

09,05

## Излучающие гетероструктуры с двухслойной квантовой ямой InGaAs/GaAsSb/GaAs и ферромагнитным слоем GaMnAs

© О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, П.Б. Демина,  
М.В. Дорохин, И.Л. Калентьева, А.В. Кудрин

Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Россия  
E-mail: vikhrova@nifti.unn.ru

Исследованы излучательные и магнитные свойства гетероструктур нового типа с двухслойной квантовой ямой InGaAs/GaAsSb/GaAs и ферромагнитным слоем GaMnAs. Установлено наличие циркулярной поляризации электролюминесцентного излучения в диапазоне температур от 10 до 160 К. Магнитопольевые зависимости степени циркулярной поляризации являются нелинейными с петлей гистерезиса при температурах от 10 до 50 К, при более высоких температурах они становятся линейными. Величина поляризации при насыщении намагниченности GaMnAs в поле 2000 Ое сохраняется на уровне  $\sim 0.2\%$ .

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания (проект № 8.1751.2017/ПЧ Минобрнауки России) при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 15-02-07824\_a, 16-07-01102\_a, 17-37-80008\_мол\_эв\_a), стипендии (конкурс СП-2015) и гранта Президента Российской Федерации (№ МК-8221.2016.2).

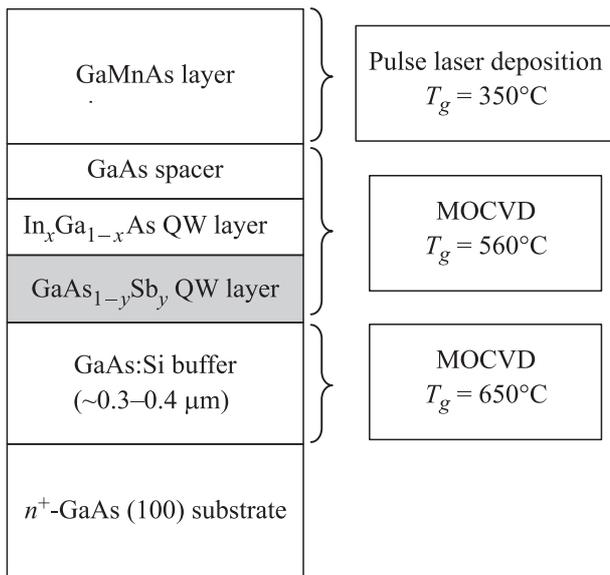
DOI: 10.21883/FTT.2017.11.45060.09k

### 1. Введение

Арсенид-галлиевые структуры с активной областью, представляющей собой двухслойную квантовую яму  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ , активно исследуются для разработки светодиодов с длиной волны излучения вблизи  $1.3\ \mu\text{m}$  (высокоскоростного канала волоконно-оптической связи) [1,2]. При определенных толщинах соответствующих напряженных слоев и содержании индия и сурьмы в них можно достичь высокой интенсивности фотолюминесцентного излучения на непрямых переходах между зоной проводимости слоя  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и валентной зоной слоя  $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  [1]. Кроме того, излучательные характеристики значительным образом зависят от совершенства гетерограницы  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  и порядка выращивания слоев. Ранее было исследовано влияние технологических параметров получения GaAs-гетероструктур с двухслойной квантовой ямой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  методом МОС-гидридной эпитаксии на их излучательные характеристики. С учетом анализа представленных в литературе данных по получению напряженных слоев  $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  и двухслойных квантовых ям  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$  [1–4] экспериментально были определены температурный диапазон ( $560\text{--}580^\circ\text{C}$ ) и соотношение потоков элементов V и III групп ( $\lesssim 1$ ) для процесса выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии слоя  $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  ( $0.1 \leq y \leq 0.25$ ) хорошего качества с целью создания двухслойной квантовой ямы [5,6]. Подтверждено, что, как и в случае молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [7,8], первоначально выращивание слоя твердого раствора  $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  способствует значительному возрастанию

интенсивности и увеличению длины волны фотолюминесцентного излучения гетеронаноструктур с двухслойной квантовой ямой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  [5].

В настоящей работе показано, что введение в структуру светодиодов с двухслойной ямой слоя ферромагнитного полупроводника GaMnAs в качестве инжектора спин-поляризованных носителей (формирование спинового светоизлучающего диода) может расширить область их применения за счет появления циркулярной поляризации излучения. Спиновые светоизлучающие диоды — диоды с циркулярно-поляризованным излучением — используются как источники циркулярно-поляризованного оптического излучения в оптоэлектронных схемах. Работа спинового светоизлучающего диода основана на одновременном и независимом варьировании как интенсивности электролюминесценции, так и степени циркулярной поляризации электролюминесцентного излучения. Это значит, что информация может передаваться одновременно и независимо как посредством интенсивности излучения, так и посредством степени его поляризации. Поэтому использование спиновых светоизлучающих диодов значительным образом может повысить плотность данных, передаваемых по оптическим каналам связи. Отличительной особенностью спинового светоизлучающего диода является наличие в нем ферромагнитного слоя (полупроводника или металла), который функционирует как инжектор спин-поляризованных носителей. Именно инжекция спин-поляризованных носителей обеспечивает циркулярно-поляризованную электролюминесценцию, а управление магнитными параметрами ферромагнитного слоя позволяет управлять степенью циркулярной поляризации.



**Рис. 1.** Схематическое изображение гетеронаноструктуры GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs<sub>1-y</sub>Sb<sub>y</sub>/GaAs с инжектирующим слоем ферромагнитного полупроводника GaMnAs.

## 2. Методика эксперимента

В данной работе исследовались диодные (*p-i-n*) гетероструктуры, содержащие двухслойную квантовую яму *n*-GaAs/GaAsSb/InGaAs и слой полупроводника GaMnAs *p*-типа проводимости. Образцы были получены сочетанием методов МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) и импульсного лазерного нанесения (ИЛН) в едином ростовом цикле [9]. На подложках *n*<sup>+</sup>-GaAs методом МОСГЭ выращивали: буферный слой *n*-GaAs, слои квантовой ямы GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> (*x* = 0.2), In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As (*y* = 0.2) и спейсер GaAs толщиной *d*<sub>s</sub> = 9–18 nm. Затем при 350°C методом импульсного лазерного нанесения формировали слой GaMnAs толщиной ~ 100 nm (отношение времен распыления мишеней Mn и GaAs составляло 0.15) и покровный слой GaAs толщиной ~ 14 nm. Схематическое изображение структур представлено на рис. 1, параметры структур показаны в таблице. Структура № 7975 является контрольной. Она изготовлена на подложке полуизолирующего GaAs, содержит буферный слой нелегированного GaAs (МОСГЭ) и слой GaMnAs, изготовленный в тех же технологических условиях, что и в случае диодных структур.

Исследовались спектры фото- (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ) изготовленных структур в зависимости от температуры измерений (от 10 до 300 К) и мощности оптической или электрической накачки. Для возбуждения фотолюминесценции использовали лазеры с длиной волны λ = 632.5 nm (мощность 30 mW) или λ = 532 nm (с варьированием мощности от 0.1 до 114 mW). Электролюминесценцию исследовали на изготовленных с

применением фотолитографии и химического травления меза-диодов (диаметр 500 μm) с металлическим (Au) омическим контактом к слою GaMnAs. Магнитопольные зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции (*P*<sub>EL</sub>) исследовали в геометрии Фарадея по стандартной схеме с использованием четвертьволновой пластины [10]. Измерение намагниченности производили при 300 К с использованием магнитометра с переменным градиентом магнитного поля.

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

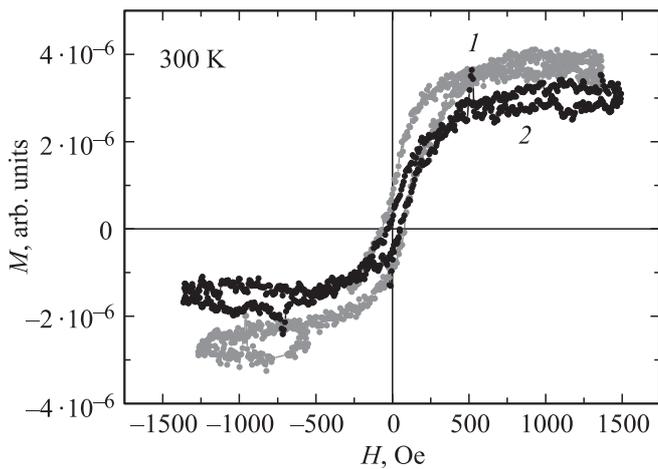
Из представленных в таблице данных видно, что содержание марганца (определяемое соотношением времен распыления лазерным излучением соответствующих мишеней) в инжекторном слое GaAs достаточно высокое и может составлять ~ 10 at.%. Ранее было показано, что указанный полупроводник является ферромагнитным и обладает температурой Кюри ~ 50–70 К по исследованиям магнитопольных зависимостей сопротивления Холла [11]. Наблюдался аномальный эффект Холла и отрицательное магнетосопротивление. Гальваномагнитные исследования тестового образца № 7975 в температурном диапазоне 10–300 К подтвердили этот факт. Слой GaMnAs также имеет включения второй фазы, сохраняющей ферромагнитные свойства вплоть до комнатной температуры. На это указывают измеренные нами магнитопольные зависимости намагниченности (рис. 2) и наличие петли гистерезиса на зависимости угла поворота плоскости поляризации от магнитного поля, полученной в процессе исследования магнитооптического эффекта Керра [11]. Включения второй фазы могут представлять собой полуметаллические кластеры MnAs и/или MnGa с температурой Кюри вблизи 315 К и свыше 600 К соответственно [12].

Изготовленные структуры имеют достаточно высокое структурное и оптическое качество, на что указывает сохранение излучательных свойств при температурах 160–220 К. Полученные спектры фотолюминесценции образцов содержат пики, соответствующие переходам в

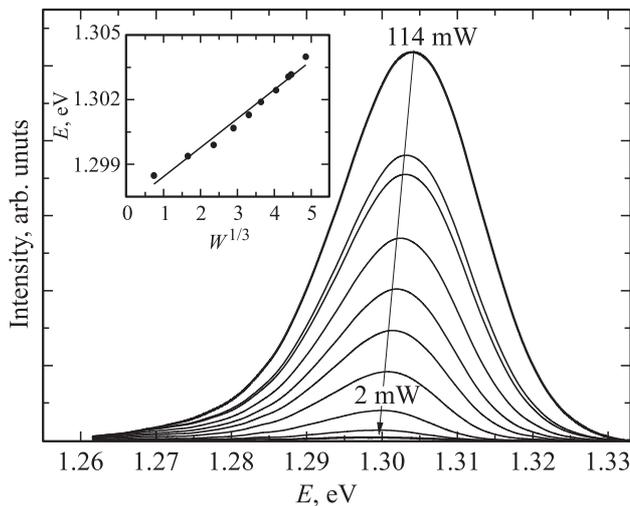
Технологические параметры серии гетеронаноструктур GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs<sub>1-y</sub>Sb<sub>y</sub>/GaAs (*x* ≈ 0.2, *y* ≈ 0.2) с инжектирующим слоем GaMnAs, изготовленных на пластинах *n*<sup>+</sup>-GaAs (100)

№ структуры	<i>h</i> <sub>GaAsSb</sub> , nm	<i>h</i> <sub>InGaAs</sub> , nm	<i>Y</i> <sub>Mn</sub>	<i>d</i> <sub>s</sub> , nm	<i>T</i> <sub>g</sub> (QW), °C	<i>h</i> <sub>cap</sub> , nm
7969	8	6	0.13	18	560	10–12
7971	8	6	0.13	9	560	10–12
7975	—	—	0.13	—	—	10–12

Примечание. *Y*<sub>Mn</sub> = *t*<sub>Mn</sub> / (*t*<sub>Mn</sub> + *t*<sub>GaAs</sub>), где *t*<sub>Mn</sub> и *t*<sub>GaAs</sub> — времена распыления мишеней марганца и арсенида галлия. Структура № 7975 изготовлена на подложке полуизолирующего GaAs и содержит буферный слой нелегированного GaAs и слой GaMnAs толщиной ~ 100 nm.



**Рис. 2.** Магнитолевая зависимость намагниченности структур при 300 К. Толщина спейсерного слоя  $d_s = 9$  (1), 18 nm (2).



**Рис. 3.** Зависимость интенсивности фотолуминесценции при 10 К от мощности накачки лазерным излучением для структуры № 7969 с GaAs спейсером толщиной 18 nm между двухслойной квантовой ямой и слоем GaMnAs (см. таблицу).

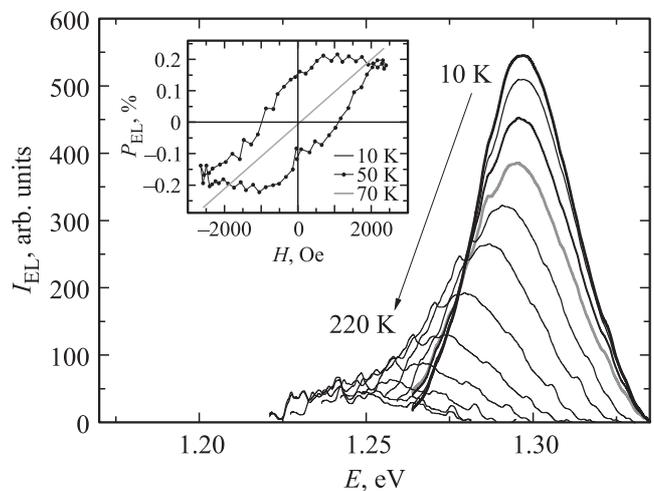
двухслойной квантовой яме вблизи энергии 1.29–1.3 eV при температуре 10 К. Зависимость энергии пика фотолуминесценции от мощности накачки  $E(W^{1/3})$  имеет линейный вид (рис. 3), что отвечает непрямому в координатном пространстве переходу между зоной проводимости слоя  $In_yGa_{1-y}As$  и валентной зоной слоя  $GaAs_{1-x}Sb_x$  и может указывать на формирование гетероперехода второго рода [13].

Уменьшение толщины спейсера GaAs между слоем GaMnAs и квантовой ямой с 18 до 9 nm приводит к значительному (на порядок) снижению интенсивности фотолуминесцентного излучения квантовой ямы. Данный эффект может быть обусловлен усилением вклада безызлучательной рекомбинации при приближении

к активной области структуры низкотемпературного слоя GaMnAs, который содержит такие дефекты, как атомы Mn в междоузлии и антиструктурные дефекты ( $As_{Ga}$ ) [14]. Кроме того, атомы Mn могут образовывать комплексы с указанными точечными дефектами [15]. Все вышеперечисленные дефекты могут оказывать влияние на процесс рекомбинации.

Исследование температурных зависимостей электролюминесценции образцов светодиодов, изготовленных на основе структур с двухслойными квантовыми ямами InGaAs/GaAsSb/GaAs и ферромагнитным инжектирующим слоем GaMnAs, выявило наличие излучения квантовой ямы в диапазоне температур 10–220 К (рис. 4). Зависимости интегральной интенсивности электролюминесценции для обоих образцов носят активационный характер. Энергия активации ( $E_a$ ) составляет  $\sim 90$  meV в случае образца со спейсерным слоем GaAs толщиной 18 nm и уменьшается до 35 meV для структуры с  $d_s = 9$  nm. Объяснение понижения  $E_a$  логично связать с „приближением“ к активной области светодиода каналов безызлучательной рекомбинации, связанных с точечными дефектами и их комплексами, возникающими в слое GaMnAs вследствие низкой температуры выращивания и легирования марганцем значительно выше предела его растворимости  $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  [16].

Исследования магнитолевых зависимостей циркулярной поляризации электролюминесценции показали, что при температуре измерений 10 К величина  $P_{EL}$  выходит на насыщение в поле  $\sim 2000$  Oe, где достигает 0.2%. Такой вид зависимости  $P_{EL}$  с петлей гистерезиса и насыщением указывает на преимущественную спиновую поляризацию носителей в активной области, связанную с наличием ферромагнитных свойств у исследуемых структур. Нелинейная зависимость  $P_{EL}$  наблюдается вплоть до температуры 50 К, интерпретируемой как температура Кюри инжектора GaMnAs (вставка на



**Рис. 4.** Влияние температуры измерения на спектры ЭЛ диода на основе структуры с  $d_s = 9$  nm при токе  $I = 30$  mA. На вставке приведены магнитолевые зависимости  $P_{EL}$ .

рис. 4). Далее вплоть до  $\sim 160$  К зависимость  $P_{EL}(H)$  является линейной, а величина  $P_{EL}$  в поле 2000 Ое сохраняется на уровне  $\sim 0.2\%$ . Выше 160 К вследствие низкой интенсивности электролюминесценции погрешность измерений становится сопоставимой с величиной степени циркулярной поляризации.

#### 4. Заключение

Таким образом, впервые экспериментально исследованы светоизлучающие гетероструктуры нового типа с двухслойными квантовыми ямами InGaAs/GaAsSb/GaAs и ферромагнитным слоем GaMnAs, сформированным методом низкотемпературного импульсного лазерного нанесения. Структуры имеют достаточно высокое оптическое и кристаллическое качество и демонстрируют циркулярно-поляризованное электролюминесцентное излучение с сохранением степени циркулярной поляризации 0.2% в диапазоне температур 10–160 К.

#### Список литературы

- [1] M. Peter, K. Winkler, M. Maier, N. Herres, J. Wagner, D. Fekete, K.H. Bachem, D. Richards. *Appl. Phys. Lett.* **67**, 2639 (1995).
- [2] M. Pristovsek, M. Zorn, U. Zeimer, M. Weyers. *J. Cryst. Growth* **276**, 347 (2005).
- [3] C.T. Wan, Y.K. Su, R.W. Chuang, C.Y. Huang, Y.S. Wang, W.C. Chen, H.C. Yu. *J. Cryst. Growth* **310**, 4854 (2008).
- [4] Y.K. Su, C.T. Wan, R.W. Chuang, C.Y. Huang, W.C. Chen, Y.S. Wang, H.C. Yu. *J. Cryst. Growth* **310**, 4850 (2008).
- [5] Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, О.В. Вихрова, Н.В. Дикарева. *ФТП* **47**, 1231 (2013).
- [6] Н.В. Дикарева, О.В. Вихрова, Б.Н. Звонков, Н.В. Малехонова, С.М. Некоркин, А.В. Пирогов, Д.А. Павлов. *ФТП* **49**, 11 (2015).
- [7] Z.C. Niu, X.H. Xu, H.Q. Ni, Y.Q. Xu, Z.H. He, Q. Han, R.H. Wu. *J. Cryst. Growth* **278**, 558 (2005).
- [8] J.F. Klem, O. Blum, S.R. Kurtz, I.J. Fritz, K.D. Choquette. *J. Vac. Sci. Technol. B* **18**, 1605 (2000).
- [9] B.N. Zvonkov, O.V. Vikhrova, Yu.A. Danilov, P.B. Demina, M.V. Dorokhin, V.V. Podol'skii, E.S. Demidov, Yu.N. Drozdov, M.V. Sapozhnikov. *J. Opt. Technol.* **75**, 389 (2008).
- [10] M. Holub, P. Bhattacharya. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, R179 (2007).
- [11] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Кудрин, М.В. Сапожников. *ФТТ* **52**, 2124 (2010).
- [12] M. Tanaka. *Mat. Sci. Eng. B* **31**, 117 (1995).
- [13] О.В. Вихрова, М.В. Дорохин, П.Б. Дёмина, Б.Н. Звонков, А.В. Здравейцев, Ю.А. Данилов, И.Л. Калентьева. *Письма в ЖТФ* **40**, 20, 96 (2014).
- [14] М.Д. Вилисова, А.Е. Куницын, Л.Г. Лаврентьева, В.В. Преображенский, М.А. Путьято, Б.Р. Семягин, С.Е. Торопов, В.В. Чалдышев. *ФТП* **36**, 1025 (2002).
- [15] А.П. Горшков, И.А. Карпович, Е.Д. Павлова, И.Л. Калентьева. *ФТП* **46**, 194 (2012).
- [16] J.F. Xu, P.M. Thibado, C. Awo-Affouda, F. Ramos, V.P. LaBella. *J. Vac. Sci. Technol. B* **25**, 1476 (2007).