

03,05

## Импульсное лазерное облучение светоизлучающих структур со слоем (Ga,Mn)As

© Б.Н. Звонков<sup>1</sup>, О.В. Вихрова<sup>1,¶</sup>, Ю.А. Данилов<sup>1</sup>, П.Б. Демина<sup>1</sup>, М.В. Дорохин<sup>1</sup>,  
М.Н. Дроздов<sup>2</sup>, Д.А. Здоровейцев<sup>1</sup>, И.Л. Калентьева<sup>1</sup>, Ю.М. Кузнецов<sup>1</sup>,  
А.В. Кудрин<sup>3</sup>, А.В. Нежданов<sup>3</sup>, А.Е. Парафин<sup>2</sup>, Д.В. Хомицкий<sup>3</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,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Россия

E-mail: vikhrova@nifti.unn.ru

Поступила в Редакцию 9 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 9 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

Сочетанием методов МОС-гидридной эпитаксии и импульсного лазерного нанесения изготовлены гетеронаноструктуры InGaAs/GaAs со слоем (Ga, Mn)As на поверхности, и исследовано влияние воздействия импульсного эксимерного лазера (длина волны 248 nm, длительность импульса  $\sim 30$  ns, плотность энергии в диапазоне  $200\text{--}360$  mJ/cm<sup>2</sup>) на их излучательные, структурные и гальваномагнитные свойства. При исследованиях использовалась спектроскопия фотолюминесценции, дополненная возможностью анализа поляризационных характеристик излучения структур. Кристаллическое совершенство исходных и облученных лазером образцов изучалось с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния. Элементный состав структур и его распределение по глубине исследовались методом вторичной ионной масс-спектрометрии. Влияние импульсного лазерного отжига на ферромагнитные свойства гетеронаноструктур характеризовалось поведением магнитопольевых зависимостей сопротивления Холла и магнетосопротивления при температурах  $10\text{--}300$  K в диапазоне магнитных полей  $\pm 3600$  Oe. При комнатной температуре исследование проводилось в магнитных полях, достигающих значений  $\pm 28000$  Oe. Для получения расчетных распределений температуры вдоль толщины образца и во времени с применением модели процесса лазерного отжига, основанной на решении задачи о распространении тепла в одномерной GaAs системе с учетом слоя (Ga, Mn)As на поверхности, были использованы оригинальные данные по коэффициенту теплопроводности структур со слоем (Ga, Mn)As, полученные посредством модифицированной методики частотного разделения ( $3\omega$ -метода).

**Ключевые слова:** МОС-гидридная эпитаксия, импульсное лазерное нанесение, гетеронаноструктура, разбавленный магнитный полупроводник, импульсный лазерный отжиг.

DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51247.01H

### 1. Введение

Разбавленные магнитные полупроводники и (Ga, Mn)As, в частности, являются перспективными материалами для современной оптической электроники. Ранее нами была показана возможность применения метода импульсного лазерного нанесения (ИЛН) в сочетании с послеростовым импульсным лазерным отжигом (ИЛО) для формирования (Ga, Mn)As с высокими значениями температуры Кюри ( $80\text{--}100$  K) [1]. При этом импульсный лазерный отжиг слоев (Ga, Mn)As, сформированных методом ИЛН, используется для повышения температуры Кюри от типичных для метода ИЛН значений  $30\text{--}40$  K до  $80\text{--}100$  K, сопоставимых с мировыми аналогами [2–4]. В работе [5] нами была исследована возможность модифицирования импульсным лазерным отжигом свойств слоя (Ga, Mn)As, расположенного на поверхности квантово-размерной

гетероструктуры InGaAs/GaAs, с сохранением ее излучательных свойств. Основное внимание при этом было уделено влиянию лазерного воздействия на фотолюминесцентные характеристики структур с четырьмя квантовыми ямами InGaAs/GaAs, отличающимися содержанием индия и расположенными на различном расстоянии от слоя (Ga, Mn)As. Для описания полученных результатов была использована модель процесса лазерного отжига, представляющая собой решение задачи о распространении тепла в одномерной системе на основе GaAs с учетом присутствия слоя (Ga, Mn)As на поверхности. В настоящей работе помимо более полного анализа излучательных свойств подобных гетеронаноструктур, включающего в себя измерение поляризационных характеристик излучения квантовых ям, расположенных на различном расстоянии от слоя (Ga, Mn)As, представлены результаты комплексных

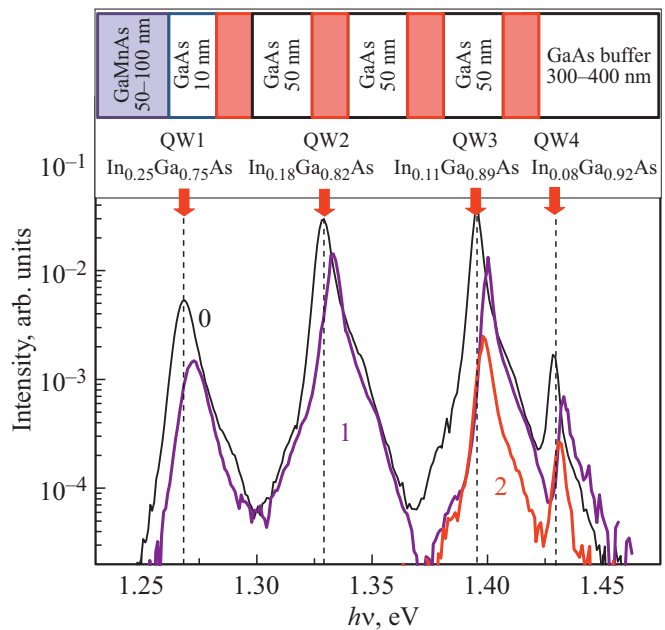
исследований влияния импульсного лазерного отжига на структурные, транспортные и магнитные свойства.

## 2. Методика эксперимента

Исследовались квантово-размерные структуры InGaAs/GaAs со слоем (Ga, Mn)As в качестве спинового инжектора на поверхности. Особенностью исследованных структур является близкое расположение (от  $\sim 10$  nm) напряженных квантовых ям к подвергнутому импульсному лазерному воздействию слою (Ga, Mn)As. Структуры изготавливались комбинированным методом МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) и импульсного лазерного нанесения на пластинах полупроводящего GaAs(100) и содержали четыре квантовые ямы (КЯ)  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ , отличающиеся содержанием индия ( $0.08 \leq x \leq 0.25$ ) и расположенные на различном расстоянии от слоя (Ga, Mn)As толщиной 50–100 nm. Схема поперечного сечения структур показана на вставке к рис. 1. Буферный слой GaAs толщиной 300–400 nm, четыре квантовые ямы (QW) InGaAs/GaAs (толщина слоя  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} \sim 10$  nm, толщина барьера GaAs = 50 nm) и спейсерный слой GaAs толщиной  $\sim 10$  nm выращивались при температурах 600–650°C методом МОСГЭ при атмосферном давлении. Для ближайшей к слою (Ga, Mn)As квантовой ямы QW1 значение  $x$  составляло 0.25, для второй от поверхности QW2  $x \sim 0.18$ , далее третьей и четвертой квантовым ямам QW3 и QW4 соответствовали величины  $x \sim 0.11$  и  $x \sim 0.08$ . Затем температура понижалась до 330°C, и методом импульсного лазерного нанесения при пониженном давлении формировался слой (Ga, Mn)As. Содержание марганца в разбавленном магнитном полупроводнике (Ga, Mn)As определялось соотношением времен распыления мишеней Mn и GaAs ( $t_{\text{Mn}}/t_{\text{GaAs}}$ ) и составляло  $Y_{\text{Mn}} = t_{\text{Mn}}/(t_{\text{GaAs}} + t_{\text{Mn}}) = 0.13$ .

Образцы изготовленных структур подвергались воздействию расфокусированного пучка излучения импульсного эксимерного лазера LPX-200 (рабочая смесь KrF, длина волны 248 nm, длительность импульса  $\sim 30$  ns). При этом плотность энергии варьировалась в диапазоне от 200 до 360  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ .

Кристаллическое совершенство исходных и облученных лазером образцов изучалось с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) исследованы на комплексе NTEGRA Spectra производства NT-MDT с применением лазера с длиной волны 473 nm. Излучение фокусировалось объективом  $100\times$  с апертурой  $\text{NA} = 0.9$ . Мощность лазерного излучения, измеренная с помощью кремниевого фотодетектора 11PD100-Si (Standa Ltd), составляла 0.5 mW. Исследование спектров КРС проводилось в геометрии обратного рассеяния. Спектроскопия КРС осуществлялась в диапазоне  $50\text{--}900\text{ cm}^{-1}$  с разрешением  $0.7\text{ cm}^{-1}$ . Все спектры были получены при комнатной температуре. Время экспозиции составляло 120 s.



**Рис. 1.** Спектры ФЛ (77 К) структур с четырьмя КЯ и слоем (Ga, Mn)As на поверхности: (0) — исходный образец; (1) —  $P = 300\text{ mJ}/\text{cm}^2$ ; (2) —  $P = 360\text{ mJ}/\text{cm}^2$ . На вставке показана схема поперечного сечения структуры.

Элементный состав исходных и отожженных образцов и его распределение по глубине изучались методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). По-слойный анализ проводился с использованием распыляющих пучков ионов  $\text{O}_2$  или Cs и анализирующего пучка ионов  $\text{Vi}$ . Глубина и размеры кратеров травления измерялись с помощью интерференционного микроскопа Talysurf CCI 2000 (Центр коллективного пользования ИФМ РАН). Принцип работы данного прибора описан в [6]. Полученные профили распределения атомов представляли собой зависимости интенсивности счета (числа импульсов в секунду) от времени распыления. Затем, после измерения глубины соответствующих кратеров, были получены ВИМС профили компонентов.

Исследовались температурные зависимости коэффициента теплопроводности исходных образцов структур со слоем (Ga, Mn)As на поверхности. Для исследования применялась модифицированная методика частотного разделения ( $3\omega$ -метод), заключающаяся в регистрации частотной зависимости напряжения двух структур: подложка и подложка с исследуемой пленкой [7]. Величина коэффициента теплопроводности пленки определяется из разности двух полученных частотных характеристик. Измерения проводились на специально сформированных с применением электронно-лучевого испарения в вакууме (формирование металлического контакта), фотолитографии и химического травления меза-структурах, представляющих собой тонкую ( $\sim 3$  nm) полосу длиной  $\sim 3\text{ cm}$  и шириной  $\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ . Через полосу пропускается электрический ток фиксированной частоты  $\omega$ .

Вследствие этого происходит разогрев металлической полоски и распространение части тепла вглубь структуры, которое определяется коэффициентом теплопроводности образца. В результате меняется сопротивление металлической полоски, что приводит к нелинейному искажению пропускаемого электрического сигнала и появлению дополнительных гармоник. Информативной в плане коэффициента теплопроводности исследуемого образца является третья гармоника падающего на полоску напряжения  $U_{3\omega}$ . В ходе эксперимента регистрируется частотная характеристика напряжения на третьей гармонике. Оригинальная автоматизированная установка для исследований температурной зависимости коэффициента теплопроводности включала в себя источник тока Keithley-6221, селективный вольтметр Stanford 810 SR и размещенные в вакуумной камере графитовый столик-нагреватель и галогеновые лампы накаливания, используемые для нагрева.

Исследования гальваномагнитных свойств структур, спектров фотолюминесценции (ФЛ) и поляризационных характеристик ФЛ излучения проводились с использованием гелиевого криостата замкнутого цикла Janis CCS-300S/202 при температурах 10–300 К в диапазоне магнитных полей  $\pm 3600$  Ое. При комнатной температуре сопротивление Холла и магнетосопротивление изучались в магнитных полях, достигающих значений  $\pm 28000$  Ое (2.8 Т).

### 3. Результаты и обсуждение

Излучательные свойства (фотолюминесценция) исходного образца и отожженных лазером образцов гетеронаноструктуры со слоем (Ga, Mn)As толщиной около 100 нм представлены на рис. 1. Спектр ФЛ исходного образца содержит четыре пика в области энергий кванта 1.27, 1.33, 1.4 и 1.43 эВ, отвечающих основным излучательным переходам в квантовых ямах QW1, QW2, QW3 и QW4, соответственно. Видно, что при плотности энергии лазерного облучения  $300 \text{ мДж/см}^2$  интенсивность излучения квантовых ям уменьшается в 3–4 раза, вместе с тем удается сохранить излучательные свойства всех квантовых ям, в том числе и КЯ QW1, расположенной на расстоянии 10–12 нм от слоя (Ga, Mn)As. Ширина пиков практически не изменяется, а их положение немного смещается в область больших энергий. С увеличением плотности энергии в импульсе до величины  $\sim 360 \text{ мДж/см}^2$  регистрируется полное гашение излучения ФЛ квантовых ям QW1 и QW2 и наблюдается значительное (более чем на порядок величины) уменьшение интенсивности ФЛ для квантовых ям QW3 и QW4. Наблюдаемые изменения в спектрах ФЛ позволяют объяснить данные исследований образцов методом вторичной ионной масс-спектрометрии (рис. 2).

Сопоставляя ВИМС профили атомов In, Ga и Mn в исходном и отожженном лазером (с плотностью энергии

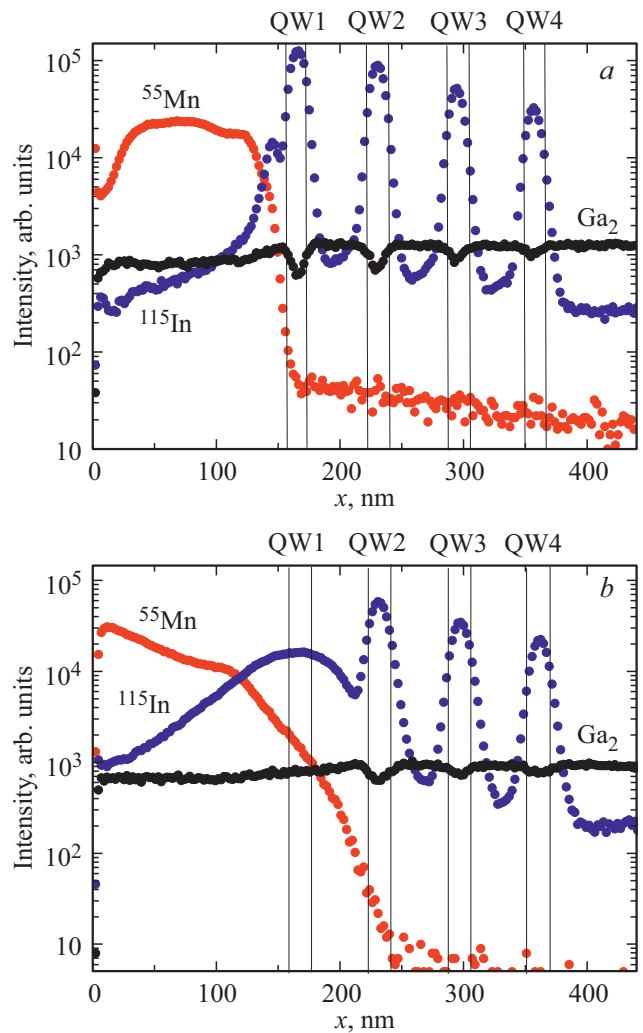


Рис. 2. ВИМС профили атомов Mn, In и Ga в исходном образце (a) и образце, отожженном эксимерным лазером с плотностью энергии  $360 \text{ мДж/см}^2$  (b).

$360 \text{ мДж/см}^2$ ) образцах (рис. 2, a и рис. 2, b соответственно) можно отметить следующие изменения:

- наблюдается значительное диффузионное расплывание индия (в особенности в области квантовой ямы QW1), приводящее к нарушению резкости гетерограниц InGaAs/GaAs и увеличению ширины квантовых ям в отожженном образце;

- атомы марганца в исходном образце сосредоточены в слое (Ga, Mn)As (толщиной около 110 нм по данным ВИМС) и профиль Mn выглядит достаточно резким;

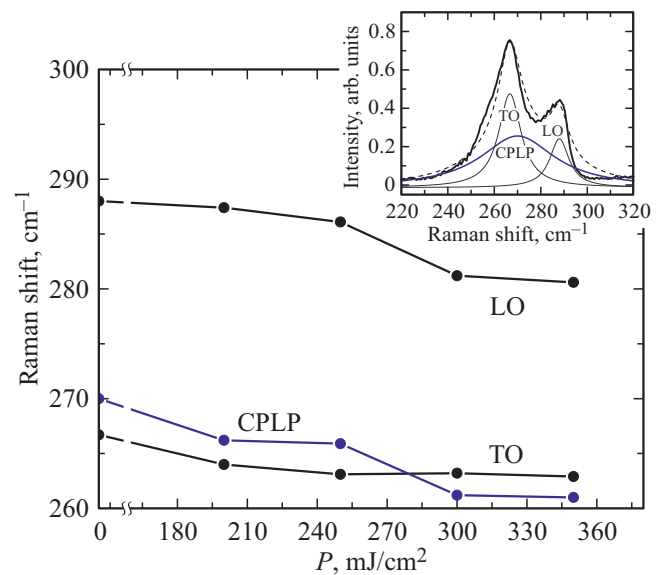
- для отожженного образца наблюдается накопление атомов Mn у поверхности слоя (Ga, Mn)As и проникновение вглубь структуры вплоть до квантовой ямы QW2.

Причиной таких диффузионных процессов является значительное тепловое воздействие, возникающее вследствие поглощения лазерного излучения. Основная часть излучения эксимерного лазера с длиной волны 248 нм поглощается в тонком приповерхностном слое (Ga, Mn)As (около 5–10 нм), происходит его разогрев

и дальнейшее распространение тепла вглубь структуры. Как было показано нами ранее [5] с использованием модели процесса лазерного отжига, основанной на решении задачи о распространении тепла в одномерной GaAs системе с учетом слоя (Ga, Mn)As на поверхности, в области расположения квантовых ям QW1 и QW4 температуры достигают значений около 1125 и 975 К, соответственно, для плотности энергии лазерного излучения  $360 \text{ mJ/cm}^2$ . Указанные температуры значительно превышают температуры изготовления гетеронаноструктур и могут способствовать диффузионному перемешиванию элементов III группы на гетерограницах InGaAs/GaAs. Кроме того, низкотемпературный слой (Ga, Mn)As с такой значительной концентрацией Mn (выше 10 at.%) содержит точечные дефекты и избыточный марганец в междоузлиях. В результате теплового воздействия происходит диффузия дефектов и атомов марганца вглубь структуры, приводящая к расплыванию границ квантовых ям. Вследствие таких процессов усиливается безизлучательная рекомбинация и регистрируется сначала, при меньших плотностях энергии лазерного излучения, уменьшение ФЛ сигнала всех квантовых ям, а затем и полное его гашение для квантовых ям, ближайших по расположению к слою (Ga, Mn)As (QW1 и QW2), и сильное уменьшение фотолюминесценции КЯ QW3 и QW4.

Анализ спектров комбинационного рассеяния света исходного и отожженного лазером образцов с использованием аппроксимации их лоренцианами показал наличие пиков в области LO- и TO-мод GaAs и связанную фонон-плазмонную моду (CPLP) (вставка на рис. 3). Причиной появления CPLP-моды являются сильнозатухающие продольные колебания плазмонов, которые взаимодействуют с LO-фононами через их макроскопические электрические поля. Для отожженных лазером образцов наблюдается уменьшение интенсивности пиков LO- и TO-мод, смещение их в область меньших частот и уширение по отношению к аналогичным пикам в спектре исходного образца. Такое поведение обусловлено разупорядочением, характеризующимся ослаблением связей и отклонениями от трансляционной симметрии, то есть эффектами, возникающими при формировании твердого раствора (Ga, Mn)As [8,9]. При этом интенсивность CPLP-моды значительно возрастает и происходит ее смещение в область низких частот (рис. 3). Это свидетельствует об усилении фонон-плазмонного взаимодействия в слое (Ga, Mn)As благодаря возрастанию концентрации носителей заряда (дырок) вследствие импульсного лазерного отжига. Данный результат подтверждается измерениями эффекта Холла при 300 К, согласно которым для подвергавшихся импульсному лазерному воздействию ( $P = 300 \text{ mJ/cm}^2$ ) образцов регистрируется возрастание объемной концентрации дырок от  $6.8 \cdot 10^{19}$  до  $2.8 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , при этом подвижность носителей заряда остается низкой и составляет  $\sim 4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ .

Таким образом, в результате лазерного воздействия, кроме изменений в излучательных характери-

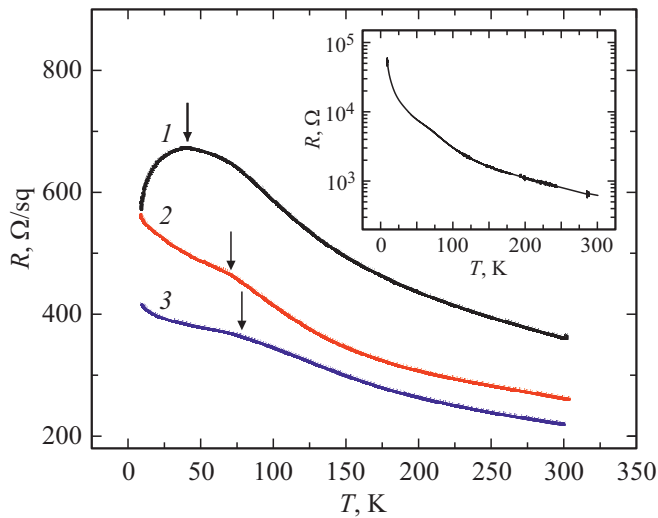


**Рис. 3.** Положение пиков в области LO-моды и TO-моды GaAs и связанной фонон-плазмонной моды (CPLP), полученное посредством аппроксимации спектров комбинационного рассеяния лоренцианами, для исходного и отожженных образцов. На вставке показан спектр комбинационного рассеяния исходного образца структуры.

стиках квантовых ям, наблюдается повышение электрической активации легирующей примеси. Исходный слой (Ga, Mn)As, выращенный при достаточно низкой температуре ( $330^\circ\text{C}$ ), может содержать значительное количество вакансий галлия ( $V_{\text{Ga}}$ ). При наносекундном лазерном нагреве слоя может происходить взаимное диффузионное перемещение на короткие расстояния (несколько нанометров) вакансий галлия и атомов Mn, находящихся первоначально в нерегулярных положениях (например, в междоузлиях,  $\text{Mn}_i$ ) в решетке полупроводника. В результате реакции  $V_{\text{Ga}} + \text{Mn}_i = \text{Mn}_{\text{Ga}}$  увеличивается суммарная электрическая активация атомов марганца в слое (Ga, Mn)As и, как следствие, возрастает концентрация носителей заряда (дырок).

Температурные зависимости сопротивления исходного и отожженного лазером образцов свидетельствуют о значительном возрастании (на два порядка величины в области температур ниже 50 К) проводимости слоя (Ga, Mn)As после воздействия лазерного излучения во всем диапазоне температур измерения (рис. 4 и вставка к нему). Из представленных данных видно, что с увеличением плотности энергии излучения от 200 (кривая 1) до 250 (кривая 2) и далее до  $300 \text{ mJ/cm}^2$  (кривая 3) сопротивление структур уменьшается на всем температурном диапазоне измерений. Зависимости  $R(T)$  содержат максимумы: ярко выраженный, как в случае образца, отожженного с  $P = 200 \text{ mJ/cm}^2$ , и менее заметные для других отожженных образцов (кривые 2 и 3). Температуру, отвечающую такому максимуму, соотносят с температурой фазового перехода ферромагнетик–пара-





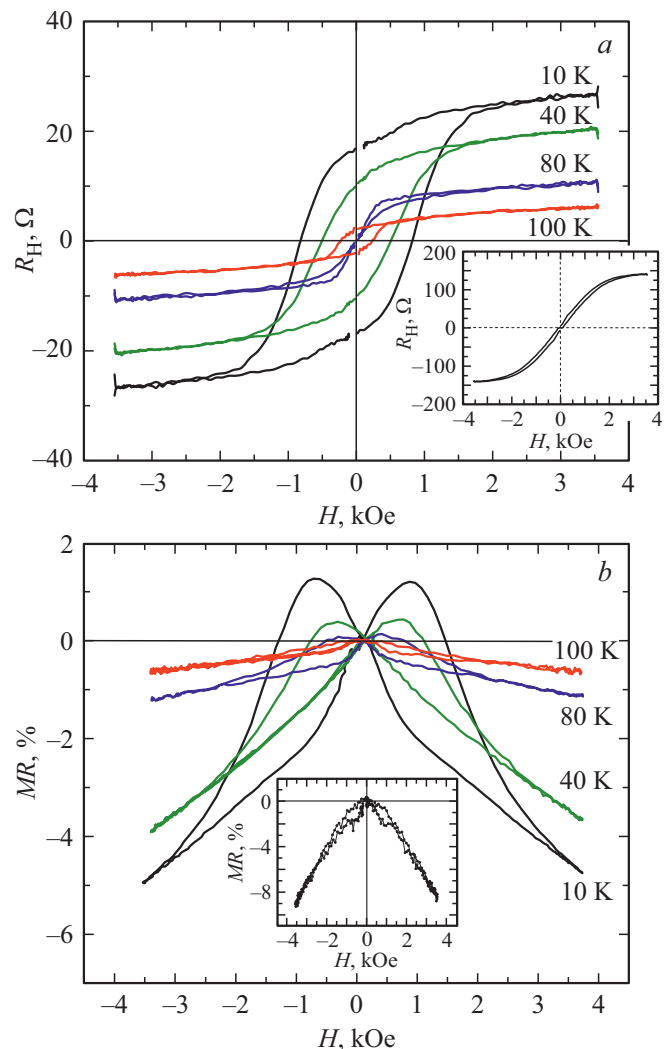
**Рис. 4.** Температурные зависимости сопротивления для образцов, отожженных эксимерным лазером с плотностью энергии 200 (кривая 1), 250 (кривая 2) и 300 мДж/см<sup>2</sup> (кривая 3). Стрелками показаны возможные значения температур фазового перехода ферромагнетик–парамагнетик. На вставке приведена зависимость сопротивления от температуры для исходного образца структуры.

магнетик (температурой Кюри,  $T_C$ ) [10]. На рис. 4 предполагаемые температуры Кюри отмечены стрелками, и можно считать, что с увеличением плотности лазерного излучения при отжиге  $T_C$  возрастает.

Об изменении магнитных свойств гетеронаноструктур со слоем (Ga, Mn)As вследствие воздействия лазерного излучения свидетельствует поведение магнитопольевых зависимостей сопротивления Холла и магнетосопротивления. На вставке к рис. 5, а приведена магнитопольевая зависимость сопротивления Холла исходного образца при 20 К, которая характеризуется петлей гистерезиса с малым значением коэрцитивного поля ( $H_C \sim 70$  Ое). При температурах свыше 40 К зависимость  $R_H(H)$  становится линейной. Магнитопольевая зависимость сопротивления Холла образца, отожженного при  $P = 250$  мДж/см<sup>2</sup>, в случае температуры измерений 10 К является нелинейной с почти квадратной петлей гистерезиса ( $H_C \sim 850$  Ое). С повышением температуры до 60–70 К происходит уменьшение коэрцитивного поля до 250–300 Ое (рис. 5, а). Для температуры 80 К наблюдается „гистерезис с осинной талией“ [11], затем при повышении температуры до 100 К на зависимости  $R_H(H)$  вновь присутствует петля гистерезиса с коэрцитивным полем около 300 Ое. Далее с увеличением температуры до 250 К сохраняется нелинейная (без гистерезиса) зависимость сопротивления Холла от магнитного поля, изменяющегося в диапазоне  $\pm 3600$  Ое. Магнитопольевая зависимость холловского сопротивления отожженного образца, полученная в больших полях (до  $\pm 28000$  Ое) при комнатной температуре, имела нелинейный вид с петлей гистерезиса ( $H_C \sim 1050$  Ое). Перечисленные осо-

бенности поведения зависимостей  $R_H(H)$  с увеличением температуры и диапазона магнитного поля при измерении, а именно, появление петли гистерезиса с „осинной талией“ и влияние диапазона изменения внешнего магнитного поля на вид зависимости, свидетельствуют о наличии в слое (Ga, Mn)As двух ферромагнитных фаз, отличающихся температурой Кюри. Для представленного на рис. 5 случая, предположительно, одна из фаз имеет  $T_C \sim 70$ –80 К, а вторая — температуру Кюри выше комнатной.

Зависимости магнетосопротивления от магнитного поля для исходного образца гетероструктуры для температуры 20 К и для образца, отожженного лазером при  $P = 250$  мДж/см<sup>2</sup>, показаны на рис. 5, б. Отрицательное магнетосопротивление (ОМС) исходного образца имеет гистерезисный вид, а его величина достигает 10% в

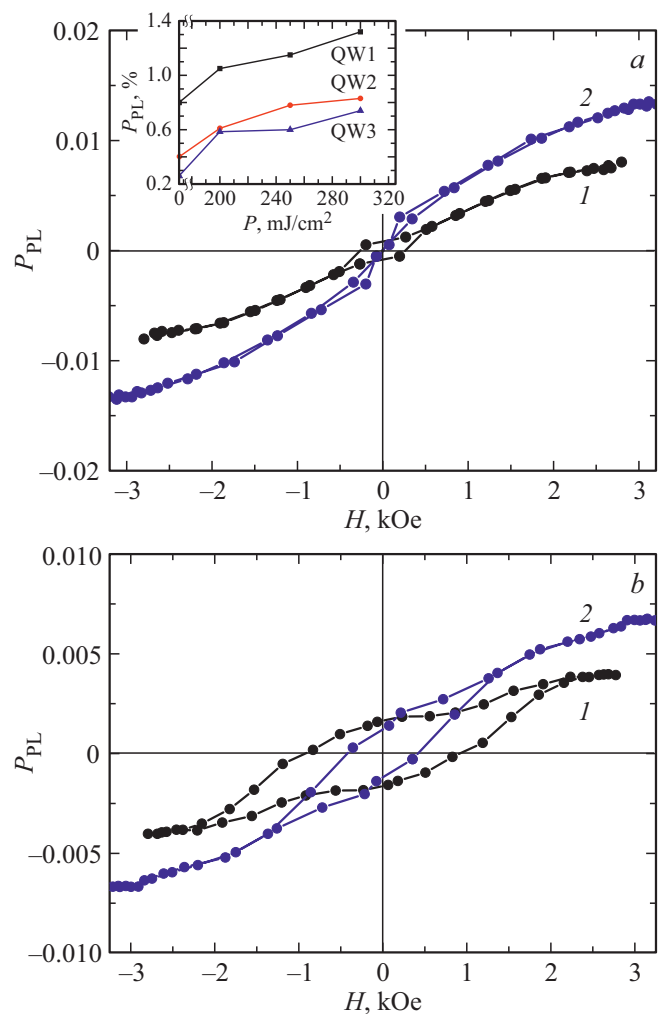


**Рис. 5.** (а) Магнитопольевые зависимости сопротивления Холла и (б) зависимости магнетосопротивления от магнитного поля при различных температурах для образца, отожженного лазером при  $P = 250$  мДж/см<sup>2</sup>. На вставках приведены магнитопольевые зависимости сопротивления Холла и магнетосопротивления исходного образца при 20 К.

магнитном поле  $\pm 3600$  Oe (вставка на рис. 5, *b*). В результате импульсного лазерного воздействия магнитопольные зависимости существенно образом модифицируются, величина ОМС уменьшается, и появляются области положительного магнетосопротивления. Такое поведение является характерным для ферромагнитных материалов и (Ga, Mn)As, в частности, и объясняется появлением эффекта анизотропного магнетосопротивления [12]. С повышением температуры измерений величина положительного магнетосопротивления снижается и уменьшается область магнитных полей, где оно регистрируется. На зависимости для температуры 100 К участок положительного магнетосопротивления отсутствует. Наблюдаемые изменения в характере магнитопольных зависимостей сопротивления также подтверждают изменение магнитных свойств слоя (Ga, Mn)As после импульсного лазерного воздействия.

Для анализа модификации свойств гетеронаноструктур со слоем (Ga, Mn)As на поверхности при импульсном лазерном отжиге были получены расчетные значения распределения температуры в образце в результате поглощения излучения эксимерного лазера. Основными параметрами, определяющими начальные условия моделирования процесса лазерного воздействия, являются оптические свойства слоя (Ga, Mn)As в области длины волны излучения эксимерного лазера (коэффициенты отражения и поглощения, потери излучения на рассеяние вследствие наличия шероховатой поверхности), коэффициент теплопроводности и толщина самого слоя [5]. При выполнении настоящей работы исследовались температурные зависимости коэффициента теплопроводности ( $k$ ) исходных образцов гетеронаноструктур со слоем (Ga, Mn)As и было установлено, что для температурного диапазона от 20 до 100°C коэффициент теплопроводности (Ga, Mn)As в 1.5–2 раза меньше, чем для GaAs (при температуре 20°C  $k$  составлял 38.5 и 59 W/m·K для (Ga, Mn)As и GaAs, соответственно). Учет этих данных при расчетах распределения температуры вдоль толщины образца и во времени показал, что в приповерхностном тонком слое (Ga, Mn)As (10–20 nm при полной толщине слоя 110 nm) температура вследствие поглощения лазерного излучения может быть близка к температуре плавления GaAs (1515 K).

Используемые нами слои (Ga, Mn)As вследствие значительного количества марганца могут содержать кластеры полуметалла MnAs, ферромагнитного при комнатной температуре. Это подтверждалось ранее при рентгено-дифракционных исследованиях [13]. Температура плавления соединения MnAs эквиатомного состава составляет 936°C (1209 K) [14]. Таким образом, вследствие лазерного воздействия возникают условия, когда температура в области слоя (Ga, Mn)As значительно превышает указанное значение и поэтому можно ожидать, что включения MnAs с более низкой температурой плавления, чем матрица, могут значительным образом модифицироваться в отожженном образце.



**Рис. 6.** Магнитопольные зависимости степени циркулярной поляризации фотолуминесцентного излучения (1) исходного образца и (2) образца, отожженного лазерным излучением с  $P = 300$  mJ/cm<sup>2</sup> при температуре 10 K для КЯ QW1 (часть *a*) и КЯ QW2 (часть *b*). На вставке показаны зависимости степени циркулярной поляризации от плотности энергии лазерного излучения для квантовых ям QW1, QW2 и QW3 при 10 K в магнитном поле 2700 Oe.

В заключительной части работы обсудим результаты исследования поляризационных характеристик фотолуминесцентного излучения. Для исходных образцов структур при 10 K было зарегистрировано частично циркулярно-поляризованное излучение для трех квантовых ям, расположенных ближе к слою (Ga, Mn)As (рис. 6). Интенсивности излучения КЯ QW4 было недостаточно, чтобы получить достоверные данные о его поляризационных характеристиках. Магнитопольные зависимости степени циркулярной поляризации (PL), приведенные на рисунке для квантовой ямы QW1, являются нелинейными с небольшим гистерезисом ( $H_C \sim 250$  Oe). Воздействие лазерного излучения способствует увеличению степени циркулярной поляризации излучения для всех трех КЯ (вставка на рис. 6, *a*). Величина  $P_{PL}$  для КЯ

QW1 с энергией основного перехода 1.27 eV возрастает от 0.8 до 1–1.5% с увеличением плотности энергии излучения при лазерном отжиге, при этом гистерезис на зависимости для отожженного образца не регистрируется. Напротив, зависимости  $P_{PL}(H)$  для более коротковолновой квантовой ямы QW2 (энергия основного перехода 1.33 eV) в случае исходного и отожженного образцов содержат гистерезис с большой величиной коэрцитивного поля (около 960 Oe для исходного образца).

Полученные магнитопольные зависимости степени циркулярной поляризации фотолюминесценции квантовых ям определяются не только зависимостью намагниченности от магнитного поля, приложенного перпендикулярно слою (Ga, Mn)As, но, главным образом, магнитооптическими свойствами (Ga, Mn)As (магнитноциркулярным дихроизмом), имеющими сильную спектральную зависимость. В особенности это характерно для неоднородных пленок (Ga, Mn)As, содержащих включения полуметаллических ферромагнитных соединений (MnAs). В частности, сообщается о присутствии в спектрах экваториального эффекта Керра слоев (Ga, Mn)As, изготовленных импульсным лазерным нанесением в аналогичных условиях (температура и содержание Mn) сильной резонансной полосы ( $E = 0.5–2.0$  eV), связанной с присутствием кластеров MnAs [15].

Можно предположить, что в области излучения длинноволновой квантовой ямы QW1 (около 980 nm при 77 K) матрица, представляющая собой легированный марганцем GaAs, является почти прозрачной и, таким образом, ее магнитные свойства не оказывают существенного влияния на прошедшее через нее излучение. Остается только вклад от полуметаллических кластеров. В случае квантовой ямы QW2 длина волны излучения уменьшается (до 930 nm) и наряду с вкладом в магнитооптические характеристики от полуметаллических включений проявляется влияние матрицы разбавленного магнитного полупроводника.

#### 4. Заключение

В работе представлены результаты комплексных исследований влияния импульсного лазерного отжига на квантово-размерные структуры InGaAs/GaAs со слоем (Ga, Mn)As в качестве спинового инжектора на поверхности. Показано, что вследствие лазерного воздействия при плотности энергии  $\leq 300$  mJ/cm<sup>2</sup> сохраняются излучательные свойства активной области структур (квантовой ямы InGaAs/GaAs), расположенной на расстоянии 10–12 nm от слоя (Ga, Mn)As. При этом фотолюминесцентное излучение квантовой ямы частично циркулярнополяризовано, и степень циркулярной поляризации после импульсного лазерного отжига существенно возрастает. Обнаружено значительное возрастание проводимости структур на всем диапазоне температур измерений (от 10 до 300 K) с увеличением плотности энергии

лазерного излучения, обусловленное повышением электрической активности примеси Mn в слое (Ga, Mn)As. Поведение магнитопольных зависимостей сопротивления Холла с увеличением температуры и диапазона магнитных полей при измерениях свидетельствует о присутствии в пленке (Ga, Mn)As двух ферромагнитных фаз, отличающихся температурой Кюри.

Для получения расчетных распределений температуры вдоль толщины образца и во времени с применением модели процесса лазерного отжига, основанной на решении задачи о распространении тепла в одномерной GaAs системе с учетом слоя (Ga, Mn)As на поверхности, были использованы оригинальные данные по коэффициенту теплопроводности структур со слоем (Ga, Mn)As, измеренные посредством модифицированной методики частотного разделения ( $3\omega$ -метода). Установлено, что в приповерхностном тонком слое (Ga, Mn)As (10–20 nm при полной толщине слоя 110 nm) температура вследствие поглощения лазерного излучения может быть близка к температуре плавления GaAs (1515 K). Поэтому возникают условия, когда температура в области слоя (Ga, Mn)As значительно превышает температуру плавления возможных присутствующих в нем включений полуметалла MnAs (1209 K), и это обстоятельство будет способствовать их значительной структурной модификации, оказывающей влияние на магнитные и магнитооптические свойства структур.

Полученные результаты представляют интерес для развития технологии использования слоев разбавленных магнитных полупроводников в приборах спиновой оптоэлектроники.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-19-00545, изготовление структур и основные исследования) и (грант № 18-72-10061, исследование поляризационных характеристик фотолюминесценции).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, А.В. Здоревейшев, А.В. Кудрин, В.П. Лесников, А.В. Нежданов, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, И.Ю. Пашенькин, С.М. Плякина. ФТТ **59**, *11*, 2130 (2017).
- [2] W. HaiLong, C. Lin, Z. JianHua. Sci. China Phys. Mech. Astronomy **56**, *1*, 99 (2013).
- [3] Sh.U. Yuldasheva, Z.A. Yunusova, Y.H. Kwonb, S.H. Leec, R. Ahujad, T.W. Kanga. Solid State Commun. **263**, 38 (2017).
- [4] Y. Jiang, Y.Ji, N. Li, J. Guo, Y. Yuan, W. Liang, H. Yang. AIP Advances **11**, 025011 (2021).
- [5] О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, И.Л. Калентьева, Ю.М. Кузнецов, А.В. Нежданов, А.Е. Парафин, Д.В. Хомичкий, И.Н. Антонов. ФТТ **63**, *3*, 346 (2021).

- [6] R.T. Blunt. CS MANTECH Conference. (April 24–27, 2006). Vancouver, British Columbia, Canada. P. 59.
- [7] D.J. Kim, D.S. Kim, S. Cho, S.W. Kim, S.H. Lee, J.C. Kim. Int. J. Thermophys. **25**, 281 (2004).
- [8] W. Limmer, M. Glunk, S. Mascheck, A. Koeder, D. Klarer, W. Schoch, K. Thonke, R. Sauer, A. Waag. Phys. Rev. B **66**, 205209 (2002).
- [9] M.J. Seong, S.H. Chun, H.M. Cheong, N. Samarth, A. Mascarenhas. Phys. Rev. B **66**, 033202 (2002).
- [10] Э.Л. Нагаев. Физика магнитных полупроводников. Наука, М. (1979).
- [11] L.H. Bennetta, E.D. Torre. J. App. Phys. **97**, 10E502 (2005).
- [12] K.Y. Wang, K.W. Edmonds, R.P. Campion, L.X. Zhao, C.T. Foxon, B.L. Gallagher. Phys. Rev. B **72**, 085201 (2005).
- [13] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Кудрин, М.В. Сапожников. ФТТ **52**, 11, 2124 (2010).
- [14] J. Paitz. Kristall Tech. **7**, 9, 999 (1972).
- [15] З.Э. Кунькова, Е.А. Ганьшина, Л.Л. Голик, Ю.А. Данилов, А.В. Кудрин, В.И. Ковалев, Г.С. Зыков, Ю.В. Маркин, О.В. Вихрова, Б.Н. Звонков. ФТП **60**, 5, 940 (2018).

*Редактор Ю.Э. Китаев*