

Эффекты микроволновых полей в ВТСП-монокристаллах Bi (2212)

© А.В. Приходько, Н.М. Шибанова

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

(Поступила в Редакцию 13 ноября 2001 г.)

Исследовано поглощение однофазных монокристаллов Bi (2212) в 2 mm диапазоне длин волн в зависимости от величины перенапряжения микроволнового поля. Выявлено появление характерного плато при ориентации электрического поля вдоль сверхпроводящих плоскостей. Обсуждается возможный механизм такого поведения в рамках представлений о роли протекательной сетки и шнуровых распределений тока.

Работа выполнена в рамках гранта Министерства промышленности, науки и технологии РФ „Сверхпроводимость“.

Исследование поглощения микроволнового излучения высокотемпературными сверхпроводниками оказалось эффективным для определения свойств внутренних джозефсоновских переходов. Обнаруженная осциллирующая зависимость мощности от поглощаемого излучения при разных величинах постоянного магнитного поля обусловлена существованием таких переходов [1]. Анализ экспериментальных исследований позволяет выделить характерные особенности поглощения. Это в первую очередь касается масштабов микроволновых полей, которые не приводят к локальной потере сверхпроводимости. Данные особенности объясняются [2] эффектами размерного квантования в контурах малого размера (площадью порядка сотен микрон). Как следует из [2], частотная зависимость поглощаемой мощности имеет максимум на частоте, которая параметрически зависит от обратной амплитуды переменного магнитного поля. При дальнейшем увеличении мощности поглощение ведет себя более сложно. При этом периодичность поглощения от поля исчезает и начинают проявляться мезоскопические флуктуации [3]. Микроволновое зондирование ВТСП-монокристаллов выявило такие особенности, как джозефсоновская генерация гармоник и когерентный пик проводимости. В первом случае также наблюдался аналог ступеней Шапиро. Эксперимент проводился в области небольших микроволновых полей, где мезоскопика не проявляется.

В данной работе исследуются микроволновые свойства монокристаллов Bi (2212) в 2 mm диапазоне длин волн в зависимости от величины микроволнового поля, зондирующего образец.

Анализ известных особенностей поглощения показывает, что максимальная частота, на которой еще проявляются эффекты размерного квантования, в соответствии с [2], составляет величину порядка нескольких гигагерц. Можно предположить, что при частотах, больших критической, данные эффекты проявляются не будут. Кроме того, эффекты джозефсоновской генерации гармоник наблюдаются только для многофазных образцов. В работе предпринят поиск микроволновых особенностей в 2 mm диапазоне длин волн, т.е. в условиях, когда эффекты размерного квантования не

проявляются. В качестве образцов выбраны однофазные и многофазные монокристаллы, в которых, во-первых, наблюдаются когерентные эффекты проводимости [4], а во-вторых — эффекты слабой связи [5].

1. Образцы и методика эксперимента

Использованы образцы монокристаллов Bi (2212), изготовленных методом спонтанной кристаллизации из расплава на воздухе. Размеры образцов составляли $0.8 \times 1.7 \times 3.7$ mm. Данная технология не отличается от представленной ранее [5,6].

В основе микроволнового эксперимента лежит использование сильноизлучающей щели в широкой стенке прямоугольного волновода. В сочетании с использованием открытых диэлектрических резонаторов (ОДР) создана оригинальная установка по исследованию профиля стоячей волны в ОДР, нагруженном образцом. Эффективность таких экспериментов при исследовании сверхпроводящих свойств показана в работе [4]. В данной работе использован одномодовый ОДР из тефлона, внутренний радиус которого составляет 0.325, внешний — 0.470 и длина — 4 mm. С поверхностью образца взаимодействуют радиальная электрическая и азимутальная магнитная компоненты электромагнитного поля на торце резонатора. Возбуждение резонатора осуществлялось при помощи щели 0.1×8 mm. Образец охлаждался до 78 К. Использовался микроволновый генератор 2 mm диапазона длин волн, максимальная электрическая мощность достигала $P_0 = 4$ mW (100%), а частота следования — 10^3 Hz. Резонансная частота ОДР составляла 143.52 GHz. Температурные измерения мощности сигнала проводились в максимуме стоячей волны, ближайшей к образцу, а измерения зависимости от нормированной падающей мощности (P/P_0) — при помещении образца непосредственно над щелью. Ориентация образца задавалась вектором электрического поля E в щели и нормалью n к базовой плоскости образца.

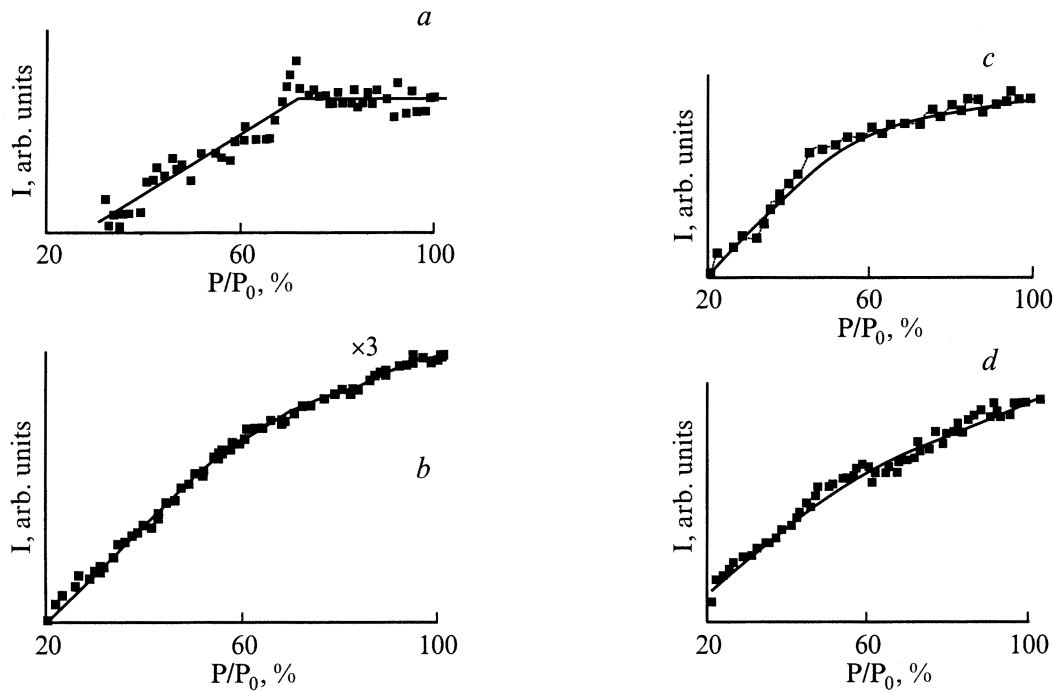


Рис. 1. Зависимость выходной микроволновой мощности I от перенапряжения P/P_0 для однофазного (a, b) и многофазного (c, d) образцов. a, c — ориентация $\mathbf{E} \perp \mathbf{n}$, b, d — $\mathbf{E} \parallel \mathbf{n}$.

2. Результаты измерений и обсуждение

Основной результат сводится к следующему экспериментальному факту: в зависимости мощности от перенапряжения для однофазного образца в полях, соответствующих величине перенапряжения 70%, появляется характерное плато, зависящее от ориентации. Для многофазного образца фиксируется характерный излом при 40% величине перенапряжения. На рис. 1 представлены зависимости выходной микроволновой мощности от величины перенапряжения для однофазных (a, b) и многофазных (c, d) различным образом ориентированных образцов при азотных температурах. При комнатной температуре данные особенности не проявляются, т.е. они являются особенностями сверхпроводящего состояния. На рис. 2 представлена зависимость критической температуры T_c от величины перенапряжения для однофазного образца при ориентации $\mathbf{E} \parallel \mathbf{n}$. Данная зависимость свидетельствует о том, что существует сверхпроводящее состояние во всем интервале перенапряжений (0–100%). Кроме того, изменение характера этой зависимости наступает при той же величине перенапряжений, которой соответствует излом на рис. 1, b .

Известно, что в малых объемах могут проявляться нелинейные эффекты, связанные с возникновением электрических неустойчивостей [7]. При этом образуется токовый шнур, следствием появления которого является изменение электрофизических характеристик. Например, при исследовании микроволнового шума в режиме

токовой неустойчивости наблюдается насыщение шума от тока низкоомного состояния [8]. Этот эффект связывается с расширением шнура, аналогично наблюдавшемуся ранее сохранению плотности тока в шнуре [7]. Согласно правилу Кирхгофа, особенности излучения должны быть связаны с особенностями поглощения, соответственно при одинаковых температурах и длине волны. Действительно, поглощение СВЧ-мощности в режиме электрической неустойчивости [9] соответствует поведению микроволнового шума. Можно предположить, что для проявления наблюдаемой области плато определяющим яв-

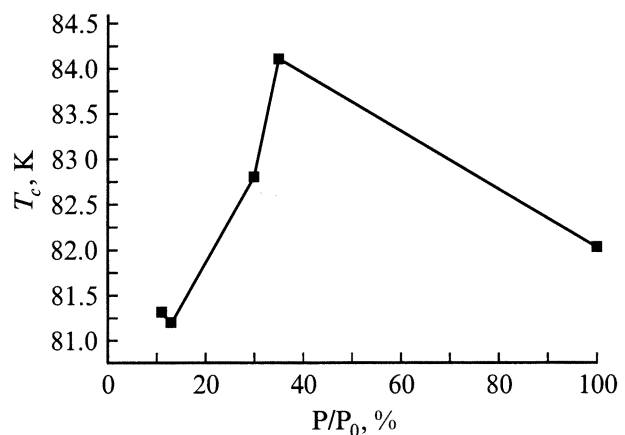


Рис. 2. Зависимость критической температуры сверхпроводящего перехода T_c от перенапряжения P/P_0 для однофазного образца. Ориентация $\mathbf{E} \parallel \mathbf{n}$.

ляется возникновение областей электрической неустойчивости в объеме образца и последующее формирование шнуровых распределений микроволнового тока. Центрами появления таких областей могут служить области неоднородного распределения поля по объему. Известно, что в образцах неэллипсоидальной формы магнитное поле внутри образца неоднородно. Для высокотемпературных сверхпроводников неоднородное распределение поля измерено в [10], что свидетельствует о появлении геометрического барьера — в центре образца экранирующий ток меньше критического, тогда как на периферии больше. Существует вероятность, что геометрический барьер может определять распределение микроволновых токов. Начало образования токового шнура можно представить в модели перколяционного перехода [11] следующим образом. Под действием протекающего в объеме микроволнового тока возникает сетка каналов протекания, при дальнейшем увеличении тока часть проводящих участков может разрушиться. Начало процесса разрушения приводит к подавлению сверхпроводящего перехода, что проявляется в уменьшении критической температуры сверхпроводящего перехода (рис. 2). Увеличивая поле, мы тем самым приближаем систему к порогу протекания, так как сетка каналов протекания становится все более разряженной. И при приближении к порогу протекания (критической концентрации проводящих каналов) протекательная сетка полностью разрывается. В работе [11] численно определены эффективная проводимость такой системы, а также плотность каналов протекания от величины поля прожога. В нашем случае это микроволновое поле, соответствующее началу электрической неустойчивости в протекательной сетке.

Главным результатом работы является факт обнаружения сосуществования сверхпроводящего перехода и электрических неустойчивостей со шнуровыми распределениями в протекательной сетке. Можно заключить, что в области полей, достаточных для возникновения электрической неустойчивости, физика процессов отличается коренным образом от случая небольших микроволновых полей. Если в последнем случае такие поля изменяют структуру протекательной сетки, то большие поля инициируют так называемые эффекты сильного поля. При этом сверхпроводящее состояние разрушается только при критических полях, связанных с приближением к порогу протекания. Отметим, что эффект повышения критической температуры перехода может быть связан со стимуляцией сверхпроводящих каналов с более высокой критической температурой в протекательной сетке и требует дальнейших исследований.

Список литературы

- [1] В.Ф. Мастеров. В сб. статей: Высокотемпературная сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования. Вып. 1/Под ред. проф. А.А. Киселева. Машиностроение, Л. (1990). С. 405.
- [2] В.Ф. Мастеров, В.А. Харченко. СФХТ **4**, 4, 629 (1991).
- [3] V.F. Masterov, I.L. Likholt, V.V. Potapov, N.M. Shibanova. Supercond. Sci. Technol. **6**, 593 (1993).
- [4] M.N. Kotov, V.F. Masterov, V.V. Potapov, A.V. Prichodko, O.V. Smertin, N.M. Shibanova. Int. J. Infrared and Millimeter Waves **14**, 8, 1679 (1993).
- [5] А.В. Приходько, Н.М. Шибанова. ФТГ **42**, 6, 992 (2000).
- [6] Н.М. Шибанова, В.В. Потапов, Н.М. Баранова, Г.А. Николаичук. Сверхпроводимость: физика, химия, техника **6**, 3, 597 (1983).
- [7] С.А. Костылев, В.А. Шкут. Электронное переключение в аморфных полупроводниках. Наукова думка, Киев (1978). 203 с.
- [8] А.В. Приходько, А.А. Чеснис, В.А. Барейкис. ФТП **15**, 3, 536 (1981).
- [9] Ж.И. Алферов, А.Т. Гореленок, В.В. Мамутин, А.В. Приходько, Т.А. Полянская, И.Г. Савельев, Ю.В. Шмарцев, Р.А. Вашкявичюс. ФТП **19**, 11, 2004 (1985).
- [10] E. Zeldov. Phys. Rev. Let. **73**, 1428 (1994).
- [11] А.П. Виноградов, А.В. Гольдштейн, А.К. Сарычев. ЖТФ **59**, 1, 208 (1989).