

## РАСЧЕТ ПРОФИЛЕЙ ВНЕДРЕНИЯ И ПЕРВИЧНО СМЕЩЕННЫХ АТОМОВ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ИОНАМИ КИСЛОРОДА

*В.Г.Володько, Н.Г.Голубева*

Разработка специальных режимов ионной имплантации с целью воздействия на параметры и стабильность характеристик высокотемпературных пленок сверхпроводников требует детального исследования процессов радиационного повреждения соответствующих соединений. При облучении подложек, состоящих из компонент с заметно отличающимися атомными номерами (какими являются пленки сверхпроводников), реальная картина дефектообразования чрезвычайно сложна, поскольку сечение взаимодействия, максимально переданная при столкновении энергия, а также распределение атомов отдачи отличаются от компоненты к компоненте очень сильно. Этот факт приводит в свою очередь к особенностям в перераспределении дефектов, влекущим за собой образование сложных комплексов и неоднозначность радиационного отжига, ответственного за возникновение и характерные параметры зон разупорядочения. Чтобы избежать трудоемкости прямого эксперимента, можно спрогнозировать поведение материала сверхпроводника, подвергнувшегося облучению, прибегнув к ЭВМ эксперименту. Метод статистических испытаний или метод Монте-Карло целесообразно применять в трех случаях, когда требуется получить картину распределения вбитых ионов и радиационных дефектов в многокомпонентных мишенях с заметно отличающимися атомными порядковыми номерами компонент, поскольку в этой ситуации правило аддитивности величин обратных пробегов нарушается. В данной работе в рамках модели бинарных столкновений без учета кристаллической решетки методом Монте-Карло проведен расчет распределения энергии, передаваемой первично выбитым атомам, а также профилей распределения их по глубине мишени и ионов кислорода для случая облучения соединений  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+\delta}$ ,  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ,  $\text{Bi}_2\text{Pb}_{0.6}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$  ионами кислорода с энергией 50 кэВ. Оба составляющие энергетических потерь движущегося иона при взаимодействии с атомами мишени — ядерное и электронное торможение учитывались по теории Линдхарда [1]. Количество испытаний равнялось 2000. Пороговая энергия смещения бралась 20 эВ и была одинаковой для всех компонент соединений.

На рис. 1 приведены распределения первично выбитых атомов всех четырех компонент соединения  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+\delta}$  по глубине мишени, разделенной на слои одинаковой толщины (100 Å). Распределения построены для целого ряда значений начальной энергии выбитых атомов в виде отношения  $N/N_{\max}$ , где  $N$  — количество частиц в каждом слое (100 Å), получивших энергию из данного энергетического интервала, для которого строится распределение, а  $N_{\max}$  — максимальное количество частиц в каком-то слое, обладающих энергией из этого же энергетического интервала. Величина энергетического интервала составляет 100 эВ. Таким

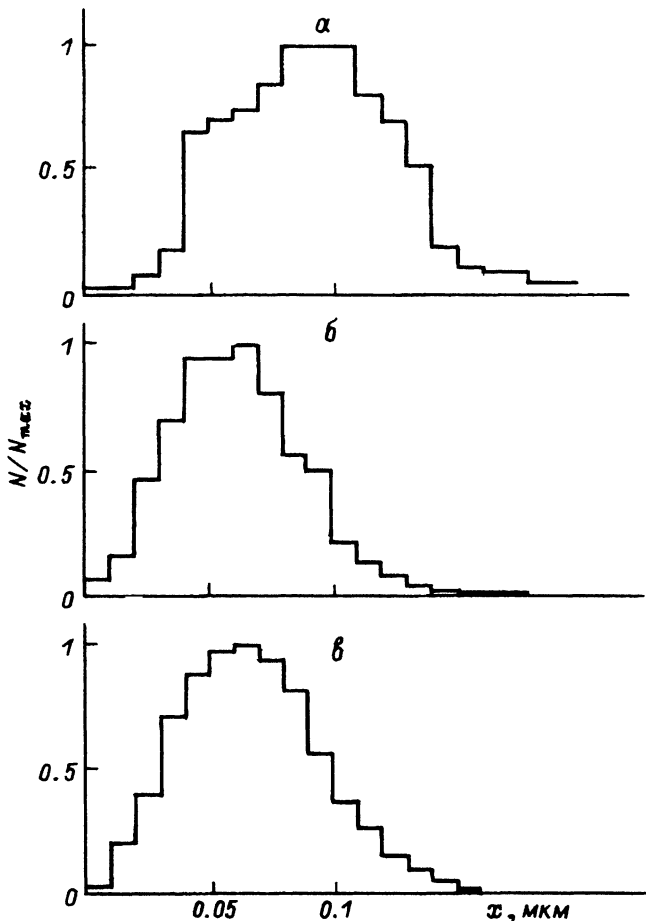


Рис. 1. Распределение энергии ПВА по слоям соединения  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+\delta}$ .

образом, когда говорится об энергии атомов, подразумевается значение энергии, приходящееся на интервал в 100 эВ от предыдущего значения до указываемого. На рис. 1 значения энергии проставлены над кривыми распределения. а каждая компонента соединения  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+\delta}$  имеет свое обозначение (верхний правый угол рисунка). Числа, помещенные в конце профилей распределения выбитых атомов в данном энергетическом интервале, обозначают  $N_{\text{max}}$  для каждой компоненты соединения. Ось абсцисс, общая для всего набора зависимостей, представляет глубину мишени, а на оси ординат  $N/N_{\text{max}}$  является общим обозначением.

Показанное на рис. 1 "послойное" торможение выбитых атомов позволяет судить о распределении энергии по глубине мишени или об энергетическом спектре, который в свою очередь хорошо отражает различное поведение компонент сложной мишени при возникновении зон разупорядочения, открывающих предысторию вторичного дефектообразования, ответственного в конечном счете за изменение критических параметров высокотемпературных пленок сверхпроводника. Действительно, как видно из рис. 1, для всех компонент соединения  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+\delta}$  низ-

кие и средние энергии (100–500 эВ) выделяются на участке 200–600 Å и имеют протяженную область значений энергий, близких к максимальному. С увеличением энергии эта область сужается, нет плавного спада в значениях энергии по слоям, в торможении все значительнее отводится роль многочисленным единичным столкновениям и различие в поведении компонент становится выраженнее. Так, для тяжелых компонент Y и Ba передача высокой энергии при столкновении происходит в слоях, расположенных вблизи поверхности (300–500 Å), в то время как для легких компонент имеются протяженные “хвосты” (особенно в области энергии 900 эВ). Переход к картине, характерной для единичных столкновений с передачей высокой энергии, выявляет ситуации, когда на 2000 независимых испытаний мы получаем 1 или 2 частицы ПВА с энергией для интервала в 100 эВ на промежутке значений энергии от 3 кэВ до максимального значения. Из таблицы видно, что количество атомов с энергией 3 кэВ для всех компонент соединений  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  и  $\text{Bi}_2\text{Pb}_{0.6}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$  составляет всего только доли процента от общего числа. Таким образом, большая их часть имеет невысокую стартовую энергию, и поэтому можно предположить, что дефекты от каскадов будут располагаться плотно по треку частицы, образуя области скопления.

На рис. 2 показаны гистограммы распределения по глубине мишени выбитых атомов иттрия, бария, меди и кислорода, образующихся при облучении сверхпроводящего соединения  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+\delta}$  ионами O с энергией 50 кэВ. Распределения выражены в отн. ед.  $N/N_{\text{max}}$  (где  $N$  — количество атомов на данном отрезке глубины, а  $N_{\text{max}}$  — максимальное количество, приходящееся на какую-то глубину). Чтобы перейти от качественной картины к количественной на рис. 2, через обозначение max приводится максимальное количество первично выбитых атомов для каждой из компонент соединения. Из рис. 2 видно, что положение максимумов для всех компонент приходится где-то на промежуток от 400 до 600 Å, что как раз совпадает с глубинами, на которых выделяются энергии до 500 эВ, не сильно отличающиеся от максимального значения (рис.1). Пики максимумов в распределении выбитых атомов выражены нерезко, они “широкие”, как и в энергетическом спектре. Распределения

Количество первично выбитых атомов с энергией 3 кэВ при облучении пленок сверхпроводников ионами кислорода с энергией 50 кэВ.

Компоненты соединения	2	3	4	Компоненты соединения	6	7
$\text{Bi}_2$	0.132	0.32	30	$\text{Bi}_2$	0.1	19
$\text{Sr}_2$	0.132	0.32	33	$\text{Pb}_{0.6}$	0.03	14
Ca	0.066	0.4	24	$\text{Sr}_2$	0.1	22
$\text{Cu}_2$	0.132	0.31	17	$\text{Ca}_2$	0.1	34
$\text{O}_{8+\delta}$	0.538	0.9	500	$\text{Cu}_3$	0.15	28
				$\text{O}_{10+\delta}$	0.52	500

Примечание. 2,6 — вероятность столкновения кислорода с данной компонентой; 3 — отношение ПВА с энергией 3 кэВ к общему числу ПВА в %; 4,7 — количество ПВА с энергией 3 кэВ.

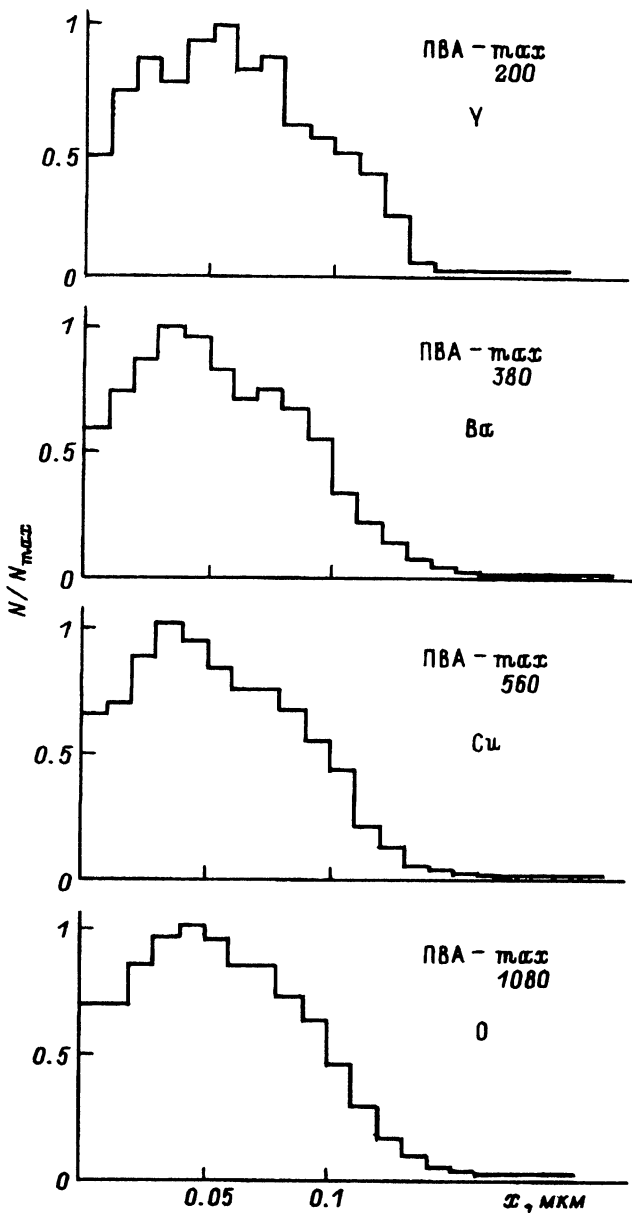


Рис. 2. Гистограммы распределения ПВА по глубине мишени  $YBa_2Cu_3O_{7+\delta}$ .

имеют плавный вид вблизи поверхности, наблюдается незначительное смещение максимумов Ba и Cu компонент к поверхности. Кислородная компонента практически не имеет максимума, в этом случае можно говорить о некоторой области, близкой к максимальным значениям. Значительное преобладание кислородной компоненты в области скопления выбитых атомов вызвано тем, что наибольшее число смещений приходится на кислородную подсистему, так как она имеет наибольшую атомную плот-

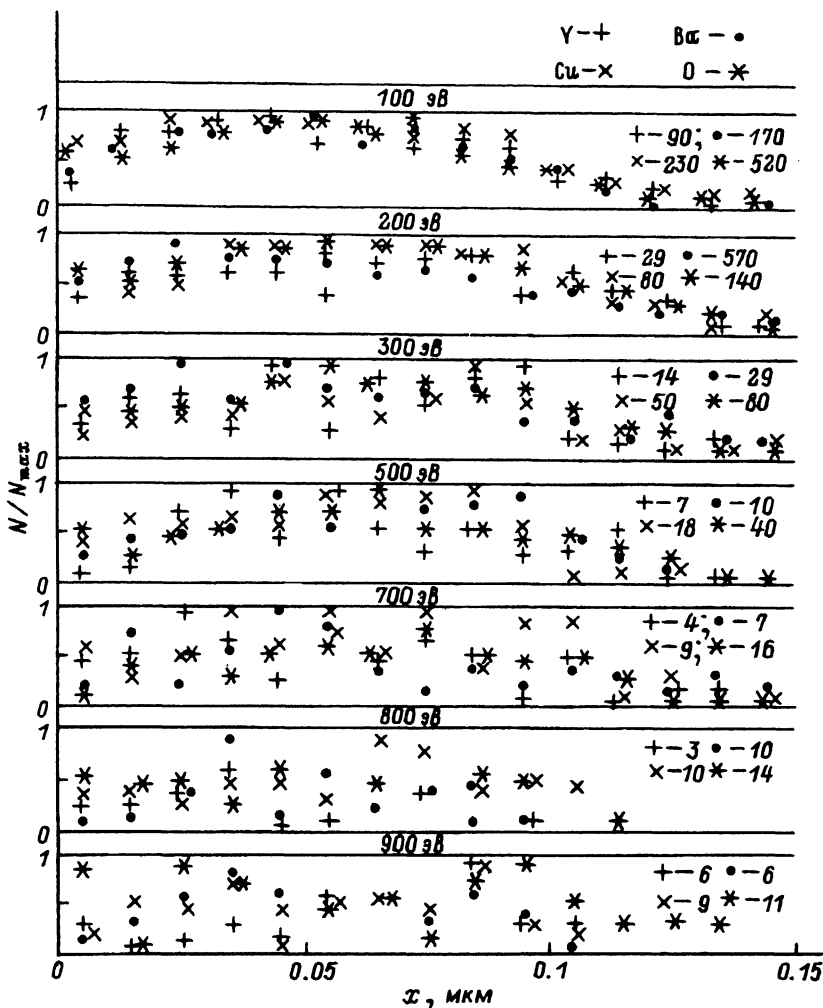


Рис. 3. Профили распределения ионов O с начальной энергией 50 кэВ в пленках  $YBa_2Cu_3O_{7+\delta}$  (а),  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$  (б),  $Bi_2Pb_{0.6}Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$  (в).  $R_p$ , мкм: а — 0.1, б — 0.066, в — 0.072;  $N_{max}$  = 250 (а), 310 (б), 270 (в).

ность в соединении  $YBa_2Cu_3O_{7+\delta}$ , а также и потому, что в рассматриваемом случае облучения ионами O кинетический коэффициент в формуле расчета передаваемой при столкновении энергии равен единице. Присутствие в профилях выбитых атомов протяженных "хвостов" с низкой концентрацией дефектов согласуется с энергетическим спектром, отражающим картину единичных столкновений с передачей высокой энергии. Особенности, присущие распределениям выбитых атомов в  $YBa_2Cu_3O_{7+\delta}$ , сохраняется и для соединений  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ ,  $Bi_2Pb_{0.6}Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ .

На рис. 3 приведены профили распределения ионов кислорода с начальной энергией 50 кэВ в  $YBa_2Cu_3O_{7+\delta}$ ,  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ ,  $Bi_2Pb_{0.6}Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ . Профили построены в относительных единицах  $N/N_{max}$ , где  $N$  — количество ионов O на данном отрезке глубины,

а  $N_{\max}$  — максимальное количество ионов O (значения указаны на рисунке) на какой-то глубине. Из сравнения гистограмм распределения примеси по глубине подложки с гистограммами распределения дефектов (ПВА) следует, что примесь находится полностью в зоне радиационных нарушений. Величина среднего проецированного пробега  $R_p$  ионов O с  $E = 50$  кэВ в  $YBa_2Cu_3O_{7+\delta}$  составляет 0.1 мкм, в  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$  — 0.066 мкм и в  $Bi_2Pb_{0.6}Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$  — 0.072 мкм.

Имеющиеся представления о механизме переноса заряда указывают на то, что наибольшее число смещений в подрешетке кислорода при бомбардировке может быть одной из основных причин деградации критических параметров и потери сверхпроводимости в высокотемпературных пленках сверхпроводников.

### Список литературы

[1] Lindhard J. // Matematisk fysiske. Medd Dan Vid. Selsk. 1965. Vol. 34. N 14. P. 1–135.

Нижегородский университет  
им. Н.И.Лобачевского  
НИФТИ

Поступило в Редакцию  
12 января 1993 г.  
В окончательной редакции  
6 мая 1993 г.

12  
© 1993 г.

Журнал теоретической физики, т. 63, в. 11, 1993

## ОБ ЭФФЕКТЕ ГУБЕРА

*Н.Н.Синельников*

Уже более тридцати лет прошло после открытия Ж.Губером [1] эффекта, однако немногие знают о его существовании и до сих пор нет единого мнения о механизме эффекта Губера.

Эффект заключается в следующем: если через металлические колесо и опору пропустить электрический ток (переменный или постоянный) и придать колесу начальную скорость, то возникнет сила, действующая на колесо в направлении движения. Простейшей системой, в которой возникает эффект Губера, является колесная пара на рельсах (рис. 1) (ток при этом подводится к рельсам). О силе эффекта говорит тот факт, что сам Губер использовал его для передвижения железнодорожных вагонов при сортировке и сцепке.

Позднее был предложен двигатель, состоящий из одного шарикоподшипника, где ток подводится к внешней и внутренней обоймам [2] (рис. 2), а затем двигатель из двух подшипников качения на одной оси, где ток подводится к внешним обоймам (1967 г., Р. Мильрой) [3] (рис. 3).

Сам Губер считал, что эффект вызывается электромагнитными силами. Однако более подробное рассмотрение исключает такую возможность. Эффект не зависит от направления движения, от места подключения источника тока и направления тока. Ни одна из электромагнитных сил не может вызвать такой эффект. Авторы [2] объясняли работу своего двигателя деформациями, возникающими при нагреве элементов