

05.4;09;12

Характеристики последовательных цепочек YBaCuO джозефсоновских переходов на бикристаллической подложке

© А.А. Веревкин, В.А. Ильин, А.П. Липатов,
Д.В. Меледин, А.А. Наумов

Московский педагогический государственный университет

Поступило в Редакцию 8 мая 1998 г.

Исследованы электрофизические характеристики цепочек высокотемпературных сверхпроводниковых джозефсоновских переходов на бикристаллической подложке, а также их взаимодействие с излучением миллиметрового диапазона волн. Показана возможность использования цепочек для детектирования миллиметрового и субмиллиметрового излучения.

Известно [1,2], что применение последовательных цепочек джозефсоновских переходов (ЦДП) в малошумящих широкополосных приемниках электромагнитного излучения позволяет преодолеть ряд трудностей, возникающих при использовании для этой цели одиночных джозефсоновских переходов (ДП). Применение ЦДП в N раз увеличивает динамический диапазон устройств (N — число звеньев цепочки) [2] и позволяет реализовать оптимальное с точки зрения достижения наивысшей степени согласования значения сопротивлений нелинейных элементов. К тому же в устройствах на основе цепочек возможно использовать структуры с большими критическими токами, чем у одиночных переходов с теми же значениями сопротивления, и поэтому первые более устойчивы к токовым перегрузкам.

Указанные достоинства обусловили создание цепочек джозефсоновских переходов из низкотемпературных сверхпроводников, специально предназначенных для использования в СВЧ-устройствах [2–4]. Они позволили обеспечить высокую стабильность и воспроизводимость параметров приемных элементов и достичь практически предельных значений флуктуационной чувствительности джозефсоновских радиометров при большом динамическом диапазоне [3]. Основным ограничением

является лишь технологическая возможность изготовления цепочек с идентичными или, по крайней мере, близкими характеристиками отдельных звеньев.

В настоящее время среди ВТСП ДП наилучшей воспроизводимостью параметров обладают устройства на основе пленок YBaCuO, напыляемых на бикристаллические подложки [5,6]. Традиционно для этого использовались титанат стронция и другие материалы с высокими значениями диэлектрической проницаемости, что ограничивало их применение в СВЧ-устройствах.

Целью данной работы является определение электрофизических характеристик цепочек YBaCuO джозефсоновских переходов, изготовленных на бикристаллических подложках из ZrO_2 , и исследование особенностей их взаимодействия с СВЧ-излучением коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

Исследуемые цепочки изготовлены на основе пленок YBaCuO толщиной ~ 200 nm, нанесенных путем магнетронного напыления на бикристаллические подложки из стабилизированного иттрием ZrO_2 ($\epsilon \approx 28$ при $T = 77$ K) с углом разориентации кристаллографических осей 32° . Переходы в виде мостиков шириной $2-6$ μm формировались на бикристаллической границе методом мокрой фотолитографии. Цепочки содержат 3–11 последовательно соединенных мостиков. Согласование ДП с падающим излучением осуществляется с помощью планарных антенн-бабочек [7]. Для сравнения были исследованы также изготовленные в едином технологическом цикле с ЦДП одиночные ДП. Последние имели нормальные сопротивления $R_n = 2.5-5 \Omega$ и критические токи $I_c = 5-35 \mu A$ при $T = 77$ K и $10-120 \mu A$ при $T = 10$ K. R_n исследованных цепочек варьировалось в пределах $8.5-15 \Omega$, а критические токи составляли $10-35 \mu A$ и $50-92 \mu A$ при температурах 77 и 10 K соответственно. Технология изготовления джозефсоновских переходов позволила реализовать ЦДП, в которых разброс критических токов отдельных ДП не превышала 5%.

Для проведения измерений в миллиметровом диапазоне волн подложка со структурами помещалась в детекторную камеру. Она обеспечивала возможность облучения образца как со стороны сверхпроводящей структуры, так и со стороны подложки. Исследования проводились в диапазоне температур 6–89 K. Частота излучения варьировалась в пределах 128–145 GHz, а его мощность, измеренная на входе детекторной камеры, — в пределах $10^{-8}-10^{-5}$ W.

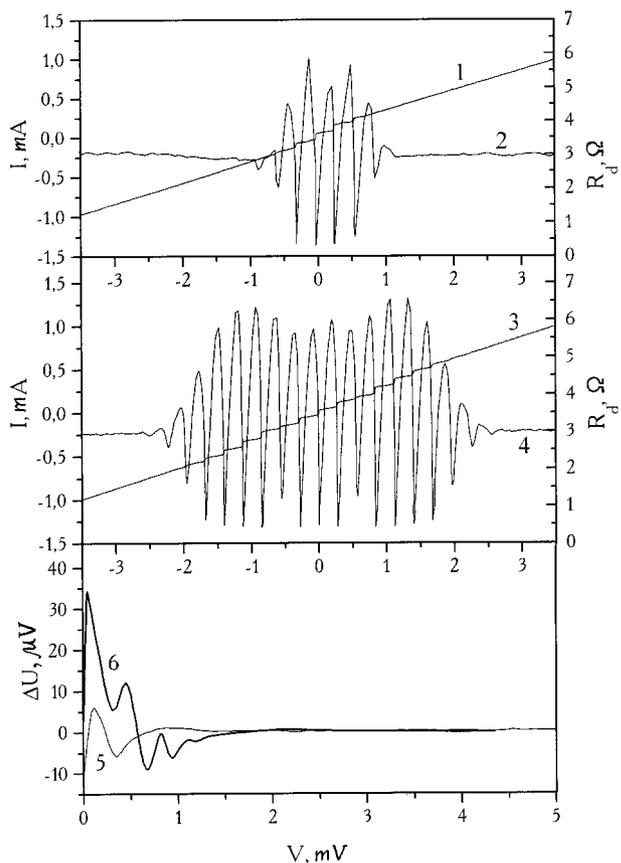


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики одиночного ДП при облучении перехода СВЧ-мощностью со стороны структуры (1) и со стороны подложки (3), зависимости дифференциального сопротивления (2) и (4) и отклика (5) и (6) от напряжения на ДП, измеренные в тех же условиях.

На рис. 1 показаны результаты исследований одного из одиночных ДП с критическим током $120 \mu A$ и нормальным сопротивлением 3Ω . Кривая 1 — вольт-амперная характеристика (ВАХ), полученная при $T = 14 K$ и воздействии на переход излучения с частотой $135 GHz$,

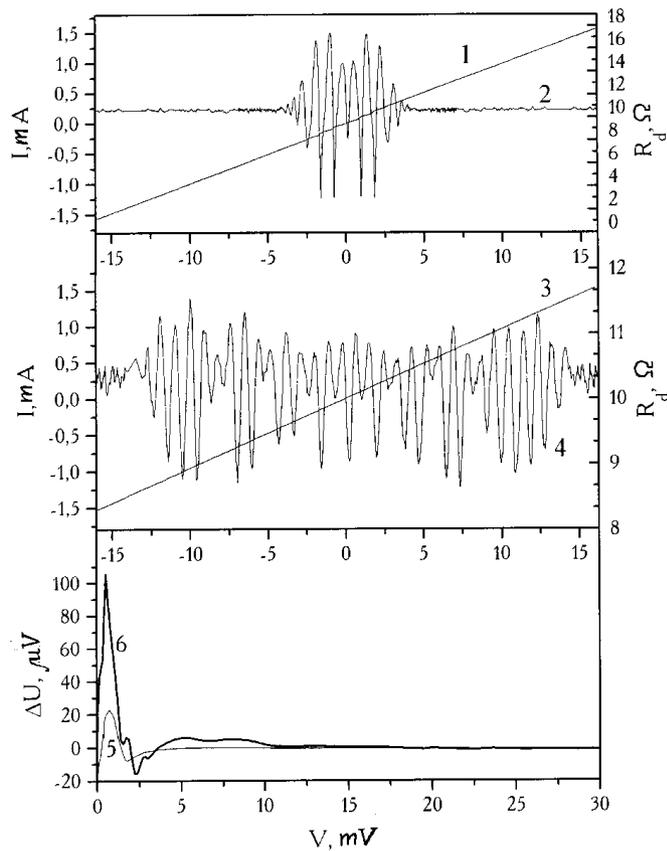


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики ЦДП при облучении перехода СВЧ-мощностью со стороны структуры (1) и со стороны подложки (3) соответственно, зависимости дифференциального сопротивления (2) и (4) и отклика (5) и (6) от напряжения на ЦДП, измеренные в тех же условиях.

падающего со стороны структуры. На ВАХ наблюдаются токовые ступеньки Шапиро, точное положение которых может быть определено из зависимости дифференциального сопротивления перехода от напряжения смещения на нем $R_d(V)$, показанной на том же рисунке (кривая 2).

Хорошо видны четыре ступеньки при напряжениях смещения, меньших 1.1 mV . Отметим, что характеристическое напряжение ($V_c = I_c R_n$) для исследуемого ДП составляет $530\ \mu\text{V}$. При облучении образца через подложку на его ВАХ и $R_d(V)$ видны девять ступенек при напряжениях, меньших 2.5 mV (см. кривые 3 и 4 на рис. 1). Отклик одиночного ДП на СВЧ-излучение, падающее на него со стороны структуры и подложки, представлен на рис. 1 (кривые 5 и 6 соответственно).

На рис. 2 показаны полученные при температуре $T = 20\text{ K}$ результаты аналогичных исследований ЦДП с $R_n = 9.5\ \Omega$ и $I_c = 60\ \mu\text{A}$, состоящей из 3 ДП. Частота излучения составляла 131.5 GHz . При облучении со стороны структуры на ВАХ и зависимости $R_d(V)$ видны 6 ступенек при напряжениях смещения, не превышающих 4 mV (кривые 1 и 2 соответственно). При облучении через подложку на этих зависимостях наблюдалось уже 17 ступенек Шапиро вплоть до напряжения 14 mV (кривые 3 и 4). Кривые 5 и 6 представляют собой отклик ЦДП, измеренный при тех же ориентациях подложки по отношению к падающему излучению, что и на рис. 1 для одиночного ДП.

Таким образом, величина отклика на излучение и количество ступенек Шапиро при облучении со стороны подложки существенно (в 4–10 раз) больше, чем при облучении со стороны структуры. Этот результат является прямым следствием несимметричности диаграммы направленности планарной антенны, сформированной на тонкой диэлектрической подложке с высоким значением ε [7].

Результаты, показанные на рис. 1, 2, позволяют оценить вольт-ваттную чувствительность η детектора, использующего в качестве нелинейного элемента ЦДП или одиночный переход. Она составляет 60 и 18 V/W соответственно при $T \sim 20\text{ K}$; при $T \sim 60\text{ K}$ η уменьшалась в 1.5–2 раза. Таким образом, величина чувствительности η для ЦДП существенно выше, чем для отдельного перехода. Это связано, по-видимому, с тем, что нормальное сопротивление цепочки в 3 раза выше, чем одиночного ДП, что примерно в 3 раза улучшает согласование элемента с СВЧ-излучением.

При этом, хотя расстояние между ступеньками на ВАХ ЦДП в 3 раза больше, чем на ВАХ ДП, в первом случае наблюдается в 1.5–2 раза больше ступенек, чем во втором. Это явление может быть объяснено частичной синхронизацией контактов, возникающей под действием внешнего монохроматического излучения, и его взаимодействием с

собственным джозефсоновским излучением в резонансной электродинамической системе, каковой является детекторная камера с помещенным в нее ДП или ЦДП [8–10].

Форма и поведение ВАХ в электромагнитном поле, а также зависимость высоты ступенек от СВЧ-мощности хорошо описывается резистивной моделью [2]. В то же время зависимость СВЧ-отклика от напряжения на ЦДП, измеренная в тех же условиях, имеет ряд особенностей. Прежде всего, наряду с обычным джозефсоновским откликом, наблюдающимся при малых напряжениях смещения $< 5\text{ мВ}$, при напряжениях смещения, больших 8 мВ , наблюдается компонента отрицательного по знаку отклика. Она обусловлена увеличением квазичастичной проводимости переходов в результате фотостимулирования неупругого резонансного туннелирования через конечное число локализованных состояний [11]. Ранее подобный эффект наблюдался на одиночных ДП на бикристаллической подложке [12,13].

Параметры упомянутых выше компонент отклика существенно различаются по величине. Так, при мощности излучения $\sim 10^{-7}\text{ Вт}$ вольт-ваттная чувствительность детектора на основе ЦДП в области напряжений смещения, где доминирует джозефсоновский отклик, составила 60 В/Вт и только лишь 5 В/Вт в области, где доминирует отклик, обусловленный квазичастичной проводимостью. Джозефсоновская компонента отклика не имеет структуры, связанной с различием критических токов отдельных переходов ЦДП, что также свидетельствует о близости характеристик отдельных ДП в цепочке. В то же время кривая, описывающая квазичастичный отклик, изрезана, что свидетельствует о сильной его зависимости от параметров звеньев цепочки (на кривой 5 рис. 2 эта структура не видна вследствие малости масштаба).

Сравнивая экспериментальные значения отклика одиночных YBaCuO ДП и цепочек на их основе, можно сделать вывод, что последние обладают в несколько раз большей вольт-ваттной чувствительностью и большим динамическим диапазоном, что облегчает их использование в приемниках миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. Это обстоятельство обусловлено их лучшим согласованием с СВЧ-трактом. Дальнейшие перспективы улучшения технологии YBaCuO ЦДП связаны с переходом к бикристаллическим подложкам с естественными границами, для которых степень разброса параметров отдельных переходов существенно ниже [14].

Список литературы

- [1] Гудков А.Л., Куликов В.А., Лаптев В.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 18. С. 1109–1112.
- [2] Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985.
- [3] Гудков А.Л., Ильин В.А., Лаптев В.Н. и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 11. С. 2261–2263.
- [4] Ильин В.А., Китайгородский М.Д. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 19. С. 197–201.
- [5] Dimos D., Chaudhari P., Manhart J., Le Goues F.K. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. N 2. P. 219–222.
- [6] Венгрус И.И., Красносвободцев С.И., Куприянов М.Ю. и др. // СФХТ. 1994. Т. 6. С. 1730–1734.
- [7] Rutledge B., Neikirk D.P., Kasilingam D.P. // Infr. and MM Waves. 1983. V. 10. P. 1–92.
- [8] Овсянников Г.А., Кузьмин Л.С., Лихарев К.К. // РЭ. 1982. Т. 27. № 8. С. 1613–1621.
- [9] Аматауни Л.Э., Губанков В.Н., Овсянников Г.А. // ФНТ. 1983. Т. 9. С. 939–943.
- [10] Веревкин А.А., Ильин В.А., Липатов А.П. // СФХТ. 1995. Т. 8. № 5–6. С. 745–756.
- [11] Венгрус И.И., Куприянов М.Ю., Сизгирев О.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. № 5. С. 372–376.
- [12] Липатов А.П., Веревкин А.А., Венгрус И.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 64. № 6. С. 417–422.
- [13] Lipatov A.P., Ilyin V.A., Verevkin A.A. et al. // Proc. ISEC'97. 1997. V. 3. P. 129–131.
- [14] Vengrus I.I., Balbashov A.M., Mozhaev A.V. et al. // Proc. ISEC'97. 1997. V. 2. P. 46–48.