

Особенности получения разбавленных магнитных полупроводников в системе узкозонных твердых растворов GaInAsSb

© К.Д. Моисеев[†], В.П. Лесников*, В.В. Подольский*, Yu. Kudriavtsev⁺, O. Kudriavtseva⁺, A. Escobosa⁺, V. Sanchez-Resendiz⁺

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

* Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603021 Нижний Новгород, Россия

⁺ CINVESTAV-IPN,

07360 Mexico D.F., P.O. box 14-740 Mexico

(Получена 6 декабря 2010 г. Принята к печати 13 декабря 2010 г.)

Разработана нанотехнология получения разбавленных магнитных полупроводников на основе соединений GaInAsSb с помощью метода лазерного осаждения атомов марганца на эпитаксиальный слой четверного твердого раствора, полученный методом жидкофазной эпитаксии. Изготовленные гетероструктуры исследовались методом рентгеновской дифракции с высоким разрешением для брэгговской и скользящей геометрии дифракции, а также проведен послыйный анализ методом масс-спектрометрии вторичных ионов. Было установлено, что приграничная область слоя $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}$ вблизи поверхности напыления атомарного марганца демонстрирует наличие пятикомпонентного соединения с атомами марганца в решетке и бинарных включений типа Mn_3As_2 . Насыщение многокомпонентного разбавленного полупроводника GaIn(Mn)AsSb соединениями марганца позволит задавать концентрацию магнитной примеси в кристалле и управлять магнитными свойствами гетероструктуры.

1. Введение

Последние годы предметом интенсивных исследований является получение полупроводниковых соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, сильнолегированных магнитной примесью, поскольку они рассматриваются как перспективные материалы при разработке приборов для применений в спинтронике. Сильное легирование магнитной примесью, например Mn, когда атомы переходного металла внедряются в узлы кристаллической решетки основного материала, приводит к образованию разбавленных полупроводников, что открывает хорошие перспективы для интеграции ферромагнитных свойств в полупроводниковых гетероструктурах. Упорядочение в дальнем поле для магнитных примесей определяется носителями заряда и дает возможность управления спиновыми свойствами системы посредством манипулирования носителями. Многие физические свойства разбавленного магнитного полупроводника на основе соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ обусловлены величиной температуры Кюри, которая определяется концентрацией дырок.

Наиболее известны полупроводниковые соединения GaMnAs, в которых введение марганца привело к формированию разбавленного полупроводника с p -типом проводимости и была получена величина температуры Кюри $T_C = 159 \text{ K}$ [1]. Хотя для соединений InMnAs было достигнуто меньшее значение T_C (до 90 K [2]), однако такие материалы демонстрировали возможность управления магнитным упорядочением носителей заряда посредством внешнего воздействия: электрического поля или света [3,4]. Более того, в зависимости от условий роста и типа подложки соедине-

ния InMnAs могут обладать как n -типом проводимости и быть при этом парамагнетиками, так и p -типом проводимости, демонстрируя аномальный эффект Холла [5,6]. Введение атомов галлия в соединение InGaMnAs позволяет увеличить температуру Кюри до 110 K [7], однако гетероструктуры, легированные дельта-слоем атомарного марганца, с двумерным дырочным газом, образующимся на гетерогранице $p\text{-GaAs}/p\text{-AlGaAs}$, обладали ферромагнитными свойствами с еще более высокими значениями температуры Кюри (до 250 K) [8]. Таким образом, взаимодействие двух систем с пониженной размерностью (δ -слой марганца и высокопроводящая квантовая яма, заполненная носителями заряда) могут определять магнитные свойства всей гетероструктуры.

Известно, что в разьединенном гетеропереходе II типа $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$ на гетерогранице существует высокопроводящий двумерный полуметаллический канал, состоящий из электронно-дырочного газа, при этом электроны и дырки, локализованные вблизи интерфейса GaInAsSb/InAs, пространственно разделены и расположены по разные стороны границы раздела [9]. В таких гетероструктурах обнаружены особенности в квантовом вертикальном магнитотранспорте, обусловленные взаимодействием между спинами локализованных носителей на гетерогранице [10]. Дельта-легирование марганцем слоя четверного твердого раствора GaInAsSb может выступать дополнительным источником ориентированных по спину дырок в общем токе носителей заряда через гетерограницу при приложении внешнего электрического поля [11].

Следует заметить, что вопросы, касающиеся структурных, технологических и физических свойств и связанные с формированием самих гетероструктур с высоким

[†] E-mail: mkd@iropt2.ioffe.rssi.ru

уровнем легирования Mn на основе узкозонных бинарных соединений $A^{III}B^V$, до настоящего времени мало изучены. Совсем не исследовались гетероструктуры на основе многокомпонентных твердых растворов, изопериодных выбранной бинарной подложке. Настоящая работа направлена на установление профиля распределения атомов магнитной примеси в узкозонных соединениях на основе четверных твердых растворов GaInAsSb.

2. Методика эксперимента

В качестве объекта для осаждения слоя атомарного марганца была использована поверхность эпитаксиального слоя четверного раствора GaInAsSb, обогащенного антимонидом галлия, с параметром постоянной кристаллической решетки, близким к параметру решетки подложки арсенида индия. Эпитаксиальный слой $Ga_{0.96}In_{0.04}As_{0.11}Sb_{0.89}$ был получен методом жидкофазной эпитаксии на монокристаллической подложке InAs, ориентированной в направлении кристаллографической оси (001).

Оценка кристаллического совершенства и определение параметров рассогласования одиночных гетероструктур InAs/GaInAsSb проводились методом высокоразрешающей дифрактометрии на трехкристальном рентгеновском спектрометре ТРС-1. Для коллимации и монохроматизации первичного пучка использовался совершенный кристалл Ge с высокой асимметрией. При этом расходимость первичного пучка для отражения (004) излучения $CuK_{\alpha 1}$ составляла 1.0–1.2 угл.с. Съемка кривых проводилась в геометрии $(n_1, -n_2)$, угловое дисперсионное уширение основных пиков вследствие различия параметров решетки кристалла-монокристалла и исследуемых структур составляло 3.5 угл.с. Измерение дифракционных кривых проводилось в режиме ω -сканирования с открытым окном детектора.

Для нанесения пленок марганца и антимонида галлия применялся импульсный лазер на алюмоиттриевом гранате, работающий в режиме модулированной добротности на длине волны 1.06 мкм. Была использована вращающаяся мишень, состоящая из пластины монокристаллического нелегированного антимонида галлия, частично закрытой металлическим марганцем высокой чистоты [12]. На полученный слой атомарного Mn осаждался слой антимонида галлия толщиной 25 нм. Температура образца, на поверхность которого осаждались пленки Mn и GaSb, не превышала 300°C [13].

Структурные исследования гетероструктур, содержащих осажденный слой Mn, проводились на рентгеновском дифрактометре высокого разрешения PANalytical X'Pert Pro (Philips) на $CuK_{\alpha 1}$ излучении, в двух- и трехкристальном варианте сканирования, для брэгговской и скользящей геометрии дифракции, для ω - и ω - 2θ мод сканирования.

Послойный анализ гетероструктур, содержащих осажденный слой Mn, был сделан с помощью метода

масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС). Измерения проводились с использованием ионного микрозонда ims-6f фирмы Cameca (Франция). Качество границ раздела и взаимная диффузия основных элементов и элементов легирования между отдельными слоями составляли основную задачу исследования. Поэтому в качестве режима послыонного анализа был выбран метод анализа кластерных ионов CsM^+ , где M — анализируемый элемент, эмитирующий с поверхности травления при распылении мишени ионами цезия [14]. Такой режим обеспечивает минимальный матричный эффект для полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ [15], а значит, максимальную достоверность данных ВИМС о распределении элементов вблизи границ раздела. Пересчет экспериментальных интенсивностей проводился с использованием стандартных образцов известного состава и данных рентгеновской дифракции. Толщины измеренных структур пересчитывались после измерений экспериментальных кратеров травления с использованием профилометра Dektak II.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Одиночная гетероструктура $Ga_{0.96}In_{0.04}As_{0.11}Sb_{0.89}/InAs$ с резкой планарной границей раздела (переходная область между двумя полупроводниками не превышала 1 нм) была получена в результате двумерного планарного роста [16]; при этом шероховатость поверхности слоя не превышала 5 нм. Как показано на рис. 1, более интенсивный и узкий пик (полуширина 10.3'') на дифракционной кривой, угловое положение которого соответствует 0 на шкале $\theta - \theta_{Br}$, отвечает отражению от подложки InAs (004), тогда как менее интенсивный, но более широкий (полуширина 14.3'') — отражению от эпитаксиального слоя GaInAsSb. Четкая интерференционная картина толщинных осцилляций вокруг пиков от слоя твердого раствора обусловлена интерференцией

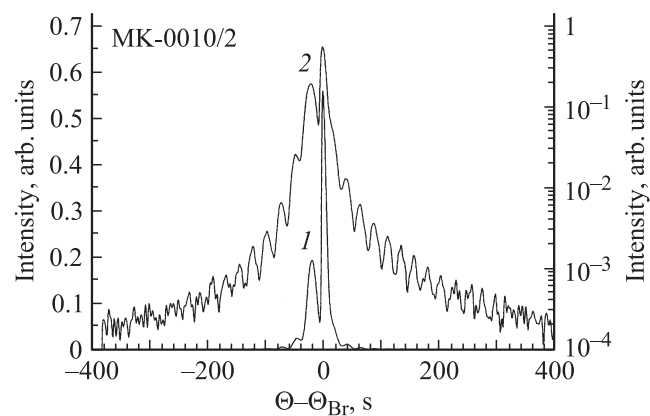


Рис. 1. Кривая дифракционного отражения в линейной (1) и логарифмической (2) шкале для одиночной гетероструктуры InAs/ $Ga_{0.96}In_{0.04}As_{0.11}Sb_{0.89}$ до осаждения марганца на поверхность, полученная в направлении (004).

излучения, дифрагируемого эпитаксиальной пленкой с планарными верхним и нижним интерфейсами (между прямой волной и двукратно отраженной). Период толщинных осцилляций обратно пропорционален толщине эпитаксиальных слоев и соответствует величине порядка 0.85 мкм. Относительное рассогласование слоя и подложки не превышало $2 \cdot 10^{-4}$. Признаков изменения состава твердого раствора вдоль направления роста по нормали к поверхности подложки не обнаружено, а сам слой был псевдоморфен подложке и полностью напряжен.

Для определения основного фазового состава всей гетероструктуры была получена дифрактограмма в интервале сканирования от 20 до 100°. При исследовании монокристаллического слоя пики (или рефлексы), для которых в заданном интервале сканирования выполняется закон Брэгга, появляются только от кристаллографических плоскостей, расположенных параллельно поверхности образца (рис. 2). Наиболее интенсивные пики экспериментального шаблона дифракции в интервале от 20 до 100° не совпадают с пиками шаблонов ни для InAs, ни для GaAs, но расположены между ними (см. пики 2, 5 и 7 в таблице) [17,18]. Следует отметить, что экспериментальные значения ближе к параметрам InAs, чем GaSb, так как слой подбирался с постоянной решетки, близкой к InAs. Принимая во внимание закон Vegarda о том, что постоянная решетки многокомпонентного твердого раствора зависит от молярной доли каждого бинарного соединения, входящего в данный твердый раствор [19],

$$a_{\text{GaInAsSb}} = (1-x)(1-y)a_{\text{GaSb}} + xy a_{\text{InAs}} + (1-x)y a_{\text{GaAs}} + x(1-y)a_{\text{InSb}},$$

где x — молярная доля индия, y — молярная доля мышьяка, $(1-x)$ — молярная доля галлия, $(1-y)$ — молярная доля сурьмы, a_{ij} — постоянная решетки соответствующего бинарного соединения (ij), то положение пика от эпитаксиального слоя строго соответ-

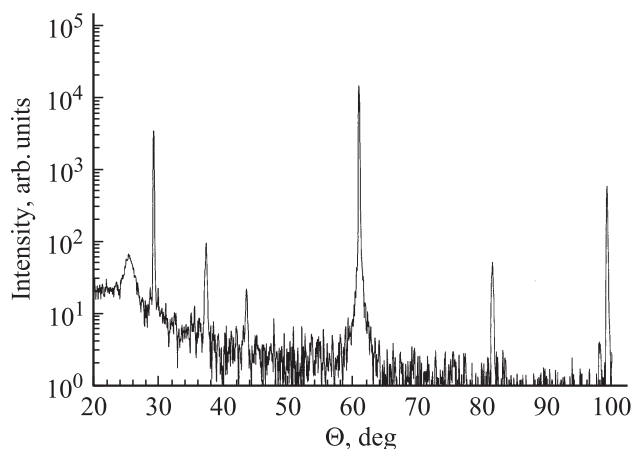


Рис. 2. Спектр рентгеновской дифрактограммы, измеренной под углом, близким к нормали к поверхности образца InAs/Ga_{0.96}In_{0.04}As_{0.11}Sb_{0.89}/Mn/GaSb.

Положение дифракционных максимумов в исследуемой гетероструктуре (пик брэгговской дифракции для вещества по данным из [17,18,20])

Номер пика	Положение пика	Идентификация пика
1	25.53°	25.443° — поликристалл InAs (111) 25.987° — поликристалл Mn ₃ As ₂ (111)
2	29.45°	29.277° — GaSb монокристалл (002) 29.455° — InAs монокристалл (002)
3	37.60°	GaInMnAsSb поликристалл (111)
4	43.45°	GaInMnAsSb поликристалл (002)
5	61.05°	60.722° — GaSb монокристалл (004) 61.143° — InAs монокристалл (004)
6	81.52°	GaInMnAsSb поликристалл (004)
7	99.31°	98.632° — GaSb монокристалл (006) 99.441° — InAs монокристалл (006)

ствует составу твердого раствора. Таким образом, три основных пика наибольшей интенсивности экспериментальной дифрактограммы при 29.45°, 61.05° и 99.31°, полученных соответственно от кристаллографических плоскостей (002), (004) и (006), соответствуют слою Ga_{0.96}In_{0.04}As_{0.11}Sb_{0.89}, который является монокристаллом с гранецентрированной кубической решеткой, при этом ориентация роста слоя соответствует ориентации подложки (001).

Как видно из рис. 2, кроме основных рефлексов, соответствующих кубической решетке четверного раствора, наблюдаются еще четыре рефлекса меньшей интенсивности при положениях 2θ , равных 25.53°, 37.40°, 43.56° и 81.52°, которые не могут быть получены ни от подложки, ни от слоя твердого раствора. Появление этих пиков может быть обусловлено наличием слоя атомарного марганца и накрывающего бинарного слоя GaSb.

Пики при положениях 2θ , равных 37.40°, 43.56° и 81.52°, можно приписать к рефлексам от кристаллографических плоскостей (111), (002) и (004) соответственно, для поликристаллического соединения на основе марганца. Более того, мы предполагаем, что марганец входит в кристаллическую решетку, скорее всего, четверного твердого раствора, следовательно, можно говорить об образовании многокомпонентного соединения GaInMnAsSb.

Присутствие в спектре дифрактограммы достаточно широкой полосы рефлекса $2\theta = 25.53^\circ$ можно объяснить суперпозицией для нескольких рефлексов при отражении в плоскости (111), например, для поликристаллических соединений InMnAs и Mn₃As₂ [20]. Для лучшего определения пиков, принадлежащих поликристаллическим соединениям, была получена дифрактограмма в плоскости дифракции, близкой к плоскости поверхности образца („скользящая“ дифракция). Пики при положениях 2θ , равных 50.0° и 50.66°, хорошо согласуются с рефлексами от кристаллографической плоскости (311)

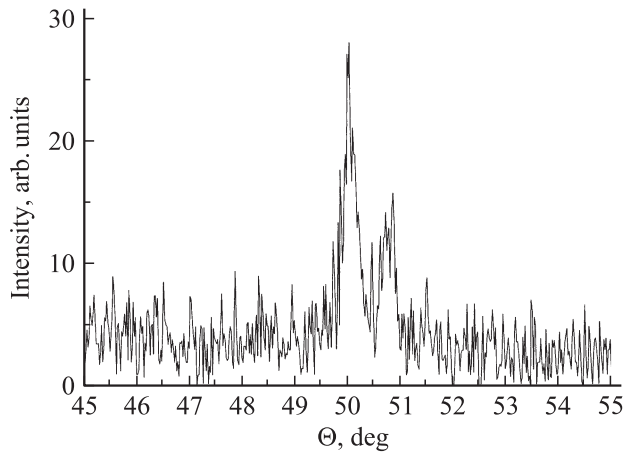


Рис. 3. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы в диапазоне углов 45–55°, измеренной под скользящим углом к поверхности образца $\text{InAs}/\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}/\text{Mn}/\text{GaSb}$.

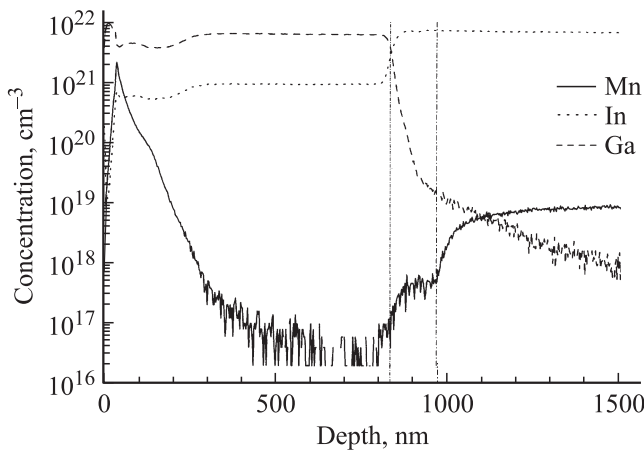


Рис. 4. ВИМС-профили распределения галлия, индия и марганца вдоль направления роста гетероструктуры $\text{GaSb}/\text{Mn}/\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}/\text{InAs}$. Положение оси ординат соответствует верхней поверхности образца.

для поликристаллов InMnAs и Mn_3As_2 , соответственно (рис. 3).

На рис. 4 представлены концентрационные зависимости основных металлических элементов от расстояния от поверхности в гетероструктуре $\text{GaSb}/\text{Mn}/\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}/\text{InAs}$. Точка пересечения кривых In и Ga на расстоянии 0.83 мкм от поверхности образца указывает на металлическую границу между слоем GaInAsSb и подложкой InAs . Также можно определить границу между слоями GaInAsSb и GaSb , которая расположена на глубине 25 нм от поверхности, что хорошо согласуется с технологическими параметрами, заданными при процессе лазерного осаждения GaSb . Оценка концентрации марганца в подложке InAs , рассчитанная из измерений профиля ВИМС, хорошо согласуется с величиной, полученной из магнитотранспортных исследований ($p = 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Кроме того, хорошо видна приповерхностная область эпитаксиального слоя четверного твердого раствора GaInAsSb шириной 100–150 нм на границе со слоем атомарного марганца, где содержание основных компонентов твердого раствора Ga и In, а также As и Sb (не показано на рисунке) меньше, чем в основном объеме эпитаксиального слоя. При этом наблюдается замедление в спаде концентрации марганца. Далее концентрация марганца продолжает спадать вглубь экспоненциально, и на глубине 500–830 нм от поверхности образца она не превышает фоновое значение ($p = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$), характерное для соединений, обогащенных антимонидом галлия [21]. В результате полуширина профиля распределения марганца составила 14 нм, что на порядок больше задаваемой при осаждении толщины слоя. Осаждение накрывающего слоя поликристаллического бинарного GaSb приводит к заметной асимметрии профиля распределения примеси в гетероструктуре, что указывает на подавление диффузии атомов марганца в объем бинарного соединения на основе галлия и сурьмы, тогда как присутствие атомов индия и мышьяка в эпитаксиальном слое четверного твердого раствора способствует активному взаимодействию с атомами марганца. Следовательно, приповерхностная область слоя GaInAsSb отражает профиль пятикомпонентного соединения с включениями марганца в кристаллическую решетку четверного твердого раствора на основе антимонида галлия.

Можно предположить, что введение слоя атомарного Mn путем лазерного осаждения приводит к формированию наноразмерного слоя разбавленного полупроводника $\text{GaIn}(\text{Mn})\text{AsSb}$, что выражается в достаточно сильном легировании четверного твердого раствора GaInAsSb магнитной примесью ($p \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$). При этом сильно нарушается картина планарного квантового магнитоимпеданса за счет шунтирования основного пути протекания тока через проводящие слои соединений с Mn. Однако при прохождении тока через гетероструктуру с дополнительным слоем, легированным магнитной примесью, в направлении, перпендикулярном плоскости гетероперехода $\text{GaInAsSb}/\text{InAs}$, наблюдались квантовые свойства в вертикальном магнитотранспорте в виде неоднородностей на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) и на зависимостях дифференциальной проводимости (dI/dU) [11].

Неоднородности в поведении ВАХ и на зависимостях dI/dU от величины приложенного магнитного поля были обусловлены участием магнитных моментов магнитной примеси в спин-зависимом токе через гетероструктуру с двумерным электронным каналом на разъединенной гетерогранице II типа, при условии когда достигается диэлектрическое состояние для магнитосопротивления $\rho_{xx}(B)$ в планарной геометрии при расположении уровня Ферми между наименьшими уровнями Ландау электронной подзоны в канале [10]. Для разъединенных гетероструктур II типа с дополнительным слоем магнитной примеси наблюдалось более

выраженное поведение спин-зависимого тока в вертикальном квантовом магнитотранспорте [11]. Максимумы туннельного тока, как и максимумы $\rho_{xx}(B)$ в планарном магнитотранспорте, соответствуют совпадению по энергии уровней Ландау $2D$ -электронов в полуметаллическом канале на гетерогранице с уровнем химпотенциала гетероструктуры. При этом с ростом магнитного поля эффект только усиливается. Такая большая разница в величине dI/dU от смещения, измеренная при данной величине магнитного поля, может быть объяснена резонансным совпадением направлений магнитных моментов носителей из нанослоя на основе марганца со спином электронов на гетерогранице. Более того, насыщение многокомпонентного разбавленного полупроводника GaIn(Mn)AsSb соединениями типа Mn_3As_2 позволяет усилить магнитные свойства всей гетероструктуры.

При измерении профиля ВИМС наблюдается также особенность в распределении марганца вблизи металлургической границы GaInAsSb/InAs(Mn). Со стороны подложки InAs обнаружено резкое, ступенчатое уменьшение концентрации Mn в интервале толщин 150 нм. При этом уровень концентрации примеси в данной области остается постоянным, порядка $p = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что может соответствовать поверхностной концентрации $n_s = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Мы полагаем, что данная особенность связана с влиянием встроенного электрического поля разьединенного гетероперехода II типа GaInAsSb/InAs [22]. Известно также, что атомы переходных металлов с незаполненной d -оболочкой обладают сильным p - d взаимодействием [23]. Тогда наличие дополнительного электрического поля на разьединенной гетерогранице II типа может влиять на концентрацию атомов акцепторной примеси вблизи поверхности интерфейса.

Таким образом, предложена нанотехнология легирования магнитными примесями многокомпонентных твердых растворов полупроводников $A^{III}B^V$ и создания на их основе узкозонных гетероструктур II типа с двумерным полуметаллическим каналом на гетерогранице с помощью комбинированного метода на основе жидкофазной эпитаксии и лазерного осаждения атомов переходного металла. Проведен послойный анализ гетероструктур методом ВИМС и оценены форма и размеры нанослоя Mn при осаждении на эпитаксиальные слои, обогащенные GaSb. Слои четверного твердого раствора GaInAsSb могут быть рассмотрены как перспективный материал для введения марганца в больших количествах в узкозонные полупроводниковые гетероструктуры на основе соединений $A^{III}B^V$, а также получения многокомпонентных разбавленных магнитных полупроводников. Данная технология позволит задавать концентрацию магнитной примеси в кристалле и управлять магнитными свойствами гетероструктуры.

Работа частично поддержана в рамках программ президиума РАН и ОФН РАН, а также грантов РФФИ (09-02-00063, 08-02-01222а), РНП ВШ 2.1.1/2833, ФЦП 02.740.11.0672. Ю. Кудрявцев выражает благодар-

ность CONACYT (Mexico) за частичную поддержку этой работы (грант #79812).

Список литературы

- [1] K.W. Edmonds, P. Boguslavski, K.Y. Wang, R.P. Campion, S.N. Novikov, N.R.S. Farley, B.L. Gallagher, C.T. Foxon, M. Sawicki, T. Dietl, M. Buongiorno Nardelli, J. Bernholc. *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 037 201 (2004).
- [2] T. Schallenberg, H. Munekata. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 042507 (2006).
- [3] H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno, K. Ohtani. *Nature (London)*, **408**, 944 (2000).
- [4] S. Koshihara, A. Oiwa, M. Hirasawa, S. Katsumoto, Y. Iye, C. Urano, H. Takagi, H. Munekata. *Phys. Rev. Lett.*, **78**, 4617 (1997).
- [5] H. Ohno. *J. Magn. Magn. Mater.*, **200**, 110 (1999).
- [6] Т.С. Лагунова, Т.И. Воронина, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Е. Самохин, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **37**, 905 (2003).
- [7] T. Slupinski, H. Munekata, A. Oiwa. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 1592 (2002).
- [8] A.M. Nazmul, T. Amemiya, Y. Shuto, S. Sugahara, M. Tanaka. *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 017201 (2005).
- [9] М.Р. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, R109 (2004).
- [10] В.А. Березовец, К.Д. Моисеев, М.П. Михайлова, Р.В. Парфеньев, Ю.П. Яковлев, В.И. Нижанковский. *Физика низких температур*, **33**, 194 (2001).
- [11] R.V. Parfeniev, K.D. Moiseev, V.A. Berezovets, N.S. Averkiev, M.P. Mikhailova, V. Nizhankovskii, D. Kaczorowski. *J. Magn. Magn. Mater.*, **321**, 712 (2009).
- [12] Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, Ю.Н. Дроздов, В.П. Лесников, В.В. Подольский. *ФТП*, **39**, 8 (2005).
- [13] Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, М.В. Сапожников, Д.В. Дружнов, С.Н. Гусев, Б.А. Грибков, Д.О. Филатов, Ю.С. Степанова, С.А. Левчук. *ЖЭТФ*, **133**, 1 (2008).
- [14] Y. Gao. *J. Appl. Phys.*, **64**, 3760 (1988).
- [15] J.M. Schroer, H. Gnaser, H. Oechsner. *Proc. 9th Int. Conf. Second. Ion Mass Spectrometry*, Yokohama, Japan, 7–12 Nov. 1993, P. 386.
- [16] К.Д. Моисеев, А.А. Ситникова, Н.Н. Фалеев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **34**, 1438 (2000).
- [17] National Bur. Stand. (U.S.). Circ. 539, **9**, 30 (1956).
- [18] National Bur. Stand (U.S.). Monogr. 25, **3**, 35 (1964).
- [19] А.Н. Баранов, А.М. Литвак, К.Д. Моисеев, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *ЖПХ*, **67**, 1951 (1994).
- [20] L. Dietrich, W. Jeitschko, M. Moller. *Z. Kristallogr.*, **190**, 259 (1990).
- [21] K.D. Moiseev, A. Krier, Yu.P. Yakovlev. *J. Appl. Phys.*, **90**, 3988 (2001).
- [22] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.Ф. Липаев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **40**, 519 (2006).
- [23] T. Jungwirth, J. Sinova, J. Mašek, J. Kučera, A.H. MacDonald. *Rev. Mod. Phys.*, **78**, 809 (2006).

Редактор Л.В. Беляков

Peculiarities of diluted magnetic semiconductors production in GaInAsSb narrow-gap solid solution system

K.D. Moiseev, V.P. Lesnikov, V.V. Podolski*,
Yu.Kudriavtsev⁺, O. Kudriavtseva⁺, A. Escobosa⁺,
V. Sanchez-Resendiz⁺*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Lobachevsky State University,
603021 Nizhni Novgorod, Russia

+ CINESTAV-IPN, Instituto Politécnico Nacional Mexico
D.F., Mexico

Abstract Nanotechnology production of diluted magnetic semiconductors based on GaInAsSb compounds has been developed using a method of laser ablation of Mn atoms onto the epitaxial layer of the quaternary solid solution synthesized by liquid phase epitaxy. Study of the obtained heterostructures were carried out employing high-resolution x -Ray diffraction method in Bragg's (normal) and coplanar geometry and secondary ions mass-spectrometry for sectioning analysis. It was established that the boundary region of $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}$ epilayer near Mn deposition surface demonstrated presence of a quinary compound containing of Mn atoms in the lattice and binary inclusions such as Mn_3As_2 . Saturation of multicomponent GaIn(Mn)AsSb diluted semiconductor by manganese compounds will allow determining of magnetic impurity level in the crystal and controlling of magnetic properties of the heterostructure.