

Светоизлучающие диоды с ферромагнитным инжектирующим слоем на основе гетероструктур GaMnSb/InGaAs/GaAs

© М.В. Дорохин[¶], Е.И. Малышева, А.В. Здорвейцев, Ю.А. Данилов, А.В. Кудрин

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 15 апреля 2012 г. Принята к печати 25 апреля 2012 г.)

Сформирована и исследована диодная структура с $p-n$ -переходом и InGaAs/GaAs-квантовой ямой в области пространственного заряда, содержащая ферромагнитный слой GaMnSb в качестве полупроводника p -типа. Показана возможность получения эффективной электролюминесценции исследованных структур. Обнаружено, что эффективность электролюминесценции зависит от условий формирования ферромагнитного слоя GaMnSb: содержания Mn и толщины слоя. Рассмотрены возможные механизмы электролюминесценции исследованных диодов. Получена циркулярная поляризация электролюминесценции указанных структур, значение степени поляризации (0.012 в магнитном поле 0.37 Тл) практически не изменяется в диапазоне температур 10–50 К. Циркулярная поляризация излучения обусловлена инжекцией в квантовую яму спин-поляризованных дырок из ферромагнитного слоя GaMnSb.

1. Введение

Создание и исследование спиновых светоизлучающих диодов (ССИД) с управляемыми магнитным полем параметрами излучения является актуальной задачей современной оптоэлектроники и спинтроники [1–3]. Ключевым элементом ССИД является слой ферромагнитного инжектора, который обеспечивает инжекцию ориентированных по спину носителей заряда в активную область светодиодной структуры. Рекомбинация ориентированных по спину носителей в активной области сопровождается испусканием циркулярно-поляризованного излучения, знак и степень которого управляются внешним магнитным полем [1–4]. К ферромагнитным инжекторам ССИД предъявляется ряд требований: обеспечение высокой интенсивности электролюминесценции (ЭЛ), совместимость с полупроводниковой структурой ССИД (например, минимизация дефектов на границе раздела инжектора с базой), высокая спиновая поляризация, высокое значение температуры Кюри.

Последние достижения в области ССИД связаны с применением эпитаксиальных ферромагнитных слоев, нанесенных на поверхность гетероструктур на основе GaAs [5–7]. Можно отметить работы по исследованию ССИД с контактами GaMnAs [5], MnAs [6], MnSb [7]. Высокое качество эпитаксиальных слоев позволяет получить достаточно эффективную электролюминесценцию. Основная проблема в технологии инжекторов такого типа — это сложность формирования качественных границ раздела. Основные виды ССИД были сформированы методом молекулярно-лучевой эпитаксии, при этом полученные в [5–7] значения степени циркулярной поляризации электролюминесценции сравнительно невелики. Одним из возможных путей решения названной проблемы является разработка новых материалов разбавленных магнитных полупроводников или полуметаллов с применением более простой и дешевой технологии.

В данной работе исследованы морфология поверхности, электролюминесцентные свойства светоизлучающих диодов на основе гетероструктур с квантовой ямой InGaAs/GaAs, содержащих слой ферромагнитного полупроводника GaMnSb, а также циркулярная поляризация фото- и электролюминесценции. Обсуждаются возможные механизмы электролюминесценции. Структуры выращены с применением комбинированной методики газофазной эпитаксии и лазерного распыления твердотельных мишеней [8]. Указанный материал инжектора, на наш взгляд, имеет значительные перспективы применения. Согласно ранее полученным результатам, преимуществами контактов GaMnSb являются возможности эпитаксиального выращивания на поверхности GaAs, а также наличие ферромагнитных свойств при комнатной температуре [9], что выгодно отличает указанные слои от GaMnAs [5].

2. Методика эксперимента

Структуры для исследований были изготовлены с помощью двухступенчатого метода эпитаксиального выращивания. Буферный слой GaAs толщиной 0.5 мкм, легированный Si до концентрации $n \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$, и слой в 3 нм нелегированного GaAs, квантовая яма (КЯ) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (ширина $d_{\text{QW}} = 10 \text{ нм}$, содержание In $x \approx 0.16$) и спейсерный слой 20–30 нм GaAs были последовательно выращены при температуре 600°C на подложке n -GaAs (001) методом газофазной эпитаксии при атмосферном давлении с использованием арсина и металлорганических соединений (ГФЭ МОС) в потоке водорода. На следующей стадии методом лазерного распыления мишеней Mn и GaSb при температуре 400°C были выращены слой GaMnSb и нелегированный 6 нм слой GaSb для предотвращения окисления ферромагнитного полупроводника. Снижение температуры выращивания было необходимо для минимизации

[¶] E-mail: dorokhin@nifti.unn.ru

Технологические и экспериментально определенные параметры исследованных структур

№ образца	Y_{Mn}	d_{GaMnSb} , нм	Толщина спейсерного слоя, нм	Относительная интенсивность ЭЛ* (ток диода, мА)	Диапазон рабочих токов, мА	Средняя высота неровностей, нм
1	0.09	< 10	30	0.9 (70)	5–70	2 ± 2
2	0.09	50	30	0.24 (70)	10–70	5 ± 2
3	0.2	30	20	0.5 (70)	10–70	4 ± 2
4	0.33	30	30	0.04 (70) 0.58 (700)	70–700	80 ± 2
5	0.33	50	20	0.0022 (100) 0.07 (1000)	100–1000	43 ± 2
6	0.33	50	30	0.003 (100) 1.15 (700)	100–700	60 ± 2
7	0.5	10	30	8.67 (50)	1–50	14 ± 2
8	0.5	50	50	0	–	115 ± 2

*Примечание. ЭЛ — электролюминесценция.

диффузии Mn из легированного слоя. Номинальная концентрация примеси Mn в легированном слое оценивалась по соотношению времен распыления компонентов ($Y_{Mn} = t_{Mn} / (t_{Mn} + t_{GaSb})$). Толщина слоя $Ga_{1-y}Mn_ySb$ (d_{GaMnSb}) составила 10, 30 и 50 нм, номинальное содержание Mn составило 0.09–0.5. Параметры структур (толщины слоев, содержание Mn) представлены в таблице. Структура слоя GaMnSb для аналогичных образцов была изучена методом рентгеновской дифракции в работе [9]. Схема исследованных структур показана на рис. 1.

Для формирования диодной структура на поверхность образцов наносился Au контакт методом термического испарения в вакууме. Базовый омический контакт к подложке GaAs формировали искровым вжиганием Sn

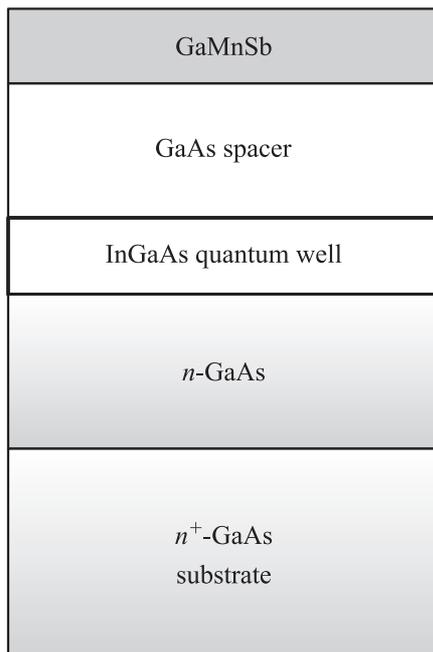


Рис. 1. Схематическое изображение исследованных структур.

фольги. Таким образом были получены диодные гетероструктуры, в которых в качестве полупроводника *p*-типа выступал тонкий слой GaMnSb. Изготовление светоизлучающих диодов завершалось формированием мезаструктур диаметром 500 мкм с применением фотолитографии и химического травления.

Для изучения свойств контактного слоя GaMnSb было проведено исследование морфологии поверхности полупроводниковых структур на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NT-MDT Solver Pro. На сформированных диодах были проведены исследования электролюминесценции (ЭЛ) при прямом смещении диодов (на GaMnSb подавался положительный относительно базы потенциал) при температуре 77 К. Для измерений циркулярной поляризации ЭЛ в интервале температур 10–120 К образцы помещали в вакуумную криосистему. Магнитополевые зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ исследовались при помещении образцов в магнитное поле электромагнита. Величина магнитного поля варьировалась в диапазоне 0–0.37 Тл. Значение степени поляризации оценивалось по формуле

$$P_{ЭЛ} = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-}, \quad (1)$$

где I_+ (I_-) — интенсивности компонент с левой (правой) поляризацией, полученные путем интегрирования полосы соответствующей части спектра излучения. Фотолюминесцентное излучение возбуждалось при облучении He–Ne-лазером поверхности образцов, не покрытых Au контактом; слой GaMnSb в указанном выше диапазоне толщин является полупрозрачным для лазерного излучения. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерялись при температурах 77 и 300 К.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Морфология поверхности

Обнаружено, что морфология поверхности исследованных структур существенно зависит от параметров вы-

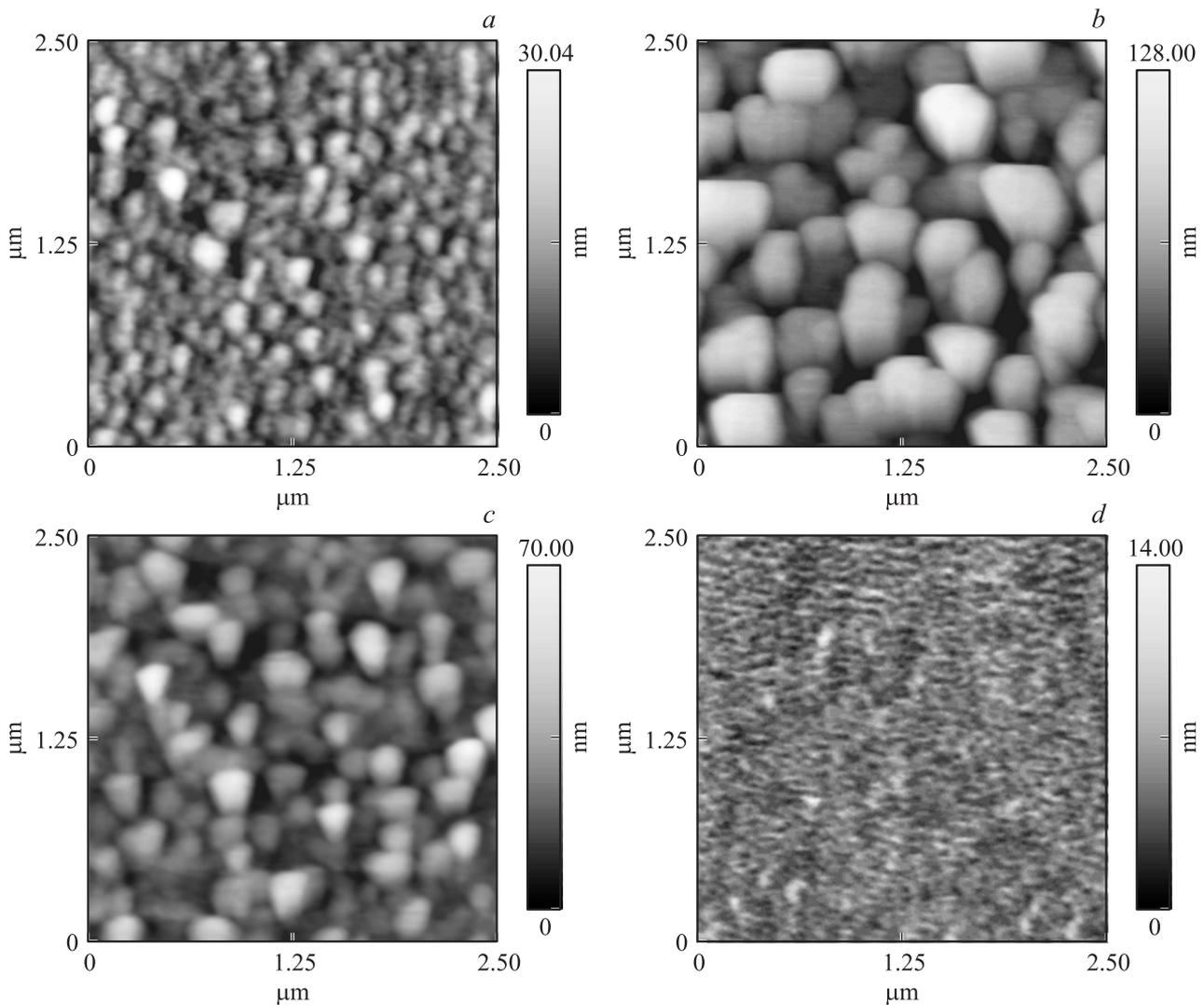


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности структур с квантовой ямой и покровным слоем GaMnSb; *a* — образец 7, *b* — образец 8, *c* — образец 4, *d* — образец 2 (параметры образцов приведены в таблице).

ращивания ферромагнитного слоя. На рис. 2 приведены АСМ-изображения, демонстрирующие характерные особенности поверхности структур. Параметры морфологии (средняя высота неровностей) для всех структур приведены в таблице. Основным фактором, определяющим морфологию поверхности, является содержание Mn. Для структур со сравнительно высоким содержанием Mn в ферромагнитном слое ($Y_{\text{Mn}} = 0.33-0.5$) характерна сильно неоднородная поверхность, на которой наблюдаются трехмерные объекты — кластеры (рис. 2, *a-c*). Характерные высоты неоднородностей достигают 115 нм. Отметим, что указанные значения более чем в 2 раза превышают номинальную толщину слоя GaMnSb. Уменьшение толщины GaMnSb сопровождается уменьшением размеров кластеров и „выравниванием“ поверхности. Для структур с низким содержанием Mn в GaMnSb ($Y_{\text{Mn}} = 0.09-0.2$), напротив, характерна сравнительно ровная поверхность (рис. 2, *d*; см. таблицу),

средняя высота неровностей на которой слабо зависит от толщины ферромагнитного слоя и составляет 2–5 нм.

3.2. Вольт-амперные характеристики и интенсивность электролюминесценции

Типичные вольт-амперные характеристики диодов на основе структур 3 и 7 показаны на рис. 3 (см. вставку). Отметим, что на всех диодах была получена выпрямляющая вольт-амперная характеристика, а значения обратных токов не превышали 10^{-9} А при напряжении до -2 В. Хотя ВАХ подобны для всех исследованных образцов, можно отметить, что для диодов на основе структур с высоким содержанием Mn ($Y_{\text{Mn}} = 0.5$) быстрый рост тока начинается при меньших значениях напряжения (0.09 ± 0.0015) В по сравнению с (0.12 ± 0.0015) В для остальных структур. Спектры электролюминесценции диодов 3 и 7, измеренные при температуре 77 К, по-

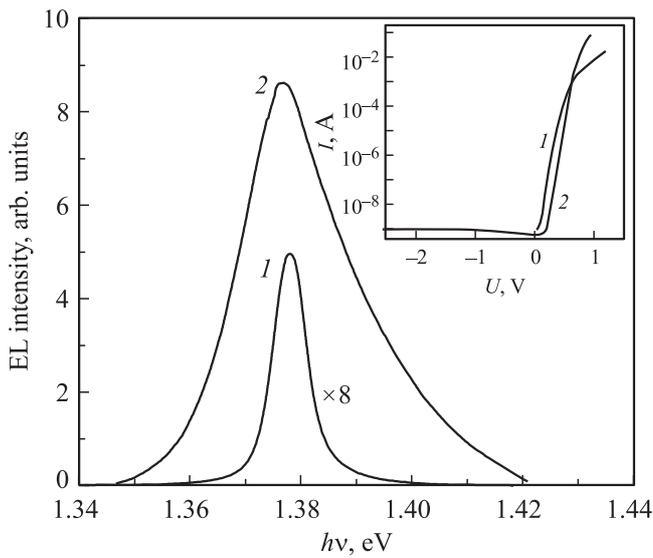


Рис. 3. Спектры электролюминесценции светоизлучающих диодов на основе структур 7 (кривая 1) и 3 (кривая 2), измеренные при температуре 77 К и токе диода 50 мА. На вставке показаны вольт-амперные характеристики структур 7 (кривая 1) и 3 (кривая 2), измеренные при 300 К (параметры образцов приведены в таблице). Значение обратного тока структуры 7 лежит ниже предела обнаружения.

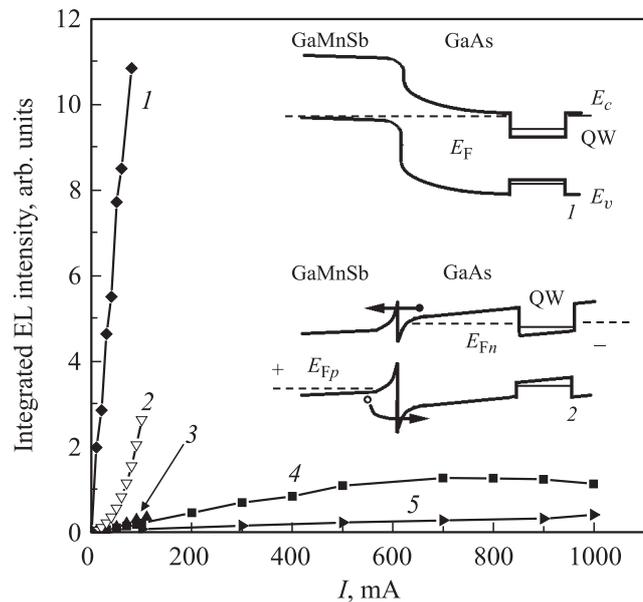


Рис. 4. Зависимости интенсивности электролюминесценции исследованных диодов от рабочего тока, измеренные при 77 К: 1 — образец 7, 2 — образец 1, 3 — образец 2, 4 — образец 4, 5 — образец 5. На вставках изображены зонные диаграммы контакта p -GaMnSb/ n -GaAs: 1 — в отсутствие электрического смещения, 2 — при прямом смещении.

казаны на рис. 3. Спектры остальных структур подобны, на рисунке они не приведены. На спектрах наблюдается линия при энергии 1.375 эВ, обусловленная излучательными переходами типа $e1 - hh1$ (между 1-м элек-

тронным уровнем и 1-м уровнем тяжелых дырок) в InGaAs квантовой яме с указанными выше параметрами $d_{QW} = 10$ нм и $x = 0.16$. Зависимости интенсивности ЭЛ от тока диода для исследованных структур показаны на рис. 4. Обнаружено, что электролюминесцентные свойства (интенсивность, токовая зависимость интенсивности) зависят от параметров ферромагнитного слоя GaMnSb.

Наиболее низкая интенсивность ЭЛ характерна для структур с высоким содержанием Mn ($X_{Mn} = 0.33 - 0.5$) и сравнительно толстым покровным слоем (более 30 нм — см. рис. 3). Отметим, что структурам с низкой интенсивностью электролюминесценции соответствует большое значение средней высоты неровностей (см. таблицу). Характерной особенностью указанных структур также является высокое значение пороговых токов: электролюминесцентное излучение в диодах на основе структур 5 и 6 было зарегистрировано при токах 100 мА, а интенсивность, превышающая на порядок уровень шумов, достигается при токе диода 500 и 300 мА соответственно. Увеличение интенсивности ЭЛ и снижение величины порогового тока достигается путем снижения толщины слоя GaMnSb или уменьшением содержания Mn. Так, снижение толщины ферромагнитного слоя до 10 нм позволяет получить высокую интенсивность ЭЛ даже в случае наибольшего содержания Mn. Уменьшение содержания Mn в 4 раза также позволяет сформировать диоды со сравнительно высокой интенсивностью электролюминесценции. В этом случае однородность поверхности структур сохраняется для слоя GaMnSb толщиной ~ 50 нм, в то же время для диодов с меньшей толщиной GaMnSb характерна более высокая интенсивность.

3.3. Циркулярная поляризация электролюминесценции

В магнитном поле электролюминесцентное излучение диода 1 становится частично циркулярно-поляризованным: интенсивность компоненты, поляризованной по левому кругу, превышает интенсивность компоненты, поляризованной по правому кругу (рис. 5, верхняя вставка). Степень поляризации, рассчитанная по формуле (1), линейно увеличивается с увеличением величины магнитного поля, достигая максимального значения 0.012 в магнитном поле 0.37 Тл (рис. 5). При изменении направления магнитного поля на противоположное степень поляризации меняет знак (рис. 5). Степень циркулярной поляризации фотолюминесценции указанного диода (номер 1) равна нулю в тех же условиях эксперимента. Отметим также, что во всех остальных случаях (структуры с более высоким содержанием Mn или с большей толщиной слоя GaMnSb) циркулярная поляризация электролюминесценции не была зарегистрирована в исследованном диапазоне магнитных полей. Диапазон температур, в котором наблюдалась циркулярная поляризация ЭЛ излучения, составил 10–110 К (см. вставку

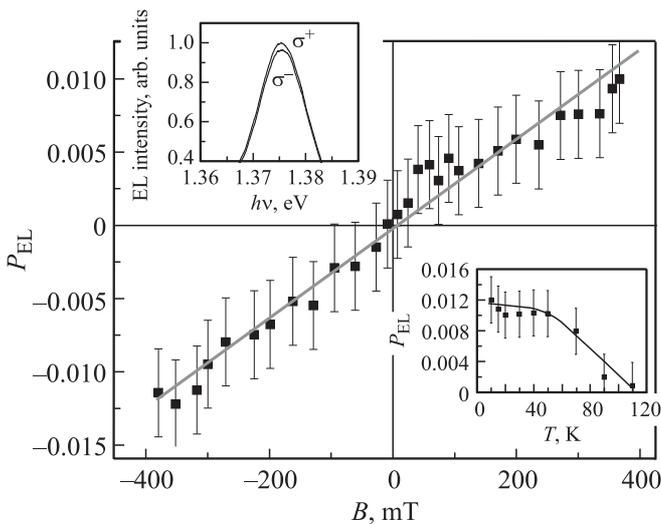


Рис. 5. Зависимость степени циркулярной поляризации структуры с $Y_{Mn} = 0.1$, $d = 10$ нм от величины магнитного поля, измеренная при температуре 10 К и токе диода 30 мА. На вставках изображены: сверху слева — спектры электролюминесценции диода, измеренные в σ^- и σ^+ поляризациях; снизу справа — зависимость степени циркулярной поляризации электролюминесценции диода от температуры измерений. Величина магнитного поля 0.37 Тл.

справа внизу на рис. 5). При температуре измерений более 50 К значение степени циркулярной поляризации уменьшается, что может быть связано с приближением к значению температуры Кюри ферромагнитного слоя и с увеличением спинового рассеяния поляризованных дырок в спейсерном слое.

4. Обсуждение результатов

Исследованные структуры могут быть разделены на 2 группы.

1) Структуры с малым содержанием Mn и однородной поверхностью (структуры 1–3, см. таблицу). В работе [9] методом рентгеновской дифракции было показано, что в подобных структурах при содержании атомов Mn $Y_{Mn} < 0.3$ слой GaMnSb является монокристаллическим. Можно предполагать, что, несмотря на большое ($\sim 7\%$) рассогласование решеток GaMnSb и GaAs, на поверхности указанных структур формируется эпитаксиальный слой GaMnSb, зонная диаграмма которого показана на рис. 4 (см. вставку 1). Особенностью зонной диаграммы гетероструктуры GaSb/GaAs, является наличие потенциального барьера для обоих типов носителей заряда [10]. Электронный и дырочный токи могут протекать в результате надбарьерной эмиссии аналогично протеканию тока в диодах Шоттки [11]. Кроме того, в случае большой плотности тока вблизи границы образуется область, обогащенная электронами, отраженными от барьера при протекании тока. Это приводит к изменению зонной диаграммы, как показано

на вставке 2 к рис. 4, и к снижению эффективной высоты потенциального барьера для обоих типов носителей [10]. Детальное описание механизмов инжекции дырок представляется затруднительным и требует дополнительных исследований. Можно предполагать, что эффективная инжекция дырок в GaAs связана с уменьшением эффективной высоты потенциального барьера. Снижение высоты потенциального барьера возможно также за счет диффузии марганца в область GaAs и формирования тонкого слоя *p*-GaAs.

Отметим возможность рекомбинации электронов с дырками на границе раздела GaAs/GaMnSb аналогично [10,12]. В силу наличия дефектов на границе раздела [13] и в слое GaMnSb (поскольку последний выращен при низкой температуре) можно сделать предположение о преимущественно безызлучательном характере рекомбинации на границе раздела. По-видимому, вероятность безызлучательной рекомбинации растет с увеличением концентрации примесных атомов Mn, а также с увеличением толщины ферромагнитного слоя — за счет увеличения количества дефектов на границе раздела и за счет диффузии атомов Mn из GaMnSb в GaAs (так как увеличение толщины магнитного слоя достигается увеличением времени процесса его выращивания). Указанное явление снижает эффективность исследованных светодиодов, а для повышения эффективности может применяться пассивация поверхности аналогично [13].

2) Структуры с высоким содержанием Mn и неоднородной поверхностью (номера 4–8). В отличие от предыдущего случая при выращивании магнитного слоя GaMnSb происходит переход от двумерного (слоевого) к трехмерному (островковому) типу роста. Хотя введение Mn в GaSb уменьшает рассогласование решеток с GaAs, условия эпитаксиального роста не выполняются. В том случае, когда концентрация Mn превышает предел растворимости в GaSb, возможно формирование двухфазной системы: кластеров GaMnSb с высоким содержанием Mn и матрицы GaSb:Mn с более низкой концентрацией Mn. При этом на АСМ-изображении регистрируются кластеры с размерами, превышающими номинальные толщины слоев GaMnSb. По-видимому, слоевой рост имеет место всего для нескольких монослоев GaMnSb, затем происходит переход к трехмерному островковому росту. Наличие на поверхности сплошного слоя GaMnSb в указанных структурах косвенно подтверждается высокими значениями предельных токов диода (1 А, что соответствует плотности тока $\sim 2 \cdot 10^3$ А/см²). В противном случае — если предположить наличие пор на поверхности — основная часть тока протекала бы через кластеры. Локальная плотность тока в области кластера была бы, как минимум, в 2 раза выше; такое значение близко к значениям порогового тока в полупроводниковых лазерах с высоким кристаллическим совершенством [14].

Механизм протекания тока в указанной группе структур также существенно отличается от механизма, характерного для структур первой группы. Проводимость

слоев с низким содержанием Mn носит полупроводниковый характер [9]. Для слоев с высокой концентрацией марганца характерно сильное вырождение полупроводника и металлический характер проводимости. Зонная диаграмма при этом существенно изменяется. Можно предполагать формирование структуры, аналогичной контакту металл/полупроводник с барьером Шоттки.

Свойства контакта металл/полупроводник определяются состоянием границы раздела, которое в свою очередь зависит от толщины ферромагнитного слоя. Увеличение толщины слоя приводит к увеличению плотности дислокаций на границе GaAs/(релаксированный GaMnSb), при этом для диодов ЭЛ не регистрируется либо регистрируется сравнительно низкое значение интенсивности. Тонкий слой GaMnSb на поверхности GaAs является либо псевдоморфным, либо частично релаксированным; при этом плотность дислокаций на границе раздела существенно ниже, чем для случая толстого покровного слоя. Кроме того, в диоде на основе структуры 7 установлено снижение высоты потенциального барьера и повышение интенсивности электролюминесценции более чем на порядок при одинаковом значении рабочего тока диода.

Циркулярно-поляризованная электролюминесценция, зарегистрированная для диода 1, свидетельствует об инжекции спин-поляризованных дырок из ферромагнитного слоя в активную область для диода с приведенными параметрами. Также отметим отсутствие циркулярной поляризации фотолуминесценции той же диодной структуры. Согласно [3], нулевое значение циркулярной поляризации при контрольных измерениях ФЛ является однозначным свидетельством того, что циркулярная поляризация электролюминесценции обусловлена инжекцией спин-поляризованных носителей из ферромагнитного слоя. Низкое значение степени поляризации, по видимому, обусловлено используемой геометрией эксперимента. В СИД на основе гетероструктур с квантовой ямой используется геометрия, в которой магнитное поле направлено перпендикулярно поверхности [15,16], а указанное направление перпендикулярно оси легкого намагничивания ферромагнитного слоя. Для намагничивания слоя требуются магнитные поля величиной порядка 2–3 Тл. Так, аналог исследованных нами структур изучался в [6]. В этой работе величина магнитного поля, в котором намагниченность ферромагнитного слоя MnAs выходит на насыщение, составила 2 Тл. В диапазоне магнитных полей 0–0.4 Тл степень циркулярной поляризации линейно зависела от магнитной индукции и не превышала 0.004. Указанное значение не превышает значения, полученного в настоящем эксперименте, что также подтверждает наличие спиновой инжекции из GaMnSb в GaAs. Отсутствие циркулярной поляризации в диодах с более высоким содержанием Mn и большей толщиной спейсерного слоя предположительно обусловлено рассеянием спин-поляризованных дырок на дефектах границы раздела. Дефекты, вызывающие спиновое рассеяние на границе раздела, являются также центрами безызлучательной рекомбинации.

Согласно данным температурной зависимости, P_c циркулярная поляризация сохраняется вплоть до температуры 110 К. Снижение степени циркулярной поляризации при температуре выше 50 К может быть обусловлено как приближением к точке Кюри ферромагнитного слоя GaMnSb со сравнительно низким содержанием Mn ($Y_{Mn} = 0.09$ для структуры 1), так и увеличением спинового рассеяния при повышенных температурах [17]. Отметим, что на подобных структурах, но с большим содержанием Mn ($Y_{Mn} = 0.33$) и большей толщиной слоя GaMnSb ($d = 30$ нм), ферромагнитные свойства вплоть до 300 К были зарегистрированы путем измерения аномального эффекта Холла [9]. Однако в случае спиновых светоизлучающих диодов повышение содержания Mn сопровождается снижением степени циркулярной поляризации ЭЛ до нуля. Для повышения рабочей температуры спинового диода требуется оптимизация его структуры.

Таким образом, нами были изготовлены и исследованы диодные структуры с InGaAs/GaAs квантовой ямой, содержащие ферромагнитный инжектор GaMnSb. Зарегистрировано электролюминесцентное излучение диодов на основе указанных структур при прямом смещении (подаче положительного потенциала на GaMnSb). Показана возможность инжекции спин-поляризованных дырок из ферромагнитного слоя в активную область СИД. Установлено, что механизм роста слоя GaMnSb на поверхности структур зависит от содержания Mn: при относительном содержании Mn меньше 0.33 имеет место послойный эпитаксиальный рост, при содержании 0.33 и выше — трехмерный островковый рост. Показано, что трехмерный рост сопровождается существенным гашением интенсивности электролюминесценции светоизлучающих диодов. Повышение интенсивности возможно за счет снижения толщины ферромагнитного слоя либо за счет уменьшения содержания Mn. Предложен механизм электролюминесценции, связанный с уменьшением эффективной высоты потенциального барьера: за счет инжекции электронов в диодах с контактом GaMnSb, обладающим полупроводниковыми свойствами, и за счет модифицирования зонной диаграммы в диодах с GaMnSb, обладающим металлическими свойствами. В диоде с тонким слоем GaMnSb зарегистрирована циркулярная поляризация электролюминесценции. Значение степени циркулярной поляризации ЭЛ излучения достигало 0.012. Показано, что циркулярная поляризация электролюминесценции обусловлена инжекцией спин-поляризованных носителей из ферромагнитного контактного слоя GaMnSb.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (10-02-00739, 11-02-00645), ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы (госконтракты с Министерством образования и науки № 02.740.11.0672 и П-1279), гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (№ 16.120.11.5359-МК).

Список литературы

- [1] I. Žutić, J. Fabian, S. Das Sarma. *Rev. Mod. Phys.*, **76**, 323 (2004).
- [2] *Concepts in Spin Electronics*, ed. by S. Maekawa (N.Y., Oxford University Press, 2006).
- [3] G. Schmidt. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **38**, R107 (2005).
- [4] M. Holub, P. Bhattacharya. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, R179 (2007).
- [5] D.K. Young, J.A. Gupta, E. Johnston-Halperin, R. Epstein, Y. Kato, D.D. Awschalom. *Semicond. Sci. Technol.*, **17**, 275 (2002).
- [6] M. Ramsteiner, H.Y. Hao, A. Kawaharazuka, H.J. Zhu, M. Kastner, R. Hey, L. Daweritz, H.T. Grahn, K.H. Ploog. *Phys. Rev. B*, **66**, 081304R (2002).
- [7] D.K. Young, E. Johnston-Halperin, D.D. Awschalom, Y. Ohno, H. Ohno. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 1598 (2002).
- [8] 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).
- [9] Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин, О.В. Вихрова, С.М. Планкина, В.С. Дунаев, А.В. Нежданов, Ю.Н. Дроздов, М.В. Сапожников. *Изв. РАН. Сер. Физ.*, **76** (2), 199 (2012).
- [10] В.И. Стриха, Е.В. Бузанева, И.А. Радзиевский. *Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки (физика, технология, применение)* (М., Сов. радио, 1974).
- [11] S.-Y. Lin, C.-C. Tseng, W.-H. Lin, S.-C. Mai, S.-Y. Wu, S.-H. Chen, J.-I. Chyi. *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 123503 (2010).
- [12] H.-W. Hsieh, S.-T. Yena. *J. Appl. Phys.*, **105**, 103515 (2009).
- [13] Y. Wang, P. Ruterana, L. Desplanque, S. El Kazzi, X. Wallart. *J. Appl. Phys.*, **109**, 023509 (2011).
- [14] Н.Б. Звонков, Б.Н. Звонков, А.В. Ершов, Е.А. Ускова, Г.А. Максимов. *Квант. электрон.*, **25** (7), 622 (1998).
- [15] R. Fiederling, P. Grabs, W. Ossau, G. Schmidt, L.W. Molenkamp. *Appl. Phys. Lett.*, **82** (13), 2160 (2003).
- [16] Z.G. Yu, W.H. Lau, M.E. Flatte. *Preprint Cond. mat.*, 0308220 (2003).
- [17] *Оптическая ориентация*, под ред. Б.П. Захарчени, Ф. Майера (Л., Наука, 1989).

Редактор Т.А. Полянская

Light-emitting diodes with GaMnSb/InGaAs/GaAs ferromagnetic semiconductor heterostructures

M.V. Dorokhin, E.I. Malysheva, A.V. Zdoroveishev, Yu.A. Danilov, A.V. Kudrin

Physico-Technical Research Institute of Nizhny Novgorod State University, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The $p-n$ -junction diode structure with InGaAs/GaAs quantum well placed in the space charge region and p -type ferromagnetic GaMnSb injector has been fabricated and investigated. The possibility of efficient electroluminescence has been demonstrated. It has been found that the electroluminescence efficiency depends on the conditions of a ferromagnetic GaMnSb layer fabrication: Mn content and layer thickness. The possible mechanisms of electroluminescence of investigated diodes have been reviewed. The circularly polarized electroluminescence of the diode with thin GaMnSb layer has been obtained. The polarization degree (0.012 at magnetic field of 0.37 T) remains essentially unchanged in the temperature range of 10–50 K. The circular polarization of the emission is due to the spin injection of holes into quantum well from a ferromagnetic GaMnSb.