

УДК 539.121.72

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  
ОТРАЖЕННЫХ И ПОГЛОЩЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Л.В.Головашкина, Ю.Г.Косарев, Н.Г.Находкин

Знание характеристик пространственного распределения поглощенных и отраженных электронов имеет важное значение для многих практических областей, например, для исследования проблемы зарядки диэлектриков, записи информации электронным лучом, при изучении структуры поверхности методом сканирующей электронной микроскопии и др.

В работе [1] уже обсуждались некоторые результаты прямого моделирования неупругого рассеяния электронов средних энергий ( $220 Z \text{ эв} \leq E_0 \leq 4000 Z \text{ эв}$ , где  $Z$  - атомный номер мишени) и было показано хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Это позволяет с определенным доверием отнестись ко всем результатам расчета, получаемых в рамках использованной модели.

Основная особенность полученных результатов состоит в том, что мы имели возможность исследовать распределение рассеянных электронов не только по углам возвышения ( $X$ ), но и по азимутам ( $Y$ ) - в областях, заключенных между плоскостями, определенными фиксированным значением  $Y$  ( $Y=0^\circ \pm \Delta$ ,  $Y=45^\circ \pm \Delta$ ,  $Y=90^\circ \pm \Delta$ ,  $Y=135^\circ \pm \Delta$ ).

Расчет выполнен для трех веществ -  $Be$ ,  $Al$ ,  $Pb$  - при различных значениях начальной энергии  $E_0$  и углах падения  $\theta^\circ = 60^\circ$  и  $80^\circ$ . Погрешность метода Монте-Карло  $\delta$  обратно пропорциональна  $\sqrt{K}$ , где  $K$  - число моделируемых траекторий, при этом с вероятностью  $\rho = 0.95$

$$\delta = |\xi - M\xi| \leq \alpha_\rho \sqrt{D\xi},$$

где  $\xi$  - моделируемая случайная величина, имеющая почти нормальный закон распределения,  $M\xi$ ,  $D\xi$  - математическое ожидание и дисперсия  $\xi$ ,  $\alpha_\rho = 1.96$ .

$B_e$   
 $E_0 = 7.7$  КЭВ  
 $\theta_0 = 80^\circ$   
 $K = 12000$   
 $\delta = 0.01$   
 $\Delta = 10^\circ$

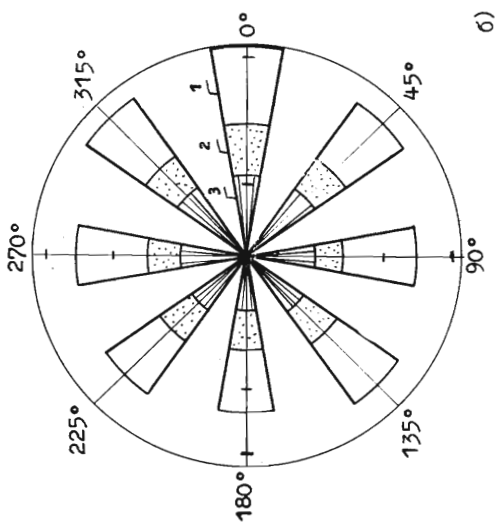
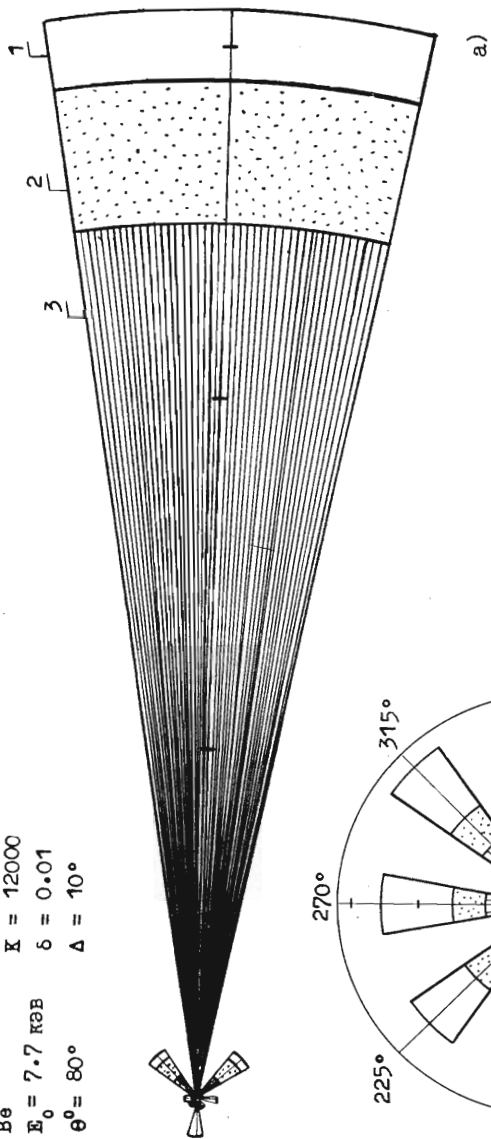
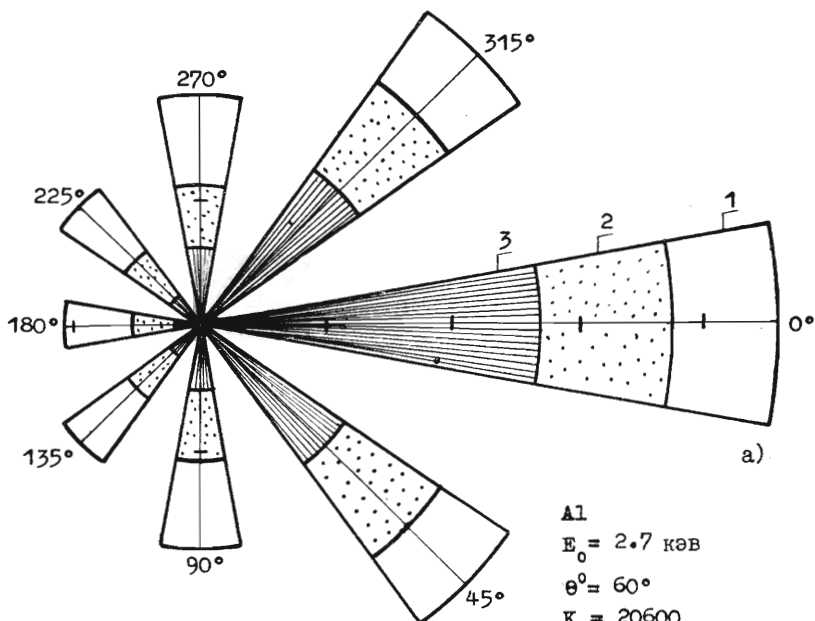


Рис. 1. Пространственное распределение электронов: а) отражение, б) поглощение.  
 $I - \alpha = 0, 90; 2 - \alpha = 0, 40; 3 - \alpha = 0, 30$



$\Delta l$   
 $E_0 = 2.7 \text{ кэВ}$   
 $\theta^0 = 60^\circ$   
 $K = 20600$   
 $\delta = 0.004$   
 $\Delta = 10^\circ$

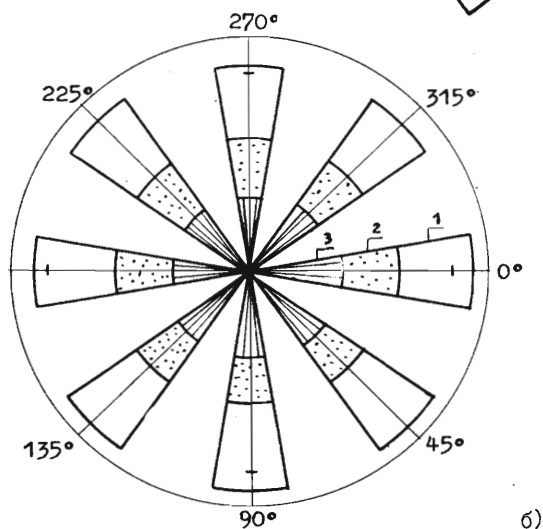


Рис. 2. Пространственное распределение электронов: а) отражение, б) поглощение.

1 -  $\alpha = 0,75$ ;  
 2 -  $\alpha = 0,40$ ;  
 3 -  $\alpha = 0,30$ .

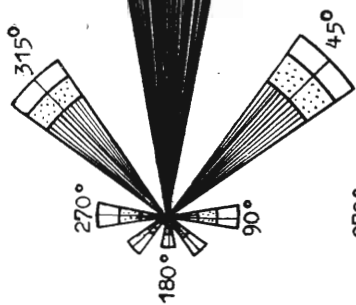
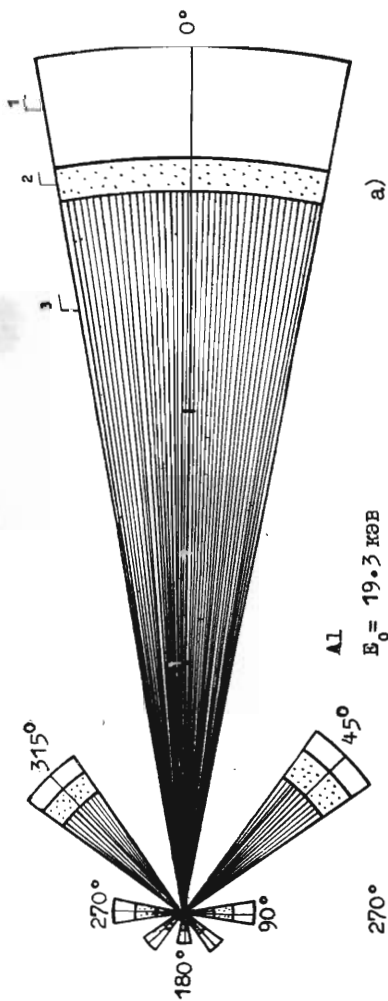
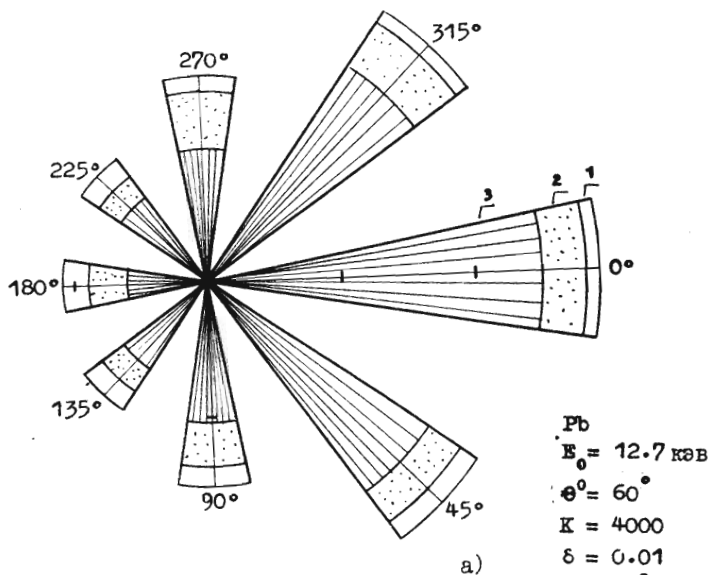


Рис. 3. Пространственное распределение электронов:  
 а) отражение, б) поглощение. 1 -  $\alpha = 0,75$ ;  
 2 -  $\alpha = 0,40$ ; 3 -  $\alpha = 0,30$ .



$Pb$   
 $E_0 = 12.7 \text{ кэВ}$   
 $\theta^0 = 60^\circ$   
 $K = 4000$   
 $\delta = 0.01$   
 а)  $\Delta = 10^\circ$   
 б)  $\Delta = 45^\circ$

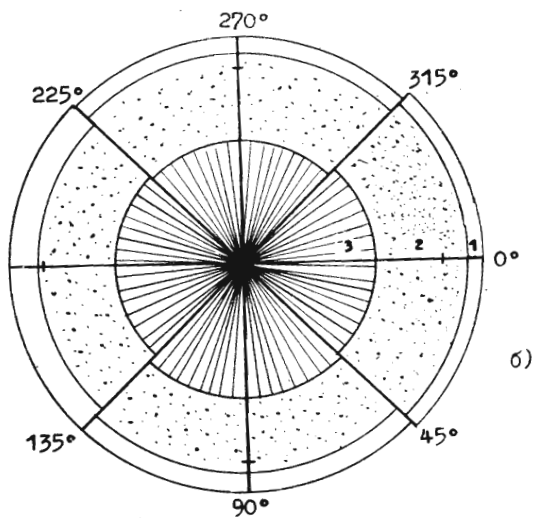


Рис.4. Пространственное распределение электронов: а) отражение, б) поглощение.

1 -  $\alpha = 0,2$ ;  
 2 -  $\alpha = 0,10$ ;  
 3 -  $\alpha = 0,05$ .

**О т р а ж е н и е .** В соответствии с экспериментом [2] в плоскости падения наибольшее число отраженных электронов расположено вблизи направления зеркального отражения (рис. 1а-4а). Относительное количество отраженных "вперед" электронов  $n_1/n$  (где  $n$  - число электронов, отраженных в области  $\vartheta = 0^\circ \pm \Delta$ ,  $n$  - общее число отраженных электронов) с увеличением атомного номера  $Z$  уменьшается. Для алюминия значение  $n_1/n$  с ростом  $E_0$  от 2.7 кэВ до 19.3 кэВ возрастает приблизительно в 3 раза (рис. 2а-3а).

Расчетные данные о пространственном распределении отраженных электронов, полученные регистрацией декартовых координат  $(x, y)$  в момент отражения, содержится в [3].

**П о г л о щ е н и е .** Для поглощенных электронов расчет обнаруживает почти равномерное пространственное распределение вокруг оси  $OZ$  даже при наклонных углах падения  $\theta^0 = 60^\circ - 80^\circ$  (рис. 1б - 4б). Следует заметить, что для  $Be$  в направлении падения пучка ("вперед") поглощается несколько больше электронов, чем в обратном направлении ("назад") (рис. 1б). Это объясняется, по-видимому, тем, что при  $\theta^0 = 80^\circ$  среднее число соударений, испытываемых электронами в мишени  $Be$ , невелико  $\approx 124$  [1]) и электроны не успевают полностью "забыть" направление своего падения. Когда число соударений в мишени возрастает ( $Al, Pb$ ), равномерность в распределении поглощенных электронов наступает при толщинах, равных глубине полной диффузии (рис. 2б - 4б).

## Л и т е р а т у р а

1. ГОЛОВЯШКИНА Л.В., НАХОДКИН Н.Г. Прямое моделирование неупругого рассеяния электронов. - "Вычислительные системы", 1972, вып. 52, с. 5-20.

2. KANTER H. Ruckstreuung von Elektronen im Energiebereich von 10 bis 100 keV. - "Ann. der Phys.", 1957, Bd. 20, S. 144.

3. SHIMIZU R., IKUTA T., MURATA K. The Monte Carlo technique as applied to the fundamentals of EPMA and SEM. - "J. Appl. Phys.", 1972, vol. 43, N 10, p. 4233-4249.

Поступила в ред.-изд. отд.  
25 июня 1973 года