

УДК 537.632

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ С КВАНТОВОЙ ЯМОЙ InGaAs/GaAs И ДЕЛЬТА<Mn>-ЛЕГИРОВАННЫМ СЛОЕМ В GaAs-БАРЬЕРЕ

© 2012 г.

М.М. Прокофьева^{1,3}, Ю.А. Данилов^{1,3}

¹Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского

²Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

³НОЦ «Физика твердотельных наноструктур» ННГУ им. Н.И. Лобачевского

danilov@nifti.unn.ru

Поступила в редакцию 03.03.2011

Приведены результаты исследований электролюминесценции светодиодов на основе гетероструктур InGaAs/GaAs, содержащих дельта<Mn>-легируемый слой в GaAs-барьере. Обнаружено, что содержание In в квантовой яме влияет на температурные зависимости циркулярной поляризации. Наибольшей температурной стабильностью циркулярной поляризации характеризуются диоды с содержанием индия 0.16 – 0.18, для которых высокое значение степени поляризации сохраняется до 45 К.

Ключевые слова: ферромагнитный полупроводник, электролюминесценция, циркулярная поляризация.

Введение

В настоящее время сильнолегированные марганцем полупроводниковые слои и бинарные соединения на основе Mn являются перспективными материалами спинтроники. Указанные слои могут применяться в магнеторезистивных элементах или в спиновых светоизлучающих диодах (СИД) в качестве инжекторов поляризованных по спину носителей заряда [1]. Спиновый СИД [2] включает, как правило, следующие элементы (рис.1): (1) ферромагнитный инжектор, который осуществляет поляризацию спинов носителей тока и их инжекцию в структуру светоизлучающего диода; (2) спейсерный слой, где спин-поляризованные носители перемещаются из ферромагнитного инжектора; (3) активную область прибора, которая типично состоит из одной или нескольких квантовых ям (КЯ) [3] или слоев квантовых точек (КТ) [4], где в течение среднего времени жизни спин-поляризованные носители рекомбинируют излучательно с неполяризованными носителями; (4) проводящую подложку, на которой выращивается гетероструктура; (5) базовый немагнитный омический контакт, который осуществляет инжекцию неполяризованных носителей в активную область. Кроме того, устройство содержит электрическую схему, которая включает источник тока или напряжения и реализует определенный режим смещения на инжекторе по отношению к базовому контакту, и источник магнитного поля. В таком приборе информация

передаётся при регистрации циркулярной поляризации электролюминесценции (ЭЛ), которая возникает в результате рекомбинации спин-поляризованных носителей заряда [2].

Ферромагнитные (ФМ) полупроводники типа $(A^3, Mn)B^5$, в частности $(Ga, Mn)As$, являются перспективным видом инжектора спин-поляризованных дырок. В указанном материале двухвалентные атомы Mn замещают трехвалентные атомы Ga, что приводит к появлению дырки в валентной зоне и локализованного магнитного момента. Хотя микроскопические механизмы ферромагнетизма в полупроводниках $(A^3, Mn)B^5$ всё ещё находятся в стадии обсуждения [1, 2, 5], общие принципы спиновой поляризации дырок в КЯ в присутствии ионов Mn можно считать установленными [2]. Как пока-

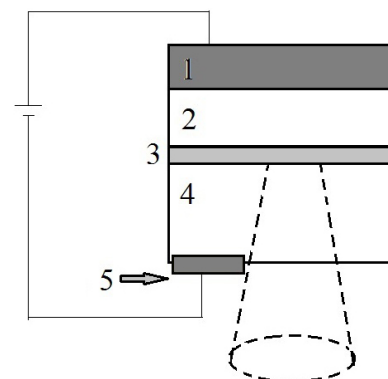


Рис.1. Схема спинового светоизлучающего диода. Элементы прибора описаны в тексте. Циркулярно-поляризованное излучение выводится через подложку

зано в работе [6], ферромагнетизм в полупроводниках A^3B^5 обусловлен обменным взаимодействием ионов марганца со свободными дырками, возникающими при ионизации Mn. Это взаимодействие и приводит к спиновой поляризации дырок.

Недостатком данного типа инжектора является сравнительно небольшое время жизни спинов инжектируемых дырок [2]. При переносе из (Ga, Mn)As к активной области спинового СИД (ССИД) дырки теряют спин и не вносят вклада в циркулярную поляризацию. Эффективная инжекция спин-поляризованных дырок возможна только в структурах с тонким спейсерным слоем между ФМ-полупроводником и активной областью. С другой стороны, снижение толщины спейсерного слоя ведёт к гашению люминесценции за счёт безызлучательной рекомбинации в КЯ с участием примесных атомов, диффундировавших в активную область из ферромагнитного полупроводника [7].

Альтернативным методом возбуждения циркулярно-поляризованного излучения является поляризация дырок непосредственно в активной области. Это было реализовано в гетероструктурах с квантовыми ямами и с дельта-Mn-легированным слоем, введённым в область барьера на небольшом (3 – 5 нм) удалении от КЯ. Влияние дельта-Mn-слоя в барьере на спиновую поляризацию дырок в GaAs/AlGaAs КЯ было обнаружено в [8] при исследовании циркулярной поляризации люминесценции в малых магнитных полях при $T_m = 5$ К. Было показано, что обменное взаимодействие ионов Mn и дырок в КЯ приводит к спиновой поляризации носителей заряда и циркулярной поляризации люминесцентного излучения квантовой ямы. Аналогичные эффекты наблюдались при дельта-легировании атомами Mn гетероструктур InGaAs/GaAs [7]. Преимуществом указанного способа легирования является пространственное разделение носителей заряда в КЯ и ионов Mn в барьере. В силу того, что концентрация магнитной примеси в дельта-слое сравнительно невелика, уменьшаются потери на безызлучательную рекомбинацию, характерные для GaMnAs. В результате в ряде работ наряду с фактом циркулярной поляризации электролюминесценции (ЭЛ) отмечалась сравнительно высокая интенсивность ЭЛ диодов с дельта-Mn-слоем и квантовой ямой InGaAs/GaAs [7, 9].

В настоящей работе были исследованы структуры спинового светоизлучающего диода, в которых активным (излучающим) слоем является квантовая яма InGaAs, а в качестве инжектора используется комбинация барьера Шоттки Au/GaAs и дельта-Mn-легированного слоя.

Целью исследования являлось определение параметров структур, оказывающих влияние на циркулярную поляризацию люминесценции КЯ. Очевидно, что одним из наиболее существенных факторов, влияющих на эффективность обменного взаимодействия и степень циркулярной поляризации, является перекрытие волновых функций ионов Mn и дырок в КЯ, которое, в свою очередь, определяется расстоянием между ними и разницей в энергетическом положении уровней. Зависимость степени циркулярной поляризации от расстояния между дельта-слоем и квантовой ямой исследована в работе [9]. Было показано, что при уменьшении толщины спейсерного слоя с 10 до 3 нм степень циркулярной поляризации люминесценции структур монотонно снижается. В настоящей работе исследована циркулярная поляризация электролюминесценции в зависимости от содержания In (x) в $In_xGa_{1-x}As$ квантовой яме. Изменение величины x позволяет варьировать энергетическое положение уровня тяжёлых дырок в КЯ и, таким образом, влияет на перекрытие волновых функций ионов Mn и дырок в КЯ.

Методика изготовления структур

Светоизлучающие структуры были выращены на подложках n^+ -GaAs (100) комбинированным методом газофазной эпитаксии и лазерного распыления твердотельных мишеней. На подложке сначала выращивался буферный слой n -GaAs толщиной 0.7 мкм с концентрацией электронов $n = (1 - 5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. После буферного слоя выращивался квантово-размерный слой, который представлял собой квантовую яму $In_xGa_{1-x}As$ с содержанием индия $x = 0.12 - 0.22$ и толщиной $d = 10$ нм. Вышеуказанные слои формировались при температуре 650°C. После КЯ выращивался тонкий (толщиной 4 нм) спейсерный слой также при температуре 650°C, а затем методом лазерного распыления Mn-мишени проводилось дельта-легирование марганцем при температуре 400°C. Содержание Mn в дельта-слое определялось по времени распыления Mn-мишени и в исследуемых структурах составляло $7.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Покровный специально нелегированный слой GaAs (толщиной 40 нм) выращивался лазерным распылением мишени GaAs при той же температуре 400°C. Далее на поверхность структур методом термического испарения в вакууме наносили Au, и таким образом формировался контакт Шоттки. После нанесения металлического контакта с применением фотолитографии и химического травления были сформированы меза-структуры диаметром 500 мкм. Базовый омический контакт формировался

искровым вжиганием Sn-фольги. Этой операцией завершалось формирование светоизлучающих диодных структур. Комбинированный способ выращивания с применением лазерного распыления позволяет (за счёт снижения температуры процесса) значительно уменьшить ширину легированного марганцем слоя до размеров 2 – 3 нм (при температуре роста 400 – 450°C).

Наиболее достоверная информация о зависимостях интенсивности и поляризации электролюминесценции изготовленных структур от технологических параметров достигается, когда выбранный параметр варьируется в пределах одной серии при сохранении других условий выращивания. Варьируемым параметром являлось содержание индия в квантовой яме (глубина КЯ).

Методика измерений

В работе представлены результаты измерений электролюминесценции изготовленных диодов. Измерения проводились при температуре 77 К в жидком азоте, а также в гелиевом криостате в диапазоне температур 10–120 К. На образец подавалось прямое смещение (положительный относительно базы потенциал), а регистрировалась часть возбуждаемого в образце электролюминесцентного излучения, выходящая со стороны подложки. Диапазон рабочих токов диодов составлял 0.5 – 30 мА при напряжении 1.5 – 3 В.

Измерение циркулярной поляризации электролюминесценции проводилось в гелиевом криостате в перпендикулярном магнитном поле величиной до 0.4 Тл. Излучение анализирова-

лось по стандартной схеме с применением пластины $\lambda/4$ и поляризатора. Степень циркулярной поляризации ЭЛ оценивалась из соотношения

$$P_{\text{ЭЛ}} = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-),$$

где $I_+(I_-)$ – интенсивности компонент с левой (правой) поляризацией, полученные путём интегрирования полосы соответствующей части спектра излучения.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены спектры электролюминесценции образцов, измеренные в σ^+ - и σ^- -поляризациях. На спектрах наблюдаются два пика. Левый пик, предположительно, связан с излучательными переходами с участием уровня Mn в GaAs (~ 1.41 эВ). Это согласуется с литературными данными, согласно которым энергетический уровень Mn в GaAs лежит на ≈ 100 мэВ выше потолка валентной зоны [10]. Следует отметить, что дельта-легированный слой образует примесную зону в запрещённой зоне GaAs. Уровни Mn, по-видимому, обусловлены атомами, которые за счёт диффузии при выращивании структуры расположены вне дельта-слоя. Интенсивность пика при энергии 1.41 эВ в несколько раз ниже, чем пика при энергии ~ 1.42 эВ, соответствующего излучательным переходам в КЯ.

При приложении магнитного поля излучение от КЯ становится циркулярно-поляризованным, т.е. интенсивность компоненты с левой поляризацией превышает интенсивность компоненты с правой поляризацией (рис. 2). Степень поляризации зависит от величины приложенного магнитного поля: на рис. 3 приведены зависимости степени циркулярной поляризации излучения

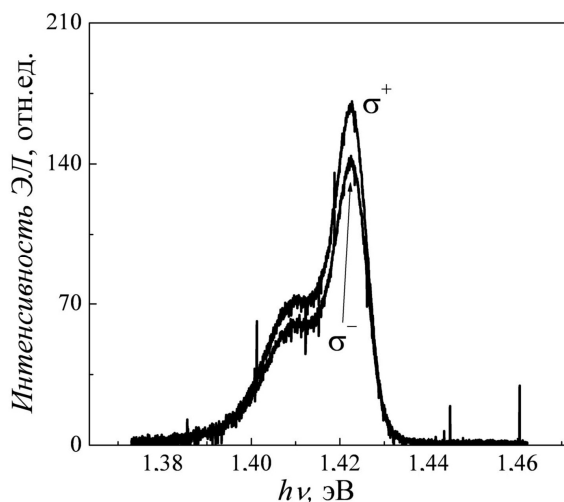


Рис. 2. Спектры электролюминесценции диодов Шоттки с $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ квантовой ямой ($x = 0.12$) и дельта-Mn-легированным слоем, измеренные в σ^+ - и σ^- -поляризациях. Температура измерений 10 К, ток диода = 5 мА

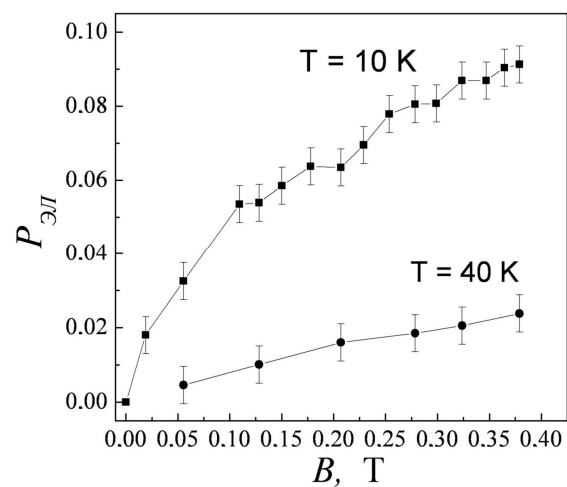


Рис. 3. Зависимость степени циркулярной поляризации излучения структур с квантовой ямой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x = 0.12$) и дельта-Mn-легированным слоем от приложенного внешнего магнитного поля. Ток диода = 5 мА

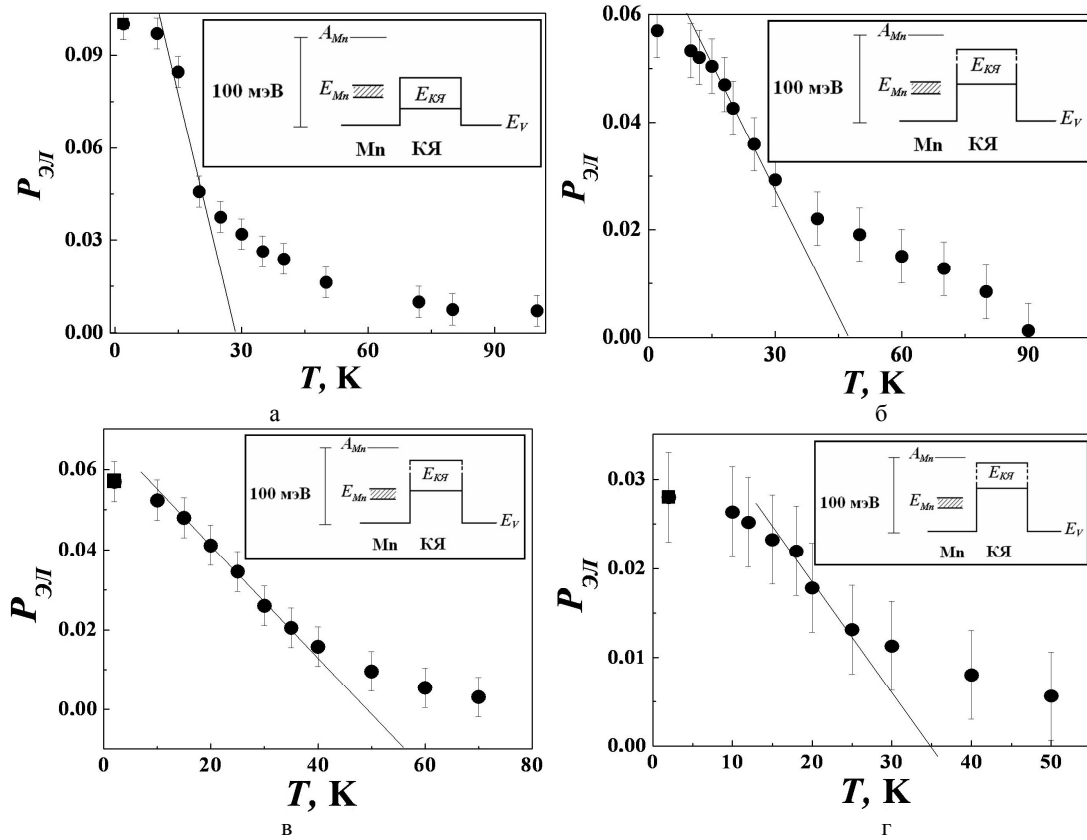


Рис. 4. Зависимость степени циркулярной поляризации от температуры измерения для структур с квантовой ямой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ и дельта- $\langle\text{Mn}\rangle$ -легированным слоем с различным содержанием In: а) $x = 0.12$, б) $x = 0.16$, в) $x = 0.18$, г) $x = 0.22$. Точки при $T_m = 2$ К получены при измерениях на гелиевом криостате в Институте физики твёрдого тела РАН. На вставках изображены предполагаемые зонные диаграммы для структуры КЯ с близкорасположенным дельта- $\langle\text{Mn}\rangle$ -легированным слоем с соответствующим содержанием In. Обозначения: A_{Mn} – уровень энергии Mn в GaAs, E_{Mn} – энергетическое положение примесной зоны, образованной дельта- $\langle\text{Mn}\rangle$ -легированным слоем, $E_{\text{КЯ}}$ – энергетический уровень тяжёлых дырок в квантовой яме, E_V – энергия потолка валентной зоны GaAs

образцов от приложенного внешнего магнитного поля $P_{\text{ЭЛ}}(B)$, измеренные при температурах 10 и 40 К. Зависимость, измеренная при 10 К, носит нелинейный характер. С увеличением поля степень циркулярной поляризации возрастает. На кривой $P_{\text{ЭЛ}}(B)$ для 10 К можно выделить участки быстрого и медленного роста степени поляризации.

Измерения, проведённые на аналогичных структурах в ИФТТ РАН [7], показывают, что в области полей ~ 0.5 Тл значение $P_{\text{ЭЛ}}$ выходит на насыщение и слабо меняется с увеличением поля. Медленный рост степени поляризации для наших структур в области полей 0.2 – 0.37 Тл связан с приближающимся выходом значения $P_{\text{ЭЛ}}$ на насыщение.

Циркулярная поляризация ЭЛ сохраняется до температур 40 – 60 К. При температурах выше 40 К степень циркулярной поляризации излучения существенно снижается. Полученные данные подтверждаются транспортными измерениями, проведёнными в работе [11] на образцах, аналогичных исследованным. Изученные в

[11] образцы представляли собой одиночные дельта- $\langle\text{Mn}\rangle$ -легированные слои, выращенные на подложках полуизолирующего i -GaAs. Зависимость сопротивления Холла от величины магнитного поля носила гистерезисный характер при температурах измерений < 40 К. По-видимому, критическая температура 30 – 40 К соответствует температуре Кюри (T_C) дельта- $\langle\text{Mn}\rangle$ -легированного слоя.

Рассмотрим подробнее влияние температуры измерений на поляризационные характеристики излучения. На рис. 4 приведены зависимости степени циркулярной поляризации от температуры измерения. Графики для разных структур для ясности приведены отдельно. Степень циркулярной поляризации сильно уменьшается при температурах выше указанной температуры Кюри дельта- $\langle\text{Mn}\rangle$ -легированного слоя. На зависимости $P_{\text{ЭЛ}}(T)$ можно выделить участок быстрого спада $P_{\text{ЭЛ}}$ (30 – 40 К) и участок медленного изменения $P_{\text{ЭЛ}}$ с ростом температуры. Температура, при которой заканчивается быстрый спад $P_{\text{ЭЛ}}$, зависит от параметров структур.

Для структур с содержанием In в квантовой яме $x = 0.12$ эта температура равна 20 К, для структур с $x = 0.16 - 0.18$ она составляет 40 – 45 К, а для структур с $x = 0.22$ – приблизительно 25 К. На втором участке степень поляризации не превышает значения 0.01 и медленно уменьшается с ростом температуры измерений.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. Известно, что обменное взаимодействие вызывает расщепление уровней с разным спином. Разница в заполнении уровней приводит к тому, что интенсивность одной из поляризованных компонент становится выше интенсивности другой. Это различие в заполнении и, соответственно, степень циркулярной поляризации электролюминесценции зависят не только от эффективности обменного взаимодействия ионов Mn в дельта-слое и дырок в квантовой яме, но и от уширения уровней в квантовой яме. Уширение линий, в свою очередь, может быть вызвано неоднородным распределением атомов примеси в плоскости структуры [7]. Поэтому только по измерениям степени циркулярной поляризации нельзя однозначно судить об эффективности обменного взаимодействия. В то же время взаимодействие ионов Mn и дырок в квантовой яме является, по-видимому, основным фактором, влияющим на температурную зависимость степени циркулярной поляризации. Мы предполагаем, что при $x = 0.16 - 0.18$ уровень энергии тяжёлых дырок в КЯ совпадает с энергией в примесной зоне Mn в дельта-слое (вставка к рис. 4б, в). Это усиливает обменное взаимодействие и повышает температуру Кюри. При увеличении содержания In уровень тяжёлых дырок в яме смещается выше по энергии, чем примесная зона, что приводит к снижению T_C . То же самое происходит при уменьшении x , в этом случае уровень смещается ниже по энергии (вставка к рис. 4г).

Заключение

Таким образом, в ходе проведенных исследований было показано, что диоды на основе GaAs, содержащие InGaAs квантовую яму и

акцепторный дельта<Mn>-легированный слой, излучают циркулярно-поляризованный свет, степень поляризации которого зависит от приложенного магнитного поля. Циркулярная поляризация рекомбинационного излучения обусловлена обменным взаимодействием ионов Mn и дырок в квантовой яме. Было обнаружено, что содержание In в квантовой яме оказывает влияние на температурные зависимости циркулярной поляризации. Предположительно, это обусловлено изменением взаимного расположения энергетических уровней ионов Mn в дельта-слое и уровней дырок в квантовой яме.

Авторы выражают благодарность Б.Н. Звонкову за изготовление структур, М.В. Дорохину и С.В. Зайцеву за обсуждения результатов и измерения циркулярной поляризации при температуре 2 К.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 10-02-00739 и 11-02-00645), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК П1279 и 02.740.11.0672).

Список литературы

1. Žutic I., Fabian J., Das Sarma S. // Rev. Mod. Phys. 2004. V. 76. P. 323–410.
2. Holub M., Bhattacharya P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. R179–R203.
3. van't Erve O.M.J., Kioseoglou G., Hanbicki A.T., et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 4334–4336.
4. Lombez L., Renucci P., Braun P.F., et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 081111.
5. Sapega V.F., Ramsteiner M., Brandt O., et al. // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. P. 235208.
6. Matsukura F., Sawicki M., Dietl T., et al. // Physica E. 2004. V. 21. P. 1032–1036.
7. Zaitsev S.V., Dorokhin M.V., Kulakovskii V.D., et al. // Physica E. 2009. V. 41. P. 652–654.
8. Myers R.C., Gossard A.C., Awschalom D.D. // Phys. Rev. B. 2004. V. 69. P. R161305.
9. Дорохин М.В., Зайцев С.В., Кулаковский В.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 24. С. 46–52.
10. Ilegems M., Digle R., Rupp Jr. L.W. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. P. 3059–3065.
11. Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Дорохин М.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 14. С. 8–17.

STUDY OF LIGHT-POLARIZATION CHARACTERISTICS OF ELECTROLUMINESCENCE FROM LIGHT-EMITTING DIODES WITH AN InGaAs/GaAs QUANTUM WELL AND A DELTA <Mn>-DOPED LAYER IN THE GaAs BARRIER

M.M. Prokof'eva, Yu.A. Danilov

The results of investigations are presented on electroluminescence from light-emitting diodes based on InGaAs/GaAs heterostructures containing a delta<Mn>-doped layer in the GaAs barrier. Indium content in the quantum well has been found to affect the temperature dependences of circular polarization. The highest temperature stability of circular polarization was observed for diodes with indium content of $x=0.16-0.18$ retaining a high value of the polarization degree up to 45 K.

Keywords: ferromagnetic semiconductor; electroluminescence; circular polarization.