

05.4;09

©1994

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫМИ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ МИКРОМОСТИКАМИ НА БИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ ИЗ $\text{NdGaO}_3$

*А.В.Андреев, Ю.Я.Дивин, В.Н.Губанков,  
И.М.Котелянский, В.Б.Кравченко, С.Г.Зыбцев,  
Е.А.Степанцов*

Одним из наиболее перспективных типов джозефсоновских ВТСП переходов для применения в качестве чувствительных детекторов излучения являются тонкопленочные эпитаксиальные  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  микромостики на бикристаллических подложках (МБП). Данный тип переходов характеризуется возможностью контроля электрических параметров посредством изменения угла разориентации бикристаллической подложки [1,2] и толщины пленки. Изучение джозефсоновской генерации в различных типах ВТСП переходов [3,4] показало, что ширина линии джозефсоновской генерации в МБП может определяться только широкополосными тепловыми флуктуациями, в то время как для других типов переходов могут быть существенными низкочастотные флуктуации критического тока. МБП могут рассматриваться как наиболее подходящий объект для детального изучения микроволновых свойств ВТСП джозефсоновских переходов и высокочастотных применений ВТСП в электронике, если они будут приготавливаться на подложках, имеющих гораздо меньшее значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , чем  $\text{SrTiO}_3$ , в настоящее время наиболее часто применяемый материал для бикристаллических подложек. Бездвойниковый монокристаллический  $\text{NdGaO}_3$  может быть хорошим кандидатом для приготовления высококачественных МБП для высокочастотных применений благодаря гораздо меньшей диэлектрической проницаемости ( $\epsilon \approx 20$ ) и, кроме того, лучшим согласованием кристаллической решетки с  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ .

В данной работе представлены результаты изучения нестационарного эффекта Джозефсона в тонкопленочных  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  микромостиках, приготовленных на бикристаллических подложках  $\text{NdGaO}_3$ , и обсуждаются возможности их применения для детектирования электромагнитного излучения миллиметрового диапазона.

Бикристаллические подложки создавались твердофазным сращиванием [5] двух монокристаллов  $\text{NdGaO}_3$  в данной взаимной кристаллической разориентации. Данная разориентация характеризуется поворотом кристаллических решеток обоих кристаллов из параллельного положения вокруг их общей оси [100] в противоположные стороны на  $18.4^\circ$ . При этом их плоскости (001) оставались параллельными друг другу. Полученные в результате сращивания кристаллические композиты, содержащие искусственную межзеренную границу, распиливались на перпендикулярные этой границе тонкие (0.5 мм) пластинки. Подложки получались их химико-механической полировкой. Угол разориентации был выбран равным  $2 \cdot 18.4^\circ$  для формирования в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  пленке низкоэнергетической межзеренной границы с решеткой совпадающих узлов  $\sum 10$ , характеризующейся повышенной когерентностью.

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  пленка толщиной 150 нм наносилась на подложку импульсным лазерным напылением. Мостики формировались фотолитографией. Геометрия эксперимента обеспечивала плохое согласование образца с волноводом, что гарантировало близкий к автономному режим работы контакта. Для измерения отклика перехода на СВЧ излучение использовалась методика синхронного детектирования с модуляцией мощности падающего излучения. Для уменьшения уровня наводок все электрические соединения, идущие к образцу, были отфильтрованы, а источник тока смещения и предварительный усилитель напряжения питались от батарей. Сбор данных осуществлялся платой аналого-цифровых преобразователей, управляемых персональным компьютером.

На рис. 1, а представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) (кривая 1), отклик на малый СВЧ сигнал с частотой  $f = 77.90$  ГГц (кривая 2), и дифференциальное сопротивление (кривая 3) МБП шириной 5 мкм при температуре 10 К. ВАХ перехода имеет гиперболическую форму, что подтверждается видом кривой дифференциального сопротивления. Критический ток образца составляет  $I_c = 32$  мкА, нормальное сопротивление  $R_n = 4.5$  Ом ( $V_c = 144$  мкВ). При малых напряжениях отклик на СВЧ излучение пропорционален дифференциальному сопротивлению, а в области напряжений  $V \approx hf/2e$  имеет характерную нечетно-резонансную особенность (селективный отклик), связанную с синхронизацией внешним излучением собственной генерации перехода. Отсутствие резонансов при напряжениях  $V_n \approx nhf/2e$  показывает, что отклик измерялся действительно в режиме малого сигнала, а отсутствие резонансов при  $V_{1/n} \approx hf/n2e$  указывает на синусоидальную зависи-

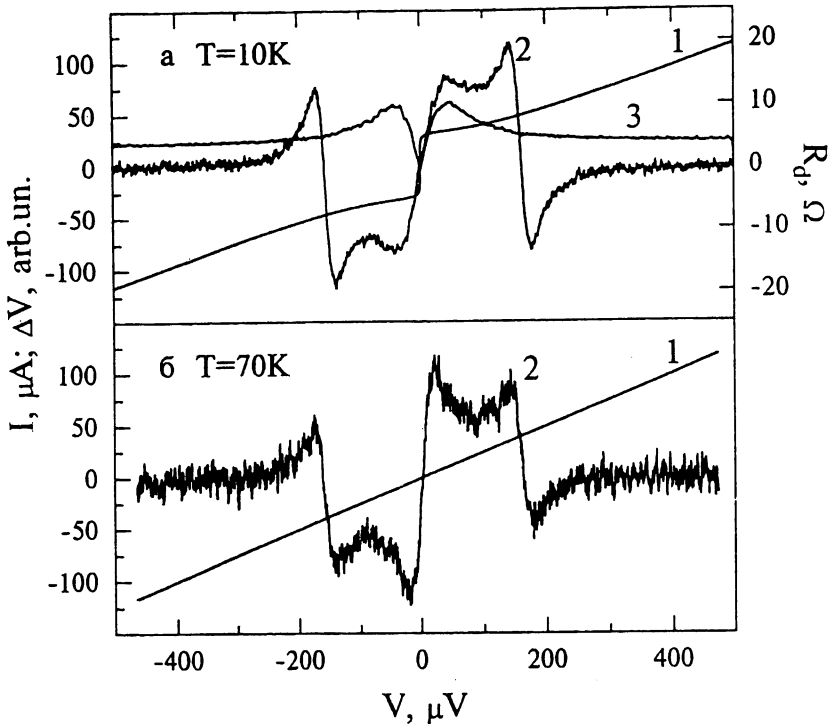


Рис. 1. ВАХ (кривая 1), отклик на малый СВЧ сигнал с частотой  $f = 77.90$  ГГц (кривая 2) и дифференциальное сопротивление  $R_d$  (кривая 3)  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  МБП шириной 5 мкм при температуре а — 10, б — 70 К.

мость сверхтока от разности фаз. Вольт-ваттная чувствительность в селективном режиме, приведенная к мощности, поглощенной в переходе, составляла  $S_v = 1.1 \cdot 10^5$  В/Вт, что дает значение  $\text{NEP} = 2.7 \cdot 10^{-14}$  Вт/Гц $^{1/2}$ . Аналогичная форма отклика сохранялась при повышении температуры вплоть до азотных, что иллюстрирует рис. 1, б, на котором представлены ВАХ (кривая 1) и отклик (кривая 2) этого же перехода при температуре  $T = 70$  К. Несмотря на то, что критический ток мал и размыт флуктуациями так, что ВАХ представляет собой близкую к прямой линию, отклик на излучение сохраняет все особенности: пропорциональность дифференциальному сопротивлению при малых значениях напряжения и нечетно-резонансную особенность при  $V \approx hf/2e$ .

Из селективного отклика джозефсоновского перехода на малое воздействие можно получить значение ширины линии джозефсоновской генерации  $\delta f = \Delta V 2e/h$ , где  $\Delta V$  — разница между напряжениями, соответствующими максимуму и

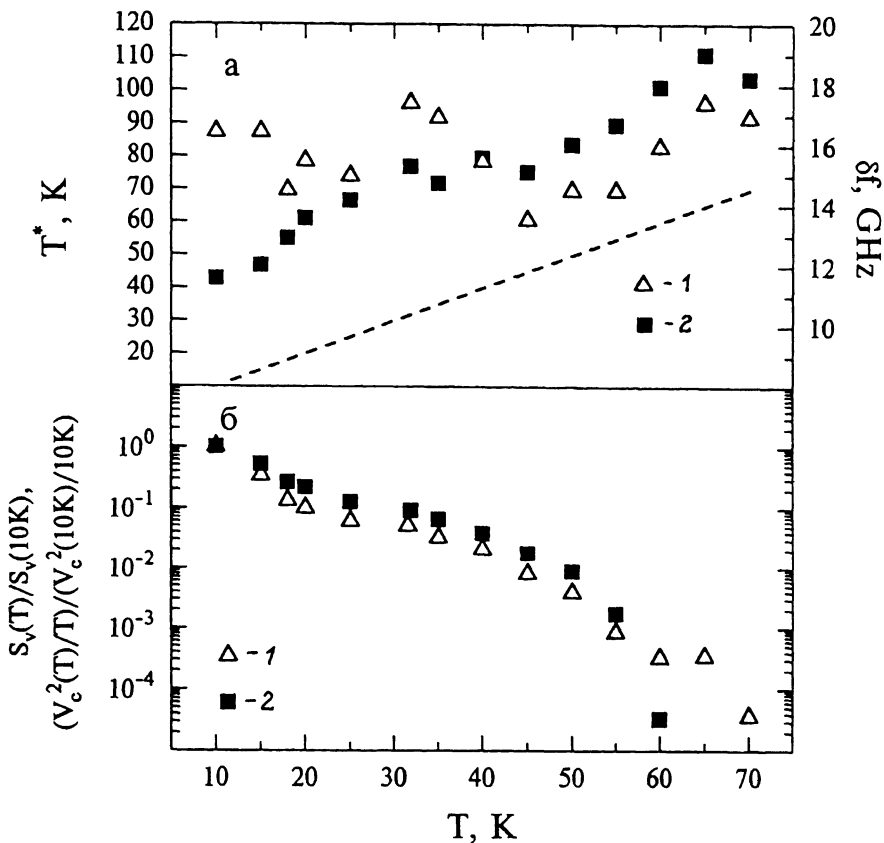


Рис. 2. Температурная зависимость: а — ширины линии джозефсоновской генерации  $\delta f$  (1) и эффективной шумовой температуры  $T^*$  (2); б — вольт-ваттной чувствительности (1) и величины  $V_c^2/T$  (2), нормированных на их значения при  $T = 10$  К, для  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  МБП шириной 5 мкм.

минимуму селективного отклика. В случае широкополосных тепловых флуктуаций и резистивной модели ширина линии джозефсоновской генерации определяется формулой:

$$\delta f = 4\pi \left( \frac{2e}{h} \right)^2 kT \frac{R_d^2}{R_n} \left( 1 + \frac{I_c^2}{2I^2} \right), \quad (1)$$

где  $R_d$  и  $I_c$  — соответственно дифференциальное сопротивление и ток в точке смещения  $V = hf/2e$ . Так как ВАХ и отклик на малый сигнал близки к предсказываемым в резистивной модели, то для описания шумов в переходе можно применять формулу (1), используя вместо физической температуры  $T$  эффективную шумовую температуру  $T^*$  — та-

кую, чтобы формула (1) давала экспериментально измеренную ширину линии джозефсоновской генерации. Температурные зависимости ширины линии  $\delta f$  эффективной шумовой температуры  $T^*$  приведены на рис. 2, а. Из приведенного рисунка видно, что шумовая температура  $T^*$  превышает физическую температуру  $T$  во всем диапазоне и возрастает с увеличением последней, причем с увеличением температуры  $T$  относительная доля избыточных флуктуаций уменьшается. Так, при  $T = 10 \text{ К}$   $T^*/T \cong 4.2$ , а при  $T = 70 \text{ К}$   $T^*/T \cong 1.5$ . Наличие избыточных шумов может быть объяснено флуктуациями критического тока, так как для данного мостика  $V_c = 144 \text{ мкВ} \approx hf/2e$  и рабочая точка при измерении селективного отклика находится близко к критическому току. Из-за неоднородного распределения тока вдоль бикристаллической границы в МБП данный тип переходов может рассматриваться как многократный многоконтурный интерферометр, в котором кванты магнитного потока могут двигаться и пиннинговаться, вызывая избыточные флуктуации критического тока.

Из формулы для отклика джозефсоновского перехода на малый внешний сигнал [6], предполагая, что наведенный в переходе СВЧ ток связан с мощностью падающего излучения как  $I_f^2 = KW/R_d$ , где  $I_f$  — наведенный в переходе СВЧ ток,  $K$  — не зависящий от температуры коэффициент, учитывающий согласование перехода с внешней волноводной системой,  $W$  — мощность падающего излучения, можно получить температурную зависимость вольт-ваттной чувствительности в селективном режиме  $S_v = \Delta V/W \sim \sim V_c^2/T$ . На рис. 2, б приведены температурные зависимости вольт-ваттной чувствительности  $S_v$  и величины  $V_c^2/T$ . Для удобства сравнения обе величины нормированы на их значения при  $T = 10 \text{ К}$ . Данные для зависимости  $V_c^2/T$  приведены в интервале 10–60 К, так как для более высоких температур определить значение  $V_c$  сложно из-за малой величины критического тока. Зависимость вольт-ваттной чувствительности  $S_v$  близка к зависимости  $V_c^2/T$ , что указывает на применимость резистивной модели для описания температурных зависимостей сигнальных свойств данного типа переходов в широком диапазоне температур.

Таким образом, тонкопленочные эпитаксиальные  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  микромостики, приготовленные на бикристаллических подложках из  $\text{NdGaO}_3$ , проявляют джозефсоновские свойства, согласующиеся с предсказаниями резистивной модели в широком диапазоне температур от 10 до 70 К. Эффективная шумовая температура  $T^*$ , определенная из ширины линии джозефсоновской генерации, превышает

физическую температуру и возрастает с увеличением последней. Низкое значение диэлектрической проницаемости  $\text{NdGaO}_3$   $\epsilon \approx 20$  и высокая чувствительность к излучению ( $\text{NEP} = 2.7 \cdot 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при  $T = 10$  К) делает данные переходы перспективными для исследования высокочастотных свойств джозефсоновских ВТСП переходов и их применений в качестве чувствительных детекторов для миллиметрового и дальнего инфракрасного диапазона спектра.

Данная работа выполнена при поддержке Государственной программы Российской Федерации "Высокотемпературная сверхпроводимость", проект "Структура-2" и NATO Linkage Grant (project Lg-921040).

### Список литературы

- [1] Gross R., Chaudhary P. // Principles and Applications of Superconducting Quantum Interference Devices. / Ed. by A. Barone. Singapore, 1991.
- [2] Dimos D., Chaudhary P., Mannhart J., LeGoues F.K. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. P. 219-222.
- [3] Divin Yu. Ya., Mygind J., Pedersen N.F., Chaudhary P. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. P. 3053-3055.
- [4] Divin Yu. Ya., Andreev A.V., Fischer G.M., Mygind J., Pedersen N.F., Herrmann K., Glyantsev V.N., Siegel M., Braginski A.L. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. P. 1295-1297.
- [5] Степанов Е.А. А.С. СССР № 1116100, 1982, БИ. 1984. № 36. С. 77.
- [6] Лизарев К.К., Ульрих Б.Т. // Системы с джозефсоновскими контактами. М., 1978. С. 446.

Институт радиотехники  
и электроники  
Институт кристаллографии  
Москва

Поступило в Редакцию  
21 марта 1994 г.