



Лекция 9. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

Дисциплина: Радиационные эффекты и современная спектроскопия твердого тела.

Преподаватель: Phd, и.о. доцента Мархабаева А.А.



Цель лекции: Изучить физические механизмы взаимодействия ионизирующих излучений с атомами и кристаллической решёткой твёрдых тел, процессы образования радиационных дефектов и каскадов смещений, а также рассмотреть влияние типа облучающих частиц, их энергии и температуры на структуру и свойства материалов.

Основные вопросы лекции

- Первичные и вторичные стадии радиационного дефектообразования.
- Упругие и неупругие взаимодействия частиц с атомами решётки.
- Пороговая энергия смещения E_{di} условия образования первично выбитых атомов (ПВА).
- Процесс каскада смещений и каскадная функция.
- Модель Кинчина–Пиза для оценки числа смещений.
- Формирование обеднённых зон и дислокационных петель.
- Влияние типа излучения (электроны, ионы, нейтроны, γ -кванты) на спектр энергий отдачи.
- Понятие dpa (displacements per atom) и оценка радиационных повреждений.
- Трансмутационные превращения и их роль при нейтронном облучении.
- Температурная зависимость миграции и аннигиляции радиационных дефектов.



Первичные сведения об образовании радиационных дефектов

В условиях эксплуатации современные материалы могут подвергаться воздействию на них электронов, легких и тяжелых ионов, нейтронов, - излучения и т.п. Таковыми являются материалы конструкционных элементов ядерных реакторов, мощных ускорителей, космических аппаратов. Облучение ядерными частицами для материалов не проходит бесследно. При достаточной энергии этих частиц, столкновение их с атомами материала ведет к образованию радиационных дефектов. Постепенно накапливаясь, они меняют свойства материалов. Этот процесс имеет свою специфику и не может быть повторен другим способом. Образование радиационных дефектов в металлах обычно разделяют на две стадии – первичную и вторичную. К первичной относят акты смещения атомов из нормальных положений в узле решетки.



Процесс ионизации в металле быстро нейтрализуется, а в случае ядерной реакции может образоваться новое ядро с выделением какой – либо частицы. При упругом взаимодействии ядру атома матрицы (следовательно, атому в целом) передается определенная кинетическая энергия E_0^l . Если ее величина достаточна, т.е. больше, чем энергия связи атомов в решетке, то он выталкивается из своего места из узла кристаллической решетки и смещается в направлении переданного импульса. Каждый металл характеризуется своим набором, так называемых пороговых значений энергий - $E_d(hkl)$. Если полученная атомом от бомбардирующей частицы энергия E^l равна или превышает $E_d(hkl)$ и приобретенный атомом импульс совпадает с направлением $[hkl]$, его смещение оказывается устойчивым. В этом случае смещенный атом не возвращается в исходное положение в узел, а занимает межузельное положение. Таким образом, в решетке металла образуется пара Френкеля – *МУА и вакансия*.



Подобный процесс многократных атомных смещений ПВА называют *каскадом смещений*. Каскады характеризуют энергией E' и количеством смещенных в межузельное положение атомов, т.е. так называемой *каскадной функцией* (ν). В первом приближении эта величина может быть определена из простого соотношения, выведенного американскими физиками Кинчином и Пизом:

$$\nu = k \frac{E'}{2Ed} \quad \text{где} \quad k = 0,7 \div 0,8. \quad (3.1)$$



На расстояниях 50-80 Å от краев зон располагались единичные МУА. Повышение температуры до 60 К приводило к удалению практически всех МУА, тогда как структура обедненных зон оставалось неизменной. При комнатной температуре все МУА уходили к стоком, а обедненные зоны оказывались намного меньше размера при концентрации вакансий в них ~ 20 ат.%. Наличие примесей обусловливало еще большее изменение параметров обедненных зон ($C_e \sim 30 \text{ ат.\%}$, объем ~ $6 \cdot 10^{-20} \text{ см}^3$). Однако МУА атомы не уходили на стоки. Они захватывались атомами примеси и стабилизировались вблизи границы зон. При этом их удаленность от ближайших (периферийных в обедненных зонах) вакансий составляла 10÷50 Å.



Если температура металла такова, что допускает диффузию атомов газа по решетке, газ в металле частично перераспределяется, частично выходит из него. Удаление его полностью достаточно трудно. Однако, чем сильнее нагрет метал, тем больше газа из него выходит. Этот процесс можно проследить по графику газовыделения и определить распаду каких комплексов соответствует пик выхода газа, оценить энергию связи этого комплекса (рис. 3.1).

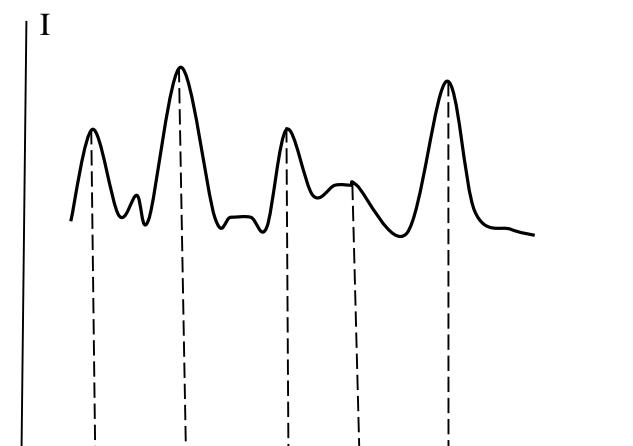


Рис.3.1. Процесс газовыделения из облученных металлов



Пороговая энергия E_d образования смещения составляет величину около 25 эВ. Согласно самой ранней и простой модели Кинчина—Пиза, ПВА с энергией $E \leq E_d$ создает $v - E/E_d$ пар Френкеля (междоузельный атом-вакансия). Таким образом, число смещений, производимых в единице объема материала за время t , будет

$$d = N_0 \varphi \sigma v t. \quad (3.1)$$

где N_0 — число атомов в единице объема; φ — поток нейтронов; σ — сечение упругого взаимодействия нейтрана с ядром атома среды. Непрерывное образование дефектов сопровождается непрерывным же возвращением атомов в узлы кристаллической решетки. За время t каждый атом окажется смещенным из узла d/N_0 раз, т.е.:

$$y = d/N_0 = \varphi \sigma v t. \quad (3.2)$$

Этой величиной часто характеризуют степень радиационного повреждения материала (вместо флюенса нейтронов φt).



Термодинамически равновесная концентрация вакансий в обычных металлах дается выражением $N_{ev} = N_0 \exp(E_{jv}/kT)$, где ($E_{jv} = 1 \text{ эВ}$), при температуре около 500°C $N_{ev} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Концентрация же радиационно- созданных вакансий может превосходить эту величину на много порядков, т.е. облучение является мощным средством создания в материале сверхравновесных концентраций вакансий и междуузельных атомов. Энергия образования междуузельного атома $E_{JL} = 4 \text{ эВ}$, т.е. больше энергии образования вакансий, поэтому термически равновесная концентрация междуузельных атомов $N_{si} \ll N_{ev}$.



В соответствии с классической нерелятивистской механикой при упругих столкновениях частица с массой M_1 , и с кинетической энергией E может передать покоящейся частице с массой M_2 максимальную энергию T , равную

$$T = \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cdot E \quad (3.3)$$

Минимальная величина энергии E_{\min} , которая необходима для передачи энергии E_d , равна

$$E_{\min} = \frac{(M_1 + M_2)^2 E_d}{4M_1 M_2}. \quad (3.4)$$

Данное рассуждение неприменимо для электронов и гамма – квантов. В случае электронов значение E_{\min} настолько велико, что необходимо для вычисления использовать релятивистскую механику:

$$T = E_d = \frac{2E_{\min} [E_{\min} + m_e c^2]}{M_2 c^2}, \quad (3.5)$$

где m_e - масса электрона; c - скорость света.

|



Кинетическую энергию электрона до поглощения γ -кванта можно не учитывать. Тогда минимальная энергия γ -кванта, необходимая для смещения атома равна

$$E_{\text{н}} = \frac{2E_{\text{min}} [E_{\gamma \text{ min}} + m_e c^2]}{M_2 c^2}. \quad (3.6)$$

Оценка энергии, затрачиваемой для смещения атома необходима для расчета полного числа смещений, вызываемых различными бомбардирующими частицами. Сечение образования первично смещенного атома фотоном с энергией E_{γ} будет равно

$$\delta_{\text{n}}(E_{\gamma}, E_{\text{n}}) = \int_{E_{\text{c}}}^{\infty} \frac{\partial \delta}{\partial T}(E_{\gamma}, E_{\text{n}}) dT. \quad (3.7)$$



**Контрольные вопросы: «Взаимодействие ионизирующих излучений с твёрдым телом»
(гл. 3, 3.1)**

1. Что называют первичной и вторичной стадиями радиационного дефектообразования?
2. Какие типы взаимодействий частиц с атомами решётки различают (упругое/неупругое) и к чему они приводят?
3. Что такое пороговая энергия смещения E_d и от каких факторов она зависит?
4. Что такое первично выбитый атом (ПВА) и при каких условиях он возникает?
5. Объясните, что такое каскад смещений. Какие его основные параметры?
6. В чём физический смысл каскадной функции и какова упрощённая оценка Кинчина–Пиза?
7. Почему тяжёлые заряженные частицы обычно эффективнее создают смещения, чем электроны и γ -кванты?
8. Какова роль ионизационных потерь и почему при больших энергиях ПВА сначала тратит энергию на ионизацию, а затем на смещения?
9. Что такое «обеднённая зона» в ядре каскада смещений и чем она окружена?



**Контрольные вопросы: «Взаимодействие ионизирующих излучений с твёрдым телом»
(гл. 3, 3.1)**

10. При каких условиях обеднённая зона «схлопывается» в дислокационную петлю вакансационного типа?
11. Как вид облучающей частицы (электрон, ион, нейtron, γ) влияет на спектр энергий отдачи и пространственное распределение дефектов?
12. Почему γ -кванты обычно малоэффективны в создании дефектов и через какие процессы они всё же могут их вводить?
13. Чем отличается механизм передачи энергии атомам решётки для электронов и ионов (учёт релятивистики/кулоновского рассеяния)?
14. Запишите выражение для максимальной передаваемой энергии при упругом столкновении и объясните его смысл.
15. Что такое энергия $E_i E_i$ (граница между ионизационными и «смещающими» потерями) и каков её порядок для металлов?



**Контрольные вопросы: «Взаимодействие ионизирующих излучений с твёрдым телом»
(гл. 3, 3.1)**

16. Как определить минимальную энергию γ -кванта, достаточную для смещения атома (связь с EdE_dEd)?
17. Дайте определение величины dpa (displacements per atom). Почему она удобна для сопоставления разных видов облучения?
18. Какие ограничения есть у прямого сравнения по dpa при моделировании нейтронов синтеза другими видами облучения?
19. Что такое трансмутационные превращения и почему их вклад особенно важен для 14-МэВ нейтронов?
20. Как температура облучения влияет на судьбу введённых вакансий и междуузельных атомов (мобильность, рекомбинация, кластеризация)?
21. Почему при низкотемпературном облучении дефекты «замораживаются», а при высокотемпературном — частично отжигаются в процессе облучения?



Рекомендуемая литература:

1. Гребенюк В. Д., *Радиационная физика твёрдого тела*. М.: Энергоатомиздат, 2008.
2. Михайлов М. Н., *Основы радиационной физики и дозиметрии*. СПб.: БХВ-Петербург, 2013.
3. Кудрявцев Ю. И., *Дефекты кристаллической решётки и радиационные процессы*. М.: Физматлит, 2010.
4. Кузнецов С. В., *Физика ионизирующих излучений*. М.: Академия, 2018.
5. Was G. S., *Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys*. Springer, 2017.