

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oen, O. S. Cross sections for atomic displacements in solids by fast electrons / O. S. Oen // Oak Ridge National Laboratory Report ORNL-4897. – 1973.
2. Kwon, J. Gamma displacement cross-sections in various materials / J. Kwon, A. T. Motta // Annals of Nuclear Energy. – 2000. – Vol. 27. – P. 1627–1642.
3. Lijian, T. Analytic Fitting to the Mott Cross Section of Electrons / T. Lijian, H. Qing, L. Zhengming // Radiat. Phys. Chem. – 1995. – Vol. 45, № 2. – P. 235–245.
4. Alexander, D. E. Defect production considerations for gamma ray irradiation of reactor pressure vessel steels / D. E. Alexander // Journal of Nuclear Materials. – 1997. – Vol. 240. – P. 196–204.

И. Д. ГОЛЕНКО, П. Б. КАЦ

Беларусь, Брест, УО «БрГУ имени А. С. Пушкина»

**РАСЧЕТ СЕЧЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ АТОМА ФОТОНОМ
ЗА СЧЕТ ФОТОЭФФЕКТА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА LQZ**

Гамма-кванты в основном вызывают смещения атомов за счет образования в веществе электронов высокой энергии, которые и вызывают смещение атомов. Один из методов расчета сечения смещения атома фотоном был предложен в работе [1]. При этом необходим расчет сечения смещения атома электроном. В [2] для расчета сечения смещения атома электроном используется приближение Маккинли – Фешбаха, в других используют кусочную интерполяцию данных по сечениям смещения атомов из [3]. Сечение Маккинли – Фешбаха неприменимо для тяжелых элементов, таких как золото. Как мы показали ранее, метод LQZ [4] и его модификации при расчетах сечения смещения атома электроном приводят к результатам, очень близким к получаемым при интегрировании моттовского дифференциального сечения рассеяния [3]. В данной работе мы используем метод LQZ и его модификации для расчета сечения смещения атома фотонами за счет фотоэффекта.

Сечение смещения атома фотоном с энергией E_γ за счет фотоэффекта [1]:

$$\sigma_{PE}(E_\gamma) = \sigma^{PE}(E_\gamma) \bar{n}(E), \quad (1)$$

где $\sigma^{PE}(E_\gamma)$ – сечение фотоэффекта на атоме. Для энергии фотонов более 2 МэВ [6]

$$\begin{aligned} \sigma^{PE}(E_\gamma) = & 5\pi a_0^2 Z^5 \alpha^8 \exp(-\pi Z\alpha + 2(Z\alpha)^2(1 - \ln[Z\alpha])) \times \\ & \times (\gamma^2 - 1)^{3/2} \left(\frac{mc^2}{E_\gamma} \right)^5 \left(\frac{4}{3} + \frac{\gamma(\gamma - 2)}{\gamma + 1} \left[1 - \frac{1}{2\gamma\sqrt{\gamma^2 - 1}} \ln\left(\frac{\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}}{\gamma - \sqrt{\gamma^2 - 1}} \right) \right] \right), \end{aligned} \quad (2)$$

a_0 – боровский радиус, $\alpha = 1/137,036$ – постоянная тонкой структуры, γ – лоренцевский фактор для образовавшегося при фотоэффекте электрона с энергией E : $E = E_\gamma - B$, B – энергия связи электрона в атоме. Будем в качестве B брать

энергию связи электрона в К-слое. Для железа, согласно [7], $B = 7112$ эВ, $\bar{n}(E)$ – среднее число смещенных атомов, создаваемых электроном с энергией E :

$$\bar{n}(E) = N \int_0^E \frac{\sigma^e(T)}{S(T)} dT, \quad (3)$$

N – концентрация атомов в веществе. $S(T)$ – электронная тормозная способность вещества для электронов. Будем использовать выражение для тормозной способности вещества из [7]:

$$S(T) = \frac{2\pi e^4 NZ (3 \cdot 10^9)^4}{mc^2 \beta^2 (1,6 \cdot 10^{-6})^2} \left(\ln \frac{mc^2 E \beta^2}{I_p^2 (1 - \beta^2)} - \beta^2 \right), \quad (4)$$

I_p – средняя энергия ионизации атома. По [8] будем рассчитывать ее, как $I_p = 1,35 \cdot 10^{-5} Z$ МэВ.

$\sigma^e(T)$ – сечение смещения атома электроном с энергией T .

$$\sigma^e(T) = \int_0^{T_m} \frac{d\sigma}{dT'} \nu(T') dT',$$

$\nu(T')$ – число смещений атома, вызываемых атомом с энергией T' , $\frac{d\sigma}{dT'}$ – дифференциальное сечение рассеяния с передачей энергии T' .

Мы будем использовать, как и в [3], выражение

$$\nu(T') = \begin{cases} 0, T' < T_d, \\ 1, T_d < T' < 2T_d, \\ T' / 2T_d, 2T_d < T'. \end{cases} \quad (5)$$

T_d – минимальная переданная энергия, при которой атом может сместиться из положения равновесия. T_m – максимальная энергия, которая может быть передана атому массой M при столкновении с электроном с энергией T :

$$T_m = \frac{2T(T + 2mc^2)}{Mc^2}.$$

Сравним наши результаты расчета среднего числа смещенных атомов с приведенными в работе [8] (рисунок 1).

Результаты расчета сечения смещения атома сравним с приведенными в [2]. В указанной работе использовалась формула для тормозной способности вещества, отличная от (5), другое выражение для $\nu(T')$ и приближение Маккинли – Фешбаха.

Результаты, получаемые с помощью метода LQZ, хорошо согласуются с результатами, получаемыми при использовании приближения Маккинли – Фешбаха для элементов с небольшими значениями Z (железо и никель).

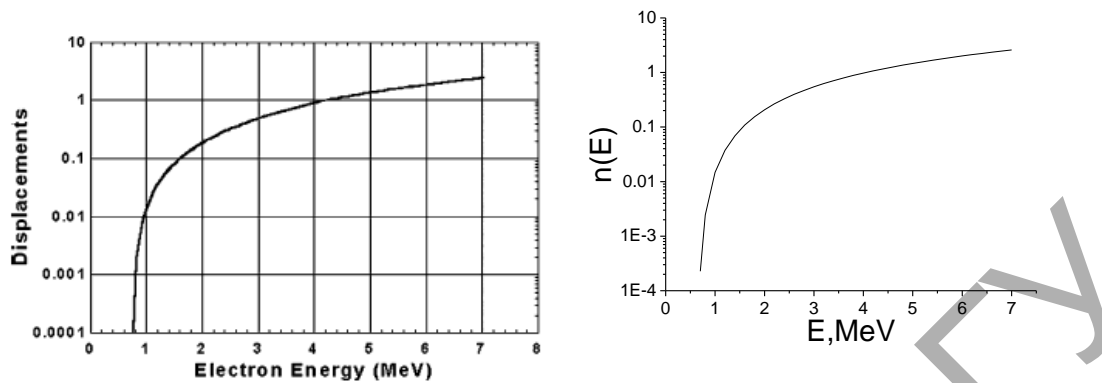


Рисунок 1 – Зависимость среднего числа смещенных атомов от энергии электрона. Слева график из [8], справа – результат наших расчетов

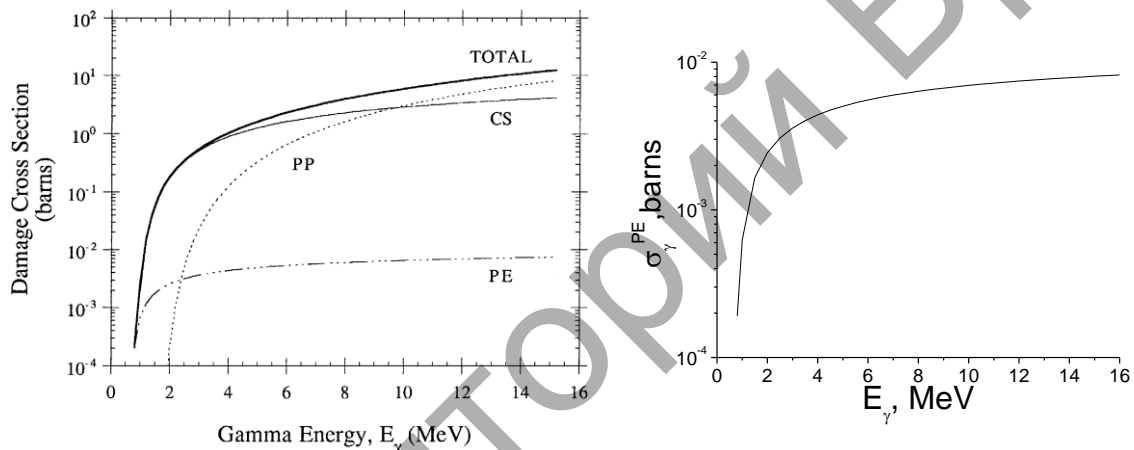


Рисунок 2 – Сечение смещения атома фотоном за счет фотоэффекта. Слева график из [2], справа – результат наших расчетов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oen, O. S. Cross Sections for Atomic Displacements in Solids by Gamma Rays / O. S. Oen, D. K. Holmes // Journal Of Applied Physics. – 1959. – Vol. 30, № 8. – P. 8–21.
2. Alexander, D. E. Defect production considerations for gamma ray irradiation of reactor pressure vessel steels / D. E. Alexander // Journal of Nuclear Materials. – 1997. – Vol. 240. – P. 196–204.
3. Oen, O. S. Cross sections for atomic displacements in solids by fast electrons / O. S. Oen // Oak Ridge National Laboratory Report ORNL-4897. – 1973.
4. Lijian, T. Analitic Fitting to the Mott Cross Section of Electrons / T. Lijian, H. Qing, L. Zhengming // Radiat. Phys. Chem. – 1995. – Vol. 45, № 2. – P. 235–245.
5. Hall, H. The Theory of Photoelectric Absorption for X-Rays and γ -Rays / H. Hall // Reviews Of Modern Physics. – 1936. – Vol. 8. – P. 358–397.
6. X-RAY DATA BOOKLET [Electronic resource] // Center for X-ray Optics and Advanced Light Source Lawrence Berkeley National Laboratory. – Mode of access: <http://web.horde.to/xdb.lbl.gov/>. – Date of access: 21.01.2021.
7. Kwon, J. Gamma displacement cross-sections in various materials / J. Kwon, A. T. Motta // Annals of Nuclear Energy. – 2000. – Vol. 27. – P. 1627–1642.

8. Views of TAGSI on the effects of gamma irradiation on the mechanical properties of irradiated ferritic steel reactor pressure vessels / J. F. Knott [et al.] // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2005. – Vol. 82. – P. 929–940.

А. В. ДЕМИДЧИК

Беларусь, Брест, УО «БрГУ имени А. С. Пушкина»

ЗАДАНИЯ 11 КЛАССА ПО ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ НА IV ЭТАПЕ РЕСПУБЛИКАНСКОЙ ОЛИМПИАДЫ ПО ФИЗИКЕ

Раздел физики «Электричество и магнетизм» изучается в 8, 10 и 11 классах средней школы.

В 8 классе изучается глава «Электромагнитные явления», в которой можно выделить следующие структурные элементы: *электростатика* (§§ 12–18 школьного учебника [1]; электризация тел, электрическое поле, электрическое напряжение, расчет работы в электрическом поле), *постоянный ток* (§§ 19–27; источники тока, сила тока, ее измерение, закон Ома, сопротивление, способы соединения проводников, работа и мощность тока, закон Джоуля – Ленца) и *магнетизм* (§§ 28–31; постоянные магниты, магнитное поле, магнитное поле тока, магнитное поле прямого проводника и катушки с током, электромагнит). В 8 классе выполняется четыре лабораторные работы:

1) сборка электрической цепи и измерение силы тока в ней (лабораторная работа № 3 школьного учебника [1]);

2) измерение электрического напряжения и сопротивления проводника (лабораторная работа № 4);

3) изучение последовательного соединения проводников (лабораторная работа № 5);

4) изучение параллельного соединения проводников (лабораторная работа № 6).

В 10 классе изучается глава «Электродинамика»: *электростатика* (§§ 16–24 школьного учебника [2]; закон Кулона, напряженность поля, разность потенциалов, конденсаторы), *постоянный ток* (§§ 25–26; ЭДС, закон Ома для полной цепи, КПД источника тока), *магнетизм* (§§ 27–33; силы Ампера и Лоренца, магнитный поток, закон электромагнитной индукции) и *электрический ток в различных средах* (§§ 34–37; в металлах, электролитах, газах, полупроводниках). В 10 классе выполняется одна лабораторная работа: измерение ЭДС и внутреннего сопротивления источника (лабораторная работа № 4 школьного учебника [2]).

В 11 классе изучается глава «Электромагнитные колебания и волны»: *электромагнитные колебания* (§§ 7–10 школьного учебника [3]; колебания, колебательный контур, свободные и вынужденные колебания, трансформатор, производство, передача и потребление электроэнергии) и *электромагнитные волны* (§ 11). Лабораторных работ в 11 классе по рассматриваемой тематике нет.

Проанализируем олимпиадные задания последнего десятилетия, предлагаемые учащимся выпускных классов.