

13. De Kock A. J. et al. Microdefects and Striations in Dislocation-Free LEC — GaP Crystals.— J. Cryst. Growth, 1977, vol. 41, N 1.
14. Шефталъ Н. Н., Козлов Ю. А. Эволюция свободно растущего монокристалла.— В кн.: Процессы реального кристаллообразования. М.: Наука, 1977, с. 69—112.
15. Василенко Н. Д., Дьяченко А. М., Марончук И. Е., Масенко Б. П. О влиянии подложки на механические напряжения в эпитаксиальных гетероструктурах $Al_xGa_{1-x}As-GaAs$.— В кн.: Кристаллизация и свойства кристаллов. Вып. 5. Новочеркасск: изд. Новочеркасского политехн. ин-та, 1978, с. 25—28.
16. Гиваргизов Е. И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. М.: Наука, 1977.
17. Чалмерс В. Теория затвердевания. М.: Металлургия, 1968.
18. Литвин А. А., Марончук И. Е. Особенности выращивания эпитаксиальных слоев из ограниченного объема раствора-расплава.— Кристаллография, 1977, т. 22, № 1.
19. Hartman R. L., Hartman A. R. Strain-Induced Degradation of GaAs Injection Lasers.— Appl. Phys. Lett., 1973, vol. 23, N 3.

Поступила в редакцию 14 января 1980 г.

УДК 621.315.592 : 543.422.8

Н. А. БЕРТ, С. Г. КОННИКОВ, В. Е. УМАНСКИЙ
(Ленинград)

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ЗОНДА

Введение. В середине тридцатых годов Косселем были разработаны физические основы метода рентгенографии с расходящимся пучком, позволяющего в принципе проводить локальные прецизионные измерения параметра элементарной ячейки [1]. Развитие техники формирования тонких электронных пучков, создание электронно-зондовых приборов и в связи с этим возможность получения источников рентгеновского излучения малых размеров порядка нескольких микрометров послужили дальнейшему развитию метода Косселя и способствовали созданию камеры к микроанализатору для проведения рентгеноструктурных исследований. Однако целый ряд конструктивных и методических сложностей затрудняет и по сегодняшний день широкое использование метода «истинного» Косселя для проведения рентгеноструктурных исследований непосредственно в микроанализаторе. К ним следует отнести и тот факт, что не всегда можно использовать для формирования дифракционной картины рентгеновское излучение, генерируемое в результате бомбардировки исследуемого образца электронным зондом. В связи с этим значительный интерес представляет метод широко расходящегося пучка (ШРП), реализация которого в электронно-зондовом приборе не представляет значительных трудностей [2]. Данный метод исследования имеет ряд преимуществ перед традиционными рентгеновскими методами исследования, так как обладает топографичностью и позволяет одновременно получать рефлексы от различных кристаллографических плоскостей. Кроме того, в сочетании с другими методиками, используемыми при работе на электронно-зондовом приборе (рентгеновский микроанализ, микрокатодолуминоесценция, растровая микроскопия, «индуцированный» ток и т. д.), этот метод позволяет точнее получить информацию о свойствах изучаемого объекта.

В данной работе обсуждаются возможности рентгенодифракционных исследований гетероструктур с помощью метода ШРП, реализованного конструктивно на электронно-зондовом приборе JXA-5A («Jeol», Япо-

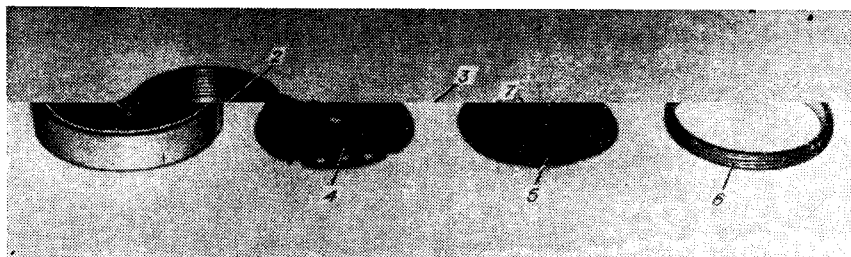


Рис. 1. Рентгеновская приставка к РЭММу JXA-5A для съемки рентгенограмм методом обратного отражения ШРП:

1 — корпус, 2 — столик для образцов, 3 — корпус фотокассеты, 4 — фотопленка, 5 — черная бумага, 6 — прижимное кольцо, 7 — пистон с мишенью.

ния). Ниже рассматривается методика определения рассогласования параметров решеток ($\Delta a/a$), установление величин напряжений (σ) и деформаций (ϵ), возникающих в гетероструктурах, исследование температурной зависимости рассогласования в структурах подложка — гетероэпитаксиальный слой; обсуждаются также конструкция устройства к прибору JXA-5A для проведения рентгеноструктурных исследований и способы расчета $\Delta a/a$, σ , ϵ .

Определение величины рассогласования параметров элементарной ячейки в структуре подложка — эпитаксиальный слой (слои). Вследствие ограниченного объема камеры образцов в микроанализаторе JXA-5A наиболее приемлемой для получения рентгенограмм на отражение является схема с источником рентгеновского излучения, расположенным в плоскости регистрирующей фотопластинки [2]. В такой геометрии реализуется наибольший путь рентгеновских лучей при заданных размерах рентгеновской приставки.

Для получения рентгенограмм методом обратного отражения ШРП нами использовалась предложенная в работе [3] простая рентгеновская приставка, в конструкцию которой были внесены некоторые изменения (рис. 1). В частности, набор съемных кассет (3) позволяет ускорить процесс съемки рентгенограмм. С помощью перемещающегося по высоте столика для образца (2) проводится установка оптимального расстояния источник — кристалл. В качестве прострельной мишени (7), которая служит источником рентгеновского излучения при бомбардировке ее сфокусированным пучком электронов, применялась металлическая фольга

Типичные режимы работы РЭММа JXA-5A при съемке рентгенограмм методом обратного отражения ШРП

| Используемое излучение | Толщина мишени h , мкм | Расстояние источник — кристалл l , мм | Ускоряющее напряжение E_0 , кВ | Ток зонда I_3 , мкА | Время экспозиции t , мин |
|------------------------|--------------------------|---|----------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Ti(K_α) | 15 | 20 | 20 | 0,5 | 2,0 |
| Ni(K_α) | 8 | 13 | 27 | 5,0 | 4,0 |
| Cu(K_α) | 6 | 13 | 30 | 6,0 | 5,0 |
| Zn(K_α) | 12 | 13 | 30 | 6,0 | 6,0 |

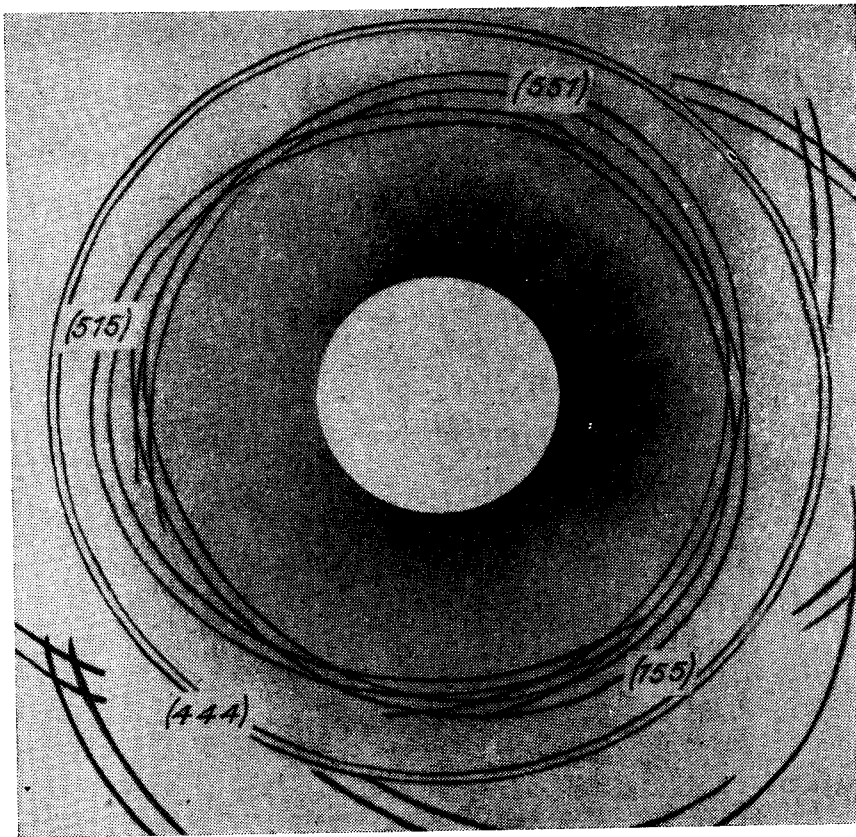


Рис. 2. Рентгенограмма, полученная методом обратного отражения ШРП от пленки GaAs (111) выращенной в растворе Cu(K α).

(Ti, V, Co, Fe, Ni, Cu, Zn) толщиной 5–15 мкм. Регистрация дифракционной картины осуществлялась на фотопластинке со специальной штриховой сверхконтрастной эмульсией или на фотопленке «Микрат-200». Наиболее часто используемые режимы работы РЭММа JXA-5A представлены в таблице. Пример полученной рентгенограммы от монокристалла арсенида галлия с ориентацией (111) приведен на рис. 2.

Получение рентгенограмм гетероструктур имеет свои особенности. Так как минимальная толщина материала, формирующая при данных условиях дифракционную картину, обычно значительно меньше глубины проникновения рентгеновского излучения [4], то дифракционные линии могут быть получены одновременно от нескольких слоев гетероструктуры. Явление одновременной дифракции использовалось нами для определения величины рассогласования постоянных решеток в гетероструктурах с толщиной эпитаксиальных слоев 2–20 мкм.

Рис. 3 демонстрирует рентгенограмму, полученную от гетероструктуры GaAs—Ga_{0,5}In_{0,5}P (100) в излучении Ti(K α). Наличие одновременной дифракции и использование K α_1 - и K α_2 -линий характеристического излучения материала мишени позволяют определить величину рассогласования постоянной решетки эпитаксиального слоя и подложки по измерениям расстояний между дифракционными линиями на рентгенограмме:

$$\Delta d/d = -\Delta\lambda r_\lambda(\Delta d)/\lambda r_d(\Delta\lambda) = -\Delta\lambda\gamma/\lambda, \quad (1)$$

где λ — длина волны K α_1 -линии; $\Delta\lambda$ — разность длин волн K α_2 - и K α_1 -линий; $r_\lambda(\Delta d)$ — расстояние между дифракционными линиями, полученными

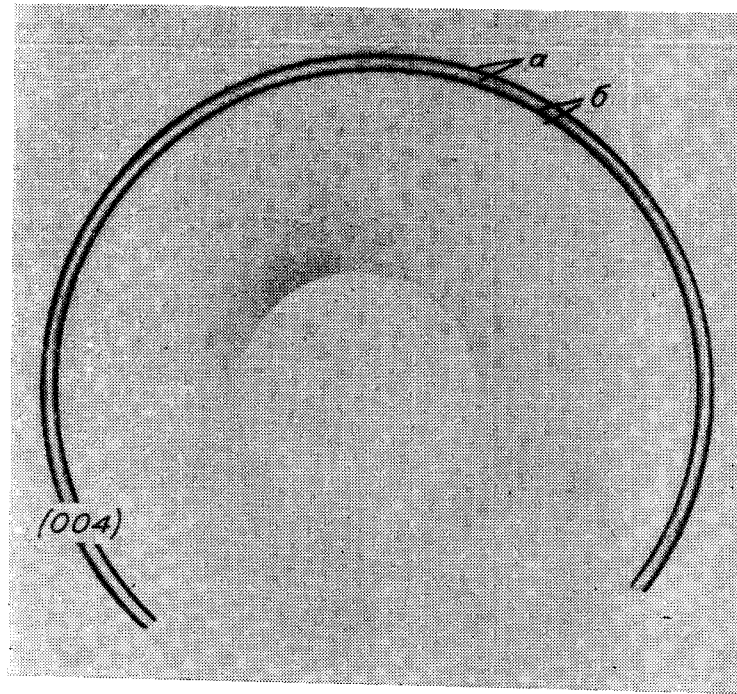


Рис. 3. Рентгенограмма, полученная методом обратного отражения ШРП от гетероструктуры GaAs—Ga_xIn_{1-x}P (100) в излучении Ti (K_α):
 а — K_α- дублет дифракционных линий от слоя, б — K_α- дублет дифракционных линий от подложки.

на длине волны λ от эпитаксиального слоя и подложки; $r_d(\Delta\lambda)$ — расстояние между дифракционными линиями, полученными от подложки на длинах волн λ и $\lambda + \Delta\lambda$.

Формула (1) является приближенной и при величине $\Delta d/d > 0,25\%$ требует введения поправки. В случае измерения расстояний между дифракционными линиями по большой полуоси псевдоэллипса (например, рефлекс 711 на рис. 2) выражение для поправки определяется как

$$\delta(\Delta d/d)_p = [(1 + (\text{tg}^2\Theta)/2 - A \text{tg} \Theta)\gamma^2 + (A - 1/2)\text{tg} \Theta \gamma](\Delta\lambda/\lambda)^2, \quad (2)$$

где

$$A = (\sin^2(\Theta - \varphi) \text{ctg}(\Theta + \varphi) + \sin^2(\Theta + \varphi) \text{ctg}(\Theta - \varphi)) / (\sin^2(\Theta - \varphi) + \sin^2(\Theta + \varphi)). \quad (2a)$$

Здесь Θ — угол дифракции, φ — угол наклона отражающей атомной плоскости к поверхности кристалла.

Если $\varphi = 0$, то (2) приобретает вид

$$\delta(\Delta d/d)_p = [(\text{tg}^2 \Theta/2)\gamma^2 + (1 - \text{tg} \Theta/2)\gamma](\Delta\lambda/\lambda)^2.$$

Выращивание гетероэпитаксиальных слоев осуществляется, как правило, на подложках из элементарных полупроводников или бинарных полупроводниковых соединений, параметры кристаллической структуры которых известны, т. е. для подложки могут быть найдены углы дифракции Θ_n и Θ'_n для K_{α₁}- и K_{α₂}-линий характеристического излучения материала мишени и угол φ . Тогда, используя точную формулу

$$\begin{aligned} & \text{ctg}[\arcsin(\lambda/(2d(1 + \Delta d/d)) + \varphi)] + \text{ctg}[\arcsin(\lambda/2d(1 + \Delta d/d) - \varphi)] = \\ & = (B - C)\gamma + C, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$B = \text{ctg}(\Theta'_n + \varphi) + \text{ctg}(\Theta'_n - \varphi), \quad (3a)$$

$$C = \text{ctg}(\Theta_n + \varphi) + \text{ctg}(\Theta_n - \varphi), \quad (3б)$$

путем машинного расчета можно построить зависимость $\Delta d/d = f(\gamma)$. Для $\varphi = 0$ уравнение (3) упрощается:

$$\text{ctg} \arcsin \lambda / (2d(1 + \Delta d/d)) = (\text{ctg} \Theta'_n - \text{ctg} \Theta_n) \gamma + \text{ctg} \Theta_n. \quad (4)$$

Построенная с помощью уравнений (3) или (4) зависимость $\Delta d/d = f(\gamma)$ применяется в дальнейшем для определения величины рассогласования постоянных решеток.

Абсолютная погрешность измерения $\Delta d/d$ по изложенной выше методике в наших условиях определялась точностью измерения расстояний между дифракционными линиями на рентгенограмме и составляла 0,005%, что соответствовало абсолютной погрешности определения постоянной решетки эпитаксиального слоя 0,00002 нм. На рис. 4 представлен график зависимости величины рассогласования $\Delta d/d$ от энергии краевой линии фотолюминесценции твердого раствора $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ ($x \approx 0,5$) на подложке GaAs с ориентацией (100). Для измерений использовался рефлекс 400, полученный в излучении $\text{Ti}(K_\alpha)$.

Определение величин напряжений и деформаций, возникающих в гетероэпитаксиальных слоях. Определение рассогласования постоянных решеток в гетероструктурах связано с рядом особенностей, главная из которых состоит в том, что при выращивании достаточно тонких (несколько микрон) эпитаксиальных слоев на массивных подложках происходит упругая деформация эпитаксиального слоя в плоскости, параллельной гетерогранице, — так называемая «тетрагональная» деформация для ориентации (100) и «ромбоэдрическая» деформация для ориентации (111) [5—7].

В этом случае величина рассогласования постоянных решеток становится анизотропной: она различна для рефлексов, имеющих разные углы наклона φ к плоскости гетерограницы. Таким образом, определить постоянную решетки недеформированного эпитаксиального слоя прямыми измерениями не удастся, но она может быть рассчитана по результатам изме-

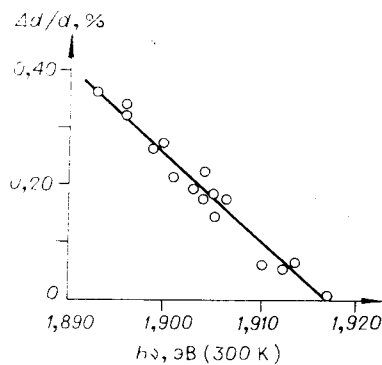


Рис. 4. График зависимости рассогласования постоянных решеток в гетероструктурах GaAs — $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ (100) от энергии $h\nu$ краевой полосы фотолюминесценции эпитаксиального слоя.

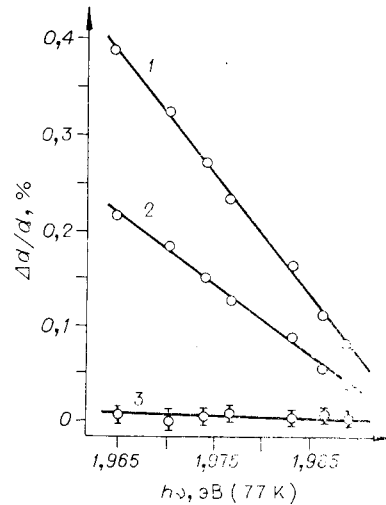


Рис. 5. Графики зависимости рассогласования постоянных решеток в гетероструктурах GaAs — $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ (111) от энергии краевой полосы фотолюминесценции эпитаксиального слоя:
1 — $(\Delta d/d)_\perp$, 2 — $(\Delta d/d)_{\text{св}}$, 3 — $(\Delta d/d)_\parallel$.

рений межплоскостных расстояний в различных кристаллографических направлениях.

Наиболее простое решение эта задача имеет в рамках модели плоского напряженного состояния, причем деформацией массивной подложки пренебрегают [5, 7]. Рассматривая рассогласование постоянных решетки в направлениях, перпендикулярном гетерогранице — $(\Delta d/d)_\perp$, параллельном ей — $(\Delta d/d)_\parallel$ и составляющем угол φ с плоскостью гетероперехода — $(\Delta d/d)_\varphi$, и учитывая, что $\Delta d/d \ll 1$, можно показать, что

$$(\Delta d/d)_\varphi = (\Delta d/d)_\perp \cos^2 \varphi + (\Delta d/d)_\parallel \sin^2 \varphi. \quad (5)$$

Таким образом, в эксперименте достаточно получить значения $(\Delta d/d)_\varphi$ для двух систем кристаллографических плоскостей; решая затем совместно два уравнения типа (5), можно определить величины рассогласования $(\Delta d/d)_\perp$ и $(\Delta d/d)_\parallel$.

Метод ШРП обладает в этом плане уникальными возможностями, ибо позволяет в одном эксперименте получить набор рефлексов от различных кристаллографических плоскостей (см. рис. 2), причем величина $(\Delta d/d)_\perp$ измеряется непосредственно в эксперименте по рефлексу с $\varphi = 0$.

Расчеты параметров деформированного состояния эпитаксиального слоя, а также величины рассогласования свободного недеформированного слоя $(\Delta d/d)_{св}$ проводятся на основании матрицы коэффициентов упругой податливости \hat{S} с учетом упругой анизотропии исследуемых гетероэпитаксиальных пленок соединений $A_{III}B_V$ и их твердых растворов [8, 9].

Для ориентации (111)

$$(\Delta d/d)_{св} = ((4S_{11} + 8S_{12} + S_{44})/3S_{44})[(\Delta d/d)_\perp - (\Delta d/d)_\parallel] + (\Delta d/d)_\parallel$$

деформация и напряжения в плоскости гетерограницы

$$\varepsilon = -((4S_{11} + 8S_{12} + S_{44})/3S_{44})[(\Delta d/d)_\perp - (\Delta d/d)_\parallel],$$

$$\sigma = -(2/S_{44})[(\Delta d/d)_\perp - (\Delta d/d)_\parallel].$$

Для ориентации (100)

$$(\Delta d/d)_{св} = ((S_{11} + S_{12})/(S_{11} - S_{12}))[(\Delta d/d)_\perp - (\Delta d/d)_\parallel] + (\Delta d/d)_\parallel,$$

$$\varepsilon = -((S_{11} + S_{12})/(S_{11} - S_{12}))[(\Delta d/d)_\perp - (\Delta d/d)_\parallel],$$

$$\sigma = -(1/(S_{11} - S_{12}))[(\Delta d/d)_\perp - (\Delta d/d)_\parallel].$$

На рис. 5 представлены зависимости рассогласования постоянных решетки в эпитаксиальных слоях $Ga_xIn_{1-x}P$ на подложке GaAs с ориентацией (111) в зависимости от их энергии фотолюминесценции. Для измерений использовались рефлексы 444 и 711, полученные в излучении $Cu(K_\alpha)$.

Как следует из представленной зависимости, эпитаксиальные слои сжаты в плоскости гетероперехода, причем величина $(\Delta d/d)_\parallel$ в пределах точности эксперимента равна 0, что свидетельствует о полном согласовании постоянных решетки слоя и подложки в плоскости гетерограницы. В этом случае дислокации несоответствия не образуются, но значительные упругие напряжения (для изученных структур $\sigma = (1-5) \cdot 10^9$ дин/см²) ограничивают возможности создания долгоживущих приборов на основе рассмотренных гетероструктур.

Точность определения параметров деформированного состояния эпитаксиального слоя существенно зависит от используемых для измерений рефлексов: разность углов наклона φ к плоскости гетерограницы для получения удовлетворительной точности должна быть не менее 40°. Это достигается путем подбора длины волны излучения, т. е. с помощью материала используемой мишени.

Определение температурной зависимости величины рассогласования параметров элементарной ячейки в структуре подложка — эпитаксиальный слой. Эффективность работы приборов с гетеропереходами во многом определяется степенью кристаллического совершенства гетерострук-

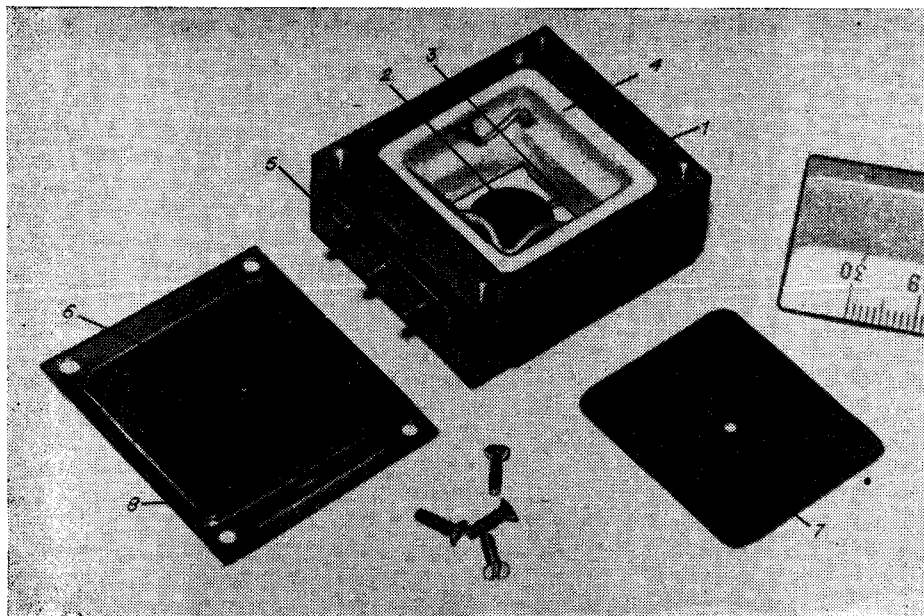


Рис. 6. Рентгеновская температурная камера к РЭММу JXA-5A для съемки рентгенограмм методом обратного отражения ШРП:

1 — корпус, 2 — печь сопротивления, 3 — термопара, 4 — теплоизолирующая прокладка, 5 — электрический разъем, 6 — поршень с мишенью, 7 — черная бумага, 8 — крышка.

тур. Одним из основных факторов, обуславливающих выбор той или иной системы для создания совершенных гетеропереходов, является разность коэффициентов термического расширения контактирующих материалов $\Delta\alpha$. Влияние этого фактора, однако, неоднозначно: он может приводить как к возникновению термических напряжений в гетероструктуре, так и к компенсации рассогласования постоянных решеток, возникающего при температуре выращивания [10].

Экспериментальное определение разности коэффициентов термического расширения позволяет выбрать оптимальные технологические параметры получения эпитаксиальных гетероструктур и приборов на их основе.

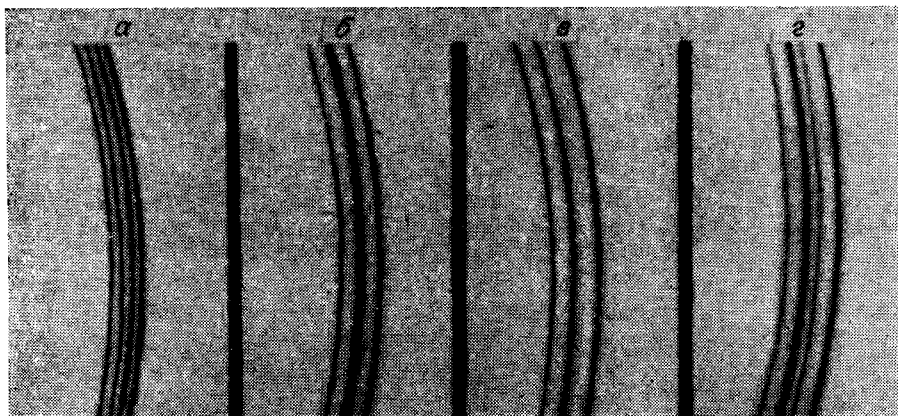


Рис. 7. Фрагменты рентгенограмм, снятых методом двух экспозиций. Первая экспозиция при 25, вторая — при 160 (а), 230 (б), 330 (в) и 410 °C (г). Монокристалл GaAs (100), излучение Ti ($K\alpha$).

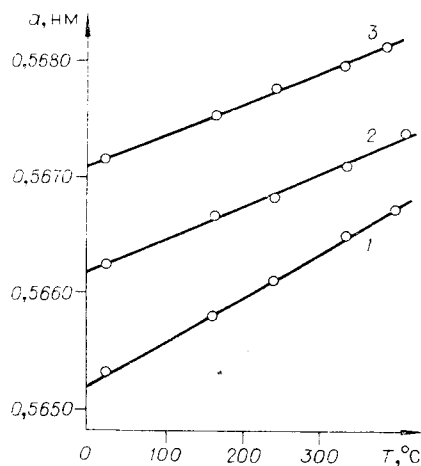


Рис. 8. Графики температурной зависимости постоянной решетки a :

1 — подложка GaAs, 2 — эпитаксиальный слой Ga_{0,5}In_{0,5}P, 3 — эпитаксиальный слой Ga_{0,48}In_{0,52}P.

Для проведения температурных измерений методом ШРП была разработана специальная приставка к РЭММу JXA-5A, схема которой представлена на рис. 6. Нагрев образца проводился миниатюрной печью сопротивления (2) за счет теплопроводности. Контроль и поддержание температуры осуществлялись с помощью термопары хромель — алюмель (3) и электронного регулятора HS-1 фирмы «Jeol», Япония, причем точность поддержания темпера-

туры была не хуже $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Градуировка термопары осуществлялась по плавлению химически чистых веществ (In, Sn, Pb) на поверхности исследуемых образцов. Максимальная температура образца составляла 420° и лимитировалась в основном разогревом корпуса приставки (не выше 60°C), так как специальных мер по его охлаждению не предпринималось.

Фотографическая регистрация дифракционной картины позволила применить метод нескольких экспозиций для изучения температурного расширения подложек, используемых для изготовления гетероструктур (рис. 7). На рис. 8 представлены температурные зависимости величины постоянной решетки подложек GaAs с ориентацией (100) и полученных на этих подложках эпитаксиальных слоев твердого раствора Ga_xIn_{1-x}P с $x \approx 50\%$. Измерения проводились по рефлексу 400 (излучение Ti(K_α)). Зависимость коэффициентов термического расширения, определенная по этой зависимости с учетом упругой деформации эпитаксиального слоя, составила $\Delta\alpha = (1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Относительно большое значение разности коэффициентов термического расширения в этих гетероструктурах приводит к значительным термическим напряжениям, возникающим при охлаждении их от температуры эпитаксии (750°) до комнатной, что отрицательно влияет на эффективность работы приборов, изготовленных на основе рассматриваемых гетероструктур.

Заключение. Использование представленных методик не ограничивается применением их для исследования лишь одиночных гетероструктур. С помощью метода ШРП, реализованного в электронно-зондовом приборе, можно проводить рентгенодифракционные исследования многослойных гетероструктур, и в частности гетеролазеров, определяя величину рассогласования постоянных решеток активного слоя и широкозонных эмиттеров и устанавливая величины напряжений и деформаций в этих слоях. Кроме того, сопоставление данных рентгеноструктурных исследований с результатами других электронно-зондовых исследований (микрoанализ, микрокатодолюминесценция и т. д.) позволяет установить такие фундаментальные зависимости, как зависимость параметра решетки от состава, полуширины спектра, величины рассогласования и т. д.

Несомненно, что метод ШРП, реализованный в микроанализаторе, значительно расширяет возможности электронно-зондовых исследований гетероэпитаксиальных структур и приборов на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kossel W., Voges H. Röntgeninterferenzen an der Einkristallantikathode.— Ann. Phys., 1935, Bd 22, N 8.

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-