

# Сверхпроводниковый джозефсоновский детектор терагерцового диапазона, работающий при температуре жидкого азота

И.В. Борисенко, Ю.В. Кислинский, К.И. Константиныч, Г.А. Овсянников  
Институт радиотехники и электроники РАН, Москва, Россия

В работе представлены результаты исследования джозефсоновских детекторов, изготовленных из высокотемпературных металлоксидных сверхпроводников на бикристаллической подложке. Переходы изготавливались из YBCO на подложках  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{NdGaO}_3$ . Для согласования джозефсоновских переходов использовались логопериодическая и двойная щелевая антенны, выполненные из металла в одном слое с YBCO. Измерения проводились при температурах  $T=20\div 80\text{K}$  и на частотах до 510 ГГц.

Несмотря на существенные трудности в применении высокотемпературных металлоксидных сверхпроводников, связанные с малой длиной когерентности, высокой чувствительностью к содержанию кислорода и сильной анизотропией электронных свойств, они, благодаря высоким критическим параметрам, по-прежнему остаются привлекательными в качестве материала сверхпроводниковой электроники. В настоящее время одним из наиболее воспроизводимых типов джозефсоновских переходов (ДП) из металлоксидных сверхпроводников являются переходы сформированные на бикристаллической границе. Известно, что такие переходы имеют высокие значения нормального сопротивления  $R_N=1\div 50$  Ом и характерного напряжения  $V_C=I_C R_N$  до 1 мВ уже при температуре жидкого азота [1]. Высокие значения характерного напряжения позволяют применять бикристаллические переходы для детектирования электромагнитного излучения вплоть до частот в несколько терагерц с возможностью перестройки по всему частотному диапазону, что существенно превосходит возможности аналогов, изготавливаемых на основе известных технологий на базе традиционных сверхпроводников.

Переходы были изготовлены на бикристаллических подложках  $(1\bar{1}02)$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  (г-плоскость) с углом разориентации кристаллографических осей  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$   $\text{Al}_2\text{O}_3 \pm 12^\circ$ , а также на подложках  $(110)$   $\text{NdGaO}_3$  с наклоном осей  $\langle 110 \rangle$  в плоскости перпендикулярной бикристаллической границе на углы  $\pm 11^\circ$  и  $\pm 14^\circ$ . Пленка  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (YBCO) осаждалась при температуре 750-770°C методом катодного распыления из стехиометрической керамической мишени. Полученные YBCO пленки толщиной от 100 нм до 200 нм имели температуру сверхпроводящего перехода 88-89 К. Изготовление переходов заканчивается формированием пересекающего бикристаллическую границу тонкопленочного мостика из YBCO шириной 4-8 мкм и длиной 8-15 мкм [2]. Полученные ДП имели следующие электрофизические параметры: плотность критического тока  $10^4$ -

$10^5$  А/см<sup>2</sup>, характерное напряжение  $V_C=I_C R_N=0.3\div 1$  мВ при температуре  $T=77\text{K}$ . Типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) хорошо описывается резистивной моделью, в которой присутствуют два канала переноса тока: ток квазичастиц  $V/R_N$  и сверхпроводящий ток  $I_s(\varphi)=I_C \sin \varphi$ .

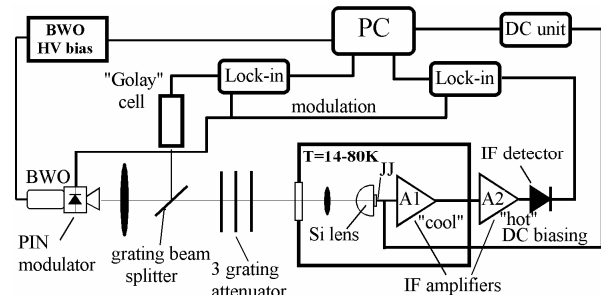


Рис.1. Блок-схема автоматизированного комплекса для измерения частотных характеристик и определения чувствительности ДП.

Согласование внешнего излучения с бикристаллическим переходом представляет собой достаточно сложную задачу, поскольку такие переходы зачастую имеют не только сравнительно низкий импеданс порядка 5-15 Ом, но и требуют дополнительных цепей для смещения по постоянному току и съема детектированного сигнала, выполненных в единой планарной схеме с согласующими элементами. Поверх YBCO слоя методом взрывной фотолитографии изготавливалась металлическая антенна из Pt. Таким образом было сделано два типа образцов: с двойной щелевой антенной и с широкополосной логопериодической антенной, показанные на вставках к рис. 2а) и 2б) соответственно. Характерные размеры щелевой антенны выбирались из условий работы на трех центральных частотах: 300, 400 и 500 ГГц. Измерения проводились как в криостате замкнутого цикла с рабочей температурой до 20 К, так и в заливном криостате при температуре 77 К. В качестве внешнего источника микроволнового излучения использовалась лампа обратной волны с перестраиваемой частотой от 220 ГГц до 550 ГГц. Излучение от лампы через квазиоптическую систему из тефлоновых линз, тефлоновое окно в криостате и кремниевую полусферическую линзу направлялось на образец с высокой степенью фокусировки. Для измерения амплитудно-частотных характеристик детектора использовался автоматизированный комплекс, управляемый персональным компьютером (рис.1). В процессе измерения плавно изменялась частота генерации лампы

с синхронным измерением текущей мощности излучения и детекторного отклика с образца.

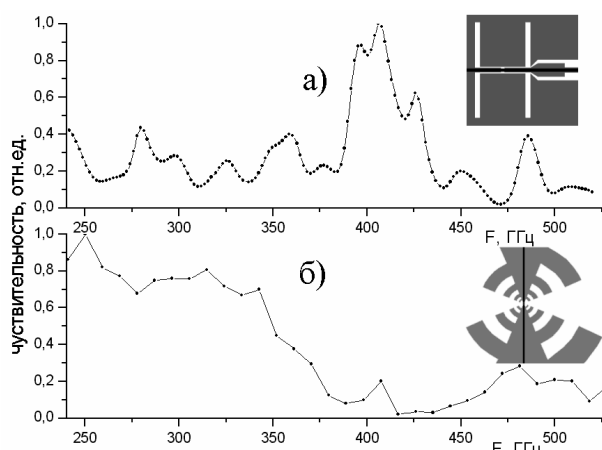


Рис.2. Амплитудно-частотные характеристики образцов с двойной щелевой и логопериодической антеннами.

Образцы с логопериодической антенной имели гладкую АЧХ с плавным увеличением чувствительности в сторону низких частот, что может быть объяснено либо увеличением потерь в сверхпроводящей пленке на высоких частотах, либо уменьшением эффективной площади приема логопериодической антенны с увеличением частоты (рис. 2б) [3]. АЧХ образцов с двойной щелевой антенной имеют резкий пик на расчетной частоте с шириной 50 ГГц и высотой 20 dB, что хорошо согласуется с электродинамической моделью согласования перехода с такой антенной (рис. 2б).

Для изменения величины падающей на образец мощности монохроматического излучения использовался набор трех последовательных сеток, состоящих из параллельных металлических нитей, разнесенных на расстояние много меньше длины волны. Для определения мощности излучения падающего на образец при открытом аттенуаторе использовалась известная бесселева зависимость величины ступеней Шапиро, возникающих на ВАХ перехода, от переменного тока  $I_{RF}$  протекающего через переход (рис.3). Поворотом средней сетки вносилось заранее прокалиброванное затухание в тракте, при этом уже в квадратичном режиме работы детектора по измеренному отклику перехода и по известной падающей мощности определялась вольт-ваттная чувствительность детектора, которая при  $T=81K$  на частоте  $f_c=500ГГц$  составила  $2 \cdot 10^4 В/Вт$ . Пороговая мощность детектора определялась при отношении сигнал-шум равном 1. Эквивалентная мощность шуму (NEP) при полосе синхронного детектора 1 Гц и постоянной интегрирования 1 сек. была равна для широкополосного режима  $6 \cdot 10^{-13} Вт/\sqrt{Гц}$ .

Полученные экспериментальные данные по детектированию слабого сигнала терагерцового диа-

пазона свидетельствуют о перспективности использовании ДП из купратных сверхпроводников на частотах терагерцового диапазона, соответствующих энергиям выше щели традиционных сверхпроводников.

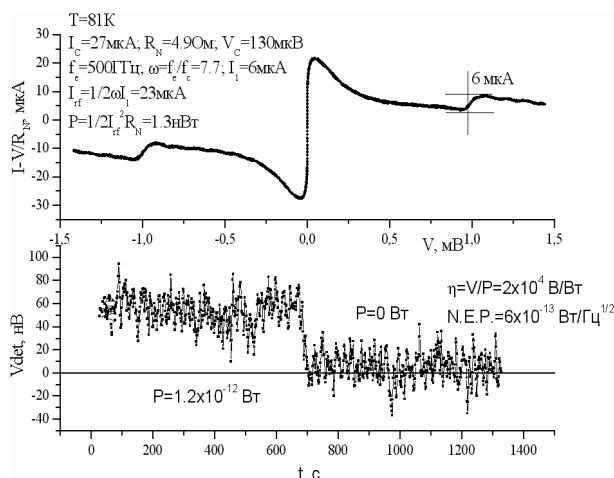


Рис.3. ВАХ перехода под воздействием сильного сигнала с вычтенным квазичастичным вкладом (верх) и шум-дорожка для определения чувствительности.

Авторы благодарны А.Ахумяну и Н. Погосяну за помощь в проведении амплитудно частотных измерений. Работа частично финансировалась в рамках Федеральной программы Актуальные направления физики конденсированного состояния, Сверхпроводимость, грантом научных школ Президента России НШ-1344.2004.2, РФФИ 04-02-16818а, ИНТАС-2001-0809, ИНТАС- 2001-0249, МНТЦ-2369.

1. А.В. Шадрин, И.В. Борисенко, Г.А. Овсянников, И.М. Котелянский, Ф.В. Комиссинский. “Металлоксидные сверхпроводящие бикристаллические переходы с высокими критическими параметрами”, Тезисы конференции “Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости”, 2004.

2. Г. А. Овсянников, И.В. Борисенко, К.И. Константинович, А.Д. Маштаков, Е.А. Степанцов, Письма в ЖТФ 25, 65 (1999).

3. К.У. Constantinian, G.A. Ovsyannikov, I.V. Borisenko, P.Yagoubov, Physica C 372-376, 420 (2002).