

зданы высоко производительные системы, они смогут получить достаточно широкое распространение в огромном количестве сфер.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Буртыка Ф. Б. Симметричное полностью гомоморфное шифрование с использованием неприводимых матричных полиномов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 8. С. 107–122.
2. Manish M. Potey, C. A. Dhote, Deepak H. Sharma. Homomorphic Encryption for Security of Cloud Data // Procedia Computer Science. 2016. Т. 79 № 1 С. 175–181.
3. Бабенко Л. К., Буртыка Ф. Б., Макаревич О. Б., Трепачева А. В. Методы полностью гомоморфного шифрования на основе матричных полиномов // Вопросы кибербезопасности. № 1 (9). 2015. С. 14–25.
4. Дупленко А. Г. Направления развития гомоморфного шифрования в Российской Федерации // Техника. Технологии. Инженерия. 2016. №1. С. 9–11.

РАСЧЕТ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО КОЭФФИЦИЕНТА ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

С. В. Козодоев, А. В. Леонтьев, А. О. Поживилко

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

E-mail: avl141055@gmail.com

В программном комплексе CASINO проведён расчёт коэффициента обратного рассеяния электронов от различных элементов. На основании полученных результатов, определены параметра моделирования, позволяющие получать данные, наиболее близкие к экспериментальным.

Ключевые слова: коэффициент обратного рассеяния электронов; casino; метод Монте-Карло; моделирование.

Введение. Коэффициент нормального отражения электронов (КНОЭ) от поверхности твердых тел является весьма важным параметром для ряда практически важных приложений, таких как методы диагностики материалов электронной техники (оже-электронная спектроскопия, электронный микроанализ и др.), а также для решения широкого круга задач электронной литографии. Для описания движения электронов в твердом теле ранее достаточно успешно использовали аналитическая модель Арчарда [1], согласно которой электроны сначала, не рассеиваясь, проходят некоторый путь X_D , а затем изотропно рассеиваются во все стороны. Полученные таким способом результаты, однако, не лучшим образом согласуются с экспериментальными данными, так как модель Арчарда не настолько близка к реальной физической картине, чтобы служить надежной основой для количественных расчетов. Тем не менее,

оказалось, что при всей своей простоте диффузионная модель правильно отражает многие качественные закономерности явления и дает удовлетворительную количественную оценку размеров зоны воздействия остро сфокусированных электронных пучков и ориентировочные значения КНОЭ.

Прогресс в соотношении теории и эксперимента по КНОЭ был достигнут при использовании метода Монте-Карло для описания движения электронов в твердом теле [2-3]. Хорошим примером такой программы является программный комплекс CASINO [4]. Для определения КНОЭ можно использовать широкий выбор физических моделей взаимодействия электронов с веществом, реализованных в программном комплексе CASINO.

Целью настоящей работы являлся расчет КНОЭ для всех элементов периодической системы, выбор наиболее подходящих физических моделей путем сравнения расчетных данных с экспериментальными.

Результаты расчетов и обсуждение. Программный комплекс CASINO реализует метод Монте-Карло численного моделирования процесса экспонирования вещества пучком электронов [4]. Данная программа позволяет строить траектории электронов в веществе, при выборе и варьировании множества параметров, играющих важную роль при экспонировании. Возможные физические модели: общее сечение рассеяния, дифференциальное сечение рассеяния, эффективное сечение рассеяния, потенциал ионизации, генератор случайных чисел, направляющий косинус представлены на рис. 1.

Поскольку большое значение имеет зависимость коэффициента обратного рассеяния от массы атома мишени A , то целесообразно просчитать эту зависимость. Ниже предоставлены зависимости коэффициента обратного рассеяния от атомной массы мишени, рассчитанные по модели Арчарда [1], полученные с помощью программы CASINO, а также экспериментальные значения (рис. 2) для энергии электронного пучка $E=20$ кэВ. Показано, что минимальное значение псевдоисторий для адекватного моделирования составляет не менее 10^4 . Получено, что наилучшее совпадение экспериментальных данных ($E=20$ кэВ) с расчетными имеет место в случае приближения Мотта для полного и дифференциального сечений и формулы Гризинского для эффективного сечения ионизации.

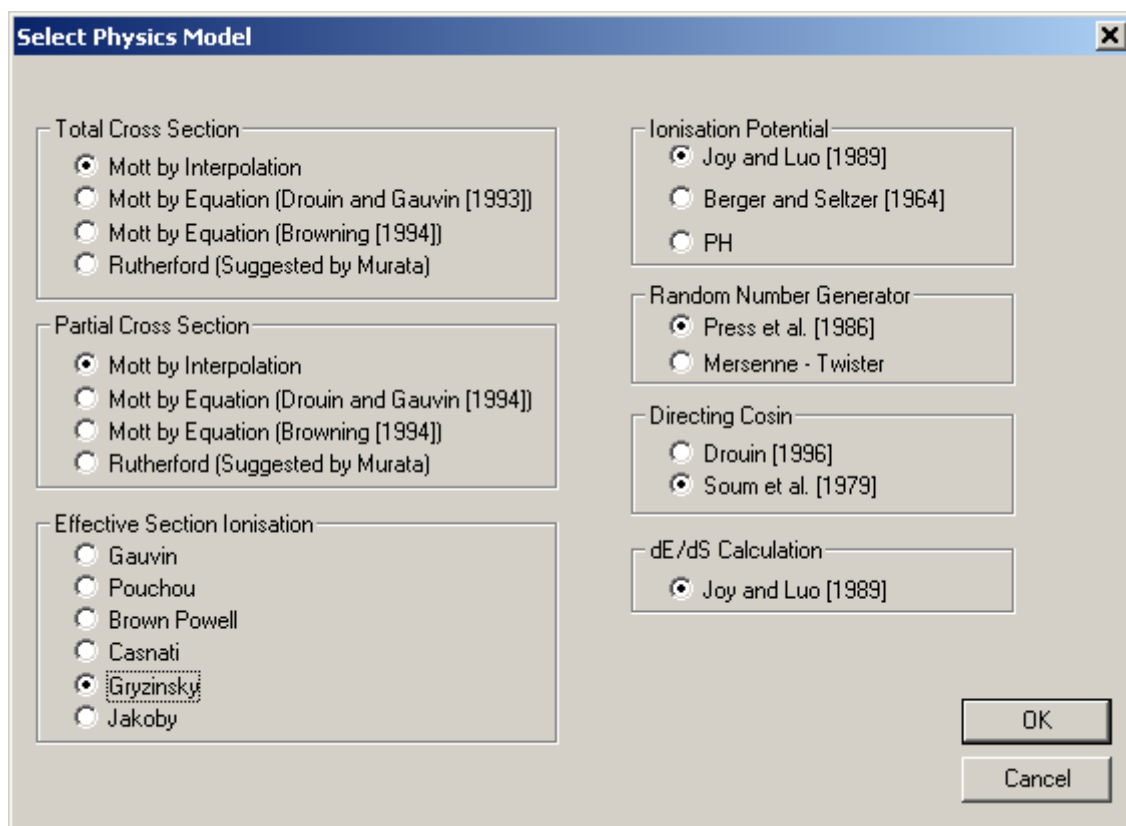


Рис. 1. Выбор физических моделей в программном комплексе CASINO.

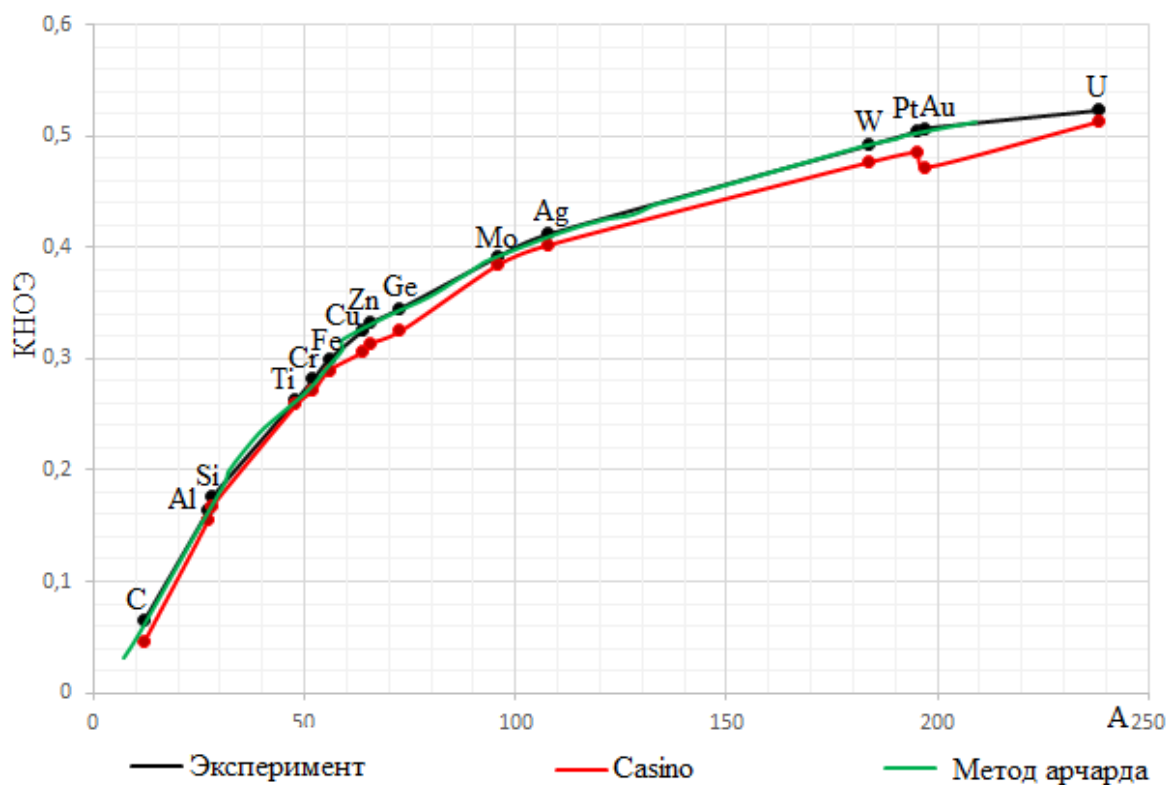


Рис. 2. Зависимость КНОЭ от атомной массы.

Для Cu, Zn, Ge, W и Pt наблюдается незначительное, а для Au – существенное отклонение значения КНОЭ от экспериментальных. Это связано с осцилляцией тормозной способности электронов в твердых телах. Тем не менее, оказалось, что при всей своей простоте диффузионная модель достаточно правильно отражает многие качественные закономерности явления и дает удовлетворительную количественную оценку размеров зоны воздействия остро сфокусированных электронных пучков. Метод МК дает совпадение с экспериментальными значениями не хуже 2% при правильном выборе физических моделей. Обсуждаются вопросы выбора расчётных моделей (рис. 1) в зависимости от энергии электронного пучка.

Представленная работа выполнена в рамках лабораторного практикума по спецкурсам, читаемым студентам кафедры физической электроники и нанотехнологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Аброян И. А., Андронов А. Н., Титов А. И. Физические основы электронной и ионной технологии. М.: Высшая школа, 1984. 316 с.
2. Hunger H. J., Kuchler L. Measurements of the electron backscattering coefficient for quantitative EPMA in the energy range of 4 to 40 keV // Phys. Stat. Sol. (A). 1979. p. 45–48.
3. Ч.Х. Кат. Компьютерное моделирование методоммонте–карло процессов переноса электронов втвёрдотельных структурах в нанoeлектронике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www1.vstu.ru/files/thesis_defence/15004/chan_hay_kat.pdf. – Дата доступа: 20.02.2020.
4. Casino. Monte Carlo simulation of electron trajectory in solids [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gel.usherbrooke.ca/casino/>. – Дата доступа: 22.02.2020.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ–КАРЛО ФИЗИЧЕСКОГО РАСПЫЛЕНИЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

В. С. Оразаев, А. В. Леонтьев

Белорусский государственный университет, г. Минск

E-mail: vadim_orazaev_1998@mail.ru

Представлены, рассчитанные с помощью программного комплекса SRIM-2013, значения коэффициента распыления Si ионами He, Ne, Ar, Kr и Xe при энергиях 1, 5, 10, 20, 40, 60, 80 и 100 кэВ. Проведена оценка глубины зарождения распыленных атомов.

Ключевые слова: SRIM-2013; Метод Монте-Карло; физическое распыление.