

06

## Светодиоды на основе гетероструктур InGaAs/GaAs с магнитоуправляемой электролюминесценцией

© А.В. Кудрин, М.В. Дорохин, Ю.А. Данилов, Е.И. Малышева

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

Поступило в Редакцию 14 июля 2011 г.

Сформирована и исследована *pin*-диодная структура с квантовой ямой InGaAs/GaAs, содержащая ферромагнитный слой GaMnAs в качестве полупроводника *p*-типа проводимости. Показано, что внешнее магнитное поле приводит к уменьшению (на  $\approx 5\%$  в магнитном поле 3600 Ое при 10 К) сопротивления слоя GaMnAs. В режиме источника напряжения изменение сопротивления приводит к увеличению интенсивности электролюминесценции светоизлучающего диода. Указанный эффект обусловлен ферромагнетизмом в GaMnAs и спадает до нуля при температуре, превышающей температуру Кюри ферромагнитного слоя.

Создание магнитоуправляемых источников света является актуальной задачей современной оптоэлектроники в течение последних 10 лет [1–3]. Традиционно данная задача решалась путем создания источников циркулярно-поляризованного излучения, знак и степень поляризации которых управляются внешним магнитным полем [1–4]. К недостаткам указанных структур можно отнести необходимость решения задачи детектирования циркулярной поляризации. Более простым является вариант создания магнитоуправляемого светоизлучающего диода (СИД), основанный на возможности управления интенсивностью электролюминесценции (ЭЛ) при приложении внешнего магнитного поля [5,6]. В цитируемых работах, по существу, речь идет о схемах невысокого уровня интеграции, объединяющих на подложке магнито-чувствительный элемент (магниторезистивный спиновый клапан [5] или трехслойную структуру со спиновым туннелированием [6]), усилитель сигнала (транзистор с высокой подвижностью электронов [5] или

транзистор с металлической базой [6]) и СИД. Приложенное внешнее магнитное поле изменяет параметры входа усилителя, что приводит к варьированию входного тока СИД и, следовательно, интенсивности оптического сигнала. Следует также отметить, что гетероструктуры в [5,6] сформированы методом молекулярно-лучевой эпитаксии, который требует дорогостоящего оборудования.

В данной работе в качестве магниточувствительного элемента используется слой ферромагнитного полупроводника GaMnAs, нанесенный эпитаксиально на поверхность полупроводниковой гетероструктуры с квантовой ямой GaAs/InGaAs. Все слои структуры были изготовлены в одном реакторе комбинированным методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭМОС) и лазерного распыления твердотельной мишени. Преимуществами изготовленных структур является их относительная простота по сравнению с [5,6], а также потенциальная возможность изучения эффектов спиновой инжекции из ферромагнитного GaMnAs в полупроводниковую структуру [7].

Структуры для исследований были изготовлены с помощью двухступенчатого метода эпитаксиального выращивания. Буферный слой GaAs толщиной  $0.5 \mu\text{m}$ , легированный Si до концентрации  $n \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$ , и слой нелегированного GaAs толщиной 3 nm, квантовая яма (КЯ)  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (ширина  $d_{QW} = 10 \text{nm}$ ) и спейсерный слой GaAs толщиной 30 nm были последовательно выращены при температуре  $650^\circ\text{C}$  на подложке *n*-GaAs (001) методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении. На следующей стадии методом лазерного распыления мишеней Mn и GaAs были выращены слой ферромагнитного полупроводника GaMnAs толщиной 3 и нелегированный слой GaAs толщиной 6 nm для предотвращения окисления ферромагнитного полупроводника. Температура выращивания составляла  $350^\circ\text{C}$ . Снижение температуры выращивания было необходимо для минимизации диффузии Mn из легированного слоя. Исследования структур методом вторично-ионной масс-спектрометрии не выявили сколько-нибудь значительной диффузии атомов Mn. Номинальная концентрация примеси Mn в легированном слое определялась соотношением времен распыления Mn и GaAs, которое для исследованных структур составило 1:8. Дополнительные детали технологии изготовления структур описаны в [8].

Для формирования диодной структуры на поверхность образцов методом термического испарения в вакууме наносился Au-контакт. Обратный омический контакт формировался искровым вжиганием Sn-

фольги. Таким образом, формировалась диодная  $pin$ -структура, в которой в качестве полупроводника  $p$ -типа выступал тонкий слой  $\text{GaMnAs}$ . Изготовление светоизлучающих диодов завершалось формированием меза-структур диаметром  $500\ \mu\text{m}$  с применением фотолитографии и травления. Также для сравнения результатов были изготовлены контрольные диоды, содержащие слой  $p^+$ - $\text{GaAs}$  :  $\text{C}$  вместо  $\text{GaMnAs}$  [9].

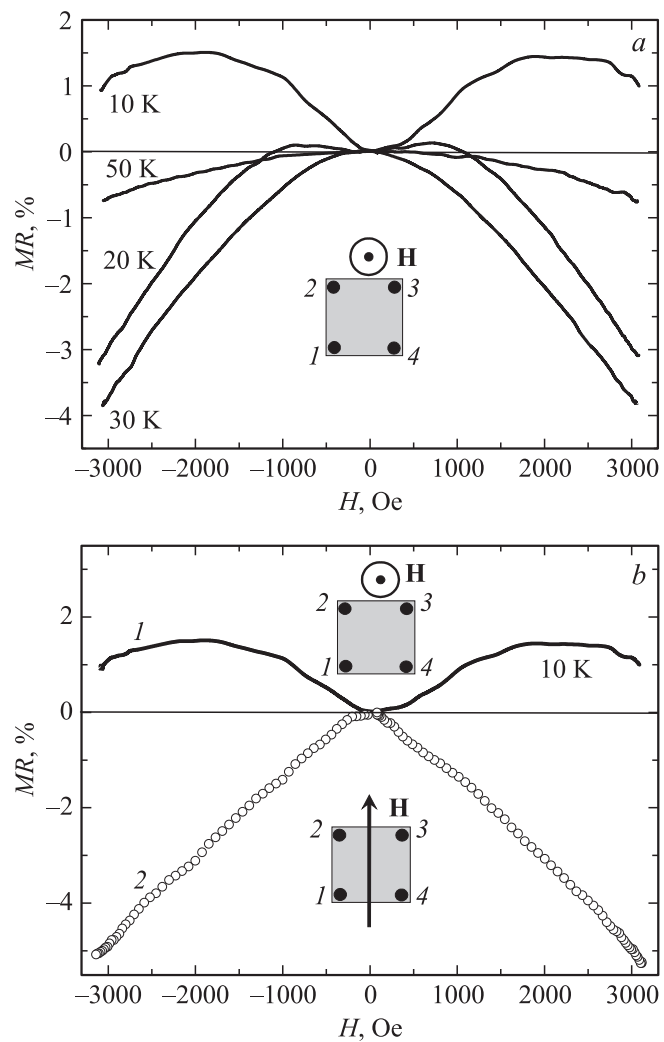
Проведены исследования магнитополевых зависимостей гальваномагнитных свойств (эффекта Холла и магнетосопротивления) и интенсивности электролюминесценции диода. Гальваномагнитные свойства были измерены в трех различных геометриях:

1) В геометриях  $A$  и  $B$  гальваномагнитные свойства измерялись при протекании тока в плоскости структуры. Вектор магнитного поля в геометрии  $A$  направлен перпендикулярно плоскости, а в геометрии  $B$  параллельно плоскости. В обоих случаях формирование меза-структуры не проводилось, а вместо  $\text{Au}$  контакта к поверхности образцов были изготовлены бездиффузионные омические контакты  $1-4$  в геометрии Ван-дер-Пау, как показано на вставках к рис. 1. Поскольку спейсерный слой  $\text{GaAs}$  толщиной  $30\ \text{nm}$ , разделяющий КЯ и слой  $\text{GaMnAs}$ , специально не легировался, его проводимость значительно ниже проводимости слоя  $\text{GaMnAs}$ . Это позволяет сделать вывод, что при исследовании эффекта Холла и магнетосопротивления тестовый ток (вставка к рис. 1) протекает преимущественно в слое  $\text{GaMnAs}$  и, следовательно, полученные магнитополевые зависимости сопротивления  $R_{34}$  и сопротивления Холла  $R_{13}$  определяются свойствами слоя  $\text{GaMnAs}$ .

2) В геометрии  $C$  исследовалось магнетосопротивление диодной меза-структуры, направление тока было перпендикулярно плоскости магнитного слоя аналогично режиму электролюминесценции (вставка к рис. 2). Направление магнитного поля совпадало с направлением тока.

Спектры электролюминесценции исследовались при прямом смещении диода (к  $\text{Au}$ - контакту приложен положительный относительно базы потенциал) в режиме источника напряжения. Диапазон напряжений, прикладываемых к диоду, составил  $1.5-1.53\ \text{V}$ . Диапазон температур измерений составил  $10-70\ \text{K}$ . При исследованиях ЭЛ образцы вводились в магнитное поле в геометрии  $C$ .

По результатам измерений гальваномагнитных свойств, проведенных для геометрии  $A$ , были рассчитаны электрические параметры слоя  $\text{GaMnAs}$  для температур  $300$  и  $77\ \text{K}$  (см. таблицу). Полученные значения удельного сопротивления, концентрации и подвижности



**Рис. 1.** Магнетосопротивление исследуемой структуры при протекании тока в плоскости слоя GaMnAs: *a* — магнетосопротивление при различных температурах в геометрии A; *b* — магнетосопротивление при 10 К в геометрии A (зависимость 1) и геометрии B (зависимость 2).

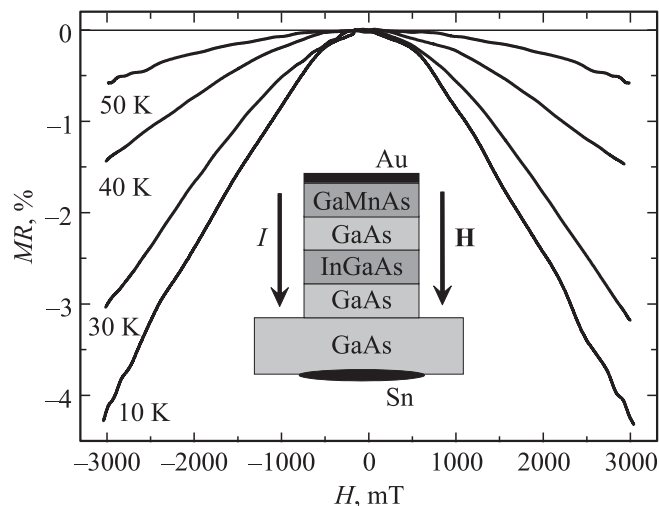
Электрические параметры слоя GaMnAs при 300 и 77 К

	300 К	77 К
$p, \text{cm}^{-3}$	$5 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{18}$
$\mu, \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	5	10
$\rho, \Omega \cdot \text{cm}$	0.025	0.21

носителей хорошо согласуются с соответствующими значениями для слоев GaMnAs, выращенных на полуизолирующих подложках методом лазерного распыления [10].

На рис. 1, *a* представлены зависимости магнетосопротивления структуры, измеренного в геометрии *A*. В диапазоне температур 10–70 К наблюдается эффект отрицательного магнетосопротивления (ОМС), т.е. уменьшение удельного сопротивления с увеличением величины магнитного поля. Эффект ОМС характерен для слоев GaMnAs и обычно связывается с уменьшением величины спин-зависимого рассеяния носителей тока в магнитном поле [11]. Отрицательное магнетосопротивление наблюдается при температурах порядка температуры Кюри и ниже. При температурах ниже 30 К на зависимостях сопротивления от магнитного поля в диапазоне полей до 2000 Ое присутствуют участки положительного магнетосопротивления (рис. 1), что является проявлением эффекта анизотропного магнетосопротивления. Последний связан с зависимостью сопротивления ферромагнетика от взаимной ориентации направления протекания тока и направления намагниченности [12]. Внешнее магнитное поле изменяет направление намагниченности (ориентирует вдоль магнитного поля), что изменяет величину спин-зависимого рассеяния носителей тока и может приводить к увеличению сопротивления. После намагничивания материала до насыщения ориентация намагниченности не меняется, и дальнейший ход магнетосопротивления определяется эффектом ОМС.

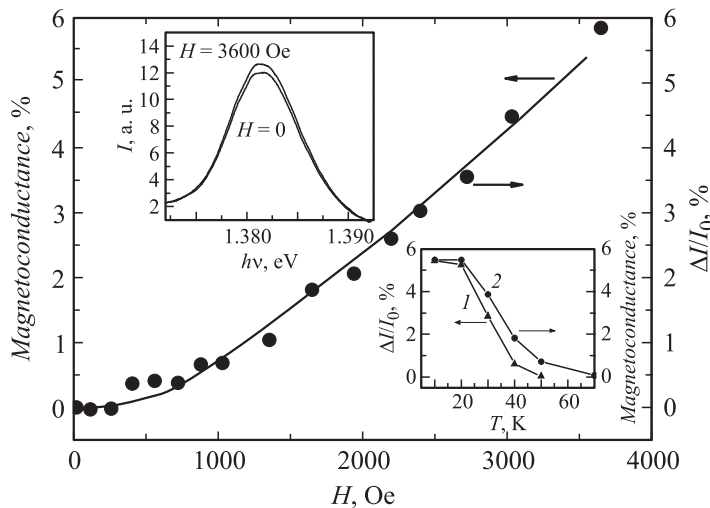
На рис. 1, *b* представлены зависимости магнетосопротивления при 10 К для случаев ориентации магнитного поля перпендикулярно плоскости структуры — геометрия *A* (зависимость 1) и в плоскости структуры — геометрия *B* (зависимость 2). В случае ориентации магнитного поля в плоскости структуры участки положительного магнетосопротивления отсутствуют; следовательно, в процессе намагничивания не происходит значительной переориентации направления намагниченно-



**Рис. 2.** Магнетосопротивление светоизлучающей меза-структуры при различных температурах (геометрия *C*). На вставке показано схематическое изображение меза-структуры, направление тока, протекающего в структуре, и ориентация внешнего магнитного поля.

сти структуры. Это позволяет сделать заключение о расположении оси легкого намагничивания преимущественно в плоскости слоя, что характерно для тонких слоев GaMnAs [11,12].

На рис. 2 представлены зависимости магнетосопротивления диодов при различных температурах, полученные в геометрии *C*. Изменение сопротивления определялось по изменению величины тока через меза-структуру во внешнем магнитном поле при постоянном напряжении на структуре. В диапазоне температур 10–70 К для меза-структуры наблюдается отрицательное магнетосопротивление. При 10 К уменьшение сопротивления структуры составляет  $\approx 5\%$  в магнитном поле 3600 Ое. Сопоставление зависимостей магнетосопротивления, полученных в разных геометриях, позволяет сделать вывод, что снижение сопротивления меза-структуры в магнитном поле определяется отрицательным магнетосопротивлением слоя GaMnAs. Отсутствие участков положительного магнетосопротивления в геометрии *C* связано с тем, что при намагничивании ферромагнитного слоя GaMnAs эффект переориентации



**Рис. 3.** Магнитопольевые зависимости проводимости в геометрии С (непрерывная линия) и интенсивности электролюминесценции (символы) меза-структуры при 10 К. На верхней вставке представлены спектры электролюминесценции при 10 К в нулевом магнитном поле и магнитном поле 3600 Ое. На нижней вставке представлены температурные зависимости величины изменения интенсивности электролюминесценции и магнетопроводимость меза-структуры в магнитном поле 3600 Ое.

намагниченности вдоль направления тока и ОМС действуют в одну сторону, в отличие от геометрии А.

С увеличением температуры наблюдается уменьшение величины отрицательного магнетосопротивления в случае протекания тока как в слое GaMnAs (рис. 1), так и поперек меза-структуры (рис. 2). Подобная температурная эволюция ОМС-характера для магнитных полупроводников связана с уменьшением проявления спин-зависимых эффектов в транспорте носителей тока при повышении температуры. Следует отметить, что температура Кюри слоев GaMnAs, полученных на *i*-GaAs (эквивалентных слою GaMnAs в рассматриваемой структуре), составляла порядка 50 К [10].

В режиме источника напряжения уменьшение сопротивления меза-структуры в магнитном поле приводит к увеличению тока диода, а ток

диода является основным параметром, определяющим интенсивность электролюминесценции [9]. Действительно, при введении диодов в магнитное поле величиной 3600 Ое интенсивность электролюминесценции возрастает примерно на 5% (верхняя вставка к рис. 3). Зависимость интенсивности электролюминесценции от величины магнитного поля качественно совпадает с магнитополевой зависимостью изменения проводимости структуры (рис. 3), что подтверждает определяющее влияние магнетосопротивления структуры на интенсивность ЭЛ. Отметим, что для контрольного образца, не содержащего ферромагнитного слоя, модуляции интенсивности ЭЛ не наблюдалось в исследованном диапазоне магнитных полей.

На нижней вставке к рис. 3 показаны температурные зависимости модуляции интенсивности электролюминесценции (кривая 1) и проводимости меза-структуры (кривая 2) в магнитном поле 3600 Ое относительно нулевого магнитного поля. Данные зависимости подобны: с повышением температуры наблюдается уменьшение модуляции интенсивности ЭЛ в магнитном поле, что сопровождается уменьшением величины магнетопроводимости. При температурах выше 70 К величина модуляции спадает до нуля. Численные различия в кривых 1 и 2 обусловлены нелинейной зависимостью интенсивности ЭЛ от плотности тока и от прикладываемого напряжения [9]. Модуляция интенсивности также нелинейно зависит от величины изменения сопротивления, причем конкретный вид зависимости отличается для разных температур.

Таким образом, в работе исследована диодная структура с квантовой ямой InGaAs/GaAs, содержащая ферромагнитный слой GaMnAs. Показано, что индуцированное внешним магнитным полем изменение сопротивления ферромагнитного слоя может приводить к увеличению интенсивности электролюминесценции светоизлучающего диода. Эффект обусловлен ферромагнетизмом в GaMnAs и спадает до нуля при температуре, равной или превышающей температуру Кюри указанного слоя. Величина модуляции интенсивности электролюминесценции (до  $\approx 5\%$  в магнитном поле 3600 Ое) не хуже значений, полученных в [5], и ниже, чем в [6], но сформированные нами приборные структуры гораздо проще в изготовлении и в топологическом решении. Возможна также оптимизация характеристик при соответствующем подборе толщины спейсерного слоя. Несомненным преимуществом использованной нами технологии формирования является доступность оборудования и его применимость для массового производства. Можно



полагать, что приборы подобного типа будут использоваться в качестве магнитных сенсоров с передачей информации по волоконно-оптическим линиям связи, дисплеев с визуализацией магнитного поля и элементов оптических схем.

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

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (10-02-00739, 11-02-00645), ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы, гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых Российских ученых (№ 16.120.11.5359-МК), АВЦП РНП ВШ 2.2.2.2/4297-11107 и 2.1.1/2833-12029, контракта 02.740.11.0672 с Министерством образования и науки.

## Список литературы

- [1] Holub M., Bhattacharya P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. R179–R203.
- [2] Concepts in spin electronics / Ed. S. Maekawa. N.Y., Oxford University Press, 2006.
- [3] Schmidt G. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. R107–R122.
- [4] Fiederlihg R., Grabs P., Ossau W., Schmidt G., Molenkamp L.W. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. N 13. P. 2160–2163.
- [5] Saha D., Basu D., Bhattacharya P. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 194104.
- [6] Appelbaum I., Russel K.J., Monsma D.J., Narayanamurti V., Marcus C., Hanson M.P., Gossard A.C. // Appl. Phys. Lett. 2003. V 83. P. 4571.
- [7] Young D.K., Gupta J.A., Johnston-Halperin E., Epstein R., Kato Y., Awschalom D.D. // Semicond. Sci. Tech. 2002. V. 17. P. 275–284.
- [8] Звонков Б.Н., Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Демидов Е.С., Демина П.Б., Дорохин М.В., Дроздов Ю.Н., Подольский В.В., Сапожников М.В. // Оптический журнал. 2008. Т. 75. В. 6. С. 56–61.
- [9] Дорохин М.В., Демина П.Б., Байдусь Н.В., Данилов Ю.А., Звонков Б.Н., Прокофьева М.М. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. В. 5. С. 34–39.
- [10] Звонков Б.Н., Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Дроздов Ю.Н., Кудрин А.В., Сапожников М.В. // ФТТ. 2010. Т. 52. В. 11. С. 2124–2127.
- [11] Matsukura F., Ohno H., Shen A., Sugawara Y. // Phys. Rev. B. 1998. V. 57. N 4. P. R237–R240.
- [12] Wang K.Y., Edmonds K.W., Campion R.P., Zhao L.X., Foxon C.T., Gallagher B.L. // Phys. Rev. B. 2005. V. 72. P. 085201-1–7.