

ОСОБЕННОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ В ВИДЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И ДРУГИХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДАМИ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Б. Н. Васичев

Государственное унитарное предприятие "Научно-исследовательский институт электронной и ионной оптики", Москва, Россия

Обсуждаются особенности, приводится методика распознавания образов в виде элементной неоднородности в гетерогенных массивных образцах и тонких пленках методами аналитической электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа, а также некоторые аппаратные функции для определения чувствительности и достоверности при оптимальных условиях анализа.

Повышенное внимание к эффективности анализов на элементный состав, в том числе к их локальности, производительности, массовости, вызвано необходимостью прогнозирования новых технологических и конструкционных свойств материалов, совершенствования технологии изготовления композиционных материалов и синтезированных вычислительных сред в электронной технике. С развитием метода локального микроанализа тонких пленок [1] (первые опыты были начаты в 60-е годы) электронный микроскоп превратился в аналитический микроскоп.

В настоящее время наибольшей абсолютной чувствительностью, прицельностью и разрешающей способностью при дозированном воздействии потоком электронов на исследуемую область объекта обладает именно аналитическая электронная микроскопия [1—3].

За последние 25—30 лет электронно-зондовый микроанализ в сочетании с электронной микроскопией и особенно наиболее информативная его модификация — метод сочетающий в себе дифракционную электронную микроскопию и микроанализ — достигли очень высокой степени развития, так что без него немислимо проведение глубоких исследований тонкой структуры твердых тел и, прежде всего, реальной структуры в реальном масштабе времени на субмикроскопическом уровне, вплоть до атомного, и с абсолютной чувствительностью элементного определения до 10^{-17} г. Однако все больше проявляется интерес к исследованию технологических режимов, сопровождающихся как фазовыми превращениями, так и процессам радиационного стимулирования при воздействии на материалы дозированного электронного пучка непосредственно под наблюдением с высоким разрешением [4—5].

Определение элементной и структурной неоднородности гетерогенных образцов методами электронно-зондового микроанализа

Информационные особенности опознавания образов в виде элементной неоднородности в полупроводниковых и других структурах методами электронно-зондового микроанализа и аналитической электронной микроскопии состоят в том, что в образцах, в которых невозможно во время анализа учитывать влияние близлежащих слоев традиционными способами, с помощью специальных методов удастся определить и выделить истинное состояние объекта (микрофазы, включения или локального участка матрицы) на фоне значительных помех в виде искаженной интенсивности характеристического рентгеновского спектра или электронных потоков, формирующих изображения объекта.

Аналитические возможности электронных микроскопов стали столь многообразны и многоплановы, что ни один, даже самый квалифицированный физик не мог бы охватить на достаточно высоком уровне все практические тонкости этого научного метода. Поэтому настоящая статья посвящена только одной фундаментальной проблеме — повышению эффективности (правильности, надежности, уровню автоматизации) локального элементного анализа многокомпонентных многофазных образцов различных материалов, включая тонкие свободные от подложки, и образцов с неоднородными поверхностями.

Проблема микроанализа, т. е. определение количественного содержания того или другого химического элемента в данной области образца, интерпретация изображения в электронном микроскопе всегда встречали большие трудности. Разработано множество подходов и методов к решению этих задач, но решены они не до конца. Причина здесь в том, что существующий инструментарий "смотрит" на образец как бы с одной стороны и в прямом, и в переносном смысле.

Сложность выполнения гетерогенного анализа, в том числе полупроводникового объекта, состоит в том, что при микроанализе лишь частично, в очень узком угловом диапазоне используются пространственные распределения вторичных и отраженных электронов, фотонов, рентгеновских квантов, которые несут информацию о локальных свойствах исследуемого объекта. Большая часть информации, предоставляемая нам природой, утрачивается. Испытатель не может использовать ее по вине разработчиков аналитического оборудования, так как последний не осознал важность утрачиваемой информации при анализе. Фирмы—разработчики аналитической аппаратуры, широко рекламирующие свою продукцию, просто вводят в заблуждение многих потребителей. Они предлагают широкий, но убогий с точки зрения аналитических возможностей, выбор аппаратуры. Именно это и не позволяет в ряде случаев провести анализ сложных полупроводниковых объектов ни с помощью растровых электронных микроскопов, оснащенных рентгеновскими приставками, ни с помощью специализированных рентгеновских микроанализаторов.

Результаты анализа или опознавания объекта в них существенно зависят от ориентации образца относительно направления регистрации сигналов вторичных излучений. В итоге имеют место невозпроизводимость и случайность результатов опознавания.

Известно, что при бомбардировке образца электронным пучком в результате упругих и неупругих взаимодействий ускоренных электронов пучка с атомами твердого тела в последнем возбуждается вторичное излучение, которое, так же как и упругоотраженные электроны, несут массу информации об этом взаимодействии.

Для наглядности представим себе вокруг точки анализа несколько вложенных одна в другую сфер, характеризуемых радиусами-векторами $R_{i,j}$. Каждый радиус-вектор $R_{i,j}$ является характеристикой физических явлений, происходящих при взаимодействии налетающих электронов с атомами (например, вероятность возбуждения аналитической линии $p(\lambda)$ или относительная истинная интенсивность i -й аналитической линии I_i и тормозного излучения I_T на один электрон, коэффициент поглощения аналитических линий веществом μ_p , флуоресценция v_j^1 , возбуждение вторичных электронов δ и т. д.), параметров электронного зонда (например, таких как энергия электронов E , сила тока i , форма сечения пучка s , распределение плотности тока в пучке $j(s)$ и стабильности и повторяемости этих и других параметров ΔE , Δi , $\Delta j(s)$, параметров системы регистрации излучений, включающие в себя детекторы, тракты усиления, обработки сигналов и представления сигналов (например, эффективность, разрешающая и др.). Величина каждого вектора $R_{i,j}$ зависит от угла регистрации θ , угла выхода носителей сигнала ψ , азимутального угла регистрации носителей сигналов γ , угла отбора носителей сигналов $\Delta\theta$, направления траектории движения электронного зонда по отношению к границе двух фаз ϕ , т. е. величина вектора $R_{i,j}$ связана с неоднородностью распределения вокруг точки анализа компонентов, из которых состоит анализируемый образец. Если образец гетерогенный, то воображаемые сферы должны быть искривлены в соответствии с величиной вектора $R_{i,j}$ сложным образом, зависящим от многих факторов:

$$R_{i,j} = F(\theta, \gamma, \Delta\theta, \psi, \phi, E, I_p, I_T, i, v_j^1, \Delta\theta, j(s), \Delta j(s), \Delta i, \Delta E, p(\lambda), \mu_p^i, l, \alpha, \dots).$$

Мы подошли к задаче высокоинформативной электронно-зондовой микрофотографии с внутренним источником излучения. Причем параметры источника излучения в данном случае зависят не только от показателей качества оборудования (электронного микроскопа или микроанализатора), но и от состава, структуры и рельефа поверхности исследуемого участка образца.

Расчетным путем установлена связь между геометрическими параметрами, такими как угол регистрации θ , угол отбора информации $\Delta\theta$, высота и угол наклона щели (плоскости входного окна) регистрирующего устройства α по отношению к плоскости условно названной горизонталью.

Было принято, что все виды вторичного излучения, включая и отраженные электроны, при нормальном падении электронного пучка на поверхность гомогенного образца имеют симметричную диаграмму направленности, соответствующую закону косинуса $I = I_0 \cos \theta$. Постоянство угла отбора носителей информации $\Delta\theta$ влияет на ошибки анализа при изменении интенсивности аналитического сигнала.

Аналитическое выражение угла отбора $\Delta\theta$, значение которого отождествляется с геометрической эффективностью регистрации носителей информации, подтвержденное экспериментально, имеет вид

$$|\Delta\theta| = \left| \arctg \left[\frac{\left(\frac{x_a}{L} + \frac{l}{L} \cos \alpha \right) + \operatorname{ctg} \theta \left(\frac{y_a}{L} - \frac{l}{L} \sin \alpha \right)}{\left(\frac{y_a}{L} + \frac{l}{L} \sin \alpha \right) + \operatorname{ctg} \theta \left(\frac{x_a}{L} - \frac{l}{L} \cos \alpha \right)} \right] \right|,$$

где x_0, y_0 — координаты щели детектора (спектрометра);

L — расстояние от образца до нижнего среза электронной линзы.

Изменение амплитуды сигналов вторичных излучения I_1 и I_2 для двух соседних положений вектора R (или входного окна детектора), сдвинутых один относительно другого на величину $\Delta\theta$ равно

$$K = -\operatorname{tg} \frac{2\theta + \Delta\theta}{2} \operatorname{tg} \frac{\Delta\theta}{2}. \quad (1)$$

Формула (1) позволяет оценить гетерогенность образца. На этом основаны все парносимметричные регистраторы излучений, широко используемые в растровой электронной микроскопии [6—7] и рентгеновском микроанализе [10].

Регистрация аналитических линий (включая рентгеновские) в режиме парной симметрии уже упрощает расчет количественного анализа, так как поправки на атомный номер, на тормозное излучение, связанные с различием торможения и обратного рассеяния электронов, и на флуоресценцию автоматически исключаются. В результате остается лишь хорошо разработанная поправка на поглощение. Обычно при расчете поправок в микроанализе используется функция поглощения $f(\chi)$ [6]. Она имеет в микроанализе свое особое значение. Точность теоретически или экспериментально найденных значений $f(\chi)$ зависит не только от тщательности ее вычисления, но и от точности использованных значений массовых коэффициентов поглощения. Кроме того, определить их экспериментально в гетерогенных образцах в “точке” анализа в обычных микроанализаторах практически невозможно. Поэтому проблема заключается в том, что неточное значение массовых коэффициентов поглощения для образцов в виде, например, кроющих пленок на подложке и особенно в длинноволновой области спектра приводит к значительным ошибкам в определении концентрации искомого элемента C_j . Ошибка $\Delta f/f$ зависит от значения μ/ρ [7—8], где μ — линейный коэффициент поглощения; ρ — плотность вещества, и может быть представлена в виде соотношения:

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{E_0, \psi = \text{const}} = -B \left[\frac{\Delta(\mu/\rho)}{\mu/\rho} \right].$$

Значения коэффициента B табулированы в работе [9] для некоторых элементов. Практика показала, что эта ошибка часто является наибольшей и определяющей точность анализа. Для снижения погрешности анализа необходимо во время эксперимента уточнять значения $(\mu/\rho)^*$ для образца в точке измерения. Для этого измеряем отношение интенсивностей аналитической i -й линии на образце при разных углах γ_j . Получаем систему уравнений:

$$\frac{I|\gamma_j, \psi = \text{const}}{I|\gamma_{j+1}, \psi = \text{const}} = \frac{\int_0^\infty [\varphi(\rho z) \gamma_j \exp(-\alpha \gamma_j \rho z)^*] d(\rho z)}{\int_0^\infty [\varphi(\rho z) \gamma_j + 1 \exp(-\alpha \gamma_j + 1 \rho z)^*] d(\rho z)}, \quad (2)$$

$$j = 1, 2, \dots, N.$$

После преобразования с учетом того, что $\varphi(\rho z)$ одинаковы для одних и тех же условий эксперимента, определяется массовый коэффициент поглощения $(\mu/\rho)^*$, а путем решения линейной системы уравнений (2) совместно с уравнениями

$$\sum_i^N C_j (\mu / \rho)_{i,j} = (\mu / \rho)_i^*, \quad (3)$$

$$\sum_i^N C_j = 1 \quad (4)$$

находятся C_j — искомые концентрации компонентов.

В уравнении (3) $(\mu/\rho)_{i,j}$ — парциальные коэффициенты поглощения для i -го излучения j -м элементом.

Этот метод позволил определять неоднородность рельефа поверхности, неоднородность толщины крошащих пленок на полупроводниковых подложках и проводить элементный микроанализ вблизи гетерограниц подложки. Гетерофон определялся по методике описанной в [10].

Определение элементной неоднородности свободных гомогенных тонких пленок методами электронно-зондового микроанализа в аналитической электронной микроскопии

Количественные методы анализа тонких свободных пленок основаны на эмиссии рентгеновских лучей этой пленкой в условиях бомбардировки ее электронами с энергией, достаточной для возбуждения характеристического спектра определяемого элемента. Концентрация элемента A определяется из

$$C_A = k(I_o - I_n) = kI_A,$$

где C_A — концентрация элемента A в анализируемой пленке;

k — коэффициент пропорциональности, зависящий от условий анализа (силы тока пучка, ускоряющего напряжения, эффективности регистрации излучения, состава пленки и т. д.), т. е. от параметров вектора $R_{i,j}$

На практике коэффициент k определяют экспериментально;

I_o — измеренная спектрометром интенсивность аналитической линии;

I_A — интенсивность аналитической линии характеристического спектра элемента A за вычетом фона;

I_n — интенсивность фона непрерывного спектра.

Недостатком метода абсолютных измерений при определении C_A с помощью отношения интенсивности аналитических линий элементов A , измеренных I_A и на эталоне $I_{(A)}$, т. е. методом внешних стандартов:

$$C_A = I_A / I_{(A)}$$

При рентгеновском анализе тонких пленок толщиной менее 0,1 мкм энергия прошедших через пленку электронов практически равна энергии первичных электронов пучка, а интенсивность рентгеновских аналитических линий прямо пропорциональна массе вещества в зоне облучения. При этих условиях отношения интенсивностей можно представить в виде:

$$C_A = \frac{I_A(\rho z)_A}{I_{(A)}(\rho z)_{(A)}} = \frac{I_A m_{(A)}}{I_{(A)} m_A},$$

где ρ — плотность;

m_A и $m_{(A)}$ — массы веществ в зоне возбуждения рентгеновского излучения в пленке и эталоне, соответственно.

Для достоверности анализа необходимо, чтобы масса вещества, находящегося в зоне возбуждения рентгеновского излучения, была одинакова для анализируемого объекта и эталона. При анализе достаточно массивных объектов отношение $m_{(A)}/m_A \approx 1$. Толщина же тонких пленок, как электронно-микроскопических объектов, как и пленок, полученных методами осаждения или электролитического травления, подвергаемых рентгеноспектральному исследованию, как правило, неизвестна. Реплики с экстракцией представляют собой скопления частиц вещества или отдельные выделенные микрофазы, помещенные на тонкую пленку — подложку.

В этом случае важен выбор критерия "тонкости" пленки. Этот казался бы простой вопрос на практике оказался довольно сложным [1]. Поэтому предлагалось много разных методов количественного микроанализа тонких пленок, обладающих разной погрешностью анализа. Здесь мы остановимся лишь на некоторых.

Метод нормирования измеренной интенсивности по анализируемому объему вещества имеет вид:

для частиц

$$C_A = [I_A/I_{(A)}] [D_{(A)}^3/D_A^3],$$

для тонких пленок

$$C_A = [I_A/I_{(A)}] [d_{(A)}^3/d_A^3]^2 [h_{(A)}/h_A].$$

При определении элементного состава микрочастиц (образца), имеющих диаметр D_A , и эталона в виде частиц с диаметром $D_{(A)}$ определяют по проекции их изображения, допуская при этом, что их толщина h равна величине сечения. Чем меньше соответствует это допущение реальности, тем больше ошибка. Диаметр электронного зонда на образце d_A и эталоне $d_{(A)}$ поддается измерению. Толщину тонких пленок h_A образца и $h_{(A)}$ эталона необходимо заранее измерять. Однако все известные способы дают значительную ошибку, поэтому используют косвенные методы учета массовой толщины.

Если аналитический электронный микроскоп был бы приспособлен для проведения опознавания образа элементной неоднородности как было показано выше, то можно, воспользовавшись уравнением (2), найти численные значения C_j . Однако такой прибор пока имеется в распоряжении только нашей лаборатории, а потому следует воспользоваться следующим методом [11].

Образец рассматривается как гетерогенная по толщине структура, состоящая из n наложенных друг на друга слоев входящих в него элементов, и предполагается, что справедливо равенство

$$(ph) = \sum_{i=1}^n (ph)_i,$$

где (ph) и $(ph)_i$ — массовые толщины образца и i -го слоя.

Интенсивность аналитической линии от каждого слоя в первом приближении прямо пропорциональна массовой толщине этого слоя и справедливо равенство

$$\frac{(ph)_i}{(ph)_i'} = \frac{I_i}{I_i'}$$

где $(ph)_i'$ — массовая толщина i -го слоя в эталоне;

I_i и I_i' — интенсивности аналитических линий i -го элемента в образце и эталоне, соответственно.

При анализе пленок, толщина которых больше некоторой критической, и первое приближение нуждается в поправке на состав, необходимо ввести поправку только на селективное поглощение излучения в образце, так как другие поправки малы:

$$Q_i = \frac{1}{1 - C_i \frac{(ph)_i}{2}},$$

где $C_i = (\mu / \rho)_i^j \cos \theta$, θ — угол выхода рентгеновского излучения из образца.

$$(\mu / \rho)_i = \sum_{j=1}^n C_j (\mu / \rho)_j^j,$$

C_j — весовая доля i -го компонента в образце.

Выражение для определения весовой доли i -го компонента в образце в общем виде можно представить так:

$$C_i = \frac{I_i}{I_p} \frac{(ph)_p Q_i}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{I_i}{I_p} (ph)_p Q_i \right]}. \quad (5)$$

Процедура определения C_i заключается в том, что измеряют интенсивность аналитических линий и фона и определяют I_i и I_p . Затем решается система уравнений, состоящая из (5) и (6):

$$\sum_{i=1}^n C_i = 1. \quad (6)$$

Полученные значения вновь используют для определения $(\mu / \rho)_i$, и снова решают систему уравнений (5) и (6). Так методом последовательных приближений определяют истинное значение C_i .

Учет влияния аппаратных функций ЭОС на эффективность возбуждения аналитических линий

Одной из наиболее значимых аппаратных функций ЭОС является ускоряющее напряжение. Эффективность микроанализа зависит от ряда факторов, из которых одним из важнейших является правильный выбор оптимальных условий возбуждения аналитической линии рентгеновского излучения. Зависимость интенсивности рентгеновского спектра от скорости первичных электронов, зависящей, в свою очередь, от ускоряющего напряжения, исследована в ряде работ. Некоторые исследователи указывают, что интенсивность в области напряжений до $U = 3U_j$ может быть представлена формулой

$$I = \text{const} (U - U_j)^n,$$

где n имеет значения от 1,5 до 2,5; U_j — напряжение возбуждения данной линии.

Более строгий подход к определению оптимального ускоряющего напряжения с учетом поправок на поглощение позволил получить следующую формулу:

$$I = A \cdot \exp(-k^2 U^2) \left[\frac{U - U_j}{U_j} - \lg \frac{U}{U_j} + \frac{k^2}{6U_j} \cdot (2U^3 - 3U^2 U_j + U_j^3 + \dots) \right],$$

которая справедлива для $U \leq 10 U_i$. Здесь A — константа.

Увеличение интенсивности аналитической линии с повышением ускоряющего напряжения, а точнее с повышением мощности электронного пучка, приводит к повышению предельной чувствительности определения содержания элементов вещества в анализируемом объекте.

Влияние и учет аппаратных функций системы регистрации излучения и эффективность регистрации аналитических линий

Под чувствительностью микроанализа понимают возможность зафиксировать минимальное изменение концентрации в некотором диапазоне концентраций $C + \Delta C$.

Известно, что если электрон, проходя через тонкую пленку, теряет энергию ΔE , то полная интенсивность характеристического излучения равна

$$I = \frac{2\pi e^4 \omega_k}{E_k} N_A \int_{E_0}^{E_0 - \Delta E} \frac{1}{E_0} \ln\left(\frac{E_0}{E_k}\right) dx.$$

Полная интенсивность непрерывного спектра тонкой пленки равна

$$I_n = C_1 \ln\left(\frac{E_p + \Delta E}{E_p}\right) \sum N_A z^2 \int_{E_0}^{E_0 - \Delta E} \frac{1}{E_0} \ln\left(\frac{2E_0}{J}\right) dx,$$

где C_1 — константа;

E_p — энергия рентгеновского излучения;

$(E_p + \Delta E)$ — диапазон энергий рентгеновского излучения;

J — средний потенциал ионизации.

Эффективность регистрации аналитических линий зависит от типа применяемых средств регистрации. В работе [1] было показано, что при 100%-ной эффективности регистрации интенсивность аналитической линии определяется по формуле

$$I_\lambda = I_\lambda^0 = \frac{\int_{\lambda_0 - b_c}^{\lambda_0 + b_c} f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_0 - b}^{\lambda_0 + b} f(\lambda) d\lambda} = I_\lambda^0 R_c,$$

где I_λ^0 — порожденная интенсивность линии;

$2b$ — ширина линии;

R_c — характеризует эффективность спектрометра (детектора);

b_c — полуширина "окна" спектрометра;

λ_0 — длина волны, соответствующая максимальной интенсивности аналитической линии;

$f(\lambda)$ — функция распределения интенсивности аналитической линии включая фон непрерывного спектра.

$R_c = 1$ при $b_c = b$, когда вся аналитическая линия регистрируется спектрометром.

Для заданного значения разрешающей способности спектрометра с увеличением b_c контрастность линии уменьшается, а с повышением разрешающей спо-

способности спектрометра при постоянном значении b_c (энергетического окна спектрометра) контрастность увеличивается.

Из формулы (5) следует, что

$$C_{\text{пр}} = 2\sqrt{2} C \frac{\sqrt{I_{\phi}^0}}{I_{\lambda}^0} \frac{\sqrt{b_c \chi}}{R_c \sqrt{bt}} = \Delta C,$$

где

$$t = \frac{18I_{\phi}}{(I - I_{\phi})^2} \left(\frac{C}{C_{\text{пр}}} \right)^2,$$

здесь t — время, затраченное на анализ;

χ — эффективность регистрации рентгеновского излучения с длиной волны λ_0 ;

I_{ϕ}^0 — порожденная интенсивность фона непрерывного спектра.

Эта формула позволяет сделать оценку анализа. В ней первый множитель характеризует объект исследования, второй — условия возбуждения аналитической линии и фона непрерывного спектра, третий — способ регистрации рентгеновского излучения.

На эффективность регистрации излучения существенное влияние оказывает ширина энергетического окна спектрометра. Правильный выбор ширины окна спектрометра (в кристаллодифракционном спектрометре под этим понимается ширина щели) и времени, затрачиваемого на анализ, позволяет добиться высокой чувствительности определения элемента в объекте исследования.

Влияние и учет аппаратных функций и времени анализа на оптимизацию условий анализа

Инструментальную ошибку обычно определяют по формуле:

$$v_{\text{общ}} = \sqrt{(v_1)^2 + (v_2)^2 + (v_3)^2 + \dots},$$

где v_1 — ошибка воспроизводимости результата измерения за короткие промежутки времени. Она определяется из результатов n -кратного непрерывного измерения одной и той же величины (интенсивности линии);

v_2 — ошибка воспроизводимости результата измерения за большие промежутки времени. Она определяется из результатов n -кратного периодического измерения одной и той же величины (интенсивности линии) в течение длительного времени;

v_3 — ошибка за счет механических юстировок, приготовления и установки образцов, настройки спектрометра. Она определяется из результатов многократного периодического измерения одной и той же величины после каждой новой настройки, юстировки или установки образца, т. е. набирается статистика.

Знание величин v_1 , v_2 , v_3 и $v_{\text{общ}}$ позволяет избежать ошибок при анализе объектов.

При решении широкого круга задач опознавания образа при микроанализе приходится проводить измерения интенсивности аналитических линий и фона в условиях малого отношения $I_{\lambda}/I_{\phi} \rightarrow 1$, т. е. в случаях, когда скорость счета квантов линии находится на уровне фона. В этом случае анализ является доста-

точно эффективным при заданной относительной ошибке измерений, если оптимальным образом распределено время счета квантов линии и фона. Ниже даны формулы для вычисления числа квантов в этих условиях.

$$N_{\lambda+\phi} = \left(\frac{\varepsilon \% I_{\lambda}}{100 I_{\phi}} \right)^{-2} \left(1 + \frac{I_{\lambda}}{I_{\phi}} \right) \left[1 + \left(1 + \frac{I_{\lambda}}{I_{\phi}} \right)^{1/2} \right],$$

$$N_{\phi} = \left(\frac{\varepsilon \% I_{\lambda}}{100 I_{\phi}} \right)^2 \left[1 + \left(1 + \frac{I_{\lambda}}{I_{\phi}} \right)^{1/2} \right].$$

Эти формулы дают возможность определить число импульсов от фона и линии вместе с фоном непрерывного спектра, соответствующее оптимальному распределению общего времени измерения интенсивности фона и линии. Величина ошибки измерения $m+1$ в этом случае, как известно, определяется по формуле

$$\varepsilon(I_{\lambda}) \% = 100 \left(\frac{I_{\lambda}^2 t}{I_{\phi}} \right)^{-1/2} \left\{ \left[m \left(1 + \frac{I_{\lambda}}{I_{\phi}} \right) \right]^{1/2} + 1 \right\},$$

где t — полное время измерения числа импульсов линии и фона.

Л и т е р а т у р а

1. Васичев Б. Н. Электронно-зондовый микроанализ тонких пленок. — М.: Metallurgia, 1977.
2. Тронево́й Н. В., Тронево́й М. А. Электронно-зондовый микроанализ неоднородных поверхностей. — М.: Metallurgia, 1996.
3. Introduction to Analytical Electron Microscopy/Edited by John J. Hren at c. (Основы аналитической электронной микроскопии/Под ред. Дж. Дж. Грена и др.; перевод с англ./Под ред. М. П. Усикова. — М.: Metallurgia, 1990.
4. Васичев Б. Н. //Тез. док. Всероссийской науч.-техн. конф. "Микроэлектроника". — Москва—Зеленоград, ноябрь, 1994.
5. Васичев Б. Н. //Известия АН СССР. Сер. Физ., 1990. Т. 54. № 2. С. 353.
6. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. в 2-х кн. Кн. 1/Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. С. 303.
7. Смирнов Ю. С., Васичев Б. Н., Камунин А. А. //Известия АН СССР. Сер. Физ. 1983. Т. 47. С. 1078.
8. Васичев Б. Н., Смирнов Ю. С. //Расширенные тезисы докл. VIII Всес. конф. по локальным рентгеноспектральным исследованиям и их применению. — Черногловка: Изд. ИХФ, 1982. С. 26.
9. Яковец Х., Гейнрих К. Физические основы рентгеноспектрального локального анализа. — М.: Наука, 1973. С. 198.
10. Гимельфарб Ф. А. Ренгеноспектральный микроанализ слоистых материалов. — М.: Metallurgia, 1986. С. 152.
11. Васичев Б. Н. //Известия АН СССР. Сер. Физ. 1982. Т. 46. № 12. С. 2391—2393.

INFORMATION SPECIAL FEATURE IDENTIFY FORM HAVE APPEARANCE ELEMENTARY GETEROGEN STRUCTURE AND TOPOLOGER IN SPECIMENS SEMICONDUCTORS AND OTHER MATERIALS BY METHOD ANALYTIC ELECTRON MICROSCOPY

B. N. Vasichev

Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

In this paper discuss method electron beam microanalysis identify image in the form of element non homogeneous surroundings in thick and thin films.