

УДК 537.533.35.7:519.245

Об одной особенности энергоуглового спектра вторичных электронов

С. С. Борисов

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Россия

С. И. Зайцев

Институт проблем технологий микроэлектроники РАН, г. Черноголовка Московской обл., Россия

Рассмотрены проблемы моделирования энергоуглового спектра обратнорассеянных и истинно вторичных электронов методом как дискретных, так и непрерывных потерь. Показано наличие артефакта углового спектра — отклонения от синусоидального закона в диапазоне углов ~ 177 — 180° от направления пучка.

Диагностика с помощью растровой электронной микроскопии и технологическое использование электронных пучков (в основном в микроэлектронике) определяют неослабляющийся интерес к разработке теоретических и математических моделей взаимодействия быстрых электронов с веществом в целях адекватной интерпретации экспериментальных данных в диагностике и предсказании результата технологического воздействия.

Появление новых, более точных, датчиков, позволяющих анализировать с высоким разрешением ($<1\%$) характеристики эмиссии вторичных электронов, такие как энергетические и угловые спектры, заставляют разрабатывать более точные модели рассеяния частиц в веществе.

Существуют два подхода к моделированию рассеяния электронов в твердых телах: приближение дискретных и непрерывных потерь. Приближение, в котором все существенные сечения рассеяния (упругое взаимодействие с атомными ядрами, ионизация внешних и внутренних атомных оболочек, генерация Оже-электронов, плазмонов в диапазоне энергий до 100 кэВ, потери в этих каналах рассеяния являются доминирующими и составляют $>97\%$ всех потерь, поэтому

остальными каналами неупругого рассеяния можно пренебречь) рассматриваются по отдельности, можно назвать приближением дискретных потерь в отличие от приближения непрерывных потерь, в котором потери энергии вычисляются исходя из непрерывного характера потерь, рассчитываемого обычно по формуле Бете.

Нами была создана программа на основе метода Монте-Карло, в которой есть возможность использовать оба этих приближения и сравнивать полученные ими результаты. В качестве сечения упругого взаимодействия используется формула Резерфорда либо Мотта.

Процесс ионизации атомов описывается сечением Гризинского для электронов внутренних атомных оболочек и сечением Мёллера для электронов внешних оболочек. Более подробно модель описана в работе [1], где рассматривалась разница между результатами, получаемыми при моделировании с использованием различных приближений.

Результаты моделирования

Считается [2], что угловое распределение вторичных электронов подчиняется синусоидальному закону. Проведенное моделирование показывает, что имеются некоторые отклонения от данного правила для вторичных электронов (с энергией > 50 эВ). На рис. 1 приведен пример полученного с помощью моделирования углового спектра вторичных электронов, эмитированных с поверхности полубесконечного образца из Au, при энергии первичных частиц в 20 кэВ, а на рис. 2 — аналогичные графики для Au, Ag, Cu и Si для энергий 10 и 30 кэВ. Как видно из рисунков, на переведенных угловых спектрах виден пик в направлении, обратном направлению пучка. Данный пик наблюдается и для неперпендикулярного падения пучка — на рис. 3 приведен угловой спектр для случая падения первичных электронов под углом 45° к поверхности образца (для того чтобы суммирование по телесному углу не сделало пик неразличимым, датчик вторичных электронов считается направленным перпендикулярно направлению первичных электронов). При этом для истинно вторичных (с энергией < 50 эВ), угловой спектр которых приведен на рис. 4, такого пика не наблюдается. Для электронов, испущенных в диапазон углов 177—180° от направления первичных электронов, был построен энергетический спектр (рис. 5), из которого видно, что в области пика преобладают электроны с высокой энергией — испытывавшие относи-

тельно небольшое количество взаимодействий (например несколько сгенерировавших плазмонов).

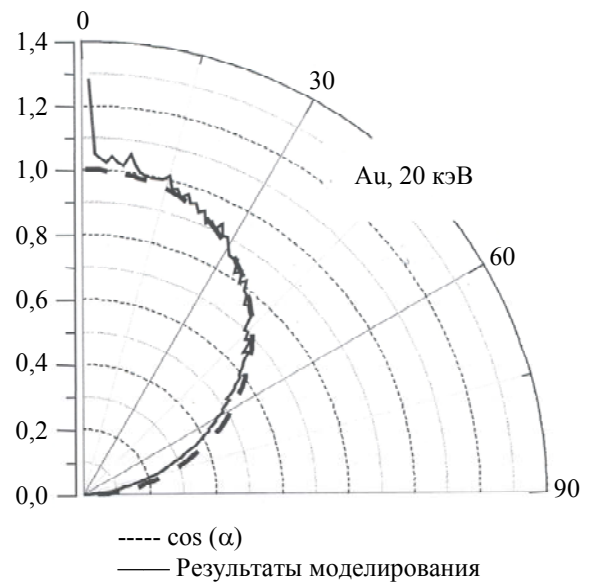


Рис. 1. Угловой спектр электронов, отраженных от массивного Au при перпендикулярном падении пучка на образец, нормированный на единицу

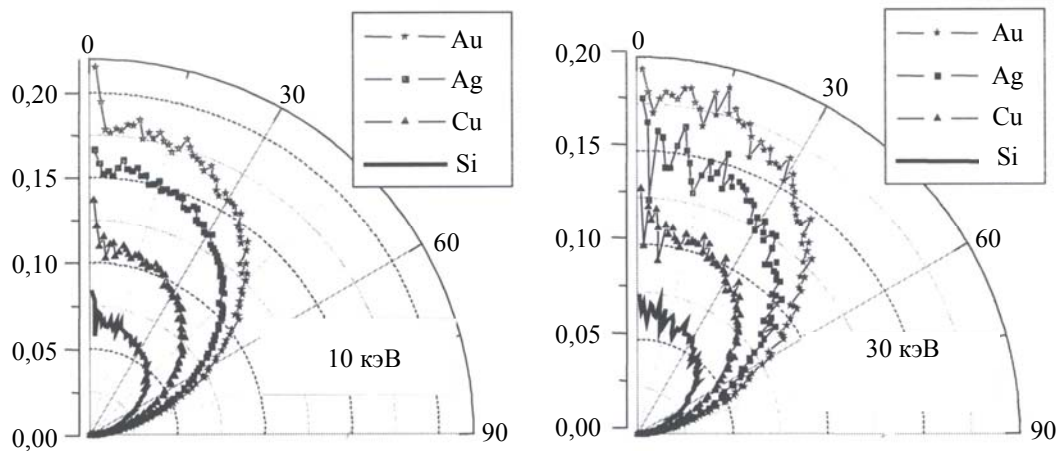


Рис. 2. Угловые спектры для случая перпендикулярного падения пучка на образцы из различных материалов для энергий 10 и 30 кэВ

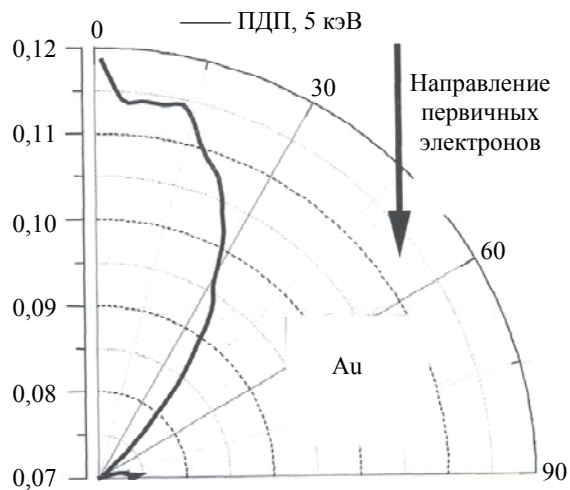


Рис. 3. Угловой спектр электронов, отраженных от массивного Au при падении пучка на образец под углом 45°. Датчик считается расположенным перпендикулярно пучку

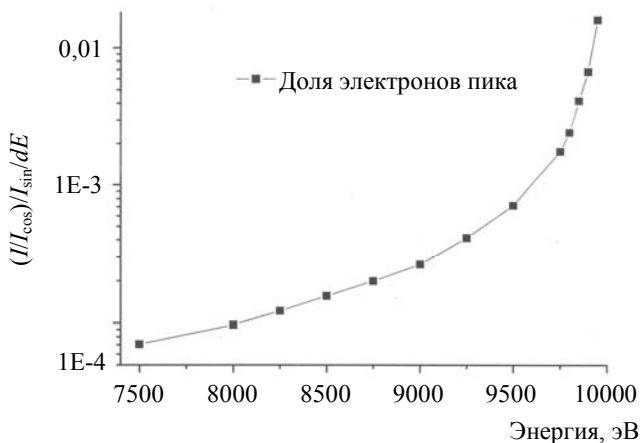


Рис. 5. Энергетический спектр вторичных электронов в области углов 177—180° от направления пучка электронов с энергией 10 кэВ, падающего на массивный Au

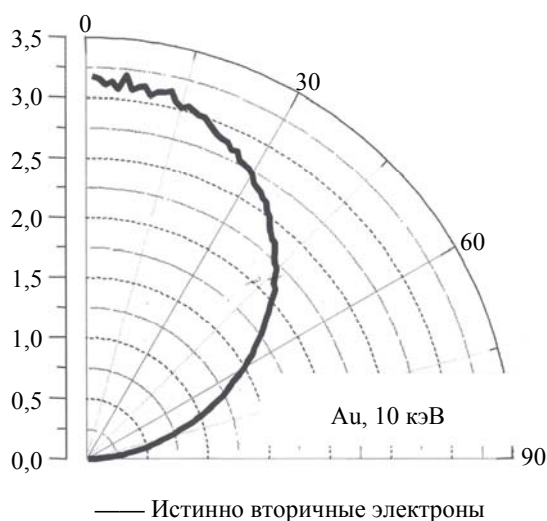


Рис. 4. Угловой спектр истинно вторичных электронов, отраженных от массивного Au при перпендикулярном падении пучка на образец

Обсуждение

Экспериментальное наблюдение данной области углового спектра, к сожалению, затруднено близостью детектора к пучку.

Как видно из энергетического спектра электронов рассматриваемого пика, его формируют электроны с высокой энергией — на долю электронов с энергией, на 50 эВ меньше энергии первичных электронов, приходится > 50 % электронов. По-видимому — это электроны, испытавшие малое число взаимодействий с небольшой потерей энергии и упругоотраженные назад.

Сечение упругого взаимодействия в рассматриваемом диапазоне энергий примерно в пять раз больше других сечений. Вычислим вероятность отражения электрона назад на угол ~177—180° на протяжении транспортной длины свободного пробега относительно упругого взаимодействия и сравним ее с ожидаемым коэффициентом рассеяния по косинусоидальному закону. Для Au при энергии первичных электронов ~20 кэВ коэффициент обратного отражения составляет ~0,5 [2], что дает коэффициент обратного отражения ~0,04 при угле 177—180° в соответствии с косинусоидальным распределением.

Исходя из сечений Резерфорда и Мотта, вычислим вероятность рассеяния строго назад на длине λ порядка транспортной длины $\frac{1}{\lambda} = 2\pi \int_0^\pi \sin(\theta) d\theta (1 - \cos(\theta)) N \sigma(\theta)$ (где σ — сечение взаимодействия; N — число атомов в единице объема) на угол 177—180° по соотношению сечений упругого взаимодействия на углы 0—177° и 177—180°, соответственно.

Для рассматриваемого в качестве примера случая облучения Au электронами с энергией 20 кэВ при использовании сечения Резерфорда получим, что доля электронов, рассеянных назад, составляет на транспортной длине ~48 % от коэффициента эмиссии для углов 177—180°. При использовании Моттовского сечения доля таких электронов составляет ~70 % из-за большей вероятности обратного рассеяния, даваемого этим сечением.

Так как с ростом энергии частицы уменьшается вероятность рассеяния назад, то уменьшается и величина пика. Как видно из рис. 2, уже для энергии первичных частиц в 30 кэВ он становится слаборазличимым.

Выводы

При моделировании углового спектра вторичных электронов обнаружено отклонение от синусоидального закона в области углов ~177—180° от направления первичных частиц — пик, состоящий в основном из электронов, испытавших малое количество взаимодействий и упруго отраженных назад.

Интенсивность пика соответствует оценкам, полученным исходя из вероятности рассеяния назад на

транспортной длине рассеяния, и падает с ростом энергии первичных электронов.

Характерная особенность приведенных результатов — обсуждаемый пик присутствует в результатах, получаемых при использовании как приближения дискретных, так и непрерывных потерь. Наличие пика не зависит от угла падения первичных электронов на поверхность образца.

Л и т е р а т у р а

1. Борисов С. С., Грачев Е. А., Зайцев С. И. Моделирование взаимодействия электронного пучка с гетерогенными средами методом Монте-Карло в приближении дискретных потерь// Прикладная физика, 2004. № 3. С. 65.

2. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. — М.: Наука, 1969.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

About one feature of an angular dependence for energy of secondary electrons

S. S. Borisov

The Physical Faculty of the Moscow State University, Russia

S. I. Zayitsev

Institute for problems of technologies of microelectronics, Chernogolovka, Moscow Region, Russia

Problems of model operation of an energy-angular dependence for the back dispelled and true-secondary electrons have been considered by a method of discrete losses, and also by a method of continuous losses. Presence of the artefact for an angular spectrum was clearly recognized: it is a diversion from the sine law in the 177—180° range from a beam direction.

* * *