

# МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СПИНОВЫХ УСТРОЙСТВ

## METHODS AND MEANS OF INFORMATION CODING USING SPIN-POLARIZATION DEVICES

*A. Dmitriev*

*Summary.* Spin nanoelectronics allows for entirely new ways of information encoding and encrypting using the spin of photons in a fiber-optic data transmission. The ability of creating spin light emitting diode which emits circularly polarized light is discussed. Spin-polarized carriers are injected from the ferromagnetic contact combined with the quantum well in the spin light emitting diode. Quantum selection rules that describe recombination establish a connection between the circular polarization of the light emitted along the normal to the surface and the spin polarization of electrons.

*Keywords:* information encoding, spin light-emitting diode, spintronics.

**Дмитриев Алексей Иванович**

Московский государственный университет путей  
сообщения императора Николая II (Москва); Институт  
проблем химической физики РАН (Черноголовка)  
alex-dmitriev2005@yandex.ru

*Аннотация.* Спиновая наноэлектроника позволяет реализовать принципиально новые способы кодирования и шифрования информации при помощи спинов фотонов в волоконно-оптических линиях передачи данных. В статье обсуждается возможность создания спинового светодиода, излучающего циркулярно-поляризованный свет. В спиновом светодиоде спин-поляризованные носители инжектируются из ферромагнитного контакта, объединенного с квантовой ямой. Квантовые правила отбора, описывающие рекомбинацию, устанавливают связь между циркулярной поляризацией света, испускаемого вдоль нормали к поверхности, и спиновой поляризацией электронов.

*Ключевые слова:* кодирование информации, спиновый светодиод, спинтроника.

## 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 решений 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  $\sigma^+$ -поляризованному излучению ставится в соответствие «1»,  $\sigma^-$  — поляризованному излучению — «1».

## Постановка задачи

Гетероструктуру с ферромагнитным слоем и квантовой ямой можно сделать двумя способами: а) 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

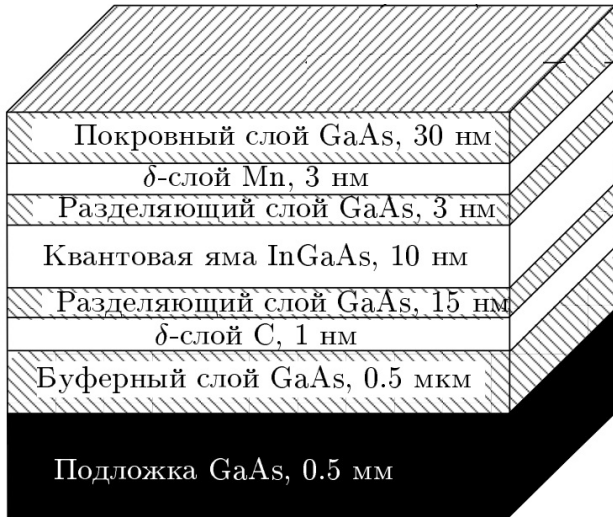


Рис. 1. Схематическое изображение гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs

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, преимуществом отдельного легирования марганцем в гетероструктурах является отсутствие гашения фотолюминесценции квантовой ямы с увеличением концентрации марганца.

### 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].

Следует заметить, что если для светоизлучающего слоя используется в основном только GaAs, InAs, InGaAs

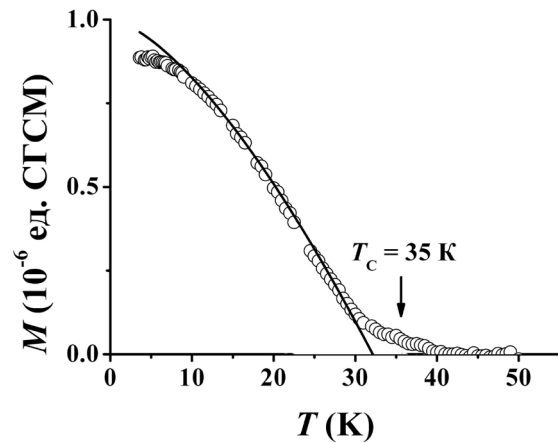


Рис. 2. Температурная зависимость магнитного момента гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs в магнитном поле 1 кЭ, лежащем в плоскости гетероструктуры. Сплошной линией показаны аппроксимация формулой Блоха « $T^{3/2}$ »

и изредка CdSe, то материалы для ферромагнитного инжектора отличаются большим разнообразием. Из группы магнитных полупроводников помимо GaMnAs используются также ZnMnSe и CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> [11]. Также используются ферромагнитные металлы Co, Fe, CoFe, NiFe-CoFe, Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>, MnAs, MnSb и сплавы Гейслера Co<sub>2,4</sub>Mn<sub>1,6</sub>Al и Co<sub>2</sub>MnGe [11].

Обсудим температурную зависимость магнитного момента гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs, измеренную с помощью СКВИД магнитометра MPMS5 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 [5]. Ферромагнетизм слоя GaMnAs, как и в других магнитных полупроводниках A<sup>3</sup>MnB<sup>5</sup> индуцирован носителями заряда посредством косвенного обменного взаимодействия.

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).

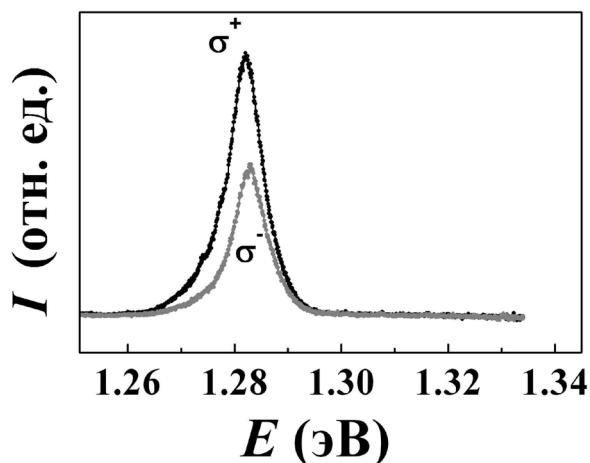


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs при  $T = 2$  К в магнитном поле 50 кЭ

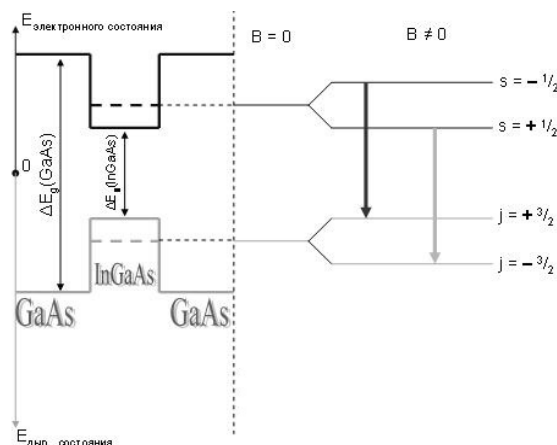


Рис. 4. Зонная диаграмма двойной гетероструктуры GaAs/InGaAs с квантовой ямой и схема возможных излучательных электронных переходов при наложении внешнего магнитного поля

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  $\sigma^+$  или  $\sigma^-$  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  $\sigma^+$ , либо  $\sigma^-$  поляризации фокусировалось на щель монохроматора и затем попадало на Si ПЗС-детектор. Степень циркулярной поляризации люминесценции определялась из соотношения  $PФЛ = (I^+ - I^-)/(I^+ + I^-)$ , 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 ( $\sigma^+$  и  $\sigma^-$ ) вследствие зеемановского расщепления спиновых уровней носителей заряда. Степень циркулярной поляризации имеет положительный знак и превышает 20%.

### Обсуждение результатов

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  $\sigma^+$ -поляризованного света при распространении вдоль направления +z [8]. 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  $\sigma^+$  и  $\sigma^-$ -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  $\sigma^+$  и  $\sigma^-$  компонент. Этого можно добиться, введя в гетероструктуру, содержащую квантовую яму, слой ферромагнитного полупроводника 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 [12]. Упругие напряжения в квантовой яме InGaAs/GaAs вытесняют уровень размерного квантования легких дырок значительно выше по энергии, чем уровень тяжелых дырок [13]. 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]).

## Выводы

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 ли-

ния 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 МГУПС (МИИТ) В.П. Соловьеву за полезные обсуждения. Работа поддержана грантом РФФИ № 16-07-00863а.

## ЛИТЕРАТУРА

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 ЖЭТФ. — 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<sub>1-x</sub>Mnx, обладающих перколяционным ферромагнетизмом // ЖЭТФ. — 2009. — Т. 135. — № 5. — С. 1134–1141.
3. Моргунов Р. Б., Дмитриев А. И., Tanimoto Y., Кленина И. Б. Магнитный резонанс в нанопроволоках Ge<sub>0.99</sub>Mn<sub>0.01</sub> // ФТТ. — 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<sub>0.99</sub>Co<sub>0.01</sub> // ФТТ. — 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 // ЖЭТФ. — 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 ЖЭТФ. — 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 // ФТТ. — 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 ЖЭТФ. — 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. — N2. — P. R179-R203.
12. 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. — N3. — P. 035338–1–5.
13. Hendorfer G., Schneider J. G-factor and effective mass anisotropies in pseudomorphic strained layers // Sem. Sci. Technol. — 1991. — V. 6. — N7. — P. 595–601.

© Дмитриев Алексей Иванович (alex-dmitriev2005@yandex.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»