



Лекция 10.

Взаимодействие нейтронов с твердым телом

Дисциплина: Радиационные эффекты и современная спектроскопия твердого тела.

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



Цель лекции: Изучить физические процессы взаимодействия нейтронов с атомами твёрдого тела, рассмотреть основные типы нейтронных реакций, механизмы упругого и неупругого рассеяния, а также влияние нейтронного облучения на структуру и свойства материалов.

Основные вопросы лекции

- Характеристики нейтронов и их классификация по энергии.
- Механизмы взаимодействия нейтронов с веществом.
- Упругое и неупругое рассеяние нейтронов.
- Захват нейтронов и ядерные реакции (n,γ) , (n,p) , (n,α) .
- Энергетический спектр выбитых атомов и формирование дефектов.
- Каскады смещений и величина пороговой энергии.
- Трансмутационные процессы и образование газовых элементов (He, H).
- Радиационные эффекты в конструкционных материалах под нейтронным облучением.
- Методы исследования нейтронных повреждений.



Существуют два различных механизма смещения атомов в твердых телах, облучаемых нейтронами. В соответствии с первым нейтрон сталкивается непосредственно с ядром атома и передает ему энергию, превышающую E_d . После упругого или неупругого столкновения ядро остается незаряженным. Почти всегда ядро получает энергию, достаточную для образования следующих смещений, прежде чем оно замедлится и остановиться. Второй механизм обусловлен ядерными реакциями на нейтронах. Продукты реакции вызывает атомные смещения. Примерами таких процессов служат реакции типа $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, $^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$, $^{238}\text{U}(n, f)$.

Если плотность моноэнергетических нейтронов составляет n нейтронов в единице объема, тогда скорость реакции равна

$$R = N_0 n \sigma v, \quad (3.8)$$

где v - скорость нейтронов; σ - сечение реакции; N_0 - число атомов в единице объема.

Поскольку ядерные реакции в этом случае идентичны и создают одно и то же число смещений и если N_0 - число атомов, смещенных в результате одной реакции, тогда число смещений в единицу времени равно произведению $R V$. Величина $n\varphi$ - плотность потока нейтронов и обозначим через $\varphi = n\varphi$. Когда в облучении участвуют нейтроны с различной энергией, плотность потока нейтронов в интервале энергии $E_H \div E_H + dE_H$ будет $\frac{\partial\varphi(E_H)}{\partial E_H} \cdot dE_H$ и скорость реакции оказывается равной:

$$R = N_0 \int \frac{\partial\varphi(E_H)}{\partial E_H} \cdot \delta(E_H) dE_H \quad (3.9)$$

Достаточной для образования смещенных атомов энергией обладают ядра отдачи, возникающие при испускании β - частиц. В этом случае энергия ядра отдачи определяется из соотношения

$$2 M E_{\text{отд}} = P_e^2 \quad (3.10)$$

где P_e - импульс электрона. Энергия электронов вычисляется по закону релятивистской механики. В результате для энергии отдачи ядра можно получить

$$E_{\text{отд}} = \frac{1}{2M} \left(\frac{E_\beta}{c^2} \right) (E_\beta + 2m_e c^2) \quad (3.11)$$

Тогда число смещений вычисляется по формуле

$$v = \frac{1}{4 M E_n} \left(\frac{\bar{E}_\gamma}{e} \right)^2 \quad (3.12)$$

Следовательно, при каждом соударении образуется в среднем полное число смещений $\bar{\nu}$, определяемое из соотношения

$$\bar{\nu}(E_H) = \nu(\alpha E_H / 2) \quad (3.13)$$

В потоке моноэнергетических нейтронов φ с энергией E_H число смещений в единичном объеме, образовавшихся за единицу времени, равно

$$\frac{dn}{dt} = N_0 \varphi \delta(E_H) \bar{\nu}(E_H). \quad (3.14)$$

Функция $\nu(T)$, обозначающая число смещений, образуемых первично выбитым атомом с начальной энергией T , выполнены Кинчиным и Пизом, которые нашли:

$$\nu(T) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq T \leq E_0 \\ 1 & \text{при } E_0 \leq T \leq 2E_0 \\ T/2E_0 & \text{при } 2E_0 \leq T \leq L_c \\ L_c/2E_0 & \text{при } T > L_c \end{cases} \quad (3.15)$$



3.3 Радиационные процессы при облучении заряженными частицами

Простейшей вид радиационного повреждения возникает в том случае, когда непосредственно взаимодействующие с излучением атомы получают энергию, лишь ненамного превышающую энергию смещения E_v , и температура достаточно для того, чтобы межузельный атом или вакансия были подвижными. В этом случае повреждение представляет собой одиночные межузельные атомы и вакансии и все бомбардирующие частицы смешают лишь небольшую часть атомов. Для получения межузельного атома с нулевой подвижностью облучение следует проводить при очень низкой температуре, например, для металлов при 20K.

Энергия ионов, разгоняемых ускорителями, таких как альфа – частица, протоны, достигают 10-60 МэВ. При таких энергиях ядро движущегося атома взаимодействуют непосредственно с ядрами атомов решетки твердого тела. Такое взаимодействие, осуществляемое между кулоновскими потенциалами, относится к разряду резерфордовских столкновений. Пусть заряд и масса движущегося и покоящегося атомов равны, соответственно, Z_2e , M_2 и Z_1e , M_1 . Если скорость движущегося атома равно \mathcal{V} , то наименьшее расстояние ϵ , на которое движущийся атом приблизится к покоящемуся, можно определить из уравнения:

$$\frac{Z_1 Z_2 e^2}{\epsilon} = \left(\frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \right) \frac{\mathcal{V}}{2} \quad (3.16)$$

Средняя энергия, передаваемая выбиваемую атому при столкновении, равна

$$\overline{T}_\partial = E_\partial \ln (T_{\max} / E_\partial) \text{ при } T_{\max} \gg E_\partial, \quad (3.17)$$

$$\text{где } T_{\max} = \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)} \cdot E. \quad (3.18)$$



3.4 Конфигурация и типы дефектов при облучении.

Простейшими типами повреждений, которые образуются бомбардирующими частицами, являются междоузельный атом (МУА) и вакансии в кристаллической решетке. Образование одиночного МУА происходит в том случае, когда атом покидает поверхность кристалла и располагается в одном из междоузлий кристаллической решетки. Энергия кристалла увеличивается во время такого перехода на величину E_e , называемую энергией образования МУА. Удаление атома из внутреннего узла решетки и расположение его на поверхности кристалла приводит к возникновению вакансии. Энергия кристалла при этом еще раз возрастает на величину E_v , называемую энергией образования вакансии. В том случае, когда выбитый из узла решетки атом располагается в междоузлии, образуется пара точечных дефектов – вакансии и междоузельный атом. Энергия образования такой пары, вообще говоря, отлична от энергии E_M и E_e . В каждом из двух случаев атомы, окружающие МУА или вакансию, имеют возможность релаксировать к состоянию равновесия.

Образование точечных дефектов не нарушает условия *электронейтральности* кристалла, т.к. в металлах удаление иона при образовании вакансии сопровождается удалением электрона. В чисто ионных кристаллах для сохранения электронейтральности на каждый отрицательно заряженный дефект образуется один положительный. Равновесная концентрация дефектов, присутствующих в кристалле при какой-либо температуре, определяется энергией их образования. Концентрация вакансий в твердом теле, находящегося в состоянии теплового равновесия, может быть представлена выражением:

$$C_v \approx \exp\left(-\frac{E_v}{kT}\right). \quad (3.20)$$

Аналогичные выражения будут для пар Френкеля, МУА и комплексных дефектов в полярных кристаллах. Одиночные дефекты подвижны. Пусть МУА при температуре абсолютного нуля находится в потенциальной яме глубиной E_δ . Повышение температуры заставляет МУА совершать тепловые колебания внутри потенциальной ямы, в результате чего с ростом температуры возрастает вероятность выхода МУА из ямы и попадает в другую яму. Частота перескоков МУА записывается как

$$\nu = \nu_0 \exp[-E_{\delta M} / KT] \quad (3.21)$$



Помимо перечисленных, одной из возможных комплексных конфигураций смещенных атомов может быть кроудион. Это такая конфигурация, в которой дополнительный атом выстраивается по линии плотной упаковки. Однако такая комбинация не всегда устойчива. Вполне вероятно, что МУА в этом случае образует так называемую расщепленную конфигурацию, или «гантель». Образование комплекса из трех вакансий или четырех вакансий также возможно. Энергия связи комплекса из четырех вакансий (тетравакансий) находится в пределах $0,46 \div 2,9$ эВ, а энергию активации миграции - равной 1,9 эВ. В ионных кристаллах между противоположно заряженными дефектами действуют обычные электростатические силы, поэтому работа на образование скоплений невелика. В большинстве случаев облучения материалов конструкций в процессе эксплуатации образующиеся скопления дефектов состоят из гораздо большего числа точечных дефектов.



Контрольные вопросы: «Взаимодействие нейтронов с твёрдым телом» и «Радиационные процессы при облучении заряженными частицами» (разд. 3.2–3.4)

1. Какие два механизма смещения атомов реализуются при облучении нейтронами?
2. Чем конечное состояние ядра отличается при упругом/неупругом столкновении нейтрона без ядерной реакции?
3. Какие ядерные реакции на нейтронах чаще всего ведут к смещениям и почему их продукты эффективны?
4. Как записывается скорость ядерной реакции для моноэнергетических нейтронов и что означают $n, v, \sigma, Nn, v, \sigma, N$? (формула 3.8)
5. Как обобщается скорость реакции на случае спектра энергий нейтронов? (интеграл 3.9)
6. Что такое плотность потока нейтронов ϕ и как она связана со скоростью реакций/смещений?
7. Как выводится энергия отдачи ядра при испускании β -частицы и как ею пользоваться? (3.10–3.11)



Контрольные вопросы: «Взаимодействие нейтронов с твёрдым телом» и «Радиационные процессы при облучении заряженными частицами» (разд. 3.2–3.4)

8. Как подсчитать число смещений, создаваемых β -распадом, в единицу времени? (3.12)
9. Что такое «первично выбитый атом» (ПВА) и почему он может создавать каскад смещений?
10. Какова приближённая каскадная функция Кинчина–Пиза $\nu(T)/\nu_i(T)$ и физический смысл энергии E_i ? (3.15)
11. В каком диапазоне энергий у ПВА преобладают электронные потери, а где – смещающие? Что задаёт границу E_i ?
12. При каких условиях образуются «простые» радиационные повреждения (изолированные МУА и вакансии) и почему важна низкая T ?
13. Почему тонкие образцы, облучённые электронами/ γ -квантами, удобны для изучения базовых параметров МУА/вакансий?
14. В каких материалах возможна почти равномерная по объёму наработка смещений и почему (пример: графит)?



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. Was G. S. Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys. Springer, 2017.
5. F. Garner, Radiation Damage in Metals. Elsevier, 2019.