

УДК 621.385.833

## ЭВРИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИАЦИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ МАТЕРИАЛОВ СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

*Б. Н. Васичев*

Государственное предприятие "Научно-исследовательский институт электронной и пошлой оптики", Москва, Россия

*Рассмотрена модель электронно-стимулированной аномальной диффузии атомов примеси, связанной со спин-спиновыми взаимодействиями электронов атомов и электронов релятивистского пучка.*

Физические свойства материалов зависят от количества различных примесных атомов и несовершенств кристаллической структуры, например таких, как дислокации, точечные дефекты и их взаимодействие друг с другом [1].

Согласно теории Гранато-Люкке [2], радиационные дефекты могут служить "точками закрепления" дислокаций и причиной изменения, например, механических свойств конструкционных и других материалов.

Согласно теории автора работы [3], при облучении полупроводниковых пластин потоком релятивистских электронов с энергией не менее 0,5 МэВ можно стимулировать аномальную глубокую диффузию примеси и управлять ею.

Традиционно привыкли рассматривать вопрос электронно-стимулированной диффузии с точки зрения сильной ионизации атомов.

Потери энергии электронами пучка в основном связывают с ионизацией налетающими электронами атомов вещества. Считают, что только в этом случае могут протекать радиационно-стимулированные реакции. Однако существуют и другие скрытые от прямого наблюдения экспериментатора физические эффекты. На самом деле большую часть энергии электроны пучка расходуют на возбуждение, а не на удаление электронных оболочек атома. Эти эффекты связаны с измене-

нием траекторий связанных (в основном валентных) электронов атома, вызываемым изменением ориентации спинов этих электронов.

Налетая, атомы пучка изменяют поле решетки и поле вблизи атомов, еще больше нарушая их асимметрию. Возможны два вида воздействия налетающего электрона на электроны атома в рамках классического и привычного нам рассеяния свободного электрона на электронах атома: взаимодействие магнитных моментов электронов и взаимодействие электрических полей, т. е., в более привычной терминологии, зарядов.

Если происходит взаимодействие магнитных моментов электронов пучка и валентного электрона (время такого взаимодействия измеряется фемтосекундами), то электрон атома, получив дополнительный к имеющемуся импульс, может не только изменить орбиту, но и начинает прецессировать, что влечет за собой еще большее изменение основной траектории вокруг ядра (ядер в молекуле).

В возбужденных таким образом атомах могут образовываться новые или изменяться имеющиеся межатомные связи. Вместе с ионизацией отдельных атомов и групп эти явления приводят к радиационным дефектам, наблюдаемым в эксперименте.

Проникновение одних атомов сквозь решетку других в этом случае можно объяснить с позиций аномальной связи в молекулах таких атомов, которая имеет ярко выраженный дипольный момент. Под действием электронного "ветра" диполь разворачивается, и при новой ионизации один из атомов отделяется и движется почти вдоль направления "ветра" до новой встречи. После этого структура решетки временно восстанавливается.

Из теории нелинейной физики известно, что среди неравновесных диссипативных сред, склонных к самоорганизации — созданию структур, в природе чаще других встречаются так называемые возбудимые среды (они известны, в частности, в биологии и химии), к ним следует отнести и находящиеся в возбуждении искусственно. По сравнению с обычными волновыми средами они обладают одной принципиальной особенностью — образующие их элементы могут находиться лишь в нескольких качественно различных состояниях. Это могут быть, в частности, состояния "возбуждения" и "восстановления" — "стационарное состояние". Связь же между этими элементами (как правило, диссипативная) делает возможным переход данного элемента среды под действием возмущения, передаваемого от соседнего или внешнего элемента, из одного (начального) состояния в следующее.

Если предположить, что релаксация элемента среды от одного состояния (например, изменение ориентации спинов или соотношения связывающих и несвязывающих орбиталей, возникающих при изменении траектории связанного электрона или разрыва связи) к другому описывается простейшей из возможных моделей — уравнением первого порядка вида

$$du/dt = f(u, \alpha), \tag{1}$$

где  $f(u, \alpha)$  обычно имеет падающий участок ( $N$ -образная характеристика), то учет изотропной по пространству связи между такими элементами приведет нас к нелинейному кинетическому уравнению диффузионного типа

$$du/dt = f(u, \alpha) + D\Delta u. \tag{2}$$

Здесь коэффициент диффузии  $D$  в общем случае зависит от  $u$ . Если рассматриваемая среда описывается несколькими переменными, то  $u$  — вектор, а  $D(u)$  — матрица (компоненты вектора  $u$  — электрическое или магнитное поле и концентрации положительных и отрицательных ионов). Это уравнение получено в работе [4].

В случае, когда процессы в среде можно считать одномерными, уравнение (1) принимает вид уравнения (3)

$$du/dt = f(u, \alpha) + Dd^2u/dx^2, \tag{3}$$

где  $D$  — размерность стохастического множества (странного аттрактора) в фазовом пространстве, которая может меняться от 2 до  $m$  (при  $D \geq 2$  степень порядка в среде высока, при  $D \sim m$  в диссипативной системе реализуется режим с максимально возможной в ней степенью беспорядка;  $D = 1$  соответствует абсолютному порядку — периодической структуре).

Эта математическая модель исследовалась еще в 30-е гг. Зельдовичем и Франк-Каменецким в связи с задачей горения [5] и Колмогоровым, Петровским и Пискуновым, описавшими с помощью уравнения (2) распространение эпидемий [6] и т. д.

Автором исследовалась математическая модель [7], в которой связь элементов системы описывается системой линейных уравнений. Она наглядно иллюстрирует не только передачу внешнего возмущения на связанные элементы, но и демонстрирует усиление этого воздействия, причем усиление передается в системе по определенному закону.

Каждый из элементов в ответ на внешнее возбуждение, поданное в соответствующей фазе, способен возбудиться, после чего “замолкает”. Если же два таких элемента за счет диффузии связаны, то они могут поочередно запускать друг друга. В результате благодаря диффузионной связи двух неколебательных [8] элементов в системе возникают автоколебания.

Для образования подобной ситуации принципиальны неравновесность нелинейной среды (нелинейной она становится при облучении релятивистскими электронами) и ее диссипативность в результате развития неустойчивости ориентации спина электронов, которые нарастают при возмущении магнитного поля в некотором интервале временных масштабов; затем из-за эффекта конкуренции равновесного и неравновесного порядков динамической системы (возможного только при наличии диссипации) “выживает” эффект лишь вполне определенного состояния.

Такие изменения ориентации спина могут приводить к значительным изменениям параметров орбит электронов в атоме. Это подтверждается тем, что происходит расщепление уровней энергии и спектральных линий атома и других атомных систем в магнитном поле (эффект Зеемана).

При анализе этого процесса в качестве параметра, который показывает, когда в среде “порядок” и когда этот порядок нарушен, т. е. когда наступает “хаос”, определяющий “зону” порядка или “хаоса”, используется так называемый критерий Рэля, в данном случае пропорциональный напряженности магнитного и электрического полей пучка. Этот параметр называют управляющим, поскольку он “управляет” переводом системы из одного состояния в другое. При критических значениях параметра Рэля (математики называют их точками бифуркации) и наблюдаются переходы “порядок — хаос”.

Этот процесс описывается нелинейными уравнениями Лоренца. Они связывают между собой координаты фазового пространства: величину разориентации спина электрона, число таких электронов, температуру и управляющий параметр (параметр Рэля).

При движении организованного магнитного или электрического потока относительно среды или в среде, которую потоки пронизывают, чаще возникает турбулентный поток. При турбулентности магнитного или электрического потока маленькие вихри-возмущения, непрерывно возникающие в среде, не рассасываются (как при ламинарном течении), а постоянно нарастают, пока все движение потока не приобретет сложный, запутанный характер. В связи с этим описание этого движения чрезвычайно сложно: у турбулентного потока слишком много “степеней свободы”. Синхронно с образованием турбулентности происходит более эффективно разориентация спинов у электронов атомов, что также приводит к долговременной релаксации свойств конденсированных систем.

В этом состоянии возбужденная система атомов отличается от первоначального своими физическими свойствами, т. е. наблюдаются более серьезные изменения физических свойств конденсированных сред, так как амплитуды колебаний орбит электронов, а следовательно, и атомов в молекулах достигают больших величин [9].

Действие магнитного поля пучка на стационарные системы через переориентацию спинов электронов приводит лишь к деформации так называемой трехмерной сетки из молекул, соединенных в этом случае растянутыми, изогнутыми и частично разорванными, например водородными, или другими связями. Система, характеризуемая статистической закономерностью межмолекулярных расстояний и ориентаций, перестраивается, нарушая установившийся порядок. Это обуславливает возможность возникновения и исчезновения долгоживущих микрорегионов, так называемых пульсирующих групп. Их появление и распад не связаны со значительными энергетическими изменениями. Известно, что энергия, необходимая для изгиба водородных связей (изменение угла между линией, соединяющей центры ближайших молекул, и направлением связи, например  $A_1-A_2$  — атом 1 и атом 2) одной из этих групп (молекул), много меньше энергии их разрыва (например, для разрыва водородной связи молекулы необходимо затратить энергию порядка 16,7—25,1 кДж/моль). Одновременная деформация угла и длины связи молекул энергетически более выгодна, чем деформация только угла или только длины связи [8].

Таким образом, изменение структуры конденсированной системы возможно при затрате энергии, намного меньшей энергии водородных и подобных им связей.

#### Л и т е р а т у р а

1. Дино Дж., Виньярд Дж. Радиационные эффекты в твердых телах. — М.: Изд-во "Иностранная литература", 1960. — 244 с.
2. Гранато А., Люкке К. Физическая акустика. — М.: Мир, 1969. Ч. А. Т. IV. — 261 с.
3. Васичев Б. Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1990. Т. 54. № 2. С. 353.
4. Hodgkin A., Huxley A. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. // J. Physiol. 1952. V. 117. P. 500—525.
5. Зельдович Б. Я., Франк-Каменецкий Д. А. // ДАН СССР, 1938. Т. 19. С. 693—697.
6. Колмогоров А. Н., Петровский И. Е., Пискунов Н. С. Исследование уравнения диффузии, соединений с возрастом количества вещества и его применение к одной биологической проблеме. — В кн.: Теория горения и взрывы. — М.: Наука, 1981. С. 213—242.
7. Васичев Б. Н. Автореф.: дис. д-ра физ.-мат. наук./ЦНИИЧМ. М., 1971.
8. Smale S. // Lect. Appl. Math., 1974. V. 6. P. 15—26.
9. Зацепина Г. Н. Свойства и структура воды. — М.: Мир, 1972. — 399 с.

## THE HEURISTIC MODEL RADIATION MODIFICATION OF MATERIALS BY HIGH VOLTADGE ELECTRON BEAM

*B. N. Vasichev*

*Analysis spin-spin interaction electrons of atoms and relativist electrons of beam have influence on beam-stimulate anomaly diffusion atoms of admixture through specimen.*