

Сверхпроводниковый субтерагерцовый быстродействующий нанопереключателъ

Л. Кузьмин, М. Тарасов⁺¹⁾, Э. Отто, А. Калабухов, Г. Яссин^{*2)}, П. Граймс^{*2)}, П. Маускопф^{∇2)}

Чалмерский технологический университет, Гетеборг SE41296, Швеция

⁺ Институт радиотехники и электроники РАН, 125009 Москва, Россия

^{*} Оксфордский университет, Оксфорд OX1 3RH, Великобритания

[∇] Кардифский университет, Кардиф CF24 3YB, Великобритания

Поступила в редакцию 31 мая 2007 г.

После переработки 26 июня 2007 г.

Предложен, разработан, изготовлен и исследован планарный нанопереключателъ субтерагерцового диапазона частот на основе тонкой сверхпроводящей пленки. Переключателъ позволяет модулировать микроволновый сигнал или переключать его между двумя ветвями цепи с малыми потерями и большой скоростью. Переключателъ естественно интегрируется со сверхпроводниковыми высокочувствительными детекторами. Его применение позволяет избавиться от массивных и медленных механических модуляторов и повысить точность измерений в таких решающих экспериментах астрофизики, как исследование анизотропии космического фонового излучения.

PACS: 74.45.+c, 74.50.+r

Многие измерения в субтерагерцовом диапазоне частот ограничены возможностями волноводных механических переключателей и модуляторов. К таким ограничениям относятся: скорость переключения не выше десятков герц, прямые потери на уровне нескольких децибел, нестабильность переключения, большие размеры устройства и невозможность их интегрирования с криогенными детекторами. Среди критических измерений можно упомянуть исследование поляризации космического микроволнового фонового (реликтового) излучения. В настоящее время разрабатываются наземные, аэростатные и космические проекты Clover [1], EBEX [2], BICEP [3] и др. в частотном диапазоне 40–450 ГГц. Компоненты анизотропии излучения измеряются в поляриметре с переключением разности фаз между каналами $0/90^\circ$, а также $0/180^\circ$. Применение как механических, так и магнитных переключателей на эффекте Фарадея в ферритовых стержнях не позволяет получить требуемой точности измерений до 10^{-4} . Применение для модуляции рип диодов также не обеспечивает требований малых потерь на этих частотах. Вместе с тем представляется весьма заманчивым использовать сверхпроводящие структуры для снижения потерь и совместимости со сверхпроводниковыми детекторами, болометрами и смесителями.

Рассмотрим электромагнитную волну, распространяющуюся вдоль планарной линии передачи, поперек которой включен сверхпроводящий наномостик. Требуемый переключателъ в открытом состоянии должен пропускать сигнал без потерь и вызывать полное отражение в закрытом состоянии. Это достигается в случае, если переключающий элемент имеет импеданс, много больше импеданса линии в открытом состоянии и много меньше импеданса линии в закрытом состоянии. В закрытом состоянии импеданс сверхпроводящего наномостика Z_{off} складывается из геометрической индуктивности L_g и кинетической индуктивности L_k сверхпроводящего тока:

$$Z_{\text{off}} = i\omega(L_g + L_k),$$

А в открытом состоянии к импедансу Z_{on} добавляется нормальное сопротивление R_n , но исчезает кинетическая индуктивность:

$$Z_{\text{on}} = R_n + i\omega L_g$$

и в итоге должно преобладать нормальное сопротивление полоски. Ясно, что выбор материала и геометрии следует делать, исходя из максимального отличия $\omega L_g \ll R_n$. Если взять полоску нитрида ниобия длиной 5 мкм, шириной 500 нм и толщиной 20 нм, то для удельного сопротивления 200 мкОм·см получим сопротивление мостика 1 кОм и геометрическую индуктивность 3 пГн.

¹⁾ e-mail: tarasov@hitech.cplire.ru

²⁾ G. Yassin, P. Grimes, P. Mauskopf.

Кинетическая индуктивность тонкой пленки может быть рассчитана по формуле $L_k = \mu_0 \lambda^2 (l/wt)$, где $\mu_0 = 1.25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м магнитная постоянная, $\lambda = 200$ нм – лондоновская глубина проникновения, l – длина, w – ширина, t – толщина полоски. Для нашей полоски получим значение кинетической индуктивности 13 пГн. В итоге на частоте 225 ГГц мы получим полное индуктивное сопротивление 22 Ом, что приводит к частичному пропусканию в закрытом состоянии линии $Z_0 = 70$ Ом с коэффициентом рассогласования $K_p = 4R_0R_s/(R_0 + R_s)^2 = 0.7$. В случае волновода полного сечения или линии с волновым сопротивлением 300 Ом коэффициент рассогласования составит уже 0.25 в закрытом состоянии. Однако для этого случая рассогласование в открытом состоянии составит 0.7, то есть прямые потери сигнала составят 70%.

Для увеличения ослабления в закрытом состоянии можно использовать емкостное согласование. В этом случае наномостик подключается к линии передачи через конденсаторы, образующие резонансный контур с индуктивностями мостика. Импеданс в закрытом состоянии

$$Z_{\text{off}} = i\omega(L_g + L_k) + 2/i\omega C = (2 - \omega^2 LC)/i\omega C$$

на резонансной частоте может быть близок к нулю и вызывать полное отражение. В нашем случае на частоте 225 ГГц емкости должны составлять по 65 фФ. Полоса согласования по уровню –15 дБ составит около 50 ГГц. Рабочая полоса переключателя с резонансными емкостями определяется добротностью резонансного контура и может достигать 30%.

Для расширения полосы согласования и упрощения конструкции можно укоротить полоску до 1 мкм, тогда значения индуктивностей сократятся в 5 раз и можно получить приемлемые значения глубины модуляции даже без применения согласующих емкостей. Можно также использовать материал с более высоким значением удельного сопротивления (например ВТСП) и линию с более высоким импедансом. Удобно воспользоваться простым соотношением для отношения импедансов в открытом и закрытом состояниях:

$$Z_{\text{on}}/Z_{\text{off}} = \rho/\omega\mu_0\lambda^2,$$

которое не зависит от геометрии полоски.

Отметим еще малое энергопотребление такого типа переключателя $P = V^2/R_n$. В нашем случае рассеиваемая мощность составляет около 2 мВт и может быть легко снижена уменьшением объема мостика.

В качестве тестовой структуры мы использовали щелевую линию $Z_0 = 70$ Ом с плавными переходами

ми до полной высоты волновода основного сечения (см. рис.1). Структуру формировали электронной

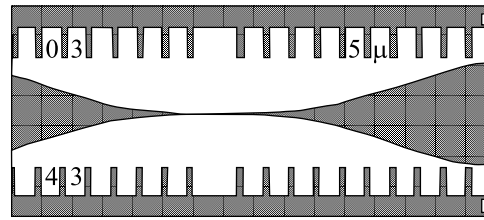


Рис.1. Изображение в оптическом микроскопе образца с щелевой линией и плавными переходами к волноводу основного сечения. Длина щелевой линии 5 мкм, ширина 0.3 мкм. Слева указан номер структуры (43)

литографией методом ионного травления на кварцевой подложке толщиной 200 мкм. Пленку нитрида ниобия наносили методом магнетронного распыления ниобиевого катода в плазме в смеси аргона и азота на нагретую подложку. Затем наносили двуслойный фоторезист и формировали рисунок электродов и щелевой линии. После проявления и чистки термическим напылением наносили 50-нанометровую пленку золота с подслоем хрома для лучшей адгезии, затем взрывали резист. Следующим этапом была электронная литография для формирования собственно наномостика из нитрида ниобия. Затем проводили реактивное ионное травление в плазме CF_4 . В итоге формировали узкий и длинный мостик (рис.2), детальную

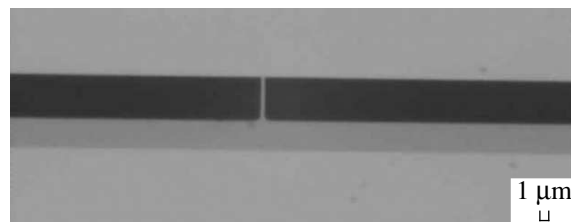


Рис.2. Изображение NbN-наномостика, расположенного в центре щелевой линии

структуру которого можно видеть на изображении в микроскопе атомных сил (рис.3).

После изготовления образцы тестировали на постоянном токе при температуре жидкого гелия. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) приведены на рис.4, переключающие характеристики – на рис.5. На частотах до 100 кГц наблюдается лишь незначительное запаздывание на уровне около 0.5 мкс, связанное с постоянной времени измерительной цепи.

Затем подложки разрезали высокооборотной алмазной пилой до размера, соответствующего размеру канавки в волноводном блоке с сечением вол-

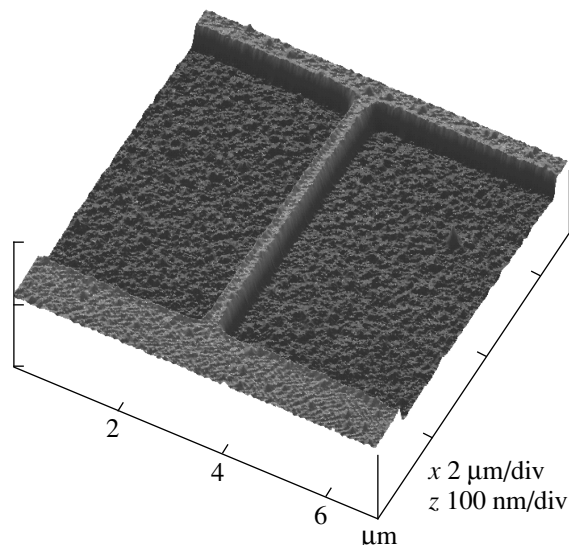


Рис.3. Изображение в микроскопе атомных сил мостика длиной 5 мкм, шириной 0.4 мкм, толщиной 20 нм

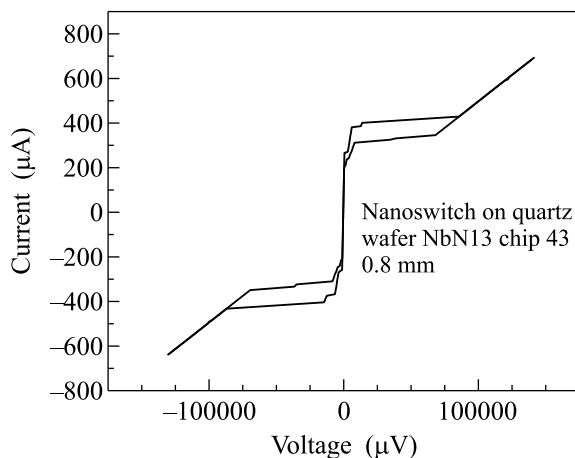


Рис.4. Вольт-амперная характеристика мостика шириной 800 нм, сопротивлением 200 Ом и критическим током 300 мкА

новода 0.55×1.1 мм. Для измерений на частотах в районе 230 ГГц в качестве источника излучения мы использовали генератор на лампе обратной волны ОВ-65. Была изготовлена криогенная вставка с круглым сверхразмерным волноводом, в которой находился волноводный блок с нанопереключателем и детектор на основе высокотемпературного джозефсоновского перехода. Измерение ВАХ джозефсоновского перехода позволяет определить уровни сигналов на выходе нашего переключателя. На рис.6 приведены ВАХ в отсутствие сигнала, при включенном генераторе и закрытом ключе и при открытом ключе. Видно, что в закрытом положении имеется небольшое

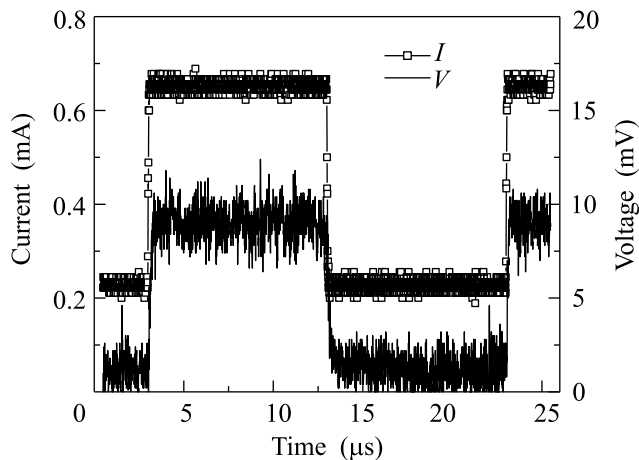


Рис.5. Переключающие характеристики мостика. Линия I – заданный ток, линия V – измеренное напряжение в зависимости от времени

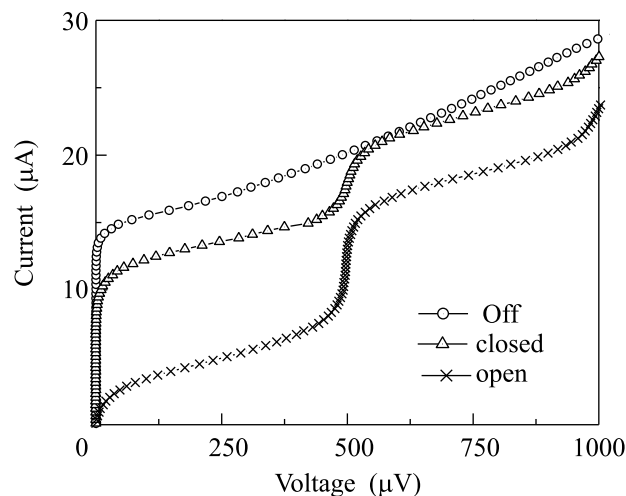


Рис.6. Вольт-амперные характеристики джозефсоновского детектора, кривые open для открытого ключа, close – закрытый ключ, off – источник излучения выключен

пропускание сигнала, а в открытом положении уровень возрастает в 5 раз, то есть на 14 дБ.

Полученное значение глубины модуляции несколько хуже, чем можно ожидать для полностью согласованного ключа (100%), однако лучше, чем для простой сверхпроводниковой полоски без резонансной настройки (30%). В нашем случае волноводной конструкции роль настроечных конденсаторов играют емкости, образованные краями щелевой линии, заходящими в канавку в волноводе (неизлучающую щель). Величина этой емкости определяется диэлектрической постоянной подложки $\epsilon = 4$, длиной $l = 4$ мм, шириной $w = 0.2$ мм и толщиной $t = 0.2$ мм, что дает значение

$C = \varepsilon_0 \varepsilon l w / t = 4 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 140$ фФ. В зависимости от требований к конкретному переключателю возможно либо его укорочение с увеличением сопротивления (снижением толщины), либо увеличение волнового сопротивления линии, либо применение интегральных настроечных емкостей, либо использование других материалов, в том числе высокотемпературных сверхпроводников. Стоит еще упомянуть, что предельное быстродействие такого ключа может быть сравнимо с оценками, сделанными для похожей топологии в NbN-боллометре на горячих электронах и составляющее менее 36 пс или до 16 ГГц [4].

Предложен, разработан, изготовлен и исследован новый тип быстродействующего планарного субтерагерцового сверхпроводникового переключателя на основе наномостика из нитрида ниобия. Исследованы переключающие характеристики на частотах до 100 кГц. На частоте 230 ГГц в волноводной конструкции глубина модуляции составила более 14 дБ. В за-

висимости от требований конкретного эксперимента характеристики могут быть улучшены применением дополнительных резонансных емкостей либо сверхпроводников с более высоким удельным сопротивлением.

Работа выполнена при финансовой поддержке Шведского агентства по науке, Российского фонда фундаментальных исследований, грант # 05-02-19650 НЦНИЛ.а, ФАНИ # 02.513.11.3157.

-
1. G. Yassin, CLOVER – A novel instrument for measuring the CMB B-mode polarization, Proc. 15 Int. Symp. Space THz Technol., 2004.
 2. P. Oxley, The EBEX experiment, Proc. SPIE **5543**, 320 (2004).
 3. B. G. Keating, BICEP: A large angular scale CMB polarimeter, Proc. SPIE **4843**, 284 (2003).
 4. K. S. P'in, M. Lindgren, M. Currie et al., APL **76**, 19, 2752 (2000).