

03,05,09,12

## Повышение рабочей температуры спиновых светоизлучающих диодов (Ga,Mn)As/GaAs путем постростовых воздействий

© Е.И. Малышева<sup>1</sup>, М.В. Дорохин<sup>1</sup>, Ю.А. Данилов<sup>1</sup>, А.Е. Парафин<sup>2</sup>, М.В. Ведь<sup>1</sup>,  
А.В. Кудрин<sup>1</sup>, А.В. Здоровейцев<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, филиал ФИЦ ИФФ РАН,  
Нижний Новгород, Россия

E-mail: malysheva@phys.unn.ru

Сформированы и исследованы спиновые светоизлучающие диоды на основе гетероструктур InGaAs/GaAs, содержащие ферромагнитные слои (Ga,Mn)As. Для повышения рабочей температуры спинового светоизлучающего диода поверхность структур перед нанесением металлических омических контактов подвергалась импульсному лазерному отжигу. Во внешнем магнитном поле сформированные диоды испускают циркулярно-поляризованное электролюминесцентное излучение. Получено повышение температуры регистрации циркулярно-поляризованной люминесценции с 30 К для исходной структуры до 110 К для структуры, подвергнутой лазерному отжигу. Полученный эффект связывается с повышением температуры Кюри (Ga,Mn)As в результате лазерного воздействия.

Работа выполнена в рамках проектной части госзадания Минобрнауки России (№ 8.1751.2017/ПЧ), при поддержке РФФИ (17-37-80008 мол\_эв\_а) и стипендии Президента РФ (СП-2450.2018.5).

DOI: 10.21883/FTT.2018.11.46654.10NN

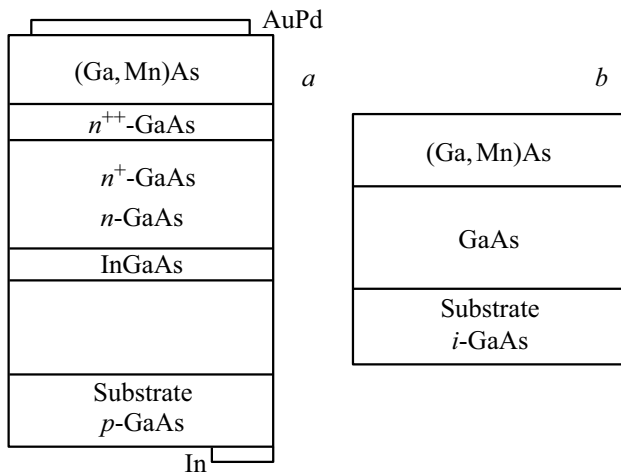
### 1. Введение

Спиновые светоизлучающие диоды (ССИД) с инжектором в виде слоев разбавленных магнитных полупроводников представляют интерес с точки зрения интеграции в оптоэлектронные микросхемы [1]. Перспективным методом получения таких диодов является газофазная эпитаксия из металлорганических соединений (ГФЭ МОС) в сочетании с импульсным лазерным нанесением (ИЛН). Ранее нами сообщалось о формировании структур спиновых светоизлучающих диодов, содержащих слои (Ga,Mn)As, и получении низкотемпературной циркулярно-поляризованной люминесценции [2,3]. Ограничением ростового метода, использованного нами в [2,3], является низкое значение температуры Кюри слоя (Ga,Mn)As, который формируется импульсным лазерным нанесением. Это ограничение существенно снижает рабочие температуры спинового светоизлучающего диода (до величины  $\sim 30$  К) за счет понижения эффективности спиновой инжекции и, соответственно, значения степени циркулярной поляризации в области перехода ферромагнетик/парамагнетик [2,3]. В работе [4] сообщалось, что отжиг слоев (Ga,Mn)As, сформированных методом ИЛН, импульсным эксимерным лазером позволяет существенно повысить температуру Кюри (до уровня аналогов, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [5]). В данной работе рассмотрено влияние отжига на свойства спиновых светоизлучающих диодов, содержащих подобные [2,3] слои (Ga,Mn)As. Показано, что применение импульсного лазерного отжига поверхности ССИД позволяет сместить точку Кюри (Ga,Mn)As инжектора до температуры  $\sim 110$  К, и,

таким образом, поднять рабочую температуру спинового светоизлучающего диода.

### 2. Методика эксперимента

Структуры сформированы комбинированным методом МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) в сочетании с импульсным лазерным нанесением (ИЛН) [2,3,6]. Было сформировано два типа структур. Первый тип (структура А) — представляет собой эпитаксиальные гетероструктуры светоизлучающих диодов (СИД) для исследований в режиме электролюминесценции, сформированные на подложках *p*-GaAs. Последовательно выращивались следующие слои: буферный слой *p*-GaAs, квантовая яма  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ :С (концентрация дырок  $p \approx 8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , ширина  $d_{\text{QW}} = 16 \text{ nm}$ ), слой *n* — GaAs с градиентным легированием толщиной 90 nm и сильнолегированный  $n^{++}$  — слой толщиной 30 nm ( $n \approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ). Затем при температуре 340°C методом лазерного распыления Mn и GaAs мишеней был выращен слой (Ga,Mn)As толщиной 90 nm. Второй тип структур (структура В) предназначен для исследований гальваномагнитных явлений и представляет собой аналогичный слой (Ga,Mn)As толщиной 90 nm, выращенный на подложке *i*-GaAs. Сформированные образцы подвергались воздействию импульсного лазерного отжига, выполненного с применением эксимерного лазера LPX-200, работающего на длине волны 248 nm, имеющего длительность импульса  $\sim 30 \text{ ns}$ , плотность энергии в импульсе до  $290 \text{ mJ/cm}^2$  [4]. Было использовано три режима лазерного отжига, отличавшихся энергией лазерного воздействия, а именно, отжига с энергиями 160,



**Рис. 1.** Схемы исследованных структур: *a* — светоизлучающий диод (Ga,Mn)As/ $n^+$  – GaAs/ $n$  – GaAs/InGaAs (структура А), сформированный на подложке  $p$ -GaAs, *b* — структура В, сформированная на подложке  $i$ -GaAs.

260 и 290 мДж/см<sup>2</sup>. Лазерный пучок расфокусирован на площадь 1 см<sup>2</sup>. Также исследовались исходные структуры, не подвергнутые лазерному отжигу. Схемы образцов представлены на рис. 1.

Для изучения свойств слоя (Ga,Mn)As, подвергнутого лазерному отжигу, было проведено исследование морфологии поверхности структур на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NT-MDT Solver Pro в неконтактном режиме.

Для формирования диодов на поверхность образцов наносился омический PdAu контакт методом электронно-лучевого испарения в вакууме. Методами фотолитографии и химического травления изготавливали меза-структуры диаметром 500 мкм.

На диодах проведены исследования электролюминесценции (ЭЛ), циркулярной поляризации ЭЛ в диапазоне температур 10–300 К. Магнитное поле направлено перпендикулярно поверхности структур. Степень циркулярной поляризации ЭЛ ( $P_{EL}$ ) оценивалась по формуле:

$$P_{EL} = ((I(\sigma^+) - I(\sigma^-)) / (I(\sigma^+) + I(\sigma^-))) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $I(\sigma^+)$ ,  $I(\sigma^-)$  — относительные интенсивности ЭЛ, измеренные для света, поляризованного по левому и по правому кругу.

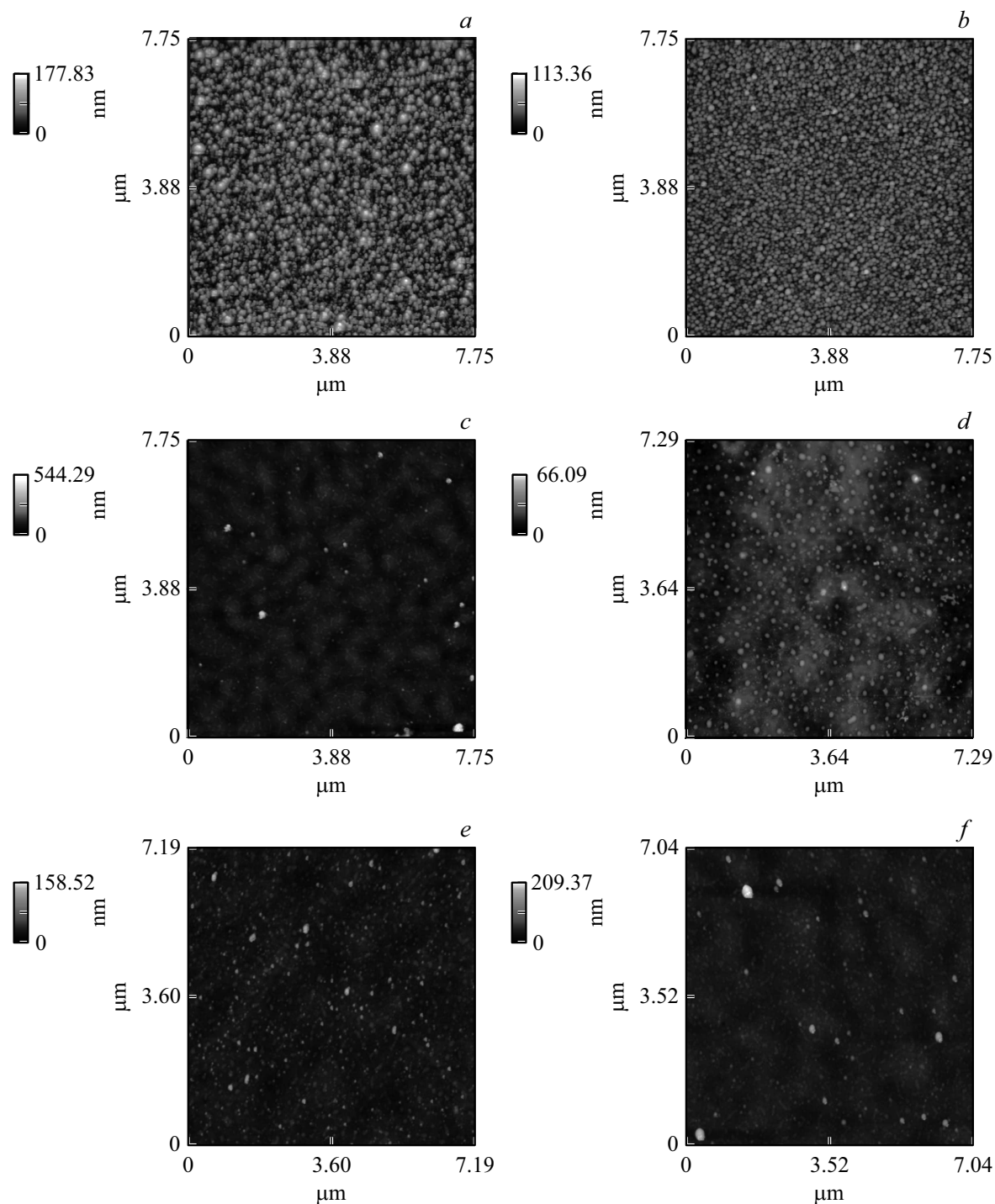
На контрольных структурах (В) проводились измерения магнитопольевых зависимостей слоевого сопротивления в диапазоне температур 10–120 К, что позволило оценить влияние лазерного отжига на гальваномагнитные свойства слоя (Ga,Mn)As.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Характерной особенностью процесса лазерного отжига является неоднородность лазерного пучка: энергия

лазерного импульса в центре выше энергии импульса по краям лазерного пучка, следовательно, воздействие его на образец также неоднородно. На рис. 2 представлена топография поверхности образцов, подвергнутых отжигу с энергиями 160, 260 и 290 мДж/см<sup>2</sup>: участков из центральной части образца (рис. 2, *c, e, f*) и с периферии (рис. 2, *b, d*), а также исходного образца (рис. 2, *a*). Исходная поверхность структуры характеризуется среднеквадратичной высотой неровностей равной ~ 22 нм, латеральным размером неровностей ~ 100 нм. Воздействие лазера на поверхность существенно модифицирует ее топографию. Минимальное изменение зарегистрировано на периферии образца, отожженного лазером с энергией 160 мДж/см<sup>2</sup> (рис. 2, *b*). При повышении интенсивности воздействия на поверхности формируются крупные кластеры низкой плотности, а также гантелеобразные кластеры меньшего размера. Реконструкция поверхности является характерной особенностью импульсного лазерного отжига [7]. Интересным экспериментальным фактом представляется подобие топографии поверхности исходного образца и периферии образца, отожженного при энергии 160 мДж/см<sup>2</sup> (рис. 2, *a* и *b* соответственно), а также топографии центра образца с отжигом при энергии 160 мДж/см<sup>2</sup> и участка образца с периферии, подвергнутого отжигу при энергии 290 мДж/см<sup>2</sup> (рис. 2, *c* и *d* соответственно). Это свидетельствует о близких значениях плотности мощности лазерного воздействия для указанных участков (то есть, в первом случае воздействие лазерного пучка с энергией 160 мДж/см<sup>2</sup> на периферию структуры мало). Отметим, что для исследований циркулярной поляризации электролюминесценции были выбраны диоды, расположенные в центральной части образца.

Анализ изменения магнитных свойств слоев в результате импульсного лазерного отжига был выполнен по результатам гальваномагнитных измерений, проведенных на структурах В [4]. На рис. 3 представлены зависимости слоевого сопротивления от магнитного поля для структуры В, подвергнутой отжигу лазера с энергией 290 мДж/см<sup>2</sup> (рис. 3, *b*) и исходной части структуры В (рис. 3, *a*), измеренных в диапазоне температур 13–80 К. При минимальной температуре измерений (13 К) на обоих графиках наблюдаются участки положительного магнетосопротивления, причем обе зависимости образуют замкнутую петлю гистерезиса. По мере увеличения температуры измерений амплитуда магнетосопротивления уменьшается, а петля гистерезиса сужается. При температуре, равной 40 К для исходной структуры и 80 К для отожженной структуры, участок положительного магнетосопротивления и петля гистерезиса пропадают. Указанное значение оценивается как точка Кюри слоя (Ga,Mn)As. Отметим, что в результате отжига оценочное значение температуры Кюри выросло с 40 до 80 К. Дополнительным подтверждением смещения точки Кюри в область более высоких температур в результате отжига является наличие нелинейной зависимости сопротивления Холла (аномального эффекта Холла) для отожженного образца (вставка к рис. 3, *a*, кривая 2) [8].

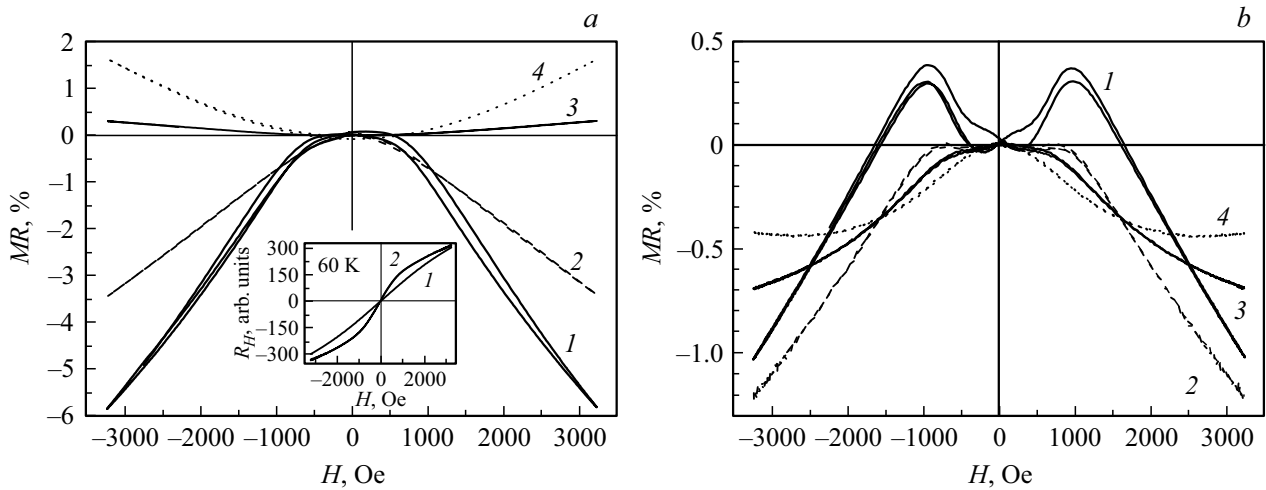


**Рис. 2.** Топография поверхности структуры спинового светоизлучающего диода с поверхностным слоем (Ga,Mn)As (*a*), а также той же структуры, подвергнутой импульсному лазерному отжигу: (*b*) —  $160 \text{ mJ/cm}^2$  (на периферии лазерного пучка); (*c*)  $160 \text{ mJ/cm}^2$  (в центре лазерного пучка); (*d*)  $290 \text{ mJ/cm}^2$  (на периферии лазерного пучка); (*e*)  $260 \text{ mJ/cm}^2$  (в центре лазерного пучка); (*f*)  $290 \text{ mJ/cm}^2$  (в центре лазерного пучка).

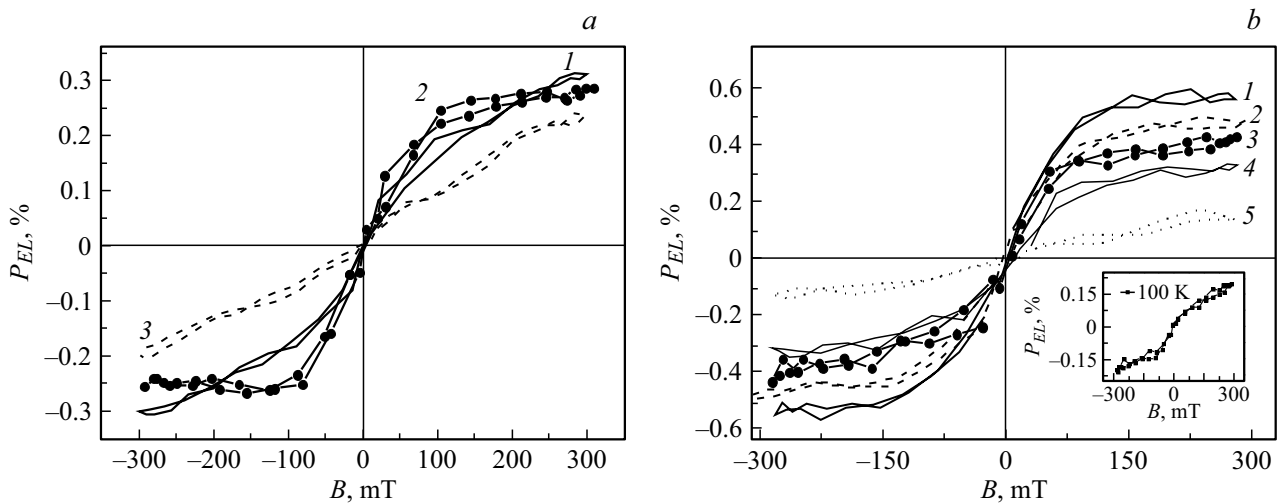
Для исходной структуры магнитополевая зависимость сопротивления Холла может быть описана линейной функцией (вставка к рис. 3, *a*, кривая 1).

На рис. 4 представлены магнитополевые зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции, измеренные в диапазоне температур 10–120 К для

исходного (рис. 4, *a*) и отожженного (рис. 4, *b*) образцов. В обоих случаях кривые, измеренные при 13 К, являются нелинейной функцией магнитного поля. На нелинейных зависимостях  $P_{\text{EL}}(B)$  наблюдается два участка: участок быстрого изменения  $P_{\text{EL}}$  в диапазоне магнитных полей 0–0.1 Т и участок „медленного“ увеличения



**Рис. 3.** Магнитооптические зависимости слоевого сопротивления структуры (Ga,Mn)As/i-GaAs, измеренные при различных температурах, для исходной структуры (a), и структуры, подвергнутой отжигу лазером с энергией 290 мДж/см<sup>2</sup> (b). Температуры измерений: 13 К (кривая 1), 40 К (кривая 2), 60 К (кривая 3), 80 К (кривая 4). На вставке к рис. 3, a показаны магнитооптические зависимости сопротивления Холла, измеренные при температуре 60 К для исходной структуры (1) и отожженной с энергией 290 мДж/см<sup>2</sup> (2).



**Рис. 4.** Магнитооптические зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции: a) исходной структуры в диапазоне температур 13–30 К (кривая 1 — 13 К; кривая 2 — 20 К, кривая 3 — 30 К) и b) структуры, подвергнутой лазерному отжигу, в диапазоне температур 14–120 К (кривая 1 — 13 К, кривая 2 — 40 К, кривая 3 — 60 К, кривая 4 — 80 К, кривая 5 — 110 К). На вставке показана магнитооптическая зависимость степени поляризации, измеренная для той же структуры при температуре 100 К.

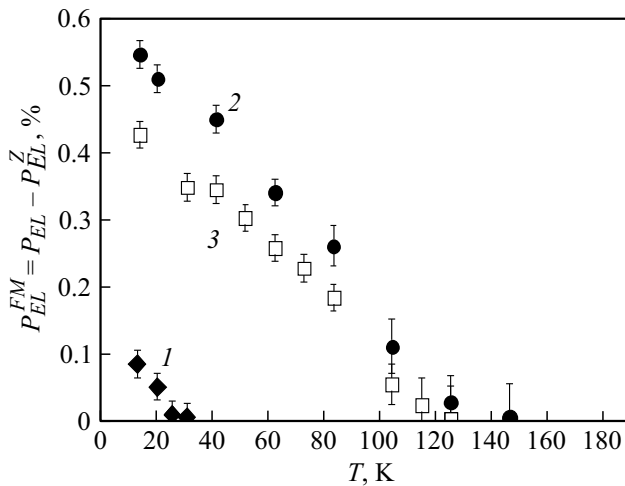
степени поляризации в полях 0.1–0.3 Т. На участке „медленного“ увеличения степени поляризации  $P_{EL}(B)$  может быть аппроксимирована линейной функцией. Значение  $P_{EL}$  с достаточной степенью точности может быть представлено в виде суммы двух слагаемых:

$$P_{EL} = P_{EL}^{FM} + P_{EL}^Z, \quad (3)$$

где  $P_{EL}^{FM}$  — слагаемое, связанное с инжекцией спин-поляризованных электронов,  $P_{EL}^Z$  — слагаемое, обусловленное зеемановским расщеплением в магнитном поле уровней размерного квантования в квантовой яме.

Отметим повышение степени циркулярной поляризации в результате отжига (рис. 4, a, b, кривая 1).

В структурах без лазерного отжига при увеличении температуры измерений значение степени циркулярной поляризации уменьшается, и при температуре 30 К зависимость  $P_{EL}(B)$  становится линейной. В этой точке и для более высоких температур на зависимости  $P_{EL}(B)$  имеет место монотонное увеличение степени циркулярной поляризации с ростом магнитного поля, которое может быть описано линейной функцией и которое, по-видимому, обусловлено зеемановским расщеплением уровней квантовой ямы в магнитном поле  $P_{EL}^Z$ . В струк-



**Рис. 5.** Температурные зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции, измеренные в магнитном поле 280 мТ для спиновых светоизлучающих диодов на основе исходной структуры (1 — закрытые ромбы), структуры, подвергнутой отжигу лазером с энергией 260 мДж/см<sup>2</sup> (2 — закрытые кружки), структуры, подвергнутой отжигу лазером с энергией 290 мДж/см<sup>2</sup> (3 — открытые квадраты).

турах, подвергнутых лазерному отжигу, при повышении температуры измерений значение степени циркулярной поляризации уменьшается медленнее по сравнению с исходным образцом, а зависимость становится линейной при температуре 110 К.

Наиболее наглядно эффект повышения рабочей температуры ССИД в результате лазерного отжига может быть продемонстрирован на температурных зависимостях степени поляризации, измеренных при введении диода в магнитное поле  $\sim 280$  мТ, представленных на рис. 5. Данные представлены за вычетом компоненты, связанной с зеемановским расщеплением уровней  $P_{EL}^Z$ .

Для всех исследованных структур с ростом температуры значение степени циркулярной поляризации уменьшается. Для структур, подвергнутых лазерному отжигу с энергиями 260 и 290 мДж/см<sup>2</sup>, область падения степени поляризации затянута по сравнению с исходной структурой, а значение  $P_{EL}^{FM}$  обращается в нуль при температуре  $\sim 110$ –120 К. Зависимости  $P_{EL}^{FM}(T)$  подобны с учетом погрешности измерений. Можно отметить несколько более высокое значение степени поляризации для структуры, отожженной при 260 мДж/см<sup>2</sup>, по сравнению с другими мощностями отжига. Для структуры, подвергнутой отжигу с энергией 160 мДж/см<sup>2</sup>, принципиального изменения степени поляризации и диапазона рабочих температур не зарегистрировано. Зависимость  $P_{EL}^{FM}(T)$  для указанной структуры в пределах погрешности совпадает с зависимостью для исходной структуры (рис. 4, кривая 1). По-видимому, указанной энергии лазерного отжига недостаточно для того, чтобы оказать существенное воздействие на свойства пленки (Ga,Mn)As.

Повышение диапазона рабочих температур диодов на основе структур, подвергнутых лазерному отжигу, мы связываем с повышением температуры Кюри ферромагнитного инжектора (Ga,Mn)As. Согласно результатам измерений циркулярно-поляризованной люминесценции, точка Кюри слоя разбавленного магнитного полупроводника достигает 110 К, что соответствует значениям для слоев (Ga,Mn)As, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [1,5]. Различие между данными, полученными по гальваномагнитным измерениям и измерениям степени циркулярной поляризации (рис. 3 и 4), мы связываем с неоднородностью лазерного отжига по поверхности структур (как было показано на рис. 2). При гальваномагнитных исследованиях область, участвующая в измерении, составляет  $\sim 4 \times 4$  мм и включает как участок в центре лазерного пятна, так и на периферии. Можно предположить, что на изменение вида кривой магнетосопротивления оказывают влияние периферийные участки (Ga,Mn)As, значение температуры Кюри которых очевидно ниже, чем на участках, находящихся в центре лазерного пучка. При измерениях циркулярно-поляризованной электролюминесценции был исследован диод, сформированный из центра структуры: для данной области интенсивность воздействия максимальная и значение температуры Кюри также, по-видимому, выше. С точки зрения наибольших достижимых значений рабочей температуры следует взять за основу именно данные по циркулярно-поляризованной люминесценции.

#### 4. Заключение

Таким образом, в рамках настоящей работы был предложен новый способ повышения рабочей температуры спинового светоизлучающего диода, содержащего слой (Ga,Mn)As, а именно — импульсный лазерный отжиг поверхности структур перед нанесением контакта. Гальваномагнитные исследования, как и исследования циркулярно-поляризованной люминесценции ССИД, показали, что в результате отжига происходит повышение температуры Кюри (Ga,Mn)As и увеличение рабочей температуры спинового светоизлучающего диода до значения  $\sim 110$  К (для исходной структуры таковое значение составляет 30 К). Обнаруженный эффект связывается с влиянием импульсного лазерного воздействия на структуру слоев (Ga,Mn)As, заключающимся в перестроении атомов Mn в положения замещения Ga и повышении концентрации дырок [4]. Полученные значения температуры соответствуют наилучшим показателям для структур, сформированных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

#### Список литературы

- [1] D.K. Young, J.A. Gupta, E. Johnston-Halperin, R. Epstein, Y. Kato, D.D. Awschalom. *Semicond. Sci. Tech.* **17**, 275 (2002).
- [2] Е.И. Малышева, М.В. Дорохин, М.В. Вель, А.В. Кудрин, А.В. Здоровейшев. *ФТП* **49**, 1497 (2015).

- [3] Е.И. Малышева, М.В. Дорохин, А.В. Здоровейцев, М.В. Ведь. *ФТТ* **58**, 2190 (2016).
- [4] О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, А.В. Здоровейцев, А.В. Кудрин, В.П. Лесников, А.В. Нежданов, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, И.Ю. Пашенькин, С.М. Планкина. *ФТТ* **59**, 2130 (2017).
- [5] T. Jungwirth, J. Sinova, J. Masek, J. Kucera, A.H. MacDonald. *Rev. Mod. Phys.* **78**, 809 (2006).
- [6] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, В.В. Подольский, М.В. Сапожников. *Опт. журн.* **75** (6), 56 (2008).
- [7] S. Zhou. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 263001 (2015).
- [8] N. Nagaosa, J. Sinova, S. Onoda, A.H. MacDonald, N.P. Ong. *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1539 (2010).

*Редактор К.В. Емцев*