nano Lett. **14**, 10, 5748 (2014).
- [11] A.N. McCaughan, N.S. Abebe, Q.Y. Zhao, K.K. Berggren. Nano Lett. **16**, 12, 7626 (2016).
- [12] Q.Y. Zhao, E.A. Toomey, B.A. Butters, A.N. McCaughan, A.E. Dane, S.-W. Nam, K.K. Berggren. Supercond. Sci. Technol. IOP Publishing **31**, 3, 035009 (2018).
- [13] R. Baghdadi, J.P. Allmaras, B.A. Butters, A.E. Dane, S. Iqbal, A.N. McCaughan, E.A. Toomey, Q.-Y. Zhao, A.G. Kozorezov, K.K. Berggren. Phys. Rev. Appl. **14**, 5, 1 (2020).
- [14] В.В. Goncharov, В.А. Gurovich, К.Е. Prikhodko, М.М. Dementyeva, V.L. Stolyarov, E.D. Olshansky, A.G. Domantovsky, L.V. Kutuzov, E.M. Malieva, A.A. Cherepanov. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. **1005**, 1, 012023 (2020).
- [15] Д.И. Долгий, Е.Д. Ольшанский, Е.П. Рязанцев. Конверсия в машиностроении 3–4, 119 (1999).
- [16] В.А. Gurovich, К.Е. Prikhodko, М.А. Tarkhov, A.G. Domantovsky, D.A. Komarov, В.В. Goncharov, Е.А. Kuleshova. Micro. Nanosyst. **7**, 3, 172 (2015).
- [17] Б.А. Гурович, М.А. Тархов, К.Е. Приходько, Е.А. Кулешова, Д.А. Комаров, В.Л. Столяров, Е.Д. Ольшанский, Б.В. Гончаров, Д.А. Гончарова, Л.В. Кутузов, А.Г. Домантовский. Рос. нанотехнологии **9**, 7–8, 36 (2014).
- [18] К.Е. Prikhodko, В.А. Gurovich, М.М. Dement'eva. Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. **130**, 1, 012046 (2016).
- [19] Б.А. Гурович, К.Е. Приходько, Л.В. Кутузов, Б.В. Гончаров, Д.А. Комаров, Е.М. Малиева. ФТТ **63**, 9, 1241 (2021).

Редактор Е.В. Толстякова