

Переключения сверхпроводящих нанопроводников из NbN в нормальное состояние и обратно на высоких частотах в двухслойных структурах за счет локального нагрева

© Б.А. Гурович,¹ Г.Ю. Голубев,¹ К.Е. Приходько,^{1,2} Л.В. Кутузов,¹ Д.А. Комаров,¹
Е.М. Малиева,¹ Б.В. Гончаров,¹ Д.А. Гончарова,¹ В.Л. Столяров¹

¹Национальный исследовательский центр „Курчатовский Институт“,
123182 Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
115409 Москва, Россия
e-mail: geolubev@gmail.com

Поступило в Редакцию 7 мая 2025 г.

В окончательной редакции 7 мая 2025 г.

Принято к публикации 7 мая 2025 г.

Выполнены эксперименты по демонстрации работы единичного элемента устройства из двух гальванически развязанных сверхпроводящих NbN-нанопроводов в разных слоях, в один из которых в месте их пересечения интегрировано сопротивление $\sim 1.2 \text{ k}\Omega$. Срабатывание устройства (возникновение напряжения на выходе) происходит за счет бесконтактного локального нагрева сверхпроводника теплом, выделяющимся в резистивном участке нанопровода в соседнем слое через слой разделительного диэлектрика. В жидком гелии (4.2 K) на устройство подавались ВЧ сигналы прямоугольной и синусоидальной формы, а также синусоидальные СВЧ сигналы на частотах 1, 4 и 9 GHz. Установлено, что при подаче прямоугольного ВЧ сигнала скорость срабатывания бесконтактного инвертора соответствует частоте $\sim 0.83 \text{ GHz}$; при подаче синусоидального сигнала 100 MHz на выходе возникает периодический сигнал удвоенной частоты; при подаче СВЧ сигнала на частотном спектре наблюдаются пики на удвоенной частоте (2, 8 и 18 GHz), что указывает на возможность работы устройства на частотах до 18 GHz.

Ключевые слова: NbN-нанопровод, сверхпроводимость, СВЧ, бесконтактный инвертор, процессор, суперкомпьютер, криотрон, „Y-tron“, „h-tron“.

DOI: 10.61011/JTF.2025.09.61229.102-25

Введение

В современных полупроводниковых процессорах рост количества транзисторов приводит к драматическому росту суммарной длины и плотности соединительных проводов, ограничивающих быстродействие на уровне единиц GHz по причине возникновения паразитных RC-цепей [1,2]. Поскольку соединительные провода являются проводниками, выделяющими тепло при протекании тока, рост количества транзисторов сопровождается увеличением паразитного энерговыделения в слое металлизации. Так, суммарное энергопотребление американских центров обработки данных в 2018 г. составило 205 TWh электроэнергии [3].

Из этого следует, что дальнейшее увеличение вычислительных мощностей полупроводниковых компьютеров (в том числе суперкомпьютеров) возможно в основном благодаря количественному росту.

Данные ограничения полупроводниковой электроники вынуждают развивать альтернативные вычислительные технологии, в том числе на основе эффекта сверхпроводимости. На данный момент развиваются как технологии квантовых вычислений, так и технологии, имеющие

классическую вычислительную архитектуру, а также криогенные полупроводниковые технологии [4].

Наиболее развитым сверхпроводниковым направлением с классической архитектурой является быстрая одноквантовая логика (БОК или RSFQ — Rapid Single Flux Quantum). Современные устройства RSFQ-логики имеют тактовую частоту до 50 GHz, а также экстремально низкое энергопотребление единичного переключения (120 aJ против 10^5 aJ для CMOS-технологии). Также RSFQ-технология имеет различные модификации: ERSFQ (Enhanced RFSQ), LV-RSFQ (Low-Voltage RSFQ), AQFP (Asymmetric Qubit Flux Parametron), RQL (Resonant-Tunneling Quantum Logic), которые позволяют достичь еще меньшего энергопотребления (вплоть до 0.086 aJ на переключение) [5]. На основе данной технологии компанией HYPRES изготавливаются коммерческие устройства [6], а развитие RSFQ-логики включено в международную дорожную карту для устройств и систем (IRDS), как передний край микроэлектроники в эпоху после Мура (post-Moore era) [7].

Альтернативным направлением развития сверхпроводниковой логики является использование эффекта

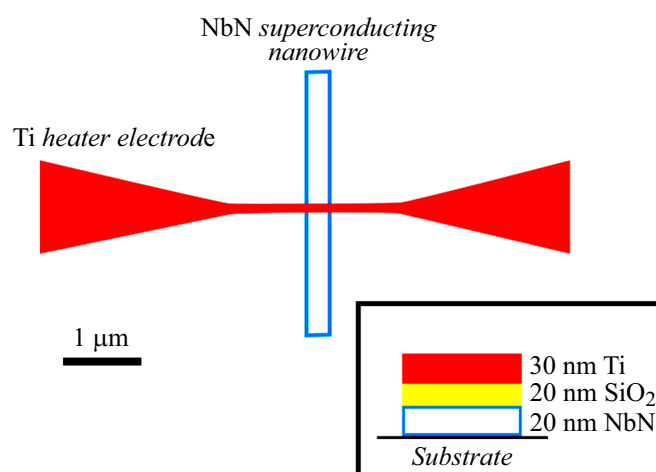


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и окрашенное РЭМ изображение (б) логического устройства „h-tron“ [14].

управления состоянием участка сверхпроводника с помощью внешнего источника. Первым устройством в данном направлении являлся криотрон Д. Бака, в котором участок цилиндрического сверхпроводника переводится между нормальным и сверхпроводящим состоянием с помощью затвора, создающего магнитное поле выше критического [8]. Позднее компанией IBM была создана тонкопленочная версия криотрона, также использующего для управления сверхпроводящим состоянием магнитное поле [9]. Несмотря то что характерный размер элемента равен примерно 1 μm , в работе [10] отмечается, что при масштабировании данного устройства до характерного размера 100 nm может быть достигнуто время переключения ~ 1 ps (соответствует частоте переключения ~ 1 THz) и энергия переключения $\sim 10^{-19}$ J/bit. Эти параметры сопоставимы по быстродействию и энергоэффективности с современными RSFQ-схемами.

Также в настоящее время ведутся работы по управлению сверхпроводящим состоянием с помощью локального нагрева. Так, в НИЦ „Курчатовский институт“ (НИЦ КИ) создано и развивается направление, нацеленное на изготовление элементной базы устройств сверхпроводниковой логики на тонкопленочных нанопроводах. Принцип действия устройств основан на переключении участка сверхпроводящего нанопровода между нормальным и сверхпроводящим состояниями под воздействием локального нагрева. В роли нагревателя используется другой сверхпроводящий нанопровод с интегрированным в него участком с металлическим типом проводимости [11].

Интеграция сопротивления проводится по технологии селективного изменения атомного состава тонкопленочных материалов, также разработанной в НИЦ КИ. В рамках данной технологии тонкопленочный материал, состоящий из нескольких атомов с разной массой

(например, оксиды и нитриды металлов), подвергается облучению низкоэнергетическими ионами (~ 1 keV). В частности, при облучении сверхпроводящей пленки NbN смешанным протонно-кислородным пучком происходит постепенное селективное замещение атомов азота на атомы кислорода.

Следует заметить, что разработки устройств управления состоянием сверхпроводника с помощью локального нагрева проводятся и другими авторами. Например, в работе [12] были созданы тонкопленочные криотроны с гальванической связью, в которых разогрев сверхпроводника происходит в созданном заужении затвора, соединенного со сверхпроводником. Позже ими были изготовлены устройства для считывания информации „Y-tron“ [13], устройства управления сверхпроводящим состоянием без гальванической связи „h-tron“ [14], а также ячейки памяти на их основе [15].

Рассмотрим подробнее известное из литературы устройство „h-tron“, которое также использует тепло, возникающее в металлическом затворе, для перевода сверхпроводящего нанопровода в соседнем слое в нормальное состояние. Здесь необходимо подчеркнуть, что, несмотря на аналогичный способ бесконтактного переключения сверхпроводника в нормальное состояние в устройстве „h-tron“ и в создаваемых нами устройствах, применяемый в них способ перевода участка сверхпроводника в нормальное состояние за счет локального нагрева, был запатентован нами ранее в РФ [11].

На рис. 1 представлена схема устройства „h-tron“ на тонкопленочном NbN. В роли затвора выступает тонкий титановый электрод толщиной 30 nm. От управляемого провода из NbN затвор отделен 20 nm оксида кремния SiO_2 . Толщина управляемого нанопровода составляет 20 nm. При протекании тока через затвор с металлическим типом проводимости в нем по закону Джоуля-Ленца возникает тепло, которое нагревает участок сверхпроводника выше критической температуры, переводя его в нормальное состояние.

Следует отметить, что авторы работы [14] не проводят оценку быстродействия данного устройства. Известно, что время распространения тепла на некоторое расстояние от нагревателя, необходимое для прогрева тела до определенной температуры, пропорционально квадрату данного расстояния. Из этого следует, что уменьшение толщины диэлектрика между затвором и нагреваемым проводом будет повышать быстродействие устройства (например, уменьшение толщины диэлектрика в 2 раза должно увеличить частоту переключения в 4 раза). Дополнительным ограничением быстродействия устройства может являться толщина самого затвора и прогреваемого нанопровода, поскольку прогрев сверхпроводника большей толщины будет требовать больше энергии и больше времени на прогрев. При этом авторы работы [14] справедливо отмечают, что реальное быстро-

действие устройства также сильно зависит от условий теплосъема.

Несмотря на схожий принцип работы устройства „h-tron“ из работы [14] и изучаемого нами устройства бесконтактного переключения, последнее обладает рядом преимуществ в ожидаемых более высоких частотах переключения и более низкого энергопотребления. Это обусловлено следующими структурными отличиями наших устройств.

Во-первых, используемая нами методика селективного изменения атомного состава позволяет интегрировать сопротивления в готовые сверхпроводящие нанопровода. Это позволяет формировать участки с металлическим типом проводимости только в участке нанопровода, который предназначен для локального нагрева, т.е. без избыточного рассеивания тепла на подводящих проводах. Также данная технология позволяет комбинировать сверхпроводящие участки с участками металлического типа проводимости с „плавным“ интерфейсом между металлической и сверхпроводящей частями нанопровода (в отличие от „резкого“ интерфейса, возникающего при использовании технологии „lift-off“ при внедрении металлического участка в сверхпроводящий нанопровод). Это особенно актуально для многокаскадных логических устройств, в которых один каскад может содержать сверхпроводящий участок, управляемый внешним затвором, и резистивный участок, служащий затвором для следующего каскада.

Во-вторых, интеграция сопротивлений смешанным ионным облучением через маску позволяет изготовить все интегрированные сопротивления за одну технологическую операцию облучения.

В-третьих, с помощью варьирования дозы смешанного ионного облучения, а также геометрии облученной области, можно корректировать номинал интегрированного сопротивления, либо при уменьшении дозы создавать участки с подавленной сверхпроводимостью, обладающие пониженными критическими свойствами [16].

В-четвертых, используемые нами меньшие толщины разделительного диэлектрика позволяют реализовать требуемый для переключения сверхпроводящего нанопровода прогрев до критической температуры быстрее, чем в устройствах „h-tron“.

Ранее нами было изучено поведение NbN под смешанным ионным облучением, необходимым для изготовления элементов сверхпроводниковой электроники. Так, при облучении смешанным протонно-кислородным пучком пленки NbN толщиной 5 nm в диапазоне доз 1.8–9 dpa (displacements per atom) наблюдается изменение характера проводимости со сверхпроводящего на металлический. При дозах 9–12.6 dpa пленка становится диэлектрической при температуре 4.2 K, при этом изменение характера проводимости обусловлено изменением химического состава пленки [16].

Основной целью настоящей работы является экспериментальная демонстрация переключения небольшого

участка сверхпроводящего NbN-нанопровода из сверхпроводящего состояния в нормальное и обратно на высоких частотах за счет локального нагрева теплом, выделяемым участком нормального металла (затвором), расположенным в соседнем слое.

1. Описание эксперимента

Объектом исследования является двухслойная NbN-структура на сапфировой подложке, представляющая собой пару NbN-нанопроводов, находящихся в разных слоях. Нанопровода при этом расположены перпендикулярно друг к другу и разделены диэлектриком Al_2O_3 толщиной 12.5 nm (рис. 2).

В нанопровод во втором слое в области пересечения с другим нанопроводом интегрировано управляющее сопротивление R_1 . Этот нанопровод далее будем называть затвором. Второй нанопровод в области пересечения остается сверхпроводящим и переводится в нормальное состояние путем превышения T_c в результате передачи тепла от R_1 на затворе, находящегося на расстоянии, равном толщине межслоевого диэлектрика. Данный нанопровод будем называть основным. Ширина затвора и основного провода в наших экспериментах была одинакова и составляла 400 nm, толщина нанопроводов (соответствует толщине пленки NbN) составляла 6.5 nm для основного провода (первый слой) и 5.5 nm для затвора (второй слой).

Сопротивление R_1 в сверхпроводящем NbN-затворе представляет собой квадратную область 400×400 nm из оксинитрида ниобия NbNO, созданную из исходного нитрида ниобия под действием смешанного ионного облучения. Эта область обладает металлическим типом проводимости при температуре 4.2 K и изготовлена селективным замещением атомов азота на атомы кислорода по радиационной технологии, разработанной в НИЦ КИ [17]. В рамках данной технологии проведено облучение нанопровода через маску смешанным ионным пучком, состоящим из 99% протонов и 1% ионов кислорода. Энергия смешанного ионного пучка при проведении облучения составляла 1 keV, плотность ионного тока — 0.849 A/m^2 . Флюенс облучения составлял $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. После облучения проводился стабилизирующий отжиг при температуре 200°C . В результате облучения и отжига электрическое сопротивление облученного материала на квадрат составляло $\sim 1.2 \text{ k}\Omega/\text{sq}$.

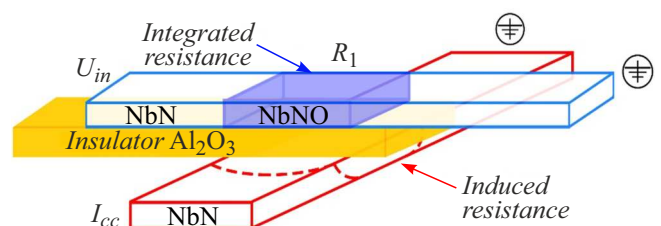


Рис. 2. Схема единичного логического устройства.

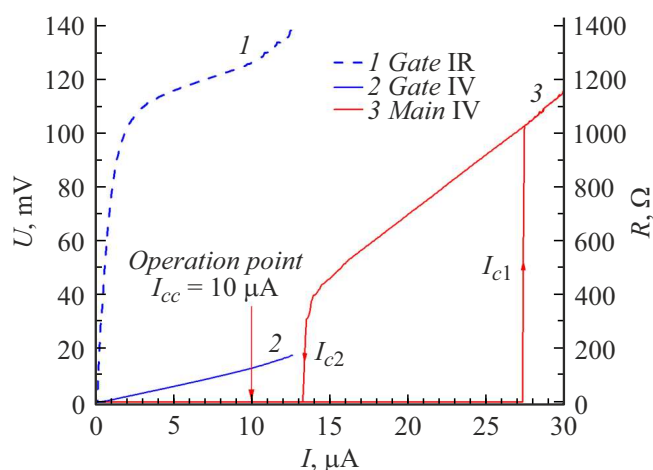


Рис. 3. ВАХ затвора (Gate IV) и основного провода (Main IV) с зависимостью дифференциального сопротивления от тока через затвор (Gate IR).

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) затвора (Gate IV) и основного провода (Main IV), а также график зависимости электрического сопротивления от тока через затвор (Gate IR).

Следует отметить, что на ВАХ основного провода 3 присутствует гистерезис, т.е. разница между критическим током перехода из сверхпроводящего состояния в нормальное I_{c1} и критическим током перехода из нормального состояния в сверхпроводящее I_{c2} . Эта разница объясняется тем, что, находясь в нормальном состоянии, сверхпроводник подвержен джоулеву самоподогреву, который удерживает его от перехода в сверхпроводящее состояние [18]. В связи с данным фактом в качестве рабочего значения тока I_{cc} , подаваемого на основной провод, выбрано значение, меньшее I_{c1} и I_{c2} , т.е. соответствующее нахождению основного провода в сверхпроводящем состоянии. Рабочее значение тока I_{cc} выбрано так, что $I_{cc} > I_{c1}$, и не будет наблюдаться возврат основного провода в сверхпроводящее состояние после единичного переключения, и, как следствие, нарушения корректной работы устройства. Таким образом, в качестве рабочего значения тока на основном проводе выбрано значение $I_{cc} = 10 \mu\text{A}$.

Кривые 2 и 1 (рис. 3) соответственно представляют собой ВАХ и дифференциальное сопротивление затвора в рабочей области интегрированного сопротивления (т.е. до перехода в нормальное состояние сверхпроводящих участков затвора). Для номинала интегрированного сопротивления наблюдается нелинейность: номинал интегрированного сопротивления растет с ростом тока.

Рассмотрим подробнее кривую 1. Резкий рост номинала сопротивления в диапазоне токов $0 - 5 \mu\text{A}$ предположительно связан с переходом в нормальное состояние остатков сверхпроводящей фазы в зоне формирования сопротивления. Замедленный рост сопротивления в диапазоне токов $5 - 10 \mu\text{A}$ может быть следствием измене-

ния сопротивления на квадрат облученной области по мере ее разогрева при развертке тока во время снятия ВАХ.

Дальнейший загиб кривой при повышении тока через затвор может быть связан с переходом сверхпроводящего участка затвора в „резистивное“ состояние. Оно объясняется формированием и перемещением вихрей Абрикосова при приближении тока к критическому току перехода в нормальное состояние (не показан на кривых 1 и 2, поскольку переход сверхпроводящей части затвора в нормальное состояние выходит за его рабочий диапазон). Более подробно резистивное состояние описано в работе [19]. Таким образом, дифференциальное сопротивление в области более $10 \mu\text{A}$ является суммой номинала интегрированного сопротивления и добавочного последовательного сопротивления сверхпроводящей области затвора.

Сопоставив кривую 1 с кривой 2, можно отметить, что для корректной работы устройства затвор должен обладать сопротивлением $1 - 1.3 \text{ k}\Omega$, что соответствует минимальному подаваемому входному напряжению $\sim 3 \text{ mV}$. Максимальное входное напряжение ограничено $\sim 18 \text{ mV}$, поскольку при превышении данного значения происходит нежелательный переход в нормальное состояние сверхпроводящей части затвора. Следует отметить, что при фиксированной толщине пленки NbN номинал интегрированного сопротивления зависит от дозы облучения (доза определяет сопротивление на квадрат пленки), а также от формы облучаемой области.

В настоящей работе были выполнены эксперименты двух типов. В эксперименте первого типа исследовалась пара затвор — основной провод на способность затвора переключать основной провод из сверхпроводящего состояния в нормальное на больших частотах. Для этого на затвор с помощью внешнего генератора ВЧ сигналов подавалось переменное напряжение U_{in} , служащее входным сигналом. На основной провод с помощью внешнего источника тока подавался постоянный ток питания I_{cc} , величина которого выбиралась меньше критического тока обратного перехода (I_{c2}) основного провода (тока перехода из нормального состояния в сверхпроводящее). Ограничение тока питания основного провода значением тока обратного перехода ($I_{cc} < I_{c2}$) была обусловлена необходимостью обеспечения возврата основного провода в сверхпроводящее состояние после снятия сигнала на затворе. При переводе основного провода в нормальное состояние на нем возникает напряжение, которое регистрируется осциллографом. В такой конфигурации исследуемое устройство работает в режиме повторителя, т.е. подача напряжения на вход приводит к возникновению напряжения на выходе устройства.

Схема проведения экспериментов первого типа представлена на рис. 4. На первый канал осциллографа подавался синхронизационный импульсный сигнал с генератора. Для регистрации исходного сигнала на второй

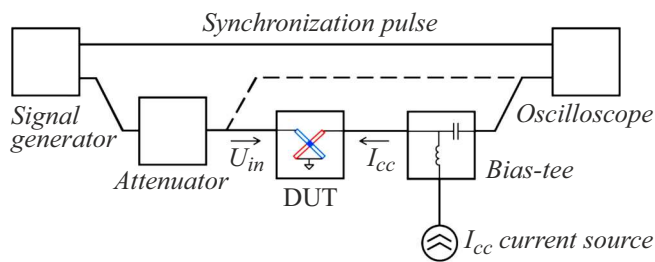


Рис. 4. Схема измерения тестируемого устройства с регистрацией входного и выходного сигнала осциллографом.

канал осциллографа подается сигнал с выхода генератора напрямую вместе с синхронизационным импульсом (штриховая линия на рис. 4). Затем сигнал с выхода генератора подается уже на тестируемое устройство, при этом синхронизационный импульс продолжает подаваться на первый канал осциллографа. Данная схема измерений позволяет приблизиться к корректной синхронизации входного и выходного сигналов на устройстве, однако не спасает от возможной фазовой задержки выходного сигнала в процессе прохождения через устройство и криогенный ВЧ тракт.

На вход подавался ВЧ сигнал двух видов: прямоугольный однополярный импульс и синусоидальный сигнал. Частота следования прямоугольных импульсов составила 50 MHz, минимальное время нарастания фронта использованного входного прямоугольного импульса составило 1.2 ns, что формально соответствует частоте 0.83 GHz. Поэтому особое внимание было уделено исследованию области фронта выходного сигнала, крутизна которого отражает быстродействие устройства.

Подача на вход устройства сигнала синусоидальной формы с частотой 100 MHz использовалась для демонстрации корректной работы устройства: на выходе ожидался периодический сигнал с удвоенной частотой. Это связано с тем, что локальный нагрев, являющийся причиной срабатывания устройства, генерируется в резистивном участке затвора вне зависимости от направления тока (знака напряжения) через затвор. Напряжение на выходе зависит только от абсолютного значения амплитуды входного сигнала и должно возникать как на положительном, так и на отрицательном полупериодах входящей синусоиды.

Ограничения описанных выше экспериментов по частотам были обусловлены ограниченными возможностями осциллографа по регистрации сигналов во времени: предельная частота для использованного прибора составляла 1 GHz.

В эксперименте второго типа с помощью внешнего СВЧ генератора на вход устройства подавался синусоидальный СВЧ сигнал на частотах 1, 4 и 9 GHz. В связи с отсутствием осциллографа на указанный диапазон частот регистрация выходного сигнала проводилась на анализаторе спектра в области удвоенной частоты (2, 8 и 18 GHz соответственно). При подаче синусоидального

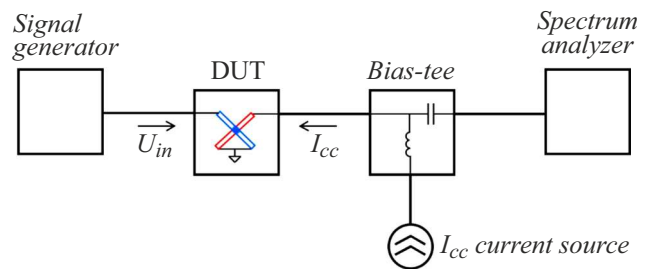


Рис. 5. Схема измерения тестируемого устройства с регистрацией выходного сигнала анализатором спектра.

сигнала на анализаторе спектра даже с выключенным питанием возможно возникновение пика из-за проходящего сигнала и его гармоник. Поэтому измерения проводились с включенным и выключенным I_{cc} . Схема измерений представлена на рис. 5.

Для обеспечения омического контакта сверхпроводящих нанопроводов с измерительным стендом на слой NbN были напылены платиновые контакты с промежуточным подслоем никеля. Контакт между образцом и стендом обеспечивается путем приклеивания золотого волоска к образцу с использованием индия. Измерительный стенд помещается в сосуд с жидким гелием и охлаждается до температуры 4.2 K.

2. Результаты и обсуждение

В ходе проведения экспериментов первого типа было установлено, что при превышении амплитуды прямоугольного однополярного импульсного сигнала напряжения срабатывания инвертора на втором проводе наблюдаются прямоугольные импульсы, длительность и частота которых соответствуют длительности и частоте входных импульсов (50 MHz). Время нарастания фронта выходного сигнала также составляла ~ 1.2 ns, что соответствует времени нарастания фронта входного сигнала. Если амплитуда входного импульсного сигнала ниже порога срабатывания инвертора, то на втором нанопроводе не наблюдалось импульсов, т.е. основной нанопровод не переключался в нормальное состояние.

На рис. 6 показаны зависимости входного напряжения на затворе (кривая 1) и выходного напряжения на сверхпроводящем нанопроводе (кривая 2). Как видно из рис. 6, скорость нарастания выходного сигнала по переднему фронту соответствует скорости нарастания входного сигнала и составляет ~ 1.2 ns.

Для синусоидального входного сигнала как только напряжение попадало в рабочий диапазон инвертора на втором нанопроводе наблюдался сигнал с удвоенной частотой по сравнению с частотой входного сигнала. Этот эффект удвоения частоты объясняется тем, что инвертор срабатывает как на положительной, так и на отрицательной ветвях синусоиды. Это происходит потому, что локальный нагрев, являющийся причиной сраба-

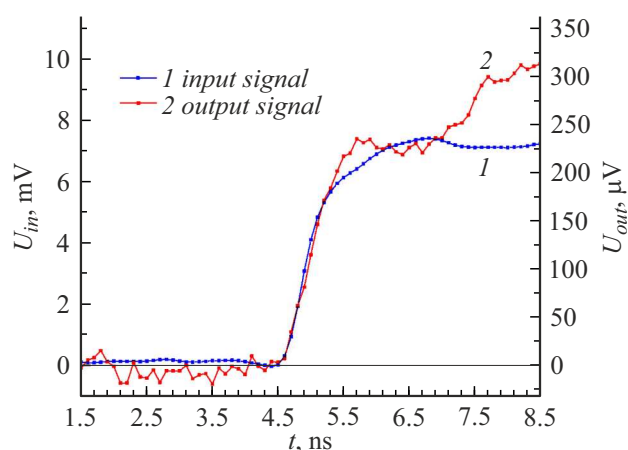


Рис. 6. Передний фронт входного сигнала на затворе (1) и выходного сигнала (2) на основном нанопроводе вследствие его переключения в нормальное состояние прямоугольным однополярным импульсом.

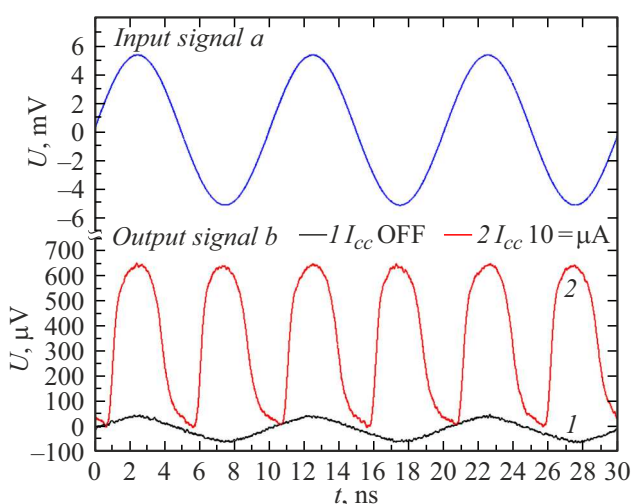


Рис. 7. Переключение сверхпроводящего нанопровода синусоидальным сигналом: *a* — входной сигнал на затворе; *b* — выходной сигнал на сверхпроводящем нанопроводе.

тивания инвертора, генерируется в резистивном участке первого нанопровода вне зависимости от направления тока (знака напряжения) через первый нанопровод.

На рис. 7 представлены осциллограммы синусоидального входного сигнала *a* и выходного сигнала *b* с включенным ($I_{cc} = 10 \mu\text{A}$) и выключенным ($I_{cc} \text{ OFF}$) питанием.

Анализ рис. 7 показывает, что периодические максимумы выходного сигнала характеризуются формой верхней части синусоиды, повторяя верхнюю часть входного сигнала. В это время выходной нанопровод находится в нормальном состоянии и по закону Ома на нем возникает напряжение, пропорциональное величине возникающего сопротивления.

Переход сверхпроводящего нанопровода в нормальное состояние возникает при превышении уровня входного напряжения выше определенного порогового уровня ($\sim 3 \text{ mV}$). Обратный переход нанопровода из нормального состояния в сверхпроводящее происходит в тот момент, когда величина входного напряжения падает ниже порогового уровня ($\sim 3 \text{ mV}$).

Между максимумами величина выходного сигнала близка к нулю (т.е. в это время выходной нанопровод находится в сверхпроводящем состоянии). Несмотря на знакопеременный характер входного сигнала, выходной сигнал всегда имеет положительную полярность. Частота выходного сигнала в два раза больше, чем частота входного сигнала (эффект удвоения частоты).

Измерения переключений в СВЧ области частот проводились с применением анализатора спектров. На рис. 8 представлены спектры выходного сигнала на частоте 18 GHz при переключении сверхпроводящего нанопровода входным синусоидальным сигналом на частоте 9 GHz . На рис. 8, *a* продемонстрирован спектр при включенном питании на выходном нанопроводе, а на рис. 8, *b* — при выключенном питании на выходном нанопроводе.

Анализ рис. 8 показывает, что при использовании входного сигнала с частотой 9 GHz на удвоенной частоте 18 GHz наблюдается сильный пик интенсивности (рис. 8, *a*) высокочастотного сигнала, который исчезает при снятии питания с выходного каскада (рис. 8, *b*). Также следует отметить, что на частоте подаваемого сигнала пик наблюдается с выключенным I_{cc} (проходящий сигнал), а при включении I_{cc} интенсивность пика увеличивается (проходящий сигнал и, предположительно, гармоника выходного сигнала).

Аналогичный эффект удвоения частоты сигнала на выходе устройства по сравнению с частотой на входе был экспериментально получен для следующих частот входящих сигналов: 1 , 4 и 9 GHz , т.е. на выходе наблюдались пики на частотах 2 , 8 и 18 GHz в рабочем диапазоне амплитуды работы инвертора.

Заключение

Представлены впервые полученные результаты по экспериментальному наблюдению эффектов удвоения частоты при работе двухслойного криогенного логического устройства на основе сверхпроводящих нанопроводов из NbN, использующего эффект локального нагрева.

Экспериментально продемонстрировано переключение сверхпроводящего провода из сверхпроводящего состояния в нормальное при подаче прямоугольного импульса с сохранением длительности фронта вплоть до 1.2 ns (соответствует частоте переключения $\sim 0.83 \text{ GHz}$ и минимальным параметрам имеющегося в настоящее время оборудования).

Экспериментально показано, что переключение сверхпроводящего нанопровода в нормальное состояние при

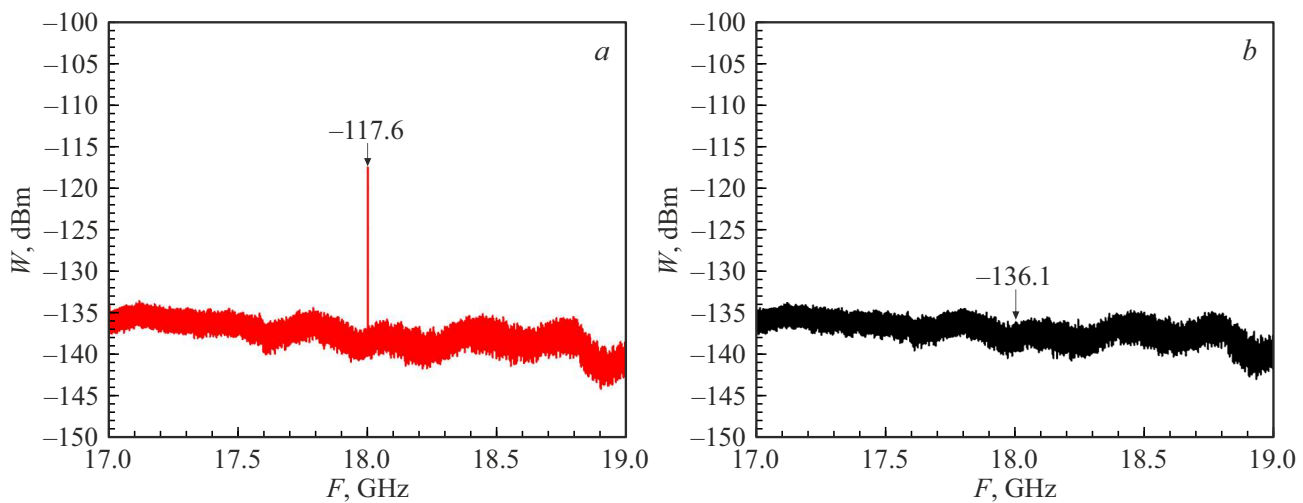


Рис. 8. Спектр выходного сигнала на частоте 18 GHz при переключении сверхпроводящего нанопровода входным синусоидальным сигналом на частоте 9 GHz: *a* — при включенном питании на выходном нанопроводе; *b* — при выключенном питании на выходном нанопроводе.

подаче синусоидального ВЧ сигнала на затвор происходит при превышении уровня входного сигнала порогового значения ~ 3 мВ; полярность выходного сигнала положительная и не зависит от знака входного сигнала; частота выходного сигнала в два раза больше частоты входного синусоидального сигнала.

Экспериментально продемонстрирован эффект удвоения частоты СВЧ сигнала на выходе (2, 8 и 18 GHz) по сравнению с частотой входного сигнала 1, 4 и 9 GHz.

Полученные результаты доказывают потенциальную возможность использования изготовленных образцов для создания логических устройств с высокими тактовыми частотами.

Финансирование работы

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R.W. Keyes. *Proceedings IEEE*, **89** (3), 227 (2001). DOI: 10.1109/5.915372
- [2] V.A. Bespalov, N.A. Dyuzhev, V.Yu. Kireev. *Nanobiotechnol. Reports*, **17** (1), 24 (2022). DOI: 10.1134/S2635167622010037
- [3] E. Masanet, A. Shehabi, N. Lei, S. Smith, J. Koomey. *Science*, **367** (6481), 984 (2020). DOI: 10.1126/science.aba3758
- [4] S. Alam, M.S. Hossain, S.R. Srinivasa, A. Aziz. *Nature Electron.*, **6** (3), 185 (2023). DOI: 10.1038/s41928-023-00930-2
- [5] R. Bairamkulov, G. De Micheli. *IEEE Circuits Systems Magazine*, **24** (2), 16 (2024). DOI: 10.1109/MCAS.2024.3376492
- [6] O.A. Mukhanov. *IEEE Transactions Appl. Superconduct.*, **21** (3), 760 (2011). DOI: 10.1109/TASC.2010.2096792
- [7] J. Ren, G. Tang, F. Wang, S. Li, P. Qu, X. Gao, L. Ying, S. Yang, B. Liu, X. Zhang, X. Gao, W. Peng, Z. Wang. *CCF Trans. HPC*, **4**, 182 (2022). DOI: 10.1007/s42514-022-00114-y
- [8] D.A. Buck. *Proc. IRE*, **44** (4), 482 (1956). DOI: 10.1109/JRPROC.1956.274927
- [9] V.L. Newhouse, J.W. Bremer. *J. Appl. Phys.*, **30**, 1458 (1959). DOI: 10.1063/1.1735362
- [10] K.K. Likharev. *Physica C: Superconduct. its Applications*, **482**, 6 (2012). DOI: 10.1016/j.physc.2012.05.016
- [11] 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 2674063 РФ, заявл. 27.03.2018, опубл. 04.12.2018, Бюл. № 34. 13 с.)
- [12] A.N. McCaughan, K.K. Berggren. *Nano Lett.*, **14** (10), 5748 (2014). DOI: 10.1021/nl502629x
- [13] A.N. McCaughan, S.N. Abebe, Q.Y. Zhao, K.K. Berggren. *Nano Lett.*, **16** (12), 7626 (2016). DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b03593
- [14] 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), 054011 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.14.054011
- [15] Q.Y. Zhao, E.A. Toomey, B.A. Butters, A.N. McCaughan, A.E. Dane, S.W. Nam, K.K. Berggren. *Supercond. Sci. Technol.*, **31** (3), 035009 (2018). DOI: 10.1088/1361-6668/aaa820
- [16] Б.А. Гурович, К.Е. Приходько, Л.В. Кутузов, Б.В. Гончаров, Д.А. Комаров, Е.М. Малнева. *ФТТ*, **64** (10), 1390 (2022). DOI: 10.21883/FTT.2022.10.53079.47НН

- [17] Б.А. Гурович, К.Е. Приходько, Е.А. Кулешова, К.И. Маслаков, Д.А. Комаров. ЖЭТФ, **143** (6), 1062 (2013). DOI: 10.7868/S0044451013060062
- [18] M. Tinkham, J.U. Free, C.N. Lau, N. Markovic. Phys. Rev. B, **68** (13), 134515 (2003). DOI: 10.1103/PhysRevB.68.134515
- [19] Г.Ю. Голубев, К.Е. Приходько, Б.А. Гурович, Д.А. Комаров, Е.М. Малиева, Б.В. Гончаров, Д.А. Гончарова, В.Л. Столяров. ФТТ, **66** (6), 859 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.06.58237.23НН