

02,13

Создание элементов из NbN для логических устройств классических криокомпьютеров

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

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

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

¶ E-mail: prihodko_ke@nrcki.ru

Поступила в Редакцию 9 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 9 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

Описан метод, который позволяет снизить критический ток и мощность переключения нанопровода небольшой длины из сверхпроводящего состояния в нормальное за счет встраивания в нанопровод участка нормального металла. Этот эффект обусловлен локальным нагревом сверхпроводящего проводника за счет тепла, выделяемого в нормальном металле. Интегрированное сопротивление создавалась из исходного NbN под действием ионного облучения через маску. Полученные значения мощностей переключения позволяют конструировать многослойные логические элементы без гальванической связи для классических криокомпьютеров.

Ключевые слова: тонкие сверхпроводящие пленки NbN, бесконтактное переключение состояния сверхпроводника, криоэлектронные устройства, интегрированные криогенные резисторы.

DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51246.36H

1. Введение

В последние годы в НИЦ „Курчатовский институт“ развивается направление по созданию основных логических элементов классических криогенных компьютеров на основе нанопроводов из NbN.

Ранее был продемонстрирован способ бесконтактного переключения участка нанопровода из сверхпроводящего состояния в нормальное за счет нагрева соседнего нанопровода (затвора), находящегося в нормальном состоянии или с интегрированной областью нормального металла [1]. С использованием бесконтактного переключения нанопровода из сверхпроводящего состояния в нормальное был сформирован многокаскадный инвертор сигнала, что продемонстрировало возможность создания схем с большой степенью интеграции, поскольку для каждого звена использовался независимый нанопровод, подключенный к источнику опорного напряжения [2].

Наиболее перспективным с точки зрения минимизации энергопотребления схемы является организация бесконтактных переключений нанопроводов, расположенных в соседних слоях и разделенных слоем диэлектрика, поскольку при этом расстояние между нанопроводами составляет $\sim (5-10)$ nm. Кроме минимизации энергопотребления, многослойная схема потенциально позволяет существенно увеличить плотность расположения элементов при создании устройства. Создание многослойных устройств требует разработки технологии напыления ультратонких функциональных слоев из NbN при температурах, близких к комнатной, для того, чтобы не подвергать многократному отжигу уже сформированные функциональные слои [3].

Были исследованы зависимости минимальной мощности, выделяемой в затворе, необходимой для переключения нанопровода, от расстояния между затвором и нанопроводом, а также от геометрических размеров нанопровода и тока, протекающего через нанопровод, в том числе в двухслойной схеме, когда нанопровод и затвор разделены слоем диэлектрика толщиной 10 nm. Было показано, что такие переключения могут быть реализованы при мощности на затворе ~ 0.3 nW [2].

В настоящей работе выполнено изучение возможности еще большего снижения минимальной требуемой мощности за счет уменьшения размеров элементов, уменьшения расстояния между ними, а также за счет увеличения рабочей температуры термостата.

Альтернативные разработки подобных классических логических элементов проводятся в группе под руководством Берггрена, где были созданы элементы nTrop [4], а также продемонстрирована работа логических схем на их основе. Основным отличием элемента nTrop от разрабатываемых в НИЦ „Курчатовский институт“ бесконтактных переключателей состоит в том, что в них реализуется гальваническая связь между входными и выходными сигналами, что приводит к эффекту растекания токов при последовательном соединении многокаскадных устройств, что затрудняет создание стабильных схем на их основе. Наиболее близким к нашей разработке является созданный в этой группе бесконтактный элемент hTrop [5]. В элементе hTrop отсутствует гальваническая связь между нанопроводами, а управление протеканием тока через основной нанопровод осуществляется бесконтактным образом путем нагрева от участка управляющего нанопровода после его перехода в нормальное

состояние. В работе [6] бесконтактное переключение основного нанопровода в нормальное состояние было использовано в схеме управления ячейками памяти для реализации гальванической развязки между затвором и основным нанопроводом.

Выбор тонкопленочного нитрида ниобия в качестве низкотемпературного сверхпроводника при изготовлении логических устройств обусловлен его технологичностью, высокой температурой сверхпроводящего перехода, наличием опыта работы с ним, а также разработанной технологией его модификации до металлического состояния под действием ионного облучения, что позволяет создавать интегрированные сопротивления под действием облучения через окна в маске.

Однако разрабатываемые способы бесконтактного нагрева сверхпроводящих нанопроводов и возможность реализации логических элементов на основе переходов сверхпроводников в нормальное состояние и обратно, никак не ограничиваются использованием нитрида ниобия. Другие тонкопленочные сверхпроводники, синтезируемые при комнатной температуре, также могут быть использованы для создания подобных логических устройств, при этом требуется разработать способы радиационного преобразования сверхпроводника в металл для формирования интегрированных криогенных резисторов.

2. Методика эксперимента

Сверхпроводящие пленки NbN толщиной (5–6) nm наносились на подложку из монокристаллического сапфира методом магнетронного распыления при комнатной температуре подложки [3].

Изготовление наноструктур проводилось методом электронной литографии с использованием электронного резиста 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 ионным пучком через окна в защитной маске [7,8]. В работе [7] были исследованы электрические свойства тонких пленок из нитрида ниобия после воздействия смешанного ионного облучения до различных доз. Было показано, что облучение NbN до флюенса (1–2) дpa (по азоту) приводит к образованию фазы оксинитрида ниобия, проявляющей металлические свойства при рабочей температуре 4.2 К.

Интеграция участков нормального металла в сверхпроводящий нанопровод в работе производился путем облучения участка сверхпроводящего нанопровода смешанным ионным пучком до флюенса ~ 1 дpa [8] через окно в маске из ПММА, созданное методом электронной литографии, аналогично процедуре, подробно описанной в работе [9]. 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.

В работе были изучены нанопровода шириной (50–100) nm различной длины с интегрированными сопротивлениями, сформированными под действием ионного облучения. Длины сверхпроводящих нанопроводников были соизмеримы или меньше длин участков нормальной фазы (интегрированных сопротивлений). Эксперименты проводились в жидком гелии при температуре подложки 4.2 К, а также в машине замкнутого цикла в диапазоне температур от 3.5 до 8 К.

3. Результаты и обсуждение

Ранее нами было экспериментально продемонстрировано уменьшение прямого критического тока нанопровода до значения тока возврата в сверхпроводящее состояние при встраивании в него участка нормального металла [6], что основывалось на методе, разработанном в [10].

При реализации бесконтактного переключения элементов в соседних слоях, разделенных слоем тонкого диэлектрика, требуемая мощность переключения будет тем ниже, чем ближе температура переключаемого элемента к критической температуре перехода T_c . Для дополнительного локального увеличения температуры переключаемого элемента в настоящей работе было использовано тепло, выделяемое в участке нормального металла, интегрированного в переключаемый сверхпроводящий элемент.

Из общих соображений ясно, что такой дополнительный нагрев будет более эффективным в случае, если размер переключаемого сверхпроводника будет небольшим. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование эффекта снижения мощности переключения сверхпроводящего нанопровода изготовленного из NbN в зависимости от геометрических размеров за счет влияния интегрированного в него под действием ионного облучения участка нормального металла.

На рис. 1 показан пример исследованных нанопроводников из NbN с интегрированными сопротивлениями. При ширине нанопровода 75 nm суммарная длина нанопроводника составила 300 nm (см. рис. 1, *a*) и 700 nm (см. рис. 1, *b*), при этом часть нанопровода (длиной ~ 200 nm) занимает область нормального металла. Поскольку в данной работе длина сверхпроводящего участка нанопровода была небольшой по сравнению с длиной интегрированного сопротивления, тепло, выделяемое в нормальном металле при протекании тока через нанопровод, начинало влиять на величину критического тока нанопровода, а также на минимальную мощность, необходимую для переключения сверхпроводящего нанопровода в нормальное состояние W_{\min} , в сторону их уменьшения.

На рис. 2 показана зависимость W_{\min} от R_0 для различных сформированных нанопроводов: (1) — длина нанопровода 300 nm; (2) — длина нанопровода 700 nm.

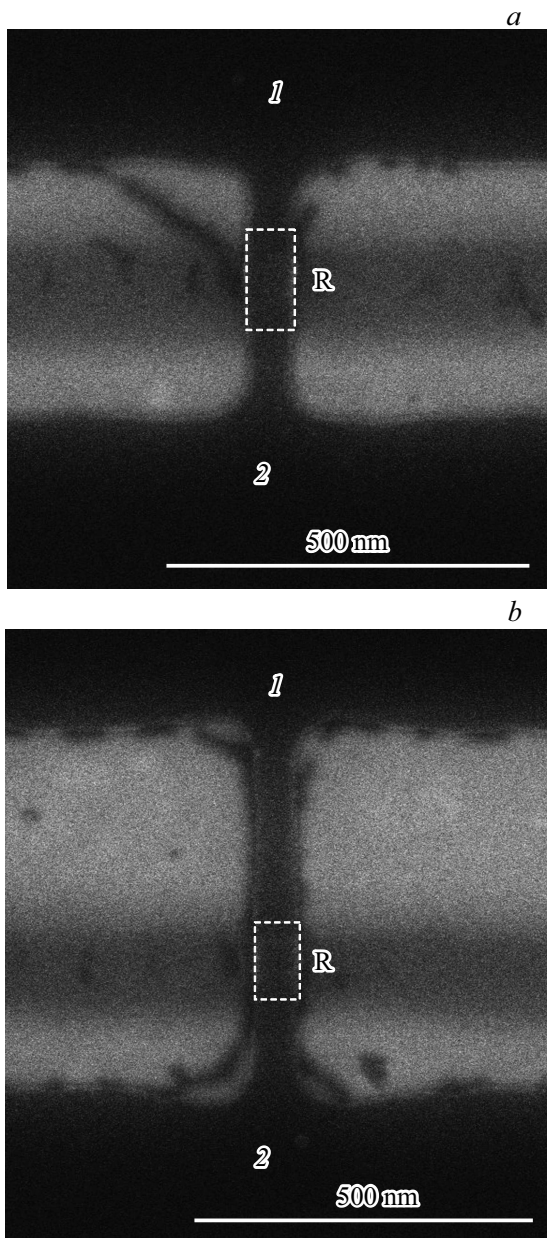


Рис. 1. Нанопроводники из NbN длиной: (а) — 300 нм и (б) — 700 нм с интегрированными сопротивлениями (темная полоса). Длина интегрированных сопротивлений составляет ~ 200 нм: (1)–(2) — нанопровод из NbN; R — участок нормального металла, созданный посредством облучения участка нанопровода (пунктирный прямоугольник) смешанным ионным пучком.

Вычисление мощности, выделяемой на резистивном участке при переключении нанопровода W_{\min} , проводилась с использованием статических вольт-амперных характеристик как произведение номинала сопротивления R_0 области нормального металла (определяемой по наклону кривой до перехода) на квадрат тока перехода I нанопровода из сверхпроводящего состояния в нормальное. Как видно из рис. 2, при длине нанопровода

700 нм мощность переключения составляет несколько десятков нановатт, в то время как уменьшение длины до 300 нм позволяет снизить мощность переключения до (100–500) пВт и менее вне зависимости от номинала интегрированного сопротивления.

Увеличение температуры образца также приводит к уменьшению величины критического тока перехода нанопровода с интегрированным сопротивлением из сверхпроводящего состояния в нормальное, а также минимальной мощности, необходимой для такого переключения (см. рис. 3). Это обусловлено тем, что при приближении температуры подложки к критической температуре перехода T_c , дополнительная мощность, необходимая для нагрева нанопровода до критической температуры, уменьшается. Как видно из рис. 3, по

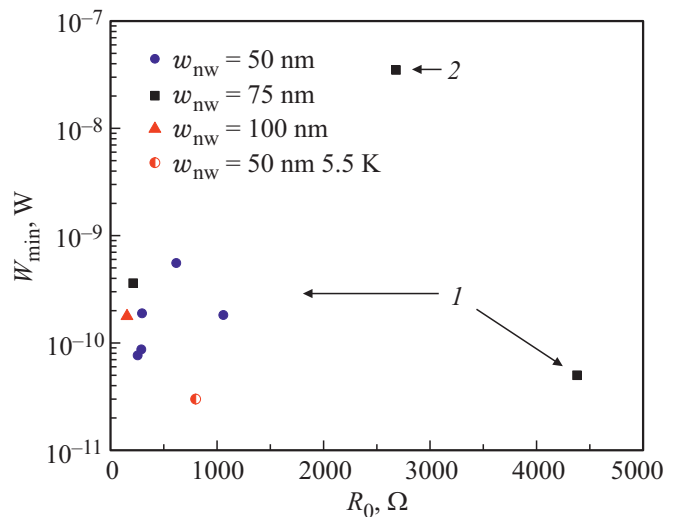


Рис. 2. Зависимость мощности переключения W_{\min} от номинала R_0 для различных ширин нанопроводов: (1) — длина нанопровода 300 нм; (2) — длина нанопровода 700 нм.

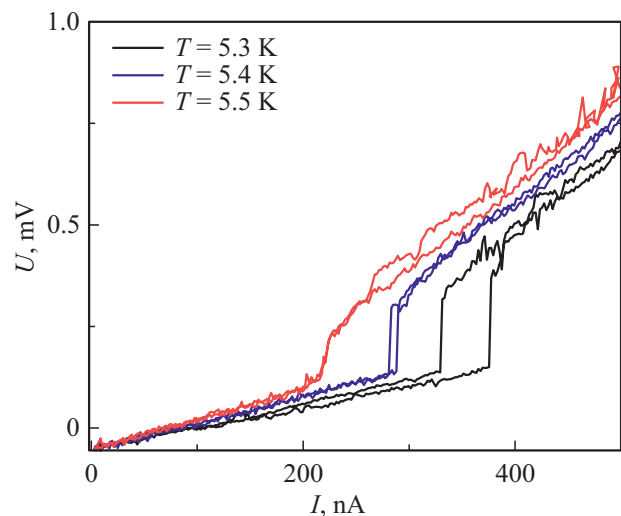


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики при различных температурах для нанопровода длиной 300 и шириной 50 нм с интегрированным сопротивлением $R_0 = 800 \Omega$.

мере приближения температуры образца к критической температуре сверхпроводящего перехода, увеличивается ширина области перехода и уменьшается величина гистерезиса по току. При выборе оптимальных значений рабочих параметров функционирования логических устройств на основе сверхпроводящих нанопроводов с интегрированными сопротивлениями следует учитывать необходимость обеспечения резкого перехода из сверхпроводящего состояния в нормальное и обратно. Примером правильной характеристики является кривая при температуре $T = 5.5$ К, показанная на рис. 3. Дальнейшее увеличение температуры образца приводит к существенному увеличению ширины перехода по току, что может затруднить правильное переключение формируемых логических элементов.

4. Заключение

Полученные в работе данные по уменьшению мощности переключения единичного нанопровода из сверхпроводящего состояния в нормальное при малой длине нанопровода, позволяют использовать этот эффект при конструировании многослойных логических элементов (НЕ, ИЛИ, И) без гальванической связи, характеризующихся малым энергопотреблением.

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 нано структур.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“ (приказ от 02.07.2020 № 1055).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Б.А. Гурович, К.Е. Приходько, А.Г. Домантовский, В.Л. Столяров, Д.А. Комаров, Е.А. Кулешова, Л.В. Кутузов. Патент РФ № 2674063 (2018).
- [2] Б.А. Гурович, К.Е. Приходько, Л.В. Кутузов, Б.В. Гончаров. ФТТ **62**, 9, 1420 (2020).
- [3] B.V. Goncharov, B.A. Gurovich, K.E. Prikhodko, M.M. 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**, 012023 (2020).
- [4] A.N. McCaughan, K.K. Berggren. Nano Lett. **14**, 10, 5748 (2014).

- [5] R. Baghdadi, J.P. Allmaras, B.A. Butters, A.E. Dane, S. Iqbal, A.N. McCaughan, E.A. Toomey, Q. Zhao, A.G. Kozorezov, K.K. Berggren. Phys. Rev. Appl. Am. Phys. Soc. **14**, 5, 1 (2020).
- [6] M. Nguyen, G.J. Ribeill, M.V. Gustafsson, S. Shi, S.V. Aradhya, A.P. Wagner, L.M. Ranzani, L. Zhu, R. Baghdadi, B. Butters, E. Toomey, M. Colangelo, P.A. Truitt, A. Jafari-Salim, D. McAllister, D. Yohannes, S.R. Cheng, R. Lazarus, O. Mukhanov, K.K. Berggren, R.A. Buhrman, G.E. Rowlands, T.A. Ohki. Sci. Rep. **2020**, **10**, 248(2020).
- [7] B.A. Gurovich, K.E. Prikhodko, M.A. Tarkhov, A.G. Domantovsky, D.A. Komarov, B.V. Goncharov, E.A. Kuleshova. Micro Nanosyst. **7**, 3, 172 (2015).
- [8] 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).
- [9] Б.А. Гурович, К.Е. Приходько, Б.В. Гончаров, М.М. Деметьева, Л.В. Кутузов, Д.А. Комаров, А.Г. Домантовский, В.Л. Столяров, Е.Д. Ольшанский. ЖТФ, **90**, 11, 1860 (2020).
- [10] Б.А. Гурович, К.Е. Приходько, А.Г. Домантовский, Е.А. Кулешова, Л.В. Кутузов. Патент РФ № 2694799 (2018).

Редактор Ю.Э. Кутаев