

## ИССЛЕДОВАНИЕ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА МОНОКРИСТАЛЛОВ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ С ПОМОЩЬЮ ШИРОКОУГОЛЬНОГО АТОМНОГО ЗОНДА

Ю.А. В л а с о в, О.Л. Г о л у б е в,  
А.А. С а м о х в а л о в, Н.Н. С ю т к и н,  
Е.Ф. Т а л а н ц е в, Н.М. Ч е б о т а е в и  
В.Н. Ш р е д н и к

К настоящему моменту известно не менее десяти работ [1-10], в которых поверхность материалов высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) визуализировалась в атомном масштабе методами полевой ионной микроскопии. В некоторых из них для определения состава поверхности применялся атомный зонд [1, 3, 8, 9]. В большинстве этих работ в качестве изображающего газа использовались аргон, водород, неон; лишь в работах [4, 10] был применен азот, обеспечивающий высокий контраст изображения и хорошее разрешение атомов. Как правило, в цитированных работах объектом исследования была поликристаллическая керамика, хотя на конце тонкого острия чаще всего присутствовало единственное монокристаллическое зерно. Керамика использовалась во всех цитированных работах с применением атомного зонда.

В настоящей работе изучаемый материал ВТСП представлял собой монокристалл соединения  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . В качестве изображающего газа применялся азот. В отличие от инертных газов, азот лучше аккомодирует на охлажденной поверхности объекта. С другой стороны, по отношению к оксидам азот химически менее агрессивен, чем водород. Кроме получения эмиссионных картин с атомным пространственным разрешением, в задачу работы входило исследование состава поверхности и приповерхностных областей монокристалла  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с помощью широкоугольного атомного зонда [11, 12]. Эксперименты такого рода необходимы для создания представлений о реальной структуре поверхности материалов ВТСП.

Монокристаллы  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  выращивались из расплавов. Кристаллизация проводилась в тиглях из алунда, платины и некоторых других материалов - при охлаждении расплавов на воздухе от 1040 °С до 850 °С со скоростью 2° в час. Наиболее крупные кристаллы (до 4x4x0.4 мм) получались в алундовых тиглях. Параметры решетки кристаллов при этом составляли (после окисления в кислороде при 500 °С)  $a=3.84 \text{ \AA}$ ,  $b=3.88 \text{ \AA}$ ,  $c=11.70 \text{ \AA}$ . Кристаллы имели относительно низкие температуры фазового перехода  $T \approx 60 \text{ К}$ . Примерно такие же, но более мелкие, кристаллы выращивались при кристаллизации в тиглях из платины. Они отличались резким переходом ( $\sim 1^\circ$ ) в сверхпроводящее состояние при 82 К.

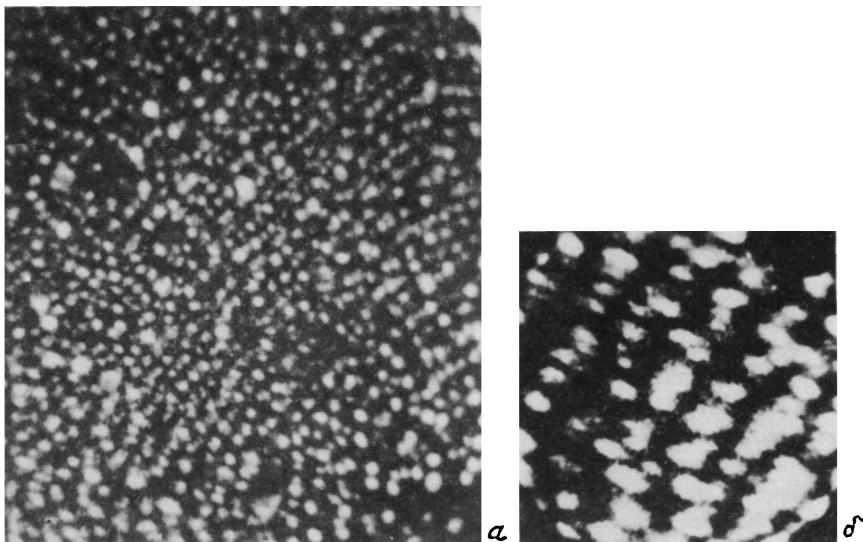


Рис. 1. Полевые ионные изображения монокристаллов  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , изображающий газ – азот, а – изображение вершины острья,  $V = 5500$  В,  $T \approx 63$  К; б – изображение малой части эмиттирующей поверхности острья,  $V = 6600$  В,  $T \approx 80$  К.

Образцы-острия изготавливались из аттестованных на сверхпроводящие свойства мелких монокристаллов размером  $1 \times 1 \times 0.1$  мм по методу, предложенному в работе [2]. С помощью скальпеля кристалл раскалывался на предметном стекле. Из осколков выбирались наиболее острые размером  $0.2-0.5$  мм в длину и  $0.05-0.2$  мм в ширину, имевшие пирамидальные выступы с углом раствора  $5-10^\circ$ . Выбор производился при наблюдении в оптическом микроскопе с увеличением  $\times 200$ .

Отобранные осколки приклеивались с помощью проводящей эпоксидной смолы к достаточно тупому вольфрамовому острю – объекту полевого эмиссионного микроскопа. Образец из монокристалла  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  никакому химическому или электролитическому травлению далее не подвергался, его поверхность очищалась затем только холодным полевым испарением уже в полевом ионном микроскопе. Применявшийся в предварительных опытах полевой ионный микроскоп содержал детектор типа микроканальный конвертор-экран, расположенный достаточно близко к острю с тем, чтобы наблюдать полностью изображение кончика острья. Подробности техники эксперимента в этой части работы соответствовали описанному в [4]. В удачных опытах удавалось получить совершенную эмиссионную картину поверхности с атомным разрешением (рис. 1, а), выявляющую как некоторые грани (развитые далеко не так полно, как

это бывает на металлических поверхностях), так и обширные области атомных ступеней, выглядящих как пунктирные полосы, состоящие из точек-атомов.

Проверенный и аттестованный таким образом объект переносился затем в другой прибор с микроканальным детектором диаметром 56 мм, удаленным от острия на расстояние 10 см. В этом случае на экране наблюдалась лишь часть полного изображения. Обычно это была область параллельных ступеней (рис. 1, б). Изображения наблюдались при охлаждении острия жидким азотом и в лучах ионов азота. За счет полевого испарения можно было снимать атомный слой за слоем, выбирая исходное состояние для масс-анализа. Отметим, что по соображениям работ [4, 10], где наблюдавшиеся эмиссионные картины сравнивались с данными машинного моделирования, наиболее вероятным оказывается, что атомы компонент изображаются (с помощью ионов азота) селективно и что светлыми точками на экране предстают скорее всего атомы иттрия. Следующими по вероятности участия в отображаемых картинах являются, по-видимому, атомы меди. Полосчатый контраст большей части эмиссионных изображений связан со слоистой структурой кристаллов  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . После выбора исходной поверхности (например, типа рис. 1, б) изображающий газ откачивался, микроканальный детектор использовался теперь как приемник ионов материала острия. Ионы образовывались при полевым испарением после воздействия короткого (10 нс) импульса напряжения амплитудой  $\Delta V = 1000$  В, который складывался с базовым постоянным напряжением  $V$ .  $V$  можно было изменять в широких пределах (в данной работе от 3000 до 10000 вольт). Импульсы ионного тока регистрировались с помощью микроканального детектора и ФЭУ на экране запоминающего осциллографа. По мере прибытия на детектор разных групп ионов возникала осциллограмма ступенчатой формы (из-за послесвечения экрана), которая фотографировалась. В процессе экспериментов наблюдалось множество осциллограмм, фотографировались не все из них. Прибор работал теперь в режиме широкоугольного атомного зонда умеренного разрешения (около 25). По 58 зафиксированным осциллограммам после пересчета времен пролета ионов, измеренных при разных напряжениях, к единому напряжению ( $V + \Delta V$ ) 10000 В была построена гистограмма рис. 2.

На гистограмме представлено распределение количества событий по различным временам пролета  $t$ . Шаг гистограммы  $\Delta t = 20$  нс. Под событием понимается появление на осциллограмме ступени в каком-либо интервале ( $t, t + \Delta t$ ). Высота ступени, как-то коррелирующая с количеством ионов в соответствующей группе, во внимание не принималась. Таким образом, количество событий отвечает частоте появления ионов данного типа при однократных импульсных испарениях, но не отражает точно состав образца (для этого требуется более совершенный атомный зонд). Обычно осциллограмма содержала немного ступеней (2-4), из чего можно заключить, что каждый импульс испарял малую долю моноатомного слоя. По мере испарения острие затуплялось, и требовалось посте-

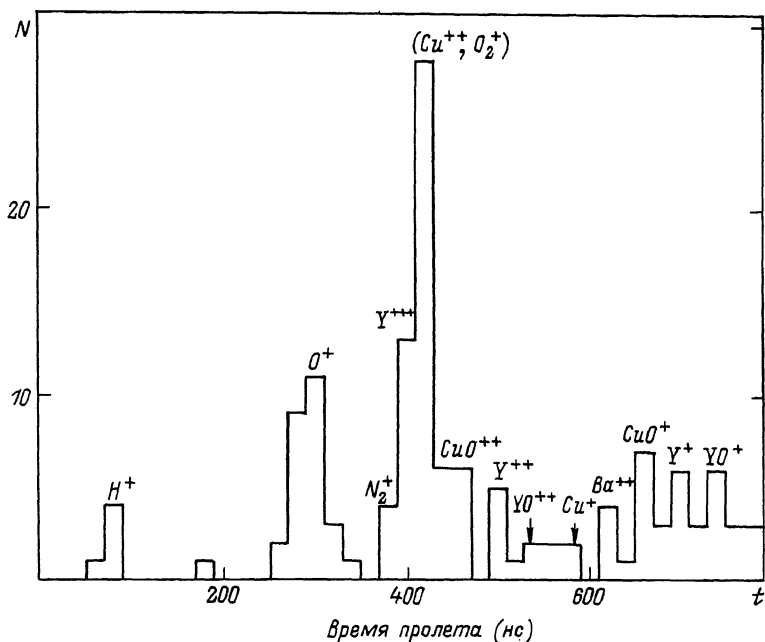


Рис. 2. Распределение количества событий ( $N$ ) по времени пролета ( $t$ ). Событие – появление какого-либо определенного вида ионов (регистрируемое по осциллограмме) при воздействии однократного испаряющего импульса. Времена пролета при общем ускоряющем напряжении  $V + \Delta V$  от 4000 до 11000 В пересчитаны на единое напряжение 10000 В. Гистограмма построена на основе обработки 58 осциллограмм. Единичному событию соответствует неидентифицированный прямоугольник вблизи  $t = 200$  (нс).

пенное повышение базового напряжения  $V$ . Идентификация пиков на гистограмме рис. 2 определялась по времени пролета ионов. Кроме того, гистограмма сравнивалась со спектром, полученным в широкоугольном атомном зонде с использованием в качестве объекта керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  [1]. Ионы из наиболее высоких пиков ( $O_2^+$ ,  $Cu^{++}$ ) и  $O^+$  на гистограмме рис. 2 обнаруживались с самого начала полевого испарения и в начале серии опытов при самом низком базовом  $V$  (от 3000 до 4500 В). Большое разнообразие групп ионов, в том числе с большими временами пролета проявилось при повышении  $V$  (до 5500–10000 В). Это может соответствовать меньшему порогу полевого испарения для более легких ионов. Менее вероятно изменение состава приповерхностных областей при переносе объекта после предварительных опытов. В целом гистограмма рис. 2 отражает набор ионов, типичный для полевого испарения оксидных иттриево-бариево-медных керамик, как это следует из известных работ [1, 3, 8, 9]. Относительная

встречаемость ионов в спектрах из цитированных работ и на гистограмме рис. 2 примерно коррелирует (за исключением иона  $\text{Ba}^{++}$ ), из чего следует, что амплитуды пиков тока групп ионов (высоты ступеней на осциллограммах) в среднем не сильно отличались друг от друга, а выборка 58 осциллограмм из многих не сильно отличалась от случайной. Из гистограммы следует общее соответствие химического состава поверхности после скола и некоторого полевого испарения составу в объеме монокристалла. В частности, из гистограммы также следует, что иттрий и медь, атомы которых с наибольшей вероятностью наблюдаются на ионных эмиссионных изображениях, в изобилии присутствуют в приповерхностной области.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] K e l l o g g G.L. and B r e n n e r S.S. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. No. 22. P. 1851-1853.
- [2] M e l m e d A.J., S h u l l R.D., C h i a n g C.K., F o w l e r H.A. // Sciens. 1988. V. 239. P. 176-178.
- [3] C e r e z o A., G r o v e n o r C.R.M., H o y l e R.M., S m i t h G.D.W. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 52. No 12. P. 1020-1022.
- [4] М е с я ц Г.А., С ю т к и н Н.Н., И в ч е н к о В.А., Т а л а н ц е в Е.Ф. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 16. С. 1504-1507.
- [5] M i l l e r M.K., M e l m e d A.J., and M o r e K.L. // J. de Physique. 1988. Т. 49. Coll. C6. suppl. 11. C 6-447 - C 6-452.
- [6] E r n s t N., B o z d e c h G. and M e l m e d A.J. // J. de Physique. 1988. Т. 49. Coll. C6. suppl. 11. C6-453 - C6-458.
- [7] M e l m e d A.J., S h u l l R.D. and C h i a n g C.K. // J. de Physique. 1988. Т. 49. Coll. C6. suppl. 11. C6-459 - C6-464.
- [8] K e l l o g g G.L. and B r e n n e r S.S. // J. de Physique. 1988. Т. 49. Coll. C6. suppl. 11. C6-465 - C6-470.
- [9] Z a h a r c h u k G., A l v e n s l e b e n L.V., O e h r i n g M. and H a a s e n P. // J. de Physique. 1988. Т. 49. Coll. C6. suppl. 11. C6-471 - C6-476.
- [10] M e s y a t s G.A., S y u t k i n N.N., I v c h e n k o V.A. and T a l a n t s e v E.F. // J. de Physique. 1988. Т. 49. Coll. C6. suppl. 11. C6-477 - C6-481.
- [11] P a n i t z J.A. // Rev. Sci. Instrum. 1973. V. 44. N 8. P. 1034-1038.

[12] Б е р н а ц к и й Д.П., В л а с о в Ю.А., П а в л о в В.Г. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 13. С. 806-808.

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

Поступило в Редакцию  
19 июня 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 16 26 августа 1989 г.  
08; 09

## РОЛЬ КОГЕРЕНТНЫХ ВОЛН В ОБРАЗНОМ ВОСПРИЯТИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВНУТРИКЛЕТОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

М.Б. Г о л а н т, П.В. П о р у ч и к о в

В работах [1, 2] была показана возможная роль генерируемых клетками когерентных акусто-электрических волн (приблизительно в миллион раз более коротких, чем электромагнитные) как высокоинформативного средства получения данных о процессах, связанных с нарушениями нормального функционирования этих клеток.

Однако скорость и объем обрабатываемой информации в значительной мере зависят от способа ее восприятия и обработки. С этой точки зрения, как известно, наиболее эффективными являются образное восприятие и обработка информации в сложных организмах. Для иллюстрации этого положения обычно приводят восприятие зрительного образа. Например, глаза человека имеют около 250 миллионов приемников, которые одновременно воспринимают различные элементы наблюдаемого объекта, фиксируя в мозгу образ, подобный образу этого объекта [3], что создает исключительные удобства для мысленного манипулирования с образом как единым целым и приводит к огромной экономии затрат как памяти, так и средств обработки, необходимых для манипулирования. Результат обработки информации реализуется затем в действиях, осуществляемых на уровне органов (рук, ног, мышц и т. п.). Однако мозг человека, включающий всего около  $10^9$ - $10^{10}$  клеток, не может осуществить моделирование процессов, совершающихся в организме на клеточном уровне, т. к. число клеток в организме составляет  $10^{14}$ - $10^{15}$ . Поэтому управление процессами на клеточном уровне может осуществляться, в первую очередь, системами самих клеток. И на сегодняшний день сохраняют значение представления Р. Вихрова о том, что любая патология связана с патологией клетки.

Естественно возникает вопрос, а являются ли образными восприятие и обработка информации о нарушениях, осуществляемые в клетках с помощью когерентных волн КВЧ диапазона частот? Стрессовая реакция организма в целом (неспецифический ответ организма на изменение режима существования) с точки зрения фаз приспособления к изменениям подобна реакциям клетки на неблагоприят-