

Дельта-легирование соединениями марганца гетероструктур на основе GaAs

© К.Д. Моисеев¹, В.Н. Неведомский¹, Yu. Kudriavtsev², A. Escobosa-Echavarría², M. Lopez-Lopez³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Dep. Ingeniería Eléctrica-SEES, Cinvestav-IPN, México

³ Dep. Física, Cinvestav-IPN, Mexico

E-mail: mkd@iropt2.ioffe.ru

(Получена 2 февраля 2017 г. Принята к печати 13 февраля 2017 г.)

Гетероструктуры с квантовыми ямами GaAs/InGaAs/GaAs, легированные пространственно удаленными моноатомными слоями Mn, были получены на подложке GaAs(001) в режиме монослойного наращивания методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Комбинированные исследования полученных образцов были проведены при помощи метода вторичной ионной масс-спектрометрии, рентгено-дифракционных измерений и с использованием просвечивающего электронного микроскопа. Исследуемые гетероструктуры с концентрацией легирующей примеси 0.5 монослоя были упруго напряжены и демонстрировали планарные четкие границы раздела без видимых протяженных и точечных дефектов. Предложена методика визуализации распределения концентрации марганца в трехмерной матрице GaAs вблизи квантовой ямы. Согласно экспериментальным результатам существует вероятность диффузии марганца в квантовую яму GaAs/InGaAs/GaAs при уменьшении критической толщины буферного слоя GaAs менее 3 нм.

Работа была выполнена при частичной поддержке проекта РФФИ (№ 15-02-08909).

DOI: 10.21883/FTP.2017.09.44882.8534

1. Введение

Возникший в последние годы интерес к производству устройств спинтроники требует технологических подходов для получения полупроводниковых магнитных гетероструктур с заранее заданными и контролируемыми свойствами [1]. Ранее большинство работ было посвящено исследованиям полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$, сильно легированных магнитной примесью, вплоть до магнитных разбавленных сплавов, таких как InMnAs, GaMnAs и GaInMnAsSb [2–4]. Сильное легирование магнитной примесью, например марганцем, когда атомы переходного металла внедряются в узлы кристаллической решетки матричного материала, создавая соединения так называемых разбавленных полупроводников, открывает хорошие перспективы для интеграции ферромагнитных свойств объемных полупроводниковых гетероструктур. Однако увеличение толщины эпитаксиальных слоев разбавленных полупроводников приводит к увеличению внутренних напряжений, вызванных значительной разницей в параметрах кристаллической решетки матрицы и магнитной примеси. Поэтому введение примесных слоев пониженной размерности в объем трехмерной матрицы, например, так называемое δ -легирование, локализует возникающие напряжения и открывает широкие возможности в управлении свойствами полупроводниковых структур при разработке новых приборов. Более того, если распределение легирующей примеси ограничено одним или несколькими атомарными монослоями (МС), то профиль легирования может быть описан δ -функцией Дирака. В этом

случае δ -слои обеспечивают высокую концентрацию легирующей примеси, локализованную в ограниченном пространстве в масштабах, сопоставимых с постоянной решетки матрицы.

Ранее было показано, что помещение δ -слоя Mn в проводящий канал с высокой концентрацией дырок, расположенный на гетерогранице i -GaAs/ p -AlGaAs, приводило к самоорганизации ферромагнитного порядка среди спинов атомов марганца, при этом сама гетероструктура демонстрировала высокую степень намагниченности [5]. Кроме того, взаимодействие спинов ионов магнитной примеси с волновыми функциями квантованных носителей заряда (локализованных в квантовых ямах, в квантовых точках и др.) может проявиться в специфических магнитооптических и магнитотранспортных свойствах полупроводниковых гетероструктур [6,7]. Поэтому крайне важно знать, каким может быть распределение магнитной примеси в объеме трехмерной матрицы вблизи квантово-размерных нанообъектов при удаленном легировании δ -слоями марганца (см., например, схематическую гетероструктуру на рис. 1). Метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) имеет значительные преимущества при эпитаксиальном наращивании слоев пониженной размерности по сравнению с другими технологическими методами, так как позволяет получать многослойные полупроводниковые гетероструктуры с атомарно управляемыми толщинами слоев и резкими профилями легирования [8]. В настоящей работе мы сообщаем о визуализации распределения концентрации марганца в моноатомном слое, помещенном в трехмерной матрице GaAs вблизи

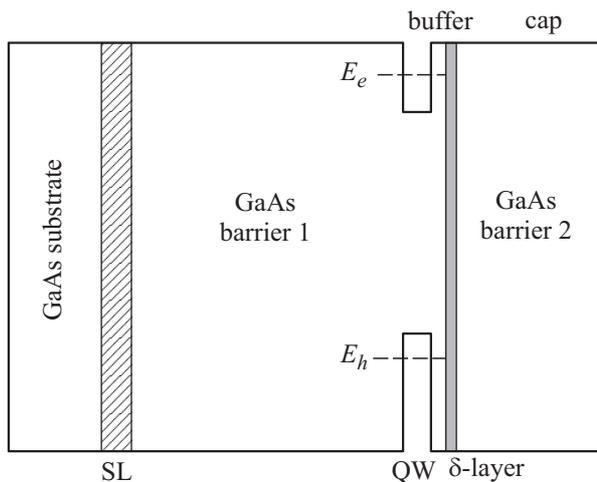


Рис. 1. Схематическая энергетическая диаграмма гетероструктуры на основе квантовой ямы I типа GaAs/GaInAs/GaAs с удаленным δ -легированием соединениями марганца. SL — переходной слой на границе раздела подложка GaAs и эпитаксиальная гетероструктура, QW — квантовая яма, E_c и E_h — уровни размерного квантования электронов и дырок соответственно.

квантовой ямы в гетероструктурах, полученных методом МПЭ.

2. Структуры для исследований и методики экспериментов

Гетероструктуры с квантовыми ямами GaAs/InGaAs/GaAs были получены на подложке GaAs(001) в камере Riber C21 в режиме монослойного наращивания МПЭ в интервале температур 500–600°C. Эпитаксиальное наращивание производилось со скоростью 0.5 мкм/ч. После процесса оксидной десорбции на обработанную поверхность подложки GaAs наращивалась сверхрешетка (SL) общей толщиной 9 нм с пятью периодами AlAs (0.8 нм)/GaAs (0.8 нм) с целью сглаживания поверхности матрицы, на которую впоследствии осаждались эпитаксиальные слои, формировавшие заданную гетероструктуру (рис. 2). Собственно квантовая яма содержала первый барьерный слой GaAs (barrier 1) толщиной 300 нм, трехкомпонентный активный слой InGaAs (QW) толщиной 10 нм и буферный слой GaAs (buffer) толщиной 3 нм. В процессе эпитаксиального наращивания все полученные слои преднамеренно не легировались. Подробности роста квантовых ям в системе GaAs/InGaAs/GaAs и способы легирования гетероструктур на основе GaAs приведены в работах [9,10]. Для осаждения атомарного марганца температуру подложки понижали до 300°C, что позволило получить эпитаксиальный слой Mn с концентрацией 0.5 монослоя (МС). Номинальная концентрация Mn была подтверждена исследованиями с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS). Завершал гетероструктуру нелегированный накрывающий слой GaAs (cap) толщи-

ной 40 нм, который вместе с буферным GaAs составлял второй барьерный слой (barrier 2).

Послойный анализ полученной гетероструктуры производился с помощью метода вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Исследования проводились с использованием ионного микрозонда ims-6f фирмы Cameca (Франция). В режиме послойного анализа регистрировались кластерные ионы CsM^+ , эмитируемые с поверхности травления при распылении мишени ионами цезия, где M — анализируемый элемент [11]. Такой режим обеспечивает минимальный матричный эффект при исследовании полупроводниковых соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ [12], а значит, максимальную достоверность данных ВИМС о распределении элементов вблизи гетерограниц. Тонко сфокусированным ионным пучком цезия с энергией 5 кэВ и силой тока около 50 нА сканировался растр размером 300 × 300 мкм. Угол падения первичных ионов составлял около 45° по отношению к нормали поверхности образца. Вторичные ионы, испускаемые из центральной круговой области кратера диаметром около 60 мк, анализировались в масс-спектрометре с двойной фокусировкой с магнитным сектором. Пересчет экспериментальных интенсивностей проводился с использованием стандартных образцов известного состава и данных рентгеновской дифракции. Концентрация интересующего элемента вычислялась с использованием относительных коэффициентов чувствительности (RSFs), определенных ранее ВИМС профилированием имплантированных стандартов. Толщины исследуемых слоев пересчитывались после измерений экспериментальных кратеров травления с использованием профилометра Dektak-XT фирмы Bruker.

Структурные свойства полученных образцов были исследованы на просвечивающем электронном микроскопе JEM 2100F производства фирмы JEOL (Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Были использованы как режим дифракционного контраста, так и режим

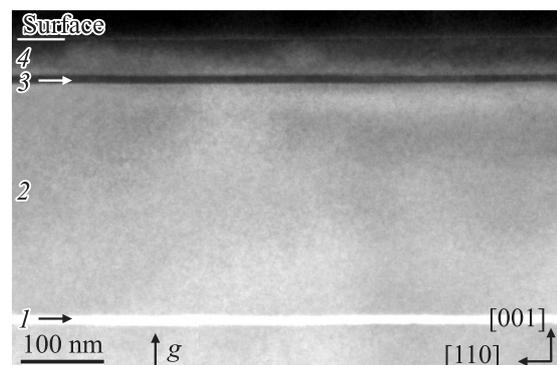


Рис. 2. Темнопольное ПЭМ изображение поперечного сечения [1-10] эпитаксиальной гетероструктуры с направлением вектора $g = (002)$: 1 — сверхрешетка (SL) с пятью периодами AlAs/GaAs, 2 — барьерный слой GaAs (barrier 1), 3 — квантовая яма (QW) InGaAs, 4 — барьерный слой GaAs (barrier 2), включающий в себя буферный слой GaAs, а также δ -слой Mn и накрывающий слой GaAs.

прямого изображения с высоким разрешением. Образцы для ПЭМ исследования были подготовлены в соответствии со стандартной процедурой, с предварительным механическим утонением и последующим травлением путем распыления пучком ионов Ar^+ с энергией 4 кэВ.

Рентгенодифракционные измерения были проведены на установке PANalytical MRD X'Pert Pro фирмы Philips (Нидерланды) при $\text{CuK}\alpha_1$ -облучении в трехосной конфигурации детектирования. В данной конфигурации типичное значение ширины пика на полувысоте ($FWHM$) от подложки GaAs в ориентации (004) не превышало 0.0025° . Для того чтобы преодолеть эффект „покачивания“, наблюдаемый в высококачественных монокристаллических образцах [13], вместо обычного одиночного сканирования была выбрана проекция величины соотношения $\omega/2\theta$ как функция от угла ω . Моделирование и подгонка кривых качания были выполнены с помощью программы X'pert Epitaxy and Smoothfit. Полученные значения толщин квантовой ямы InGaAs и барьерных слоев GaAs контролировались с помощью изображений поперечного сечения гетероструктуры, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 3 представлено ПЭМ-изображение поперечного сечения гетероструктуры вблизи квантовой

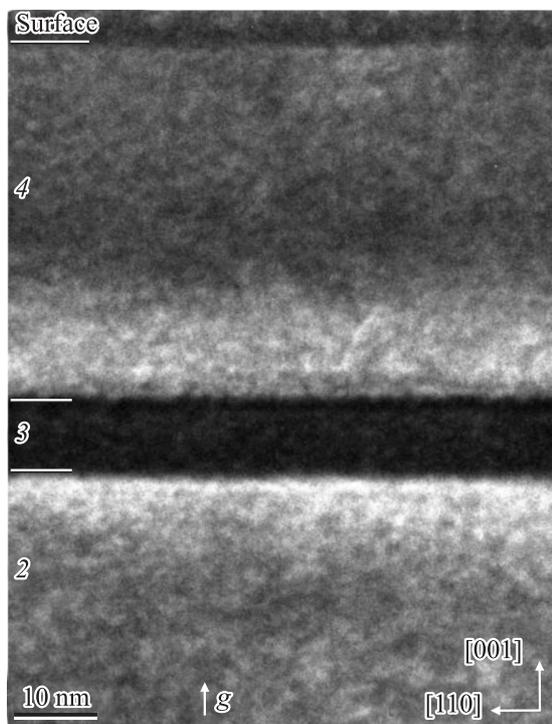


Рис. 3. Увеличенное ПЭМ-изображение поперечного сечения исследуемой гетероструктуры вблизи квантовой ямы GaAs/InGaAs/GaAs. 2 и 4 — слой GaAs, 3 — слой InGaAs.

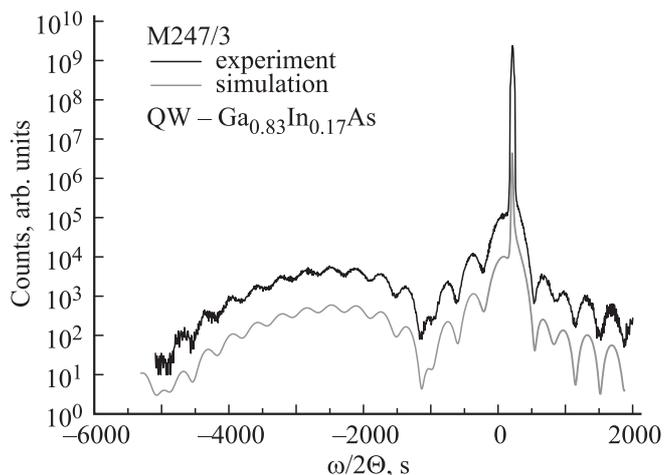


Рис. 4. Рентгеновские кривые качания, экспериментальная (черная) и теоретически рассчитанная (серая) на основе параметров, приведенных в таблице. Рассчитанная кривая сдвинута по вертикальной оси вниз на порядок величины для ясности представления.

ямы GaAs/GaInAs/GaAs, полученное вдоль направления [1–10]. Как видно из рисунка, эпитаксиальный слой узкозонного твердого раствора InGaAs толщиной 9.7 нм ограничен планарными границами раздела, свободными от продольных дислокаций и точечных дефектов. Следует отметить, что второй барьерный слой визуально не отображает какого-либо присутствия вставленного слоя другого состава, отличного от матричного материала. На изображении отсутствует линия контраста на расстоянии 3 нм выше слоя InGaAs, которая могла бы быть приписана к положению тонкого слоя атомарного марганца. Это означает, что граница раздела между разделительным слоем GaAs и последующим покрывающим слоем GaAs является псевдоморфной и проявление структурных дефектов на поверхности раздела, индуцированных введением моноатомного слоя переходного металла, мало вероятно. Ранее уже наблюдались подобные особенности для полупроводниковых образцов, легированных в интервалах субмонослойных концентраций, и было показано, что формирование структурных дислокаций становится заметным при концентрациях легирующей примеси, превышающих 1 МС [14]. В этом случае деформационная релаксация вставленного слоя вызывает появление дислокаций несоответствий и кластеров, обогащенных, например, марганцем, за счет большой разницы в постоянных кристаллических решеток между матрицей GaAs и слоем MnAs с типом решетки цинковой обманки [15]. Рассогласование в параметрах решеток между этими соединениями может достигать 6%.

Так как гетероструктура, обсуждаемая в данной работе, может состоять из материалов с одинаковым типом кристаллической решетки, то для изучения ее структурных особенностей могут быть использованы подходы и методы моделирования, применимые для

Экспериментальные данные и результаты моделирования параметров для кривых качания для гетероструктуры GaAs/InGaAs/GaAs/ δ -Mn/GaAs

№ слоя	Название слоя	Состав слоя	Толщина слоя (ПЭМ измерения), нм	Толщина слоя (модель), нм	Толщина слоя (ВИМС измерения), нм
1	barrier 1	GaAs	278	280	
2	quantum well	In _{0.175} Ga _{0.825} As	9.7	9.3	10.3
3	spacer	GaAs		2	3
4	δ -layer	MnAs		0.2	
5	cap	GaAs	42.7 (общая)	41.7	43

полупроводников A^{III}B^V. Экспериментальная кривая качания для данной гетероструктуры показана на рис. 4. В левой боковой части спектра относительно основного пика, который соответствует подложке GaAs, наблюдается интенсивная широкая полоса, положение максимума которой определяется постоянной кристаллической решетки тройного твердого раствора In_xGa_{1-x}As и дает возможность оценить концентрацию индия в слое, формирующем квантовую яму GaAs/InGaAs/GaAs. Найденное значение концентрации индия соответствовало $x = 0.175$. Отчетливая картина толщинных осцилляций вокруг отражения от слоя In_{0.175}Ga_{0.825}As, наблюдаемая на кривой качания, обусловлена интерференцией излучения, дифрагированного эпитаксиальной пленкой с планарными верхними и нижними интерфейсами (между прямой и двукратно отраженной волнами). Следует отметить, что ярко выраженные толщинные осцилляции характерны именно для высококачественных многослойных структур с резкими интерфейсами между эпитаксиальными слоями. Как известно, период таких колебаний обратно пропорционален толщине эпитаксиального слоя и в данном случае из оценки интерференционной картины ширина квантовой ямы оказалась равной 9.3 нм, что обнаруживает хорошее согласие с данными, полученными с помощью ПЭМ (см. таблицу).

На основе экспериментальных данных, полученных из ПЭМ-исследований, была смоделирована многослойная гетероструктура, подобная представленной на рис. 1. В модельной структуре изначально предполагалось, что слои MnAs и GaAs, полученные при низких температурах, будут иметь кристаллическую решетку типа цинковой обманки. Параметры структуры, используемые при моделировании спектров, приведены в таблице. Толщина слоя MnAs задавалась порядка 0.2 нм, что эквивалентно концентрации 0.5 МС и может быть применимо к термину „ δ -слой“. Толщина буферного слоя GaAs была выбрана в качестве параметра подгонки. Результат моделирования представлен также на рис. 4 (кривая серого цвета). Сравнение обеих кривых показывает, что было достигнуто хорошее согласие расчетного спектра и экспериментально полученной кривой. Наиболее близкое совпадение было достигнуто для толщины буферного слоя GaAs, равной 2 нм.

Для выявления δ -слоя марганца в матрице GaAs были проанализированы данные, полученные с использованием метода ВИМС. На рис. 5 показаны два экспериментальных концентрационных профиля: индия и марганца. Оба профиля демонстрируют асимметричную форму с различными наклонами для правой и левой части профиля; величина наклонов приведена в единицах нм/дек (нм за декаду). Наклон нарастающего фронта (leading edge, переднего по отношению к внешней поверхности гетероструктуры) ВИМС-профиля для обоих элементов был резкий и с одинаковой средней величиной $\lambda_L = -2.5$ нм/дек. Это означает, что в полученных эпитаксиальных слоях сегрегация и диффузия анализируемых элементов в матричном материале в направлении к внешней поверхности гетероструктуры отсутствуют [14]. Поскольку величина наклона в ВИМС-профилях для индия и марганца в исследуемой гетероструктуре одинакова, фронтальные края соответствующих профилей можно считать параллельными. Следовательно, расстояние между нарастающими фронтами определяется толщиной буферного слоя GaAs (3 нм),

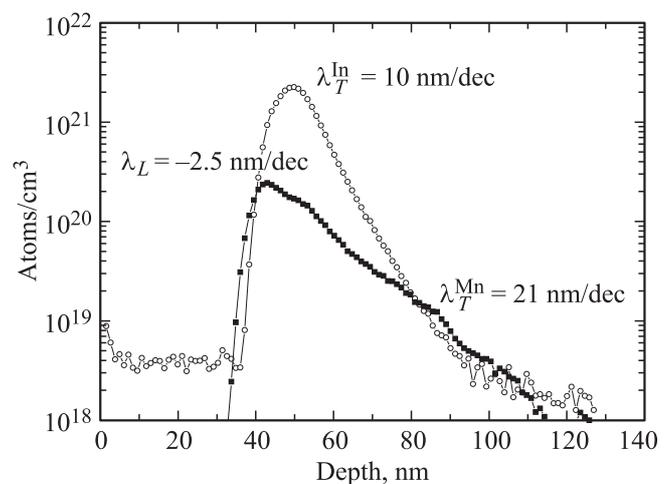


Рис. 5. Экспериментальные ВИМС профили марганца с концентрацией 0.5 МС (заполненные квадраты) и индия (открытые круги), полученные вдоль направления эпитаксиального роста. Нулевая отметка указывает на положение границы раздела воздух/поверхность гетероструктуры.

который расположен между δ -слоем Mn и квантовой ямой GaAs/InGaAs/GaAs, что согласуется с предложенной нами моделью гетероструктуры.

С другой стороны, спадающий фронт (trailing edge, последующий в направлении к подложке за фронтальным краем) концентрационного профиля для индия имел более пологий наклон $\lambda_T(\text{In}) = 10$ нм/дек, что может быть объяснено инструментальным эффектом ионного вбивания и перемешивания при измерении с помощью ВИМС [8]. Ранее нам удалось применить процедуру обратной свертки к экспериментальным данным, чтобы такой асимметричный вид концентрационного профиля преобразовать в реальную форму распределения индия для квантовой ямы GaAs/InGaAs/GaAs (см. [16] и ссылки внутри). В результате таких действий была получена симметричная форма профиля In с полушириной $FWHM_{\text{In}} = 10.3$ нм (рис. 6), которая соответствовала толщине квантовой ямы InGaAs, что хорошо коррелирует с данными ПЭМ и рентгенодифракционного анализа (см. таблицу).

Как видно из рис. 5, наклон спадающего фронта в профиле марганца значительно более пологий ($\lambda_T(\text{Mn}) = 21$ нм/дек) по сравнению со спадающим фронтом в профиле индия, что указывало на эффект сегрегации марганца в направлении к подложке при ионном травлении в процессе измерения методом ВИМС [14]. Основываясь на физике атомных столкновений, мы можем предположить, что вдвое большее значение спадающего фронта марганца не может быть объяснено только эффектом баллистического перемешивания атомов первичными ионами. На самом деле параметр перемешивания атомов отдачи, который и определяет в значительной степени протяженность спадающего фронта, можно оценить, в первом приближении, как длину проекционного пробега (R_P) атомов отдачи (In и Mn) в рассматриваемой матрице (GaAs) после соударения с первичным ионом цезия (Cs^+) [17]:

$$R_P = C_1 m_2 \left[\left(\frac{Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}}{Z_1 Z_2} \right) E_{\max} \right]^{2/3}, \quad (1)$$

где m_2 — масса атомов мишени (средняя для InGaAs), Z_i — атомный номер первичного иона (1) и атома мишени (2), C_1 — коэффициент, характеризующий передачу энергии от первичного иона атомам мишени и зависящий от энергии первичного иона, E_{\max} — максимальная энергия, передаваемая первичным ионом атому отдачи, определяемая при лобовом столкновении следующим образом:

$$E_{\max} = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} E_0, \quad (2)$$

где m_1 — масса первичного иона (1), E_0 — энергия первичного иона. Мы оценили проекционный пробег имплантированных атомов In и Mn в матрице GaAs с энергией, равной максимальной E_{\max} , используя метод Монте-Карло (программа SRIM-2008) [18]. Были

получены достаточно близкие значения ($R_P = 4.2$ нм для Mn и $R_P = 3.7$ нм для In). Это означает, что другой дополнительный механизм перемещения (перераспределения) атомов марганца непосредственно в процессе послойного анализа методом ВИМС должен быть рассмотрен для объяснения наблюдаемой двукратной разницы в величине спадающего фронта для Mn и In соответственно.

Отметим, что послойное разрешение в методе ВИМС часто определяется как разница глубин между 84 и 16% от максимального значения анализируемого сигнала. Именно это определение будет использовано в дальнейшем. Вообще говоря, разрешение в методе ВИМС определяется несколькими физическими эффектами: баллистическим перемешиванием атомов, вызванным первичными ионами, которое можно разделить на каскадное изотропное перемешивание (σ_{cm}) и анизотропную имплантацию атомов отдачи (λ_{kn}) [16], а также некоторыми дополнительными процессами, сопровождающими ионное распыление, как то: образование шероховатости поверхности в процессе ионного травления (σ_{tg}), радиационно-стимулированная диффузия (λ_{df}), радиационно-стимулированная сегрегация (λ_{sg}) и др. Каскадное перемешивание и радиационно-стимулированная шероховатость поверхности травления описываются гауссианами, тогда как вбивание атомов отдачи, радиационно-стимулированная диффузия и сегрегация описываются экспоненциальными функциями. Соотношение между параметром разрешения по глубине (Δz) и параметрами всех перечисленных функций можно представить через квадратуру:

$$(\Delta z)^2 = (2\sigma_{\text{tg}})^2 + (\sigma_{\text{cm}})^2 + (1.658\lambda_{\text{kn}})^2 + (1.658\lambda_{\text{sg}})^2 + (1.658\lambda_{\text{df}})^2 + \dots \quad (3)$$

Из анализа экспериментальных профилей Mn и In мы можем предположить, что экспериментальная функция разрешения по глубине метода ВИМС, которая используется для процедуры обратной свертки и восстановления исходного распределения, должна включать дополнительный экспоненциальный множитель, описывающий радиационно-стимулированную сегрегацию марганца в процессе послойного анализа (травления поверхности GaAs ионами цезия). Этот множитель (точнее, параметр λ_{sg} для этого множителя) может быть определен сравнением растущего и спадающего фронтов в концентрационном профиле марганца, как это было предложено в наших предыдущих работах для анализа квантовой ямы GaAs/InGaAs/GaAs [16,19]. Следует отметить, что в данном случае определенный таким образом параметр будет представлять собой сумму квадратов параметров сегрегации и имплантации атомов отдачи.

До того как провести процедуру обратной свертки, с помощью метода Монте-Карло (программа SRIM-2008) были оценены скорости распыления соединений $\text{In}_{0.175}\text{Ga}_{0.825}\text{As}$ и GaAs. Найденная разница в

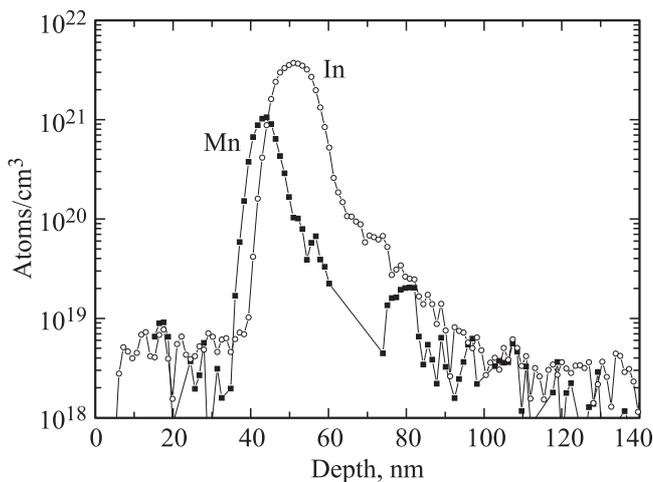


Рис. 6. Пересчитанные (восстановленные методом обратной свертки) профили распределения согласно предложенной модели: In — кривая с открытыми кругами описывает квантовую яму GaAs/InGaAs/GaAs и Mn — кривая с заполненными квадратами, описывающая пространственное положение δ -слоя MnAs в барьере GaAs вблизи узкозонного слоя InGaAs.

скоростях составляла менее 3%, что меньше экспериментальной погрешности определения глубины кратера травления, который был измерен с помощью обычного игольчатого профилометра. В результате можно пренебречь разностью в скоростях травления ямы InGaAs и барьеров GaAs и не учитывать этот эффект при проведении обратной свертки. В случае δ -слоя, когда концентрация марганца много меньше концентрации индия, мы также не принимали во внимание возможное изменение скорости распыления, вызванное изменением состава мишени. Кроме того, был исключен из рассмотрения так называемый матричный эффект (изменение выхода ионов в зависимости от состава поверхности травления), так как изменения в интенсивности ионов CsAs⁺ при послойном анализе гетерограниц GaAs/InGaAs не были обнаружены. Собственно, регистрация вторичных кластерных ионов CsM⁺ как раз и используется для минимизации (и даже исключения) матричного эффекта при послойном анализе методом ВИМС гетероструктур на базе соединений A^{III}B^V [11,12,16]. В итоге мы применили процедуру обратной свертки для экспериментального распределения марганца, при выполнении условий, оговоренных выше.

На рис. 6 показаны результаты выполнения обратной свертки для распределений Mn и In. Следует подчеркнуть, что оба пересчитанных профиля сохранили наклоны нарастающих фронтов, однако формы самих профилей изменились. Профиль индия стал симметричным с одинаково резкими наклонами нарастающего и спадающего фронтов, что говорит о резкости гетерограниц квантовой ямы и практическом отсутствии сегрегации индия в матрице GaAs. Полуширина пересчитанного профиля марганца составила $FWHM_{Mn} = 6.4$ нм.

Данное значение близко к величине 3–5 нм, типичной для слоев субмонослойной концентрации (номинальная концентрация менее $5 \cdot 10^{13}$ см⁻² [16]), что указывает на хорошую пространственную локализацию легирующей примеси, и профиль распределения можно представить в виде δ -функции. На самом деле, профиль Mn является более сложным и включает в себя уширение, вызванное диффузией и сегрегацией. После процедуры обратной свертки профиль Mn стал практически симметричным, однако если нарастающий фронт достаточно резкий (концентрация растет с 10^{18} до почти 10^{21} атом/см³ на промежутке в 2.5 нм), то спадающий фронт профиля марганца с концентрацией ниже 10^{20} атом/см³ демонстрирует „затянутый хвост“. Это означает, что существует вероятность сегрегации марганца в сторону квантовой ямы и возможна диффузия легирующей примеси в слой тройного твердого раствора InGaAs. Во всяком случае, мы не можем исключить такую вероятность, исходя из полученных данных. Чтобы оценить степень легирования квантовой ямы, необходимо провести магнитотранспортные и фотолюминесцентные исследования в зависимости от толщины разделяющего слоя GaAs. Однако эти вопросы находятся вне области интересов данной работы и могут быть предметом для дальнейшего изучения полученной гетероструктуры.

4. Заключение

Предлагаемая методика выращивания гетероструктур с δ -легированием позволяет получать слои легирующей примеси переходного металла в субмонослойной концентрации, расположенные в „барьерном“ слое на расстоянии нескольких нанометров от квантовой ямы. Полученные гетероструктуры были упруго напряжены и демонстрировали планарные четкие границы раздела без видимых протяженных и точечных дефектов. Как видно из таблицы, предлагаемая модель описывает реальную гетероструктуру с достоверной точностью, а расчетные параметры демонстрируют хорошее согласие с экспериментальными данными, полученными из измерений ПЭМ и ВИМС. Согласно измерениям ВИМС и трактовке экспериментальных результатов, существует вероятность диффузии марганца в квантовую яму GaAs/InGaAs/GaAs при уменьшении критической толщины буферного слоя GaAs менее 3 нм.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФИ (№ 15-02-08909).

Список литературы

- [1] H. Ohno. J. Magn. Magn. Mater., **200**, 110 (1999).
- [2] A.J. Blattner, J. Lensch, B.W. Wessels. J. Electron. Mater., **30**, 1408 (2001).
- [3] I. Frymark, G. Kowalski. J. Phys. D: Appl. Phys., **38**, A160 (2005).

- [4] К.Д. Моисеев, В.П. Лесников, В.В. Подольский, Yu. Kudriavtsev, O. Koudriavtseva, A. Escobosa, V. Sanchez-Resendiz. *ФТП*, **45**, 788 (2011).
- [5] A.M. Nazmul, S. Sugahara, M. Tanaka. *Phys. Rev. B*, **67**, 241308R (2003).
- [6] M.A. Pankov, B.A. Aronzon, V.V. Rylkov, A.B. Davydov, V.V. Tugushev, S. Caprara, I.A. Likhachev, E.M. Pashaev, M.A. Chuev, E. Lahderanta, A.S. Vedenev, A.S. Bugaev. *Eur. Phys. J. B*, **85**, 206 (2012).
- [7] А.И. Дмитриев, Р.Б. Моргунов, С.В. Зайцев. *ЖЭТФ*, **139**, 367 (2011).
- [8] E.F. Schubert, J.M. Kuo, R.F. Kopf, H.S. Luftman, L.C. Hopkins, N.J. Sauer. *J. Appl. Phys.*, **67**, 1969 (1990).
- [9] C.M. Yee-Rendon, M. Lopez-Lopez, M. Melendez-Lira. *Rev. Mexic. Fisica*, **50**, 193 (2004).
- [10] A. Del Rio-De Santiago, V.H. Méndez-García, I. Martínez-Velis, Y.L. Casallas-Moreno, E. López-Luna, A.Yu. Gorbatheev, M. López-López, E. Cruz-Hernández. *Appl. Surf. Sci.*, **333**, 92 (2015).
- [11] Y. Gao. *J. Appl. Phys.*, **64**, 3760 (1988).
- [12] J.M. Schroer, H. Gnaser, H. Oechsner. *Proc. 9th Int. Conf. Second. Ion Mass Spectrometry* (Yokohama, Japan, Nov. 7–12, 1993) p. 386.
- [13] S. Gallardo-Hernandez, I. Martinez-Velis, M. Ramirez-Lopez, Y. Kudriavtsev, A. Escobosa-Echavarria, S. Luiz Morelhaio, M. Lopez-Lopez. *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 192113 (2013).
- [14] A.M. Nazmul, S. Sugahara, M. Tanaka. *J. Cryst. Growth*, **251**, 303 (2003).
- [15] M. Shirai, T. Ogawa, I. Kitagawa, N. Suzuki. *J. Magn. Mater.*, **177**, 1383 (1998).
- [16] Yu. Kudriavtsev, R. Asomoza, S. Gallardo-Hernandez, M. Ramirez-Lopez, M. Lopez-Lopez, V. Nevedomsky, K. Moiseev. *Physica B*, **453**, 53 (2014).
- [17] H. Gnaser. *Low-Energy Ion Irradiation of Solid Surfaces*. In: G. Höhler (eds), Springer, Tracts in Modern Physics, v. 146 (Verlag Berlin Heidelberg, 1999) p. 13.
- [18] www.srim.org
- [19] S. Gallardo, Y. Kudriavtsev, A. Villegas, G. Ramirez, R. Asomoza, E. Cruz-Hernandez, J.S. Rojas-Ramirez, M. Lopez-Lopez. *Appl. Surf. Sci.*, **255**, 1341 (2008).

Редактор А.Н. Смирнов

Delta-doping of GaAs-based heterostructures by manganese compounds

K.D. Moiseev¹, V.N. Nevedomsky¹, Yu. Kudriavtsev², A. Escobosa-Echavarria², M. Lopez-Lopez³

¹ Ioffe Institute,
194021 St, Petersburg, Russia

² Dep. Ingenieria Eléctrica-SEES,
Cinvestav-IPN, México

³ Dep. Física,
Cinvestav-IPN, Mexico

Abstract Heterostructures with GaAs/InGaAs/GaAs quantum wells, doped with spatially remote monatomic layers of Mn, were obtained on the GaAs(001) substrate by molecular-beam epitaxy in a monolayer enhanced mode. Combined studies of the obtained samples were performed using the method of secondary ion mass spectrometry, X-ray diffraction measurement and transmission electron microscope imaging. The heterostructures under study doped with the impurity concentration of 0.5 monolayer were strained elastically and demonstrated abrupt planar interfaces without visible extended and point defects. The technique of imaging of the distribution of manganese concentration in the GaAs three-dimensional matrix close to the quantum well has been proposed. According to the experimental results it is probable manganese diffusion into the GaAs/InGaAs/GaAs quantum well with a decrease in the critical thickness of the GaAs buffer layer of less than 3 nm.

This work was in part supported by RBRF project (N 15-02-08909).