

Комплексная диагностика гетероструктур с квантово-размерными слоями

© С.Г. Конников, А.А. Гуткин, М.В. Загорянская[¶], Т.Б. Попова,
А.А. Ситникова, А.А. Шахмин, М.А. Яговкина

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 3 марта 2009 г. Принята к печати 10 марта 2009 г.)

Возможности комплексной диагностики сложных квантово-размерных гетероструктур на основе соединений $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$, используемых для создания мощных лазеров, продемонстрированы на примере структур с квантовой ямой GaInP/GaAs/AlGaAs, выращенных эпитаксией из металлорганической газовой фазы. Исследования спектров катодолюминесценции позволили оценить состав барьерных слоев, подтвердить существование квантовой ямы и обнаружить аномалии в их излучении, связанные с изменением состава. При изучении структур в просвечивающем электронном микроскопе были определены толщина барьерных слоев, ширина и состав квантовой ямы, а также обнаружены переходные слои вблизи интерфейсов. Точное определение состава барьерных слоев было выполнено методом рентгеноспектрального микроанализа. Полученные величины параметров использовались при интерпретации данных рентгеновской дифракции, которые подтвердили существование переходных областей и обнаружили градиенты состава и частичную релаксацию в основной части слоев. Результатом проведенных комплексных исследований явились взаимосогласованные и обоснованные данные о составе и толщине слоев, а также данные о качестве интерфейсов, частичной релаксации слоев, существовании переходных слоев и градиентов состава.

PACS: 68.35.bj, 68.65.Fg, 68.35.Ct, 78.60.Hk, 68.37.-d, 61.05.cp, 81.07.St

1. Введение

Развитие новых технологий, определяющих современный уровень микро-, нано- и оптоэлектроники, невозможно без адекватного диагностического сопровождения, позволяющего получать наиболее полную, количественно точную информацию об основных физических и физико-химических параметрах и характеристиках на всех этапах технологического процесса получения наноструктур и приборов на их основе. Такую информацию можно получить лишь при наличии диагностического комплекса, включающего современные взаимодополняющие методы, обеспечивающие так называемую „доказательную“ диагностику, которая гарантирует надежность интерпретации результатов исследований многослойных приборных наногетероструктур, дает возможность быстро находить пути оптимизации их параметров и позволяет корректно сравнивать результаты исследований, полученные в различных научных центрах. Цель данной работы заключается в демонстрации эффективности комплексной диагностики многослойных низкоразмерных гетероструктур на примере систем, используемых для создания мощных лазеров.

Полупроводниковые лазеры на длину волны ~ 0.8 мкм с мощностью не менее 5 Вт в настоящее время создаются на основе гетероструктур с тонким квантово-размерным слоем, служащим для локализации неравновесных электронно-дырочных пар. При этом в качестве барьеров, ограничивающих область локализации, выступают слои широкозонных тройных или четверных

соединений GaInP, GaInAsP, AlGaAs, GaAsP, а в качестве активной области лазера обычно используется тонкий (квантово-размерный) слой GaAs [1,2]. Существенное влияние на эффективность таких приборов оказывает кристаллическое совершенство всех слоев структуры, качество интерфейсов, толщины и состав каждого из слоев [3–6].

Возможности комплексной диагностики подобных систем представлены на примере всестороннего исследования двух структур с квантовой ямой (КЯ) GaAs: Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs (EM719) и Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs (EM721) (рис. 1 и 2). Структуры были выращены методом газовой фазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОСVD) на плоскости (001) подложки из GaAs, легированной Te. Указанные выше составы слоев и их толщины, приведенные на рис. 1 и 2, задавались выбором условий роста слоев при создании структуры. Заданная ширина КЯ составляла 10 нм.

Для диагностики структур использовались методы локальной катодолюминесценции (КЛ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) и рентгеновской дифракции (РД).

2. Катодолюминесцентные исследования

При катодолюминесцентных исследованиях применялся метод вариации энергии электронного пучка, который позволяет получать спектры люминесценции из различных по глубине областей структуры. Определение

[¶] E-mail: zam@mail.ioffe.ru

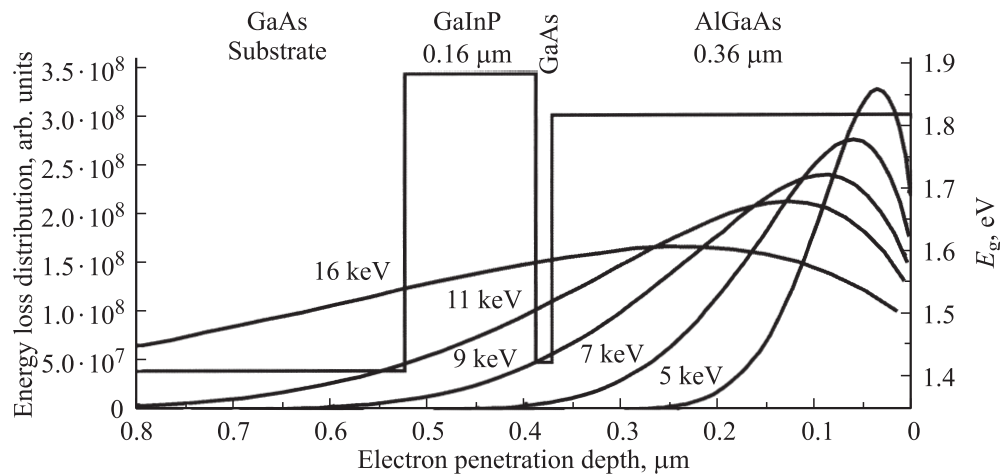


Рис. 1. Схема структуры EM719 и распределение потерь энергии электронов по глубине структуры при различных энергиях электронного пучка, определяющее область генерации излучения и, таким образом, область анализа.

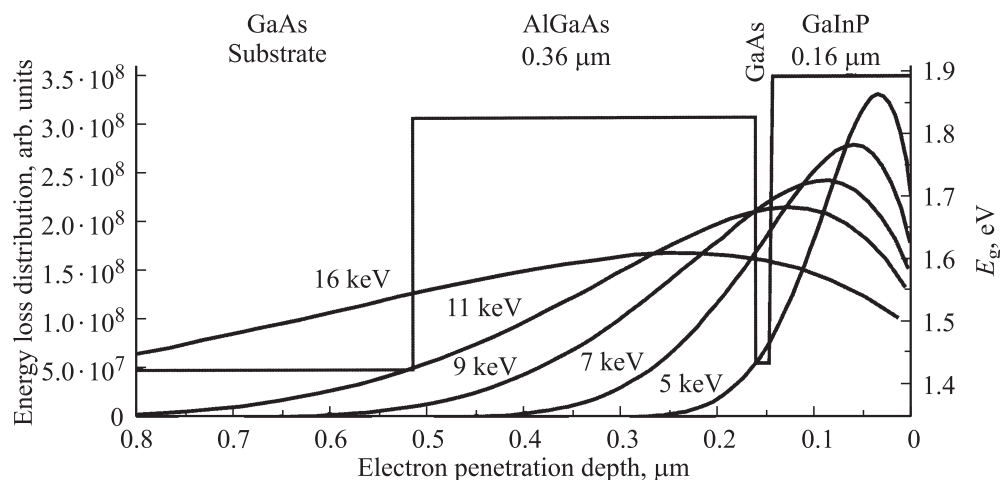


Рис. 2. Схема структуры EM721 и распределение потерь энергии электронов по глубине структуры при различных энергиях электронного пучка.

положения этих областей может быть проведено из расчетов распределения потерь энергии электронов по глубине структуры. Результаты такого расчета, проведенного методом Монте-Карло, для исследованных структур при нескольких энергиях электронного пучка показаны на рис. 1 и 2. Однако в случае существования квантовой ямы при анализе спектров ее люминесценции следует также учитывать и возможность возбуждения за счет диффузии носителей из области генерации электронно-дырочных пар. Этот эффект приводит к появлению излучения квантовой ямы и в случае генерации носителей в области, не захватывающей квантовую яму.

На рис. 3 и 4 приведены спектры катодолуминесценции обеих структур. При энергии электронного пучка 5 кэВ возбуждается практически только верхний слой структур, а при увеличении энергии в спектре проявляется люминесценция нижнего слоя и подложки.

Таким образом, измеряя спектры КЛ при различной энергии электронного пучка, мы можем определить, какая полоса люминесценции соответствует верхнему и нижнему барьерному слою.

По спектрам КЛ обеих структур в видимом диапазоне при 77 К (рис. 3) были определены средние составы слоев: для AlGaAs максимум люминесценции 1.89 эВ (1.82 эВ при 300 К) соответствует составу $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$, для InGaP максимум люминесценции 1.94 эВ (1.88 эВ при 300 К) соответствует $\text{Ga}_{0.49}\text{In}_{0.51}\text{P}$ [7]. В ближнем ИК диапазоне при 5 кэВ наблюдается люминесценция от слоя GaAs-КЯ. При этом катодолуминесценция КЯ для образца EM719 возбуждается за счет диффузии носителей, поскольку электронный пучок теряет всю энергию в верхнем слое, не доходя до КЯ (рис. 1). Полоса излучения наноразмерного канала GaAs имеет различные положения и полуширину для двух образцов, как показано на рис. 4. Это свидетельствует о разли-

чиях в составе и(или) толщине слоев, образующих КЯ. Более широкая полоса люминесценции КЯ в структуре EM719 и ее смещение в сторону меньших энергий по отношению к объемному GaAs могут быть связаны с образованием в КЯ твердого раствора InGaAs переменного состава.

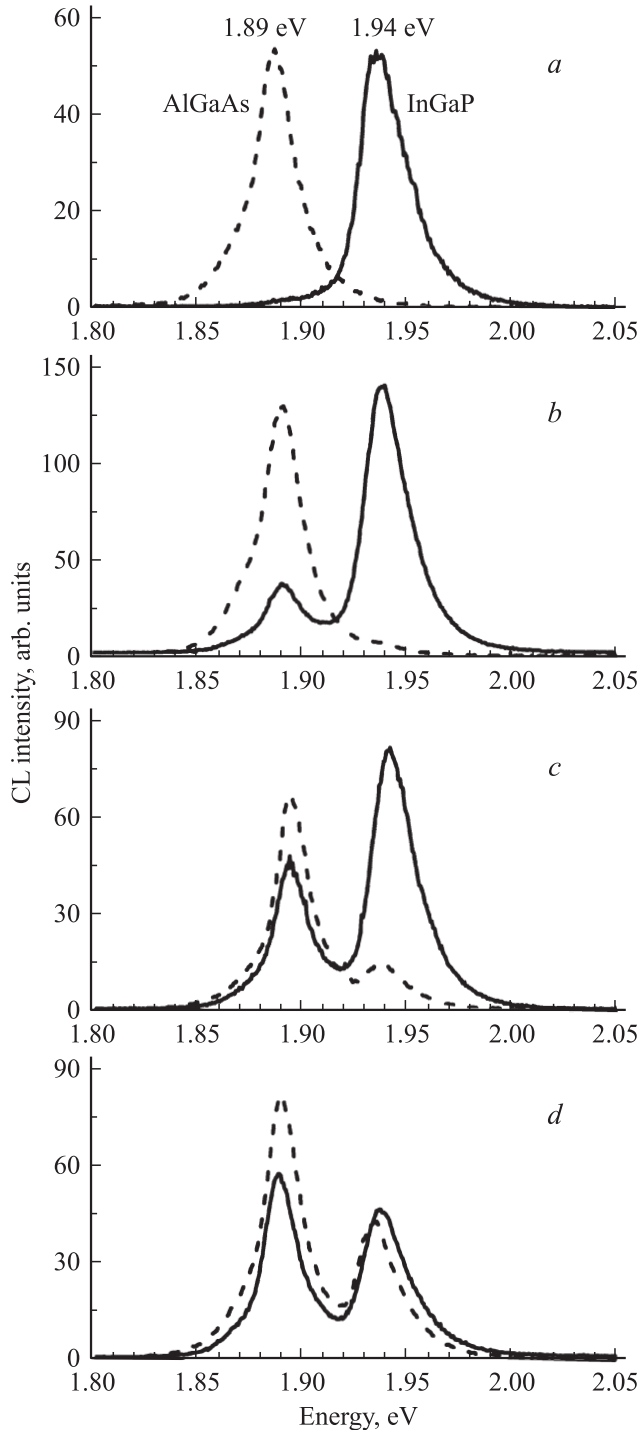


Рис. 3. Спектры катодолуминесценции структур EM719 (штриховые линии), EM721 (сплошные линии) в видимом диапазоне, полученные при температуре 77 К и энергиях электронного пучка 5 (a), 9 (b), 11 (c) и 16 кэВ (d).

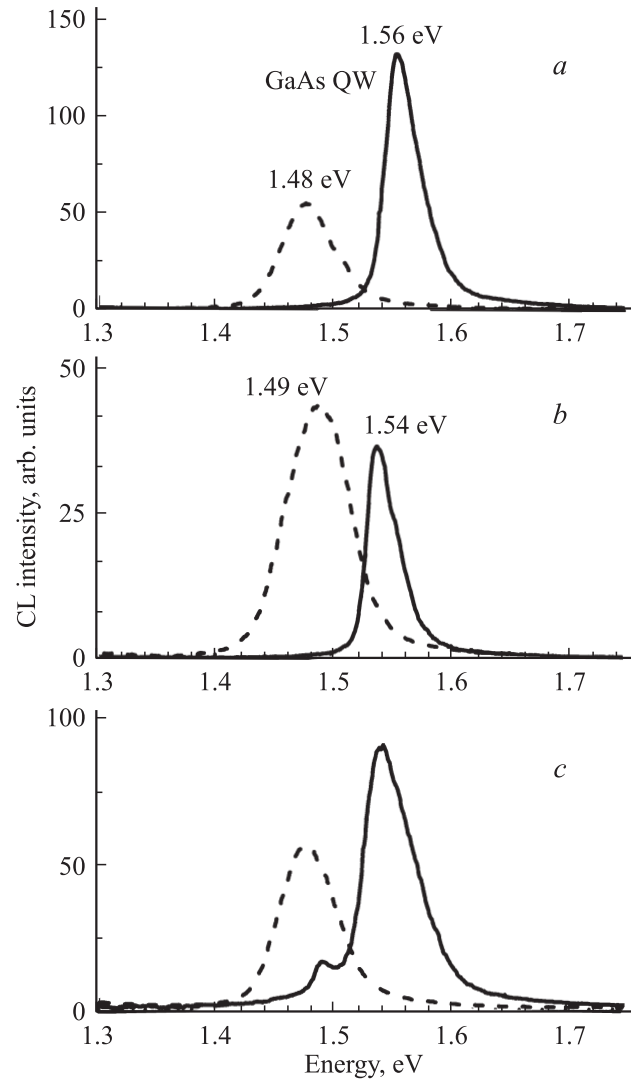


Рис. 4. Спектры катодолуминесценции структур EM719 (штриховые линии), EM721 (сплошные линии) в ближнем ИК диапазоне, полученные при температуре 77 К и энергии электронного пучка 5 (a), 9 (b) и 11 кэВ (c).

3. Просвечивающая электронная микроскопия

Исследование вышеуказанных образцов методом ПЭМ, выполненное на микроскопе JEOL-2100F, показало достаточно высокий уровень технологии, обеспечивающей разумное соответствие ожидаемых толщин эпитаксиальных слоев полученным величинам, определенным из ПЭМ (точность определения $\pm 5\%$, рис. 5, a). Эпитаксиальные слои не имеют видимых дефектов, интерфейсы достаточно гладкие.

Однако исследования элементного состава с помощью рентгеноспектрального микроанализа, реализованного на указанном микроскопе с помощью приставки INKA Energy TEM 250 при сканировании электронного пучка (диаметром 2 нм) по поперечному сечению образца

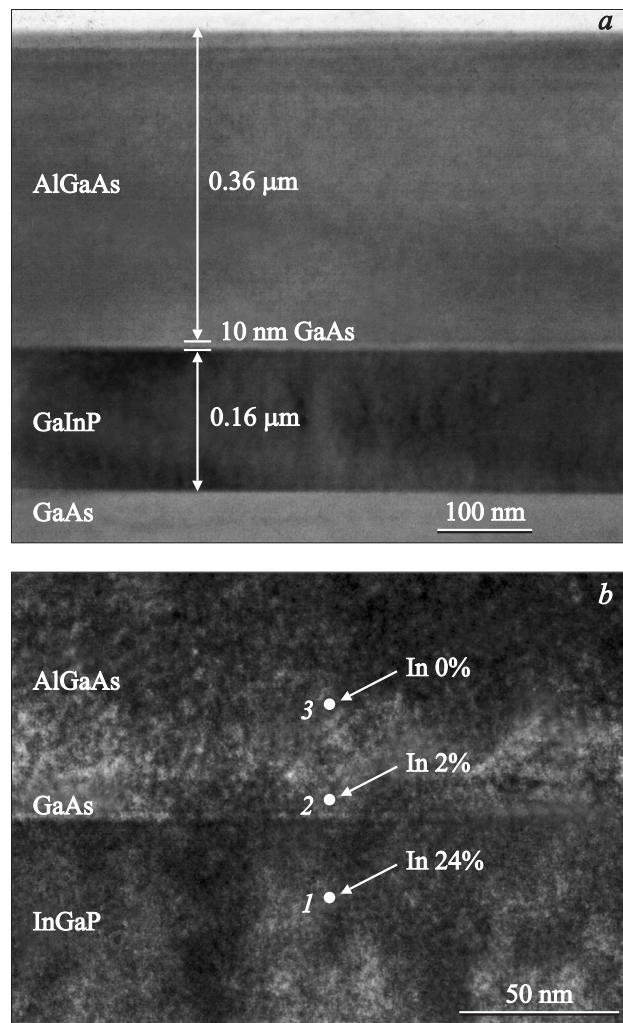


Рис. 5. *a* — структура слоев на поперечном сечении образца EM719 (изображение получено в химически чувствительном рефлексе, поэтому слой, содержащий индий, кажется темным по сравнению с AlGaAs); *b* — изображение слоев с квантовой ямой GaAs образца EM719 в дифракционном контрасте с указанием точек (1–3), где проводилась оценка концентрации In.

(рис. 5, *b*), обнаруживают существование в КЯ структуры EM719 примерно 2 ат% индия (точность определения ± 1 ат%). Это может свидетельствовать о проникновении атомов индия со стороны слоя GaInP при выращивании GaAs на поверхности GaInP.

Исследования образца с инверсным расположением эпитаксиальных слоев (EM721) показали, что ширина GaAs-КЯ в этом образце составляет примерно 6 нм. Присутствие посторонних элементов в этом слое в количестве, превышающем погрешность измерений, не обнаружено (рис. 6). Однако при тщательном изучении контраста на снимке рис. 6 можно предположить наличие переходного слоя между слоями GaAs и GaInP (темно-серая полоса).

На рис. 7 слой GaAs в этом же образце показан в фазовом контрасте, при этом отчетливо наблюдает-

ся непрерывность атомных плоскостей при переходе через интерфейс. Нижняя граница слоя демонстрирует наличие некоторых напряжений, которые увеличиваются с нарастанием толщины (на снимке от левого края к правому) и проявляются как темные ореолы, в то время как верхняя граница слоя GaAs не имеет никаких отличительных признаков. Такое различие также может быть объяснено существованием переходного слоя. Действительно, в слое GaInP вблизи границы с GaAs-КЯ рентгеноспектральные исследования обнаружили присутствие As в количестве не менее 3 ат%.

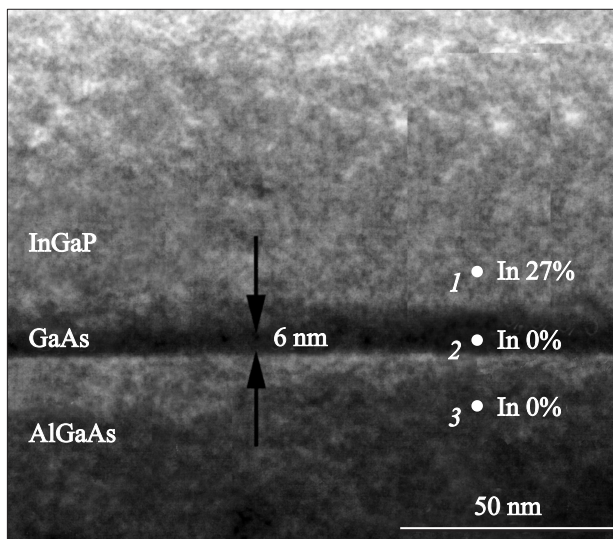


Рис. 6. Изображение слоев с квантовой ямой в образце EM721 с указанием точек (1–3), где проводилась оценка концентрации In.

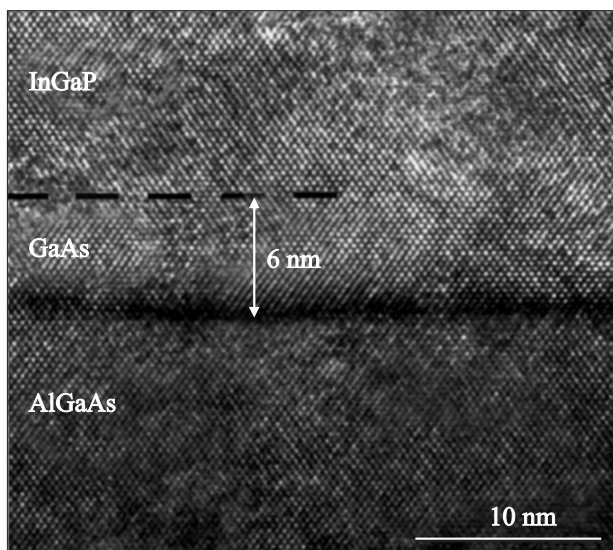


Рис. 7. Изображение слоев с квантовой ямой в образце EM721 с высоким разрешением.

Таблица 1. Составы слоев, оцененные из положения максимумов РД и по данным РСМА

№ образца, слой	$(\Delta c/c)_{\text{exp}}$	x (слой псевдоморфен GaAs)	x (слой полностью релаксировал)	x (РСМА)	Примечание
EM719, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$5.9 \cdot 10^{-4}$	0.18 ± 0.01	0.32 ± 0.01	0.24 ± 0.01	—
EM719, $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$	$3.97 \cdot 10^{-3}$	0.51 ± 0.01	0.538	0.51 ± 0.02	Максимум асимметричен (плечо в сторону меньших углов) \Rightarrow неоднородность состава по образцу +0.5%
EM721, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$7.7 \cdot 10^{-4}$	0.24 ± 0.01	0.477	0.24 ± 0.02	Максимум асимметричен (плечо в сторону больших углов) \Rightarrow релаксация структуры
EM721, $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$	$3.56 \cdot 10^{-3}$	0.507 ± 0.001	0.532	0.51 ± 0.01	—

Помимо содержания индия и мышьяка в определенных точках структур рентгеноспектральные исследования, проведенные на поперечных сечениях образцов в просвечивающем электронном микроскопе, позволили также оценить элементный состав слоя в этих точках. В пределах точности этих оценок ($\pm(3-5)$ ат%) наблюдалось совпадение с данными РСМА, которые будут приведены далее.

4. Рентгеноспектральный микроанализ

Рентгеноспектральный микроанализ структур проводился на электронно-зондовом микроанализаторе „Сamebax“ при падении электронного пучка перпендикулярно плоскости слоев.

Поскольку традиционный количественный микроанализ для наноразмерных гетероструктур не применим из-за неоднородности состава в области, возбуждаемой электронным зондом, для определения концентрационного профиля и состава тонких слоев исследуемых структур нами использовалась методика, развитая в работах [8,9]. Методика основана на измерении относительной интенсивности анализируемого излучения соответствующих элементов в зависимости от энергии электронного зонда с последующим сравнением этих зависимостей с расчетными.

Применение этой методики позволило не только определять состав тонких слоев, находящихся как на поверхности, так и на некоторой глубине структуры, но и одновременно находить толщину этих слоев и глубину их залегания. Основным условием применимости этой методики является возможность выбора анализируемых элементов, определяющих состав одного из слоев и отсутствующих в других слоях.

Анализируемые в данной работе структуры содержат твердые растворы AlGaAs и GaInP, которые являются квазибинарными, и их состав определяется концентрацией одного из компонентов: Al в AlGaAs или In в GaInP. При этом точность определения состава поверхностных слоев не хуже точности стандартного микроанализа и

Таблица 2. Толщины слоев исследованных структур в нм

Метод	EM719			EM721		
	AlGaAs	КЯ	GaInP	GaInP	КЯ	AlGaAs
ПЭМ	360 ± 20	10	160 ± 10	160 ± 10	6	360 ± 20
РСМА	350 ± 50	—	160 ± 30	160 ± 20	—	—
РД	369	10	188	171	6	352

при концентрациях, больших 1%, составляет 2–3 отн%. Для слоев, находящихся на некоторой глубине, точность несколько хуже и составляет 4–6 отн%. В случае сильного поглощения излучения кривая зависимости относительной интенсивности от энергии при энергиях, больших 20 кэВ, выходит на насыщение и границы глубоких слоев определяются плохо.

Исследования структур проводились при следующих режимах работы: аналитические линии — AlK_α и InL_α ; энергия электронного зонда — 2.5–15 кэВ с шагом 1 кэВ, 20–35 кэВ с шагом 5 кэВ; ток зонда — 50 нА для энергий 2.5–10 кэВ и 20 нА для энергий 10–35 кэВ. Пример зависимостей интенсивности аналитических линий от энергии электронного пучка и их аппроксимации расчетными кривыми приведен на рис. 8, где величина K представляет собой отношение интенсивности аналитической линии спектра образца к интенсивности излучения массивного эталона, содержащего 100% Al или In. Результаты определения состава и толщин слоев приведены в табл. 1 и 2

5. Рентгенодифракционные исследования

Дифракционные кривые, полученные на рентгеновском дифрактометре D8 DISCOVER при $2\theta/\theta$ -сканировании в области угла отражения (004) GaAs, приведены на рис. 9.

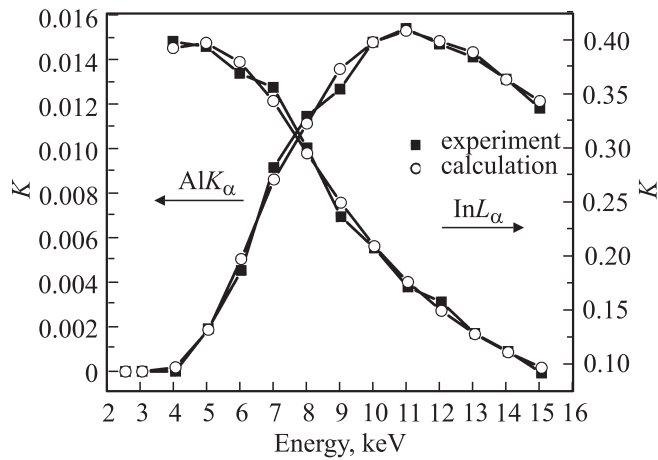


Рис. 8. Сравнение экспериментальной и расчетной зависимостей относительных интенсивностей рентгеновского излучения AlK_{α} и InL_{α} от энергии электронного зонда, полученных для структуры EM721.

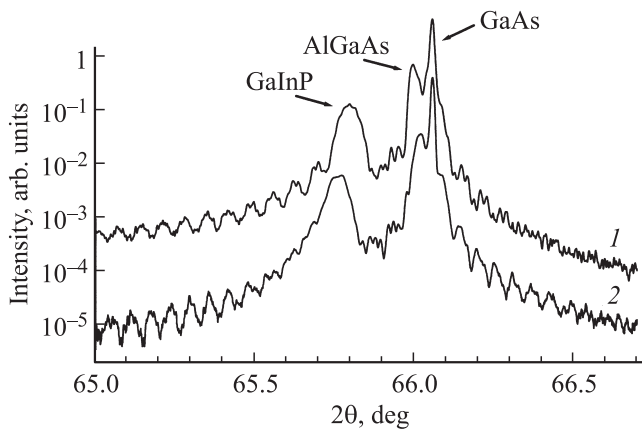


Рис. 9. Дифракционные кривые для образцов EM719 (1) и EM721 (2).

Как видно из рисунка, структуры близки по параметрам, как и следует из технологических данных. Дифракционный максимум подложки наблюдается около $2\theta = 66.06^\circ$, что соответствует табличному значению для объемного GaAs. Слева от максимума подложки наблюдаются по 2 пика, которые могут быть идентифицированы как дифракционные максимумы от слоев AlGaAs (около 66.0°) и GaInP (около 65.75°). Кроме того, на обеих кривых наблюдаются толщинные осцилляции в широком диапазоне углов, что говорит о достаточно хорошей планарности интерфейсов. Эти осцилляции с периодом $\delta\theta$ около 0.03° с точностью до погрешности определения соответствуют интерференции на слое GaInP структур. Более мелкие осцилляции (с периодом около 0.01°) отвечают интерференции на всей структуре.

Главные отличия в структурах проявляются в том, что не совпадают положения дифракционных максимумов от слоев. Из разности положения максимумов слоя и

подложки можно оценить относительное рассогласование их межплоскостных расстояний в направлении, перпендикулярном плоскости подложки $\Delta c/c$. Предполагая, что изменение постоянной решетки слоя с составом твердого раствора подчиняется закону Вегарда, а сам слой псевдоморфен подложке или полностью релаксировал, по величине $\Delta c/c$ можно определить состав слоя (см. табл. 1).

Как следует из табл. 1, в большинстве случаев наилучшее согласие с данными РСМА достигается в предположении о псевдоморфности слоев относительно подложки. Однако и в этих случаях асимметрия пиков свидетельствует о возможных отклонениях структуры от идеальной и требует более детального анализа. Еще более сильные отклонения от идеальности проявляются для слоя AlGaAs в образце EM719.

Детальный анализ рентгеновской дифракционной и интерференционной картины проводился путем построения модельных кривых в рамках программного пакета „Leptos“ фирмы Брукер. Алгоритм расчета дифракционных кривых основывался на динамической теории в рамках модели Такаги–Топэна. Первое приближение строилось на основании технологических данных, результатов микроанализа, ПЭМ и оценок, приведенных выше. Вариационными параметрами были: изменение состава по толщине для слоя GaInP и степень релаксации слоя AlGaAs с толщиной. Для оценки изменений структурных параметров с толщиной, слой разбивался на 2–3 подслоя, внутри которых задавался линейный закон изменения варьируемого параметра. Результаты такого анализа для образца EM719 показаны на рис. 10. Чтобы оценить положение и форму максимумов пришлось предположить наличие градиента состава в слое GaInP и ненулевую степень релаксации для слоя AlGaAs

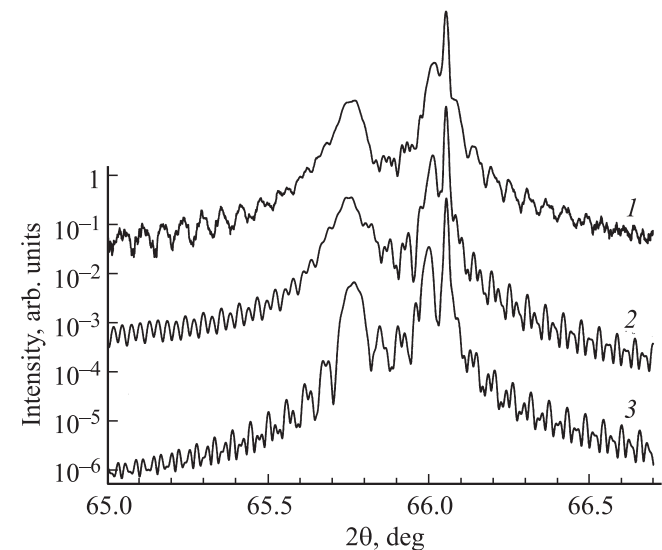


Рис. 10. Дифракционные кривые для образца EM719: 1 — экспериментальная кривая, 2 — наилучший результат моделирования, 3 — моделирование по данным технологического процесса.

Таблица 3. Результаты детального моделирования дифракционных кривых

Слой	Толщина, нм	Состав x	Релаксация R	Примечание
Образец EM719				
$Al_xGa_{1-x}As$	185	0.242	1–0.34	Верхний подслой
$Al_xGa_{1-x}As$	184	0.242	0.34–0	Нижний подслой
$Ga_{1-x}In_xAs$	10	0–0.15	0	Квантовая яма
$Ga_{1-x}In_xP$	3	0.43–0.51	0	Переходной слой
$Ga_{1-x}In_xP$	185	0.515–0.504	0	
Образец EM721				
$Ga_{1-x}In_xP$	33	0.516	0	Верхний подслой
$Ga_{1-x}In_xP$	130	0.508	0	Нижний подслой
$Ga_{1-x}In_xAsP^*$	8	0.505–0.04	0	Переходной слой
GaAs	6	–	0	Квантовая яма
$Al_xGa_{1-x}As$	46	0.242	0.69–0.05	Верхний подслой
$Al_xGa_{1-x}As$	306	0.242	0.05–0.01	Нижний подслой

Примечание. * Концентрация As равна 3 ат% согласно данным ПЭМ.

в этом образце. Аналогичные допущения были сделаны и для образца EM721 для получения наилучшего согласия модельной и экспериментальной кривых качания. Следует отметить, что предположение о наличии релаксации в слое AlGaAs согласуется с данными, полученными с помощью ПЭМ (рис. 7), которые связывались с напряжениями, возникшими при росте тонкого слоя GaAs на слое AlGaAs, имеющего в верхних слоях ненулевое рассогласование по латеральному параметру $\Delta a/a$ относительно подложки GaAs. Следует отметить, что релаксация слоя, приводящая к изменению значения параметров решетки в пределах величин $\sim 8 \cdot 10^{-4}$, скорее всего, не будет сопровождаться образованием дефектов и не проявится на ПЭМ высокого разрешения (рис. 7).

Для достижения наилучшего результата при расчете рентгеновской дифракционной кривой варьировались также и параметры тонкого слоя GaAs. В этом случае удалось получить весьма хорошее согласие между модельным расчетом и экспериментом как в широком диапазоне углов, так и в тонкой структуре интерференционных пиков. Варьируемым параметром было содержание In в этом слое, причем предполагалось, что содержание индия изменяется с толщиной слоя. Основанием для такого предположения послужило дополнительное уширение и асимметрия максимумов GaInP, а также данные ПЭМ и КЛ. При том значения толщины слоя закладывались согласно данным ПЭМ.

В табл. 3 указаны полученные в результате моделирования значения толщин слоев и пределы изменения их состава и степени релаксации R в пределах слоя:

$$R = \frac{a_{\text{exp}} - a_{\text{GaAs}}}{a_f - a_{\text{GaAs}}}, \quad (1)$$

где a_{exp} — латеральная постоянная решетки, полученная из аппроксимации экспериментальных дифракционных

кривых, a_f — постоянная решетки свободного слоя, a_{GaAs} — постоянная решетки свободного GaAs.

Как видно из табл. 2, учет меняющейся с глубиной релаксации верхнего слоя в образце EM719 позволил не только наилучшим образом описать экспериментальную дифракционную кривую модельным расчетом, но и согласовать полученный состав этого слоя с данными РСМА (см. табл. 1).

В целом следует подчеркнуть, что использование моделирования позволяет извлечь из рентгеновских дифракционных кривых весьма детальную информацию о структуре образцов. Иллюстрацией этого факта может служить разница в интерференционных картинах для образцов (рис. 9). Так, в образце EM719 толщинные осцилляции состоят из 2 максимумов, которые с удалением от пиков слоев сливаются, образуя единый пилообразный максимум. Моделирование показало, что удвоение осцилляций связано с тем, что слой AlGaAs распадается на 2 подслоя, толщины которых равны друг другу и толщине нижележащего слоя GaInP. В образце EM721 толщина слоя AlGaAs тоже в 2 раза больше толщины слоя GaInP, что приводит к „удвоению“ интерференционных максимумов со стороны больших углов. Но соотношение толщин не так четко выдержано, что приводит к более быстрому затуханию интерференционной картины. Отметим, что ПЭМ-картины указывают на планарность интерфейсов в пределах области исследования ПЭМ — порядка микрона. При РД исследованиях зондируемая площадь больше на несколько порядков (облучаемая поверхность образцов — $2 \times 0.005 \text{ см}^2$). В связи с этим тот факт, что модельная дифракционная кривая со стороны меньших углов не совпадает по периоду с экспериментальной, указывает на нарушение планарности границ слоев в пределах области сканирования рентгеновским пучком. Этим можно объяснить и некоторые различия в толщинах слоев, полученных с помощью ПЭМ и РД метода (табл. 3).

6. Заключение

Основным результатом проведенных комплексных исследований явилась взаимосогласованная и, следовательно, надежная информация о составе и толщинах слоев (табл. 1–3), а также сведения о качестве интерфейсов, степени релаксации слоев, существовании переходных слоев и градиентов состава.

Следует подчеркнуть, что сравнительно нетрудоемкие исследования методом КЛ позволили оценить состав барьерных слоев и подтвердить существование КЯ. Эти же исследования обнаружили аномалии в излучении КЯ и стимулировали исследование элементного состава КЯ и примыкающих к ним слоев в просвечивающем электронном микроскопе. В свою очередь результаты ПЭМ и более точного определения состава барьерных слоев методом РСМА были использованы при интерпретации данных РД, которые подтвердили существование переходных областей и обнаружили градиенты состава и частичную релаксацию слоев.

При этом даже средний состав слоев и их толщина оказались существенно отличающимися от заданных в технологическом процессе и требовали коррекции режимов выращивания структур. Дальнейшее совершенствование технологических процессов и, возможно, дизайна структур требуют также полученные при диагностике данные о попадании в слои атомов посторонних элементов, градиентах составов, механических напряжениях и частичной релаксации слоев. Эти же данные необходимо учитывать при объяснении электрических и оптических свойств подобных структур и приборов на их основе.

Работа выполнена в Региональном Северо-Западном центре коллективного пользования „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

Авторы выражают благодарность И.С. Тарасову и Д.А. Винокурову за предоставление образцов и полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] А.В. Мурашова, Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, В.В. Шамахов, В.В. Васильева, В.А. Капитонов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Т.А. Налет, Д.Н. Николаев, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов, Y.S. Kim, D.H. Kang, C.Y. Lee. ФТП, **42** (7), 882 (2008).
- [2] В.В. Безотосный, В.В. Васильева, Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, О.Н. Крохин, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.В. Мурашова, Т.А. Налет, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, Ю.М. Попов, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. ФТП, **42** (3), 357 (2008).
- [3] T. Nittono, S. Sugitani, F. Hyuda. J. Appl. Phys., **78** (9), 5387 (1995).
- [4] K. Uchida, T. Arai, K. Matsumoto. J. Appl. Phys., **81** (2), 771 (1997).
- [5] X.B. Zhang, J.H. Ryou, R.D. Dupuis, G. Walter, N. Holonyak, jr. J. Electron. Mater., **35**, 705 (2006).

- [6] Q. Yang, D.A. Kellog, C. Lin, G.E. Stillman, N. Holonyak, jr. Appl. Phys. Lett., **75**, 1101 (1999).
- [7] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. J. Appl. Phys., **89** (11), 5815 (2001).
- [8] Т.Б. Попова, Л.А. Бакалейников, М.В. Заморянская, Е.Ю. Флегонтова. ФТП, **42** (6), 686 (2008).
- [9] Л.А. Бакалейников, Я.В. Домрачева, М.В. Заморянская, Е.В. Колесникова, Т.Б. Попова, Е.Ю. Флегонтова. ФТП, **43** (4), 568 (2009).

Редактор Т.А. Полянская

Combined investigation of heterostructures with quantum well

S.G. Konnikov, A.A. Gutkin, M.V. Zamoryanskaya, T.B. Popova, A.A. Sitnikova, A.A. Shakhmin, M.A. Yagovkina

loffe Physical Technical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Combined investigation possibilities of quantum-dimensional structures based on A^{III}B^V semiconductors are demonstrated. The heterostructures with quantum well under consideration (InGaP/GaAs/AlGaAs) were grown by MOCVD. Such type of structures is used for high power lasers. Cathodoluminescent study allowed estimating the composition of barrier layers, confirming the presence of quantum well and detects anomalies of quantum well luminescence related with its composition. The barrier layer widths, quantum well width and its composition were defined using the transmission electron microscopy which also found intermediate layers near the interfaces. The precise composition of barrier layers was determined by electron probe microanalysis. These results were used for interpretation the X-ray diffraction data which confirmed the presence of intermediate layers and found out the composition gradient and partial relaxation in the main parts of barrier layers. The firm and conformable data about the thickness, composition, interface quality, layers relaxation and presence of intermediate layers were obtained as the result of these combined investigations.