

Оптические и магнитотранспортные свойства структур InGaAs/GaAsSb/GaAs, легированных магнитной примесью

© И.Л. Калентьева[¶], Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, А.В. Здоровейцев

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2015 г. Принята к печати 12 мая 2015 г.)

Впервые экспериментально исследованы структуры с двухслойными квантовыми ямами InGaAs/GaAsSb/GaAs, содержащие δ -слой магнитной примеси (Mn) на границе раздела GaAs/InGaAs. Структуры были изготовлены методом МОС-гидридной эпитаксии и лазерного осаждения на подложках проводящего (n^+) и полуизолирующего GaAs в едином ростовом цикле. Изготовленные образцы различались толщиной слоя InGaAs, которая варьировалась от 1.5 до 5 нм. Обнаружено значительное влияние уменьшения толщины квантовой ямы InGaAs на оптические и магнитотранспортные свойства исследованных структур. При этом наблюдается нелинейный характер магнитополовой зависимости сопротивления Холла и отрицательное магнетосопротивление при температурах $\leq 30\text{--}40\text{ К}$, циркулярная поляризация электролюминесценции в магнитном поле, противоположное поведение интенсивностей фотолуминесцентного и электролюминесцентного излучения структур, а также возрастание вклада непрямых переходов при уменьшении толщины InGaAs. С использованием моделирования показано, что указанные эффекты могут быть обусловлены влиянием δ -слоя акцепторной примеси (Mn) на зонную структуру и распределение концентрации дырок в двухслойной квантовой яме.

1. Введение

Интерес к структурам, содержащим двухслойные квантовые ямы (КЯ) InGaAs/GaAsSb/GaAs, обусловлен возможностью получения диодов, излучающих на длине волны $\sim 1.3\text{ мкм}$. При определенных толщинах и составах напряженных слоев можно достичь высокой интенсивности фотолуминесцентного излучения на непрямых в реальном пространстве переходах между зоной проводимости слоя InGaAs и валентной зоной слоя GaAsSb [1]. Предполагается, что введение ферромагнитных слоев в подобные структуры позволит расширить область применения таких светоизлучающих диодов благодаря появлению циркулярной поляризации излучения. Данная работа посвящена исследованию возможности использования в качестве магнитного материала δ -легированного марганцем слоя GaAs. При этом основное внимание было уделено изучению электрических, оптических и магнитотранспортных свойств структур с двухслойными квантовыми ямами, содержащих δ -слой Mn непосредственно в активной области. Ранее было показано, что одиночные δ -легированные марганцем слои GaAs, выращенные сочетанием методов МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) и лазерного осаждения, обладают ферромагнитными свойствами при температурах $T \lesssim 30\text{--}40\text{ К}$ [2]. Расположение такого δ -слоя Mn вблизи активной области светоизлучающего диода с квантовой ямой InGaAs/GaAs применяется для создания структур, генерирующих циркулярно-поляризованное электролюминесцентное излучение [3,4].

2. Методика изготовления и исследования структур

Исследуемые структуры с двухслойными квантовыми ямами были изготовлены на подложках n^+ -GaAs (001) и i -GaAs (001) в едином ростовом цикле. Вначале методом МОС-гидридной эпитаксии при температуре $T_g = 650^\circ\text{С}$ был выращен буферный слой GaAs толщиной $\sim 0.18\text{ мкм}$, затем при $T_g = 560^\circ\text{С}$ формировались слои квантовых ям GaAs $_{1-x}$ Sb $_x$ (шириной 7 нм, $x \approx 0.15\text{--}0.17$) и In $_y$ Ga $_{1-y}$ As (шириной d_{InGaAs} , $y \approx 0.1\text{--}0.12$). Далее T_g понижалась до 400°С и посредством лазерного распыления мишеней Mn и GaAs формировались δ -слой с содержанием Mn (Q_{Mn}) $0.25\text{--}0.3$ монослоя (МС), что соответствует концентрации примеси $\sim 1.9 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$, и покровный слой GaAs толщиной $14\text{--}20\text{ нм}$ [5]. В таблице приведены основные технологические параметры структур и электрофизические характеристики структур, изготовленных на пластинах i -GaAs.

Исследования магнитотранспортных свойств структур, изготовленных на подложках i -GaAs, были проведены с использованием криостата замкнутого цикла в температурном диапазоне от 10 до 300 К. Величина магнитного поля варьировалась от 0 до $\pm 3\ 500\text{ Э}$.

Излучательные свойства структур изучались при температуре $T = 77\text{ К}$. Для возбуждения фотолуминесценции (ФЛ) использовался He-Ne-лазер (длина волны излучения $\lambda = 632.5\text{ нм}$, мощность 30 мВт). Кроме того, фотолуминесцентные свойства структур исследовались в зависимости от мощности накачки твердотельного лазера ($\lambda = 532\text{ нм}$) при 10 К.

Изучение электролюминесценции было реализовано с использованием мезаструктур диаметром 500 мкм,

[¶] E-mail: vikhrova@nifti.unn.ru

Технологические параметры и электрические характеристики образцов структур, изготовленных на пластинах полуизолирующего GaAs

Номер структуры	d_{InGaAs} , нм	Q_{Mn} , МС	300 К		77 К	
			μ_{eff} , $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{c}$	p_s , 10^{13} cm^{-2}	μ_{eff} , $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{c}$	p_s , 10^{12} cm^{-2}
1	5	0.25	90	0.73	440	0.62
2	4	0.30	31	1.7	70	3.6
3	3	0.30	38	1.7	43	6.3
4	1.5	0.30	45	1.1	95	2

сформированных после напыления металла (Au) на поверхность структуры с применением фотолитографии и химического травления. Омический контакт к подложке n^+ -GaAs формировался электроискровым вжиганием оловянной фольги. Спектры электролюминесценции измерялись в режиме прямого смещения диодов. Температурные зависимости электролюминесценции (ЭЛ) исследовались в диапазоне от 10 до 300 К. Измерения циркулярной поляризации электролюминесценции выполнены по стандартной схеме с использованием четвертьволновой пластины. Магнитополевые зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ исследовались в геометрии Фарадея (магнитное поле H перпендикулярно поверхности образцов). Значение степени циркулярной поляризации электролюминесценции оценивалось по формуле

$$P_{\text{EL}} = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-), \quad (1)$$

где $I_+(I_-)$ — интенсивности компонент с левой (правой) поляризацией, полученные путем интегрирования части спектра излучения, отвечающей пику, связанному с переходами в квантовой яме.

3. Экспериментальные результаты

Вначале представим результаты, полученные для структур с двухслойными квантовыми ямами, которые были выращены на пластинах полуизолирующего GaAs. Для всех структур наблюдается полупроводниковый характер температурных зависимостей сопротивления: с уменьшением температуры от комнатной до 10 К слоевое сопротивление монотонно растет. Знак эффекта Холла указывает на то, что основные носители заряда — дырки. Электрические параметры структур, рассчитанные из гальваномагнитных измерений, — слоевая концентрация дырок p_s , эффективная подвижность μ_{eff} — представлены в таблице.

Можно предположить, что существуют два основных канала проводимости: один по δ -слою марганца, другой в двухслойной квантовой яме InGaAs/GaAsSb. Значения, представленные в таблице, это эффективные величины, характеризующие проводимость по обоим каналам. Выделить проводимость по какому-либо одному из них достаточно сложно.

Расчеты зонной диаграммы и распределения носителей заряда в модельных одномерных структурах, выполненные с помощью программы 1D Poisson/Schrödinger [6] для двух значений толщин слоя InGaAs при температуре 77 К (рис. 1, *a, b*), показали, что с уменьшением толщины слоя InGaAs происходит перераспределение носителей между каналами проводимости, и большая часть дырок оказывается в квантовой яме GaAsSb.

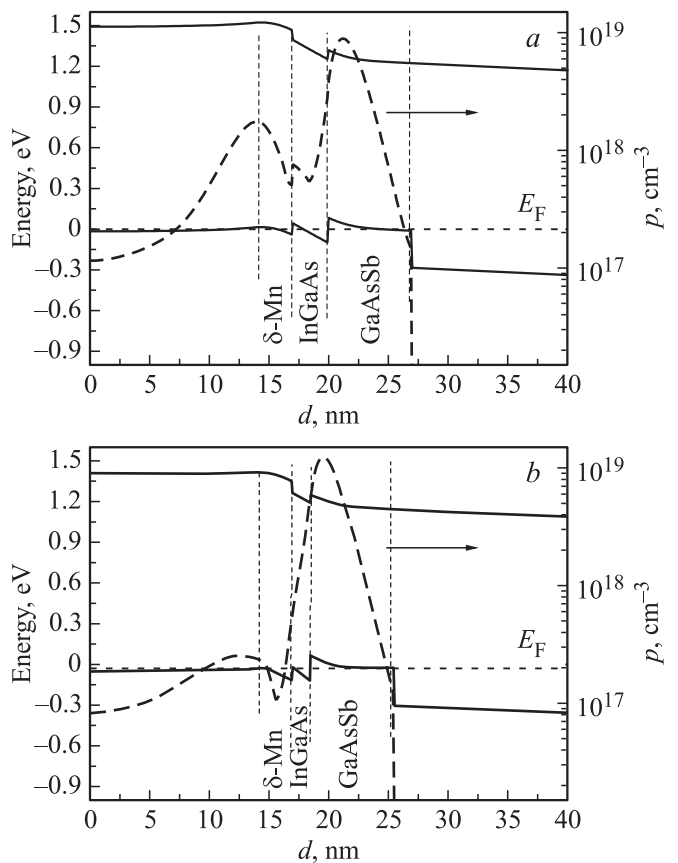


Рис. 1. Рассчитанные в одномерном приближении для температуры 77 К зонная диаграмма и распределение концентрации дырок (p) по толщине d в структурах с двухслойными квантовыми ямами: $d_{\text{InGaAs}} = 3$ (*a*) и 1.5 нм (*b*). E_F — уровень Ферми. При расчетах δ -слой Mn задавался как слой GaMnAs толщиной 3 нм с концентрацией дырок в соответствии с данными таблицы.

Изучение магнитотранспортных свойств структур показало, что для образцов с толщиной слоя InGaAs ≤ 5 нм при низких температурах наблюдаются нелинейные зависимости сопротивления Холла (R_H) от магнитного поля: аномальный эффект Холла с положительными нормальным и аномальным коэффициентами Холла. Аномалия в эффекте Холла и наблюдаемое также отрицательное магнетосопротивление (ОМС) указывают на ферромагнитное поведение структур. Ранее было показано, что даже одиночный (без КЯ) δ -легированный марганцем слой GaAs является ферромагнитным [7]. В исследуемых структурах оказалось, что и характер нелинейности зависимостей $R_H(H)$, и величина отрицательного магнетосопротивления зависят от толщины слоя InGaAs. Так, при $d_{\text{InGaAs}} = 5$ нм нелинейный вид зависимости $R_H(H)$ наблюдался только при температуре измерений 10 К, при этом величина ОМС составляла 2.5% в поле 3500 Э. При уменьшении толщины слоя InGaAs от 4 до 1.5 нм температура, при которой регистрировались нелинейные зависимости $R_H(H)$, увеличивалась до 30–35 К, а величина ОМС возрастала до 5%.

Подтверждающим фактом ферромагнетизма исследованных образцов служит наблюдение циркулярной поляризации электролюминесценции (P_{EL}) светоизлучающих диодов, изготовленных на основе структур на n^+ -GaAs (рис. 2). Вид зависимости степени циркулярной поляризации от H в целом подобен виду магнитопольевой зависимости $R_H(H)$ соответствующего образца, изготовленного на подложке i -GaAs, и обусловлен определяющей ролью намагниченности δ -слоя марганца в области слабых полей [8].

Результаты исследований фотолюминесценции структур с двухслойными квантовыми ямами, изготовленных на подложках полуизолирующего GaAs, представлены на рис. 3, *a*. Глубина проникновения возбуждающего фотолюминесценцию излучения (длина волны 632.5 нм) может быть оценена как величина, обратная

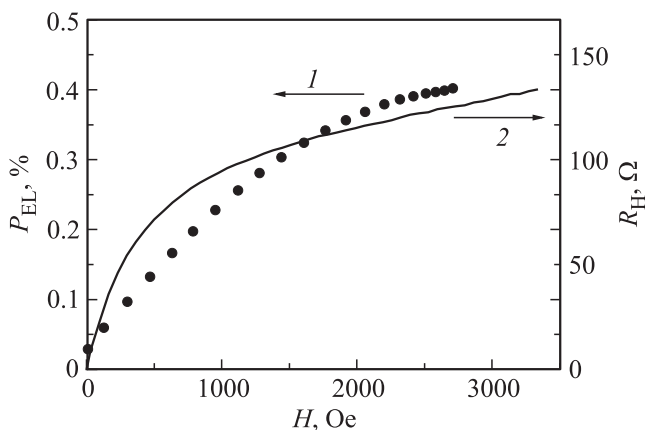


Рис. 2. Магнитопольевые зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции (1) и сопротивления Холла (2) для структур с $d_{\text{InGaAs}} = 3$ нм при 10 К.

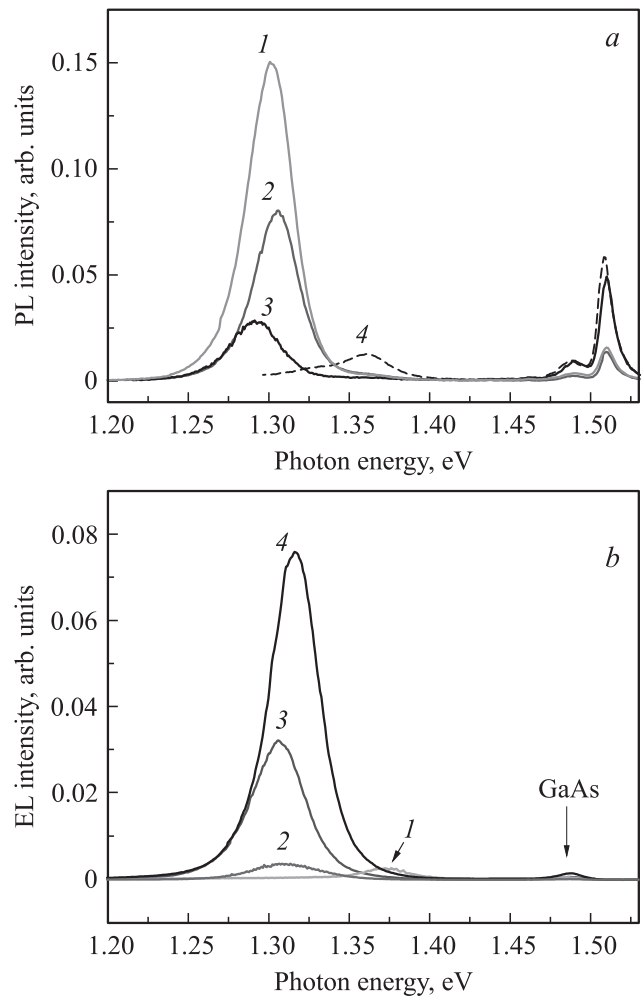


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции (PL) при 77 К (*a*) и электролюминесценции (EL) при 77 К, токе 20 мА (*b*) для структур с различной шириной КЯ InGaAs d_{InGaAs} , нм: 1 — 5, 2 — 4, 3 — 3, 4 — 1.5.

коэффициенту поглощения (коэффициент поглощения $\alpha \approx 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^{-1}$ согласно [9]). Эта величина в GaAs составляет ~ 260 нм. С учетом поглощения в низкотемпературном покровном слое GaAs и в КЯ глубину проникновения грубо можно оценить величиной ~ 200 нм. Следовательно, основная часть электронно-дырочных пар рождается в бездефектной области структур (в области буферного слоя GaAs), какая-то часть их там же и рекомбинирует, о чем свидетельствует наличие на рис. 3, *a* фотолюминесцентного пика при энергии кванта 1.508 эВ (энергия межзонных переходов в GaAs).

Другая часть носителей, благодаря диффузии, попадает в расположенную вблизи поверхности двухслойную квантовую яму и там участвует в процессах излучательной рекомбинации. Наблюдается значительное, на порядок величины, снижение сигнала фотолюминесценции квантовой ямы с уменьшением толщины слоя InGaAs от 5 до 1 нм.

Для объяснения этой зависимости следует рассмотреть, где в структуре могут находиться центры безызлучательной рекомбинации носителей. Во-первых, это слой низкотемпературного GaAs толщиной 14–20 нм. Во-вторых, это граница раздела $\langle \delta$ -слой Mn)/InGaAs. Ранее [10] были проведены электронно-микроскопические исследования на поперечном сечении структур, содержащих две квантовые ямы InGaAs, различающиеся толщиной и составом. На верхнюю границу ближайшей к поверхности КЯ (толщиной 5 нм) наносился δ -слой Mn, сформированный при тех же условиях, которые используются и для наших структур (температура, условия лазерного осаждения). Электронно-микроскопические изображения и полученное на поперечном сечении распределение примесей и компонентов по глубине структуры показали, что граница раздела $\langle \delta$ -слой Mn)/InGaAs является неровной и содержит дефекты кристаллической структуры, а марганец не проникает в глубь квантовой ямы дальше области сегрегации индия. Интенсивность фотолюминесценции такой КЯ существенно снижалась [10].

Вероятнее всего, снижение интенсивности ФЛ при уменьшении толщины слоя InGaAs связано с приближением области структуры, где носители безызлучательно рекомбинируют, к квантовой яме GaAsSb. В связи с этим вклад безызлучательной рекомбинации возрастает, что приводит к снижению интенсивности фотолюминесцентного излучения двухслойной квантовой ямы. Излучение ФЛ от области буферного слоя GaAs остается приблизительно на прежнем уровне.

Изменение интенсивности электролюминесцентного излучения структур с двухслойной квантовой ямой, изготовленных на подложках n^+ -GaAs, при уменьшении толщины слоя InGaAs и приближении δ -слоя Mn к металлургической границе раздела слоев InGaAs и GaAsSb имеет противоположный характер поведения по отношению к интенсивности фотолюминесценции. Наблюдается значительное возрастание сигнала электролюминесценции от активной области структур: в 30 раз при уменьшении толщины квантовой ямы InGaAs от 5 до 1 нм (рис. 3, *b*). Данный факт может быть связан с различием в областях генерации/рекомбинации электронно-дырочных пар в процессах электро- и фотолюминесценции. В случае электролюминесценции электронно-дырочные пары инжектируются непосредственно в область квантовой ямы. Источником дырок является δ -слой марганца, а электроны в активную область поставляются электрическим полем из буферного слоя. Как видно из представленных зонных диаграмм и рассчитанных распределений концентрации носителей заряда в структурах, основная часть дырок сосредоточена в области квантовой ямы GaAsSb, а с уменьшением толщины слоя InGaAs эта тенденция нарастает. Так, для толщины $d_{\text{InGaAs}} = 1.5$ нм дырки практически полностью локализованы в слое GaAsSb. Можно предположить, что процесс электролюминесценции (по сути ее интенсивность) определяется количеством дырок в квантовой

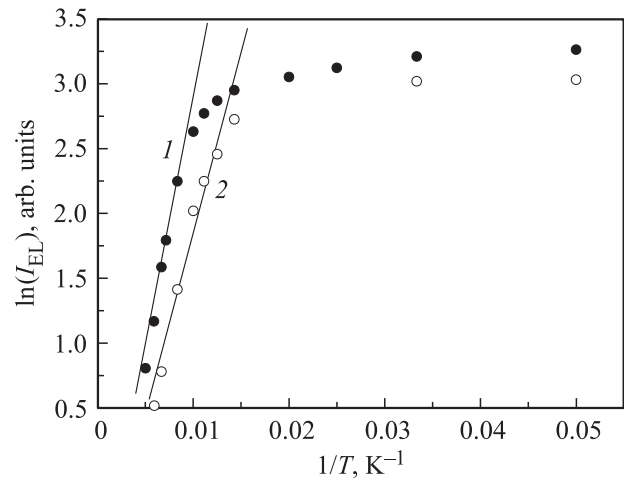


Рис. 4. Зависимость интегральной интенсивности электролюминесценции I_{EL} (ток 20 мА) от обратной температуры для структур с различной шириной КЯ InGaAs d_{InGaAs} , нм: 1 — 1.5, 2 — 3.

яме GaAsSb, которые могут излучательно рекомбинировать с электронами, находящимися в слое InGaAs (это непрямые в координатном пространстве переходы), и с электронами в слое GaAsSb (прямые переходы). Механизм существенного снижения роли безызлучательной рекомбинации на дефектах, обусловленных присутствием δ -слоя марганца и „низкотемпературного“ слоя GaAs, в процессе ЭЛ до конца не понятен. Можно предположить, что вероятность захвата носителей заряда на центры безызлучательной рекомбинации значительным образом снижается в присутствии внешнего электрического поля.

Исследование температурных зависимостей электролюминесценции образцов, аналогичных образцам 3 и 4 (см. таблицу), но изготовленных на n^+ -подложках GaAs, выявило наличие сигнала ЭЛ в диапазоне температур от 10 до 200 К. Зависимости интегральной интенсивности излучения ЭЛ (I_{EL}) от обратной температуры представлены на рис. 4. Видно, что процесс гашения сигнала при увеличении температуры от $T = 80$ –100 К носит активационный характер. Определенные из зависимостей значения энергии активации (E_a) составляют для образца 3 с толщиной квантовой ямы InGaAs, равной 3 нм, $E_a = 32$ мэВ, а для образца 4 с $d_{\text{InGaAs}} = 1.5$ нм $E_a = 38$ мэВ. Отметим несколько меньшие значения энергии активации (17 мэВ) гашения фотолюминесценции на высокотемпературном участке для образца 2. Немного отличающиеся значения энергии активации (23 мэВ) получены в [11] из температурной зависимости фотолюминесценции структур с квантовой ямой GaAsSb/GaAs. Здесь отмечено, что указанное значение энергии активации связано с энергетическим распределением локализованных состояний (с флуктуациями потенциала квантовой ямы). Флуктуации имеют „ростовое“ происхождение, а состояния становятся термически

активированными при температурах выше 100 К [11]. Значение ширины распределения локализованных состояний ~ 16 мэВ получено в [12] для квантовых ям GaAsSb/GaAs, причем это значение увеличивалось с повышением температуры выращивания активной области КЯ до ~ 30 мэВ при $T_g = 507^\circ\text{C}$. Заметим, что в нашем технологическом процессе $T_g = 560^\circ\text{C}$.

В целом наблюдаемое излучение структур (фото- и электролюминесценция) может формироваться за счет вклада трех переходов: прямые переходы в слоях InGaAs, GaAsSb и непрямой в координатном пространстве переход между зоной проводимости квантовой ямы InGaAs и валентной зоной квантовой ямы GaAsSb. Представленные выше результаты моделирования зонных диаграмм (рис. 1, *a, b*) выявили значительное влияние δ -слоя акцепторной примеси (Mn), расположенного на внешней границе слоя InGaAs, на изгиб зон, распределение концентрации дырок в двухслойной квантовой яме и, как следствие, на вклад в излучение каждого из указанных оптических переходов. Кроме того, расчеты показывают возможность возрастания вклада непрямых переходов с уменьшением толщины слоя InGaAs (рис. 1, *b*) вследствие перераспределения дырок из δ -легированного марганцем слоя GaAs в валентную зону слоя GaAsSb. Данное предположение подтверждается экспериментальными результатами по исследованию зависимости фотолюминесцентных характеристик структур на подложках *i*-GaAs от мощности оптической накачки (P_W) при температуре $T = 10$ К. В частности, для образцов 2 и 3 (см. таблицу) при толщинах слоя InGaAs 4 и 3 нм было обнаружено характерное для непрямых переходов смещение пика ФЛ в область больших энергий, величина которого зависит от мощности возбуждающего излучения, а именно: $P_W^{1/3}$ [13]. Для структуры 1 с $d_{\text{InGaAs}} = 5$ нм преобладали прямые в координатном пространстве переходы (положение пика ФЛ КЯ не зависело от мощности накачки при ее изменении более чем на 2 порядка величины). Для структуры 4 ($d_{\text{InGaAs}} = 1.5$ нм) из-за низкой интенсивности ФЛ провести подобное исследование не представилось возможным.

4. Заключение

Представленные результаты исследований показали, что введение δ -слоя марганца в активную область (на границу раздела GaAs/InGaAs) структур с двухслойными квантовыми ямами InGaAs/GaAsSb/GaAs оказывает значительное влияние на их оптические и магнитотранспортные свойства. Наиболее ярко наличие такого легирования проявляется при уменьшении толщины слоя квантовой ямы InGaAs от 5 до 1.5 нм. При этом наблюдается целый ряд эффектов: изменение магнитотранспортных характеристик, противоположный характер поведения интенсивности фотолюминесцентного и электролюминесцентного излучения структур,

наличие циркулярной поляризации ЭЛ. Предполагается, что указанные эффекты могут быть обусловлены значительным влиянием δ -слоя акцепторной примеси (Mn) на зонную структуру и распределение концентрации дырок в двухслойной квантовой яме.

Работа выполнялась в рамках реализации государственного задания (проекты № 8.1054.2014/К и № 3.285.2014/К) Минобрнауки России, а также при поддержке РФФИ (грант № 15-02-07824_a) и стипендии президента (конкурс СП-2015).

Список литературы

- [1] M. Peter, K. Winkler, M. Maier, N. Herres, J. Wagner, D. Fekete, K.H. Bachem, D. Richards. *Appl. Phys. Lett.*, **67** (18), 2639 (1995).
- [2] О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, И.Л. Калентьева, А.В. Кудрин. *Письма ЖТФ*, **35** (14), 8 (2009).
- [3] С.В. Зайцев, М.В. Дорохин, А.С. Бричкин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, В.Д. Кулаковский. *Письма ЖЭТФ*, **90**, 730 (2009).
- [4] M.V. Dorokhin, Yu.A. Danilov, P.B. Demina, V.D. Kulakovskii, O.V. Vikhrova, S.V. Zaitsev, B.N. Zvonkov. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 245110 (2008).
- [5] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, В.В. Подольский, М.В. Сапожников. *Опт. журн.*, **75** (6), 56 (2008).
- [6] G. Snider. <http://www3.nd.edu/~gsnider>
- [7] А.В. Кудрин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов. *Письма ЖТФ*, **36** (11), 46 (2010).
- [8] И.Л. Калентьева, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин, П.А. Юнин. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **78** (1), 26 (2014).
- [9] В.И. Литовченко, А.М. Грехов, Д.В. Корбутяк, В.Г. Литовченко. *Оптические свойства полупроводников. Справочник* (Киев, Наук. думка, 1987).
- [10] А.И. Бобров, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, М.Н. Дроздов, Б.Н. Звонков, Н.В. Малехонова, Е.Д. Павлова. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **78** (1), 18 (2014).
- [11] M. Dinu, J.E. Cunningham, F. Quochi, J. Shah. *J. Appl. Phys.*, **94**, 1506 (2003).
- [12] Ю.Г. Садофьев, N. Samal, Б.А. Андреев, В.И. Гавриленко, С.В. Морозов, А.Г. Спиваков, А.Н. Яблонский. *ФТП*, **44**, 422 (2010).
- [13] N.N. Ledentsov, J. Böhrer, M. Beer, F. Heinrichsdorff, M. Grundmann, D. Bimberg, S.V. Ivanov, B.Ya. Meltser, S.V. Shaposhnikov, I.N. Yassievich, N.N. Faleev, P.S. Kor'ev, Zh.I. Alferov. *Phys. Rev. B*, **52**, 14058 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

Optical and magnetotransport properties of InGaAs/GaAsSb/GaAs structures doped with magnetic impurity

*I.L. Kalentyeva, B.N. Zvonkov, O.V. Vikhrova,
Yu.A. Danilov, P.B. Demina, M.V. Dorokhin,
A.V. Zdoroveishev*

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The structures InGaAs/GaAsSb/GaAs with two-layer quantum wells containing magnetic impurity (Mn) δ -layer at the interface GaAs/InGaAs has been experimentally investigated at the first time. The heterostructures were fabricated by MOCVD and laser deposition techniques on conductive substrates (n^+) and semi-insulating substrates GaAs in a single growth cycle. Fabricated samples had different InGaAs layer thickness which was varied from 1.5 to 5 nm. A significant influence of reducing the thickness of the quantum well InGaAs on optical and magnetotransport properties of the studied structures was found. Nonlinear magnetic-field dependence of the Hall resistance and negative magnetoresistance at temperatures ≤ 30 –40 K, circular polarization of the electroluminescence in magnetic field, the opposite behavior of the intensities of photoluminescence and electroluminescence emission of the structures and increase of the contribution of indirect transitions are observed with decreasing InGaAs thickness. The band simulation shows that these effects may be due to the influence of δ -layer acceptor impurity (Mn) on the band structure and hole density distribution in the two-layer quantum well.