

# Use of electron on a crystal lattice dynamic diffraction electron-optical formulation for an anomalous absorption effects on the transmission electron microscope images of crystalline objects explanation

*T. A. Grishina*

Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

*V. Yu. Grishina*

Institute for Nuclear Research, Moscow, Russia

*Electrons with a crystal lattice periodic field diffraction interaction electron-optical approximation representations are applied for the equal thickness fringes and hunting curves intensity profiles calculation and analysis. The results of the analysis used for an origin explanation of the anomalous absorption effects apparent at examination of monocrystalline objects by the transmission electron microscopy methods.*

УДК 537.533

## Анализ эффективности детекторов вторичных электронов в режиме парной симметрии

*Б. Н. Васичев*

Московский государственный институт электроники и математики  
(Технический университет), Россия

*А. А. Мельников*

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики  
(Технический университет), Россия

*О. Д. Потапкин*

Научно-исследовательский институт электронной и ионной оптики, Москва, Россия

*Представлена методика оценки эффективности детекторов вторичных электронов в режиме парной симметрии.*

Высокоэффективный сбор вторичных электронов (ВЭ) необходим в электронно-лучевых установках различного технологического назначения. Он позволяет повысить качество изображения в растровом электронном микроскопе, выделить скрытый рельеф, снизить погрешность измерения линейных размеров элементов топологии субмикронного размера, повысить точность совмещения в установках электронной литографии.

Однако вопросы эффективности детекторов ВЭ в режиме парной симметрии не нашли должного освещения в литературе. Эффективность сбора ВЭ оценивали, используя прямолинейные траектории ВЭ, или же

принималось утверждение, что собираются все эмитированные объектом ВЭ за счет так называемого вытягивающего потенциала [1, 2].

В настоящей работе оптимизация геометрии детектора и его расположения в камере объектов проводилась в два этапа. Первый этап состоял в моделировании электростатического поля в камере объектов при определенных краевых условиях, второй этап заключался в расчете траекторий ВЭ при заданных начальных и граничных условиях.

### Обобщенная математическая постановка задачи расчета электростатических полей в камере объектов

В общем случае задача расчета электростатических полей в камере объектов сводится к решению квазигармонического уравнения вида

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \rho = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями, заданными на различных участках границы рассматриваемой области  $V$ ,

$$\varphi = \varphi_s - \text{ на } S_1; \quad (2)$$

$$\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 - \text{ на } S_2, \quad (3)$$

- где  $\varphi$  — потенциал поля;  
 $\varepsilon(x_1, x_2)$  — диэлектрическая проницаемость среды;  
 $\rho(x_1, x_2)$  — плотность объемного заряда;  
 $\varphi_s$  — потенциал на части границы  $S$ ;  
 $S = S_1 \cup S_2$  — полная граница расчетной области  $V$ ;  
 $n$  — внешняя нормаль к границе  $S$ .

Диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon(x_1, x_2)$  можно считать кусочно-постоянной функцией, удовлетворяющей условиям сопряжения на границе раздела сред  $i$  и  $j$

$$\varphi_i = \varphi_j; \quad (4)$$

$$\varepsilon_i \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{L_i} = \varepsilon_j \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{L_j}. \quad (5)$$

### Методика решения сопряженной краевой задачи расчета электростатического поля в камере объектов

В основу методики решения сопряженной краевой задачи (1) — (5) положен метод конечных элементов (МКЭ). Можно показать, что решение этой задачи эквивалентно минимизации функционала [3, 4]:

$$F = \frac{1}{2} \int_V \left[ \varepsilon \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \varepsilon \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 - 2\rho\varphi \right] dV = 0. \quad (6)$$

Для упрощения дальнейших преобразований введем в рассмотрение матрицы

$$\{b\} = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^T; \quad (7)$$

$$[c] = \begin{pmatrix} \varepsilon & 0 \\ 0 & \varepsilon \end{pmatrix}. \quad (8)$$

С учетом обозначений (7), (8) и после преобразований функционал (6) можно записать в виде

$$F = \frac{1}{2} \int_V [\{b\}^{-1} [c] \{b\} - 2\rho\varphi] dV. \quad (9)$$

Предположим далее, что расчетная область  $V$  разбита на непересекающиеся треугольные конечные элементы с системой базисных функций  $N_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Введем в рассмотрение функции  $\varphi^{(l)}$ , определенные на отдельных конечных элементах. Элементарный вклад конечного элемента  $V^{(l)}$  в общую величину функционала (6) определяется равенством:

$$F^{(l)} = \frac{1}{2} \int_{V^{(l)}} [\{b^{(l)}\}^T [c^{(l)}] \{b^{(l)}\} dV - \int_{V^{(l)}} \varphi^{(l)} \rho^{(l)} dV] = 0. \quad (10)$$

С учетом (10) выражение (9) можно переписать следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^N F^{(i)}, \quad (11)$$

где  $N$  — общее число элементов, на которое разбита расчетная область  $V$ .

Для того чтобы минимизировать функционал  $F$ , необходимо продифференцировать выражение (10) по  $\{\varphi\}$  и результат приравнять нулю

$$\frac{\partial F}{\partial \{\varphi\}} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial F^{(i)}}{\partial \{\varphi\}} = 0, \quad (12)$$

где  $\{\varphi\}$  — узловые значения искомой функции  $\varphi$ .

Искомая функция  $\varphi$  может быть определена для каждого элемента через базисные функции  $N_i$  следующим образом:

$$\varphi^{(l)} = [N^{(l)}] \{\varphi\}. \quad (13)$$

Таким образом,

$$\{b\} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1^{(i)}}{\partial x} & \frac{\partial N_2^{(i)}}{\partial x} & \frac{\partial N_3^{(i)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1^{(i)}}{\partial y} & \frac{\partial N_2^{(i)}}{\partial y} & \frac{\partial N_3^{(i)}}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{pmatrix} = [D^{(i)}] \{\varphi\}. \quad (14)$$

После дифференцирования выражения (9) по  $\{\varphi\}$  с учетом выражений (10) и (14) и приравнивания результата к нулю получаем результирующую систему уравнений:

$$[G] \{\varphi\} = \{F\}, \quad (15)$$

где

$$[G] = \sum_{i=1}^N [g^{(i)}]; \quad (16)$$

$$\{F\} = - \sum_{i=1}^N [f^{(i)}]; \quad (17)$$

$$[g^{(i)}] = \int_{V^{(i)}} [D^{(i)}]^T [C^{(i)}] [D^{(i)}] dV; \quad (18)$$

$$[f^{(i)}] = - \int_{V^{(i)}} \rho^{(i)} [N^{(i)}] dV. \quad (19)$$

Для учета граничных условий Дирихле (4) систему (15) преобразуем с помощью следующего алгоритма. Пусть для определенности задано численное значение потенциала  $\phi_i$ , тогда все преобразования матричного уравнения (15) сводятся к следующему: все коэффициенты  $i$ -й строки матрицы  $[G]$ , за исключением диагонального, приравниваются нулю,  $i$ -я компонента вектора  $[F]$  заменяется на произведение  $G_{ii}\phi_i$ ; все остальные уравнения преобразуются вычитанием произведения  $G_{ji}\phi_i$  из  $F_j$  и подстановкой  $G_{ji} = 0, j = 1, 2, 3; j \neq i$ .

### Расчет траекторий вторичных электронов

Задача Коши для уравнения движения ВЭ имеет вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \eta E_x;$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \eta E_y;$$

$$x(t_0) = x_0;$$

$$y(t_0) = y_0;$$

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=t_0} = (2\eta U_0)^{1/2} \sin \Psi;$$

$$\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=t_0} = (2\eta U_0)^{1/2} \cos \Psi,$$

(20)

(21)

где  $\eta = e/m$ ,  $m$  — масса электрона;  
 $e$  — заряд электрона;

$E_x, E_y$  — компоненты вектора напряженности электрического поля.

Можно показать, что задача Коши (20), (21) эквивалентна следующей задаче:

$$\frac{dx_1}{dt} = \eta E_x;$$

$$\frac{dy_1}{dt} = \eta E_y;$$

$$\frac{dx}{dt} = x_1; \quad \frac{dy}{dt} = y_1;$$

(22)

$$\begin{aligned}
 x(t_0) &= x_0; \\
 y(t_0) &= y_0; \\
 x_1(t_0) &= (2\eta U_0)^{1/2} \sin \Psi; \\
 y_1(t_0) &= (2\eta U_0)^{1/2} \cos \Psi,
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

где  $\Psi$  — угол между электронно-оптической осью и направлением вылета ВЭ ( $\Psi = 0 \div \pi/2$ ),  $U_0$  — энергия ВЭ ( $U_0 = 0-300$  В).

Для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений с успехом можно применять метод Штермера, методы Рунга-Кутты. Однако целесообразнее использовать метод прогноза и коррекции — метод Хемминга [4].

Используя векторные и матричные обозначения

$$R = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x \\ y \end{pmatrix}; \tag{24}$$

$$A = \begin{pmatrix} \eta E_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \eta E_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \tag{25}$$

$$R_0 = \begin{pmatrix} x_0(t_0) \\ y_0(t_0) \\ x_1(t_0) \\ y_1(t_0) \end{pmatrix}, \tag{26}$$

имеем

$$R' = \frac{dR}{dt} = AR_0. \tag{27}$$

Для устойчивости процесса вычислений траекторий использована модификация метода Хемминга — метод прогноза и коррекции Милна [4].

В методе Милна используются следующие формулы:

$$\text{прогноза: } P_{j+1} = R_{j-3} + \frac{4h}{3}(2R_j' - R_{j-1}' + 2R_{j-2}'); \tag{28}$$

$$\text{уточнения прогноза: } M_{j+1} = P_{j-3} - \frac{112}{121}(P_j - C_j); \tag{29}$$

$$\text{коррекции: } C_{j+1} = \frac{1}{8}(9R_{j-2} + 3h(M_{j+1} + 2R_j' - R_{j-1})). \tag{30}$$

Конечный результат определяется по формуле:

$$R_{j+1} = C_{j+1} + \frac{9}{121}(P_{j+1} - C_{j+1}). \tag{31}$$

### Некоторые аспекты численного решения задач расчета электростатических полей в камере объектов

Решение задач моделирования электростатических полей с использованием МКЭ состоит из следующих этапов:

подготовка информации о решаемой задаче: геометрия расчетной области, свойства материалов, граничные условия, условия сопряжения, информация об интерполяции конечными элементами;

генерация сетки в расчетной области, перенос граничных условий и условий сопряжения на сетку, визуализация результатов разбиения для оценки качества разбиения, улучшение качества разбиения, если это необходимо;

решение задачи: формирование полной системы уравнений, преобразование системы уравнений с учетом граничных условий, нахождение решения системы алгебраических уравнений;

вывод и обработка результатов моделирования: визуализация результатов, анализ особенностей распределения электростатических полей, расчет интегральных характеристик.

Пакет программ FIELDV, предназначенный для расчета электростатических полей, состоит из отдельных программ, каждая из которых выполняет вполне определенные функции; пакет программ MESH предназначен для генерации сетки конечных элементов в расчетной области; пакет FIELD — для решения задачи расчета стационарных электростатических полей; пакет GRV — для визуализации результатов расчета в виде картин распределения электростатических полей.

Пакет программ FIELDV разработан на языке программирования ФОРТРАН-IV и реализован на ПЭВМ IBM PC AT.

Для решения системы уравнений (15), полученной в результате дискретной аппроксимации по МКЭ сопряженной краевой задачи (1—5), использован метод треугольного разложения.

#### Результаты моделирования

Проводились расчеты для исследования влияния конструкции детектора на характер распределения электростатического поля, а также для определения траекторий ВЭ.

В процессе моделирования варьировалось расстояние от полюсного наконечника до объекта. Расчетная схема камеры объектов представлена на рис. 1, в которой симметрично оптической оси ЭОС размещены два детектора ВЭ. Детекторы имеют электроды, на которые подается напряжение, создающее в камере объектов электростатическое поле, способствующее сбору ВЭ на чувствительных элементах детекторов.

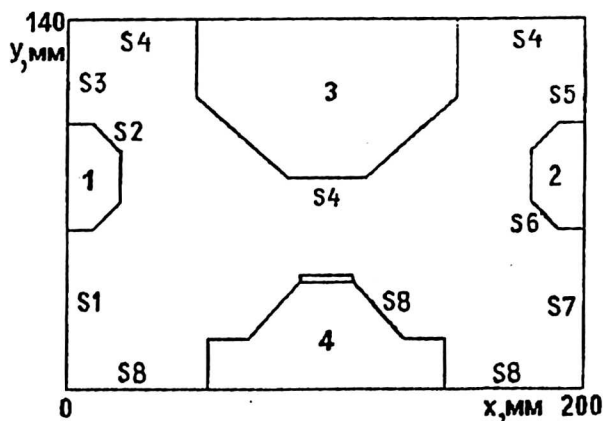


Рис. 1. Расчетная схема камеры объектов:

1, 2 — детекторы ВЭ типа Эверхарта-Торнли; 3 — кожух объективной линзы; 4 — столик с образцом

Расчет электростатического поля в данном случае осуществляется путем решения уравнения с частными производными (1) относительно потенциала при граничных условиях:

$$\varphi = 0 \quad - \quad \text{на } S_4, S_8; \quad (32)$$

$$\varphi = 1000 \text{ В} \quad - \quad \text{на } S_2, S_6; \quad (33)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad - \quad \text{на } S_1; S_3; S_5; S_7 \quad (34)$$

с использованием разработанного пакета программ FIELDV.

На рис. 2 представлена картина распределения электростатического поля в рабочей области камеры объектов, на рис. 3 — результаты расчетов траекторий ВЭ с различными начальными данными.

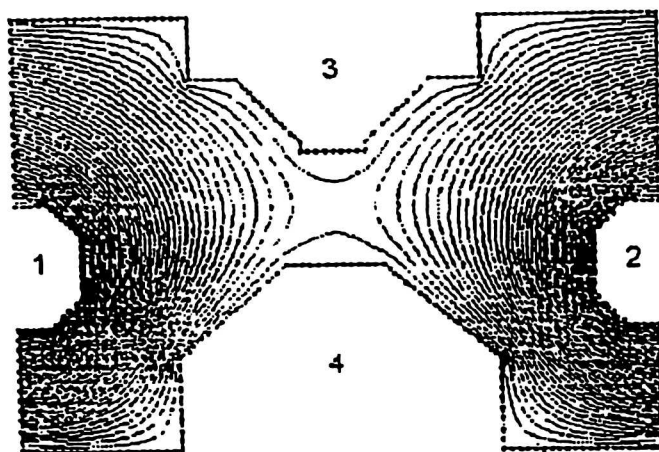


Рис. 2. Картина распределения электростатического поля в рабочей области камеры объектов:

1, 2 — детекторы ВЭ типа Эверхарта-Торнли; 3 — кожух объективной линзы; 4 — столик с образцом

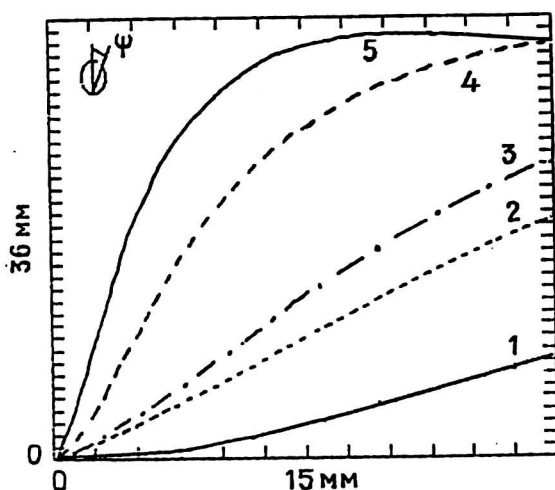


Рис. 3. Траектории вторичных электронов:

1 — 30 эВ,  $\pi/2$ ; 2 — 30 эВ,  $\pi/3$ ;  
3 — 10 эВ,  $\pi/3$ ; 4 — 1 эВ,  $\pi/3$ ;  
5 — 1 эВ,  $\pi/6$

ВЭ, попавшие на стенки камеры, на столик объектов и на корпус объективной линзы, исключались из рассмотрения.

Коэффициент сбора ВЭ определялся по формуле

$$I = \iint N(E) \cos \psi dE d\psi, \quad (35)$$

где  $N(E)$  — распределение ВЭ по энергиям.

### Л и т е р а т у р а

1. Reimer L.//Scanning Electron Microscopy. Springer-Verlag, 1985.
2. Postek M. T.//Rev. Sc. Instrum. 1990. V. 61. P. 3730.
3. Зенкевич О.//Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. — М.: Мир, 1975. — 542 с.
4. Васичев Б. Н., Мельников А. А.//Расчет и проектирование магнитных фокусирующих систем: — М.: МИРЭА, 1989. — 48 с.

## The analysis of efficiency of secondary electron detectors in pair symmetre regime

*B. N. Vasichev*

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University), Russia

*A. A. Melnikov*

Moscow State Institute of Radioengineering, Electronics and Automation  
(Technical University), Russia

*O. D. Potapkin*

Research Institute of Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

*Calculation of the secondary electron collection coefficient for two-detector system. The important parameter, which determines the accuracy of line-width measurements in electron beam technological devices is the secondary electrons collection coefficient. The problem of calculation electrostatic field in chamber with different boundary conditions is present. The secondary electron trajectories are plotted.*