

В.В. Углов

Радиационные процессы и явления в твердых телах



В.В. Углов

Радиационные процессы и явления в твердых телах

*Допущено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов учреждений
высшего образования
по специальностям
«Ядерная физика и технологии»,
«Физика (по направлениям)»*



Минск
«Вышэйшая школа»
2016

УДК 539.1:539.21(075.8)

ББК 22.383я73

У25

Рецензенты: кафедра микро- и наноэлектроники УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (заведующий кафедрой доктор физико-математических наук, профессор *В.Е. Борисенко*); заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси *В.А. Пилипенко*.

В оформлении обложки использованы снимки, полученные автором при исследовании толерантных материалов, перспективных для реакторов IV поколения.

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

Углов, В. В.

У25 Радиационные процессы и явления в твердых телах : учеб. пособие / В. В. Углов. – Минск : Вышэйшая школа, 2016. – 188 с. : ил.

ISBN 978-985-06-2763-6.

Изложены современные представления о физике радиационно-индуцированных и радиационно-стимулированных процессов и явлений в твердых телах под воздействием высокоэнергетических частиц и излучения. Особое внимание уделено описанию физических основ первичных процессов в твердых телах и образованию в них радиационных дефектов и их скоплений. Рассмотрено практическое применение радиационных процессов и явлений при разработке материалов для реакторов.

Для студентов учреждений высшего образования по специальностям «Ядерная физика и технологии», «Физика (по направлениям)».

УДК 539.1:539.21(075.8)

ББК 22.383я73

ISBN 978-985-06-2763-6

© Углов В.В., 2016

© Оформление. УП «Издательство “Вышэйшая школа”», 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Воздействие высокоэнергетических частиц и излучения на твердые тела приводит к изменению их структурно-фазового состояния и физических свойств. В основе радиационных методов обработки лежат как первичные процессы взаимодействия заряженных частиц и излучения с твердым телом, так и процессы последующего образования в нем структурных дефектов. Эти два момента являются базисом радиационных процессов и явлений – основным инструментом радиационных технологий XXI в. В настоящее время исследования в этой области направлены в основном на проектирование (конструирование) материалов для ядерных и термоядерных реакторов деления и синтеза, а также на радиационно-стимулированную модификацию свойств материалов и создание новых структур.

Понимание физических изменений, происходящих в твердых телах под влиянием высокоэнергетических частиц и излучения, требует детального ознакомления с важнейшими радиационно-индуцированными (стимулированными) эффектами, вызываемыми облучением различного вида.

Цель данного учебного пособия – сформировать понимание теории и основных механизмов, лежащих в основе радиационных эффектов в твердых телах под воздействием излучения различного вида (нейтроны, ионы, электроны, γ -кванты).

В первой главе рассмотрены первичные процессы в твердых телах при радиационном воздействии высокоэнергетических частиц и излучений с конденсированным веществом.

Во второй главе описывается образование и эволюция дефектов и их скоплений при радиационном воздействии.

Третья глава обобщает наиболее интересные и важные радиационно-индуцированные (стимулированные) процессы и явления.

Следует отметить, что рассматриваемая область радиационной физики твердого тела довольно широка и многогранна, в связи с чем основное внимание уделено рассмотрению физической природы радиационных явлений и эффектов на атомарном уровне с учетом комплексного влияния и изменения микроструктуры, элементного и фазового состава мишеней под воздействием высокоэнергетических частиц и излучений.

При написании учебного пособия были учтены творческие дискуссии на семинарах, конференциях, совещаниях, а также общение с известными специалистами в области радиационной физики твердого тела, такими как А.Ф. Тулинов, Г.Г. Бондаренко, Л.И. Иванов, Д.И. Тетельбаум, Г.Е. Ремнев, Ю.П. Шаркеев, А.И. Рябчиков, В.В. Козловский, М.И. Гусева, Ю.В. Мартыненко, Б.А. Калинин, В.Л. Якушин, А.Е. Лигачев, В.А. Шулов, Л.И. Пранявичюс, Б. Раушенбах, Х. Риссел, И.М. Неклюдов, В.Н. Воеводин, А.Д. Погребняк, К.К. Кадыржанов, С.Б. Кислицын, А.И. Купчишин, В.М. Анищик, Ф.Ф. Комаров, Н.Т. Квасов, П.Н. Гайдук, а также с преподавателями и сотрудниками кафедры физики твердого тела Белорусского государственного университета. Автор с благодарностью вспоминает своих учителей – прекрасных специалистов в области радиационного материаловедения, принимавших активное участие в решении проблем, затронутых в данной книге, тех, кого уже, к большому сожалению, нет рядом: Г.А. Гуманского, В.П. Гольцева, И.С. Ташлыкова, П.В. Павлова, И.А. Аброяна, В.С. Соловьева, Т.Э. Туркебаева, А.К. Жетбаева.

Данная работа выполнялась в рамках проекта № 16–19–10246 «Разработка научных основ создания радиационноустойчивых нанокпозиционных материалов» Российского научного фонда.

За содействие улучшению содержания учебного пособия автор выражает искреннюю признательность рецензентам – коллективу кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (особенно заведующему кафедрой доктору физики-математических наук, профессору В.Е. Борисенко) и заместителю директора по научному развитию ГЦ «Белмикрoанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕРАЛ» доктору технических наук, профессору, члену-корреспонденту Национальной академии наук Беларуси В.А. Пилипенко.

Все отзывы, замечания и пожелания просьба направлять по адресу: издательство «Вышэйшая школа», пр. Победителей, 11, 220048, Минск.

Автор

ГЛАВА 1

ПЕРВИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ ПРИ РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

1.1. Физические основы процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом

Общие сведения

Первичные процессы в твердых телах при радиационном воздействии – это процессы, в основе которых лежит возбуждение электронной и ядерной подсистем, смещение атомов кристаллической решетки из первоначальных равновесных положений и протекание ядерных реакций (рис. 1.1). Характерное время

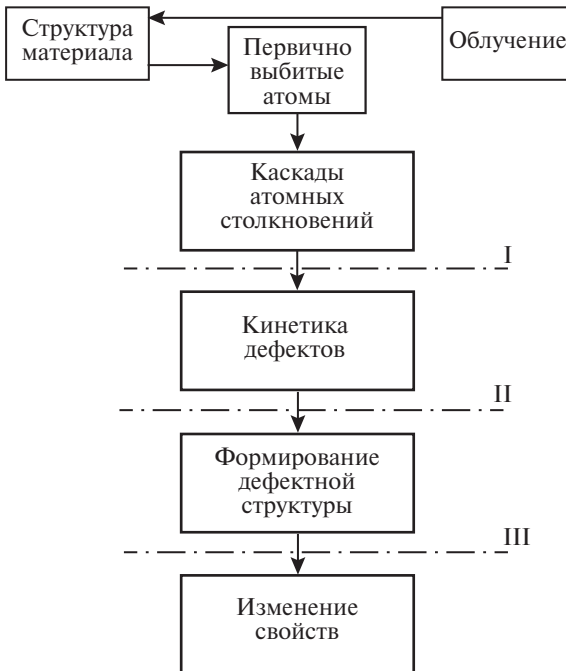


Рис. 1.1. Схема основных стадий радиационной повреждаемости материалов:
I – динамическая стадия; II – диффузионная стадия; III – стадия эволюции стоков

протекания первичных процессов составляет порядка 10^{-18} с. Конкретные закономерности при первичных процессах зависят от условий облучения и типа материала.

Под *условиями облучения* понимают:

- 1) тип, энергию и спектр бомбардирующих частиц;
- 2) плотность потока частиц;
- 3) продолжительность облучения (дозу);
- 4) температуру при облучении;
- 5) сопутствующие внешние воздействия.

Для первичных процессов в твердых телах при радиационном воздействии наиболее значимыми факторами являются тип, масса, заряд, энергия (скорость) частиц, составляющих излучение, и пространственная плотность излучения.

Флюенс

Рассмотрим моноэнергетический пучок однотипных, однородно распределенных в пространстве частиц.

Плотностью потока частиц называется число частиц, проходящих через единицу перпендикулярной к пучку площади в единицу времени ($\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ или $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

Пусть пространственная плотность частиц n , а скорость частиц v . Тогда плотность потока частиц

$$\varphi = nv.$$

Интегральным потоком Φ частиц (флюенсом) называется число частиц, прошедших через единицу перпендикулярной к пучку площади за время t (м^{-2} или см^{-2}):

$$\Phi = \varphi t.$$

В активной зоне тепловых, быстрых и термоядерных реакторов материалы подвержены облучению частицами, различающимися как по природе, так и по спектрам своего распределения, скоростям или энергиям. В этом случае в дополнение к характеристикам излучений, перечисленным выше, следует ввести распределение частиц по скоростям или энергиями:

$$n_j(E) = \frac{dn_j}{dE}, \quad \varphi_j(E) = \frac{d\varphi_j}{dE}.$$

Тогда интегральный поток частиц будет вычисляться по формуле

$$\Phi_j = \int_0^t dt \int_{E_j}^{\infty} \phi_j(E) dE,$$

где E_j – минимальная энергия налетающих частиц типа j .

Физические основы первичных процессов

Попадая в твердое тело, быстрая частица вовлекается в сложный процесс взаимодействия с электронами и ядрами атомов кристаллической решетки. По мере проникновения в глубь материала мишени частицы теряют свою энергию и, передав ее электронной и ядерной подсистемам, останавливаются.

Скорость потери энергии бомбардирующих частиц характеризуется *тормозной способностью вещества* dE/dx . Расстояние, на которое частица проникает в материал, называется *глубиной (длиной) пробега частиц* и обозначается $R(E)$.

Передача энергии бомбардирующих частиц ядрам мишени и электронам происходит в упругих и неупругих процессах их взаимодействия. Процесс *упругого взаимодействия* бомбардирующих частиц с атомами мишени аналогичен классическому упругому соударению твердых шаров. При *неупругом взаимодействии* часть энергии бомбардирующих частиц расходуется на возбуждение, ионизацию атомов мишени, орбитальный переход электронов, ядерные реакции.

При рассмотрении процессов, происходящих в облучаемом материале, требуется статистический подход, так как излучение представляет собой пучок падающих частиц, а вещество состоит из большого числа связанных определенным образом атомов. В основе такого подхода лежит вероятность протекания того или иного процесса взаимодействия. За меру плотности вероятности события при взаимодействии пучка частиц с твердым телом принято *сечение (дифференциальное, парциальное, полное) реакции*.

Эффективным сечением взаимодействия σ называется отношение числа взаимодействий в единицу времени (m) к плотности потока частиц ϕ :

$$\sigma = m/\phi.$$

Эффективное поперечное сечение имеет размерность площади и обычно выражается в барнах, $1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$ (10^{-24} см^2).

Процессы, происходящие при столкновении налетающих частиц с атомами мишени, а следовательно, и вероятность того

или иного процесса взаимодействия частиц, определяется прежде всего потенциалом взаимодействия $V(r)$.

Атомные потенциалы взаимодействия

Взаимодействие атомов вещества характеризуется соотношением двух характерных расстояний – боровского радиуса атома водорода $a_0 = 0,053$ нм и расстояния d между двумя ближайшими атомами в кристалле. Обозначим через r расстояния между сталкивающимися атомами. При $r \gg d$ электроны занимают энергетические уровни отдельных атомов, а между этими атомами нет силы притяжения. Силы притяжения возникают тогда, когда пара атомов сближается настолько, что перекрываются оболочки валентных электронов. Силы взаимодействия при этом не превышают нескольких электронвольт и их можно не учитывать при рассмотрении столкновений.

При $a_0 < r \ll d$ перекрываются внутренние оболочки атомов, а некоторые электроны оказываются в одной и той же области и занимают одинаковые энергетические уровни. При этом часть электронов должна сменить энергетический уровень. Дополнительная энергия появляется за счет работы, которую нужно затратить, чтобы сблизить атомы и обеспечить положительную энергию взаимодействия частиц.

Потенциал, описывающий взаимодействие частиц при $a_0 < r \ll d$ (потенциал Борна – Майера), имеет вид

$$V(r) = A \exp\left(-\frac{r}{b}\right),$$

где A, b – константы пары налетающая частица – ядро мишени.

При $r < a_0$ ядра становятся ближайшей парой заряженных частиц в системе и кулоновский потенциал взаимодействия преобладает над всеми другими:

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r^2},$$

где Z_1, Z_2 – порядковые номера взаимодействующих ядер (их заряд); e – заряд электрона.

С увеличением расстояния становится возможным проникновение электронов в пространство между ядрами. Потенциал взаимодействия уменьшается (по отношению к кулоновскому потенциалу взаимодействия) вследствие электростатического

экранирования ядерных зарядов пространственным зарядом самых глубоких электронных оболочек. В этом случае используется экранированный кулоновский потенциал:

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r^2} f\left(\frac{r}{a}\right), \quad (1.1)$$

где $f(r/a)$ – функция экранирования.

Экранированный кулоновский потенциал можно вычислить, используя метод Томаса – Ферми. Для представления этого потенциала не существует простой функции, но при $r < a_0$ хорошим приближением является потенциал

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r^2} \exp\left(-\frac{r}{a}\right). \quad (1.2)$$

В формулах (1.1), (1.2) a – радиус экранирования, который определяется следующим образом:

$$a = \frac{0,8853a_0}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}}.$$

Взаимодействие излучений с твердым телом сводится к трем первичным процессам:

- 1) возбуждение электронной и ядерной подсистем;
- 2) ядерные реакции;
- 3) смещение атомов из первоначальных равновесных положений.

Возбуждение электронной и ядерной подсистем играет особую роль в образовании радиационных дефектов в ионных кристаллах и полупроводниках. Металлы после подобного возбуждения без каких-либо последствий быстро возвращаются в равновесное состояние.

При ядерных реакциях в облучаемом материале образуются атомы примеси – трансмутанты – и изменяется химический состав облучаемого материала.

Смещение атомов из узлов кристаллической решетки

В основе большинства явлений радиационной повреждаемости материалов лежит смещение атомов из узлов кристаллической решетки (рис. 1.2).

При столкновении налетающая частица, испытывая упругое или неупругое взаимодействие, передает атому мишени часть

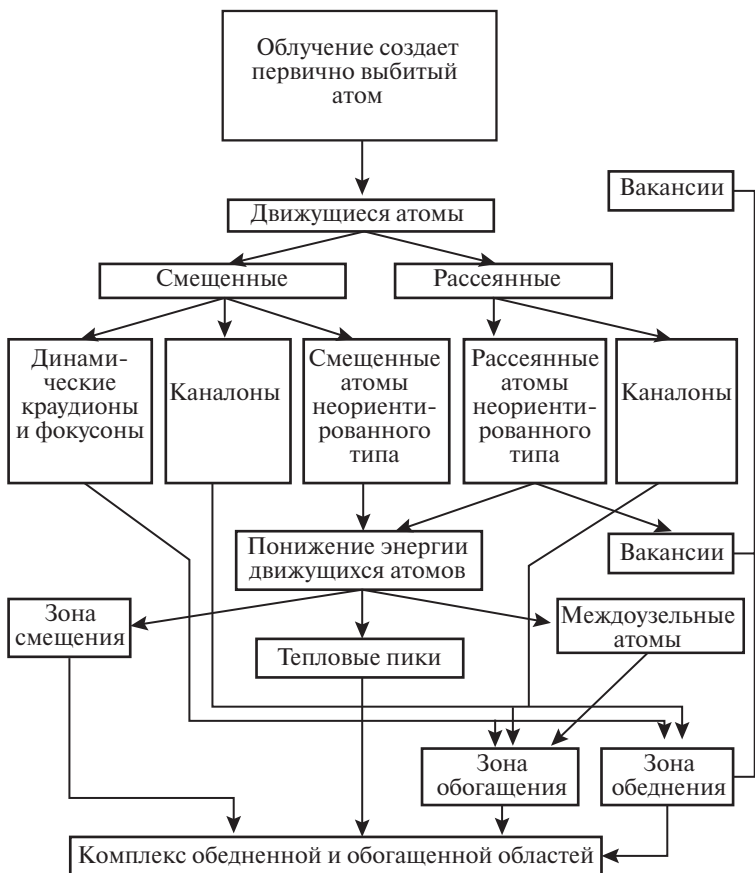


Рис. 1.2. Схема развития радиационного каскада в кристалле

энергии T_{12} . В зависимости от энергии, переданной атому при столкновении, последний либо только отклоняется от своего первоначального равновесного положения, либо смещается на большое расстояние, превышающее так называемый *радиус спонтанной рекомбинации*, и создает устойчивую пару Френкеля вакансии – междоузельный атом. Минимальное значение переданной атому мишени энергии T_{12} , при котором происходит необратимое смещение атома из первоначального положения в кристаллической решетке, принято называть *энергией смещения* и обозначать E_d . Для различных металлов и кристаллографических ориентаций E_d составляет $\approx 15 \dots 90$ эВ.

С точки зрения возникновения в материалах радиационных повреждений представляют интерес потоки частиц и излучений, передающих атомам мишени энергию T_{12} , равную или превышающую порог смещения $E_d \approx 4\epsilon_s$ (ϵ_s – энергия сублимации).

Первично выбитый атом (ПВА) – это атом, смещенный из узла кристаллической решетки при непосредственном взаимодействии с частицей излучения. Если ПВА способен передавать другому атому решетки энергию $T > E_d$, то он выбивает второй атом, который при том же условии смещает третий атом, и т.д. Таким образом высокоэнергетические частицы создают в твердых телах целые каскады атом-атомных смещений.

В табл. 1.1 приведены расчетные значения начальной энергии E_i для частиц различного сорта, необходимой для передачи атомам мишени (никель) энергии, равной пороговой (около 30 эВ) и значительно превышающей ее (50 кэВ). В первом случае образуются отдельные пары Френкеля, во втором – каскады смещений.

Таблица 1.1

Расчетные значения начальной энергии частиц E_i , при которых энергия смещенных атомов в никеле T_{12} соответствует 30 и 50 000 эВ

Тип частиц	E_i , эВ
Ион никеля	60 и 100 000
Альфа-частица	250 и 400 000
Нейтрон	860 и 1 600 000
Электрон	800 000 и 91 000 000

1.2. Характеристика степени радиационных повреждений

Для характеристики степени радиационных повреждений используют *число атомных смещений в единице объема в единицу времени*:

$$R = \frac{\text{Смещения}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}} = N \int_{\hat{E}}^{\hat{E}} \varphi(E_i) \sigma_D(E_i) dE_i,$$

где N – атомная плотность твердого тела; \hat{E} – максимальная энергия падающей частицы; \check{E} – минимальная энергия пада-

ющей частицы; φ — зависящая от энергии плотность потока частиц; σ_D — зависящее от энергии сечение образования смещений:

$$\sigma_D = \int_{\hat{T}}^{\hat{T}} \nu(T) \sigma(E_i, T) dT, \quad (1.3)$$

где \hat{T} — максимальная энергия, передаваемая атому решетки при столкновении с ним частицы с энергией E_i ; \check{T} — минимальная энергия, передаваемая атому решетки при столкновении с ним частицы с энергией E_i ; $\nu(T)$ — число смещений, приходящихся на ПВА с энергией T ; $\sigma(E_i, T)$ — поперечное сечение взаимодействия частицы с энергией E_i и атома решетки, при котором последний приобретает энергию T .

В результате имеем:

$$R = N \int_{\check{T}}^{\hat{T}} \int_{\check{E}}^{\hat{E}} \varphi(E_i) \sigma(E_i, T) \nu(T) dE_i dT. \quad (1.4)$$

В формуле (1.4) есть две основные величины: $\sigma(E_i, T)$, которая описывает передачу энергии от частицы излучения к ПВА, и $\nu(T)$, которая определяет, сколько смещений вызовет данный ПВА при дальнейшем взаимодействии.

Полное дифференциальное сечение $\frac{d\sigma}{dT}$ образования ПВА с энергией T равно сумме дифференциальных сечений в упругих $\left(\frac{d\sigma}{dT}\right)_y$ и неупругих $\left(\frac{d\sigma}{dT}\right)_н$ процессах взаимодействия потока частиц с веществом:

$$\left(\frac{d\sigma}{dT}\right) = \left(\frac{d\sigma}{dT}\right)_y + \left(\frac{d\sigma}{dT}\right)_н.$$

Потери энергии и вклад каждого из процессов взаимодействия потока частиц с веществом в создание смещенных атомов зависят от энергии, заряда и массы бомбардирующих частиц, а также от заряда и массы атомов мишени. В настоящее время принято условное деление бомбардирующих частиц: в зависимости от массы — на *легкие* ($M_1 < M_p$, где M_p — масса протона) и *тяжелые* ($M_1 > M_p$); в зависимости от заряда — на *нейтральные* и *заряженные*; в зависимости от энергии — на *медленные* ($E_i < 1$ кэВ), *промежуточные* (1 кэВ $< E_i < 100$ кэВ) и *быстрые*

($E_i > 100$ кэВ). Ядра мишени в зависимости от массы подразделяются на *легкие* ($A < 25$), *промежуточные* ($25 < A < 80$) и *тяжелые* ($A > 80$).

Таблица 1.2

Энергия образования смещений для некоторых металлов

Металл	Кристаллическая решетка	$E_{d\min}$, эВ	E_d , эВ
Алюминий	ГЦК	16	25
Титан	ГПУ	19	30
Ванадий	ОЦК	–	40
Хром		28	40
Марганец		–	40
Железо		20	40
Кобальт	ГЦК	22	40
Никель		23	40
Медь		19	30
Цирконий	ГПУ	21	40
Ниобий	ОЦК	36	60
Молибден		33	60
Тантал		34	90
Вольфрам		40	90
Свинец	ГЦК	14	25
Нержавеющая сталь		–	40

Примечание. Условные обозначения: ГЦК – гранцентрированная кубическая решетка; ГПУ – гексагональная плотноупакованная решетка; ОЦК – объемноцентрированная кубическая решетка.

Одной из ключевых величин радиационной физики является *энергия образования смещений* E_d . Это энергия, которую необходимо сообщить атому кристаллической решетки, чтобы сместить его из положения равновесия в решетке. В табл. 1.2 приведены значения энергии образования смещений для некоторых металлов.

1.3. Облучение нейтронами

Нейтроны являются электрически нейтральными частицами и поэтому взаимодействуют в основном с ядрами мишени. Сечение взаимодействия нейтронов с ядрами гораздо меньше,

чем сечение взаимодействия других частиц, имеющих заряд, поэтому нейтроны обладают большей проникающей способностью (несколько миллиметров). Взаимодействие нейтронов с ядрами может быть как упругим, так и неупругим.

Рассмотрим, как вычисляется сечение образования смещений в случае упругого рассеяния нейтронов. Для этого в формуле (1.3) необходимо знать значения величин $v(T)$ и $\sigma(E_i, T)$. Как правило, $v(T)$ рассчитывается по ТРН-стандарту (модель Торренса – Робинсона – Норретта). Рассмотрим вычисление $\sigma(E_i, T)$.

Пусть $\sigma(E_i, \varphi)$ – дифференциальное сечение упругого рассеяния нейтрона с начальной энергией E_i на угол φ . Рассматривая упругое рассеяние нейтрона, можно пользоваться хорошо известной моделью соударения твердых шаров. Можно показать, что

$$\sigma(E_i, T) = \frac{4\pi}{\gamma E_i} \sigma(E_i, \varphi),$$

где $\gamma = \frac{4A}{(1+A)^2}$; A – массовое число атома решетки.

Для большинства атомных ядер в широком интервале энергий нейтронов (0,02...15,0 МэВ) формулу для дифференциального сечения передачи энергии можно записать так:

$$\sigma(E_i, T) = \frac{\sigma(E_i)}{\gamma E_i},$$

где $\sigma(E_i)$ – полное сечение упругого рассеяния нейтронов с энергией E_i , которое можно вычислить на основании модели упругого столкновения шаров.

Для вычисления $v(T)$ по ТРН-стандарту необходимо знать кинетическую энергию, передаваемую ПВА от нейтрона. Используя модель упругого столкновения твердых шаров, можно получить кинетическую энергию атома отдачи при рассеянии на угол φ :

$$T = \frac{\gamma}{2} E_i (1 - \cos \varphi). \quad (1.5)$$

Интерес представляет также средняя кинетическая энергия, которую приобретает атом при взаимодействии с нейтроном. Она вычисляется по формуле

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Список основных сокращений и обозначений	5
ГЛАВА 1. ПЕРВИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ ПРИ РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	7
1.1. Физические основы процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом	7
Общие сведения	7
Флюенс	8
Физические основы первичных процессов	9
Атомные потенциалы взаимодействия	10
Смещение атомов из узлов кристаллической решетки	11
1.2. Характеристика степени радиационных повреждений	13
1.3. Облучение нейтронами	15
1.4. Облучение ионами	17
1.5. Облучение электронами	21
1.6. Облучение γ -квантами	23
ГЛАВА 2. ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ И ИХ СКОПЛЕНИЙ ПРИ РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	25
2.1. Простейшие типы повреждений и их эволюция	25
Общие сведения	25
Простейшая модель расчета $\nu(T)$	27
Модель Кинчина – Пизе	28
Модификация модели Кинчина – Пизе (нарушение условия 3)	29
Модификация модели Кинчина – Пизе (нарушение условия 5)	30
Модель Линдхарда	30
ТРН-стандарт	31
2.2. Фокусировка и каналирование пучков частиц в кристалле	32
2.3. Особенности каскада столкновений при облучении различного типа	37
2.4. Кластеры	41
2.5. Взаимодействие дефектов	45

Общие сведения	45
Отжиг радиационных дефектов	46
Зарождение и рост дислокационных петель	48

ГЛАВА 3. РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ И РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

3.1. Диффузия и перераспределение атомов	51
Механизмы диффузии	51
Радиационно-стимулированная диффузия	53
Особенности диффузии в поликристаллах	55
3.2. Сегрегация, рафинирование и геттерирование примесей, очистка от них материалов	56
Сегрегация	56
Механизмы сегрегации	56
Простейший пример сегрегации	58
Влияние стоков на сегрегацию	60
Сегрегация в аустенитных и ферритных сталях	61
Рафинирование	66
Геттерирование примесей	69
3.3. Фазовые превращения	70
Общие сведения	70
Аустенитные стали	73
Ферритные стали	75
Механизмы эволюции выделений вторых фаз	77
3.4. Распухание и порообразование	78
Общие сведения	78
Распухание в уране	80
Распухание в металлах и сплавах	83
Зависимость распухания от температуры облучения	84
Зависимость распухания от дозы	86
Зависимость распухания от скорости повреждения	88
Влияние структуры первичных радиационных повреждений на распухание материалов	89
Влияние кристаллического строения металлов на порообразование	90
Роль дислокационной структуры в порообразовании	90
Влияние двумерных протяженных дефектов на порообразование в материалах	92
Влияние напряжений на распухание материалов	92

Роль нестационарных полей температуры и радиации в развитии пористости	94
Влияние газов на порообразование в материалах	95
Форма и упорядочение пор	97
Способы уменьшения распухания	98
3.5. Радиационный рост	99
3.6. Блистеринг и флекинг	114
Общие сведения	114
Природа образования блистеров	115
Основные закономерности радиационного блистеринга	118
3.7. Распыление поверхности материалов при ионном облучении	120
Общие сведения	120
Физическое распыление	121
Химическое распыление	125
3.8. Трекообразование	125
Механизмы трекообразования	125
Металлы	127
Полупроводники	130
3.9. Дальнодействие	132
Общие сведения	132
Эффект дальнодействия в металлах	132
Механизмы дальнодействия	134
3.10. Напряжения и деформация	137
Статические и динамические напряжения	137
Остаточные напряжения	139
3.11. Радиационное упрочнение и охрупчивание	144
Общие сведения	144
Влияние флюенса и типа бомбардирующих частиц на степень радиационного упрочнения	145
Влияние энергии бомбардирующих частиц на степень упрочнения металлов	147
Влияние температуры облучения на степень упрочнения металлов	148
Низкотемпературное радиационное охрупчивание	150
Высокотемпературное радиационное охрупчивание	151
Механизмы ВТРО	151
Зависимость ВТРО от условий облучения	153
Способы уменьшения ВТРО	155
3.12. Радиационная ползучесть	156

3.13. Электролизация	161
3.14. Трансмутация	163
Приложение. Значения некоторых величин, характеризующих радиационные эффекты в твердых телах	169
Литература	183

Учебное издание

Углов Владимир Васильевич

**РАДИАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ
В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ**

Учебное пособие

Редактор *Е.В. Малышева*
Художественный редактор *Т.В. Шабунько*
Технический редактор *А.Н. Бабенкова*
Корректор *Т.К. Хваль*
Компьютерная верстка *А.Н. Бабенковой*

Подписано в печать 12.08.2016. Формат 84×108/32. Бумага офсетная.
Гарнитура «NewtonС». Офсетная печать. Усл. печ. л. 10,08.
Уч.-изд. л. 10,7. Тираж 300 экз. Заказ 2009.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Вышэйшая школа”».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013.
Пр. Победителей, 11, 220048, Минск.
e-mail: market@vshph.com <http://vshph.com>

Открытое акционерное общество «Типография “Победа”».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/38 от 29.01.2014.
Ул. Тавлая, 11, 222310, Молодечно.