

УДК 537.533.3

Энергоанализатор вторичных электронов для растрового электронного микроскопа / В. Д. Белов, А. В. Хрущев // Научное приборостроение. -1992.-Т.2.-N 2.-С. 65-69.

Рассмотрен цилиндрический энергоанализатор вторичных (Оже) электронов для растрового микроскопа с пространственной фокусировкой 2-го порядка по углам вида "ось-кольцо", имеющий длину проекции основной траектории на ось цилиндров 216 мм и разрешение по энергиям 0.03-0.7 % при светосиле от 2 до 13 % . Библ.-4 назв. Ил.-3. Табл.-1.

В. Д. Белов, А. В. Хрущев

(Институт аналитического приборостроения РАН, С.-Петербург)

ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОР ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ РАСТРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА

Развитие методов диагностики твердотельных структур микроэлектроники привело к появлению комбинированной методики, в которой анализ структурных особенностей рельефа поверхности решается методом растровой электронной микроскопии высокого разрешения, а анализ состава поверхности производится методом спектроскопии вторичных (Оже-) электронов. Такое сочетание позволяет осуществлять элементный анализ с пространственным разрешением растрового электронного микроскопа. Примером реализации методики могут служить приборы РН1 660 фирмы Perkin Elmer (США), JAMP 30 фирмы Jeol (Япония) [1, 2].

В настоящей статье рассматривается вариант энергоанализатора для электронно-оптической системы растрового низковольтного электронного микроскопа, разработанной д-ром М. Ленцем в Институте приборостроения ЧСАН, ЧСФР.

Разработка энергоанализатора производилась на основе следующих критериев:

возможности получения большей светосилы (около 10 % от 2π стерадиан);
возможности получения высоких значений пространственного (порядка 500 А) и энергетического ($\Delta E/E = 0.05-1.0$ %) разрешений при работе в режиме Оже-микронзонда;

простоты и технологичности конструкции.

В результате анализа различных схем энергоанализаторов для конкретной конфигурации электронно-оптической системы электронного микроскопа выбран аксиально-симметричный электростатический энергоанализатор с диспергирующим полем между обкладками цилиндрического конденсатора (цилиндрическое зеркало). Схема энергоанализатора показана на рис. 1.

В рассматриваемом энергоанализаторе реализуется пространственная фокусировка второго порядка вида ось — внутренний цилиндр по углам вылета вторичных электронов из мишени. Соответствующая этому режиму геометрия анализатора позволяет установить линзовую систему электронного микроскопа на оси цилиндра и получить дисперсию по энергиям, близкую к дисперсии цилиндрического зеркала с фокусировкой вида ось — ось при таких же длинах траекторий [3]. Расположение линии фокусов на внутреннем цилиндре освобождает пространство для размещения координатно-чувствительного детектора вторичных электронов, при использовании которого может быть достигнут эффект стереоскана и

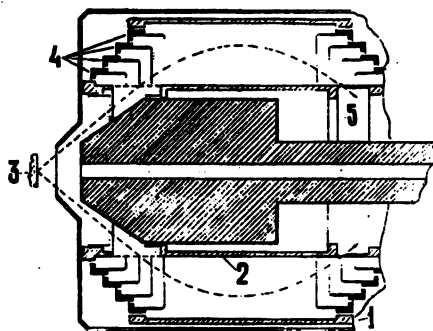


Рис. 1. Схема энергоанализатора: 1, 2 — наружный и внутренний цилиндры, соответственно; 3 — мишень; 4 — корректирующие электроды; 5 — выходная щель

уменьшено влияние особенностей структуры поверхности на интенсивность сигнала.

При расчете параметров энергоанализатора предполагается, что влияние краевых полей, связанных с конечностью длины цилиндров, скомпенсировано корректирующими электродами. Возмущение же, вносимое входным отверстием, устраняется применением "прозрачного" экрана из тонких проводников, параллельных оси цилиндра. Это позволяет считать распределение потенциала чисто логарифмическим и воспользоваться аналитическими выражениями для траектории заряженной частицы, аббераций и энергетической дисперсии.

Если на наружный цилиндр подан потенциал $U(r_2) = V$, а на внутренний $U(r_1) = 0$, выражение для потенциала в пространстве между электродами в цилиндрических координатах приобретает следующий вид:

$$U(r) = \frac{V}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1},$$

где r_1, r_2 — радиусы внутреннего и наружного электрода, соответственно.

Координата точки возвращения частицы на внутренний цилиндр определяется выражением

$$z(r) = r_1 \operatorname{ctg} \theta + \frac{2\sqrt{\pi r_1}}{\sqrt{A}} \cos \theta \exp\left(\frac{\sin^2 \theta}{A}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{\sin \theta}{\sqrt{A}}\right), \quad (1)$$

$$\text{где } A = \frac{eV}{E \ln \frac{r_2}{r_1}}; \quad E = \frac{mv_0^2}{2}.$$

В рассматриваемой системе радиус внутреннего цилиндра r_1 , задаваемый размерами линзовой части микроскопа, равен 60 мм.

Как известно [4], условия фокусировки второго порядка в режиме *ось — внутренний цилиндр* однозначно определяют угол наклона осевой траектории к оси системы θ_0 и радиус наружного электрода r_2 , на который подается потенциал, равный энергии настройки анализатора (выраженной в электрон-вольтах). Для r_1 , равного 60 мм, имеем $\theta_0 = 38.82^\circ$, $r_2 = 153.42$ мм.

Тогда из выражения (1) координата Z_c точек фокуса второго порядка, отсчитываемая от мишени, равна 216 мм.

Дисперсия по энергии D в выбранном режиме определяется соотношением $D = 2.97 \cdot r_1$ и равна 179 мм [3].

Нетрудно показать, что при диапазоне размеров источника вторичных электронов от 0.01 до 0.5 мм, характерных для фрагментов исследуемых участков поверхности, выражение для разрешения по основанию принимает вид

$$R = \frac{2s_1' + s_2 + \Delta}{D} 100\%,$$

где $s_1' = r_0 \operatorname{ctg} \theta_0$ — проекция источника на базовую траекторию, спроецированная затем на ось OZ ; s_2 — размер выходной щели; Δ — абберационное уширение пучка.

Ниже приведена таблица результатов расчета координат краев входной щели z_1 и z_2 , абберационного уширения Δ , разрешения по основанию R и доли частиц, попавших во входную щель $\Omega = 2\alpha \sin(\theta_0) 100\%$ для разброса углов вылета вторичных электронов из мишени $\alpha = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6^\circ$ и различных значениях размера их источника r_0 для выходной щели $s_2 = 0.2$ мм.

Учитывая, что частицы удаляются от оси максимум на расстояние $r_1 \exp\left[\left(\sin^2(\theta + \alpha_{\max}) \ln \frac{r_2}{r_1}\right)\right] = 96$ мм, радиус наружного цилиндра r_2 может быть уменьшен. Это позволяет снизить на нем потенциал и уменьшить число электродов, компенсирующих краевые эффекты.

Если анализатор работает в режиме Оже-микросзонда при поперечных размерах пучка первичных электронов около 500 А, характерный размер исследуемой площадки обычно не превышает 50 мкм. В этом случае изображение на дисплее может быть отображено в кадре из 1000×1000 точек, а разрешение по энергиям может лежать в диапазоне 0.03—0.7 % при светосиле от 2 до 13 %, соответственно.

Анализ данных таблицы при сделанных допущениях относительно режимов Оже-микросзонда показывает преимущество выбранного режима фокусировки по отношению к традиционной схеме энергоанализатора с фокусировкой ось—ось в силу меньших значений абберационного уширения.

Для расчета геометрии корректирующих электродов используется плоская симметричная система (рис. 2), состоящая из двух угловых полубесконечных электродов, на которые поданы потенциалы V_0 и V_1 . Расстояние между электродами d , а зазор в начале координат считается бесконечно малым. В такой модели распределение потенциала между электродами дается выражением

$$\varphi(x, y) = \frac{V_0 + V_1}{2} + \frac{V_1 - V_0}{\pi} \arctg \left[\frac{\sin \frac{\pi x}{d} \operatorname{ch} \frac{\pi y}{d}}{\cos \frac{\pi x}{d} \operatorname{sh} \frac{\pi y}{d}} \right],$$

а отклонение от потенциала в идеальном плоском конденсаторе

α , град	z_1 , мм	z_2 , мм	Δ , мм	Ω , %	r_0 , мм			
					0.01	0.05	0.1	0.5
1	71	77	0.006	2	0.03	0.07	0.2	0.7
2	69	80	0.04	4	0.05	0.1	0.2	0.7
3	67	83	0.15	7	0.1	0.2	0.2	0.8
4	64	86	0.36	9	0.2	0.3	0.4	0.9
5	62	89	0.7	11	0.4	0.5	0.5	1.1
6	60	93	1.2	13	0.7	0.7	0.8	1.4

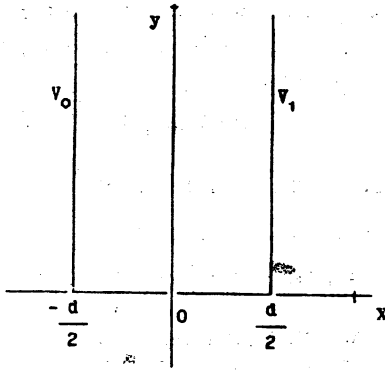


Рис. 2. Плоская симметричная система, состоящая из двух угловых полубесконечных электродов

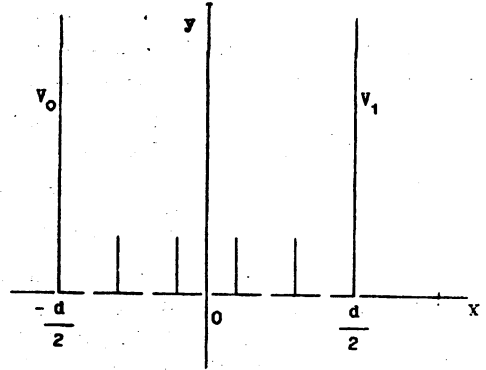


Рис. 3. Полубесконечный плоский конденсатор с системой из четырех корректирующих электродов на торце (за пределами электродов отклонение поля от идеального не превышает 10^{-4})

$$\Delta(x, y) = \frac{V_1 - V_0}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\sin \frac{\pi x}{d} \operatorname{ch} \frac{\pi y}{d} - 1}{\cos \frac{\pi x}{d} \operatorname{sh} \frac{\pi y}{d}} \right) - \pi \frac{x}{d} \right]. \quad (2)$$

Оно достигает максимального значения в точках

$$x^*(y) = -\frac{d}{\pi} \operatorname{arcsin} \left[\operatorname{sh} \frac{\pi y}{d} \left(\operatorname{ch} \frac{\pi y}{d} - \operatorname{sh} \frac{\pi y}{d} \right) \right]. \quad (3)$$

Ниже показана зависимость максимального значения Δ от расстояния до торца системы

y/d	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$\frac{ \Delta(x^*) }{V_1 - V_0}$	0	0.01	$6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$

При анализе электронно-оптической системы высокого разрешения ($R \leq 1\%$), как известно [4], погрешность определения потенциала не должна превышать 10^{-4} . Следовательно, влиянием краевого поля можно пренебречь на расстоянии $s = 1.5d$. Очевидно, если требуется уменьшить s , следует ввести в систему n корректирующих электродов (рис. 3), на которые поданы соответствующие потенциалы, причем n оценивается соотношением

$$n \geq \frac{2(l-\delta)}{3d} - 1, \quad (4)$$

где δ — некоторый сдвиг, вызванный конечностью толщины корректирующих электродов, который приводит к дополнительному возмущению поля в окрестности их краев. Приведенные оценки с известными оговорками можно распространить на осесимметричный случай.

Реальная геометрия кольцевых корректирующих электродов показана на рис. 1. Оценки на основании выражений (2) — (4), проведенные для рассматриваемой конфигурации, показывают, что n достаточно принять равным 4 и δ 3 мм (при толщине электродов до 1.5 мм).

Решение задачи в рамках приведенных выше моделей (с учетом проведенных оценок) обеспечивает предлагаемой системе при использовании ее в качестве энергоанализатора Оже-микронзонда в составе с растровым электронным микроскопом следующие аналитические и конструктивные характеристики:

диапазон изменения разрешения по энергиям 0.03-0.7 % при светосиле от 2 до 13 % (для режимов Оже-микронзонда);

передний рабочий отрезок, свободный от элементов конструкции, от 10 до 20 мм;

внешний диаметр энергоанализатора с экранами около 220 мм.

В заключение авторы выражают глубокую признательность д-ру М. Ленцу (ИП ЧСАН, ЧСФР), любезно предоставившему данные по электронно-оптической части растрового электронного микроскопа и оказавшему содействие как в постановке задачи, так и в проведении работ по международному проекту.

ЛИТЕРАТУРА

1. *The PHI 660 Scanning Auger Microprobe* (проспект фирмы Perkin-Elmer Corporation). PHI Data Sheet TA1075 8-86 5M. 1986.
2. *JEOL* (проспект фирмы JEOL Ltd). NO. 0501F608.1986. С. 12.
3. *Афанасьев В. П., Явор С. Я.* Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. - М.: Наука, 1978.
4. *Renfro G. M., Fishbeck H. J.* // *Rev. Sci. Instrum.* - 1975.- V. 46, N 5. - P. 620.

Рукопись поступила 10. 06. 92