

# Температурная чувствительность и шумы ВТСП джозефсоновского детектора на сапфировой бикристаллической подложке при температуре 77 К

М. Тарасов<sup>1)</sup>, Е. Степанцов<sup>◇</sup>, А. Калабухов<sup>+</sup>, М. Куприянов<sup>□</sup>, Д. Винклер<sup>+</sup>

<sup>◦</sup>Институт радиотехники и электроники РАН, 125009 Москва, Россия

<sup>◇</sup>Институт кристаллографии РАН, 117333 Москва, Россия

<sup>□</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, 119899 Москва, Россия

<sup>+</sup>Chalmers University of Technology, Gothenburg SE41296, Sweden

Поступила в редакцию 11 октября 2007 г.

После переработки 22 октября 2007 г.

В  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  пленках, выращенных на сапфировых бикристаллических подложках, изготовлены джозефсоновские переходы на основе искусственных межзеренных границ, образованных разворотом кристаллических решеток вокруг оси [100]. Пленки наносили методом лазерной абляции поверх буферного слоя  $\text{CeO}_2$ . Критическая температура пленок достигала 88.5 К при ширине перехода 1.5 К. Переходы шириной от 2 до 3 мкм были интегрированы в планарные логопериодические антенны и измерены при температуре 77 К. Значения характерного напряжения  $I_c R_n$  достигали 570 мкВ. Под действием внешнего излучения на частоте 113 ГГц на ВАХ наблюдались ступени Шапиро. Была измерена температурная чувствительность такого детектора, помещенного в квазиоптический приемный модуль. При модуляции температуры входного излучения 77 К/300 К на выходе детектора наблюдался отклик более 200 нВ. Собственные шумы на частоте модуляции составили около  $1 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$ , что соответствует температурному разрешению на уровне 1 К.

PACS: 74.50.+r, 85.25.Pь

Высокочувствительные микроволновые приемники необходимы для мониторинга атмосферы, биомедицинских исследований, контроля безопасности. Обычные полупроводниковые детекторы ограничены по частоте и чувствительности. Стандартные фурье-спектрометры, генераторы гетеродина на основе ламп обратной волны и лазеров дальнего ИК диапазона громоздки, сложны в управлении и дорогостоящи. Альтернативой всем этим устройствам могут стать сверхпроводниковые приемные устройства, такие, как джозефсоновские прямые и селективные детекторы, СИС смесители с джозефсоновскими генераторами гетеродина, гильберт-спектрометры, СКВИД-датчики и усилители. В отличие от традиционных ниобиевых устройств с рабочей температурой в районе 4 К, высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) позволяют работать при температуре жидкого азота (77 К), в том числе с использованием простых и дешевых криогенных охладителей замкнутого цикла. ВТСП бикристаллические переходы на сапфировых подложках представляются перспективны-

ми кандидатами для использования в микроволновых детекторах, генераторах и спектрометрах.

Сапфир имеет весьма низкие потери на СВЧ, что позволяет использовать его в качестве материала подложки в детекторах и генераторах вплоть до терагерцовых частот. Обычно для ВТСП джозефсоновских переходов на межзеренных границах использовали бикристаллы с разориентацией кристаллических решеток, образованной их вращением вокруг оси [001]. Однако известно, что кривизна искусственной межзеренной границы в наклонных бикристаллических пленках, в которых разворот осуществляется вокруг оси [100], в три раза меньше, чем в традиционных бикристаллах с разориентацией в плоскости подложки, что позволяет значительно увеличивать характеристическое напряжение джозефсоновских переходов и воспроизводимо изготавливать высококачественные джозефсоновские переходы. В этом случае рост пленок изменяется от островкового или спирального механизма роста к послойному, что приводит к меньшей шероховатости поверхности и увеличению плотности тока [1, 2]. Как было показано в [3, 4], наклонные [100] бикристаллические переходы

<sup>1)</sup>e-mail: tarasov@hitech.cplire.ru

обладают намного лучшими параметрами по сравнению со случаем разориентации в плоскости подложки. В них граница в ВТСП пленке более прямолинейна и больше соответствует границе в подложке, то есть меньше отклонение от заданного угла разориентации. В работе [4] продемонстрированы значения  $I_c R_n$  до 1.2 мВ при 77 К и 8 мВ при 4.2 К в случае подложек из титаната стронция. Однако такие подложки отличаются высокой диэлектрической постоянной и высокими СВЧ потерями, что ограничивает чувствительность возможных детекторов и их частотный диапазон. В случае изготовления наклонных бикристаллов из галата ниодима [5] удается продвинуться по частоте в терагерцовый диапазон. Для дальнейшего уменьшения потерь и улучшения согласования по СВЧ сигналу в данной работе использованы сапфировые наклонные бикристаллические подложки, отличающиеся малыми потерями, высокой теплопроводностью и близкой к  $\text{YBaCuO}$  постоянной подложки. Ранее в работах [6, 7] мы исследовали джозефсоновские переходы на таких подложках при температуре жидкого гелия и получали достаточно высокие значения характерного напряжения до 4 мВ и наблюдали излучение из такого перехода на частотах до 1.7 ТГц. Однако такие переходы имели слишком малые значения критического тока для работы при температуре жидкого азота. В данной работе параметры переходов оптимизированы для работы при 77 К. Отметим, что они не будут работать при 4.2 К, поскольку критический ток слишком велик и вольт-амперная характеристика становится гистерезисной, то есть каждый температурный диапазон требует оптимизации параметров переходов.

Эпитаксиальные пленки  $\text{YBaCuO}$  выращивали методом лазерной абляции на симметричных сапфировых бикристаллических подложках, обеспечивающих разворот кристаллических решеток монокристаллических частей пленки вокруг их общей оси [100] с наклоном главных осей [001] на  $11.6^\circ$  в сторону границы. Вначале в атмосфере кислорода при давлении 0.3 мбар и температуре подложки  $770^\circ\text{C}$  наносили буферный слой  $\text{CeO}_2$ . Затем при температуре  $780^\circ\text{C}$  и давлении кислорода 0.6 мбар выращивали  $\text{YBaCuO}$  толщиной 250 нм. Поверх нее без разрыва вакуума наносили тонкую пленку золота. Толстый слой золота 50 нм для контактных площадок и планарных антенн наносили магнетронным распылением. Форму площадок, антенн и джозефсоновских мостиков формировали с помощью ультрафиолетовой литографии с последующим ионным травлением в плазме аргона.

В результате на подложке размером  $5 \times 5$  мм получены образцы с тремя джозефсоновскими перехо-

дами, интегрированными каждый в логопериодическую антенну. Изображение одного фрагмента представлено на рис.1.



Рис.1. Фотография образца с джозефсоновским бикристаллическим переходом (темный мостик в центре), интегрированным с логопериодической антенной

Образцы помещали в квазиоптическую установку. Подложку прижимали обратной стороной к удлиненной гиперполусферической кремниевой линзе [8]. Диаметр полусферической линзы составлял 13.7 мм, и удлинение выполнено в виде кремниевой шайбы с тем, чтобы антенна располагалась на расстоянии 2.20 мм позади центра полусферы. Комбинация такой линзы и антенны имеет ширину пучка около  $34^\circ$  на уровне  $-30$  дБ и около  $16^\circ$  на уровне  $-10$  дБ. Диаграмма направленности может быть аппроксимирована достаточно узким гауссовым пучком, распространяющимся от антенны. Пучок затем преобразовывался в слабосходящийся с помощью пластиковой линзы диаметром 50 мм. Это позволило использовать оптическое окно и холодные фильтры сравнительно малого диаметра 25 мм и значительно уменьшить засветку ИК и субмиллиметровым фоновым излучением.

Были измерены характеристики переходов на постоянном токе. При минимальном значении захваченного магнитного потока характерное напряжение достигало 600 мкВ, что соответствует частоте 300 ГГц. Затем измерены вольт-амперные характеристики под действием внешнего СВЧ излучения на частоте 113 ГГц от источника на основе лавиноточечного диода. На рис.2 наблюдаются ступени Шапиро, соответствующие этой частоте излучения. Чувствительность джозефсоновского детектора к слабому сигналу была измерена по методу холодной и теплой нагрузок. Для этого перед окном криостата располагали механический модулятор и поглотитель

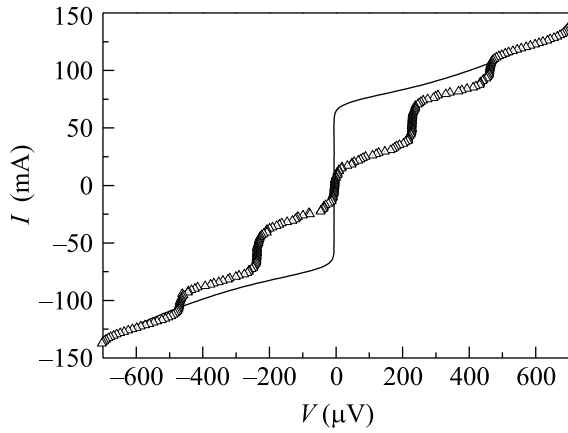


Рис.2. Вольт-амперные характеристики образца при температуре 77 К без сигнала (сплошная линия) и при подаче излучения на частоте 113 ГГц (треугольники)

при температуре жидкого азота. Спектр принимаемого теплового излучения был ограничен применением холодных фильтров низких частот и не превышал 300 ГГц. Вращение лопастей модулятора приводило к появлению перед окном излучения черного тела с температурой жидкого азота 77 К и при комнатной температуре 300 К. Частота модуляции составляла 27 Гц. Сигнал выделялся синхронным детектором и регистрировался в зависимости от напряжения смещения (см. рис.3). Отклик на перепад температур в

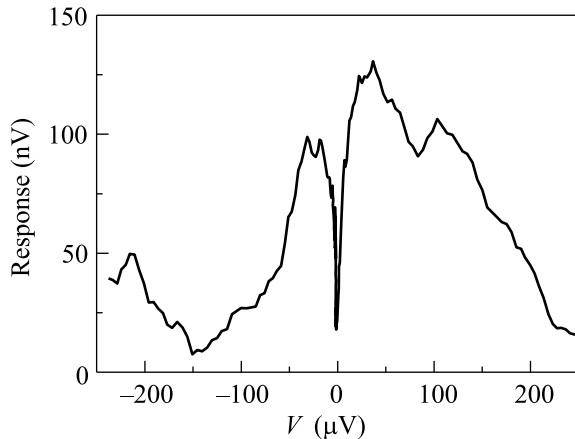


Рис.3. Отклик детектора на переключение входной тепловой нагрузки (300 К/77 К), измеренный синхронным детектором на частоте 27 Гц

200 К достигал 200 нВ. Были также проведены измерения собственных шумов джозефсоновского перехода, измеренные при закрытом оптическом окне (см. рис.4). В области максимального отклика спектральная плотность шумов составляла  $\sim 1$  нВ/Гц<sup>1/2</sup>. Из сравнения этих результатов можно получить значе-

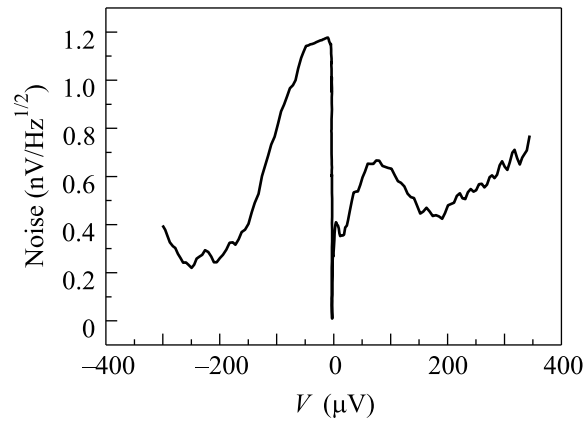


Рис.4. Собственные шумы детектора, измеренные при закрытом оптическом окне

ния температурного разрешения на уровне 1 К/Гц<sup>1/2</sup>. Это значение можно сравнить с теоретической оценкой Лихарева [9]

$$\frac{\delta T}{\sqrt{\Delta F}} \approx 20T \frac{\sqrt{F_c}}{\Delta F_\Omega} \omega^2,$$

где  $\Delta F$  – полоса интегрирования на выходе,  $T$  – температура фона,  $F_c$  – критическая частота джозефсоновского перехода,  $\Delta F_\Omega$  – полоса пропускания по входному сигналу,  $\omega$  – нормированная частота сигнала. В результате получим значение 0.01 К, что существенно меньше измеренного и связано с рассогласованием по сигналу перехода сопротивлением 5 Ом с планарной антенной сопротивлением 70 Ом, а также потерями на отражение от кремниевой линзы, пластиковой линзы и оптического окна.

Можно также оценить мощность теплового излучения на входе в полосе 300 ГГц, которая составит 1.2 нВт при 300 К и 0.3 нВт при 77 К, то есть перепад мощности составляет 0.9 нВт. При амплитуде на выходе 150 нВ получим чувствительность на теплое входное окно 170 В/Вт. Спектральное разрешение в случае непосредственного применения метода гильберт-спектрологии можно оценить по полуэмпирической формуле  $\Delta F[\text{МГц}] = 40 \cdot R[\text{Ом}] \cdot T[\text{К}] = 13$  ГГц для температуры 77 К и нормального сопротивления 4.4 Ом. Для улучшения спектрального разрешения без потери чувствительности можно применить низкоиндуктивный резистивный шунт и малозумящий усилитель тока, что позволит получить спектральное разрешение на уровне 1 ГГц и ниже. Отметим еще, что частота модуляции 27 Гц была связана с использованием механического модулятора, а быстродействие джозефсоновского детектора, в принципе, достигает характерной частоты перехода и составляет сотни гигагерц.

Разработан, изготовлен и исследован микроволновый квазиоптический ВТСП джозефсоновский детектор, работающий при температуре 77 К. Характерное напряжение джозефсоновских переходов достигает 570 мкВ, что соответствует характерным частотам до 300 ГГц. Отклик на тепловое излучение миллиметрового диапазона волн составляет 1 нВ/К. Температурное разрешение составляет 1 К/Гц<sup>1/2</sup>. Такие быстродействующие детекторы могут быть использованы в составе радиотепловизоров, сканеров и спектрометров для дистанционной диагностики атмосферы, биомедицинских исследований, пассивных систем контроля безопасности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант # 05-02-19650 НЦНИЛ\_а, Минобрнауки, госконтракт # 02.513.11.3157.

1. L. Mechin, P. Berghus, and J. Evetts, *Physica C* **302**, 102 (1998).
2. P. Czerwinka, R. Campion, K. Horbelt et al., *Physica C* **324**, 96 (1999).
3. U. Poppe, Y. Divin, M. Faley et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11**, 3768 (2001).
4. Y. Divin, U. Poppe, C. Jia et al., *Physica C* **372–376**, 115 (2002).
5. Y. Divin, O. Volkov, M. Liatti, and V. Gubankov, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13**, 676 (2003).
6. М. Тарасов, Л. Кузьмин, Е. Степанцов и др., *Письма в ЖЭТФ* **79**, 356 (2004).
7. E. Stepantsov, M. Tarasov, A. Kalabukhov et al., *J. Appl. Phys.* **96**, 3357 (2004).
8. D. F. Filipovic, S. S. Gearhart, and G. M. Rebeiz, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* **41**, 1738, (1993).
9. К. К. Лихарев, Б. Т. Ульрих, *Системы с джозефсоновскими контактами*, М.: Изд. Моск. ун-та, 1978.