

Влияние параметров дельта(Mn)-легирования GaAs-барьера на циркулярно поляризованную люминесценцию гетероструктур GaAs/InGaAs

© М.В. Дорохин¹, С.В. Зайцев², А.С. Бричкин², О.В. Вихрова¹, Ю.А. Данилов¹, Б.Н. Звонков¹, В.Д. Кулаковский², М.М. Прокофьева¹, А.Е. Шолина¹

¹ Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

² Институт твердого тела РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия

E-mail: dorokhin@nifti.unn.ru

Исследована циркулярная поляризация низкотемпературной электролюминесценции диодов на основе гетероструктур с нелегированной квантовой ямой InGaAs/GaAs и дельта(Mn)-слоем в GaAs-барьере. Изучена возможность изменения степени циркулярной поляризации электролюминесценции путем варьирования основных конструкционных параметров диодов (толщины спейсерного слоя, т.е. расстояния между дельта(Mn)-слоем и квантовой ямой, концентрации атомов в дельта(Mn)-слое, введения дополнительного акцепторного дельта-слоя). Найдено, что наиболее эффективным способом управления степенью циркулярной поляризации электролюминесценции является изменение толщины спейсерного слоя.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 07-02-00486, 08-02-97038 р_поволжье), CRDF (BR4M01), программы „Развитие научного потенциала высшей школы“ (РНП 2.2.2.2/4297), программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ и ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“.

1. Введение

Дельта-легирование марганцем полупроводников A^3B^5 представляет значительный интерес для изготовления приборов спинтроники. Указанный тип легирования широко применяется для модификации магнитных свойств структур, поскольку позволяет создать в локальной области полупроводника высокую концентрацию магнитных моментов без внесения большого количества дефектов [1,2]. Обменное взаимодействие дырок с ионами Mn приводит к спиновой поляризации. Так, использование дельта-легирования атомами Mn в гетероструктурах A^3B^5 [3,4] позволило контролировать магнитные свойства и спиновую поляризацию носителей в квантовой яме (КЯ). Преимуществом указанного способа легирования является пространственное разделение носителей заряда в КЯ и ионов Mn в барьере, что, в частности, позволяет избежать потерь на безызлучательную рекомбинацию, характерных для GaMnAs [5], и регистрировать сравнительно высокую интенсивность электролюминесценции. В результате в ряде работ была получена циркулярно поляризованная электролюминесценция структур с дельта-слоем Mn и квантовой ямой GaAs/AlGaAs [3] или InGaAs/GaAs в сравнительно малых магнитных полях при низкой температуре $T = 5$ К.

Хотя микроскопические механизмы ферромагнетизма в полупроводниках A^3B^5 : Mn все еще находятся в стадии обсуждения, общие принципы спиновой поляризации дырок в КЯ в присутствии ионов Mn можно считать установленными [6]. В то же время важным остается вопрос о влиянии технологических параметров

выращивания и легирования структур на эффективность обменного взаимодействия и степень спиновой поляризации дырок в КЯ.

Известно, что примесь Mn характеризуется сравнительно низкой растворимостью в GaAs [6]. Для введения высокой концентрации атомов Mn необходимо выращивание слоев при низкой температуре, что доступно в методе молекулярно-лучевой эпитаксии [6,7] или при использовании комбинированной методики газофазной эпитаксии и лазерного распыления [2,8]. Для повышения температуры Кюри в GaMnAs требуется высокая концентрация дырок (более $5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) и высокая концентрация примеси Mn в подрешетке Ga (более 0.05) [9]. Указанные параметры в каждом конкретном случае зависят от технологии изготовления [7,8]. Например, объемные слои GaMnAs подвергаются длительному низкотемпературному отжигу [10]. При этом увеличивается количество атомов Mn, замещающих атомы Ga, которые при этом являются акцепторной примесью и вносят вклад в ферромагнитное упорядочение [9,10]. Для повышения концентрации дырок используется легирование полупроводника другой акцепторной примесью [11], что позволяет повысить температуру Кюри материала. В системе квантовая яма–дельта-слой Mn дополнительным параметром, влияющим на степень спиновой поляризации дырок, является расстояние между магнитным слоем и КЯ [2].

В настоящей работе представлены результаты изучения влияния технологических приемов дельта-легирования GaAs барьера на характеристики электролюминесценции (ЭЛ) диодов на основе гетероструктур

Параметры образцов для исследований

Серия	Номер структуры	Поверхностная концентрация электрически активного углерода в дельта(C)-слое, 10^{13} cm^{-2}	Содержание Mn в дельта(Mn)-слое, 10^{14} cm^{-2}	Толщина спейсерного слоя d_s , nm
A	1	0.2	0.6	2
	2	0.2	0.6	4
	3	0.2	0.6	8
	4	0.2	0.6	12
B	1	0	0.4	3
	2	0	0.6	3
	3	0	2	3
	4	0	4	3
	5	0	7.3	3
	6	0	9.2	3
	7	0.2	2	4
	8	0.2	0.6	3
C	1	0	0.6	4
	2	0.5	0.6	4
	3	1	0.6	4
	4	2	0.6	4

InGaAs/GaAs. Исследуется возможность управления циркулярной поляризацией низкотемпературной электролюминесценции путем варьирования основных технологических параметров изготовления диодов.

2. Методика эксперимента

Гетероструктуры InGaAs/GaAs были изготовлены с помощью двухступенчатого метода эпитаксиального выращивания. На первом этапе на подложках GaAs (001) методом МОС-тиридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) при атмосферном давлении и температуре 600°C выращивались следующие слои: буферный слой GaAs (толщиной $0.5 \mu\text{m}$, легированный Si до концентрации $n \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), дельта(C)-легированный слой, слой нелегированного GaAs толщиной 3 nm , квантовая яма $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.1-0.15$; ширина $d_{\text{QW}} = 10 \text{ nm}$) и тонкий ($d_s = 2-12 \text{ nm}$) спейсерный слой. На следующей стадии дельта(Mn)-легированный слой и покровный слой GaAs были выращены в том же реакторе при температуре 400°C посредством лазерного распыления мишеней Mn и GaAs соответственно. Снижение температуры выращивания до 400°C позволило уменьшить диффузию Mn во время выращивания образцов [12]. Схема исследованных структур показана на рис. 1, а. В исследованиях варьировались следующие параметры: 1) толщина слоя GaAs между дельта(M)-слоем и КЯ в диапазоне $2-12 \text{ nm}$; 2) содержание Mn в дельта-слое — в диапазоне $(0.75-7.5) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$; 3) содержание углерода в дельта-слое перед КЯ. Немагнитный контрольный образец содержит дельта(C)-легированный слой вместо дельта(Mn)-легированного слоя. Кроме того, образцы с

подобной структурой были выращены на подложке полупроводящего GaAs с нелегированным буферным слоем для транспортных измерений в магнитном поле. Магнитотранспортные измерения показали ферромагнитное поведение дельта(Mn)-легированных слоев с температурой Кюри $T_C \sim 30-35 \text{ K}$ (см. также [13]). Параметры исследованных образцов приведены в таблице.

После выращивания структур на их поверхность методом термического испарения металла в вакууме наносился Au-контакт Шоттки. Диаметр контакта составлял $500 \mu\text{m}$. ЭЛ измерялась при прямом смещении диода Шоттки (на Au-контакт подавался положительный по отношению к базе потенциал). Люминесцентные свойства диодов оценивались с помощью тестовых измерений ЭЛ при температуре жидкого азота и вольт-амперных характеристик. Зонная диаграмма исследованных светящихся диодов показана на рис. 1, б. Для измерений циркулярной поляризации ЭЛ диод помещался в криостат с жидким гелием ($T = 2 \text{ K}$), магнитное поле величиной до 5 T было направлено перпендикулярно поверхности образца. Степень циркулярной поляризации ЭЛ рассчитывалась из соотношения

$$P_{\text{EL}} = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-), \quad (1)$$

где I_+ (I_-) — интенсивности компонент с левой (правой) поляризацией, полученные путем интегрирования полосы соответствующей части спектра излучения. Температурная зависимость ЭЛ исследовалась в криостате замкнутого цикла, в этом случае для введения магнитного поля использовался постоянный магнит, величина магнитного поля не превышала 0.37 T .

Для определения электрических и магнитных свойств дельта(Mn)-легированных слоев были изготовлены кон-

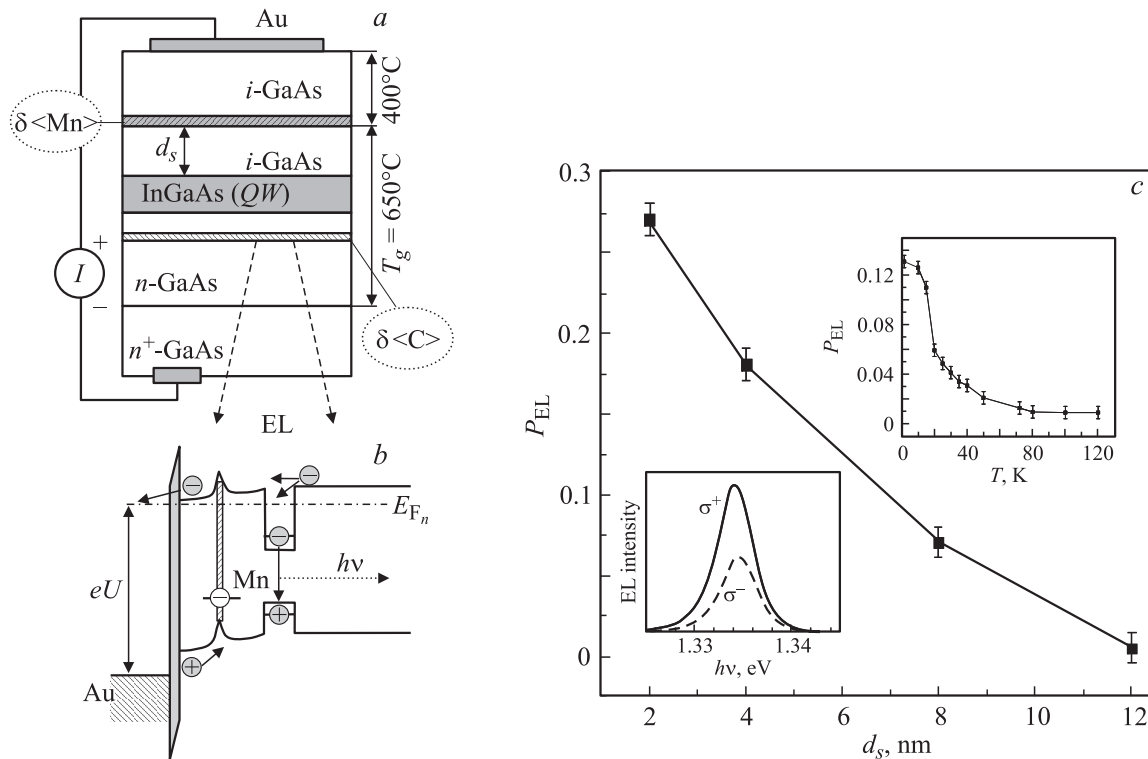


Рис. 1. *a)* Схема исследованных диодов на основе гетероструктур с КЯ и дельта-слоем Mn. *b)* Зонная диаграмма исследованных диодов в режиме прямого смещения. U — напряжение, приложенное к диоду, e — элементарный заряд, E_{F_n} — квазиуровень Ферми для электронов в полупроводнике. *c)* Зависимость степени циркулярной поляризации светоизлучающих диодов, измеренной в поле $B = 4$ Т, от толщины спейсерного слоя между КЯ и дельта(Mn)-слоем (диоды А1–А4). Температура измерений 1.5 К, ток диодов 10 мА. На вставках показаны спектры ЭЛ светоизлучающего диода с КЯ и дельта-слоем Mn, записанные в σ^+ - и σ^- -поляризациях ($d_s = 3$ нм, $B = 5$ Т, $I_d = 10$ мА) (нижняя), и зависимость степени циркулярной поляризации ЭЛ от температуры ($d_s = 5$ нм, $B = 0.37$ Т, $I_d = 10$ мА) (верхняя).

трольные структуры, содержащие одиночные дельта-слои, выращенные на полуизолирующей подложке GaAs и покрытые сверху нелегированным GaAs. На указанных структурах по измерениям эффекта Холла определялась концентрация дырок в зависимости от содержания Mn в дельта-слое.

3. Экспериментальные результаты

Как было показано ранее [2], при введении описанных выше диодов в магнитное поле линия их ЭЛ, связанная с излучательными переходами в КЯ, становится циркулярно поляризованной (нижняя вставка на рис. 1, *c*). Зависимость степени циркулярной поляризации от магнитного поля $P_{EL}(B)$ имеет два участка (рис. 2), характерных для ферромагнитных структур: участок быстрого роста P_{EL} в диапазоне полей 0–0.2 Т и участок значительно более медленного изменения P_{EL} в полях 0.3–5 Т. Значение P_{EL} в исследованных структурах с дельта-слоем Mn достигает 0.36, что существенно выше, чем в контрольных [2]. Такая зависимость характерна для ферромагнитных слоев типа GaMnAs с осью легкого намагничивания, направленной вдоль поверхности [14]. Значение степени циркулярной поляризации остается

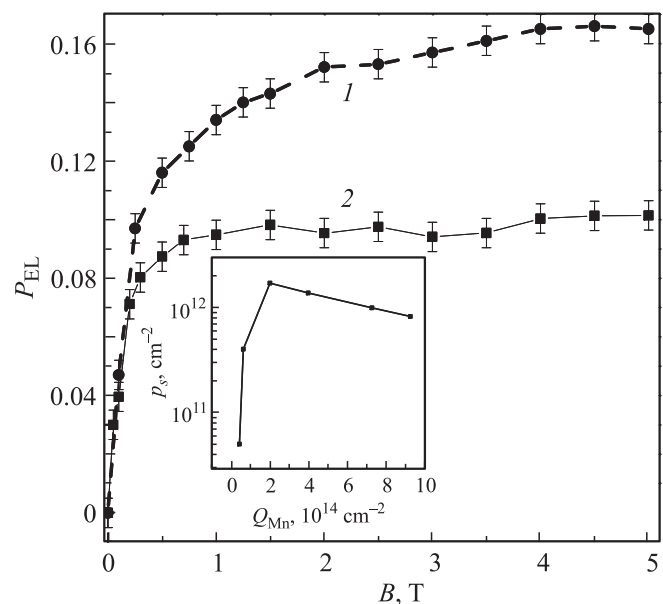


Рис. 2. Зависимость степени циркулярной поляризации ЭЛ от магнитного поля для диодов В7 (1) и В8 (2), измеренная при температуре 1.5 К, ток диода $I_d = 10$ мА. На вставке — зависимость слоевой концентрации дырок в дельта(Mn)-слое от концентрации атомов Mn.

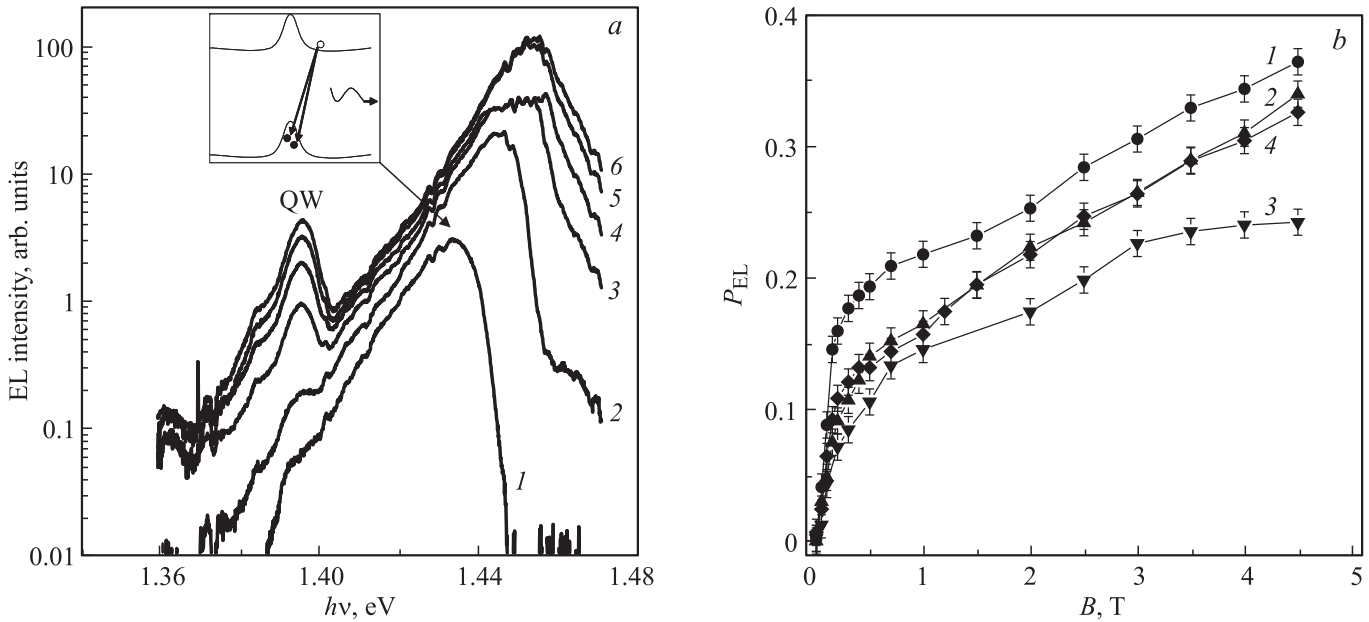


Рис. 3. *a)* Спектры электролюминесценции диодов Шоттки с КЯ, дельта-слоем Mn и дельта(C)-слоем (диод C3), измеренные при температуре 1.5 K и токах диода, равных 2 (1), 3 (2), 10 (3), 20 (4), 30 (5) и 40 mA (6). На вставке — схема возможных оптических переходов дырок из акцепторного дельта-слоя в зону проводимости GaAs. *b)* Магнитополевая зависимость степени циркулярной поляризации ЭЛ для диодов C1 (1), C2 (2), C3 (3) и C4 (4), измеренная при температуре 1.5 K.

примерно постоянным в области низких температур, при температуре ≥ 20 K величина P_{EL} монотонно падает и в области температур 30–70 K остается примерно постоянной на уровне 0.01. Как обсуждалось в работе [2], циркулярная поляризация обусловлена спиновой поляризацией дырок в квантовой яме, возникающей в результате их взаимодействия с ионами Mn в дельта-слое. Эффективность взаимодействия определяется степенью перекрытия волновых функций, концентрациями дырок и атомов Mn, замещающих атомы Ga. На рис. 1, *c* представлена зависимость степени циркулярной поляризации ЭЛ, измеренной в магнитном поле $B = 4$ T, от толщины спейсерного слоя между дельта-Mn и КЯ. С увеличением d_s значение P_{EL} монотонно падает и при толщине спейсерного слоя 12 nm становится сравнимым со значением P_{EL} контрольного диода. Наибольшее значение $P_{EL} = 0.36$ в поле 5 T зарегистрировано для диода с наименьшей $d_s = 2$ nm. Отметим, что уменьшение расстояния между КЯ и дельта-слоем Mn приводит к существенному гашению интенсивности ЭЛ. В работе [4] при исследовании аналогичных диодов было получено, что уменьшение толщины спейсерного слоя до 2 nm приводит также и к уширению линии ЭЛ, и к снижению степени циркулярной поляризации. В настоящей работе для уменьшения влияния примеси на свойства КЯ выращивался дельта-слой с меньшей концентрацией Mn ($6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ вместо $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ в работе [4]). На рис. 2 приведены зависимости $P_{EL}(B)$ для двух таких структур. Снижение содержания Mn позволило уменьшить безызлучательную рекомбинацию на дефектах, увеличить интенсивность ЭЛ и снизить

уширение линии квантовой ямы в ЭЛ. В результате даже для диодов с $d_s = 2$ nm удалось достичь достаточно высоких значений интенсивности ЭЛ и степени циркулярной поляризации.

Увеличение содержания Mn выше $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ (в структурах B1–B6) не приводит к повышению степени циркулярной поляризации ЭЛ, но ведет к существенному снижению интенсивности ЭЛ и повышению рабочих токов диодов [15]. Полученным результатам можно поставить в соответствие измерения концентрации носителей в дельта-слое в зависимости от содержания Mn. Измерения были проведены для структур с одиночными дельта(Mn)-слоями, выращенными на подложке изолирующего GaAs. Из графика, приведенного на вставке к рис. 2, видно, что при номинальном содержании марганца $6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ концентрация дырок составляет $4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ при 77 K. При увеличении содержания Mn концентрация дырок возрастает до $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ и остается практически неизменной вплоть до самых высоких содержаний Mn ($\sim 9.2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$).

Для изучения влияния концентрации дырок в КЯ на степень циркулярной поляризации ЭЛ были изготовлены диоды, различающиеся содержанием углерода в дельта(C)-слое, введенном в GaAs перед выращиванием КЯ (структуры B). На спектрах ЭЛ структур с дельта(C)-слоем, измеренных при низких температурах (2–40 K), доминирует линия, не связанная с излучательными переходами в квантовой яме с выбранными параметрами (рис. 3, *a*). Энергетическое положение указанной линии зависит от уровня накачки и смещается в область высоких энергий с увеличением тока на-

качки (рис. 3, *a*). Подобное поведение характерно для излучательных переходов из потенциальной ямы для дырок, образованной акцепторным дельта-слоем, в зону проводимости GaAs [16] (вставка на рис. 3, *a*). Предположительно, наблюдаемая на спектре линия связана с излучательными переходами в дельта-слое углерода, поскольку в структурах, не содержащих углерода, линия ЭЛ в диапазоне энергий 1.43–1.46 eV отсутствует. С увеличением температуры измерений интенсивность указанной линии существенно снижается и при температуре ~ 70 K не превышает уровня шума.

Исследования циркулярной поляризации ЭЛ показали, что дельта-легирование углеродом GaAs-барьера не приводит к повышению P_{EL} . Напротив, наибольшая степень циркулярной поляризации характерна для структуры, не содержащей дельта(C)-слоя. При введении углерода значение P_{EL} снижается с 0.36 до 0.25–0.33 для разных структур.

4. Обсуждение результатов

В работе [4] было найдено, что магнитополевая зависимость и температурная зависимость степени циркулярной поляризации для фото- и электролюминесценции близки или совпадают в пределах ошибки измерений. Следовательно, механизмы возникновения поляризации для фото- и электролюминесценции подобны. В обоих случаях циркулярная поляризация люминесценции обусловлена спиновой поляризацией дырок в КЯ, возникающей в результате их s , p - d -обменного взаимодействия с ионами Mn в дельта-слое. Эффективность такого взаимодействия падает при удалении КЯ от дельта-слоя, что может объяснить спад P_{EL} с увеличением толщины спейсерного слоя.

Помимо варьирования d_s повлиять на спиновую поляризацию носителей можно путем изменения содержания Mn в дельта-слое. Для описанных выше технологических условий изменение степени циркулярной поляризации наблюдается для структур с концентрацией Mn, лежащей в диапазоне 0.6 – $2 \cdot 10^{14}$ cm^{-2} . Из вставки на рис. 2 видно, что при увеличении содержания Mn выше $2 \cdot 10^{14}$ cm^{-2} концентрация дырок в структуре существенно не меняется. По-видимому, с увеличением содержания Mn увеличивается доля междоузельных атомов Mn в решетке GaAs. Такие атомы являются двойными донорами и компенсируют два акцепторных атома Mn, в результате чего уменьшается концентрация дырок и падает температура Кюри в GaMnAs [6,9]. Предположительно именно вследствие неизменности концентрации дырок и увеличения концентрации междоузельных атомов Mn в GaAs в структурах с содержанием Mn выше $2 \cdot 10^{14}$ cm^{-2} не удается повысить степень циркулярной поляризации ЭЛ.

Из рис. 3 видно, что дополнительное акцепторное дельта-легирование углеродом не только не приводит к повышению степени циркулярной поляризации ЭЛ, но и способствует некоторому ее уменьшению. На первый

взгляд этот эффект кажется неожиданным, поскольку именно p - d -обменное взаимодействие ионов Mn с дырками ведет к увеличению намагниченности системы ионов Mn и ее ферромагнетизму. Однако в нашем случае ферромагнетизм дельта-слоя Mn уже обеспечивается за счет большой плотности ионов Mn в дельта-слое, и величина расщепления дырочных уровней в КЯ определяется лишь намагниченностью этого слоя. Дополнительное легирование акцепторами с противоположной стороны квантовой ямы ведет к увеличению плотности дырок в квантовой яме. Увеличение же энергии Ферми дырок при фиксированной величине расщепления, по-видимому, является основной причиной уменьшения средней степени поляризации дырочной системы. Отметим также, что в структурах, не содержащих дельта(C)-слоя, потенциал ямы приобретает треугольную форму со смещением дырок в сторону отрицательно заряженного дельта-слоя Mn. Введение отрицательно заряженного дельта-слоя углерода с другой стороны КЯ приводит к выравниванию потенциала в КЯ. При этом увеличивается эффективное расстояние между дырками в КЯ (толщина КЯ 10 nm) и ионами марганца и уменьшается перекрытие волновых функций, что также может приводить к снижению степени спиновой поляризации дырок в квантовой яме.

5. Заключение

Таким образом, показана возможность достижения высоких значений магнитоуправляемой циркулярной поляризации ЭЛ в диодах на основе гетероструктур с квантовой ямой IGaAs/GaAs и близкорасположенным дельта(Mn)-легированным слоем. Исследована возможность управления степенью циркулярной поляризации ЭЛ указанных диодов путем варьирования технологических параметров их изготовления (толщины спейсерного слоя, содержания Mn и C в дельта-слоях). Найдено, что наиболее эффективным способом управления степенью циркулярной поляризации ($P_{EL} = 0$ – 0.36) является варьирование толщины спейсерного слоя между дельта(Mn)-слоем и КЯ (в пределах от 2 до 12 nm).

Список литературы

- [1] A.M. Nazmul, T. Amemiya, Y. Shuto, S. Sugahara, M. Tanaka. Phys. Rev. Lett. **95**, 017 201 (2005).
- [2] С.В. Зайцев, М.В. Дорохин, А.С. Бричкин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, В.Д. Кулаковский. Письма в ЖЭТФ **90**, 10, 730 (2009).
- [3] R.C. Myers, A.C. Gossard, D.D. Awschalom. Phys. Rev B **69**, 161 305 (2004).
- [4] M.V. Dorokhin, Yu.A. Danilov, P.B. Demina, V.D. Kulakovskii, O.V. Vikhrova, S.V. Zaitsev, B.N. Zvondov. J. Phys. D: Appl. Phys. **41**, 245 110 (2008).
- [5] H. Nemeц, A. Pashkin, P. Kuhel, M. Khazan, S. Schnoll, I. Wilke. J. Appl. Phys. **90** 1303 (2001).
- [6] H. Ohno. Science **281**, 951 (1998).

- [7] M.J. Wilson, G. Xiang, B.L. Sheu, P. Schiffer, N. Samarth, S.J. May, A. Bhattacharya. *Appl. Phys. Lett.* **93**, 262 502 (2008).
- [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**, 56 (2008).
- [9] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, D. Ferrand. *Science* **287**, 1019 (2000).
- [10] K.W. Edmonds, P. Boguslawski, K.Y. Wang, R.P. Champion, S.N. Novikov, N.R.S. Farley, B.L. Gallagher, C.T. Foxon, M. Sawicki, T. Dietl, M. Buongiorno Nardelli, J. Bernholc. *Phys. Rev. Lett.* **92**, 037 201 (2004).
- [11] A.M. Nazmul, S. Sugahara, M. Tanaka. *Phys. Rev. B* **67**, 241 308 (2003).
- [12] M.V. Dorokhin, B.N. Zvonkov, Yu.A. Danilov, V.V. Podolskii, P.B. Demina, O.V. Vikhrova, E.I. Malysheva, M.V. Sapozhnikov. *Int. J. Nanosci.* **6**, 221 (2007).
- [13] О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, И.Л. Калентьева, А.В. Кудрин. *Письма в ЖТФ* **35**, 14, 8 (2009).
- [14] V.F. Sapega, M. Moreno, M. Ramsteiner, L. Däweritz, K.H. Ploog. *Phys. Rev. Lett.* **94**, 137 401 (2005).
- [15] О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, М.М. Прокофьева, Ю.Н. Дроздов, М.В. Сапожников. *Изв. АН. Сер. физ.* **73**, 16 (2009).
- [16] А.Я. Шик. *ФТП* **26**, 1161 (1992).