Физика низких температур, 1996, т. 22, № 6, с. 618–621

Субгармоники энергетической щели на характеристиках микромостиков из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

А. В. Погребняков

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Беларусь, 220600, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

М. Т. Левинсен

H. C. Ørsted Laboratory, Niels Bohr Institute, Universitetsparken 5, DK-2100 Copenhagen, Denmark

Ю. К. Шенг, Т. Фрельтофт

NKT Research Center, Sognevej 11, DK-2605 Brøndby, Denmark

Исследованы микромостики, сформированные в эпитаксиальных пленках $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. На характеристиках микромостиков наблюдалась субгармоническая щелевая структура при напряжениях, соответствующих большей ($2\Delta_1$ = 49 мэВ), а также меньшей ($2\Delta_2$ = 10,3 мэВ) компонентам энергетической щели при T = 4,2 К. Появление субгармонической структуры связывается с андреевским отражением.

Досліджено мікромістки, які сформовани в епітаксіальних плівках $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. На характеристиках мікромістків спостерігалась субгармонічна щільова структура при напругах, відповідних більшої ($2\Delta_1$ = 49 меВ), а також меншої ($2\Delta_2$ = 10,3 меВ) компонентам енергетичної щілини при T = 4,2 К. Появлення субгармонічної структури пов'язано з андріївським відбиттям.

Субгармоническая щелевая структура (СЩС) проявляется на характеристиках сверхпроводниковых слабых связей в виде особенностей при напряжениях $V_n = 2\Delta/en$; (n = 1, 2, 3, ...; Δ — величина энергетической щели материала электродов) [1]. В качестве механизмов, объясняющих возникновение СЩС, были предложены многочастичное туннелирование [2], воздействие собственного джозефсоновского излучения слабой связи [3,4] и андреевское отражение [5,6]. В настоящее время считается, что появление СЩС обусловлено процессами туннелирования и андреевского отражения [7], и, таким образом, предложенные ранее механизмы многочастичного туннелирования [2] и андреевского отражения [6] представляют собой крайние случаи очень малой и очень большой прозрачности туннельных барьеров.

Изучение СЩС позволяет получить информацию об энергетической щели. Экспериментальные данные о величине энергетической щели в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП), в частности в $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, характеризуются большим разбросом [8], что объясняется малым значением длины когерентности, анизотропией свойств и большой химической активностью высокотемпературных сверхпроводников. В связи с этим большое значение приобретают методы исследований, в которых при изготовлении образцов удается избежать даже временного появления (и тем самым деградации) открытых поверхностей ВТСП, которые затем используются в измерениях [9–11].

В данной работе сообщается об исследованиях СЩС на характеристиках тонкопленочных микромостиков из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Тонкие эпитаксиальные пленки из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ толщиной 1 500–2 000 Å наносились на подложки из MgO (100) и $SrTiO_3$ (100) методом лазерного распыления стехиометрической мишени. Ориентация оси c нормально к плоскости подложки была подтверждена обратным резерфордовским рассеянием в условиях каналирования. Пленки имели критическую температуру T_c = 86–92 К и температурный интервал перехода в сверхпроводящее состояние ΔT_c = 1–2 К. Полоски длиной 0,5 мм и шириной 10 мкм, содержащие сужение (микромостик) и четыре контактные площадки, формировались ионным травлением. Размеры микромостиков: длина l = 10 мкм, ширина w = 1 мкм и l = 3 мкм,

© А. В. Погребняков, М. Т. Левинсен, Ю. К. Шенг, Т. Фрельтофт, 1996

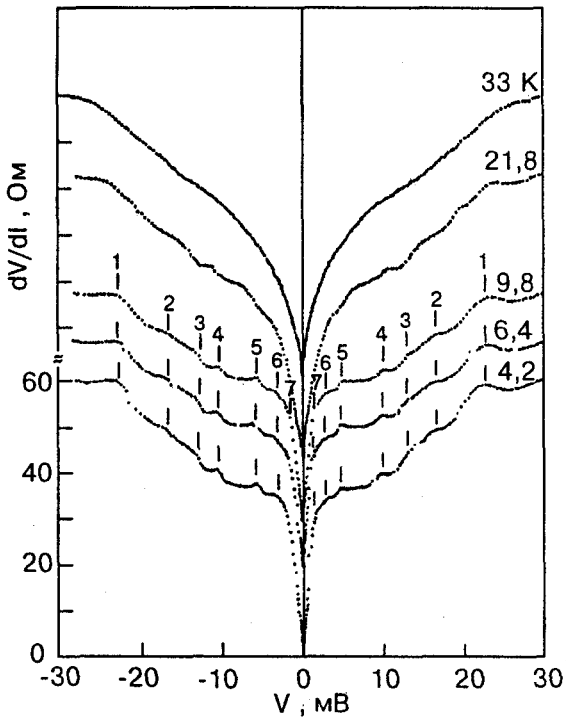

Рис. 1. Первые производные вольт-амперных характеристик микромостика из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, зарегистрированные при разных температурах. Отмечены положения особенностей субгармонической структуры.

$w = 2$ мкм. На контактные площадки лазерным распылением серебряной мишени при комнатной температуре осаждались пленки серебра толщиной 1 000 Å. Полученные данные не зависели от размеров микромостиков, поэтому ниже обсуждаются только характеристики микромостиков с размерами $l = 10$ мкм и $w = 1$ мкм.

На рис. 1 представлены первые производные вольт-амперных характеристик микромостика. Для большей ясности кривые сдвинуты вдоль оси ординат. Характеристики на рис. 1 имеют воспроизводимую структуру при значениях напряжения 23,2; 16,2; 12,88; 9,9; 5,2; 3,46; 2,8 мВ, которые могут быть разделены на две группы. Первые три значения ряда соответствуют напряжениям $V_n = 2\Delta_1 / en$ (где $n = 2, 3, 4$), относящимся к СЩС большей компоненты энергетической щели $2\Delta_1 = 49$ мэВ. Другие значения относятся к СЩС $V_m = 2\Delta_2 / em$ (где $m = 1, 2, 3, 4$), меньшей компоненты энергетической щели $2\Delta_2 = 10{,}3$ мэВ. Значение четвертого числа ряда можно отнести также к СЩС большей компоненты энергетической щели с $n = 5$. На вставке *а* на рис. 2 приведены зависимости dV/dI от V при большем напряжении смещения, которые демонстрируют отсутствие структуры при напряжениях, превышающих $V = 2\Delta_1 / e = 49$ мэВ. Особенности при V_n и V_m ясно видны на характеристиках, зарегистрированных при температурах примерно до 10 K; при дальнейшем увеличении температуры структура становится размытой, что не дает возможности изучить температурную зависимость энергетической щели, поэтому указаны только максимальные значения компонент энергетической щели.

Отсутствие сильно выраженных особенностей при напряжениях $V = 2\Delta_1 / e$ ($n = 1$) и $V = 2\Delta_2 / e$ ($m = 1$), а также относительно большое число субгармоник соответствуют пределу большой прозрачности потенциальных барьеров [7]. Поэтому предполагается, что причиной появления СЩС на характеристиках исследованных в данной работе образцов является андреевское отражение.

Анализ *I–V*-характеристик микромостиков (рис. 2) показывает, что их форма определяется движением вихрей Абрикосова. В результате движения вихрей на каком-то участке микромостика (слабой связи) возникает отличное от нуля падение напряжения [9–11]. В этом месте возникает ток квазичастиц и появляется возможность андреевского отражения.

Значения критической температуры слабых связей в микромостиках, определенные по температурной зависимости критического тока образцов (вставка *б* на рис. 2), были ниже, чем их берегов. При температурах, превышающих критическую температуру слабых связей, исследовавшиеся структуры могут рассматриваться как два *S–N*-контакта, связанные несверхпроводящей областью. Это приводит к исчезновению СЩС с увеличением температуры.

Большие и малые энергетические щели в $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ наблюдались и ранее и приписывались анизотропии единственной сверхпроводящей щели в реальном пространстве, которая вызвана анизотропией кристаллической структуры. Большие и малые энергетические щели рассматривались как щели в плоскости *ab*, Δ_{ab}, и вдоль оси *c*, Δ_c, со значениями в интервалах от 10–15 до 45–50 мэВ и от 4 до 10 мэВ соответственно [8]. В данной работе исследовались эпитаксиальные пленки высокой степени совершенства с ориентацией оси *c* по нормали к плоскости подложки и током, протекающим в плоскости *ab*. Поэтому можно предположить, что наблюдаемая СЩС связана с компонентами энергетической щели в плоскости *ab*.

В последнее время большое внимание привлекает проблема симметрии сверхпроводящего параметра порядка в высокотемпературных сверхпроводниках. В работе [12] приведены аргументы в пользу сильно анизотропного в плоскости *ab* параметра порядка, имеющего *s*-волновую симметрию.

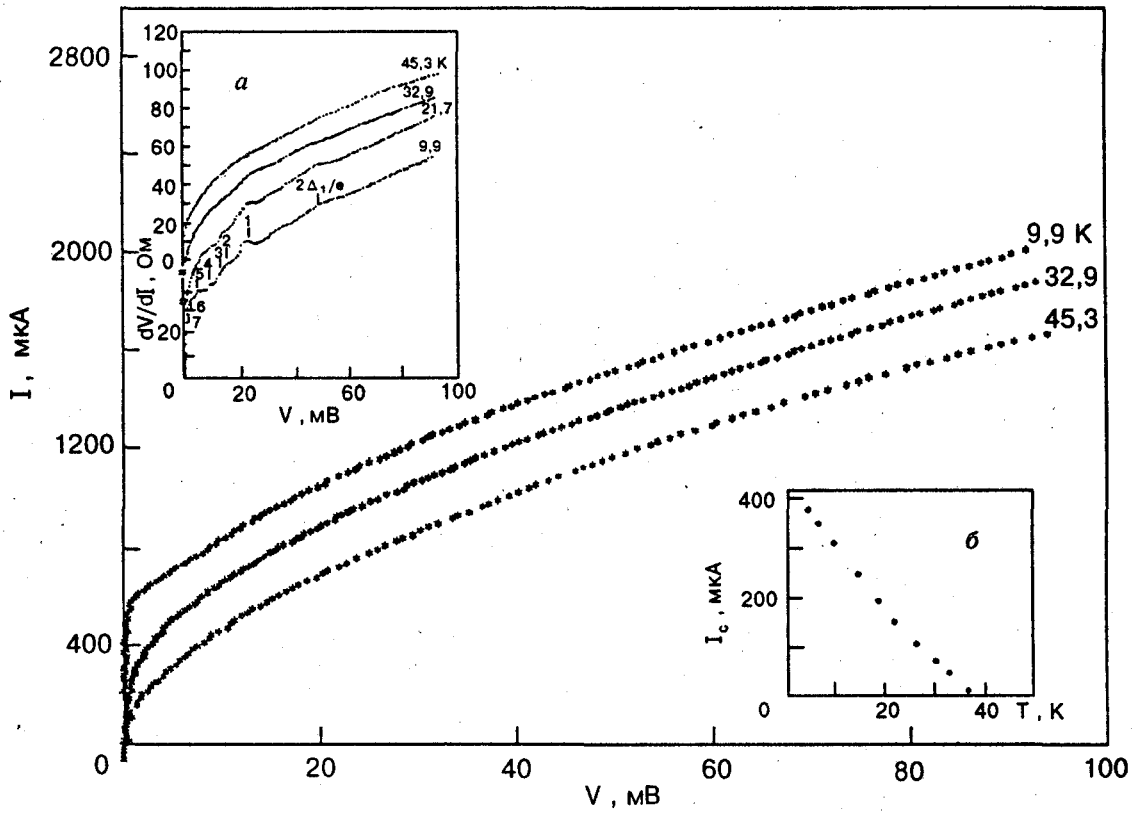

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики микромостика из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. На вставках: первые производные вольт-амперных характеристик, зарегистрированные в большем, чем на рис. 1, интервале напряжений смещения (*а*) и зависимость критического тока микромостика от температуры (*б*).

В других работах [13–14] предполагается, что параметр порядка имеет d-волновую симметрию. Рассматривались также возможные типы смешанной $(s+d)$-симметрии параметра порядка [15–16]. Эксперименты, обсуждаемые в данной работе, не позволяют установить изменение знака параметра порядка и поэтому на основании полученных данных нельзя сделать выбор между s- и d-волновыми типами симметрии параметра порядка. Тем не менее полученные данные, по-видимому, свидетельствуют о двумерной анизотропии порядка в плоскости *ab*.

Таким образом, в данной работе приведены результаты исследований характеристик тонкопленочных микромостиков из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. На характеристиках наблюдалась СЩС, соответствующая большой, $2\Delta_1 = 49$ мэВ, и малой, $2\Delta_2 = 10{,}3$ мэВ, компонентам энергетической щели. Предполагается, что СЩС связана с двумерной анизотропией параметра порядка в плоскости *ab*. Появление СЩС связывается с явлением андреевского отражения.

1. Е. Л. Вольф, *Принципы электронной туннельной спектроскопии*, Наукова думка, Киев (1990).
2. J. R. Schrieffer and J. W. Wilkins, *Phys. Rev. Lett.* **10**, 17 (1963).
3. N. R. Werthamer, *Phys. Rev.* **147**, 255 (1966).
4. L.-E. Hasselberg, M. T. Levinsen, and M. R. Samuelsen, *Phys. Rev.* **B9**, 3757 (1974).
5. А. Ф. Андреев, *ЖЭТФ* **46**, 1823 (1964).
6. M. Octavio, M. Tinkham, G. E. Blonder, and T. M. Klapwijk, *Phys. Rev.* **B27**, 6739 (1983).
7. G. B. Arnold, *J. Low Temp. Phys.* **68**, 1 (1987).
8. T. Hasegava, H. Ikuta, and K. Kitazava, *Tunneling spectroscopy of oxide superconductors, in: Physical Properties of High-Temperature Superconductors. III*, Oxford University, New York (1991).
9. Ю. М. Иванченко, П. Н. Михеенко, Я. И. Южелевский, *СФХТ* **3**, 399 (1990).
10. И. В. Короташ, Э. М. Руденко, А. И. Ральченко, В. В. Фисун, *СФХТ* **5**, 769 (1990).
11. А. К. Асадов, П. Н. Михеенко, *ФНТ* **14**, 467 (1988).
12. S. Chakravarty, A. Sudbo, P. W. Anderson, and S. Strong, *Science* **261**, 337 (1993).
13. Ch.-R. Hu, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 1526 (1994).
14. L. S. Borkovski and P. J. Hirschfeld, *Phys. Rev.* **B49**, 15404 (1994).
15. В. Ф. Елесин, Л. В. Крашенинников, Л. А. Опенов, *ЖЭТФ* **107**, 2092 (1995).
16. Y. Tanaka and S. Kashiwaya, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 3451 (1995).

Energy gap subharmonic in characteristics of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ microbridges

A. V. Pogrebnyakov, M. T. Levinsen, Yu. K. Sheng, and T. Freltoft

The microbridges formed in thin epitaxial $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ films were investigated. The characterictics of the microbridges exhibited subharmonic gap structures corresponding to large ($2\Delta_1 = 49$ meV) and small ($2\Delta_2 = 10.3$ meV) components of the energy gap at $T = 4.2$ K. The appearance of the subharmonic gap structures is attributed to the phenomenon of Andreev reflection.