

Для цитирования: Дмитриев А.И. Физическое кодирование данных с помощью поляризационных спиновых устройств. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2): 46-54. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-46-54

For citation: Dmitriev A.I. Physical data coding using polarising spin devices. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2): 46-54. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-46-54

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 004

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-46-54

ФИЗИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СПИНОВЫХ УСТРОЙСТВ

Дмитриев А.И.

Российский университет транспорта (МИИТ)

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр.9, Россия

e-mail: alex-dmitriev2005@yandex.ru

Резюме: Цель. Спиновая наноэлектроника позволяет реализовать принципиально новые способы кодирования и шифрования информации при помощи спинов фотонов в волоконно-оптических линиях передачи данных. **Цель.** В статье обсуждается возможность создания спинового светодиода, излучающего циркулярно-поляризованный свет. **Метод.** В спиновом светодиоде спин-поляризованные носители инжектируются из ферромагнитного контакта, объединенного с квантовой ямой. **Результат.** Квантовые правила отбора, описывающие рекомбинацию, устанавливают связь между циркулярной поляризацией света, испускаемого вдоль нормали к поверхности, и спиновой поляризацией электронов. **Вывод.** Сформулированы физические методы кодирования и передачи информации с помощью поляризационных спиновых устройств, использующих спиновую степень свободы. Предложены принципы устройства генератора поляризованного излучения – спинового светодиода. В его основе лежит гетероструктура, содержащая квантовую яму InGaAs/GaAs (люминесцирующий слой) и ферромагнитный слой GaMnAs. Установлено, что линия излучения квантовой ямы расщеплена на две циркулярно-поляризованные компоненты, что открывает новые возможности кодирования и передачи информации в волоконно-оптических линиях передачи данных методами поляризационной модуляции. Циркулярная поляризация фотолюминесценции из квантовой ямы InGaAs/GaAs вызвана намагниченностью близкого ферромагнитного слоя GaMnAs.

Благодарности. Автор признателен сотрудникам НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского Ю.А. Данилову и М.В. Дорохину за образцы, сотруднику ИФТТ РАН С.В. Зайцеву за оптические измерения, сотруднику Российского университета транспорта (МИИТ) В.П. Соловьеву за полезные обсуждения. Работа частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 16-07-00863а и грантом Президента РФ МК-5754.2016.3.

Ключевые слова: гетероструктуры разбавленных магнитных полупроводников GaAs:Mn, спинтроника, спиновый светодиод, циркулярно-поляризованный свет

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING
PHYSICAL DATA CODING USING POLARISING SPIN DEVICES

Aleksey I. Dmitriev

Russian University of Transport (RUT - MIIT)
9b9 Obrazcova Str., Moscow 127994, Russia,
e-mail: alex-dmitriev2005@yandex.ru

Abstract Objectives Spin nanoelectronics facilitate fundamentally new ways of encoding and encrypting information implemented using photon spins in fibre-optic data transmission lines. The article discusses the possibility of creating a spin LED emitting circularly polarised light. **Methods** In a spin LED, spin-polarised carriers are injected from a ferromagnetic contact combined with a quantum well. **Results** Quantum selection rules for describing recombination establish a connection between the circular polarisation of light, emitted along the normal to the surface, and the spin polarisation of the electrons. **Conclusion** Physical methods for coding and transmitting information by means of polarised spin devices using the spin degree of freedom are formulated. The configuration principles of a polarised radiation generator (spin LED) are proposed. The approach is based on a heterostructure containing the quantum well InGaAs / GaAs (luminescent layer) and the ferromagnetic layer GaMnAs. It is established that the quantum well emission line is split into two circularly polarised components, which opens up new possibilities for coding and transmission of information in fibre-optic data transmission lines by the methods of polarisation modulation. The circular polarisation of the photoluminescence from the InGaAs / GaAs quantum well is caused by the magnetisation of a nearby ferromagnetic GaMnAs layer.

Acknowledgments The author is grateful to the employees of NIFTI UNN named after N.I. Lobachevsky Yu.A. Danilov and M.V. Dorokhin for samples, the employee of ISSP RAS S.V. Zaitsev for optical measurements, the employee of the Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) V.P. Solov'ev for useful discussions. The work is partially supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research No. 16-07-00863a and the RF President's grant MK-5754.2016.3.

Keywords: heterostructures of diluted magnetic GaAs: Mn semiconductors, spintronics, spin LED, circularly polarised light

Введение. В настоящее время одной из основных задач технологии элементов вычислительной электроники является увеличение скорости передачи данных. Пропускная способность современных каналов передачи данных, работающих на традиционных принципах, таких как передача радиочастотных импульсов или электромагнитных волн, сейчас достигает своего теоретического предела. Выходом из сложившейся ситуации является создание каналов передачи данных, основанных на новых принципах, использующих спиновую степень свободы.

Одним из способов решения этой проблемы является создание приборов спинтроники, в которых для управления их свойствами помимо заряда электрона используется его спин.

В основе спинтронных приборов лежат наноструктуры магнитных полупроводников SiMn [1], GeMn [2, 3], GeCo [4], GaMnAs [5] и т.д. В основе спиновых светодиодов могут быть гетероструктуры, содержащие квантовую яму (люминесцирующий слой) и ферромагнитный слой. В спиновом светодиоде спин-поляризованные носители инжектируются из ферромагнитного контакта, объединенного с квантовой ямой. Квантовые правила отбора, описывающие рекомбинацию, а также закон сохранения момента импульса устанавливают связь между циркулярной поляризацией света, испускаемого вдоль нормали к поверхности, и спиновой поляризацией электронов. В условиях поляризованного излучения кодирование информации можно осуществлять не за счет модуляции интенсивности излучения, а модулируя оптическую поляризацию. При этом σ^+ -поляризованному излучению ставится в соответствие «1», σ^- -поляризованному излучению – «1».

Постановка задачи. Гетероструктуру с ферромагнитным слоем и квантовой ямой можно осуществить двумя способами: ферромагнитный слой вырастить непосредственно в квантовой яме (совместное легирование); ферромагнитный слой вырастить на некотором расстоянии от квантовой ямы (раздельное легирование).

В первом случае, при наложении внешнего поля ферромагнитный слой в квантовой яме будет намагничиваться, то есть, в самой яме появится избыток носителей заряда, имеющих ориентацию спина в заданном направлении. Это действительно приведет к тому, что излучение из ямы станет циркулярно-поляризованным (будет иметь ненулевую круговую поляризацию) и поляризация фотолюминесценции из квантовой ямы действительно будет зависеть от намагничивания магнитного слоя [6]. Однако само по себе введение магнитного слоя в квантовую яму существенно снижает квантовый выход фотолюминесценции из ямы и подвижность носителей заряда в квантовой яме [7]. То есть в гетероструктурах с магнитным слоем внутри квантовой ямы получение магнито-управляемого циркулярно-поляризованного излучения теоретически возможно, но квантовый выход фотолюминесценции из ямы и подвижность носителей заряда в квантовой яме будут очень низкими.

В случае, когда магнитный слой и квантовая яма отделены друг от друга, квантовый выход фотолюминесценции и подвижность носителей заряда в квантовой яме существенно возрастают (из-за отсутствия рассеяния носителей заряда на положительных ионах ферромагнитной примеси).

Таким образом, основным преимуществом раздельного легирования марганцем в гетероструктурах является отсутствие гашения фотолюминесценции квантовой ямы с увеличением концентрации марганца. Это даёт возможность одновременного исследования магнитных и фотолюминесцентных свойств гетероструктур, содержащих квантовую яму и магнитный слой с высокой концентрацией ионов марганца. Однако отсутствие гашения люминесценции – не единственное положительное отличие гетероструктур, полученных методом раздельного легирования.

Как известно, арсенид галлия имеет очень высокую ($\sim 8000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) подвижность электронов по сравнению с кремнием и германием. В то же время ферромагнетизм носителей заряда в квантовой яме определяется косвенным обменным взаимодействием спинов ионов марганца и через спины дырок в квантовой яме. Подвижность дырок в арсениде галлия составляет ($\sim 400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), что меньше, чем в кремнии ($\sim 450 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$). Совместное легирование квантовой ямы дельта-слоем марганца приводит к дополнительному уменьшению подвижности дырок в квантовой яме из-за рассеяния носителей заряда на положительных ионах марганца. Это делает гетероструктуры с совместным легированием квантовой ямы магнитной примесью абсолютно непригодными как для оптики, так и для спинтроники. Совсем иная ситуация возникает в случае раздельного легирования марганцем. В этом случае марганец не только не подавляет фотолюминесценцию и не уменьшает подвижность дырок в квантовой яме, но и ещё служит акцептором для электронов в гетероструктуре, а, следовательно, и донором дырок. При раздельном легировании марганец отделён от квантовой ямы слоем чистого арсенида галлия, толщиной 3 нм. Такой толщины достаточно, чтобы полностью исключить процессы диффузии марганца в квантовую яму.

В то же время, дырки, полученные из дельта-слоя марганца, являясь всего лишь вакантными местами для электронов, и не являясь атомами или молекулами, смогут свободно двигаться по гетероструктуре и попадать в квантовую яму, занимая наиболее выгодное положение по энергии. При раздельном легировании марганец не уменьшает подвижность носителей заряда в квантовой яме. Поэтому гетероструктуры, содержащие квантовую яму и магнитный слой, полученные методом раздельного легирования, представляют большой интерес, как с точки зрения магнитных и оптических свойств, так и с точки зрения взаимосвязи между ними.

Методы исследования. В России гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs для поляризационных спиновых кодирующих устройств выращивают комбинированным методом ступенчатого эпитаксиального роста в НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского в группе Ю.А. Данилова и

М.В. Дорохина [8-10]. На первом этапе на подложке GaAs (001) методом металл-органической гидридной эпитаксии последовательно выращивают буферный слой GaAs, легированный Si, далее размещается дельта-легированный углеродом слой GaAs, затем идет слой нелегированного GaAs, нелегированная квантовая яма InGaAs и, наконец, разделяющий слой GaAs (рис. 1).

На следующем этапе в том же реакторе методом лазерного распыления Mn и GaAs мишеней последовательно выращивают слой GaMnAs, толщиной около 2 нм, и покровный слой GaAs. Подробно методика изготовления и аттестации гетероструктур описана в работах [8-10].

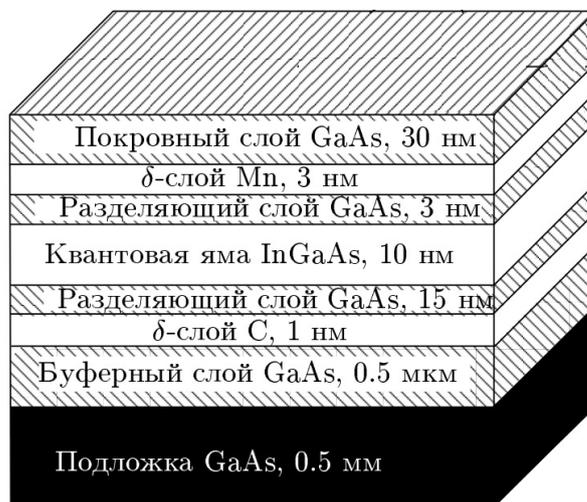


Рис. 1. Схематическое изображение гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs

Fig. 1. Schematic representation of the InGaAs / GaAs / GaMnAs heterostructure

Следует заметить, что если для светоизлучающего слоя используется в основном только GaAs, InAs, InGaAs и изредка CdSe, то материалы для ферромагнитного инжектора отличаются большим разнообразием. Из группы магнитных полупроводников помимо GaMnAs используются также ZnMnSe и CdCr₂Se₄ [11]. Также используются ферромагнитные металлы Co, Fe, CoFe, NiFe-CoFe, Ni₈₀Fe₂₀, MnAs, MnSb и сплавы Гейслера Co_{2.4}Mn_{1.6}Ga и Co₂MnGe [11].

Обсудим температурную зависимость магнитного момента гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs, измеренную с помощью СКВИД магнитометра MPMS 5 XL, Quantum Design (рис. 2). Уменьшение намагниченности слоя GaMnAs с ростом температуры, как и в обычных объемных ферромагнетиках, описывается формулой Блоха (рис. 2) при температурах ниже температуры Кюри $T_C = 35$ К [11].

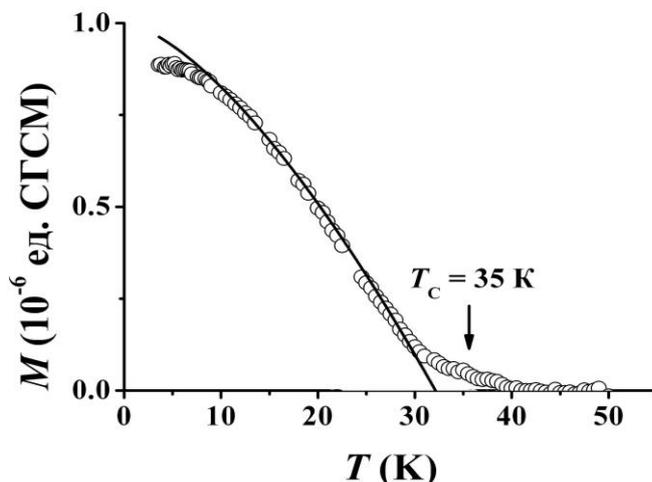


Рис. 2. Температурная зависимость магнитного момента гетероструктуры In-

GaAs/GaAs/GaMnAs в магнитном поле 1 кЭ, лежащем в плоскости гетероструктуры
Fig. 2. Temperature dependence of the magnetic moment of the In-GaAs / GaAs / GaMnAs
heterostructure in a 1 ke magnetic field lying in the heterostructure plane

Сплошной линией показана аппроксимация формулой Блоха « $T^{3/2}$ ». Справедливость формулы Блоха для температурной зависимости магнитного момента свидетельствует о возможности ее описания с помощью представлений о намагниченности объемных упорядоченных ферромагнетиков.

Анализ температурной зависимости магнитного момента позволили определить микроскопические параметры спиновой системы ферромагнитного слоя GaMnAs: спин-волновой параметр $\sim 5.3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-3/2}$, коэффициент спин-волновой жесткости $\sim 0.36 \cdot 10^{-9} \text{ Э} \cdot \text{см}^2$ и обменный интеграл $\sim 0.18 \text{ мэВ}$. Полученные значения близки к соответствующим значениям в тонких пленках GaMnAs толщиной 50 – 330 нм, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [12-13].

Обсудим методы исследования спин-поляризованной фотолюминесценции. На рис. 3 представлены спектры фотолюминесценции гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs в магнитном поле 50 кЭ и при температурах 2 К. Измерения циркулярно-поляризованной фотолюминесценции, выполнены в ИФТТ РАН С.В. Зайцевым в криостате со сверхпроводящим магнитом. Измерения проводились в геометрии Фарадея (магнитное поле было приложено перпендикулярно поверхности структур).

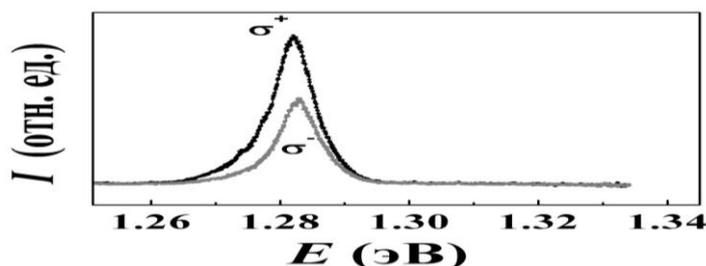


Рис.3. Спектры фотолюминесценции гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs при $T = 2$ К в магнитном поле 50 кЭ

Fig.3. The photoluminescence spectra of the InGaAs / GaAs / GaMnAs heterostructure at $T = 2$ K in a magnetic field of 50 ke

Для возбуждения использовался He-Ne лазер. Оптическая схема состояла из набора оптических элементов (диафрагма и линза), позволяющих создать плоскопараллельный пучок света, а также анализатора (четвертьволновой пластинки и поляризатора).

Анализ σ^+ или σ^- поляризации излучения проводился путем вращения четвертьволновой пластинки, при этом ось поляризации поляризатора всегда была направлена параллельно плоскости дифракционной решетки монохроматора. После анализатора линейно-поляризованное излучение соответствующее либо σ^+ , либо σ^- поляризации фокусировалось на щель монохроматора и затем попадало на Si ПЗС-детектор. Степень циркулярной поляризации люминесценции определялась из соотношения $P_{\phi/L} = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-)$, где $I_+(I_-)$ – интенсивности компонент с правой (левой) поляризацией, полученные путем интегрирования полосы соответствующей части спектра межзонного излучения квантовой ямы. Как и ожидалось линия излучения квантовой ямы расщеплена на две циркулярно-поляризованные компоненты (σ^+ и σ^-) вследствие зеемановского расщепления спиновых уровней носителей заряда. Степень циркулярной поляризации имеет положительный знак и превышает 20 %.

Обсуждение результатов. Марганец в чистом виде является парамагнетиком, а арсенид галлия – диамагнетиком. Однако если марганец добавлен в арсенид галлия в качестве примеси, то его магнитные свойства существенно меняются. В частности, тонкий слой сплава арсенида галлия с марганцем GaMnAs при высокой (~ 10 %) концентрации марганца проявляет ферромагнитные свойства [14-15]. Ферромагнетизм в магнитных полупроводниках A^3MnB^5 индуцирован носителями заряда (косвенное обменное взаимодействие). Для описания ферромагнетизма используется модель среднего поля, которая постулирует наличие двух взаимодействующих спиновых подсистем: спины делокализованных носителей заряда; локализованные спины магнитных атомов.

Ферромагнетизм описывается следующим образом. Конечное значение намагниченности создаёт расщепление в валентной зоне и уменьшает энергию носителей. Та же самая намагниченность увеличивает свободную энергию подсистемы локализованных спинов, но этот проигрыш в свободной энергии уменьшается при понижении температуры. При температуре ферромагнитного перехода эти две энергии сравниваются, и дальнейшее уменьшение температуры ведет к спонтанному спиновому расщеплению и к поляризации спинов, т.е. к ферромагнетизму. Что касается параметров тонких пленок (слоев) GaMnAs, при которых удастся наблюдать ферромагнитное взаимодействие между ионами марганца, то в работе [15] было установлено, что существует оптимальное содержание марганца (0.05 – 0.06 атомных долей), при котором формируются пленки, в которых заметная доля атомов Mn замещает Ga, выступая в качестве акцепторов. При большем содержании Mn наблюдаются эффекты образования кластеров MnAs, а главное, заметная часть дополнительно введенных атомов Mn начинает входить в междоузлия, где они выступают в качестве двойных доноров, приводя к уменьшению концентрации дырок и снижению температуры Кюри [15-16]. Связано это с тем, что ферромагнитное упорядочение в обсуждаемых разбавленных магнитных полупроводниках возможно лишь в результате косвенного обмена через свободные дырки (либо дырки примесной зоны). Поэтому уменьшение концентрации носителей приводит к подавлению в них ферромагнетизма [15-16].

Обсудим результаты исследования спин-поляризованной фотолюминесценции. Наиболее вероятными фотолюминесцентными электронными переходами являются переходы из зоны проводимости в валентную подзону тяжелых дырок (рис. 4).

Для описания этих переходов принята следующая модель:

- а) при переходе электрона из зоны проводимости в валентную зону в зоне проводимости InGaAs исчезает 1 электрон, в валентной зоне InGaAs исчезает 1 дырка;
- б) в результате перехода излучается фотон: его спин равен +1 или -1;
- в) при переходе электрона из зоны проводимости в валентную зону (или, что то же самое, рекомбинации электрона и дырки) суммарный спин системы сохраняется.

Циркулярно-поляризованное рекомбинационное излучение возникает, когда изменение магнитного квантового при межзонном переходе $\Delta m_j = \pm 1$. Переходы, для которых $\Delta m_j = -1$, приводят к эмиссии σ^+ -поляризованного света при распространении вдоль направления +z [8].

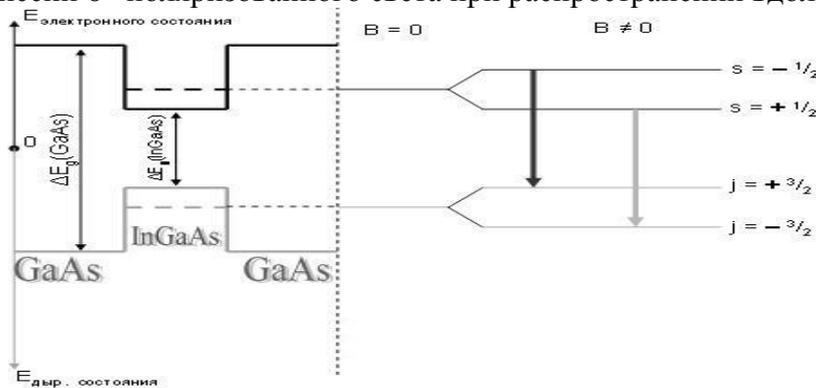


Рис. 4. Зонная диаграмма двойной гетероструктуры GaAs/InGaAs с квантовой ямой и схема возможных излучательных электронных переходов при наложении внешнего магнитного поля

Fig.4. The band diagram of the double GaAs / InGaAs heterostructure with a quantum well and the scheme of possible radiative electronic transitions when an external magnetic field is applied

Спектр излучения гетероструктуры с квантовой ямой, помещенной в магнитное поле, состоит из двух циркулярно-поляризованных компонент, различных по знаку поляризации, но одинаковых по интенсивности. Результат сложения σ^+ и σ^- компонент одинаковой интенсивности – линейно поляризованный свет (с нулевой циркулярной поляризацией).

В гетероструктурах без ферромагнитного слоя GaMnAs циркулярная поляризация излучения из квантовой ямы равна нулю [6]. Для получения циркулярно-поляризованного излучения необходимо изменить соотношение интенсивностей σ^+ и σ^- компонент. Этого можно добиться, введя в гетероструктуру, содержащую квантовую яму, слой ферромагнитного полупро-

водника GaMnAs. Обменное p - d взаимодействие тяжелой дырки с ионами Mn^{2+} в слое GaMnAs пропорционально скалярному произведению магнитного момента дырки \mathbf{j} и макроскопической намагниченности \mathbf{M} слоя GaMnAs [17]. Упругие напряжения в квантовой яме InGaAs/GaAs вытесняют уровень размерного квантования легких дырок значительно выше по энергии, чем уровень тяжелых дырок [18]. Поэтому фотолюминесценция из квантовой ямы определяется оптическими переходами между 2D-подзонами электронов и тяжелых дырок.

Циркулярная поляризация фотолюминесценции из квантовой ямы InGaAs/GaAs вызвана намагниченностью близкого ферромагнитного слоя GaMnAs (ферромагнетизм в слое GaMnAs приводит к спиновой поляризации дырок в квантовой яме [5]).

Вывод. Сформулированы физические методы кодирования и передачи информации с помощью поляризационных спиновых устройств, использующих спиновую степень свободы. Предложены принципы устройства генератора поляризованного излучения – спинового светодиода. В его основе лежит гетероструктура, содержащая квантовую яму InGaAs/GaAs (люминесцирующий слой) и ферромагнитный слой GaMnAs.

Установлено, что линия излучения квантовой ямы расщеплена на две циркулярно-поляризованные компоненты, что открывает новые возможности кодирования и передачи информации в волоконно-оптических линиях передачи данных методами поляризационной модуляции. Циркулярная поляризация фотолюминесценции из квантовой ямы InGaAs/GaAs вызвана намагниченностью близкого ферромагнитного слоя GaMnAs.

Автор признателен сотрудникам НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского Ю.А. Данилову и М.В. Дорохину за образцы, сотруднику ИФТТ РАН С.В. Зайцеву за оптические измерения, сотруднику Российского университета транспорта (МИИТ) В.П. Соловьеву за полезные обсуждения. Работа частично поддержана грантом РФФИ № 16-07-00863а и грантом Президента РФ МК-5754.2016.3.

Библиографический список:

1. Николаев С. Н., Аронзон Б. А., Рыльков В. В., Тугушев В. В., Демидов Е. С., Левчук С. А., Лесников В. П., Подольский В. В., Гареев Р. Р. Аномальный эффект Холла в Si пленках, сильно легированных Mn // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 89. – № 12. – С. 707-712.
2. Дмитриев А. И., Моргунов Р. Б., Казакова О. Л., Танимото И. Спин-волновой резонанс в пленках $Ge_{1-x}Mn_x$, обладающих перколяционным ферромагнетизмом // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 135. – № 5. – С. 1134-1141.
3. Моргунов Р. Б., Дмитриев А. И., Tanimoto Y., Кленина И. Б. Магнитный резонанс в нанопроволоках $Ge_{0.99}Mn_{0.01}$ // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49. – № 2. – С. 285-290.
4. Моргунов Р. Б., Дмитриев А. И., Tanimoto Y., Kulkarni J. S. Спиновая динамика в ориентированных ферромагнитных нанопроволоках $Ge_{0.99}Co_{0.01}$ // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50. – № 6. – С. 1058-1063.
5. Дмитриев А. И., Таланцев А. Д., Зайцев С. В., Данилов Ю. А., Дорохин М. В., Звонков Б. Н., Коплак О. В., Моргунов Р. Б. Фотолюминесцентный отклик квантовой ямы на изменение магнитного поля δ -слоя Mn в гетероструктурах InGaAs/GaAs // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2011. – Т. 140. – № 1. – С. 158-169.
6. Зайцев С. В., Дорохин М. В., Бричкин А. С., Вихрова О. В., Данилов Ю. А., Звонков Б. Н., Кулаковский В. Д. Ферромагнитное воздействие δ -<Mn>-слоя в GaAs барьере на спиновую поляризацию носителей в InGaAs/GaAs квантовой яме // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 90. – № 10. – С. 730-735.
7. Аронзон Б. А., Грановский А. Б., Давыдов А. Б., Данилов Ю. А., Звонков Б. Н., Рыльков В. В., Ускова Е. А. Свойства InGaAs/GaAs квантовых ям с δ -легированным слоем в GaAs // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49. – № 1. – С. 165-171.
8. Дорохин М. В., Данилов Ю.А. Измерение поляризационных характеристик излучения наногетероструктур: учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011.
9. Вихрова О. В., Данилов Ю. А., Дроздов Ю. Н., Звонков Б. Н., Iikawa F., Brasil M. J. S. P. Свойства квантово-размерных структур GaAs/InGaAs, содержащих δ -<Mn>-легированные слои

// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2007. – № 2. – С. 9-12.

10. Вихрова О. В., Данилов Ю. А., Дорохин М. В., Звонков Б. Н., Калентьева И. Л., Кудрин А. В. Ферромагнетизм в GaAs структурах с дельта-легированным Mn слоем // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 35. – № 14. – С. 8-17.
11. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – V. 40. – N 2. – P. R179-R203.
12. Sperl M., Singh A., Wurstbauer U., Das S. K., Sharma A., Hirmer M., Nolting W., Back C. H., Wegscheider W., Bayreuther G. Spin-wave excitations and low-temperature magnetization in the dilute magnetic semiconductor (Ga,Mn)As // Phys. Rev. B. – 2008. – V. 77. – N 12. – P. 125212-1-7.
13. Goennenwein S. T. B., Graf T., Wassner T. Brandt M. S., Stutzmann M., Philipp J. B., Gross R., Krieger M., Zürn K., Ziemann P., Koeder A., Frank S., Schoch W., Waag A. Spin wave resonance in Ga_{1-x}Mn_xAs // Appl. Phys. Lett. – 2003. – V. 82. – N 5. – P. 730-732
14. Macdonald A. H., Schiffer P., Samarth N. Ferromagnetic semiconductors: moving beyond (Ga,Mn)As // Nature materials. – 2005. – V. 4. – N 3. – P. 195-202.
15. Ohno H., Matsukura F. A ferromagnetic III-V semiconductor: (Ga,Mn)As // Solid State Commun. – 2001. – V. 117. – N 3. – P. 179-186.
16. Edmonds K. W., Boguslawski P., Wang K. Y., Champion R. P., Novikov S. N., Farley N. R. S., Gallagher B. L., Foxon C. T., Sawicki M., Dietl T., Nardelli M. B., Bernholc J. Mn Interstitial Diffusion in (Ga,Mn)As // Phys. Rev. Lett. – 2004. – V. 92. – N 3. – P. 037201-1-4.
17. Govorov A. O., Kalameitsev A. V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a single magnetic impurity: photoinduced spin orientation // Phys. Rev. B. – 2005. – V. 71. – N 3. – P. 035338-1-5.
18. Hendorfer G., Schneider J. G-factor and effective mass anisotropies in pseudomorphic strained layers // Sem. Sci. Technol. – 1991. – V. 6. – N 7. – P. 595-601.

References:

1. Nikolaev S.N., Aronzon B.A., Ryl'kov V.V., Tugushev V.V., Demidov E.S., Levchuk S.A., Lesnikov V.P., Podol'skiy V.V., Gareev R.R. Anomal'nyy effekt Kholla v Si plenkakh, sil'no legirovannykh Mn. Pis'ma v ZhTF. 2009;89(12):707-712. [Nikolaev S.N., Aronzon B.A., Ryl'kov V.V., Tugushev V.V., Demidov E.S., Levchuk S.A., Lesnikov V.P., Podol'skiy V.V., Gareev R.R. Abnormal Hall effect in heavily Mn-doped Si films. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters). 2009;89(12):707-712. (in Russ.)]
2. Dmitriev A.I., Morgunov R.B., Kazakova O.L., Tanimoto I. Spin-volnovoy rezonans v plenkakh Ge_{1-x}Mn_x, obladayushchikh perkolyatsionnym ferromagnetizmom. ZhTF. 2009;135(5):1134-1141. [Dmitriev A. I., Morgunov R. B., Kazakova O. L., Tanimoto I. Spin-wave resonance in percolating ferromagnetic Ge_{1-x}Mn_x films. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters). 2009;135(5):1134-1141. (in Russ.)]
3. Morgunov R.B., Dmitriev A.I., Tanimoto Y., Klenina I.B. Magnitnyy rezonans v nanoprovodokakh Ge_{0.99}Mn_{0.01}. Fizika tverdogo tela. 2007;49(2):285-290. [Morgunov R.B., Dmitriev A.I., Tanimoto Y., Klenina I.B. Magnetic resonance in Ge_{0.99}Mn_{0.01} nano-wires. Fizika tverdogo tela. 2007;49(2):285-290. (in Russ.)]
4. Morgunov R.B., Dmitriev A.I., Tanimoto Y., Kulkarni J.S. Spinovaya dinamika v orientirovannykh ferromagnitnykh nanoprovodokakh Ge_{0.99}Co_{0.01}. Fizika tverdogo tela. 2008;50(6):1058-1063. [Morgunov R.B., Dmitriev A.I., Tanimoto Y., Kulkarni J.S. Spin dynamics in oriented ferromagnetic Ge_{0.99}Co_{0.01} nano-wires. Fizika tverdogo tela. 2008;50(6):1058-1063. (in Russ.)]
5. Dmitriev A.I., Talantsev A.D., Zaytsev S.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Koplak O.V., Morgunov R.B. Fotolyuminescentnyy otklik kvantovoy yamy na izmenenie magnitnogo polya δ -sloya Mn v geterostrukturakh InGaAs/GaAs. ZhTF. 2011;140(1):158-169. [Dmitriev A.I., Talantsev A.D., Zaytsev S.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Koplak O.V., Morgunov R.B. Photoluminescence response of a quantum well onto Mn δ -layer magnetic field alteration in InGaAs/GaAs heterostructures. Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP). 2011;140(1):158-169. (in Russ.)]
6. Zaytsev S.V., Dorokhin M.V., Brichkin A.S., Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Zvonkov B.N., Kulakovskiy V.D. Ferromagnitnoe vozdeystvie δ -<Mn>-sloya v GaAs bar'ere na spinovuyu polarizatsiyu nositeley v InGaAs/GaAs kvantovoy yame. Pis'ma v ZhTF. 2009;90(10):730-735. [Zaytsev S.V., Dorokhin M.V., Brichkin A.S., Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Zvonkov B.N., Kulakovskiy V.D. Ferromagnetic

- impact of δ -Mn-layer in GaAs barrier onto carrier spin polarisation in InGaAs/GaAs quantum well. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters). 2009;90(10):730-735. (in Russ.)]
7. Aronzon B.A., Granovskiy A.B., Davydov A.B., Danilov Yu.A., Zvonkov B.N., Ryl'kov V.V., Uskova E.A. Svoystva InGaAs/GaAs kvantovykh yam s δ -Mn-legirovannym sloem v GaAs. FTT. 2007;49(1):165-171. [Aronzon B.A., Granovskiy A.B., Davydov A.B., Danilov Yu.A., Zvonkov B.N., Ryl'kov V.V., Uskova E.A. Properties of InGaAs/GaAs quantum wells with δ -doped layer in GaAs. Fizika tverdogo tela. 2007;49(1):165-171. (in Russ.)]
 8. Dorokhin M.V., Danilov Yu.A. Izmerenie polarizatsionnykh kharakteristik izlucheniya nanogeterostuktur: uchebno-metodicheskoe posobie. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet; 2011. [Dorokhin M.V., Danilov Yu.A. Measurement of polarisation features of nanoheterostructure emission: a Tutorial. Nizhniy Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod; 2011. (in Russ.)]
 9. Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Drozdov Yu.N., Zvonkov B.N., Iikawa F., Brasil M.J.S.P. Svoystva kvantovo-razmernykh struktur GaAs/InGaAs, sodержashchikh δ -Mn-legirovannye sloi. Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya. 2007;2:9-12. [Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Drozdov Yu.N., Zvonkov B.N., Iikawa F., Brasil M.J.S.P. The properties of GaAs/InGaAs quantum-dimensional structures, containing δ -Mn-doped layers. Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2007;2:9-12. (in Russ.)]
 10. Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Kalent'eva I.L., Kudrin A.V. Ferromagnetizm v GaAs strukturakh s del'ta-legirovannym Mn sloem. Pis'ma v ZhTF. 2009;35(14):8-17. [Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Kalent'eva I.L., Kudrin A.V. Ferromagnetism in GaAs structures with delta-doped Mn layer. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters). 2009;35(14):8-17. (in Russ.)]
 11. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers. J. Phys. D: Appl. Phys. 2007;40(2):R179-R203.
 12. Sperl M., Singh A., Wurstbauer U., Das S.K., Sharma A., Hirmer M., Nolting W., Back C.H., Wegscheider W., Bayreuther G. Spin-wave excitations and low-temperature magnetization in the dilute magnetic semiconductor (Ga,Mn)As. Phys. Rev. B. 2008;77(12):125212-1-7.
 13. Goennenwein S.T.B., Graf T., Wassner T. Brandt M.S., Stutzmann M., Philipp J.B., Gross R., Krieger M., Zörn K., Ziemann P., Koeder A., Frank S., Schoch W., Waag A. Spin wave resonance in $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$. Appl. Phys. Lett. 2003;82(5):730-732.
 14. Macdonald A.H., Schiffer P., Samarth N. Ferromagnetic semiconductors: moving beyond (Ga,Mn)As. Nature materials. 2005;4(3):195-202.
 15. Ohno H., Matsukura F. A ferromagnetic III-V semiconductor: (Ga,Mn)As. Solid State Commun. 2001;117(3):179-186.
 16. Edmonds K.W., Boguslawski P., Wang K.Y., Campion R.P., Novikov S.N., Farley N.R.S., Gallagher B.L., Foxon C.T., Sawicki M., Dietl T., Nardelli M.B., Bernholc J. Mn Interstitial Diffusion in (Ga,Mn)As. Phys. Rev. Lett. 2004;92(3):037201-1-4.
 17. Govorov A.O., Kalameitsev A.V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a single magnetic impurity: photoinduced spin orientation. Phys. Rev. B. 2005;71(3):035338-1-5.
 18. Hendorfer G., Schneider J. G-factor and effective mass anisotropies in pseudomorphic strained layers. Sem. Sci. Technol. 1991;6(7):595-601.

Сведения об авторе:

Дмитриев Алексей Иванович - кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра информационно-математических технологий и информационного права.

Aleksey I. Dmitriev - Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Assoc. Prof., Department of Information and Mathematical Technologies and Information Right.

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.06.2017.

Принята в печать 17.06.2017.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 02.06.2017.

Accepted for publication 17.06.2017.