

Электролюминесценция квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs с ферромагнитными инжекторами вида $(A^{III}, Mn)B^V$ и Ni

© М.М. Прокофьева[¶], М.В. Дорохин*, Ю.А. Данилов*, А.В. Кудрин*, О.В. Вихрова*

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

* Научно-исследовательский физико-технический институт

Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 8 апреля 2010 г. Принята к печати 20 апреля 2010 г.)

Проведено сравнительное исследование электролюминесцентных характеристик светоизлучающих диодов на основе гетероструктур с InGaAs/GaAs-квантовой ямой и инжекторным слоем, выполненным в виде ферромагнитного металла (Ni), полуметаллического соединения (MnSb) или магнитного полупроводника (InMnAs). Общей особенностью является гашение электролюминесценции при уменьшении толщины спейсерного слоя между квантовой ямой и магнитным инжектором. Обнаружено, что температурная зависимость электролюминесценции в диодах с Ni и MnSb обусловлена термическим выбросом носителей из квантовой ямы, а в диодах с InMnAs — температурной зависимостью концентрации носителей в магнитном полупроводнике, а также термическим выбросом носителей из квантовой ямы в области высоких температур.

1. Введение

Спиновая инжекция является одним из принципиальных явлений, используемых при построении приборов спинтроники. В структурах полупроводниковой спинтроники (в частности, в спиновых полевых транзисторах и спиновых светоизлучающих диодах — ССИД) используется инжекция спин-ориентированных электронов или дырок из ферромагнитного (ФМ) слоя в полупроводниковую квантово-размерную область. В квантово-размерной области происходит либо перенос носителей от инжектора-источка к детектору-стоку (в спиновом транзисторе), либо рекомбинация спин-ориентированных носителей с формированием циркулярно-поляризованного излучения (в ССИД). При этом инжектирующий слой может быть выполнен как в виде ферромагнитного металла (чаще всего это — Fe, Co, Ni или их сплавы), так и в виде магнитного разбавленного полупроводника (МРП). В последнем случае речь главным образом идет о полупроводниках типа $A^{III}B^V$, сильно легированных марганцем. Степень спиновой поляризации потока носителей, достигающих квантово-размерной области полупроводниковой гетероструктуры, определяется рядом факторов: степенью спиновой поляризации носителей в ферромагнетике, коэффициентом спиновой инжекции через границу раздела „инжектирующий слой/полупроводник“, спиновой релаксацией в промежуточном (спейсерном) слое и др. Так, было установлено [1], что коэффициент спиновой инжекции электронов через границу раздела „ФМ металл/полупроводник“ обычно невысок из-за большой разницы в удельной проводимости слоя металла и полупроводника (проблема „рассогласования проводимости“). Усилия многих исследовательских групп направлены на повышение коэффициента спиновой инжекции,

для чего в виде инжектора предлагается использовать ферромагнитный полупроводник (GaMnAs) или магнитные полуметаллические соединения типа MnB^V [2,3]. В обоих этих случаях удается минимизировать проблему рассогласования проводимостей. Ряд вопросов, однако, остается недостаточно исследованным. Среди них: как влияет встраивание ферромагнитного слоя на излучательные характеристики светодиодов?

Чаще всего в качестве активной области ССИД используется квантовая яма GaAs в AlGaAs-барьере [4]. Это обусловлено резкостью гетерограницы GaAs/AlGaAs, а также возможностью формирования ненапряженных слоев любой толщины [4]. Однако выбор системы с AlGaAs-барьером не является единственным. Известны работы по инжекции спин-поляризованных носителей в квантовую яму InGaAs в барьере-GaAs [5]. В этом случае достижима 100%-я степень циркулярной поляризации электролюминесценции (ЭЛ), т.е. 100%-я эффективность передачи информации о состоянии спина в люминесценцию. Кроме того, для AlGaAs характерны более высокие температуры роста (для метода газовой эпитаксии из металлоорганических соединений [6]), чем для InGaAs [6], что делает технологию выращивания последнего более совместимой с технологией изготовления $A^{III}B^V:Mn$ -слоев, выращиваемых при низкой температуре [8].

Существует еще один вариант структуры спинового светоизлучающего диода, в котором активным (излучающим) слоем является квантовая яма InGaAs, а в качестве инжектора используется комбинация барьера Шоттки Au/GaAs и $\delta(Mn)$ -легированного слоя [9]. Использование δ -легирования атомами Mn в структурах InGaAs/GaAs [9] позволяет пространственно разделить носители заряда в КЯ и ионы Mn в GaAs. В подобных гетероструктурах объемное перекрытие спиновых волновых функций магнитных ионов и свободных носителей

[¶] E-mail: marinaprkvfa@rambler.ru

может контролироваться электрически и детектироваться оптическими методами. Однако недостатком таких структур является низкая температура Кюри, поэтому есть смысл сравнительного рассмотрения других материалов ферромагнитных инжекторов с точки зрения повышения температуры Кюри и соответственно рабочей температуры диода.

В настоящей работе приведены результаты исследований электролюминесценции (ЭЛ) структур спиновых светоизлучающих диодов с InGaAs/GaAs-квантовой ямой и различными видами гетеропереходов ферромагнетик/полупроводник: InMnAs/GaAs, MnSb/GaAs, а также образцов с ферромагнитным металлическим инжектором Ni (Co). Получение интенсивной ЭЛ является одним из необходимых условий успешного функционирования спиновых светоизлучающих диодов.

2. Методика изготовления структур

На рис. 1, *a* приведена схема исследованных структур. Светоизлучающие структуры были выращены на подложках n^+ -GaAs (100) методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении (МОСГЭ). Сначала выращивался буферный слой n -GaAs толщиной 0.7 мкм с концентрацией электронов $(1-5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Температура процесса составляла 650°C. После буферного слоя при той же температуре 650°C выращивалась квантовая яма $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с содержанием индия $x = 0.15-0.25$ толщиной $d = 10$ нм и тонкий (10–100 нм) спейсерный слой GaAs. На поверхность структур наносился ферромагнитный слой. Исследовались три типа ферромагнитных инжекторов:

— слой ферромагнитного металла (Ni), который наносился на поверхность структур при комнатной температуре методом термического испарения в вакууме. В этом случае структуры после эпитаксиального процесса выносились из реактора и подвергались кратковременному воздействию атмосферы;

— слой полуметаллического соединения MnSb, нанесенный в том же МОСГЭ реакторе при температуре 400°C методом поочередного распыления Mn- и Sb-мишеней импульсным Nd:YAG-лазером;

— слой магнитного полупроводника InMnAs, который наносился также в МОСГЭ реакторе при температуре 320°C путем поочередного лазерного распыления Mn- и InAs-мишеней. Содержание Mn в этом случае определялось соотношением времен распыления Mn и InAs.

Формирование диодов завершалось нанесением на поверхность тонкого (20 нм) Au-контакта методом термического испарения в вакууме. Верхний Au-контакт наносился для предотвращения окисления магнитных слоев. На последней стадии методами фотолитографии и травления формировались меза-структуры диаметром 500 мкм. Базовый омический контакт формировался искровым вжиганием Sn-фольги.

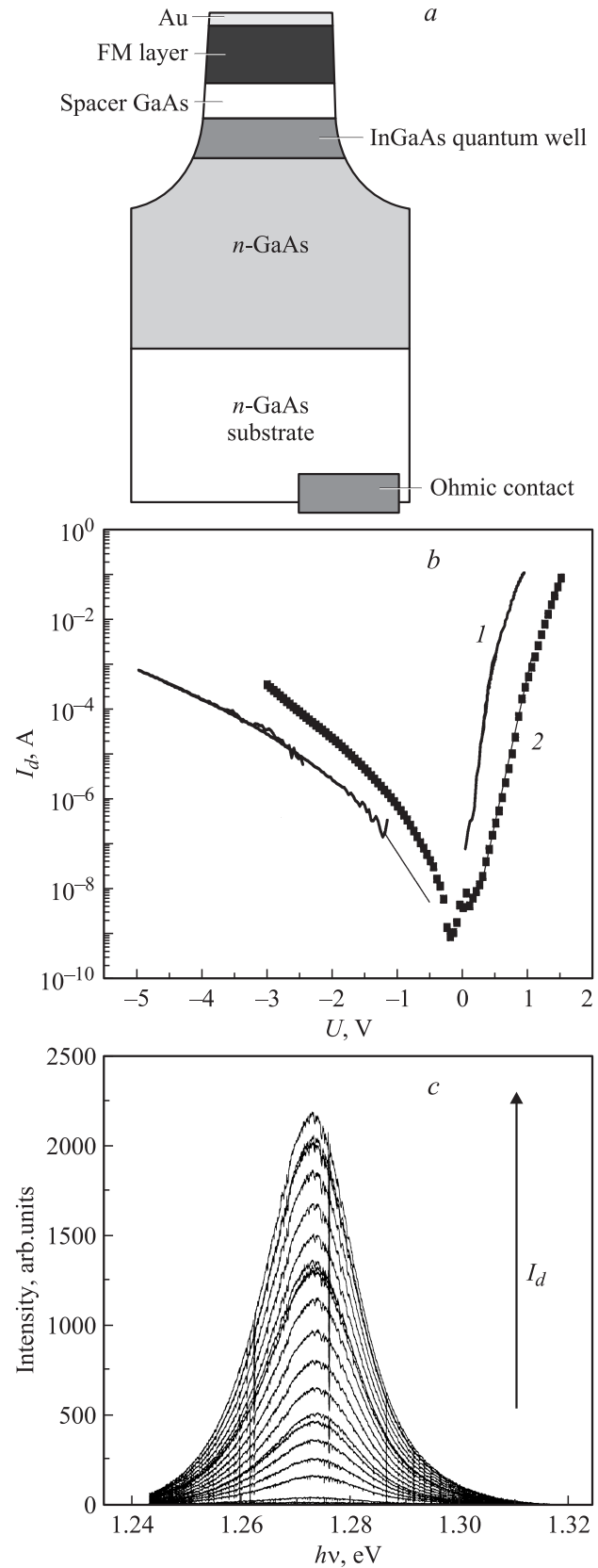


Рис. 1. *a* — общая схема структур; *b* — вольт-амперные характеристики структур: 1 — с Ni-инжектором, 2 — с MnSb-инжектором; *c* — спектры электролюминесценции структур с MnSb-инжектором, измеренные в диапазоне токов 5–100 мА. Температура измерений составляет 77 К.

3. Экспериментальная часть

В работе проведены исследования электрoluminesценции изготовленных диодов. Получение интенсивной ЭЛ является одним из необходимых условий работы спиновых светоизлучающих диодов, кроме того, электрoluminesцентные свойства позволяют судить о состоянии границы раздела ФМ слой/полупроводник.

При исследованиях ЭЛ на верхний контакт подавалось прямое смещение (положительный потенциал по отношению к базе). Излучение регистрировалось со стороны подложки. Температура измерений составляла 77 К.

На рис. 1, *b* приведена вольт-амперная характеристика исследованных структур с Ni (кривая 1) и MnSb (кривая 2). Характеристики имеют диодный вид. По прямой ветви характеристик были рассчитаны значения коэффициентов неидеальности (n) исследованных диодов. Для диода с Ni-инжектором значение коэффициента неидеальности составило 1.15, что свидетельствует о применимости модели термоэлектронной эмиссии [10] к диоду Шоттки с контактом Ni/GaAs. Для диода с MnSb-инжектором значение n составило 2.5, что, видимо, свидетельствует о существенном вкладе в прямой ток процессов рекомбинации в обедненном слое.

На рис. 1, *c* приведены типичные спектры электрoluminesценции (ЭЛ) исследованных структур. На спектрах наблюдается пик с энергией кванта 1.273 эВ, связанный с излучательным переходом в квантовой яме. Линия излучения КЯ доминирует во всех спектрах исследованных структур. Интенсивность указанной линии монотонно возрастает с увеличением рабочего тока диода во всем диапазоне токов (5–100 мА). Механизмы электрoluminesценции диодов с контактом Ni/ n -GaAs были подробно описаны ранее в [11]: инжекция неосновных носителей (дырок) в указанных структурах в режиме прямого смещения осуществляется из металла, а инжекция основных носителей — из подложки n -GaAs. Для диодов с контактом MnSb и InMnAs инжекция дырок также осуществляется из ферромагнитных инжекторов, которые имеют дырочную проводимость.

В результате сравнения электрoluminesцентных и электрических характеристик структур было обнаружено, что эффективность электрoluminesценции диодов существенно зависит от параметров технологии их изготовления, в частности от толщины спейсерного слоя GaAs между ФМ инжектором и активной областью диода. На рис. 2 приведены зависимости интегральной интенсивности ЭЛ от толщины спейсерного слоя для структур, где в роли ФМ инжектора выступает слой Ni (кривая 1), MnSb (кривая 2) или слой InMnAs (кривая 3). Интегральные интенсивности были рассчитаны путем интегрирования полосы излучения КЯ. Видно, что во всех случаях уменьшения толщины спейсера между инжектором и активной областью ниже порогового значения (5–20 нм для разных структур) наблюдается резкое снижение интенсивности ЭЛ структур вплоть до полного гашения.

Зависимость интегральной интенсивности ЭЛ исследованных структур от температуры показана на рис. 3.

Для диодов с контактом Ni и MnSb вид зависимости интенсивности ЭЛ от температуры аналогичен типичным температурным зависимостям фотoluminesценции квантовой ямы. Известно [12], что для структур с КЯ снижение интенсивности люминесценции с ростом температуры обусловлено термическим выбросом носителей из КЯ. Можно предположить, что в исследованных диодах с контактом MnSb и Ni доминирующим фактором, определяющим температурную зависимость ЭЛ, является термический выброс. Эффективность слоя носителей из ФМ инжектора слабо зависит от температуры. Ситуация отличается для структур с контактом InMnAs. На зависимости интенсивности ЭЛ от температуры наблюдается спад в области низких (< 40 К) и высоких (> 120 К) температур. Немонотонному харак-

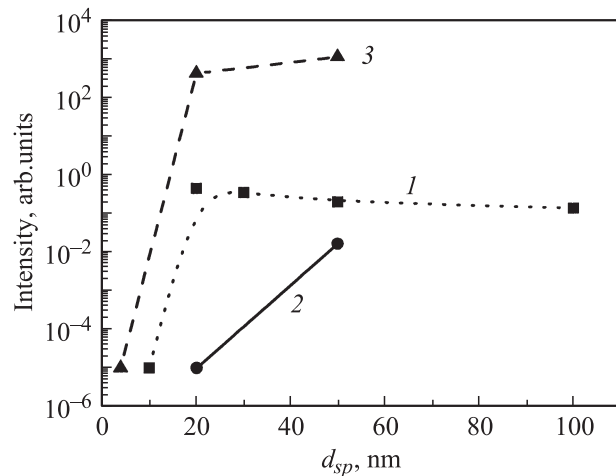


Рис. 2. Зависимости интегральной интенсивности электрoluminesценции диодов от толщины спейсерного слоя между ферромагнитным и квантово-размерным слоем для структур с различными инжекторами: 1 — Ni, 2 — MnSb, 3 — InMnAs. Температура измерений 77 К.

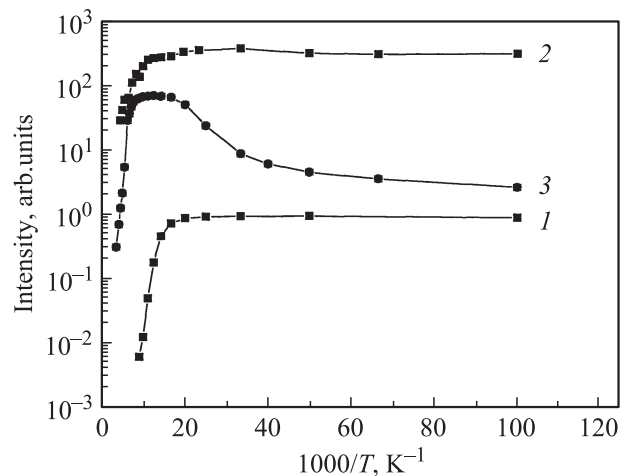


Рис. 3. Температурные зависимости интегральной интенсивности электрoluminesценции диодов для структур с различными инжекторами: 1 — Ni ($I_d = 10$ мА), 2 — MnSb ($I_d = 30$ мА), 3 — InMnAs ($I_d = 30$ мА).

теру температурной зависимости ЭЛ для структур этого типа (с InMnAs-инжектором) может быть предложено следующее объяснение. При понижении температуры наблюдается характерное для полупроводников, в частности для слоев InMnAs [13], уменьшение концентрации носителей. В частности, значения объемной концентрации дырок для слоев InMnAs, полученных по использованной нами технологии, составляют $7.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при температуре 75 К и $2.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при 10 К. При уменьшении объемной концентрации дырок с понижением температуры снижается эффективность инжекции носителей из ФМ слоя и интенсивность ЭЛ.

Для структур с инжектором Ni и InMnAs была рассчитана энергия активации гашения электролюминесценции в высокотемпературной области. Ее значение составило $60 \pm 20 \text{ мэВ}$ для Ni и MnSb и $130 \pm 20 \text{ мэВ}$ для InMnAs. Полученные значения энергии активации структур с инжектором Ni и MnSb лежат в пределах от $\Delta E/2$ до ΔE , где ΔE — суммарная глубина потенциальной ямы для электронов и дырок (которая определяется как разность межзонного перехода в GaAs и КЯ). Такие значения соответствуют энергии активации термического выброса носителей из КЯ. Следовательно, можно сделать предположение о том, что гашение ЭЛ в области высоких температур связано с термическим выбросом носителей из КЯ [12]. Более высокое значение энергии активации для диода с инжектором InMnAs может быть обусловлено тем, что помимо термического выброса, определяющего гашение ЭЛ, с ростом температуры имеет место увеличение концентрации дырок, которое может приводить к увеличению интенсивности ЭЛ.

4. Заключение

Таким образом, в работе показана возможность использования в качестве ферромагнитного инжектора в ССИД слоев двух новых материалов: InMnAs и MnSb. Во всех случаях была получена эффективная электролюминесценция диодных структур. Обнаружено, что электролюминесцентные свойства структур с инжекторами MnSb и Ni подобны. Использование инжектора InMnAs в светоизлучающих диодах ограничено снизу по температуре в связи с температурной зависимостью концентрации носителей в указанном материале. Для наиболее эффективного использования слоев указанных материалов в ССИД необходима оптимизация некоторых параметров структур, в частности толщины слоев.

Авторы работы выражают глубокую признательность Б.Н. Звонкову за изготовление образцов для исследований.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 07-02-00486, 08-02-97038 р_поволжье, 10-02-00739), CRDF (BP4M01), программы „Развитие научного потенциала высшей школы“ (РНП 2.2.2.2/4297) и программы фундаментальных исследований президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“.

Список литературы

- [1] *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation*, ed. by D.d. Awschalom, D. Loss, N. Samarth (Berlin–Heidelberg–N.Y., Springer Verlag, 2002).
- [2] T. Jungwirth, J. Sinova, J. Malek, J. Kuchera, A.H. MacDonald. *Rev. Mod. Phys.*, **87**, 809 (2006).
- [3] K.H. Ploog. *J. Cryst. Growth*, **268**, 329 (2004).
- [4] O.M.J. van't Erve, G. Kioseoglou, A.T. Hanbicki, C.H. Li, B.T. Jonker. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (7), 072 505 (2006).
- [5] Y. Ohno, D.K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno, D.D. Awschalom. *Nature*, **402**, 790 (2001).
- [6] A.P. Roth, M. Sacilotti, R.A. Masut, P.J. D'Arcy, B. Watt, G.I. Sproule, D.F. Mitchell. *Appl. Phys. Lett.*, **48** (21), 1452 (1986).
- [7] T. Nakanich. *J. Cryst. Growth*, **68**, 282 (1984).
- [8] Ю.В. Васильева, Ю.А. Данилов, Ант.А. Ершов, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова, А.Б. Давыдов, Б.А. Аронзон, С.В. Гуденко, В.В. Рыльков, А.Б. Грановский, Е.А. Ганьшина, Н.С. Перов, А.Н. Виноградов. *ФТП*, **39** (1), 87 (2005).
- [9] С.В. Зайцев, М.В. Дорохин, А.С. Бричкин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, В.Д. Кулаковский. *Письма ЖЭТФ*, **90** (10), 730 (2009).
- [10] Э.Х. Родерик. *Контакты металл–полупроводник* (М., Радио и связь, 1982).
- [11] Е.А. Ускова, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, П.Б. Демина, Е.И. Малышева, Е.А. Питиримова, Ф.З. Гильмутдинов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, вып. 2, 89 (2006).
- [12] Yu.A. Danilov, A.V. Kudrin, O.V. Vikhrova, B.N. Zvonkov, Yu.N. Drozdov, M.V. Sapozhnikov, S. Nicolodi, E.R. Zhitteytsev, N.M. Santos, M.C. Carmo, N.A. Sobolev. *J. Phys. D, Appl. Phys.*, **42**, 035 006 (2009).
- [13] G. Bacher, C. Hartmann, H. Schweizer, T. Held, G. Mahler, H. Nickel. *Phys. Rev. B*, **47** (15), 9545 (1993).

Редактор Л.В. Беляков

Electroluminescence of InGaAs/GaAs quantum-size heterostructures with $(A^{III}, Mn)B^V$ ferromagnetic injectors

M.M. Prokof'eva, M.V. Dorokhin*, Yu.A. Danilov*, A.V. Kudrin*, O.V. Vikhriva*

Nizhniy Novgorod State University,
603950 Nizhniy Novgorod, Russia

* Physical Technical Research Institute of NNSU,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract We report on the comparative investigation of electroluminescence characteristics of light-emitting diodes based on InGaAs/GaAs quantum well heterostructures and ferromagnetic emitter layer made of ferromagnetic metal (Ni), half metal compound (MnSb) or magnetic semiconductor InMnAs. The general tendency was found to be a electroluminescence quenching with the decrease of a spacer layer thickness between a quantum well and a magnetic emitter. It was found that the temperature dependence of electroluminescence for diodes with Ni and MnSb is dominated by carrier thermal escape from the quantum well, for diodes with InMnAs it is dominated by temperature dependence of carrier concentration in magnetic semiconductor at low temperatures and carrier thermal escape from the quantum well at high temperatures.