

УДК 530.136

ЭФФЕКТ НЕАДДИТИВНОСТИ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ МНОГОСЛОЙНЫХ МИШЕНЕЙ

© 2022 г. Н. В. Новиков^а, *, Н. Г. Чеченин^а, А. А. Широкова^а

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына, Москва, 119991 Россия

*e-mail: nvnovikov65@mail.ru

Поступила в редакцию 25.06.2021 г.

После доработки 28.07.2021 г.

Принята к публикации 30.07.2021 г.

Количество и последовательность слоев мишени из вольфрама и углерода влияют на потери энергии быстрых электронов в ней. Результаты расчетов по программам GEANT4 и PENELOPE согласуются между собой и показывают, что при прохождении W/C-мишени электроны теряют меньше энергии, чем в C/W-мишени. Эффект объясняется перераспределением поглощенной энергии, которое вызвано отражением электронов от границы раздела материалов. Увеличение количества слоев приводит к уменьшению влияния структуры мишени на распределение поглощенной в ней энергии.

Ключевые слова: потери энергии электронов, многослойная мишень, поглощенная энергия.

DOI: 10.31857/S1028096022030177

ВВЕДЕНИЕ

Пучки электронов широко используются в различных областях микроскопии и структурного анализа материалов. Обратные рассеянные и вторичные электроны формируют изображение рельефа поверхности в растровой электронной микроскопии и используются для рентгеноструктурного микроанализа [1, 2]. Зондирование образцов медленными электронами в спектроскопии потерь энергии упруго отраженных электронов [3] позволяет выполнить анализ концентраций примесей в поверхностных слоях мишени [4]. В просвечивающей электронной микроскопии распределение потерь энергии по глубине слоя важно для анализа характеристических потерь энергии электронов [5] и несет информацию о потерях энергии на возбуждение колебательных состояний, плазмонов и межзонных переходов. Количество и энергия быстрых электронов, прошедших через мишень, определяет интенсивность прошедшего излучения [6].

Актуальность исследований прохождения заряженных частиц через многослойные мишени связана с важностью описания изменений характеристик ионизирующего излучения в задачах радиационной защиты [7], а также с необходимостью учета изменений электрофизических, теплофизических и оптических свойств облученных материалов в материаловедении [8]. В процессах ионно-электронной эмиссии [9] используются оценки количества и энергии вторичных элект-

тронов, рожденных на некоторой глубине и достигших поверхности [10].

Поглощение ионизирующего излучения мишенью может зависеть не только от энергии первичных частиц E_0 , угла падения пучка на поверхность, толщины и состава мишени, но и от ее структуры — последовательности и количества слоев. Диапазон энергии налетающих электронов E_0 , где такое влияние структуры мишени толщиной d может проявиться, ограничен. Нижняя граница этого диапазона энергии E_{\min} определяется отличием от нуля коэффициента прохождения электронов через мишень $F_t(E_0, d) > 0$. В области энергии $E_0 < E_{\min}$ все падающие на мишень частицы либо отражаются от нее, либо поглощаются. В этом случае для коэффициентов отражения $F_r(E_0, d)$ и поглощения $F_a(E_0, d)$ выполняется соотношение $F_r(E_0, d) + F_a(E_0, d) = 1$. Верхняя граница диапазона энергии E_{\max} связана с тем, что в случае быстрых частиц ($E_0 > E_{\max}$) почти все налетающие электроны проходят через мишень ($F_t(E_0, d) \approx 1$). Из-за малых потерь энергии последовательность и количество слоев мишени в этом диапазоне энергии слабо влияет на поглощаемую энергию $E_{\text{dep}}(E_0, d)$. В диапазоне энергии $E_{\min} \leq E_0 \leq E_{\max}$ поглощенная мишенью энергия $E_{\text{dep}}(E_0, d)$, количество отраженных $F_r(E_0, d)$ и прошедших через мишень $F_t(E_0, d)$ частиц, а также их средняя энергия $E_r(E_0, d)$ и $E_t(E_0, d)$ могут зависеть от количества и последовательности слоев.

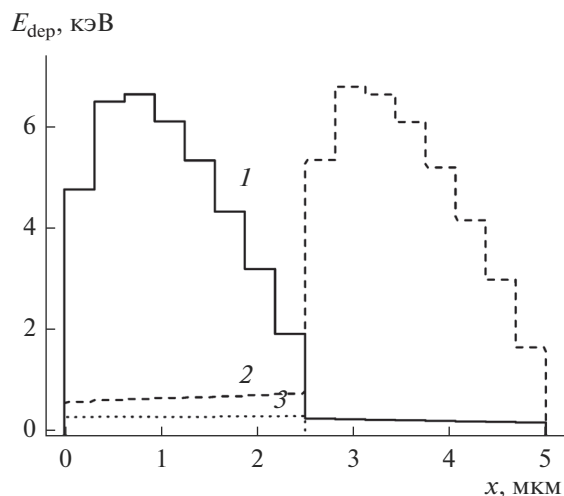


Рис. 1. Распределение поглощенной энергии по глубине двухслойной мишени толщиной $d = 5$ мкм при прохождении через нее электронов с энергией $E_0 = 80$ кэВ, рассчитанное по программе GEANT4: 1 – W/C-мишень; 2 – C/W-мишень; 3 – углеродная мишень толщиной $d/2$.

Имеется ряд программ моделирования прохождения электронов через многослойную аморфную среду: GEANT4 [11], PENELOPE [12], CASINO [13], MCNP [14] и другие. Программы отличаются своими возможностями: методом моделирования столкновения электронов с атомами, способами задания источника и материалов мишени, диапазоном энергии электронов. В настоящей работе рассмотрены особенности прохождения быстрых электронов через многослойную мишень и влияние структуры этой мишени на распределение в ней поглощенной энергии.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты распределения поглощенной мишенью энергии по глубине слоя $E_{\text{dep}}(E_0, x)$, где x ($x \leq d$) – глубина слоя, и во всей мишени $E_{\text{dep}}(E_0, d)$ при прохождении через нее электронов с энергией E_0 , падающих по нормали к поверхности, проводили по программам GEANT4 (TestEm11) [11] и PENELOPE [12]. Толщины слоев из углерода ($\rho_C = 2.0$ г/см³) и вольфрама ($\rho_W = 19.3$ г/см³) задавали одинаковыми при четном количестве слоев n . Эту комбинацию материалов с большой разницей в плотности часто используют в различных прикладных задачах [15]. В общем случае при прохождении многослойной мишени толщиной d поглощенная энергия $E_{\text{dep}}^{W/C}(E_0, d)$ в W/C-мишени, где первый слой состоит из вольфрама, следующий из углерода и далее они чередуются, может отличаться от поглощенной энергии $E_{\text{dep}}^{C/W}(E_0, d)$ в C/W-мишени, где слои меняют местами. При

анализе процесса прохождения электронов через многослойную мишень надо также учитывать отличия коэффициентов отражения $F_r^{W/C}(E_0, d)$, $F_r^{C/W}(E_0, d)$, прохождения $F_t^{W/C}(E_0, d)$, $F_t^{C/W}(E_0, d)$, а также средней энергии отраженных $E_r^{W/C}(E_0, d)$, $E_r^{C/W}(E_0, d)$ и прошедших через мишень $E_t^{W/C}(E_0, d)$, $E_t^{C/W}(E_0, d)$ электронов.

Поглощенная на глубине x энергия $E_{\text{dep}}(E_0, x)$ отличается в углероде и вольфраме из-за разницы в плотности и тормозной способности двух материалов. Из сравнения площади под кривыми 1 и 2 на рис. 1 следует, что в случае двухслойной мишени из углерода и вольфрама поглощенная энергия $E_{\text{dep}}(E_0, d)$ также отличается, и $E_{\text{dep}}^{W/C}(E_0, d) < E_{\text{dep}}^{C/W}(E_0, d)$. Неаддитивность суммы означает корреляцию процессов поглощения в разных областях многослойной мишени. Чтобы понять причины этого эффекта, были выполнены дополнительные расчеты для мишени, когда второго слоя нет. Присутствие второго слоя из углерода заметно не меняет распределение поглощенной энергии в первом слое из вольфрама, так как электрон проникает из более плотного материала в менее плотный. Ситуация качественно меняется для потерь энергии электронов в двухслойной мишени, если первый слой углерод, а второй вольфрам. Энергия, поглощенная мишенью только из углерода (рис. 1, кривая 3), заметно ниже, чем, когда у мишени есть второй слой из вольфрама. Объясняется этот эффект тем, что отражение электронов от границы раздела двух слоев для C/W-мишени увеличивает поглощение первым слоем.

Эффект неаддитивности поглощенной всей мишенью энергии будем характеризовать параметром

$$\delta E_{\text{dep}}(E_0, d) = E_{\text{dep}}^{W/C}(E_0, d) - E_{\text{dep}}^{C/W}(E_0, d).$$

В широком диапазоне энергии E_0 результаты расчетов для прохождения электронов через мишень из углерода и вольфрама дают $\delta E_{\text{dep}}(E_0, d) < 0$ (рис. 2). Результаты расчетов по программам GEANT4 и PENELOPE согласуются между собой с точностью около 5–7%. Диапазон значений энергии, где проявляются эффекты структуры мишени, ограничен и зависит от энергии E_0 и толщины мишени d . При прохождении быстрых электронов ($F_t(E_0, d) \rightarrow 1$) эффект неаддитивности потерь энергии становится слабым ($|\delta E_{\text{dep}}(E_0, d)| < 10$ эВ).

Количество прошедших через мишень частиц уменьшается при увеличении толщины мишени d . Пусть $d_{\text{min}}(E_0)$ – минимальная толщина мишени, для которой количество прошедших через нее

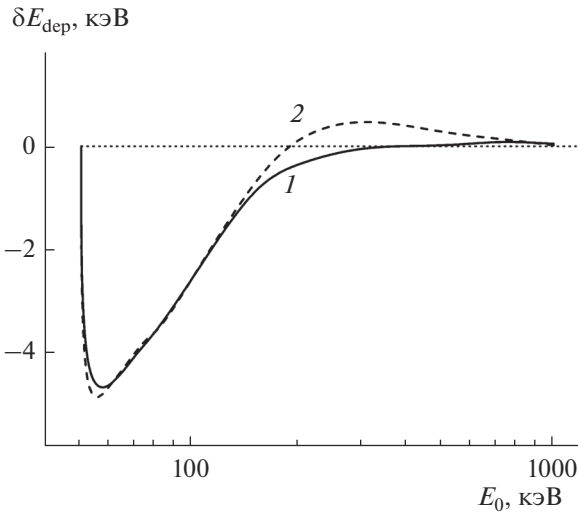


Рис. 2. Зависимость разности значений поглощенной энергии в W/C- и C/W-мишенях толщиной $d = 5$ мкм от энергии электронов E_0 , рассчитанная по программам: 1 – PENELOPE; 2 – GEANT4.

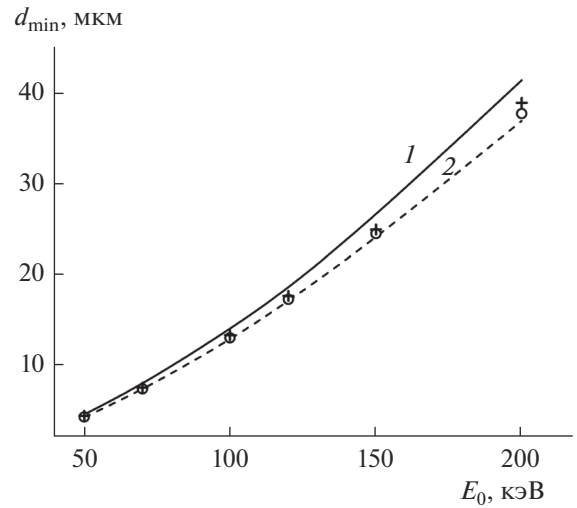


Рис. 3. Минимальная толщина двухслойной мишени, при которой количество прошедших через нее электронов не превышает 1%: 1 – GEANT4, W/C-мишень; 2 – GEANT4, C/W-мишень; (+) PENELOPE, W/C-мишень; (○) PENELOPE, C/W-мишень.

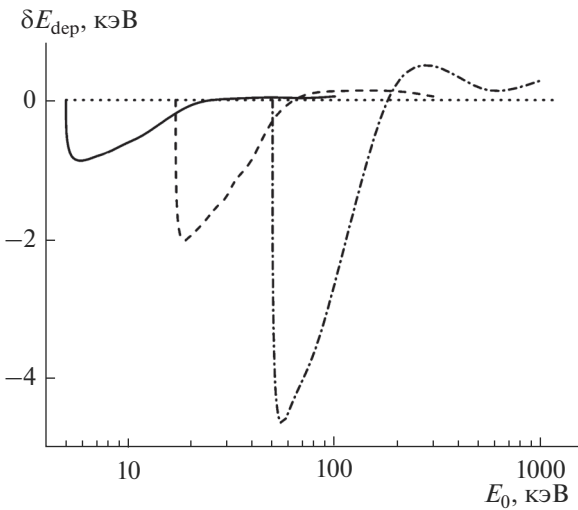


Рис. 4. Зависимость разности значений поглощенной двухслойными мишенями энергии от энергии электрона, рассчитанная по программе GEANT4 для разной толщины мишеней: 1 – 0.2; 2 – 1; 3 – 5 мкм.

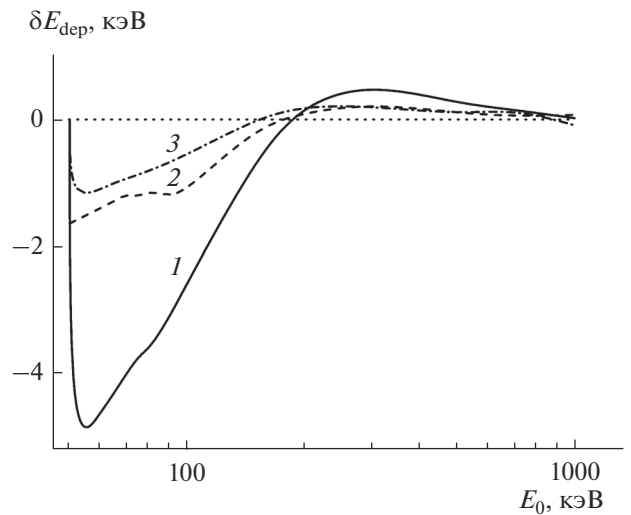


Рис. 5. Зависимость разности значений энергии, поглощенной многослойными мишенями толщиной $d = 5$ мкм, от энергии электронов E_0 , рассчитанная по программе GEANT4 для количества пар слоев n : 1 – 1; 2 – 3; 3 – 4.

электронов $F_i(E_0, d)$ не превышает 1%. Величина $d_{\text{min}}(E_0)$, характеризующая коэффициент прохождения быстрых электронов через мишень, зависит от последовательности слоев (рис. 3). С увеличением поглощенной мишенью энергии толщина $d_{\text{min}}(E_0)$ уменьшается приблизительно как $d_{\text{min}}(E_0) \sim 1/E_{\text{dep}}(E_0)$, поэтому $d_{\text{min}}^{\text{W/C}}(E_0) - d_{\text{min}}^{\text{C/W}}(E_0) > 0$, и эти отличия могут достигать нескольких микрометров.

Диапазон, где обнаружен эффект неаддитивности потеря энергии, зависит от толщины мишени $E_0^{\text{min}}(d) \leq E_0 \leq E_0^{\text{max}}(d)$ (рис. 4). В случае медленных столкновений $E_{\text{dep}}(E_0, d) \rightarrow E_0$, и перераспределение $E_{\text{dep}}(E_0, x)$ в разных слоях мишени слабо влияет на сумму $E_{\text{dep}}(E_0, d)$. Такое же слабое влияние этого эффекта в области быстрых столкновений, где прошедшие через мишень электроны уносят большую часть энергии $E_i(E_0, d) \rightarrow E_0$. Результаты расчетов показывают, что энергия

электрона E_0^* , при которой отличия в поглощенной энергии $\delta E_{\text{dep}}(E_0, d)$ достигают максимума, приблизительно пропорциональна толщине мишени ($E_0^* \sim d$). Аналогичная закономерность получается для максимального отличия потерь энергии в этой области энергии: $|\delta E_{\text{dep}}(E_0^*, d)| \sim d$.

При увеличении количества слоев мишень становится более однородной и эффект неаддитивности потерь энергии уменьшается (рис. 5). Эта особенность наблюдается во всем диапазоне энергии E_0 . Вследствие этого структура двухслойной мишени в наибольшей степени влияет на поглощение энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поглощенная всей мишенью энергия — это сумма значений энергии, поглощенной в каждом слое. Если мишень многослойная, то результат этого суммирования может зависеть от последовательности и количества слоев. Такой эффект “неаддитивности” потерь энергии, когда перестановка “слагаемых” изменяет сумму, можно объяснить корреляцией процессов поглощения в соседних слоях мишени. Результаты расчетов по программам GEANT4 и PENELOPE согласуются между собой и показывают, что при прохождении двухслойной W/C-мишени потери энергии электронов меньше, чем в C/W-мишени такой же толщины. Причина неаддитивности потерь энергии электронов в многослойной мишени из углерода и вольфрама связана с перераспределением поглощенной энергии, которое вызвано отражением электронов от границы раздела материалов. Наиболее сильно эта особенность проявляется при переходе пучка электронов из материала с более низкой тормозной способностью в материал с более высокой тормозной способностью. Увеличение количества слоев делает мишень более однородной и уменьшает влияние структуры мишени на перераспределение поглощенной энергии

в ней. Следовательно, эффект неаддитивности наиболее сильно проявляется в случае двухслойной мишени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goldstein J., Newbury D.E., Joy D.C. et al. // Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. N.Y.: Springer Science, 2007. P. 647.
2. Рид С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера, 2008. 229 с.
3. Vos M., Chatzidimitriou-Dreismann C.A., Abdul-Redah T., Mayers J. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2005. V. 227. P. 233.
4. Афанасьев В.П., Грязев А.С., Капля П.С. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 9. С. 44.
5. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А. и др. Введение в физику поверхности / Ред. Сергиенко В.И. М.: Наука, 2006. 490 с.
6. Trofymenko S.V., Nazhmudinov R.M., Shchagin A.V. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2020. V. 476. P. 44.
7. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
8. Модель космоса. Т. II. Взаимодействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Ред. Новиков Л.С. М.: Изд-во НИИЯФ МГУ, 2007. 1145 с.
9. Брусиловский Б.А. Кинетическая ионно-электронная эмиссия. М.: Энергоатомиздат, 1990. 183 с.
10. Новиков Н.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2010. № 3. С. 92.
11. Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2016. V. 835. P. 186.
12. Sempau J., Fernández-Varea J.M., Acosta E., Salvat F. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2003. V. 207. P. 107.
13. Demers H., Poirier-Demers N., Couture A.R. et al. // Scanning. 2011. V. 33. P. 135.
14. X-5 Monte Carlo Team, MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Los Alamos National Laboratory, 2003.
15. Navarro M.X., Delgado R.R., Lagally M.G. et al. // Fusion Sci. Technol. 2017. V. 72. P. 713. <https://doi.org/10.1080/15361055.2017.135048>

Nonadditivity Effect for Electron Energy Loss When Passing through Multilayer Targets

N. V. Novikov^{1,*}, N. G. Chechenin¹, A. A. Shirokova¹

¹Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: nvnovikov65@mail.ru

The number and the sequence of layers of a tungsten and carbon target changes the energy losses of fast electrons in it. The results of calculations using the GEANT4 and PENELOPE programs agree with each other and show that when passing through a W/C target, electrons lose less energy than in a C/W target. The effect is explained by the redistribution of the deposited energy, which is caused by the reflection of electrons from the interface of materials. An increase in the number of layers leads to a decrease in the influence of the target structure on the distribution of the energy absorbed in it.

Keywords: electron energy losses, multilayer target, deposited energy.