

УДК 621.315.592

Влияние концентрации примесей на люминесцентные свойства спиновых светоизлучающих диодов InGaAs/GaAs с δ -слоем Mn

© А.В. Рыков, М.В. Дорохин, Е.И. Малышева, П.Б. Демина, О.В. Вихрова, А.В. Здравейщев

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия
E-mail: rikov@nifti.unn.ru

(Получена 22 апреля 2015 г. Принята к печати 22 апреля 2015 г.)

Исследованы люминесцентные свойства светоизлучающих диодов на основе гетероструктур GaAs/InGaAs со слоями, легированными Mn. Получены зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции от ростовых параметров — содержания Mn, концентрации дырок. Обнаружено монотонное увеличение степени циркулярной поляризации электролюминесценции и температуры Кюри ферромагнитной структуры с ростом концентрации дырок, а также изменение знака степени циркулярной поляризации в зависимости от содержания Mn. Полученные данные объясняются с точки зрения известных моделей ферромагнетизма в структурах на основе ферромагнитных полупроводников.

1. Введение

Формирование и исследование свойств гетероструктур, содержащих туннельно-связанные ферромагнитный и полупроводниковый слои, активно развивается применительно к соединениям $A^{II}B^{VI}$ [1,2] и $A^{III}B^V$ [3,4]. Интерес к подобным системам связан с возможностью придания полупроводниковым слоям ферромагнитных свойств с сохранением всех остальных параметров. Наличие ферромагнетизма и, как следствие, появление ансамбля спин-поляризованных носителей заряда в полупроводниковых гетероструктурах открывает ряд новых возможностей их применения в области спиновой электроники (спинтроники). Фундаментальным механизмом появления спиновой поляризации является обменное взаимодействие носителей заряда (как правило, дырок) в ферромагнитном и полупроводниковом слоях [3,5]. Одним из примеров подобных гетеросистем является полупроводниковая структура с квантовой ямой (КЯ) InGaAs/GaAs и близко расположенным ферромагнитным δ -слоем Mn. При пониженных температурах обменное взаимодействие дырок в квантовой яме и ионов Mn в туннельно-близком δ -слое Mn приводит к поляризации дырок по спину. При этом сохраняются все остальные свойства квантовой ямы, в частности высокое значение подвижности носителей заряда [6] и высокая интенсивность люминесценции [7]. Рекомбинация с участием спин-поляризованных носителей приводит к генерации циркулярно-поляризованного люминесцентного излучения [3,4,7].

Свойства циркулярно-поляризованного излучения зависят от технологических параметров структур и определяются свойствами намагниченности ферромагнитного слоя [4,6,7]. Управление параметрами намагниченности позволяет контролировать поляризационные характеристики люминесценции структур, что важно для

практических применений. Известно, что магнитными свойствами разбавленных магнитных полупроводников $(A^{III}, Mn)B^V$ можно управлять путем изменения концентрации магнитной примеси и концентрации дырок [8–10]. В настоящей работе проведено варьирование указанных параметров в светоизлучающих диодах на основе гетероструктур с квантовой ямой InGaAs/GaAs и δ -слоем Mn ($\delta\langle Mn \rangle$) в GaAs-барьере. Исследована зависимость основных свойств таких диодов (степень циркулярной поляризации, температура Кюри ферромагнитного слоя) от содержания Mn в δ -слое и концентрации дырок. Полученные экспериментальные результаты объясняются с применением механизмов обменного взаимодействия ионов Mn и дырок в КЯ, рассмотренных в [4,11,12].

2. Методика эксперимента

Структуры были получены комбинированным методом газофазной эпитаксии (ГФЭ) и лазерного распыления [13]. В реактор одновременно помещались подложки n - и i -GaAs (100), на которых в одном технологическом цикле последовательно выращивались газофазной эпитаксией при температуре 600°C: буферный слой GaAs толщиной 0.6 мкм, квантовая яма $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ шириной 10 нм и спейсерный слой GaAs толщиной $d_s = 4$ нм. Структуры на проводящей подложке использовались для формирования спиновых светоизлучающих диодов (ССИД), а структуры на полуизолирующей подложке использовались для электрических измерений. На втором этапе лазерным распылением мишеней Mn и GaAs при температуре 400°C выращивались δ -легированный Mn слой GaAs и покровный слой GaAs. Содержание Mn оценивалось по скорости осаждения на основании калибровки установки по скорости роста и варьировалось в пределах 0.1–0.3 монослоя (МС, monolayer). Один

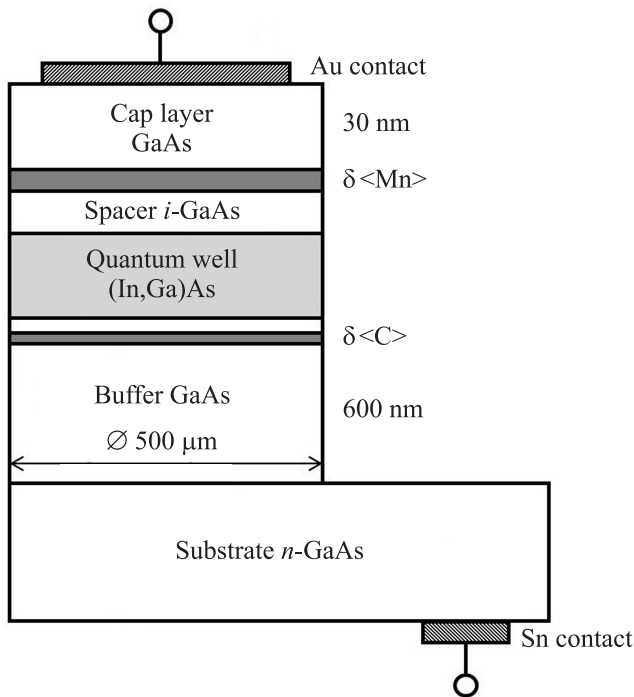


Рис. 1. Схема образца ССИД для исследований электролюминесценции.

МС соответствует слоевой концентрации атомов Mn $6.3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Для дополнительного повышения концентрации дырок в активной области в ряде образцов перед выращиванием КЯ в структуру вводился δ -слой углерода ($\delta\langle C \rangle$), расстояние между δ -слоем С и квантовой ямой составило 3 нм. Слоевая концентрация углерода составила $2.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Верхний предел концентрации С обусловлен эффективной низкотемпературной люминесценцией состояний, связанных с легированием углеродом в GaAs, не позволяющей зарегистрировать компоненту люминесценции, связанную с излучательными переходами в квантовой яме [7]. Поэтому для увеличения концентрации дырок $> 2.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ в части образцов покровный слой был сформирован путем распыления мишени GaAs:Zn. Контрольная структура (таблица, структура 14) не содержала легированных слоев. Концентрацию носителей заряда в образцах рассчитывали по результатам измерений эффекта Холла при 300 К [6], измеренного для образцов-спутников, сформированных на подложках *i*-GaAs.

Следующим технологическим этапом получения ССИД было нанесение Au-электрода на поверхность полупроводниковых структур на подложках *n*-GaAs методом электронно-лучевого испарения в вакууме и дальнейшее формирование мезоструктуры с использованием фотолитографии и химического травления. Базовый омический контакт формировался методом искрового вжигания оловянной фольги. Схема сформированных диодных структуры с варьированием содержания Mn и концентрации дырок показана на рис. 1.

Характеристики полученных диодных структур измерялись в диапазоне температур 10–100 К. Измерения электролюминесценции (ЭЛ) и циркулярной поляризации ЭЛ ССИД проводили при прямом смещении (положительный относительно базы потенциал). Циркулярную поляризацию ЭЛ измеряли по стандартной методике [13] при введении диода во внешнее магнитное поле $B = 0\text{--}300 \text{ мТл}$, значение степени циркулярной поляризации ЭЛ оценивалось из соотношения

$$P_C = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-), \quad (1)$$

где I_+ и I_- — интенсивности компонент с левой и правой поляризацией, полученные путем интегрирования соответствующей полосы спектра излучения.

3. Исследование электрических характеристик

Технологические и экспериментальные параметры исследованных образцов приведены в таблице. Видно, что слоевая концентрация дырок p_s в структурах без дополнительного легирования (только с δ -слоем Mn) значительно ниже, чем концентрация атомов Mn. Эффект можно связать с частичной компенсацией примеси Mn. Поскольку для контрольной структуры зарегистрирована проводимость *p*-типа с концентрацией примеси $p_s \approx 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, снижение концентрации в результате легирования марганцем может быть связано с автокомпенсацией. Согласно [14–16], наиболее вероятным видом дефектов, приводящих к автокомпенсации в (Ga,Mn)As со сравнительно небольшой концентрацией Mn, являются атомы Mn в междоузлиях (Mn_I). В этом положении

Технологические и экспериментально измеренные параметры образцов для исследования

Номер образца	Q_{Mn} , МС	Покровный слой	Q_C , см^{-2}	p_s , 10^{12} см^{-2}	P_{CS} , %
1	0.1	GaAs	нет	1.7	0.1 ± 0.1
2	0.15	GaAs	нет	8	0.1 ± 0.1
3	0.18	GaAs	нет	22	0.19 ± 0.1
4	0.22	GaAs	нет	19	-0.14 ± 0.1
5	0.30	GaAs	нет	11	0.1 ± 0.1
6	0.1	GaAs : Zn	нет	15	1.39 ± 0.1
7	0.15	GaAs : Zn	нет	19	1.98 ± 0.1
8	0.18	GaAs : Zn	нет	30	0.53 ± 0.1
9	0.22	GaAs : Zn	нет	29	-0.46 ± 0.1
10	0.30	GaAs : Zn	нет	22	0.8 ± 0.1
11	0.18	GaAs	$2.5 \cdot 10^{12}$	5.8	0.2 ± 0.1
12	0.22	GaAs	$2.5 \cdot 10^{12}$	10	0.3 ± 0.1
13	0.15	GaAs	$2.5 \cdot 10^{12}$	10	0.1 ± 0.1
14	нет	GaAs	нет	0.1	0

Примечание. Q_{Mn} — содержание марганца в δ -слое Mn; Q_C — содержание углерода в δ -слое С; p_s — слоевая концентрация дырок при 300 К; P_{CS} — значение степени циркулярной поляризации в насыщении, рассчитанное по формуле (2).

марганец является двойным донором и компенсирует дырки от двух атомов Mn в положении замещения Ga (Mn_{Ga}) [14–16].

Исходя из предположения о преимущественном встраивании атомов Mn в положения Mn_I и Mn_{Ga} можно выполнить оценку концентрации атомов Mn в положении Ga по формуле

$$N_{Mn} = \frac{(p_s + 2Y_{Mn})}{3}, \quad (2)$$

где N_{Mn} — концентрация атомов Mn в положении Ga, p_s — слоевая концентрация дырок, $Y_{Mn} = Q_{Mn} \cdot 6.3 \cdot 10^{14}$ — концентрация атомов Mn. Формула (2) учитывает, что каждый межузельный атом Mn уменьшает количество дырок на 2. Таким образом, из расчетных значений содержания Mn и измерений слоевой концентрации дырок может быть оценена доля атомов Mn_{Ga} , которые, согласно [16], участвуют в ферромагнитном упорядочении материала. Из проведенных расчетов получено, что отношение N_{Mn}/Y_{Mn} с учетом погрешностей составляет (0.71 ± 0.02) .

Из таблицы видно, что лазерное осаждение покровного слоя GaAs : Zn приводит к повышению концентрации дырок приблизительно на 10^{13} см^{-2} . Введение углерода приводит к незначительному повышению концентрации дырок, несколько выше величин, связанных с погрешностью измерений и технологическим разбросом параметров.

4. Исследование циркулярной поляризации электролюминесценции

Магнитопольевые зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ в диапазоне температур 10–50 К для структуры 6 с $Q_{Mn} = 0.1 \text{ MC}$ представлены на рис. 2. Для всех исследованных структур характер зависимостей $P_C(B)$ подобен. Зависимости состоят из двух участков: участка быстрого увеличения P_C с ростом магнитного поля в диапазоне 0–100 мТл и участка медленного изменения P_C в магнитном поле выше 100 мТл. Слой GaAs, δ -легированный марганцем, по своей сути является тонким слоем разбавленного магнитного полупроводника GaMnAs. Для структур на основе GaMnAs зависимости на рис. 2 с точностью до знака подобны магнитопольевым зависимостям намагниченности ферромагнитного полупроводникового слоя [17]. Участок быстрого увеличения P_C связан с постепенным насыщением намагниченности ферромагнитного δ -слоя Mn, участок медленного изменения P_C наблюдается при намагничивании δ -слоя Mn и связан с зеемановским расщеплением уровней в квантовой яме [11], величина которого пропорциональна магнитному полю, а заполнение уровней носителями с различным спином зависит от температуры. Участок зависимости $P_C(B)$ в полях, превышающих по модулю 100 мТл, может быть

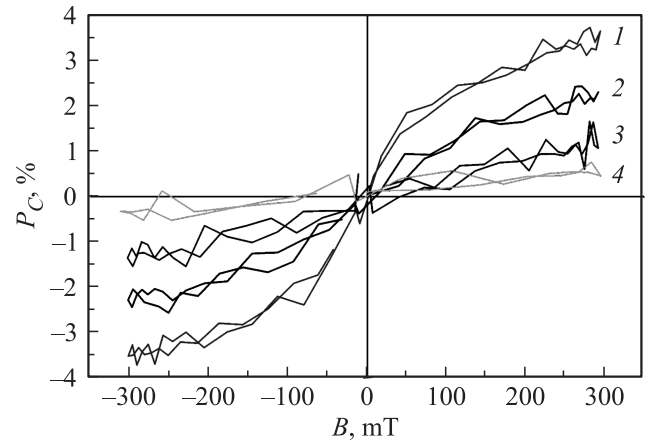


Рис. 2. Зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ от магнитного поля для структуры 6, измеренные при токе диода 10 мА и различных температурах, К: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 50 К. Ток диода 10 мА.

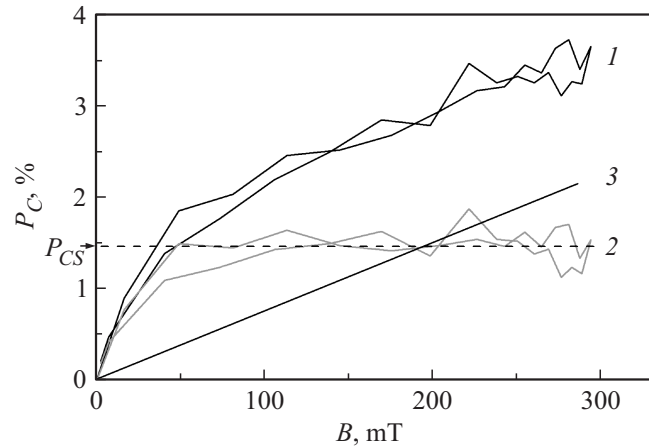


Рис. 3. Зависимость степени циркулярной поляризации ЭЛ от магнитного поля для структуры 6 при токе диода 10 мА, температуре 10 К (1); 2 — эта же зависимость за вычетом линейного слагаемого, полученного аппроксимацией $P_C(B)$ в области $> 100 \text{ мТл}$ (3).

аппроксимирован линейной функцией [4,11]. При температуре Кюри участок быстрого увеличения P_C (т.е. ферромагнитная часть) стремится к нулю, и остается только линейный участок, связанный с зеемановским расщеплением.

Следует особо отметить однозначную взаимосвязь наблюдаемой ранее в экспериментах циркулярной поляризации люминесценции структур InGaAs/GaAs/ δ (Mn) и намагниченности δ -слоя Mn [7,4,11]. В связи с этим в рамках дальнейшего анализа на основании зависимостей P_C от параметров структур будут сделаны выводы относительно к ферромагнитных свойств легированного Mn слоя. Для анализа были выбраны основные параметры циркулярно-поляризованной люминесценции: значение степени циркулярной поляризации в магнитном поле, соответствующем насыщению намагниченности —

P_{CS} , а также значение точки Кюри ферромагнитного δ -слоя — T_C . Значение P_{CS} оценивалось с учетом зеемановского расщепления по формуле

$$P_{CS}(B) = P_C(B) - kB, \quad (3)$$

где kB — линейная функция, полученная при аппроксимации участков $P_C(B)$ при $|B| > 100$ мТл (см. рис. 3). Значение T_C оценивалось из магнитопольевых зависимостей степени циркулярной поляризации, измеренных при разных температурах (рис. 2). Согласно [7,11], точка Кюри соответствует минимальной температуре, при которой зависимость $P_C(B)$ может быть описана линейной функцией. Так, оценочное значение температуры Кюри для структуры, рассмотренной на рис. 2, составляет 40 К.

Рассчитанные значения степени циркулярной поляризации в насыщении показаны в таблице. По полученным данным корреляцию между значениями P_{CS} и p_s установить не удалось, однако можно отметить, что для структур с низким значением концентрации дырок характерны сравнительно небольшие значения степени циркулярной поляризации.

Зависимость степени циркулярной поляризации в насыщении от содержания марганца в структурах представлена на рис. 4. На зависимости наблюдается точка минимума, соответствующая содержанию Mn, равному $Q_{Mn} = 0.22$ МС. При этом содержании Mn значение P_{CS} меняет знак на отрицательный. На вставке к рис. 4 показана зависимость степени циркулярной поляризации от магнитного поля для структуры с отрицательной поляризацией (образец 4). Видно, что ферромагнитная часть P_C , обуславливающая быстрый рост в малом магнитном поле, имеет обратный знак по сравнению

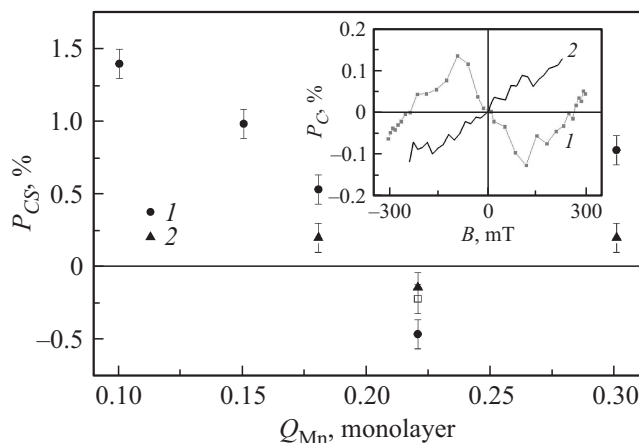


Рис. 4. Зависимость степени циркулярной поляризации ЭЛ от концентрации Mn в исследованных структурах: 1 — структуры с покровным слоем GaAs : Zn (образцы 6–10), 2 — структуры без дополнительных легированных слоев (образцы 1–5). На вставке: зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ для образца 4 от магнитного поля при температурах 10 (1) и 50 К (2).

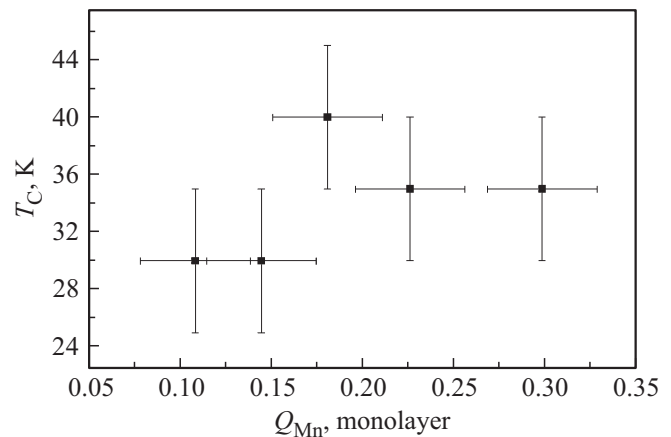


Рис. 5. Зависимость оценочного значения температуры Кюри от содержания Mn в δ -слое для структур 6–10 с покровным слоем GaAs : Zn.

с зависимостью, показанной на рис. 2. Знак слагаемого, обусловленного зеемановским расщеплением уровней, для всех структур одинаков: в магнитном поле > 100 мТл компонента степени поляризации, связанная с зеемановским расщеплением, становится сравнимой по величине, а затем и выше ферромагнитной компоненты, при этом значение P_C меняет знак на положительный. При достижении температуры Кюри (когда ферромагнитная составляющая становится равной нулю) значение P_C также становится положительным во всем диапазоне магнитных полей (вставка к рис. 4, кривая 2). Сохранение знака зеемановского расщепления независимо от параметров структур является ожидаемым результатом, поскольку величина зеемановского расщепления уровней, согласно [18], определяется только приложенным магнитным полем и величиной фактора Ландэ для квантовой ямы. Для структуры с содержанием Mn $Q_{Mn} = 0.3$ МС зарегистрировано положительное значение P_{CS} , как и для структур с меньшим содержанием Mn. Значение степени поляризации по абсолютной величине также несколько повышается для структуры с содержанием Mn $Q_{Mn} = 0.3$ МС относительно структур с $Q_{Mn} = 0.22$ МС.

На рис. 5 представлена зависимость оценочного значения температуры Кюри в исследованных структурах от содержания Mn. Видно, что изменение T_C для различных структур не выходит за пределы погрешности измерений; следовательно, можно заключить, что значение температуры Кюри слабо зависит от содержания Mn. Подобный вывод не согласуется с моделью [14–16], что, вероятно, обусловлено влиянием других ростовых параметров на температуру Кюри. Это может быть проиллюстрировано представленной на рис. 6 зависимостью оценочного значения точки Кюри исследованных структур от измеренной слоевой концентрации дырок. С учетом высокого значения погрешности при таком способе оценки, а также с учетом технологи-

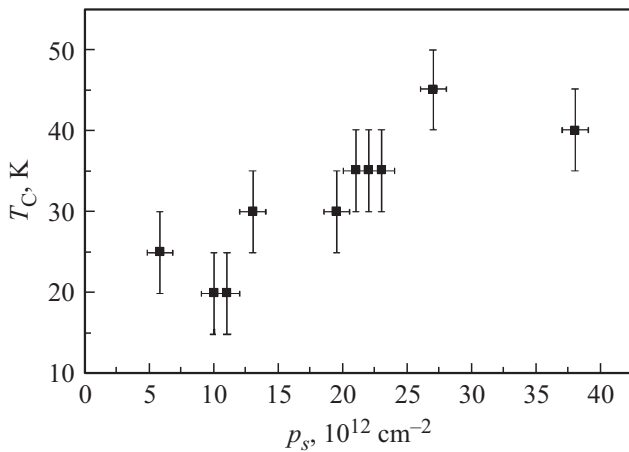


Рис. 6. Значения температуры Кюри исследованных структур для различных значений слоевой концентрации дырок.

ческого разброса структур с близкими значениями p_s общей тенденцией является увеличение температуры Кюри с повышением слоевой концентрации дырок в структурах.

5. Обсуждение результатов

Возможные механизмы, обуславливающие циркулярно-поляризованную люминесценцию структур в магнитном поле, рассмотрены в ряде работ [4,7,11–16]. Согласно [4,7,12,14–16], циркулярная поляризация обусловлена обменным взаимодействием ионов Mn и дырок в квантовой яме. Обменное взаимодействие приводит к расщеплению по спину в магнитном поле дырочных уровней в КЯ. В результате преимущественного заполнения уровней с „основным“ спином возникает спиновая поляризация дырок и циркулярная поляризация рекомбинационного излучения с участием дырок [4,7,8]. Для описания обменного взаимодействия в полупроводниках GaMnAs используется модель Руддермана–Киттеля–Касуи–Йосиды, согласно которой потенциал обменного взаимодействия описывается как [8,19,20]

$$J_{ex} = j_{p-d}^2 \frac{\mu_0 m^* k_f^4}{\pi^3 h^2} (k_f r). \quad (4)$$

Здесь μ_0 — магнитная восприимчивость, m^* — эффективная масса дырок, h — постоянная Планка, k_f — волновой вектор дырок на уровне Ферми, величина r в нашем случае соответствует расстоянию между квантовой ямой и δ -слоем Mn, $F(x) = (\sin x - x \cos x)/x^4$, j_{p-d} — константа обменного взаимодействия, определяемая для дырок формулой из [8,19,20]

$$j_{p-d} = N_0 \beta \sum \int (\hat{j} \times \hat{S}_n) |\psi_h(r)|^2 \delta(r - R_n) d^3 r, \quad (5)$$

где S_n — спиновый оператор иона Mn в позиции R_n , $N_0 \beta$ — параметр обменного взаимодействия для дырок,

ψ_h — волновая функция дырок, суммирование в (5) идет по всем позициям R_n ионов Mn в положении Ga.

Энергия обменного взаимодействия определяется в том числе концентрацией дырок. При удалении дырок из структуры в (Ga,Mn)As существенно уменьшается температура Кюри, согласно [21]. Отсутствием ферромагнитного упорядочения можно объяснить значительное снижение степени циркулярной поляризации в структурах с низкой концентрацией дырок (таблица). В случае сравнительно высокой концентрации дырок ферромагнитное упорядочение δ -слоя обуславливает циркулярно-поляризованную люминесценцию, однако значение P_{CS} зависит от большого количества параметров [6,7,11], поэтому однозначной связи степени циркулярной поляризации с концентрацией дырок из полученных экспериментальных данных установить невозможно.

Согласно [8], волновой вектор дырок на уровне Ферми $k_f \propto p^{1/3}$ (p — концентрация дырок). Энергия обменного взаимодействия растет с увеличением концентрации примеси и концентрации дырок. В [14–16] было теоретически предсказано, что точка Кюри $T_C \propto N_{Mn} p^{1/3}$ [8,14,16]. В исследованных структурах было получено, что значение T_C слабо зависит от содержания Mn, а концентрация дырок из-за дополнительного легирования цинком изменяется незначительно. В то же время для структур с отличающейся концентрацией дырок зарегистрирована тенденция к повышению температуры Кюри с увеличением p_s (рис. 6). Отметим, что сопоставление результата с теоретической формулой $T_C \propto N_{Mn} p^{1/3}$ затруднительно в силу высокого значения погрешности, а также в силу некоторого уменьшения концентрации дырок при охлаждении до 10 К. Расчет p_s при температуре 10 К затруднителен из-за вклада аномального эффекта Холла [6].

В наибольшей степени подлежит дискуссии вопрос интерпретации зависимости $P_{CS}(Q_{Mn})$, показанной на рис. 4. Несмотря на то что малое число экспериментальных точек справа от точки минимума не позволяет сделать однозначных выводов о характере зависимости при $Q_{Mn} \geq 0.3 \text{ MC}$, наблюдается устойчивая картина, связанная со сменой знака степени циркулярной поляризации для структур с содержанием марганца 0.22 MC. Варьирование концентрации дырок при этом лишь изменяет абсолютное значение P_{CS} . Изменение знака степени циркулярной поляризации соответствует изменению характера обменного взаимодействия с ферромагнитного на антиферромагнитный. Подобный эффект наблюдался в работе [22] для слоев (Ga,Mn)As. В цитированной работе показано изменение знака константы $N_0 \beta$ в зависимости от электронной конфигурации марганца (ионизованный акцептор/нейтральный акцептор), которой управляли с помощью дополнительного легирования донорными или акцепторными примесями.

В случае исследованных нами структур к изменению знака P_C приводит не дополнительное легирование акцепторной примесью, а варьирование концентрации Mn. Можно предположить, что изменение концентрации

аналогично [22] приводит к изменению электронной конфигурации примеси Mn в GaAs, которая управляет знаком $N_0\beta$.

6. Заключение

Таким образом, в работе исследована зависимость параметров циркулярной поляризации электролюминесценции гетероструктур с квантовой ямой и ферромагнитным δ -слоем Mn от содержания Mn в δ -слое и слоевой концентрации дырок. Обнаружено монотонное увеличение степени циркулярной поляризации ЭЛ и температуры Кюри ферромагнитной структуры при увеличении концентрации дырок. Зарегистрировано изменение знака степени циркулярной поляризации ЭЛ для содержания Mn в структуре, равного 0.22 МС. Полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены с точки зрения модели обменного взаимодействия между ионами Mn в δ -слое и дырками в квантовой яме. Найденные экспериментальные зависимости могут быть использованы для управления циркулярно-поляризованной электролюминесценцией в исследованных структурах.

Работа выполнена в рамках реализации гос. задания (№ 8.1054.2014/К и № 3.285.2014/К) Минобрнауки России и при поддержке РФФИ (№ 15-02-07824_а, 14-07-31280_мол_а).

Список литературы

- [1] N. Dai, H. Luo, F.C. Zhang, N. Samarth, M. Dobrowolska, J.K. Furdyna. *Phys. Rev. Lett.*, **67** (27), 3824 (1991).
- [2] I.A. Buyanova, G.Yu. Rudko, W.M. Chen, A.A. Toropov, S.V. Sorokin, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 1700 (2003).
- [3] R.C. Myers, A.C. Gossard, D.D. Awschalom. *Phys. Rev. B*, **69**, 161 305(R) (2004).
- [4] M.V. Dorokhin, Yu.A. Danilov, P.B. Demina, V.D. Kulakovskii, O.V. Vikhrova, S.V. Zaitsev, B.N. Zvonkov. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 24 (2008).
- [5] В.Л. Коренев. *Письма ЖЭТФ*, **78** (9), 1053 (2003).
- [6] О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, И.Л. Калентьева, А.В. Кудрин. *Письма ЖТФ*, **35** (14), 8 (2009).
- [7] М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, А.С. Бричкин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, В.Д. Кулаковский, М.М. Прокофьева, А.Е. Шолина. *ФТТ*, **52** (11), 2147 (2010).
- [8] T. Hartmann, S. Ye, P.J. Klar, W. Heimbrodt, M. Lampalzer, W. Stolz, T. Kurz, A. Loidl, H.-A. Krug von Nidda, D. Wolfverson, J.J. Davies, H. Overhof. *Phys. Rev. B*, **70**, 233 201 (2004).
- [9] F. Matsukura, H. Ohno, T. Dietl. *III-V Ferromagnetic Semiconductors. Handbook of Magnetic Materials*. V. 14, ed. by K.H.J. Buschow (Elsevier, 2002) v. 1, p. 1.
- [10] Y. Nishitani, D. Chiba, M. Endo, M. Sawicki, F. Matsukura, T. Dietl, H. Ohno. *Phys. Rev. B*, **81**, 045 208 (2010).
- [11] 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).
- [12] I.V. Rozhansky, N.S. Averkiev, I.V. Krainov, E. Lachderanta. *Physica Status Solidi A*, **211** (5), 1048 (2014).
- [13] 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. *Оптич. журн.*, **757** (6), 56 (2008).
- [14] K.M. Yu, W. Walukiewicz, T. Wojtowicz, I. Kuryliszyn, X. Liu, Y. Sasaki, J.K. Furdyna. *Phys. Rev. B*, **65**, 201 303(R) (2002).
- [15] J. Blinowski, P. Kacman. *Phys. Rev. B*, **67**, 121 204(R) (2003).
- [16] T. Jungwirth, J. Sinova, J. Masek, J. Kucera, A.H. MacDonald. *Rev. Mod. Phys.*, **78**, 822 (2006).
- [17] D.K. Young, J.A. Gupta, E. Johnston-Halperin, R. Epstein, Y. Kato, D.D. Awschalom. *Semicond. Sci. Technol.*, **17**, 275 (2002).
- [18] U. Bockelmann, W. Heller, G. Abstreiter. *Phys. Rev. B*, **55**, 4469 (1997).
- [19] A.O. Govorov, A.V. Kalameitsev. *Phys. Rev. B*, **71**, 035 338 (2005).
- [20] T. Jungwirth, K.Y. Wang, J. Mašek, K.W. Edmonds, J. König, J. Sinova, M. Polini, N.A. Goncharuk, A.H. MacDonald, M. Sawicki, A.W. Rushforth, R.D. Champion, L.X. Zgao, C.T. Foxon, B.L. Gallagher. *Phys. Rev. B*, **72**, 165 204 (2005).
- [21] Y. Nishitani, D. Chiba, M. Endo, M. Sawicki, F. Matsukura, T. Dietl, H. Ohno. *Phys. Rev. B*, **81**, 045 208 (2010).
- [22] Th. Hartmann, S. Ye, P.J. Klar, W. Heimbrodt, M. Lampalzer, W. Stolz, T. Kurz, A. Loidl, H.-A. Krug von Nidda, D. Wolfverson, J.J. Davies, H. Overhof. *Phys. Rev. B*, **70**, 233 201 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

Influence of dopants concentration on luminescent properties of InGaAs light-emitting diodes with Mn δ -layer

A.V. Rykov, M.V. Dorokhin, E.I. Malysheva, P.B. Demina, O.V. Vikhrova, A.V. Zdoroveishev

Research Institute for Physics and Technology, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Luminescent properties of light-emitting diodes based on InGaAs/GaAs heterostructures with Mn-doped films were investigated. Temperature dependencies of circular polarization degree were obtained as a function of such technological parameters, as amount of Mn and hole concentration. Circular polarization degree and Curie temperature were found to be monotonically increasing functions of hole concentration. Sign inversion of circular polarization degree was discovered on the certain level of Mn concentration. Experimental results were explained in terms of known theories of ferromagnetism for ferromagnetic semiconductors.