

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В NaCl ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

**В.В. Ганн, Г.В. ден Хартог\*, А.В. Сугоняко\*, Д.И. Вайнштейн\***  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
г. Харьков, Украина;*

*\*Гронингенский университет, г. Гронинген, Нидерланды*

Проведен анализ существующих экспериментальных и теоретических данных и предложена простая аналитическая формула для расчета профиля поглощенной энергии в толстых мишенях, облучаемых электронами мэвных энергий. Показано, что эффект накопления дозы существенно влияет на профиль поглощенной энергии в толстых мишенях. Выполнены измерения профиля распределения запасенной энергии в кристаллических пластинках NaCl с толщиной 0.2...0.8 мм, облученных электронами с энергией 0.5 МэВ, методом дифференциальной сканирующей калориметрии по скрытой теплоте плавления радиационно-индуцированных выделений натрия.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Необходимо различать два понятия: потери энергии электронов в мишени и энерговыделение в мишени. Потери энергии – это удельная энергия, теряемая первичным электроном пучка при прохождении мишени на заданной глубине, в то время как энерговыделение – это удельная энергия, теряемая первичными,  $\delta$  (вторичными и т. д.) электронами и поглощаемая в мишени на заданной глубине. Энергетические потери, обусловленные процессами ионизации и возбуждения атомов, в тонких мишенях хорошо описываются формулой Бете-Блоха [1]. Обширные таблицы потерь энергии электронов, включающие поправку на эффект плотности  $\delta$  и экспериментально подобранные значения средней энергии возбуждения  $I$  были опубликованы Зельцером и Бергером [2] (для NaCl рекомендовано значение  $I = 175.3$  эВ).

Расчет энергетических потерь электронов в толстых мишенях является довольно сложной проблемой. Основную трудность представляет учет обратного и многократного рассеяния электронов в среде, а при расчетах профилей энерговыделения – учет вклада  $\delta$ -электронов в переносе энергии.

Расчеты профилей потерь энергии электронов при нормальном падении пучка на поверхность мишени были выполнены Спенсером [3], Рао [4], Кобетичем и Кацем [5]. Ряд результатов был получен путем машинного моделирования прохождения электронов в мишени методом Монте-Карло [6].

### 2. ПРОФИЛИ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ

Наиболее полные расчеты профилей потерь энергии электронов при нормальном падении пучка на плоскую поверхность мишени были выполнены Спенсером [3]. Позднее Рао [4] предложил простую формулу для расчета доли электронов, прошедших через фольгу толщиной  $t$ :

$$\eta = \frac{1 + \exp(-gh)}{1 + \exp[g(t/R - h)]}, \quad (1)$$

где  $g = 9.2 Z^{-0.2} + 16 Z^{-2.2}$  и  $h = 0.63 Z/A + 0.27$ .

Зависимость коэффициента прохождения  $\eta$  от толщины мишени  $t$ , вычисленная с помощью (1) для пучка электронов с энергией 0.5 МэВ в NaCl, изображена на рис. 1.

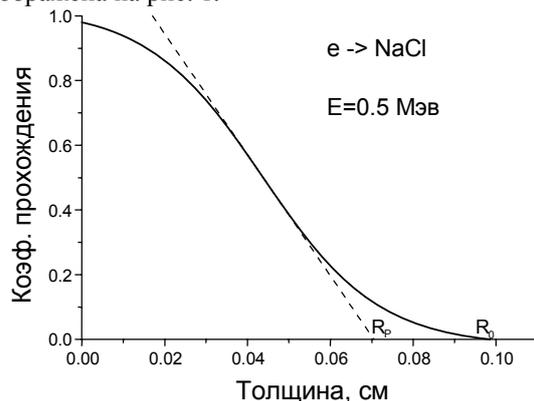


Рис. 1. Зависимость коэффициента прохождения от толщины образца NaCl

Точка пересечения продолжения линейного участка с осью  $x$  называется *фактическим* (или *экстраполированным*) *пробегом*  $R_p$ , а точка пересечения хвоста распределения с осью  $x$  – *максимальным пробегом*  $R_0$  (фон не учитывается).

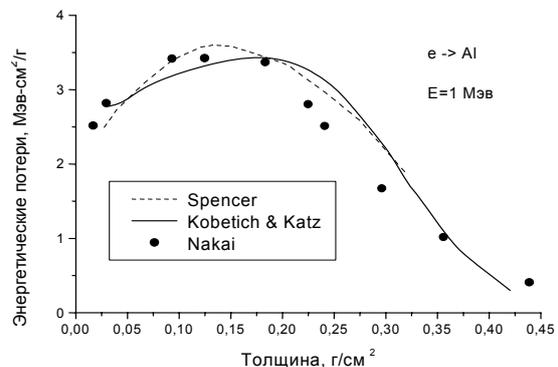


Рис. 2. Профили энергетических потерь в алюминии, рассчитанные Спенсером, Кобетичем и Кацем, – сплошные линии; экспериментальные данные Накаи [7] – точки

Профиль потерь энергии нормально падающего пучка электронов можно представить в виде [5]:

$$S = \frac{d[\eta E(R-t)]}{dt} \quad (2)$$

Здесь  $E(R)$  – зависимость «пробег-энергия».

Профиль потерь энергии имеет максимум (рис. 2), который обусловлен конкуренцией двух механизмов: ростом удельных энергетических потерь с глубиной и уменьшением количества электронов в пучке.

### 3. ЗАВИСИМОСТИ «ПРОБЕГ-ЭНЕРГИЯ»

Максимальный пробег электрона в веществе можно легко рассчитать в приближении непрерывного замедления (ПНЗ):

$$R_0(E) = \int_0^E dE' / \left( \frac{dE'}{dx} \right)_{tot} \quad (3)$$

Здесь  $\left( \frac{dE'}{dx} \right)_{tot}$  – полные потери энергии электронов

с энергией  $E'$ ;  $R_0$  – полный пробег электрона в веществе до остановки. Обширные таблицы ПНЗ пробегов электронов опубликованы Зельцером и Бергером для большого количества простых веществ и соединений [2].

Кац и Пенфолд аппроксимировали измеренную ими зависимость пробег-энергия для алюминия следующей формулой [8], справедливой в интервале энергий 0.01...3 МэВ:

$$R_{Al} = 0.421 E^{1.265 - 0.0954 \ln E} \quad (4)$$

где  $R$  – пробег в г/см<sup>2</sup>;  $E$  – энергия в МэВ.

### 4. ПРОФИЛИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

Экспериментально измеренные профили энерговыведения изображены на рис. 3 для алюминия [9]. Профили энерговыведения так же, как и профили потерь энергии, обладают ярко выраженным максимумом.

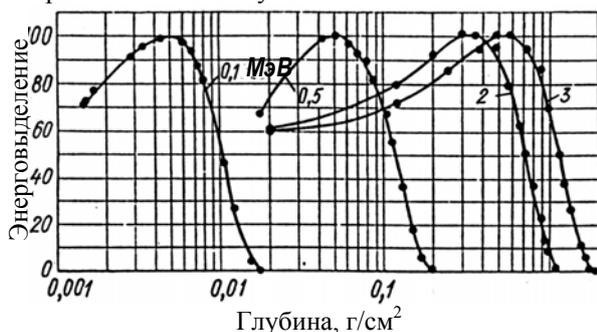


Рис. 3. Профили энерговыведения в алюминии

Расчет профилей энерговыведения электронов в толстых мишенях является довольно сложной проблемой ввиду необходимости учета многократного рассеяния электронов атомами и наличия

$\delta$ -электронов. Для расчета профилей энерговыведения в 3-х мерной геометрии используются Монте-Карловские методы, но они требуют много машинного времени. Поэтому в данной работе был предложен простой полуэмпирический метод расчета профилей энерговыведения при нормальном падении пучка электронов  $Q(x)$ , основанный на хорошо изученных профилях энерговыведения для плоскопараллельного пучка электронов в алюминии.

### 5. УНИВЕРСАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ

Из рис. 3 видно что для электронов в диапазоне энергий 100 КэВ...3 МэВ все профили энерговыведения  $Q(x)$ , изображенные в логарифмической шкале глубин, имеют одну и ту же форму. Они могут быть легко масштабированы к значению экстраполированного пробега  $R_P(E)$  и описаны одной универсальной функцией  $P(\xi)$  (рис. 4):

$$P(\xi) = \frac{1.437}{\{ch[0.95(2.295\xi - 1)]\}^{1.8} [0.5 + 1/(2.7 - 2.295\xi)]} \quad (5)$$

Здесь  $\xi$  – глубина  $x$ , отнесенная к экстраполированному пробегу:  $\xi = x / R_P(E)$ . Значения числовых параметров были получены путем подгонки к экспериментальным данным (см. рис. 3). Функция  $P(\xi)$  нормирована следующим образом:  $\int_0^\infty P(\xi) d\xi = 1$ . Для вычисления пробега

электрона в алюминии  $R_{Al}(E)$  мы используем формулу (4), а для других материалов с атомным номером  $Z$  и атомным весом  $A$  пробеги электронов можно взять из [2] или использовать следующее масштабное преобразование:

$$R_P(E) = 0.482 \left( \frac{A}{Z} \right) R_{Al}(E) \quad (6)$$

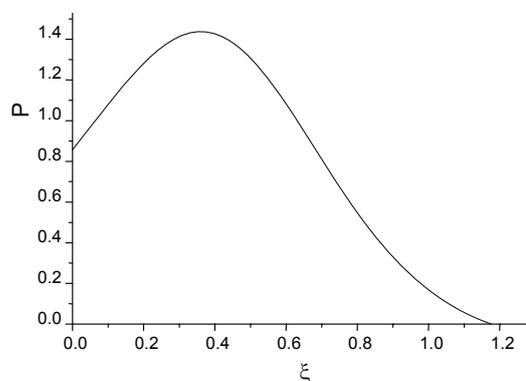


Рис. 4. Универсальный профиль энерговыведения

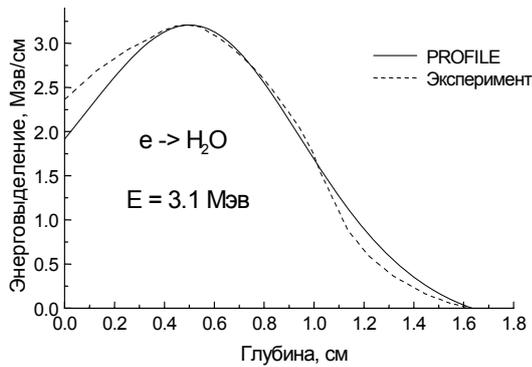


Рис. 5. Профили энерговыведения в H<sub>2</sub>O

Таким образом, профиль энерговыведения для электронов мэвных энергий выражается функцией:

$$Q(x) = \frac{E}{R_p(E)} P\left(\frac{x}{R_p(E)}\right). \quad (7)$$

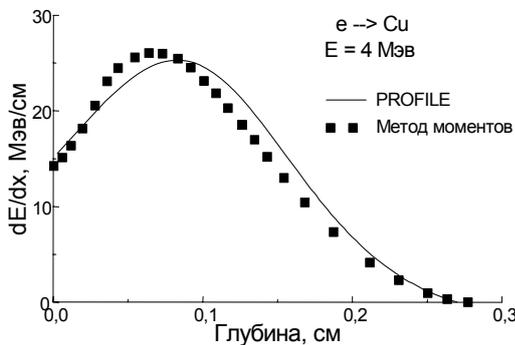


Рис. 6. Профили энерговыведения в Cu

На рис. 5 и 6 приведено сравнение рассчитанных по формулам (4-7) профилей энерговыведения (обозначение – PROFILE), с измеренным профилем энерговыведения в воде [9] и с теоретическими результатами, полученными для меди методом разложения по моментам [10].

## 6. РАСЧЕТ СРЕДНЕЙ ДОЗЫ

Имея профиль энерговыведения  $Q(x)$ , мы можем рассчитать среднее энерговыведение  $Q_{av}$  в образце заданной толщины  $t$ :

$$Q_{av}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t Q(x') dx'$$

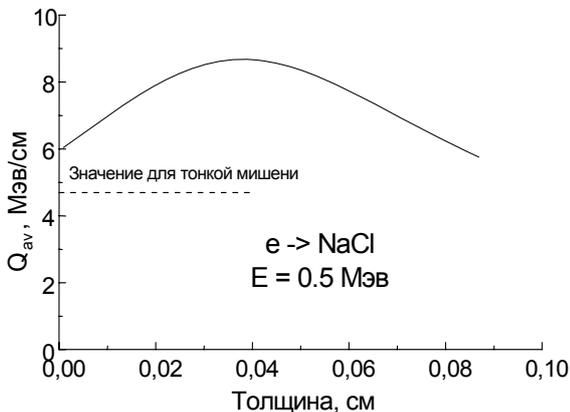


Рис. 7. Среднее энерговыведение с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктир) обратного и многократного рассеяния электронов

Зависимость  $Q_{av}$  от толщины  $t$  образца NaCl, облученного электронами с энергией 0,5 МэВ, показана на рис. 7 вместе со значением энергетических потерь, вычисленным по формуле Бете-Блоха (пунктир) с  $I = 175.3$  эВ (согласно Зельцеру-Бергеру). Видно, что учет эффекта накопления дозы, связанный с многократным и обратным рассеянием электронов, приводит к увеличению максимального значения поглощенной энергии примерно на 100%.

## 7. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Были проведены экспериментальные исследования профилей энерговыведения в пластинках NaCl под электронным облучением с энергией 0,5 МэВ. Образцы NaCl с различной толщиной облучались на ускорителе электронов университета г. Гронинген при температуре 100°C до дозы  $D_{S-B} = 26$  Град (по Зельцеру-Бергеру). Было изучено распределение поглощенной дозы по глубине путем измерения методом дифференциальной сканирующей калориметрии удельной энергии, запасенной в NaCl радиационными повреждениями при электронном облучении. Распределение поглощенной дозы определялось методом дифференциальной сканирующей калориметрии путем измерения запасенной энергии по скрытой теплоте плавления радиационно-индуцированных выделений натрия. Экспериментальные результаты изображены на рис. 8 вместе с предсказанной зависимостью средней удельной запасенной энергии от толщины образца.

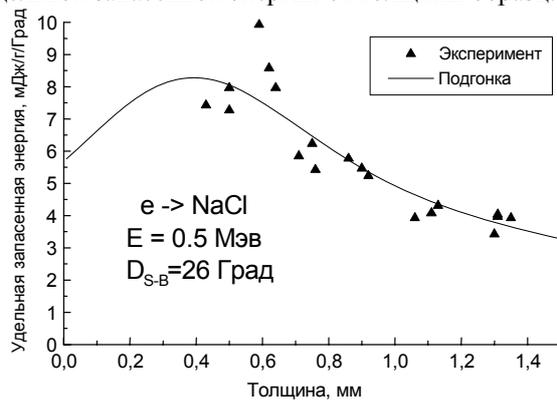


Рис. 8. Зависимость средней удельной запасенной энергии от толщины образца

Средняя запасенная энергия  $W(t)$  пропорциональна средней поглощенной дозе:

$$W(t) = \frac{CD_{S-B}}{St} \int_0^t Q(x') dx', \quad (8)$$

где  $S = 4,7$  Мэв/см – энергетические потери электронов с энергией  $E = 0.5$  Мэв;  $\rho$  – плотность образца;  $C$  – коэффициент пропорциональности, являющийся здесь подгоночным параметром:  $C = 4,2$  мДж/г/Град.

Сравнение экспериментальных данных с расчетным профилем показывает, что предложенная аппроксимация может служить основой для оценки поглощенной дозы в щелочно-галогидных кристаллах при облучении электронами мэвных энергий.

## 8. ВЫВОДЫ

Предложен метод расчета профиля поглощенной энергии в толстой мишени, облучаемой электронами с энергиями 0.1...3.0 МэВ.

Показано, что учет эффекта накопления дозы, связанного с многократным и обратным рассеянием электронов, приводит к увеличению максимального значения поглощенной энергии приблизительно в два раза по сравнению со значениями, рекомендованными Зельцером и Бергером. Этот эффект имеет место и при облучении тонких образцов, если они укреплены на толстом держателе.

Расчитанная предложенным методом зависимость поглощенной дозы от толщины мишени NaCl находится в хорошем соответствии с полученными экспериментальными результатами.

Работа выполнена в рамках Соглашения с университетом г. Гронинген, Нидерланды, № NC 1117 «Радиационные повреждения в NaCl».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Бете. *Handbuch fur Physik*. Springer Verlag, Berlin, 1933, v. 24/2.
2. M.J. Berger and S.M. Seltzer. *Stopping power for electrons and positrons (ICRU-37)*, Washington D.C., 1984.
3. L.V. Spencer. *Natl. Bur. Std. (U.S.)*, 1959, Monograph 1.
4. B.N. Shubba Rao // *Nucl. Instr. Methods*. 1966, v. 44, p. 155.
5. E.J. Kobetich and R. Katz // *Phys. Rev.* 1968, v. 170, p. 391.
6. В.И. Бойко, В.В. Евстигнеев. *Введение в физику взаимодействия сильноточных пучков заряженных частиц с веществом*. М.: «Энергоатомиздат», 1988.
7. Y. Nakai // *Japan J. Appl. Phys.* 1963, v. 2, p. 743.
8. L. Katz and A.S. Penfold // *Rev. Mod. Phys.* 1952, v. 24, p. 28.
9. *Handbuch der Physik*. Springer Verlag, Berlin, 1958, b. 34.
10. А.М. Кольчужкин, В.В. Учайкин. *Введение в теорию прохождения частиц через вещество*. М.: «Атомиздат», 1978.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОФІЛЮ ПОГЛИНЕНОЇ ЕНЕРГІЇ В NaCl ПРИ ЕЛЕКТРОННОМУ ОПРОМІНЕННІ

*V.V. Gann, H. den Hartog, A.V. Sugonyako, D.I. Vainshtein*

Зроблено аналіз експериментальних та теоретичних даних що існують та ї запропоновано проста аналітична формула для розрахунку профілю поглиненої енергії в товстих мішенях, що опромінюються електронами мевних енергій. Показано, що ефект накопичування дози істотно впливає на профіль поглиненої енергії в товстих мішенях. Впроваджені вимірювання профілю розподілу запасеної енергії в кристалічній пластинці NaCl товщиною 0.2...0.8 мм, опроміненої електронами з енергією 0.5 MeV, методом диференціальної сканіруючої калориметрії по скритій теплоті плавлення радіаційно-індукованих виділень натрію.

## INVESTIGATION OF THE ENERGY DEPOSITION PROFILE IN NaCl UNDER ELECTRON IRRADIATION

*V.V. Gann, H. den Hartog, A.V. Sugonyako, D.I. Vainshtein*

The analysis of experimental and theoretical results was done, and a simple analytical formula for the calculation of the absorbed dose profile in a thick target under electron irradiation of MeV-energy was proposed. The build-up phenomenon is shown to impact substantially on the energy deposition profile in thick samples. The stored energy profile in NaCl platelets of 0.2...0.8 mm thickness after 0.5 MeV electron irradiation has been determined by measuring the melting latent heat of radiation induced sodium precipitates with differential scanning calorimetry method.