

# Сверхвысокочастотные исследования ВТСП монокристаллов $\text{Bi}(2212)$ при азотных температурах

© А.В. Приходько, Н.М. Шибанова

Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступила в Редакцию 7 сентября 1999 г.  
В окончательной редакции 29 ноября 1999 г.)

Исследовано поглощение СВЧ мощности однофазными  $\text{Bi}$ -кристаллами (2212) с широким по температуре фазовым переходом (15 К). Установлено уменьшение поглощения СВЧ мощности, локализованное по температуре в начале фазового перехода в сверхпроводящее состояние при 80 К. Обсуждается возможный механизм особенности поглощения на основе представлений о синхронизации джозефсоновских переходов вблизи  $T_c$ .

Работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и технологий по направлению "Сверхпроводимость".

В экспериментальных исследованиях когерентных эффектов, связанных с организацией сверхпроводящего состояния, можно выделить два направления. Одно из них ориентировано на исследование так называемых когерентных эффектов II [1], связанных непосредственно с когерентным взаимодействием куперовских пар. Другое направление связано с исследованием макроскопических квантовых эффектов, обусловленных существованием множественной джозефсоновской среды [2]. Нами ранее [3] проводились микроволновые исследования когерентных эффектов в монокристаллах  $\text{Bi}(2212)$  в миллиметровом диапазоне длин волн. Было обнаружено наличие двух типов эффектов: когерентный пик проводимости, анизотропный в однофазных кристаллах, и изменение профиля стоячей волны у поверхности образцов. Последний эффект объяснялся нами существованием джозефсоновских переходов в одно- и многофазных кристаллах. Граничным условием проявления джозефсоновских эффектов является джозефсоновская частота

$$\omega_J = \frac{2eV}{\hbar} = 10^{11} \text{ s}^{-1},$$

т.е. порядка 100 GHz (при напряжении  $10^{-4} \text{ V}$  [2], если учитывать процессы выпрямления на неоднородностях в образце). В то же время граничным условием проявления когерентных эффектов II является

$$\omega_S = \frac{2\Delta}{\hbar},$$

что для энергии связи  $10^{-3} \text{ eV}$  составляет  $2.4 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$ .

Понятно, что для исследований когерентного пика проводимости необходимо проводить измерения в миллиметровом диапазоне длин волн, так как процессы рождения пар квазичастиц происходят при частотах, начиная с граничной. При этом фактор когерентности сильнее всего сказывается при энергиях пары, локализованной вблизи края энергетической щели.

В данной работе исследуется поглощение СВЧ мощности однофазными ВТСП кристаллами  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  со структурой типа 2212 в 10 см-диапазоне длин волн, т.е. при выполнении условия  $\omega < \omega_J$ . Основная идея эксперимента основывается на предположении о синхронизации отдельных джозефсоновских контактов [2] вблизи фазового перехода. Анализ джозефсоновского тока при обратном эффекте Джозефсона свидетельствует, что даже в отсутствие постоянной разности потенциалов появляются нечетные гармоники. Следовательно, в температурной зависимости мощности, поглощенной образцом, должна наблюдаться особенность, аналогичная появлению гармоник в керамических ВТСП образцах вблизи  $T_c$ . Поиску таких особенностей и посвящена данная работа.

## 1. Образцы и методика

В качестве образцов использовались монокристаллы  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ , изготовленные методом спонтанной кристаллизации из собственных расплавов на воздухе [4]. Размеры образцов в плоскости  $(ab)$  составляли  $4 \times 3 \text{ mm}$ . Исследуемые образцы в отличие от изучавшихся ранее в работе [3] после выращивания не подвергались отжигу при температурах  $800-820^\circ\text{C}$  на воздухе и, следовательно, характеризовались составом, более удаленным от оптимальной "окисленности" катионов для этого материала [4]. Отклонение в составе сопровождается и более низкими значениями температур перехода в сверхпроводящее состояние и более затянутой по температуре шириной фазового перехода изучаемых образцов по сравнению с образцами, исследованными в работе [3]. Температура перехода в сверхпроводящее состояние определялась по появлению сигнала микроволнового поглощения при ЭПР-эксперименте [5]. Начало перехода в сверхпроводящее состояние происходило при 80 К. При этом ширина фазового перехода

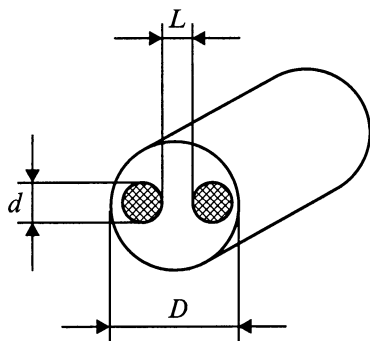


Рис. 1. Отрезок зонда-резонатора, сканирующего поверхность образца.

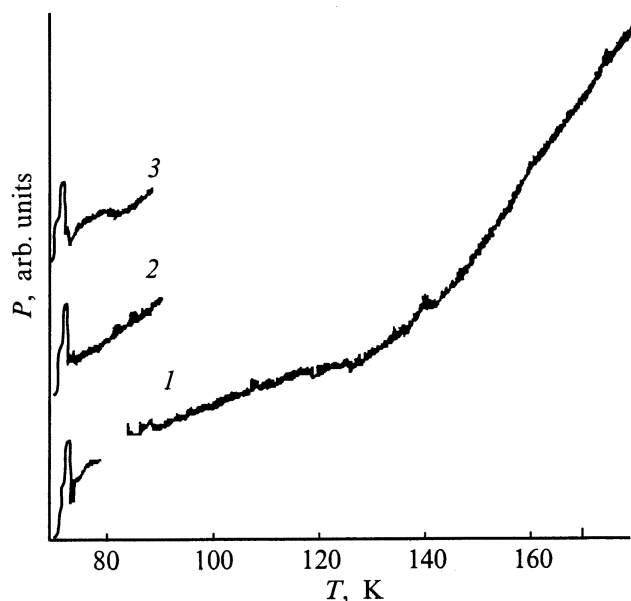


Рис. 2. Температурная зависимость мощности  $P$  для монокристалла  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  (1) и два последовательных термоцикла (2, 3), повторяющие наличие пика.

составляла не менее 15 К, т.е. переход был широким и завершался при температуре 65 К. Наличие у монокристаллов широкого по температуре фазового перехода в сверхпроводящее состояние является определяющим обстоятельством для проведения эксперимента по выявлению особенностей джозефсоновской среды, так как хорошо известно, что ширина перехода определяется, в первую очередь распределением размеров джозефсоновской сетки [2].

СВЧ свойства исследовались с использованием устройства на основе коаксиального четвертьволнового зонда-резонатора, изготовленного из симметричной двухпроводной линии [6]. Образец помещался в максимум электрического поля в центре прямоугольного резонатора. Отрезок зонда, сканирующего поверхность образца, показан на рис. 1. Размеры зонда составляли  $D = 1 \text{ mm}$ ,  $d = 0.16 \text{ mm}$ ,  $L = 0.5 \text{ mm}$ . Резонансная

частота зонда равнялась 0.942 GHz. Измерения проводились в температурном интервале 78–300 К. При помощи зонда-резонатора регистрировалась мощность  $P$ , которая была связана обратной зависимостью с величиной поглощаемой образцом СВЧ мощности. При увеличении сигнала  $P$  поглощаемая образцом СВЧ мощность уменьшалась.

## 2. Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены температурные зависимости сигнала  $P$ , снимаемого с зонда, когда базовая плоскость образца расположена параллельно электрическому полю. Как видно из рисунка, в начале перехода в сверхпроводящее состояние примерно при 80 К появляется хорошо повторяемый пик (температура начала перехода совпадает с пиком). Наличие данного пика может, по нашему мнению, свидетельствовать о проявлении когерентных эффектов в джозефсоновской среде с широким распределением размеров сетки. О существовании когерентных эффектов в среде с узким распределением размеров (ширина перехода составляла не более 5 К) сообщалось в работе [3].

Можно предположить, что в случае монокристаллических образцов с широким распределением размеров джозефсоновской сетки наиболее существенным в возникновении сверхпроводящего состояния является по аналогии с керамикой [2] следующее: определяющий фактор — существование сетки сверхпроводящего состояния; при температурах, близких к критической, сетка распадается на отдельные контуры со встроенными джозефсоновскими контактами, при этом наблюдается резкое падение поглощения образцом СВЧ мощности (пик сигнала на рис. 2).

Отметим, что процесс разрушения и формирования джозефсоновской сетки обратим, о чем свидетельствует устойчивое появление пика сигнала  $P$  при термоциклировании (кривые 1–3 на рис. 2).

Вопрос о природе когерентности взаимодействия большого числа джозефсоновских переходов в поле электромагнитной волны остается все еще актуальным. Высказывается предположение, что определяющую роль играют так называемые "эффективные переходы" [2]. В случае монокристаллических образцов  $\text{Bi}(2212)$  можно предположить, что сверхпроводящие токи создают петли на дефектах, вызванных нестехиометрией состава, в том числе и дефицитом кислорода, или на границах двойникования, которые могут существовать в однофазных образцах. Взаимосвязь характера структурных дефектов и параметров наблюдаемого резкого падения поглощаемой образцом СВЧ мощности будет предметом наших дальнейших исследований.

## Список литературы

- [1] М. Тинкхам. Введение в сверхпроводимость. Атомиздат, М. (1980).
- [2] В.Ф. Мастеров. В сб.: Высокотемпературная сверхпроводимость / Под ред. А.А. Киселева. Машиностроение, Л. (1990). С. 405.
- [3] M.N. Kotov, V.F. Masterov, V.V. Potapov, A.V. Prichodko, O.V. Smertin, M. Shybanova. *Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves* **14**, 8, 1679 (1993).
- [4] Н.М. Шибанова, В.В. Потапов, Н.М. Баранова, Г.А. Николаичук, Н.Л. Амосова, Т.И. Коновалова, В.В. Петухова, Т.И. Линева, С.В. Яковлев, Ю.М. Яковлев. Сверхпроводимость: физика, химия, техника **6**, 12, 597 (1993).
- [5] В.Ф. Мастеров, И.Л. Лихолит, А.В. Федоров, Н.М. Шибанова, Е.Л. Духовская, В.В. Потапов. Сверхпроводимость: физика, химия, техника **5**, 12, 2235 (1992).
- [6] В.Ф. Мастеров, А.В. Приходько, О.И. Коньков, А.А. Шакланов. *ФТТ* **39**, 1, 97 (1997).