

# Влияние напряжений сжатия и растяжения в слоях GaMnAs на их магнитные свойства

© Б.Н. Звонков<sup>1</sup>, О.В. Вихрова<sup>1</sup>, Ю.А. Данилов<sup>1</sup>, Ю.Н. Дроздов<sup>2</sup>, А.В. Кудрин<sup>1</sup>, М.В. Сапожников<sup>2</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  
E-mail: danilov@nifti.unn.ru

Исследовано влияние упругих напряжений (сжатия, растяжения) на магнитные свойства эпитаксиальных слоев GaMnAs, полученных методом лазерного распыления твердотельных мишеней в газовой атмосфере на различных буферных подслоях ( $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ ) и подложках (GaAs, InP). По данным исследований магнитопольевых зависимостей сопротивления Холла было установлено, что все слои обладали ферромагнитными свойствами с температурой Кюри  $\sim 50$  К. Показано, что в случае напряжений растяжения в слоях GaMnAs (буферы  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ , подложка InP) вид аномального эффекта Холла свидетельствует о преимущественной ориентации оси легкого намагничивания в направлении роста в отличие от слоев GaMnAs, полученных на подложке GaAs (с напряжениями сжатия), демонстрирующих преобладание составляющей вектора намагниченности в плоскости слоя.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 08-02-00548а и 08-02-97038р\_поволжье\_а, АВЦП „Развитие потенциала высшей школы“ 2.2.2.2/4297 и CRDF BR4M01, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“, Программы фундаментальных исследований ОФН РАН „Спиновые явления в твердотельных наноструктурах и спинтроника“ и ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“.

## 1. Введение

В связи с активным развитием полупроводниковой спинтроники актуальными являются задачи управления магнитными свойствами эпитаксиальных слоев магнитных полупроводников (GaMnAs, InMnAs), в частности направлением оси легкого намагничивания относительно плоскости структур. Для ряда практических приложений, например для использования магнитного полупроводника в качестве инжектора спин-поляризованных носителей в спиновых светодиодах, необходимо получение слоев магнитных полупроводников с осью легкого намагничивания, направленной перпендикулярно плоскости слоя. Этот прием позволит значительно уменьшить магнитные поля, в которых наблюдается спиновая поляризация диодных структур с инжекторами из магнитных полупроводников в геометрии Фарадея, и существенно упростить последующее интегрирование магнитоуправляемых спиновых светоизлучающих диодов в оптоэлектронные схемы.

Известно, что параметр решетки GaMnAs слоев больше, чем у GaAs — материала, обычно используемого в качестве подложек. Возникающие в процессе выращивания напряжения сжатия в эпитаксиальном слое GaMnAs приводят к преимущественной ориентации оси легкого намагничивания в плоскости слоя GaMnAs [1]. Управление направлением оси легкого намагничивания в эпитаксиальных слоях GaMnAs возможно путем изменения в них величины и характера упругих напряжений. В частности, в работе [1] показано, что выращивание слоев GaMnAs ( $x_{\text{Mn}}$  в диапазоне 4–5%) методом

низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии на буферном слое InGaAs ( $x_{\text{In}} = 16\%$ ) позволяет ориентировать ось легкого намагничивания вдоль направления роста за счет создания в слое GaMnAs напряжений растяжения.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния упругих напряжений в выращенных методом лазерного нанесения слоях GaMnAs на их магнитные свойства. Использование различных подложек и буферных слоев обеспечивало создание как напряжений сжатия в слое GaMnAs (подложка GaAs), так и напряжений растяжения (буферные слои  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ , подложка InP).

## 2. Методика эксперимента

Структуры были получены путем поочередного распыления лазером мишеней GaAs и Mn в потоке арсина и водорода при температуре  $350^\circ\text{C}$  и соотношении времен распыления  $Y_{\text{Mn}} = t_{\text{Mn}} / (t_{\text{GaAs}} + t_{\text{Mn}}) = 0.13$ . Слои GaMnAs толщиной порядка  $0.1 \mu\text{m}$  наносились либо непосредственно на подложки полуизолирующего GaAs или InP, либо на псевдоморфные буферные слои  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  толщиной  $\approx 0.6 \mu\text{m}$ , полученные методом МОС-гидридной эпитаксии.

Были исследованы кристаллическая структура, оптические, магнитооптические и гальваномагнитные свойства слоев. Для проведения исследований использовались метод рентгеновской дифракции, спектроскопия фотолуминесценции, меридиональный и полярный эф-

Характеристики образцов GaMnAs, выращенных методом лазерного распыления на различных подложках и буферных слоях

Номер образца	Тип подложки или буферного слоя	$\Delta a/a^*$ , %	300 К		77 К	
			$\rho$ , $\text{cm}^{-3}$	$\mu_{\text{eff}}$ , $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	$\rho$ , $\text{cm}^{-3}$	$\mu_{\text{eff}}$ , $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
5607	Подложка <i>i</i> -GaAs (001)	-0.29	$3.8 \cdot 10^{19}$	4	$1.4 \cdot 10^{18}$	30
5837	Буферный слой InGaAs ( $x_{\text{In}} \sim 0.15$ )	+0.8	$3.1 \cdot 10^{19}$	5	$3.1 \cdot 10^{18}$	13
5640	Подложка <i>i</i> -InP (001)	+3.5	$3.2 \cdot 10^{19}$	4	$1.8 \cdot 10^{18}$	16
5841	Буферный слой InGaP ( $x_{\text{In}} \sim 0.6$ )	+0.6	$2.3 \cdot 10^{19}$	7	$1.5 \cdot 10^{18}$	30

\* Рассогласование параметров решетки  $\Delta a/a$  оценивалось по отношению к литературным данным для параметра решетки GaMnAs с содержанием Mn 4–5% —  $a = 0.56696 \text{ nm}$  [1].

фекты Керра на длине волны излучения He–Ne-лазера (632.5 nm). Анализ магнитополевых зависимостей сопротивления Холла и магнетосопротивления в диапазоне температур 10–300 К проводился с использованием криостата замкнутого цикла Janis CCS-300S/202.

В таблице представлены краткая характеристика полученных структур и их электрические параметры при 300 и 77 К. Содержание индия в буферных слоях  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  определялось из рентгеноструктурных исследований. Расчетные значения рассогласования параметров решетки в полученных структурах, оцененные с учетом литературных данных для параметра решетки GaMnAs с содержанием Mn 4–5% [1] относительно  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ,  $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{P}$  и InP (см. таблицу), позволяют предположить, что в слоях GaMnAs, выращенных на данных материалах, будут присутствовать напряжения растяжения.

### 3. Результаты и обсуждение

Кристаллическое качество полученных образцов характеризуется спектрами рентгеновской дифракции (рис. 1). Так, на спектрах дифракции структур 5837 и 5841 хорошо видны пики, соответствующие буферным подслоям  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ,  $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{P}$ . По положению пиков (400) и асимметричных (440) был оценен состав твердых растворов, остаточная упругая деформация и период решетки в плоскости буферного слоя. Пик от слоя GaMnAs в этих образцах практически не различим на фоне пика от подложки GaAs. Для структуры 5840, сформированной на подложке InP, присутствует широкий пик в области значений  $2\theta$ , близких к (400) GaAs. По положению ( $2\theta = 66.2^\circ$ ) он отвечает деформированному за счет эпитаксиальных соотношений с подложкой слою GaMnAs. Уточнить состав не удается из-за большой ширины и малой интенсивности пика. Ширина кривой качания (FWHM) $_{\omega} = 1.7^\circ$  отвечает сильно релаксированному слою. Из-за малой толщины слой сохранил

остаточное упругое растяжение в плоскости подложки и пуассоновское сжатие по нормали к поверхности.

Спектральные зависимости фотолюминесценции (при 77 К) изучаемых структур содержали пики от буферных слоев  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ,  $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{P}$  и подложки InP, отвечающие межзонным переходам 1.29, 1.779 и 1.413 eV соответственно. Вместе с тем в области излучения GaAs на всех спектрах наблюдалась широкая полоса низкой интенсивности излучения, не позволяющая надежно диагностировать какие-либо переходы. По-видимому, это обусловлено малой толщиной слоев GaMnAs и нарушениями кристаллической структуры, вызванными присутствием включений второй фазы — MnAs.

Было установлено, что все образцы GaMnAs демонстрируют *p*-тип проводимости и линейные зависимости сопротивления Холла от магнитного поля при 300 и 77 К. Рассчитанные значения эффективной холловской

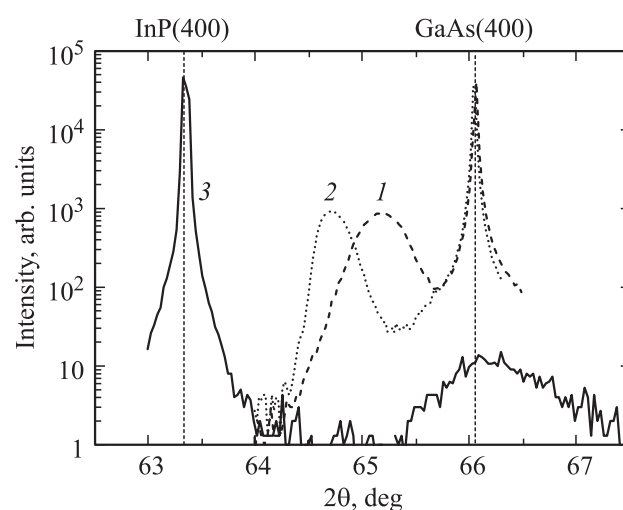
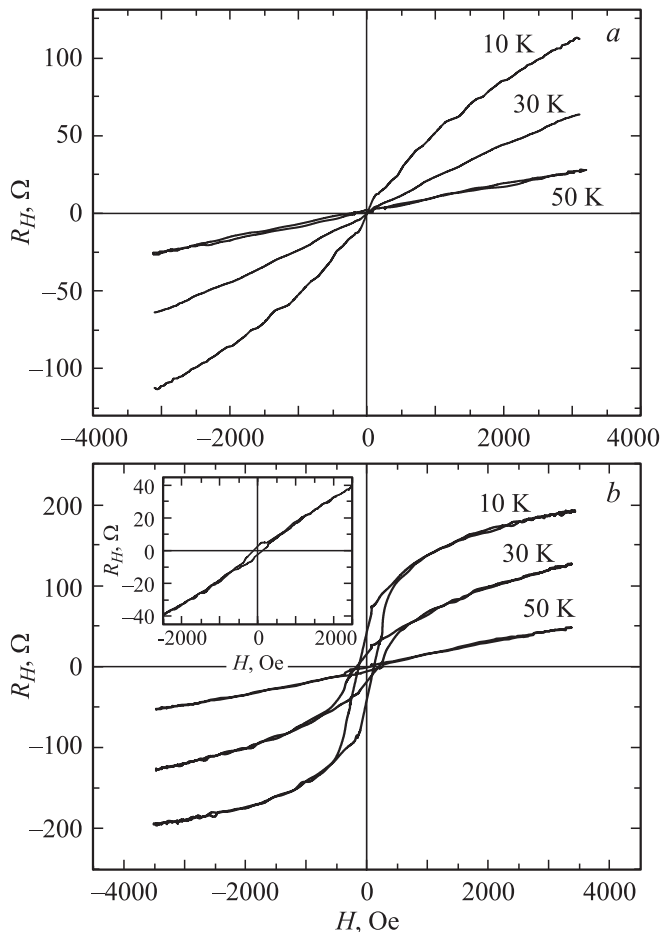


Рис. 1. Спектры рентгеновской дифракции для структур со слоями GaMnAs. Кривая 1 соответствует структуре 5837, 2 — структуре 5841, 3 — структуре 5840 (описание структур приведено в таблице).



**Рис. 2.** Зависимость сопротивления Холла от магнитного поля при различных температурах для слоев GaMnAs, выращенных на подложке GaAs (структура 5607) (a) и буферном слое  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  (структуре 5837) (b). На вставке представлена зависимость  $R_H(H)$  при 50 K в другом масштабе.

подвижности и концентрации носителей также приведены в таблице. Видно, что их величины слабо зависят от материала буферного слоя или подложки. Температурная зависимость сопротивления слоев GaMnAs имеет полупроводниковый характер, т.е. наблюдается увеличение сопротивления при понижении температуры.

На рис. 2 представлены магнитополевые зависимости сопротивления Холла  $R_H(H)$ , полученные при различных температурах, для структур 5607 и 5837. При температурах ниже 60 K в исследованных слоях GaMnAs наблюдался аномальный эффект Холла. При этом нелинейные зависимости  $R_H(H)$  образца 5837 содержали петлю гистерезиса, что свидетельствует о его ферромагнитных свойствах. Кроме того, слои GaMnAs демонстрировали характерное для ферромагнитных материалов отрицательное магнетосопротивление, составляющее около 7% при 10 K в магнитном поле 3500 Oe.

Вид магнитополевых зависимостей сопротивления Холла качественно различается для слоев GaMnAs с напряжениями сжатия и растяжения. Поскольку при

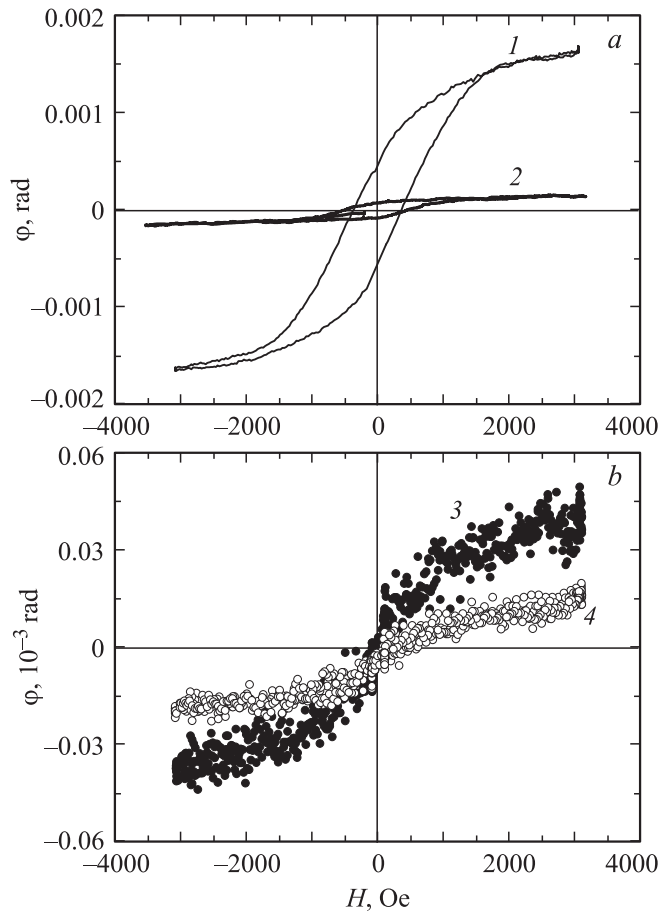
появлении аномального эффекта Холла в зависимости холловского сопротивления от магнитного поля присутствует слагаемое, пропорциональное намагниченности материала, вид кривой  $R_H(H)$  определяется характером намагничивания GaMnAs внешним магнитным полем, перпендикулярным плоскости слоев.

Для слоя GaMnAs с напряжениями сжатия (структура 5607) при температурах ниже 60 K зависимость  $R_H(H)$  демонстрирует нелинейный вид без петли гистерезиса и без явной тенденции к насыщению (рис. 2, a). Подобный вид аномального эффекта Холла характерен для слоев GaMnAs, полученных на GaAs, и связан с преимущественной ориентацией оси легкого намагничивания в плоскости слоя [2].

В слоях GaMnAs с напряжениями растяжения (структуры 5837, 5840, 5841) аномальный эффект Холла проявляется иначе: магнитополевые зависимости холловского сопротивления имеют гистерезисный характер (коэрцитивное поле  $\approx 150$  Oe при 10 K) и обнаруживают тенденцию к насыщению в магнитном поле порядка 2000 Oe (рис. 2, b). Такой характер магнитополевых зависимостей сопротивления Холла свидетельствует о появлении в данных слоях GaMnAs компоненты оси легкого намагничивания, перпендикулярной плоскости слоя. Подобное изменение вида магнитополевой зависимости холловского сопротивления (появление гистерезиса и тенденции к насыщению) наблюдалось в GaMnAs, полученном методом молекулярно-лучевой эпитаксии на буферном слое  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  [3].

Гистерезисный характер магнитополевой зависимости сопротивления Холла сохраняется до  $\approx 50$  K для слоев GaMnAs с напряжениями растяжения (вставка на рис. 2, b). Поэтому можно предположить, что температура Кюри  $T_C$  исследованных слоев GaMnAs составляет порядка 50 K.

Вместе с тем исследования магнитооптического эффекта Керра свидетельствуют о сохранении ферромагнитных свойств вплоть до комнатной температуры. Магнитополевые зависимости угла Керра, полученные при 300 K в полярной и меридиональной геометрии (магнитное поле приложено перпендикулярно плоскости слоя и в плоскости слоя соответственно) для структуры 5607 и в полярной геометрии для структур 5937 и 5840, представлены на рис. 3, a и b соответственно. Наблюдаемая при комнатной температуре нелинейная магнитополевая зависимость угла вращения плоскости поляризации может быть связана с присутствием в исследованных слоях GaMnAs включений ферромагнитной фазы MnAs (с температурой Кюри  $\approx 315$  K). Следует отметить, что регистрируемый в структурах аномальный эффект Холла определяется ферромагнитными свойствами матрицы GaMnAs и не связан с присутствием фазы MnAs, поскольку наблюдается при температурах ниже 50 K. Можно полагать, что ферромагнетизм слоев GaMnAs, полученных методом лазерного нанесения, определяется сосуществованием двух ферромагнитных



**Рис. 3.** *a*) Магнитополевые зависимости угла Керра в полярной (1) и меридиональной (2) геометрии для структуры 5607. *b*) Магнитополевые зависимости угла Керра в полярной геометрии для структур 5837 (3) и 5840 (4). Температура измерений 300 К.

подсистем: матрицы GaMnAs ( $T_C \approx 50$  К) и ансамбля включений MnAs ( $T_C \approx 315$  К).

Случае структуры со слоем GaMnAs с напряжениями сжатия магнитополевые зависимости угла Керра имеют гистерезисный вид подобного характера (сравнимые величины коэрцитивного поля ( $\sim 500$  Oe) и поля, в котором происходит насыщение ( $\sim 2000$  Oe)) как в полярной, так и в меридиональной геометрии (рис. 3, *a*). Напротив, для структур 5837 и 5840 с напряжениями растяжения в слое GaMnAs магнитооптический эффект Керра выражен значительно слабее. Нелинейный характер магнитополевой зависимости угла вращения плоскости поляризации регистрируется только в полярной геометрии (рис. 3, *a*), что может быть связано либо с меньшим количеством ферромагнитной фазы MnAs, либо с характером ее внедрения (размеры и форма включений) в этих слоях. Наблюдаемое различие магнитооптических свойств исследованных структур позволяет предположить, что возникающие из-за рассогласования параметров решетки растущего слоя GaMnAs и буферного слоя или подложки напряжения влияют не только

на ориентацию вектора легкого намагничивания матрицы GaMnAs, но и на процесс образования включений ферромагнитной фазы MnAs.

#### 4. Заключение

Таким образом, исследование магнитополевых характеристик (сопротивления Холла, магнетосопротивления) эпитаксиальных слоев GaMnAs, полученных методом лазерного распыления в атмосфере арсина и водорода на различных буферных подслоях и подложках, продемонстрировало влияние упругих напряжений сжатия (подложка GaAs) и растяжения (буферные слои  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ,  $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{P}$  и подложка InP) на преимущественную ориентацию вектора намагниченности относительно плоскости слоя. Показано, что в случае напряжений растяжения в слоях GaMnAs преобладало расположение оси легкого намагничивания перпендикулярно плоскости слоя. При этом использование материалов  $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{P}$  и InP для получения напряженных слоев GaMnAs было реализовано впервые, а результаты проведенных исследований показывают универсальность принципа управления положением вектора намагниченности посредством создания упругих напряжений. Кроме того, при исследованиях магнитооптического эффекта Керра было выявлено влияние упругих напряжений на формирование ферромагнитных включений второй фазы MnAs в слоях GaMnAs.

#### Список литературы

- [1] F. Matsukura, M. Sawicki, T. Dietl, D. Chiba, H. Ohno. *Physica E* **21**, 1032 (2004).
- [2] H. Ohno. *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 110 (1999).
- [3] H. Lee, S. Chung, S. Lee, X. Liu, J.K. Furdyna. *J. Appl. Phys.* **105**, 07C505 (2009).