

эксперименты с возбуждением образца различными компонентами электромагнитного поля с частотой  $\omega$ .

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность А.Г. Аронову за обсуждение результатов работы.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Мастеров В.Ф., Егоров А.И., Перасимов Н.П. и др. - Письма в ЖЭТФ, т. 46, в. 7, с. 289-292.
- [2] Shapiro S. - J. Appl. Phys., 1967, v. 38, N 4, p. 1879-1884.
- [3] Nethercot A.H., von Gutfield R.J. - Phys. Rev., 1963, 131, N 2, p. 576-588.
- [4] Rose K., Sherrill M.D. - Phys. Rev., 1966, v. 145, N 1, p. 145-188.
- [5] Песковацкий С.А., Бру И.И., Барилочич О.И. - Письма в ЖЭТФ, 1967, т. 6, в. 7, с. 759-762.
- [6] Губанков В.Н., Лихарев К.К., Марголин Н.М. - Письма в ЖЭТФ, 1970, т. 11, в. 5, с. 246-250.
- [7] Seraphim G.R.S., Mc Dermott R.C. - Phys. Lett., 1970, 32A, N 1, p. 35-36.
- [8] Абрамов О.В., Левиев Г.И., Погосов В.Г., Трушин М.Р. - Письма в ЖЭТФ, 1987, т. 46, в. 11, с. 433-435.
- [9] Абрикосов А.А. Основы теории металлов, М.: Наука, 1987, 520 с.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию  
6 мая 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 16

26 августа 1988 г.

### ПОЛЕВАЯ ИОННАЯ МИКРОСКОПИЯ СВЕРХПРОВОДНИКА $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

Г.А. Месяц, Н.Н. Сюткин,  
В.А. Ивченко, Е.Ф. Таланцев

Методом полевой ионной микроскопии получено изображение поверхности сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с атомным разрешением. Показано, что микрокартину чистой поверхности создают преимущественно атомы иттрия.

1. Атомная структура сверхпроводящей керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  изучалась в полевом ионном микроскопе. Возможности полевой ион-

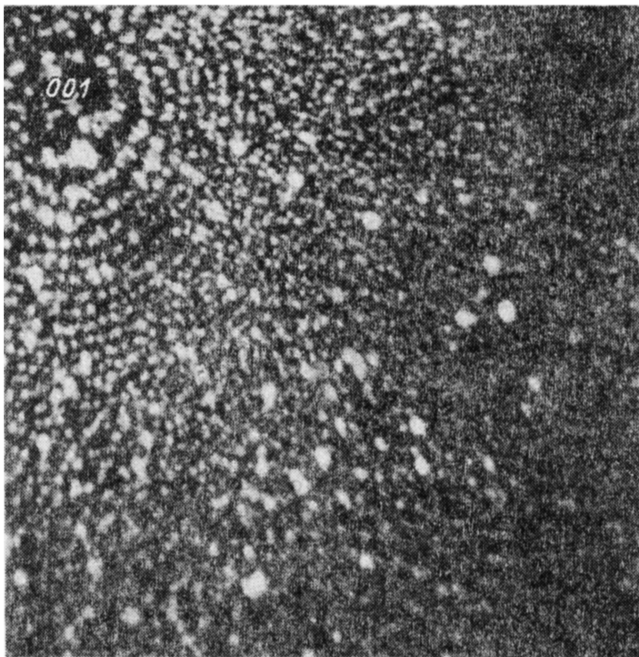


Рис. 1. Ионное изображение поверхности сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ :  $\gamma=15$  кВ; дефект в области (001).

ной микроскопии позволяют не только визуализировать чистую поверхность образца в условиях высоких электрических полей, но и путем контролируемого удаления атомов самого материала при криогенных температурах анализировать кристаллическую решетку в объеме.

Предполагалось, используя данную методику, получить ионное изображение керамики с атомным разрешением, установить, какая из подрешеток упорядоченного соединения создает микрокартину поверхности, однородна ли структура сверхпроводника в объеме и т.д. Пока известна только одна работа [1], выполненная методом полевой ионной микроскопии с помощью изображающего атомного зонда. Вследствие конструктивных особенностей прибора, в основном предназначенного для масс-спектроскопических исследований, авторам [1] не удалось наблюдать полное ионное изображение сверхпроводящей поверхности. Поэтому они не смогли определить тип изображающих атомов и соответствующую этим атомам кристаллическую подрешетку.

2. В качестве заготовок для образцов-эмиттеров служили штабики  $1 \times 1 \times 10$  мм, нарезанные алмазным кругом из аттестованных керамических таблеток  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (температура перехода в сверх-

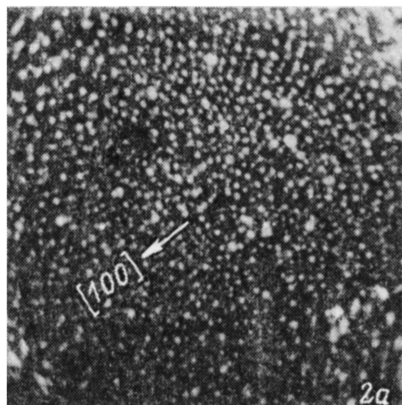


Рис. 2. а - ионное изображение области куба (001).  $V=11$  кВ; разрешение атомов в направлении 100 составляет  $3,8 \text{ \AA}$ . б - смоделированное изображение области куба (001) подрешетки иттрия.

проводящее состояние 92 К). Путем электрического и химического травления в 5–15% растворе хлорной кислоты в монобутиловом эфире этиленгликоля [1] получали острия-образцы, которые помещали в микроскоп. Приготовление атомногладкой поверхности осуществляли в самом приборе полевого испарения атомов сверхпроводника с наиболее выступающих мест полусферической вершины эмиттера.

Давление остаточных газов достигало  $10^{-5}$  Па. Хладагентом служил твердый азот (63 К). В качестве изображающего газа использовались смесь газов, в которой превалировал молекулярный азот. Для усиления изображения применялся микроканальный конвертор (диаметр МКП был 56 мм). Регистрация микрокартин поверхности осуществлялась с помощью фотокамеры при медленном полевым испарении атомов самого материала. В процессе визуализации и фиксации ионных изображений исследуемых соединений  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  не наблюдалось следов адсорбции на поверхности, что в то же время является типичным для поверхности чистых металлов и сплавов при тех же самых условиях (W, Cu,  $Cu_3Au$ ). При напуске изображающего газа водорода, ионная микрокартина сверхпроводника теряла в разрешении отдельных атомов и в выявлении граней на главных зонных линиях.

3. На рис. 1 приведено ионное изображение поверхности сверхпроводящей керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . По своей регулярности кольцевой картины, особенно в области куба (001), изображение подобно микрокартине упорядоченного твердого раствора. Это означает, что поверхность изображается в основном атомами одного сорта. Машинное моделирование ионного изображения отдельных подрешеток структуры  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  показало, что наиболее удовлетворяет реально полученному (рис. 1) изображению, смоделированное

для подрешетки иттрия (рис. 2, б). Высокая тетрагональность,  $c/a = 3$ , обусловила специфичность ионного изображения сверхпроводника, что проявилось в морфологической важности развития полюсов [2]. Наиболее развитым мог быть только один полюс куба (001), что и наблюдается на экране прибора. Все остальные кубические грани имеют развитие колец порядка развития колец додекаэдров и полюсов с более высокими индексами, типа (012) и т.п. Стереографическая проекция, построенная для подрешетки атомов иттрия, полностью удовлетворяла полученному ионному изображению сверхпроводящей керамики. На основании всего изложенного можно сделать вывод, что ионное изображение чистой поверхности  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  преимущественно создают атомы иттрия.

В процессе полевого испарения атомов самого материала анализировали структуру сверхпроводника в объеме. На изображении обычно наблюдался монокристалл, иногда с нарушениями кольцевой картины в полюсах низких индексов (см. рис. 1). Такой ионный контраст соответствует дефектам кристаллической структуры.

Кроме регулярной кольцевой картины, которую создают на экране атомы иттрия, на изображениях отмечалось достаточно хаотическое распределение точек, более интенсивных по яркости. Возможно, это атомы другого сорта, находящиеся под поверхностными атомами иттрия и косвенно влияющие на изображение.

Таким образом, в данной работе удалось получить полностью сформированное ионное изображение поверхности сверхпроводящей керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с атомным разрешением, определить тип изображающих атомов как атомов иттрия и наблюдать структуру сверхпроводника в объеме.

Авторы выражают благодарность А.Н. Петрову, А.Ю. Зуеву, С.И. Шкуратову за предоставленные образцы для исследований.

## Л и т е р а т у р а

- [1] K e l l o g g G.L., B r e n n e r S.S. - Appl. Phys. Lett., 1987, v. 51, p. 1851.
- [2] И в ч е н к о В.А., С ю т к и н Н.Н. - ФММ, 1986, т. 61, с. 575.

Институт электрофизики  
УрО АН СССР

Поступило в Редакцию  
24 мая 1988 г.