

06

Температурная стабильность фотолюминесценции в гетероструктурах с InGaAs/GaAs квантовой ямой и акцепторным дельта⟨Mn⟩-слоем в GaAs барьере

© М.В. Дорохин, Ю.А. Данилов, М.М. Прокофьева, А.Е. Шолина

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

Поступило в Редакцию 25 февраля 2010 г.

Исследованы температурные зависимости фотолюминесценции гетероструктур с InGaAs/GaAs квантовой ямой и близкорасположенным акцепторным дельта⟨Mn⟩-легированным слоем в GaAs барьере. Обнаружено повышение температурной стабильности и снижение температурного гашения в исследованных структурах по сравнению с контрольными структурами, не содержащими дельта-слоя. Повышение рабочей температуры объясняется появлением дополнительного потенциального барьера для электронов вследствие введения дельта-легированного акцепторного слоя в приповерхностный барьер.

Дельта-легирование полупроводников A^3B^5 атомами Mn успешно применяется для модифицирования их магнитных свойств [1]. Ранее [1–3] было показано, что сочетание легированного марганцем полупроводникового слоя и потенциальной ямы для дырок, расположенных на расстоянии 2–5 nm друг от друга, приводит к появлению ферромагнетизма в гетероструктуре. Так, в [2] для структур с InGaAs/GaAs квантовой ямой (КЯ) продемонстрировано ферромагнитное $s, p-d$ -обменное взаимодействие дырок КЯ с ионами Mn в близкорасположенном дельта-слое, приводившее к круговой поляризации люминесцентного излучения от КЯ. В [3] была показана возможность получения управляемой магнитным полем циркулярной поляризации электролюминесценции диодных структур с КЯ и дельта⟨Mn⟩-легированным слоем.

В приведенных выше работах было обнаружено, что излучательные свойства структур существенно зависят от температуры. Основными факторами, определяющими температурную зависимость интенсивности и циркулярной поляризации излучения диодов с InGaAs квантовой ямой, являются температурное гашение люминесценции КЯ и температура Кюри ферромагнитного дельта(Mn)-слоя. Известно, что в структурах с квантовой ямой доминирующим механизмом температурного гашения люминесценции является термический выброс носителей заряда [4,5]. Можно отметить, что в InGaAs/GaAs структурах, не содержащих никаких дополнительных слоев, гашение люминесценции наступает при температурах значительно ниже комнатной [4–6]. Для повышения рабочей температуры используются структуры с более глубокими потенциальными ямами для электронов и дырок.

В настоящей работе исследуется температурная зависимость фото- и электролюминесценции гетероструктур с InGaAs/GaAs квантовой ямой и дельта(Mn)-легированным слоем. Структуры для исследований были изготовлены с помощью трехступенчатого метода эпитаксиального выращивания. Буферный слой GaAs толщиной $0.5 \mu\text{m}$, легированный Si до концентрации $n \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, и 3-нм слой нелегированного GaAs были выращены при температуре 650°C на подложке GaAs (001) методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении. Затем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ КЯ (ширина $d_{QW} = 10 \text{ nm}$) и тонкий ($d_s = 3 \text{ nm}$) спейсерный слой GaAs были выращены при 550°C . На следующей стадии дельта(Mn)-легированный слой и покровный слой полуизолирующего GaAs были выращены в том же реакторе при температуре 400°C посредством лазерного распыления Mn и GaAs мишеней соответственно. Толщина покровного GaAs составила 30 nm . Снижение температуры выращивания до 400°C позволило уменьшить диффузию Mn из дельта-слоя во время выращивания покровного GaAs. По нашим оценкам ширина распределения Mn не превысила 2 nm . Номинальная плотность примеси Mn в дельта-слое составила $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, концентрация электрически активной примеси достигала $1.7 \cdot 10^{13}$ при 300 K . Дополнительные детали технологии изготовления структур описаны в [2].

В работе варьировалось содержание индия в квантовых ямах ($x = 0.05–0.25$). Схематическое изображение исследованных структур показано на рис. 1. Легированные марганцем структуры обозначены как структуры М. Также были изготовлены контрольные структуры, не содержащие дельта-слоя. В этом случае квантовая яма была зарощена

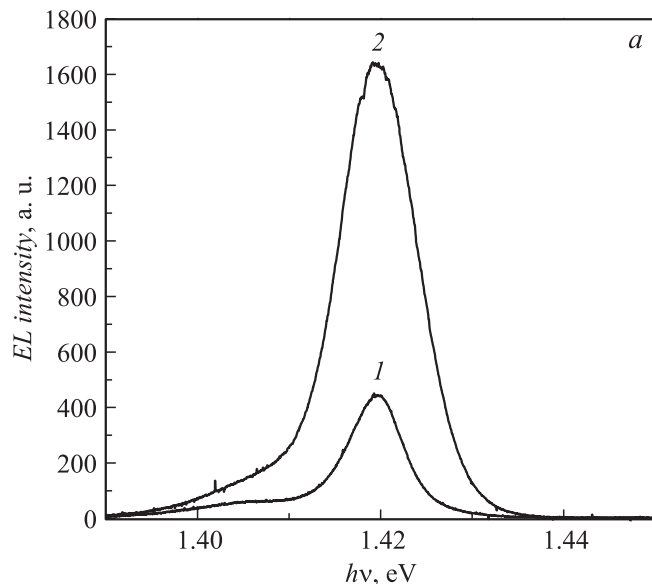


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции структуры с $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ квантовой ямой ($x = 0.11$) и дельта(Mn)-легированным слоем (1), а также контрольной структуры, не содержащей дельта-слоя (2), измеренные при температуре 30 К (а) и 110 К (б). На вставке изображена схема исследованной структуры.

высокотемпературным покровным слоем GaAs толщиной 40 nm (структуры А). Были проведены исследования фотолюминесценции (ФЛ) изготовленных структур в диапазоне температур 10–300 К. Измерения проводились с использованием гелиевого криостата замкнутого цикла. Люминесценция возбуждалась излучением He–Ne-лазера с длиной волны $0.63 \mu\text{m}$, мощностью 15 mW и диаметром пучка 1 mm. Излучение выводилось с лицевой стороны образца. Регистрация ФЛ излучения осуществлялась с помощью монохроматора и CCD детектора.

На рис. 1 приведены спектры фотолюминесценции структуры ($x = 0.11$) с дельта-слоем Mn и контрольной структуры, не содержащей дельта-слоя, измеренные при температуре 30 и 110 К. На спектрах видны пики при энергии кванта $\approx 1.42 \text{ eV}$, соответствующие излучательным переходам с основного состояния электрона на основное

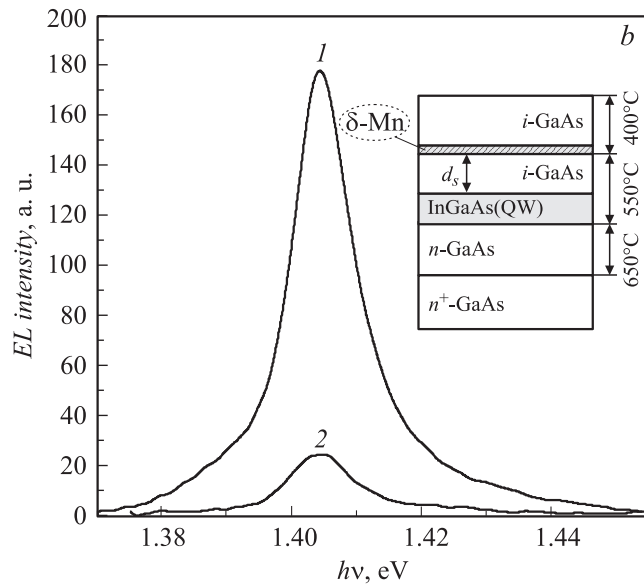


Рис. 1 (продолжение).

состояние тяжелой дырки в квантовой яме с указанным содержанием In [7]. При низкой температуре интенсивность линии КЯ в контрольной структуре существенно выше, чем в структуре с дельта(Mn)-слоем. При температуре 110 К интенсивности линии КЯ обеих структур снижаются, однако, в отличие от низких температур, для структуры М интенсивность ФЛ становится выше, чем для контрольной структуры А при одинаковых условиях возбуждения.

Зависимости интегральной интенсивности линии КЯ от температуры для структур М и А приведены на рис. 2. Для анализа температурной зависимости спектры приведены к одной интенсивности при низкой температуре. В области низких температур (рис. 2) интенсивность линий КЯ незначительно увеличивается с увеличением температуры, что может быть связано с увеличением коэффициента поглощения в GaAs [8] и соответственно с увеличением концентрации электрон-дырочных пар, генерируемых в области КЯ. При дальнейшем увеличении температуры наблюдается резкое снижение интенсивности ФЛ (рис. 3), связанное с

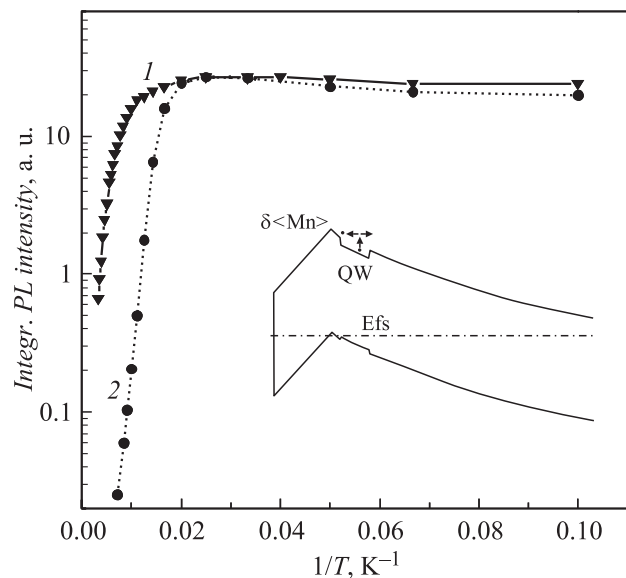


Рис. 2. Зависимость интегральной интенсивности ФЛ структуры с $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ квантовой ямой ($x = 0.11$) и дельта(Mn)-легированным слоем (1), а также контрольной структуры, не содержащей дельта-слоя (2), от температуры. На вставке изображена зонная диаграмма структуры.

термическим выбросом носителей из КЯ [4–6]. Для контрольных структур температура, при которой начинается резкий спад интенсивности ФЛ (температура гашения), зависит от ограничивающего потенциала в КЯ. Чем глубже КЯ, тем выше температура гашения, что согласуется с известными литературными данными [4–6]. В отличие от контрольных структур в структурах, содержащих дельта(Mn)-легированный слой вблизи квантовой ямы, температурное гашение значительно слабее зависит от глубины квантовой ямы. Так, в структурах М с содержанием $\text{In } x = 0.11$ интенсивность ФЛ падает на порядок относительно низкотемпературного значения при температуре 220 К, в контрольной структуре (без дельта-легирования) — при 80 К. Для содержания $\text{In } x = 0.25$ интенсивность ФЛ структуры М падает на порядок при комнатной температуре, в случае контрольной структуры — при 240 К.

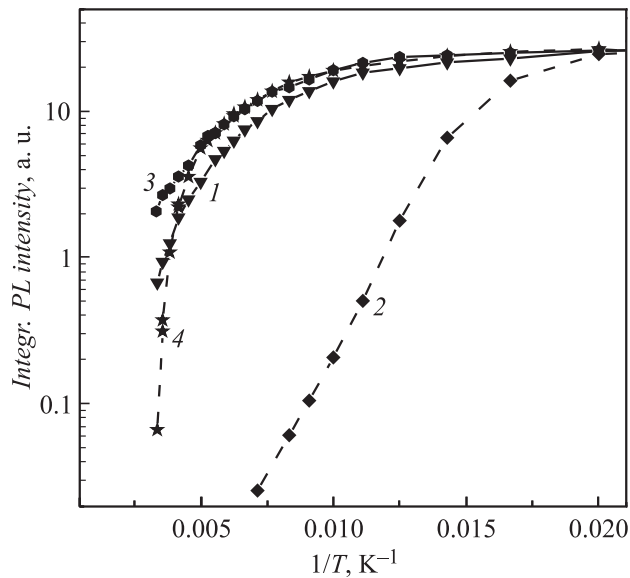


Рис. 3. Температурная зависимость интегральной интенсивности ФЛ структуры с $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ квантовой ямой и дельта(Mn)-легированным слоем (1 и 3), а также контрольных структур, не содержащих дельта-слоя (2 и 4), в области высоких температур. Содержание In в структуре $x = 0.11$ (кривые 1, 2) и $x = 0.25$ (кривые 3, 4).

При комнатной температуре сигнал ФЛ от квантовой ямы наблюдался в нашей измерительной системе только для структур М.

Отметим качественное отличие температурных зависимостей ФЛ структур с дельта(Mn)-легированным слоем и контрольных структур в области резкого спада интенсивности. В случае структур без дельта-слоя температурные зависимости хорошо спрямляются в координатах Аррениуса, а интенсивность пропорциональна

$$I = I_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура, E_a — энергия активации. Температурная зависимость ФЛ структур типа М в области

высоких температур может быть приблизительно описана формулой (1) лишь для квантовых ям со сравнительно небольшим содержанием In. В структурах с содержанием $\text{In } x > 0.11$ зависимость $\lg(I)(1/T)$ не спрямляется в диапазоне температур 10–300 К. В случае контрольных структур с содержанием $\text{In } x = 0.1, 0.15$ и 0.25 значения энергии активации составили 67, 102 и 250 meV соответственно. Полученные значения лежат в пределах $\Delta E/2 < E_a < \Delta E$, где ΔE — суммарная высота барьеров для электронов и дырок в квантовой яме, определяемая как разность между энергией межзонного излучения GaAs и энергией в максимуме интенсивности ФЛ КЯ. Это согласуется с известными литературными данными по квантовым ямам InGaAs/GaAs [4,5]. Для структуры М с содержанием $\text{In } x = 0.1$ получено несколько большее значение $E_a = 106$ meV.

Перейдем к обсуждению результатов. При низких температурах (< 50 К) термический выброс носителей из квантовых ям с используемыми в работе значениями содержания In практически отсутствует [4–6]. В этом случае интенсивность ФЛ определяется соотношениями скоростей излучательной и безызлучательной рекомбинации в КЯ. Как было показано ранее [9], для структур типа М скорость безызлучательной рекомбинации значительно выше, чем для контрольных за счет вероятности рекомбинации с участием примеси в близкорасположенном дельта-слое и на дефектах в низкотемпературном покровном слое GaAs. Таким образом можно объяснить гашение на порядок величины интенсивности ФЛ структур М по сравнению со структурами А при низких температурах. При повышении температуры (выше 50–150 К для разных x) существенное влияние на интенсивность ФЛ оказывает термический выброс носителей из квантовой ямы. По-видимому, в структурах, содержащих дельта(Mn)-легированный акцепторный слой вблизи КЯ, вероятность термического выброса значительно ниже, чем в контрольных при одной и той же номинальной глубине квантовой ямы. Предположительно, подобное различие связано с появлением в структурах М дополнительного ограничивающего потенциала для электронов [10], образуемого изгибом зон в области акцепторного дельта-слоя (вставка к рис. 2). При этом появляется вероятность отражения электронов, выброшенных из КЯ, от барьера, образованного дельта-слоем. Для отраженных электронов, в свою очередь, существует большая вероятность „сбросить“ энергию и попасть на уровни КЯ, что и приводит к снижению температурного гашения ФЛ. В контрольных

структурах выброшенные из КЯ электроны с высокой вероятностью диффундируют к поверхности, где основным каналом рекомбинации является безызлучательная рекомбинация через поверхностные состояния. Таким образом, можно предположить, что в структурах с дельта(Mn)-легированным слоем термический выброс электронов не является доминирующим механизмом температурного гашения ФЛ, поэтому температурные зависимости ФЛ не описываются формулой (1), за исключением структур с мелкой ямой ($x \leq 0.1$). Полученному результату можно привести в соответствие данные [6], согласно которым введение барьерных слоев AlGaAs эффективно предотвращает диффузию к поверхности носителей из InGaAs/GaAs квантовой ямы и позволяет увеличить интенсивность ФЛ при высоких температурах.

Термический выброс дырок из квантовой ямы, предположительно, не играет существенной роли в исследованных структурах, поскольку благодаря наличию акцепторного дельта(Mn)-слоя дырки в квантовой яме являются основными носителями, т.е. присутствуют и без возбуждения. Согласно результатам, полученным в [11] для структур, аналогичных исследуемым, но выращенных на полуизолирующей подложке GaAs, слоевая концентрация дырок составляет $3 \cdot 10^{11}$ и $1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ при 77 и 300 К соответственно.

Согласно предложенной качественной модели, повышения температурной стабильности можно ожидать при дельта-легировании области вблизи КЯ любым видом акцепторной примеси. В то же время легирование магнитными примесями, такими как Mn, представляет большой интерес в свете возможности применения структур с дельта(Mn)-легированным слоем для создания спиновых светоизлучающих диодов и получения магнитоуправляемой циркулярно поляризованной электролюминесценции [3].

Таким образом, были исследованы температурные зависимости фотолуминесценции гетероструктур с InGaAs/GaAs квантовой ямой и близкорасположенным дельта(Mn)-легированным слоем в GaAs барьере. Показана возможность повышения рабочих температур и уменьшения температурного гашения в исследованных структурах по сравнению с контрольными структурами, не содержащими дельта-слоя. Повышение рабочей температуры можно связать с появлением дополнительного потенциального барьера для электронов, образованного в результате изгиба зон в структуре из-за введения дельта-легированного слоя.

Авторы выражают глубокую признательность Б.Н. Звонкову за выращивание структур для исследований и А.В. Мурелю за полезное обсуждение результатов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 08-02-00548а и 08-02-97038 р_поволжье_а, 10-02-00739, АВЦП „Развитие научного потенциала высшей школы“ (проект № 2.2.2.2/4297) и CRDF (grant BR4M01).

Список литературы

- [1] *Nazmul A.M., Atemiya T., Shuto Y., Sugahara S., Tanaka M.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 017201.
- [2] *Dorokhin M.V., Danilov Yu.A., Demina P.B., Kulakovskii V.D., Vikhrova O.V., Zaitsev S.V., Zvonkov B.N.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 245110.
- [3] *Зайцев С.В., Дорохин М.В., Бричкин А.С., Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Звонков Б.Н., Кулаковский В.Д.* // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. В. 10. С. 730–735.
- [4] *Vening M., Dunstan D.J., Homewood K.P.* // Phys. Rev. B. 1993. V. 48. N 4. P. 2412–2417.
- [5] *Martini S., Quivy A.A., Tabata A., Leite J.R.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. N 5. P. 2280–2289.
- [6] *Bacher G., Hartmann C., Schweizer H., Held T., Mahler G., Nickel H.* // Phys. Rev. B. 1993. V. 47. N 15. P. 9545–9555.
- [7] *Дроздов Ю.Н., Алешкин В.Я., Гапонова Д.М., Данильцев В.М., Дроздов М.Н., Хрыкин О.И., Шашкин В.И.* // Нанофотоника. Материалы совещания. Нижний Новгород, 11–14 марта 2002 г. ИФМ РАН. С. 219–222.
- [8] *Оптические свойства полупроводников / Под ред. Р. Уиллардсона, А. Бира.* М.: Мир, 1970. С. 458–467.
- [9] *Němec H., Pashkin A., Kužel P., Khazan M., Schnüll S., Wilke I.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. N 3. P. 1303–1306.
- [10] *Шук А.Я.* // ФТП. 1992. Т. 26. В. 7. С. 1161–1181.
- [11] *Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Дорохин М.В., Звонков Б.Н., Калентьева И.Л., Кудрин А.В.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 14. С. 8–17.