

05;12

Прямое подтверждение существования кулоновского механизма смещения атомов в треках тяжелых ионов в диэлектрике

© В.К. Ляпидевский, М.И. Рязанов

Московский инженерно-физический институт

Поступило в Редакцию 11 октября 1996 г.

В окончательной редакции 10 апреля 1997 г.

Показано, что результаты двух независимых экспериментов подтверждают существование кулоновского механизма смещения атомов в треках тяжелых ионов в диэлектриках.

1. Как известно, в треках тяжелых ионов возникают смещения атомов. Для объяснения этого эффекта предлагались различные механизмы [1–2], в том числе кулоновское отталкивание образовавшихся в веществе ионов.

Однако прямых экспериментальных доказательств существования того или другого механизма ранее не было. Ниже показано, что смещение атомов в треках из-за кулоновского отталкивания образовавшихся в треке ионов непосредственно подтверждается экспериментами по влиянию примесных атомов на свойства трека.

2. Хорошо известно, что смещения атомов в треках не возникают в проводящих средах, а возникают в диэлектриках. Поэтому можно считать, что смещения атомов в треке связаны с локальными нарушениями в нем электронейтральности в течение некоторого времени. В проводниках локальные нарушения электронейтральности сразу погашаются электронами проводимости. Время жизни локальных нарушений электронейтральности в диэлектриках определяется последовательными перескоками электронов при захвате ионами наиболее слабо связанных атомных электронов. Валентный электрон ближайшего к иону атома находится в суммарном "двухямном" потенциале $U(\mathbf{r})$ своего атома $U'(\mathbf{r} - \mathbf{R})$ и иона $U''(\mathbf{r})$ (ион в начале координат, ядро атома в точке \mathbf{R}).

Разделяющий эти две ямы потенциальный барьер минимален в точке $r = b$ на прямой, соединяющей эти два ядра. Значение b определяется из условия экстремума $dU(b)/dr = 0$. Грубая оценка для b получается в приближении кулоновских потенциалов (Ze — заряд иона):

$$b = R\{z^{1/2}/(1 + z^{1/2}); \quad U(b) = -(e^2/R)2(z + z^{1/2}). \quad (1)$$

Если энергия связи валентного электрона $I < |U(b)|$, то валентный электрон беспрепятственно движется между ядрами, восстановление электронейтральности происходит так же быстро, как и в проводнике, и смещение атомов не успевает произойти. Однако при $I > |U(b)|$ электрон должен просочиться через потенциальный барьер, что занимает достаточно большое время по сравнению с перемещением электронов проводимости и кулоновское отталкивание успевает сместить ионы. Таким образом, условие существования смещений атомов в треках тяжелых ионов имеет вид $I > |U(b)|$ или $I > e^2n^{1/3}$, если использовать (1) при $Z = 1$.

3. Примесные атомы имеют другую энергию связи I' и плотность числа частиц n' . Погашение нарушений электронейтральности перескоками электронов по примесям возможно при $I' < |U(b)| \sim e^2n'^{1/3}$. Если $I > |U(b)|$, но $I' < |U(b')|$, то смещений атомов в треке не будет.

Поэтому добавление в диэлектрик примесей со слабосвязанными электронами облегчает захват атомных электронов ионами, уменьшая время жизни нарушений электронейтральности, а, следовательно, снижает число смещений атомов в треках тяжелых ионов.

Представляет интерес экспериментальная проверка действия примесей со слабосвязанными электронами на смещение атомов в треках ионов.

4. Как известно, при облучении гамма-квантами веществ, обладающих термолюминесценцией, в них образуются локализованные электроны с энергией связи порядка 1 эВ. Например, в алюмофосфатных стеклах энергия связи таких электронов 0.4 эВ [3]. Появление в диэлектрике слабосвязанных электронов также может помешать смещениям атомов в треке при достаточной концентрации локализованных электронов.

Таким образом, характер смещений атомов в треках может меняться и в результате облучения диэлектрика.

5. Смещения атомов в треке обычно регистрируются путем измерения скорости травления кислотой вдоль трека, используя зависимость

этой скорости от концентрации смещенных атомов [4]. В [5] исследовалось уменьшение числа смещенных атомов в треках ионов ксенона с энергией 1 МэВ на кулон в кристаллах окислов алюминия и трития [6]. Добавление примеси окиси церия к $Y_3Al_5O_{12}$ привело к уменьшению числа смещенных атомов в треке, прямо пропорциональному числу молекул примеси.

При облучении алюмофосфатных стекол гамма-квантами с энергией 1.25 МэВ при дозе 10^6 рад в [7] обнаружено уменьшение числа смещенных атомов в треках ионов никеля с энергией 7 МэВ на кулон. Оценка концентрации локализованных электронов по конверсионной эффективности приводит к значению порядка 10^{17} см^{-3} [8].

6. Итак, как показано выше, в двух независимых экспериментах [5,7] обнаружено, что появление состояний со слабосвязанными электронами в диэлектрике приводит к уменьшению числа смещений атомов в треках тяжелых ионов. Этот эффект может быть объяснен в рамках лишь одного из всех известных механизмов смещения атомов в треках — смещения атомов в треке из-за кулоновского отталкивания образовавшихся ионов.

Поэтому указанные измерения можно считать экспериментальным доказательством существования кулоновского механизма смещений атомов в треках тяжелых ионов.

Работа выполнена при содействии Российского фонда фундаментальных исследований (грант 95–2–06059).

Список литературы

- [1] Флейшер Р.М., Прайс Р.В., Уокер Р.М. Треки заряженных частиц в твердых телах, М., Энергоиздат, 1981.
- [2] Третьякова С.П. // Физика элементарных частиц и атомного ядра 1992. Т. 23. С. 364–429.
- [3] Бочвар И.А., Тимадова Т.И., Кеури-Маркус И.Б. и др. Метод дозиметрии ИКС. М., Атомиздат, 1977. С. 224.
- [4] Лятидевский В.К. В сб. Твердотельные трековые детекторы ядер и их применение. ОИЯИ, Дубна, 1990. С. 23.
- [5] Аверкиев В.В., Лятидевский В.К., Хохлов Н.Б. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1986. Т. 50. С. 568.
- [6] Аверкиев В.В., Валбис Я.А., Григорян А.Х. и др. В сб. Люминесцентные приемники и преобразователи ионизирующего излучения, Новосибирск, Наука, 1985. С. 30.

- [7] *Ляпидевский В.К.* В сб. Твердотельные трековые детекторы ядер и их применение. ОИЯИ, Дубна, 1992. С. 19.
- [8] *Зверев С.А., Ляпидевский В.К., Светличный М.И., Хохлов Н.Б.* // Изв. АН СССР, сер. физ. 1986. Т. 50. С. 542–546.