

2. Лидер В. В., Рожанский В. Н. Новый рентгеновский метод прецизионного определения межплоскостных расстояний при съемке в расходящемся пучке.— ФТТ, 1967, т. 9, № 12.
3. Лидер В. В., Рожанский В. Н. Универсальная рентгеновская приставка к электронному микроскопу.— Изв. АН СССР. Сер. Физика, 1970, т. 34, № 7.
4. Уманский М. М., Шаскольская М. П. Определение предельных толщин материала, создающего дебаеграмму.— ЖТФ, 1946, т. 16, № 6.
5. Ishida K., Matsui I., Kamejima T., Sakuma I. X-ray Study of $Al_xCa_{1-x}As$ Epitaxial Layers.— Phys. Stat. Sol. (a), 1975, vol. 31, N 1.
6. Rowland M. C., Smith D. A. Lattice Distortion in $Ga_{1-x}Al_xAs$ Layers.— J. Cryst. Growth, 1977, vol. 38, N 1.
7. Hornstra J., Bartels W. J. Determination of the Lattice Constant of Epitaxial Layers of III — V Compounds.— J. Cryst. Growth, 1978, vol. 44, N 5.
8. Brantly W. A. Calculated Elastic Constants for Stress Problems Associated with Semiconductor Devices.— J. Appl. Phys., 1973, vol. 44, N 1.
9. Арсентьев И. Н., Берт Н. А., Конников С. Г., Уманский В. Е. Определение упругих напряжений в гетероструктурах методом широко расходящегося пучка.— ФТП, 1980, т. 14, № 1.
10. Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. Закономерности дефектообразования в гетероэпитаксиальных структурах соединений $A^{III}B^V$ для оптоэлектроники.— Кристаллография, 1977, т. 22, № 2.

Поступила в редакцию 18 августа 1979 г.

УДК 543.063

И. А. ГУНЬКО, С. Г. КОННИКОВ, Т. Б. ПОПОВА, Э. А. ТРОШ

(Ленинград)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОГО МИКРОАНАЛИЗА ТОНКИХ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ И СТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ

В последнее время вопросу микроанализа тонких слоев уделяется большое внимание. При разработке метода анализа тонких слоев и пленок важно не только учитывать эффекты, обычные при микроанализе любых объектов, такие, как поглощение, эффект различия атомных номеров, вторичная флуоресценция, но и знать распределение анализируемого излучения в исследуемом образце. В микроанализе понятия тонких слоев, пленок отличаются от принятых в электронике и других областях. Так, например, обычно тонкими считают пленки с толщиной менее 100 нм. С точки зрения микроанализа тонкими являются слои, толщина которых меньше области возбуждения рентгеновского излучения, т. е. менее 0,5—1 мкм. Так как область возбуждения существенно меняется при изменении условий анализа, понятие тонкости слоев не абсолютно. Существует ряд аналитических и эмпирических методик анализа тонких пленок. Среди них следует выделить методики микроанализа тонких пленок, разработанные Колби [1], Боровским и Рыдником [2, 3]. В первой работе [1] расчет поправок на атомный номер проводился с учетом влияния границы на условия генерации рентгеновского излучения в анализируемой пленке, во второй [2] — авторы вводили дополнительно к методу ZAF поправку на толщину пленки. Причем эта поправка разбива-

ется на два слагаемых, первое из которых относится к случаю близких атомных номеров и рассчитывается по закону ослабления рассеянных электронов, второе слагаемое учитывает различие в атомных номерах подложки и слоя, и для его определения авторами использованы представления об эффективном источнике обратно рассеянных электронов на гетерогранице. Рассматриваемые в литературе методики анализа тонких пленок на подложках, как правило, применялись к анализу пленки на основе бинарной металлической системы. В принципе распространение этих эмпирических и полуэмпирических методик возможно и на случай исследования эпитаксиальных пленок или многослойных структур на основе полупроводниковых соединений. Однако это распространение требует большой серии экспериментов для подбора параметров эмпирической либо полуэмпирической теории. Очень часто вместо реального эксперимента, направленного на определение эмпирических параметров, оказывается выгодным проводить машинный эксперимент; в данном случае это расчет электронных траекторий по методу Монте-Карло. Из преимуществ применения метода Монте-Карло к микроанализу тонких пленок можно отметить следующие наиболее важные: в расчетах не используются функции и коэффициенты, полученные эмпирически, что позволяет проводить расчеты для слоя (набора слоев), состоящего из любого количества любых элементов; нет ограничения на толщину пленки и соотношение средних атомных номеров материалов подложки и слоя. В последние годы появилось несколько работ, посвященных анализу тонких слоев и других объектов излучения с помощью моделирования процесса возбуждения методом Монте-Карло [4—6]. При моделировании электронной траектории методом Монте-Карло на каждом шаге траектории проверяется вероятность образования кванта рентгеновского излучения определенной аналитической линии и фиксируются координаты точек их образования. По этим данным может быть получено трехмерное распределение квантов в возбуждаемом объеме, а также рассчитано продольное и поперечное распределения интенсивности излучения в возбуждаемом объеме с учетом ослабления интенсивности за счет поглощения излучения веществом мишени. В данной работе основная схема расчета совпадает с описанной ранее [7] для нахождения распределения излучения в массивном объекте. Модификации расчетной схемы позволяют проводить расчеты не только для однородных мишеней, но и для тонких пленок на подложках, для многослойных структур. Схема построена на сочетании теорий однократного и многократного рассеяний так, чтобы шаг траектории был значительно меньше размеров области, в которой проходит данный участок траектории. В расчетах учтены пространственные границы, на которых резко меняются параметры материала (атомный вес, номер, плотность и т. д.).

Расчеты проводились в основном для полупроводниковых бинарных соединений $A_{III}V_V$ и их твердых растворов и структур с тонкими слоями на их основе. Сделаны проверочные расчеты для металлов и сплавов. Сравнение результатов с данными других авторов [4—6] показало хорошее согласование. В большинстве случаев расхождение экспериментальных данных, полученных при исследовании эпитаксиальных слоев твердых растворов, с данными других авторов в величинах коэффициентов обратного рассеяния и глубине проникновения не превышало 10—20%, а в величинах относительных интенсивностей рентгеновского излучения — 5—10%. Измерения проводились на микроанализаторах JXA-5A и JSM-50A фирмы «Jeol», расчеты — методом Монте-Карло на ЭВМ БЭСМ-4 и БЭСМ-6.

В зависимости от целей анализа, требуемой точности, особенностей объектов измерения (толщины слоев, элементного состава слоя и подложки и т. д.) возможен разный подход к разработке методики количественного анализа тонких слоев:

Т а б л и ц а 1

Система	Аналитическая линия	E_0 , кэВ	L_{\parallel}	L_{\perp}
GaAs—AlAs	Al(K_{α})	5	0,2—0,4	0,5—0,8
		10	0,3—0,6	0,8—1,1
InP—GaP	In(L_{α})	10	0,3—0,5	1,0—1,2
		20	1,7—2,0	3,0—3,3
GaP—AlP	Al(K_{α})	5	0,3—0,6	0,5—0,9
		10	0,5—1,1	0,9—1,3
GaAs—GaP	P(K_{α})	5	0,2—0,5	0,9—1,1
		10	0,3—0,6	
GaAs—InAs	In(L_{α})	10	0,5—1,0	0,8—1,2
InAs—InSb	Sb(L_{α})	20	1,7—2,2	2,6—3,1
GaSb—AlSb	Al(K_{α})	5	0,3—0,5	
InAs—InP	P(K_{α})	5	0,25—0,5	

1) сведение методики анализа тонких пленок к методике, разработанной для массивных образцов путем выбора условий анализа, оптимальных с точки зрения локальности;

2) проведение анализа слоев известной толщины при режимах, оптимальных по контрастности и точности, и введение поправки на потерю интенсивности в тонком слое;

3) одновременное определение состава и толщины слоев при увеличении числа непосредственно анализируемых элементов или проведении анализа при нескольких значениях энергий электронов зонда;

4) анализ многослойных структур по сколу.

Рассмотрим более подробно разные случаи анализа тонких слоев и полученные результаты.

1. Как уже указывалось, критерием тонкости слоя при проведении микроанализа является соотношение толщины слоя и размеров области возбуждения рентгеновского излучения (точнее, области, из которой выходит анализируемое излучение с учетом его поглощения мишенью). При проведении анализа с поверхности слоя толщина сравнивается с размерами области в направлении падения электронного пучка, т. е. с продольной локальностью, а при анализе по сколу — с поперечной. Так как при изменении энергии электронов локальность варьирует в широких пределах, во многих случаях уменьшением энергии зонда можно добиться существенного уменьшения области возбуждения и сведения анализа тонкого слоя к случаю анализа массивного образца. При этом используются обычные методы коррекции: ZAF, метод последовательных приближений или поправки, которые рассчитываются методом Монте-Карло для массивных образцов. В этом случае важно достаточно точно знать локальность анализа и ее зависимость от ускоряющего напряжения. Величины локальности мы получили из расчетов пространственного распределения рентгеновского излучения в веществе методом Монте-Карло [7]. В табл. 1 представлены значения локальности для бинарных соединений $A_{III}B_V$ и их твердых растворов (L_{\perp} — поперечная локальность; L_{\parallel} — продольная локальность; $\Theta = 40^\circ$ — угол отбора рентгеновского излучения). На рис. 1 приведены зависимости поперечной (треугольники) и продольной (кружки) локальностей от энергии электронного зонда (E_0) для твердых

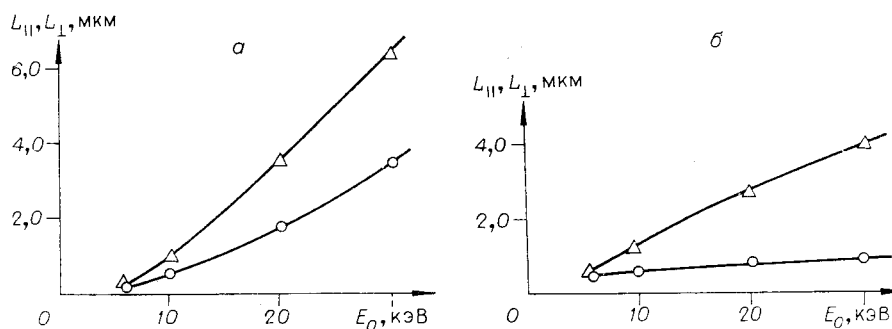


Рис. 1.

растворов $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ($x = 0, 1; y = 0, 2$) при анализе по $\text{In}(L_\alpha)$ (а) и $\text{P}(K_\alpha)$ (б).

Метод выбора оптимальных режимов наиболее пригоден при изучении достаточно тяжелых мишеней, небольшой энергии возбуждения рентгеновского излучения, значительном поглощении аналитического излучения. Например, при снижении энергии до 5–6 кэВ рассмотренный подход используется при анализе пленок толщиной более 0,3–0,4 мкм в системах GaAs–AlAs (по Al), GaP–InP (по In), GaAs–GaP (по P) и т. д. Эта методика не применима при анализе элементов с интенсивным вторичным излучением, резко увеличивающим анализируемую область, и при одновременном определении элементов со значительно различающимися энергиями возбуждения. Ошибка измерения может также возрастать за счет влияния обратного рассеяния от подложки при $L_{||} < d < z_{\text{max}}$ (z — максимальная глубина проникновения электронов) и значительном различии атомных номеров слоя и подложки.

2. При исследовании слоев известной толщины во многих случаях целесообразно проводить анализ при ускоряющих напряжениях, оптимальных с точки зрения контрастности аналитической линии и точности, и вводить поправку на потерю интенсивности в тонком слое. Соотношение концентрации элемента и относительной интенсивности можно представить в виде

$$K^A(d) = C^A \Sigma P, \quad K^A = I_{\text{обр}}^A(d) / I_{\text{эт}}^A,$$

где $I_{\text{обр}}^A(d)$ — интенсивность излучения, регистрируемая от образца данной толщины; $I_{\text{эт}}^A$ — интенсивность, регистрируемая от массивного эталона с концентрацией $C_{\text{эт}}^A = 1$.

Суммарную поправку ΣP можно представить в виде

$$\Sigma P = P(z)P(\chi)P(F)P(d).$$

Здесь $P(z)$, $P(\chi)$, $P(F)$, $P(d)$ — поправки на атомный номер, поглощение, вторичную флуоресценцию, потерю интенсивности в тонком слое соответственно.

Наличие эффекта вторичной флуоресценции вносит существенные осложнения при разработке методики анализа тонких пленок, и в данной работе мы не будем касаться этого вопроса.

Метод Монте-Карло позволяет рассчитать поправку $P(d)$, а также суммарную поправку ΣP с учетом $P(z)$ и $P(\chi)$. Схема расчета методом Монте-Карло зависит от соотношения параметров подложки и слоя. При значительном расхождении параметров в расчет вводятся пространственные границы, на которых происходит резкое изменение параметров материала (атомного номера и веса, плотности и т. д.). Расчет относительной интенсивности $K^A(d)$ проводится для некоторых фиксированных

значений толщины d и состава C^A . По полученным расчетным значениям K^A строятся семейства калибровочных кривых $C^A = f(K^A d)$. Кривые позволяют находить искомый состав по измеренным относительным интенсивностям рентгеновского излучения и толщины слоя. Однако такой метод введения поправок требует больших затрат машинного времени. С целью уменьшения объема вычислений проводятся расчеты всего для нескольких значений концентрации с учетом, что поправка $P(d)$ не сильно зависит от состава пленки. Изменение $P(z)$ и $P(\chi)$ относительно состава учитывается по аналитическим зависимостям. Задача существенно упрощается, если изменение параметров на границе слой — подложка невелико (различие в величине z менее 5). В этом случае можно считать, что распределения рентгеновского излучения в структуре слой — подложка и в массивном образце соответствующего состава идентичны и, следовательно, из распределения в массивном образце можно получить значения $P(d)$ для всего набора толщин:

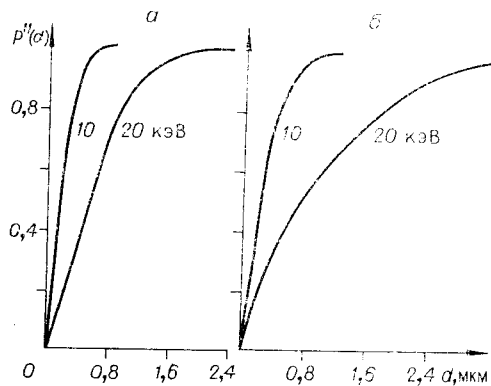


Рис. 2.

$$P(d) = I(d)/I(\infty),$$

где $I(d)$, $I(\infty)$ — интенсивности рентгеновского излучения, регистрируемые от слоя данной толщины и массивного образца соответственно; $P(d)$ — поправка на потерю интенсивности в тонком слое, показывающая долю излучения в слое данной толщины по отношению к суммарной интенсивности. Кривые $P(d)$ представлены на рис. 2 для твердого раствора $\text{Ga}_2\text{In}_{1-x}\text{P}$ (a — поправка на толщину $P(d)$ при измерениях с поверхности, b — по сколу). Было показано, что в данной системе, а также во многих других твердых растворах $\text{Al}_{III}\text{B}_V$ кривыми можно пользоваться в достаточно широком интервале концентраций, так как распределение излучения слабо зависит от состава в этих системах. Практически поступают следующим образом. По измеренным значениям K^A и d определяют приблизительный интервал концентраций. Для этого интервала по кривым находят значения $P(d)$, далее $K_\infty^A = K^A(d)/P(d)$, где K^A — относительная интенсивность излучения для массивного образца с составом, соответствующим измеренному слою. K_∞^A можно использовать для нахождения $C^A = f(K^A)$ по обычным калибровочным кривым, построенным методом ZAF или методом последовательных приближений. На рис. 3 представлены калибровочные кривые для определения состава в тонких слоях в системах $\text{GaAs} - \text{AlAs}(a)$, $\text{GaP} - \text{InP}(b)$ ($E_0 = 10$ кэВ). Здесь рассмотрено определение состава в однослойных структурах, однако этим методом рассматриваются поправки и для многослойных структур при измерениях с поверхности. С помощью приведенных кривых можно получить данные о составе тонких слоев и по сколу, но для этого кривые $P(d)$ необходимо перестроить с учетом распределения электронов в зонде. Нами при расчетах было принято нормальное распределение электронов, причем предполагалось, что диаметр зонда близок к диаметру области вторичных электронов. Эти же кривые $P(d)$ позволяют найти толщину слоев известного состава при измерениях с поверхности. В этом случае подложка не должна содержать измеряемый элемент.

3. Во многих задачах толщина анализируемого слоя неизвестна и ее измерение затруднено. В ряде случаев возможно одновременное на-

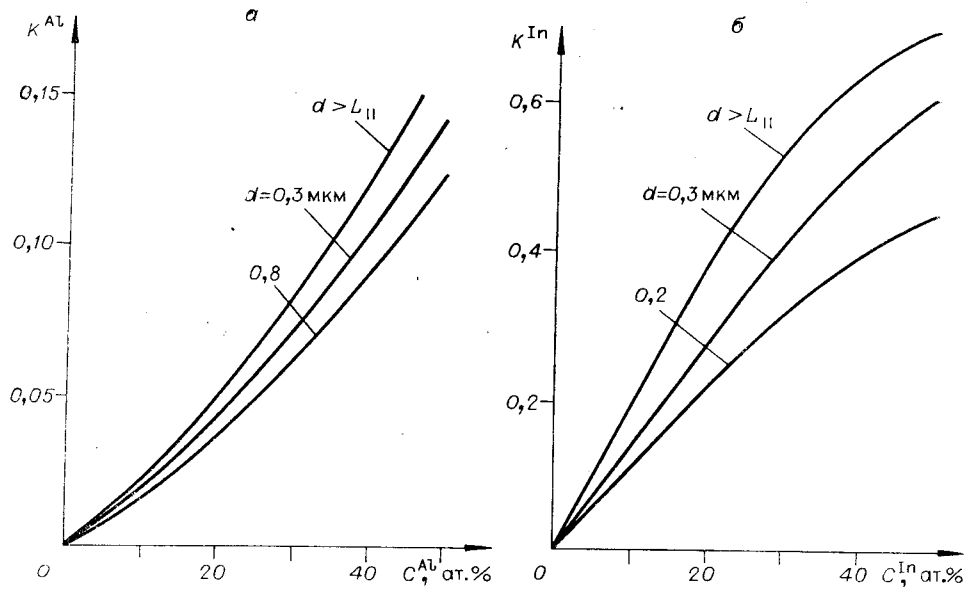


Рис. 3.

хождение состава и толщины слоев, при этом анализируемые элементы не должны содержаться в подложке. Определение возможно для бинарных, квазибинарных, тройных, а также четверных систем типа $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$.

В бинарных и квазибинарных системах состав полностью задается концентрацией одного элемента. Соотношение $C^A = f(K^A)$ представляет собой уравнение с одним неизвестным, графически выражается кривой на плоскости — калибровочной кривой, которая и позволяет по измеренным значениям K^A находить искомые C^A . В случае одновременного определения C и d появляется лишнее неизвестное. Это приводит к необходимости введения дополнительных уравнений. Например, можно одновременно измерить относительную интенсивность по двум элементам, тогда

$$C^A = f(K^A, d), \quad (1)$$

$$C^B = f(K^B, d), \quad (2)$$

$C^A + C^B = 1$ или для квазибинарных систем типа $A_xB_{1-x}C$

$$C^A + C^B = 0,5, \quad (3)$$

$$C^C = 0,5.$$

Таким образом, мы имеем три уравнения (1), (2) и (3) с тремя неизвестными C^A , C^B , d .

Другой путь увеличения числа уравнений — проведение анализа по одному элементу, но при двух энергиях электронного зонда. В таком случае

$$C_{E_1}^A = f(K_{E_1}^A, d), \quad (4) \quad C_{E_2}^A = f(K_{E_2}^A, d), \quad (5) \quad C_{E_1}^A = C_{E_2}^A. \quad (6)$$

Равенство (6) исключается, имеем 2 уравнения — (4) и (5) — с двумя неизвестными C^A , d . Аналитическое решение этой системы затруднено. Практически для одновременного определения состава и толщины удобно пользоваться таблицами. Фрагмент такой таблицы для определения состава в квазибинарных слоях $Ga_xIn_{1-x}P$ ($x = 0,2 - 0,6$; $d = 0,1 - 0,6$ мкм) представлен в табл. 2. Определение проводится по In и P. Измеренные

Таблица 2

d , мкм	C^{In} , ат. %									
	10		15		20		25		30	
	K^{In}	K^{P}	K^{In}	K^{P}	K^{In}	K^{P}	K^{In}	K^{P}	K^{In}	K^{P}
0,1	0,062	0,082	0,089	0,080	0,114	0,078	0,139	0,077	0,171	0,076
0,2	0,108	0,166	0,156	0,161	0,206	0,159	0,252	0,156	0,295	0,154
0,3	0,137	0,220	0,198	0,213	0,267	0,210	0,327	0,207	0,383	0,203
0,4	0,155	0,246	0,224	0,239	0,300	0,235	0,367	0,232	0,430	0,228
0,5	0,163	0,263	0,236	0,255	0,313	0,251	0,382	0,247	0,449	0,243
0,6	0,168	0,269	0,243	0,261	0,316	0,257	0,386	0,253	0,453	0,249

значения K^{In} и K^{P} сравниваются с табличными. Если пара табличных значений $K^{\text{In}} - K^{\text{P}}$ совпадает с измеренными, значения C^{In} в верхней строке и d в левом столбце дадут искомые состав и толщину слоя.

Значения $K^{\text{In}} = f(C^{\text{In}}, d)$ и $K^{\text{P}} = f(C^{\text{P}}, d)$ находятся из данных расчета методом Монте-Карло полностью, или зависимость $K = f(C)$ определяется методом ZAF, а $K = f(d)$ — методом Монте-Карло. При исследовании тройных и четверных систем задача одновременного определения концентрации и толщины становится более сложной. Для четверной системы типа $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$ можно записать

$$C_{E_1}^A = f(K_{E_1}^A, K_{E_1}^C, d), \quad (7)$$

$$C_{E_1}^C = f(K_{E_1}^C, K_{E_1}^A, d), \quad (8)$$

$$C_{E_2}^A = f(K_{E_2}^A, K_{E_2}^C, d), \quad (9)$$

$$C_{E_2}^C = f(K_{E_2}^C, K_{E_2}^A, d), \quad (10)$$

$$C_{E_1}^A = C_{E_2}^A, \quad C_{E_1}^C = C_{E_2}^C.$$

Имеем четыре уравнения (7)–(10) с тремя неизвестными: C^A , C^C , d . Решение этой системы проводится косвенно.

Рассмотрим пример определения состава и толщины слоев $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ на подложке GaAs. Соотношение величин K^{In} , K^{P} и C^{In} , C^{P} для каждой из заданного набора возможных толщин представляется методом «изогипс» [9]. Поправки вводятся методом ZAF, а влияние d на величину измеряемой относительной интенсивности учитывается по данным с распределении излучения в образце. Эти данные постоянны для определенной системы, они представляются графически или вводятся в память ЭВМ. Измерения проводятся по линиям $\text{In}(L_\alpha)$ и $\text{P}(K_\alpha)$ при $E_1 = 10$ и $E_2 = 20$ кэВ. По измеренным значениям K_{10}^{In} , K_{20}^{In} , K_{10}^{P} и K_{20}^{P} для нескольких значений $d = 0,1 - 0,5$ мкм рассчитываются возможные значения C^{In} и C^{P} (методом «изогипс» графически или на ЭВМ). Результаты выдаются в виде таблицы. Фрагмент

Таблица 3

d , мкм	$E_1=10$ кэВ		$E_2=20$ кэВ	
	C^{In}	C^{P}	C^{In}	C^{P}
0,3	0,284	0,271	0,332	0,280
0,4	0,253	0,245	0,258	0,240
0,5	0,243	0,231	0,209	0,221

Таблица 4

$d_1=d_3$, мкм	d_2 , мкм				$d_1=d_3$, мкм	d_2 , мкм			
	0,2	0,4	0,6	0,8		0,2	0,4	0,6	0,8
0,6	0,700	0,644	0,600	0,565	1,2	0,840	0,800	0,715	0,782
0,8	0,755	0,708	0,668	0,653	1,6	0,894	0,876	0,876	0,876
1,0	0,817	0,774	0,726	0,716	2,0	0,959	0,956	0,956	0,956
					2,4	1,0	1,0	1,0	1,0

представлен в табл. 3. Исходные значения: $K_{10}^{\text{In}} = 0,318$, $K_{20}^{\text{In}} = 0,153$, $K_{10}^{\text{P}} = 0,093$, $K_{20}^{\text{P}} = 0,0446$.

Сравнение значений C_{10}^{In} и C_{20}^{In} , а также C_{10}^{P} и C_{20}^{P} , полученных в предположении разных толщин, показывает, что истинными являются результаты $d = 0,4 \pm 0,05$, $C^{\text{In}} = (C_{10}^{\text{In}} + C_{20}^{\text{In}})/2 = 0,255 \mp 0,003$, $C^{\text{P}} = 0,243 \pm \pm 0,003$.

4. При измерении по сколу состава тонких слоев, входящих в состав многослойной структуры, отклонение измеряемой интенсивности от истинной зависит не только от толщины исследуемого слоя и его состава, но и от толщины и состава соседних слоев. Введение поправки при определении состава в таких случаях основано на сравнении измеренной интенсивности излучения от данного слоя с теоретически рассчитанной для некоторой гипотетической структуры, близкой к исследуемой. В случае когда параметры материала слабо меняются на границах слоев, кажущееся распределение излучения в структуре рассчитывается путем свертки предполагаемого распределения концентрации одного из основных элементов в структуре и распределения рентгеновского излучения в области генерации с учетом распределения электронов в зонде. Сравнение с набором таких распределений позволяет найти истинное распределение компонентов и состав тонких слоев. В качестве примера рассмотрим определение состава слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в двойной симметричной гетероэлазной структуре $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложке GaAs, $d_1 = d_3$ — толщины эмиттерных слоев, d_2 — толщина активного слоя GaAs. Для такой структуры при $x = 0,3 - 0,5$ изменением параметров на границах слоев, а также зависимостью распределения излучения от концентрации Al можно пренебречь. Тогда поправка на отклонение измеряемой интенсивности от истинной будет зависеть только от толщины слоев. В табл. 4 представлены величины $P(d_1, d_2, d_3)$ для $E_0 = 15$ кэВ.

Аналогичный подход осуществляется и при определении состава в тонких слоях с резким градиентом состава. На рис. 4, а показаны распределения интенсивности излучения $\text{Al}(K_\alpha)$ в структуре GaAs — $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с изменением x от $C_{\text{max}}^{\text{Al}} = 20$ ат. % на границе до $C_{\text{min}}^{\text{Al}} = 0$ на поверхности, $E_0 = 15$ кэВ. Кривые 1 и 2 отличаются толщиной слоя и, следовательно, градиентом состава ($1 - dc/dx = 12$ ат. %/мкм, $2 - dc/dx = 6$ ат. %/мкм). Кривые на рис. 4, б получены из кривых типа 1, 2 рис. 4, а и позволяют по измеренным максимальным значениям интенсивности находить концентрацию Al на границе слой — подложка.

Мы рассмотрели разные случаи применения данных о распределении рентгеновского излучения в исследуемом объекте при электронно-зондовом анализе. Расчеты распределений проводились методом Монте-Карло по разным модификациям одной основной программы. Эти модификации позволили рассчитать распределения излучения в однородном массивном образце, в тонких слоях, на подложках, учесть изменение параметров материала на границах между слоями. На основе результатов расчетов были разработаны методики определения состава в тонких сло-

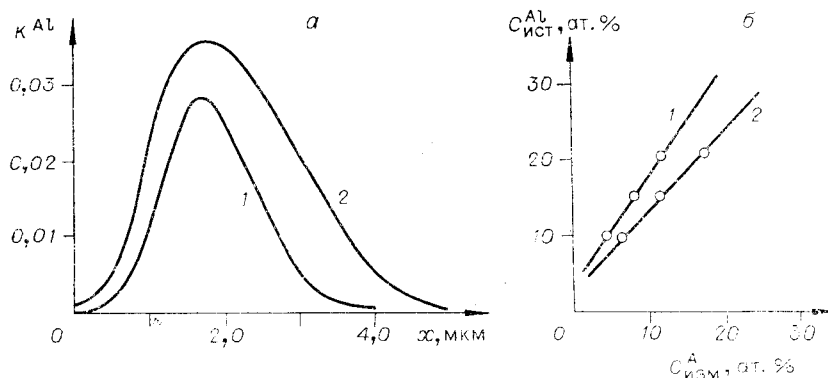


Рис. 4.

ях с известной и неизвестной толщинами, в слоях с градиентом, в многослойных структурах, при измерениях по сколу и поверхности слоя. Определены режимы, при которых анализ слоев может проводиться по методикам, разработанным для массивных образцов. Составлены таблицы и графики для введения поправок в результаты измерения тонких слоев разного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Практическая** растровая электронная микроскопия/Под ред. Дж. Гоулстейна и Х. Яковица: Пер. с англ. М.: Мир, 1978, с. 507.
2. **Рыдник В. П., Боровский И. Б.** К методике количественного локального рентгено-спектрального анализа.—Заводская лаб., 1968, т. 34, № 8.
3. **Рыдник В. П.** Об анализе состава тонких пленок с помощью первичного характеристического рентгеновского излучения.—В кн.: Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Вып. 10. Л.: Машиностроение, 1972, с. 170—178.
4. **Kyser D., Murata K.** Quantitative Electron Microprobe Analysis of Thin Films on Substrates.—IBM. J. Res. Develop., 1974, vol. 13, p. 352—363.
5. **Bolon R. B., Lifshin E.** The Use of Monte-Carlo Techniques for X-ray Analysis of Thin Films and Fine Structures.—In: Proc. of VI Annual SEM Simp. IITRI. Chicago, 1973, p. 285—292.
6. **Kyser D., Murata K.** Application of Monte-Carlo Simulation to Electron Microprobe Analysis of Thin Films on Substrates.—In: NBS Spec. Publ. 460, Proc. Workshop Use Monte-Carlo Cals. Washington, 1976, p. 129—138.
7. **Годлиник Т. Б., Гунько Н. А., Конников С. Г., Тропи Э. А.** Определение локальности микрорентгеноспектрального анализа полупроводниковых соединений и твердых растворов $Al_{1-x}V_x$ методом Монте-Карло.—В кн.: Оптика рентгеновских лучей и микроанализ. (Материалы VII Междунар. конф. по оптике рентгеновских лучей и микроскопии). Л.: Машиностроение, 1976, с. 20—24.
8. **Годлиник Т. Б., Гунько Н. А., Конников С. Г., Тропи Э. А.** Расчет поправок количественного рентгеноспектрального микроанализа твердых растворов $Al_{1-x}V_x$ методом Монте-Карло.—В кн.: Тез. докл. на 7-й Междунар. конф. по атомной спектроскопии. Прага, 1977, с. 269.
9. **Alferov Z. I. et al.** Preparation of Al-Ga-P-As Heterostructures.—Kristall und Technik, 1975, Bd 10, N 6.

Поступила в редакцию 28 августа 1979 г.