

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.

Введение. Явление распыления твёрдых тел под действием бомбардировки его поверхности потоком ионов получило название физического распыления. Различают три режима распыления: прямого выбивания, линейных и нелинейных каскадов [1]. Коэффициент распыления – отношение числа выбитых атомов к числу падающих ионов.

Для моделирования физического распыления твердых тел в настоящее время широко используется программный комплекс SRIM-2013 [2], реализующий метод Монте-Карло [3].

Целью данной работы являлась оценка глубины зарождения распыленных атомов в зависимости от условий ионного облучения. Расчет данной величины представляет с одной стороны чисто научное значение, с другой - позволяет существенно снизить затраты времени на проведение вычислений.

Результаты расчетов и обсуждение. Для оценки глубины зарождения распыленных атомов предложен последовательный расчет коэффициента распыления с пошаговым увеличением области моделирования. Сначала определялся “истинный расчетный” коэффициент распыления Y_0 , соответствующий области моделирования, превышающий (3-4) R_p , затем рассчитывались парциальные вклады Y_i .

В таблицах 1 и 2 приведены результаты, используемые для последующего построения гистограмм. Для расчета парциальных вкладов в Y_{si} в процентном соотношении использовалась формула $(Y_i - Y_{i-1}) / Y_0$. Вычисления проводились для расчета коэффициента распыления кремния ионами Ar, Kr и Xe с энергией в 20, 40, 60, 80 и 100 кэВ, и для ионов He и Ne с энергией в 1, 5, 10, 20, 40, 60, 80 и 100 кэВ. Число псевдоисторий составляло не менее $N=10^4$. При моделировании распыления ионами He, когда имеет место механизм прямого выбивания, число $N=10^5$.

Из таблиц 1, 2 и рисунков 1 – 4 можно увидеть, что при малых энергиях в 1-10 кэВ выход распыленных частиц оказывается максимальным в пределах 10-20 Å. Наибольший вклад в значение коэффициента распыления вносят ионы, проходящие до 30 Å.

При энергиях в 60-100 кэВ выход распыленных частиц оказывается максимальным в пределах 10-30 Å. Ионы, проходящие первые 10-30 Å, вносят наибольший вклад в значение коэффициента распыления.

Таблица 1

Значения коэффициента распыления Si ионами He, Ne при энергиях 1, 5 и 10 кэВ в зависимости от толщины мишени

E=1кэВ Ne (0.9977=100%)				E=5кэВ Ne (1.34=100%)				E=10кэВ Ne (1.34=100%)			
A	Y _{Si}	Y _i -Y _{i-1}	(Y _i -Y _{i-1})%	A	Y _{Si}	Y _i -Y _{i-1}	(Y _i -Y _{i-1})%	A	Y _{Si}	Y _i -Y _{i-1}	(Y _i -Y _{i-1})%
10	0.6141	0.6141	61.6%	10	0.5216	0.5216	38.9%	10	0.4446	0.4446	33.2%
20	0.9238	0.3097	31.0%	20	0.8664	0.3448	25.7%	20	0.7019	0.2573	19.2%
30	0.9858	0.062	6.2%	30	1.01	0.1436	10.7%	30	0.887	0.1851	13.8%
40	0.96	0	0.0%	40	1.15	0.14	10.4%	40	0.9494	0.0624	4.7%
50	0.9652	0	0.0%	50	1.17	0.02	1.5%	50	1.05	0.1006	7.5%
60	0.9356	0	0.0%	60	1.24	0.07	5.2%	60	1.12	0.07	5.2%
70	0.9695	0	0.0%	70	1.24	0	0.0%	70	1.1	0	0.0%
80	0.9542	0	0.0%	80	1.25	0.01	0.7%	80	1.16	0.04	3.0%
90	0.9521	0	0.0%	90	1.29	0.04	3.0%	90	1.17	0.01	0.7%
100	0.9463	0	0.0%	100	1.26	0	0.0%	100	1.16	0	0.0%

Таблица 2

Значения коэффициента распыления Si ионами He, Ne при энергиях 20, 60 и 100 кэВ в зависимости от толщины мишени

E=20кэВ Ne (1.22 = 100%)				E=60кэВ Ne (0.8536 = 100%)				E=100кэВ Ne (0.4472 = 100%)			
A	Y _{Si}	Y _i -Y _{i-1}	(Y _i -Y _{i-1})%	A	Y _{Si}	Y _i -Y _{i-1}	(Y _i -Y _{i-1})%	A	Y _{Si}	Y _i -Y _{i-1}	(Y _i -Y _{i-1})%
10	0.3812	0.3812	31.2459	10	0.2296	0.2296	26.89784	10	0.1934	0.1934	43.24687
20	0.5156	0.1344	11.01639	20	0.3894	0.1598	18.72071	20	0.2608	0.0674	15.07156
30	0.6732	0.1576	12.91803	30	0.4124	0.023	2.69447	30	0.3452	0.0844	18.87299
40	0.7472	0.074	6.065574	40	0.4194	0.007	0.820056	40	0.3464	0.0012	0.268336
50	0.8252	0.078	6.393443	50	0.4846	0.0652	7.638238	50	0.3084	0	0
60	0.8162	0	0	60	0.5214	0.0368	4.311153	60	0.3224	0	0
70	0.9098	0.0846	6.934426	70	0.4862	0	0	70	0.415	0.0686	15.33989
80	0.899	0	0	80	0.4916	0	0	80	0.372	0	0
90	0.9502	0.0404	3.311475	90	0.5664	0.045	5.27179	90	0.4158	0.0008	0.178891
100	0.98	0.0298	2.442623	100	0.5058	0	0	100	0.363	0	0

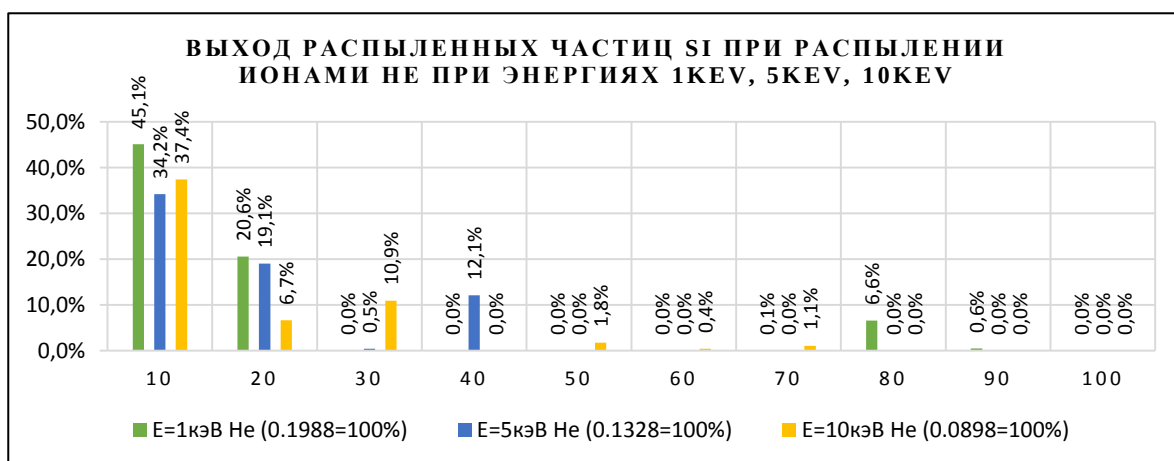


Рис. 1. Выход распыленных частиц Si при распылении ионами He при энергиях 1еВ, 5 кеВ, 10 кеВ.

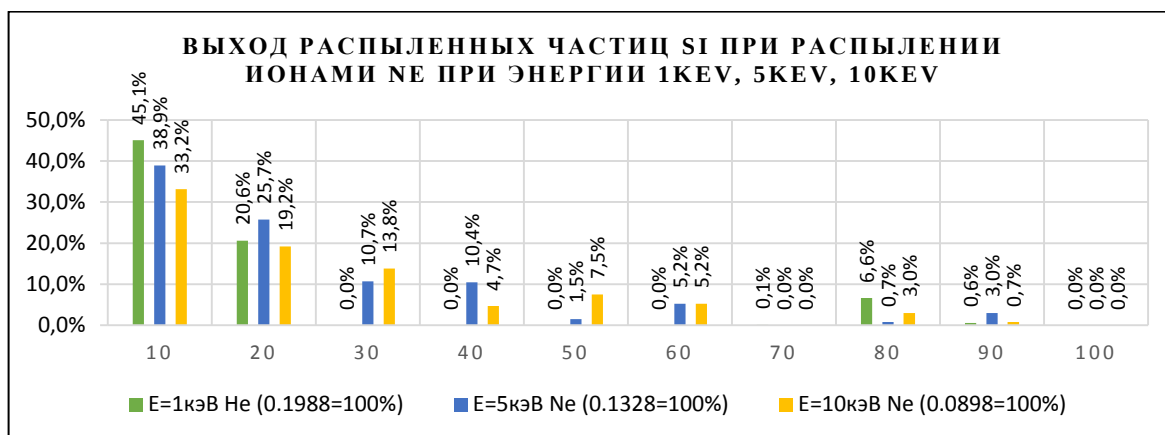


Рис. 2. Выход распыленных частиц Si при распылении ионами Ne при энергиях 1, 5 и 10 кэВ.

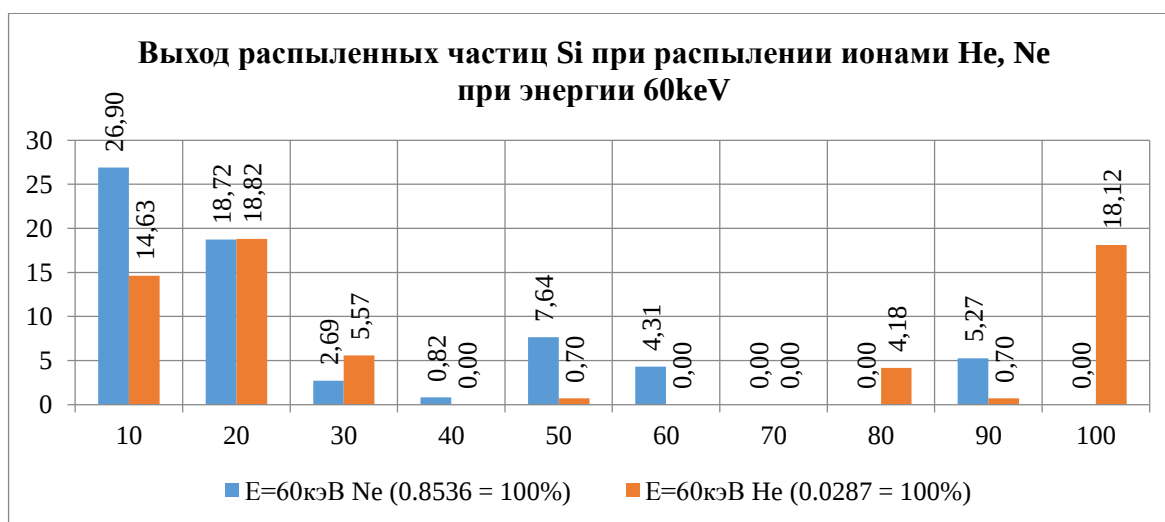


Рис. 3. Выход распыленных частиц Si при распылении ионами He, Ne при энергии 60 кэВ.

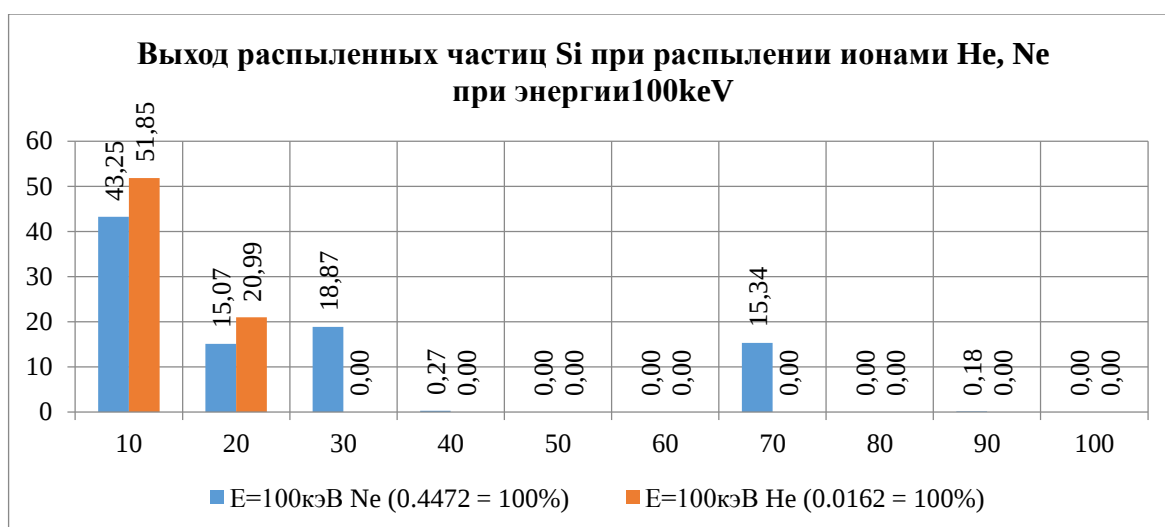


Рис. 4. Выход распыленных частиц Si при распылении ионами He, Ne при энергии 100 кэВ.

Заключение. При моделировании распыления Si ионами Ne в диапазоне энергий 10-100 кэВ разработанная методика требует доработки, что связано с доминирующим механизмом прямого выбивания атомов мишени. Установлено, что при распылении Si ионами Ne, Ar, Kr и Xe максимальная глубина зарождения распылённых атомов составила примерно 100 Å.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Характеристики ионного распыления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://256bit.ru/spektr/izmeren20.html>. – Дата доступа: 05.12.2018.
2. SRIM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://srim.org>. – Дата доступа: 05.12.2018.
3. Метод Монте-Карло [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/post/274975/>. – Дата доступа: 05.12.2018.

МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УЧЕБНОЙ НАГРУЗКИ ПРОФЕССОРСКО- ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОГО СОСТАВА

М. Д. Рак, Е. А. Чудовская

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

E-mail: mtimovets@mail.ru

Созданный программный продукт предназначен для автоматизации процесса распределения нагрузки профессорско – преподавательского состава кафедры. Представлен пользовательский интерфейс приложения, содержащий все необходимое для сокращения непродуктивных временных затрат при выполнении рутинной части этой работы.

Ключевые слова: обработка данных; учебная нагрузка.

Одними из основных вопросов работы учебных отделов учреждений в системе образования являются распределение и учет учебной нагрузки преподавателей. Для их организации есть серия документов, описывающих все дисциплины высшего учебного заведения (ВУЗа). Эти документы включают в себя, кроме названия, предлагаемое количество часов для проведения лекций, практических занятий, лабораторных работ, консультаций по теме, зачетов, экзаменов и проч. Все имеющиеся часы должны быть распределены соответствующим образом между работающими на кафедре сотрудниками.

В связи с тем, что в ВУЗе имеется четыре курса обучения бакалавров, два года занятия магистрантов, да еще и аспирантура, каждый раздел из