

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.228.3

МАГНИТООПТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СОБСТВЕННОГО ФЕРРОМАГНЕТИЗМА И ФАЗОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ В РАЗБАВЛЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

© 2020 г. Е. А. Ганьшина^а, Л. Л. Голик^б, З. Э. Кункова^{б, *}, Г. С. Зыков^а,
А. И. Руковишников^б, Ю. В. Маркин^б

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, GSP-1, Москва, 119991 Россия

^бИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,
пл. Введенского, 1, Фрязино, 141190 Россия

*e-mail: z.kunkova@gmail.com

Поступила в редакцию 16.09.2019 г.

После доработки 08.10.2019 г.

Принята к публикации 10.10.2019 г.

Представлены спектральные и температурные зависимости магнитооптического экваториального эффекта Керра (ЭЭК) слоев GaMnAs, полученных разными методами. Слои, сформированные импульсным лазерным распылением при температуре 300°C, демонстрируют ферромагнитное поведение ниже 80 К, которое обусловлено присутствием в парамагнитной матрице локальных ферромагнитных областей (Ga, Mn)As. В слоях Ga(In)MnAs, полученных ионной имплантацией с последующим импульсным лазерным отжигом, обнаружен сильный отклик ЭЭК при низких температурах. Присутствие в спектрах ЭЭК характеристической полосы в области переходов в точке L зонной структуры Ga(In)As подтверждает собственную природу ферромагнетизма. Температурные зависимости ЭЭК, измеренные в разных областях спектра, демонстрируют сложное немонотонное поведение, свидетельствующее о магнитной неоднородности слоев. Особенности, ранее не наблюдавшиеся в магнитооптических спектрах GaMnAs, объяснены с учетом магнитной и фазовой неоднородности слоев. Показана чувствительность ЭЭК к фазовой неоднородности слоев Ga(In)MnAs, а также эффективность при изучении электронного спектра и магнитной структуры разбавленных магнитных полупроводников.

Ключевые слова: разбавленные магнитные полупроводники, GaMnAs, магнитооптическая спектроскопия, ЭЭК

DOI: 10.31857/S0015323020030043

ВВЕДЕНИЕ

Разбавленные магнитные полупроводники (РМП) являются перспективными материалами спинтроники, но для использования их функциональных возможностей необходимо, чтобы температура Кюри заметно превышала комнатную. За последние 20 лет ферромагнетизм при комнатной температуре обнаружен в широком спектре материалов. Однако в РМП был выявлен ряд собственных источников ферромагнитного поведения: магнитные загрязнения, инструментальные артефакты, присутствие вторичных магнитных фаз [1]. В связи с этим сообщения о высокотемпературных РМП должны содержать надежные подтверждения собственной природы ферромагнетизма. Для получения таких подтверждений в дополнение к обычным лабораторным методам (магнитометрия, электрические и магнитотранспортные измерения) используются современные

методы структурной и магнитной диагностики: просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновская дифракция, рентгеновский магнитный круговой дихроизм и др. Однако эти сложные и дорогостоящие методы не всегда доступны.

Известно, что собственный ферромагнетизм РМП проявляется в магнитооптических (МО) спектрах особенностями, энергетическое положение которых определяется зонной структурой исходного полупроводника. Это делает МО-спектроскопию эффективным методом диагностики и изучения РМП, позволяющим регистрировать возникновение ферромагнетизма, выявлять наличие вторичных магнитных фаз, получать информацию о деталях электронного спектра РМП [2–4].

Актуальными вопросами физики РМП являются взаимодействие между ферромагнетизмом и локализацией носителей и эволюция ферромаг-

Таблица 1. Флюенс ионов Mn и характеристики слоев Ga_{1-x}Mn_xAs и In_{1-x}Mn_xAs

Ga _{1-x} Mn _x As, №	W, см ⁻²	x	T _C , К	In _{1-x} Mn _x As, №	W, см ⁻²	x	T _C , К
1-G	1 × 10 ¹⁵	0.0066	(7.5)	1-I	4 × 10 ¹⁵	0.019	14
2-G	1.5 × 10 ¹⁵	0.0087	17	2-I	8 × 10 ¹⁵	0.042	40
3-G	2 × 10 ¹⁵	0.012	31	3-I	1.6 × 10 ¹⁶	0.069	77
4-G	8 × 10 ¹⁵	0.018	60	4-I	2.8 × 10 ¹⁶	0.105	82
5-G	1 × 10 ¹⁶	~0.033	60				

нетизма в них. Сосуществование сильных эффектов обменной связи между носителями и локализованными спинами с явлениями локализации в неупорядоченных системах — одна из характерных особенностей РМП. Вопрос о взаимном влиянии ферромагнетизма и локализации особенно актуален в соединениях Ga(In)MnAs, где носители, участвующие в ферромагнитном обмене, в то же время подвержены локализации [5–9]. Понимание взаимодействия между ферромагнетизмом и локализацией находится на начальной стадии. Это связано как с недостаточным развитием теории перехода металл–изолятор (MIT) в РМП, так и с сильной зависимостью локализации и магнитных свойств от концентрации плохо контролируемых донорных дефектов (Mn в междоузлиях и антиструктурного As). Наличие случайно распределенных акцепторов (ионов Mn в узлах решетки) приводит к существенному беспорядку, флуктуациям локальной плотности носителей и электронному фазовому разделению в GaMnAs [9]. Последнее может сопровождаться переходом металл–изолятор и образованием наноразмерных металлических ферромагнитных областей в парамагнитной матрице. Сосуществование разных магнитных фаз экспериментально наблюдали в слоях GaMnAs, полученных методами низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии (НТ-МЛЭ) [7, 10, 11] и ионной имплантации с последующим импульсным лазерным отжигом (ИИ-ИЛО) [12, 13]. Магнитооптическая спектроскопия чувствительна не только к дальнему магнитному порядку, но и к возникновению ближнего порядка, и присутствие магнитных неоднородностей может проявляться в появлении дополнительных особенностей в спектрах и на температурных зависимостях МО-сигнала.

Типы структурных и точечных дефектов и, следовательно, концентрация свободных носителей, положение уровня Ферми, а также характер фазовых неоднородностей зависят от ростовой технологии. Большинство МО-исследований выполнено на слоях GaMnAs, полученных технологией НТ-МЛЭ [3 и ссылки в 16]. В то же время представляют интерес РМП, сформированные методом ИИ-ИЛО, поскольку в них практически отсутствуют дефекты, связанные с междоузельным Mn и антиструктурным As.

Мы использовали МО-спектроскопию для изучения свойств слоев Ga(In)MnAs, полученными методами ИЛР и ИИ-ИЛО [4, 14–17]. В настоящей работе представлены экспериментальные данные, демонстрирующие эффективность МО-спектроскопии для выявления вторичных магнитных фаз, подтверждения собственного ферромагнетизма и изучения особенностей электронного спектра РМП. Показана чувствительность МО-спектроскопии к электронному фазовому разделению в РМП.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Часть исследованных образцов GaMnAs получена методом лазерного распыления (ИЛР) в НИФТИ ННГУ им. Лобачевского [18]. Количество Mn в слоях контролировали соотношением времен распыления Mn- и GaAs-мишеней, $Y_{Mn} = t_{Mn}/(t_{Mn} + t_{GaAs})$. Ниже представлены результаты исследования образцов GaMnAs/i-GaAs(001) № 1–№ 4, сформированных при $Y_{Mn} = 0.13$ и 0.23 и температурах подложки $T_g = 300, 330$ и 350°C . Толщина слоя GaMnAs в образцах №№ 1–3 130 нм, в образце № 4 — 100 нм.

Также изучали слои Ga_{1-x}Mn_xAs и In_{1-x}Mn_xAs, полученные методом ИИ-ИЛО в Ion Beam Center при Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. Информация о получении образцов содержится в [12, 19]. Данные о распределении Mn по толщине слоев, результаты просвечивающей электронной микроскопии, электрических измерений и магнитометрии слоев Ga_{1-x}Mn_xAs представлены в [13]. Детали получения, данные магнитометрии и рентгеновского исследования In_{1-x}Mn_xAs опубликованы в [20]. Эффективная толщина слоев, сформированных ИИ-ИЛО, 80 нм. Значения флюенса ионов Mn, W, концентрация Mn, x, и значения температуры Кюри слоев, T_C, приведены в табл. 1.

Магнитооптические свойства слоев РМП изучали в геометрии экваториального эффекта Керра (ЭЭК), который состоит в изменении интенсивности отраженного образцом p-поляризованного света при намагничивании в магнитном поле, параллельном поверхности образца и пер-

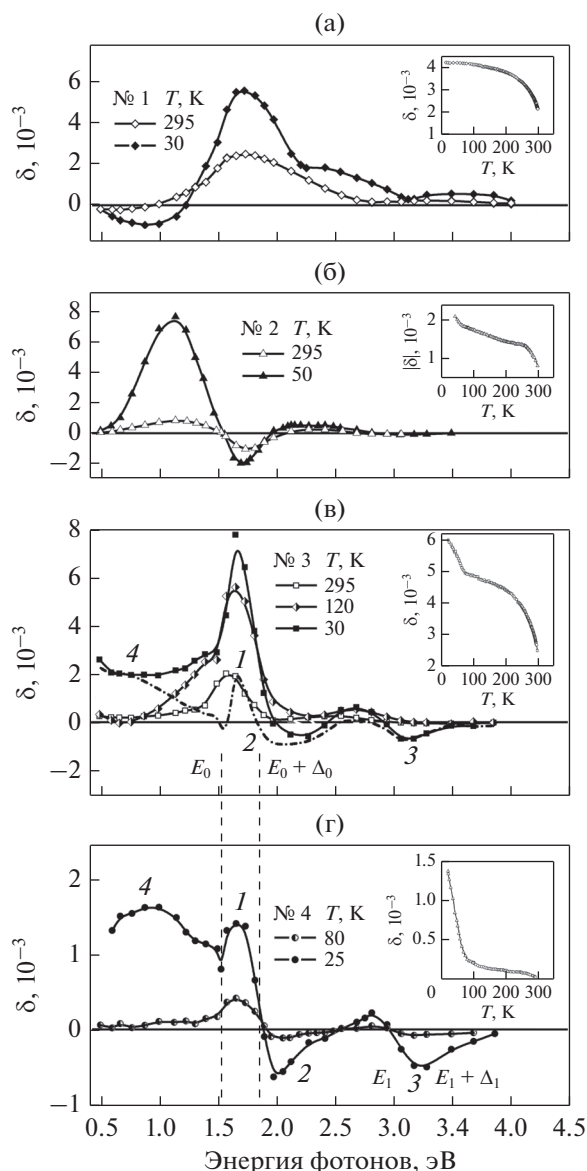


Рис. 1. Спектры ЭЭК образцов № 1–№ 4 при $T_{\text{комн}}$ и низких температурах. Пунктирные линии – энергии переходов E_0 , $E_0 + \Delta_0$ и E_1 , $E_1 + \Delta_1$ в Γ и L точках GaAs при $T = 22$ К [22]. Кривая без символов на рис. 1в – $\delta(E) = \delta(E)_{30\text{ К}} - \delta(E)_{120\text{ К}}$. На вставках показаны зависимости $\delta(T)$, измеренные при энергиях E , эВ: № 1 – 1.97, № 2 – 1.73, № 3 – 1.65, № 4 – 1.73.

пендикулярном плоскости падения света. Величина ЭЭК, $\delta = [I(H) - I(-H)]/2I(0)$, где $I(H)$ и $I(0)$ – интенсивности отраженного света в присутствии и в отсутствие магнитного поля соответственно, измерена динамическим методом при модуляции магнитного поля.

Спектры ЭЭК $\delta(E)$ записывали в диапазоне энергий $E = 0.5\text{--}4.0$ эВ в магнитных полях до 3 кЭ. Температурный диапазон исследований $T = 15\text{--}$

295 К, чувствительность аппаратуры к изменению интенсивности света $\sim 10^{-5}$. Для анализа магнитной структуры слоев измеряли температурные $\delta(T)$ и магнитополевые $\delta(H)$ зависимости ЭЭК в разных областях спектра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены спектры ЭЭК $\delta(E)$ образцов GaMnAs № 1–№ 4, сформированных ИЛР. На вставках показаны температурные зависимости $\delta(T)$, измеренные при фиксированных энергиях. Представленные кривые демонстрируют изменение характера спектров ЭЭК при изменении ростовых режимов. От образцов №№ 1–3 достаточно сильный сигнал ЭЭК регистрируется уже при комнатной температуре ($T_{\text{комн}}$). Понижение T приводит к росту сигнала, спектральные особенности становятся четко выраженными. Спектры ЭЭК образца № 1, сформированного при максимальных параметрах $Y_{\text{Mn}} = 0.23$ и $T_g = 350^\circ\text{C}$, рис. 1а, характерны для слоев GaMnAs, содержащих “объемные” включения ферромагнетика MnAs ($T_C = 318$ К). Особенности вблизи 1.8, 2.5 и 3.5 эВ обусловлены оптическими переходами в MnAs [21], а кривая на вставке аналогична зависимости $\delta(T)$ образца сравнения MnAs. При понижении T_g до 300°C в спектре образца № 2, рис. 1б, преобладающей становится резонансная структура в области $E = 0.5\text{--}2.0$ эВ. Мы показали, что эта структура обусловлена возбуждением поверхностных плазмонов в нанокластерах MnAs [4, 14]. Форма кривой $\delta(T)$ образца № 2 определяется в основном вкладом включений MnAs, но в области низких температур наблюдается слабый рост эффекта, связанный с вкладом легированной матрицы.

Спектры ЭЭК образца № 3 ($Y_{\text{Mn}} = 0.13$ и $T_g = 330^\circ\text{C}$) при трех температурах показаны на рис. 1в. Из сопоставления их со спектрами на рис. 1а, 1б следует, что при $T = 295$ и 120 К в спектрах образца № 3 содержатся вклады переходов в “объемном” MnAs и плазмонов в нанокластерах MnAs (особенность в области 1.0–1.5 эВ). Область заметного роста на зависимости $\delta(T)$ ниже 80 К указывает на присутствие низкотемпературной магнитной фазы. Поскольку при низких температурах сигнал от “объемного” MnAs и плазмонный сигнал меняются незначительно, можно выделить спектральный вклад низкотемпературной фазы, вычитая спектр при $T = 120$ К из спектра при $T = 30$ К. Выделенный вклад, $\delta(E) = \delta(E)_{30\text{ К}} - \delta(E)_{120\text{ К}}$, показан на рис. 1в кривой без символов.

Сигнал ЭЭК от образца № 4 ($Y_{\text{Mn}} = 0.13$, $T_g = 300^\circ\text{C}$) при $T_{\text{комн}}$ близок к уровню шумов и связан с присутствием “следов” MnAs. На вставке рис. 1г видно, что при охлаждении до 85 К сигнал растет, оставаясь незначительным, и резко уси-

ливаются ниже 80 К. Температурная и магнитополевая зависимости ЭЭК свидетельствуют о присутствии в образце № 4 ферромагнитной фазы с $T_C \approx 80$ К. Спектры ЭЭК образца № 4 при $T = 80$ и 25 К показаны на рис. 1г, где пунктирными линиями отмечены энергии переходов E_0 , $E_0 + \Delta_0$ и E_1 , $E_1 + \Delta_1$ в Γ - и L -критических точках зоны Бриллюэна GaAs. При $T = 25$ К в спектре $\delta(E)$ хорошо выражены четыре полосы, обозначенные цифрами 1–4. Полосы 1 и 2 смещены в сторону больших энергий ($E_{\max 1} = 1.65$ эВ; $E_{\max 2} = 2.0$ эВ) относительно переходов E_0 и $E_0 + \Delta_0$ (голубой сдвиг). Полоса 3 ($E_{\max 3} \approx 3.2$ эВ) локализована в области переходов E_1 и $E_1 + \Delta_1$. В области примесного поглощения GaAs наблюдается полоса 4. Полосы 1–4 при близких энергиях присутствуют также на разностной кривой на рис. 1в. Изменения в электронном спектре исходного полупроводника при введении высоких концентраций переходного металла слабо влияют на оптические переходы вблизи точки L , удаленной от центра зоны Бриллюэна. По этой причине наличие полосы в МО спектрах в области E_1 и $E_1 + \Delta_1$ переходов является свидетельством собственной природы ферромагнетизма РМП. Полоса 3 четко выражена в спектре ЭЭК образца № 4, следовательно, его ферромагнетизм обусловлен фазой (Ga,Mn)As. Содержание MnAs в образце № 4 незначительно и не влияет на его свойства (не регистрируется магнитометрией).

Из рис. 1в следует что, РМП (Ga,Mn)As присутствует также в образце № 3 наряду с MnAs в форме объемных и наноразмерных включений.

На образцах из тех же ростовых серий выполнены магнитные (при $T_{\text{комн}}$), электрические и магнитотранспортные измерения [17]. Магнитометрия обнаружила значительное количество фазы MnAs в образце № 1 и существенно меньшее в образце № 3. При измерениях на образцах №№ 2 и 4 намагниченность не зарегистрирована. Измерения на HR XR-дифрактометре “Bruker D8 Discover” выявили присутствие Mn только в образце № 1, следовательно, чувствительность аппаратуры недостаточна для обнаружения MnAs в других образцах. В то же время использование МО-методики позволило обнаружить MnAs во всех образцах и присутствие РМП (Ga,Mn)As в образцах №№ 4 и 3.

Образцы №№ 2 и 4 имеют очень высокое удельное сопротивление, быстро растущее ниже 80 К. Ферромагнетизм с достаточно высоким значением $T_C \approx 80$ К в образце № 4 с не согласуется с высоким удельным сопротивлением и низкой концентрацией дырок ($p \sim 2 \times 10^{19}$ см⁻³ при $T = 295$ К). Это несоответствие устраняется в случае “химического фазового разделения” [9], когда существенно неоднородное распределение Mn приво-

дит к возникновению в парамагнитной матрице ферромагнитных нанокластеров с повышенной концентрацией Mn и дырок. В таком неоднородном образце транспортные измерения зондируют парамагнитную матрицу, а ЭЭК – ферромагнитные области (Ga,Mn)As. Голубой сдвиг полос 1 и 2 в спектре ЭЭК образца № 4 может быть вызван смещением уровня Ферми вглубь валентной зоны и размерным квантованием в ферромагнитных нанокластерах. Аномальный эффект Холла (АЭХ) наблюдался при $T < 60$ К в образце № 3 (с низким удельным сопротивлением), в котором также присутствует РМП (Ga,Mn)As. АЭХ свидетельствует о низкотемпературном ферромагнетизме матрицы образца № 3 и связан, по-видимому, с перекрытием ферромагнитных областей (Ga,Mn)As и образованием путей протекания тока.

Спектральные и температурные зависимости ЭЭК образцов $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ (1-G–5-G), полученных технологией ИИ-ИЛО, представлены на рис. 2. Сигнал ЭЭК не регистрируется при $T_{\text{комн}}$, следовательно, в исследуемых образцах MnAs отсутствует. Магнитополевые зависимости ЭЭК (не показанные здесь) свидетельствуют о ферромагнетизме образцов 2-G–5-G при низких температурах (образец 1-G при температурах измерений остается парамагнитным). Спектры ЭЭК при $T = 17$ К, рис. 2а, демонстрируют сильный МО-отклик всех образцов. В области переходов E_1 , $E_1 + \Delta_1$ хорошо выражена характеристическая полоса, увеличенное изображение которой показано на вставке рис. 2а. В спектрах образцов 1-G–4-G в области $E \approx 1.1–2.25$ эВ присутствует полоса отрицательной полярности с двумя локальными минимумами в области переходов E_0 и $E_0 + \Delta_0$. С ростом x эти особенности усиливаются, наблюдается их слабый голубой сдвиг. В спектре образца 5-G отрицательная полоса становится заметно интенсивнее, один минимум около 1.6 эВ наблюдается на ней. МО-спектры на рис. 2а по форме отличаются от спектров НТ-МЛЭ образцов $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ [15]. Особенностью ИИ-ИЛО образцов $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ является гауссово распределение Mn по толщине и электронное фазовое разделение, выявленное при концентрациях $\text{Mn } x < 0.014$ [13]. Исходя из этого, мы связали широкую отрицательную полосу в спектрах ЭЭК с суперпозицией вкладов от областей с различной концентрацией Mn и/или дырок [16]. Измененная форма полосы в спектре образца 5-G может быть результатом противоположных концентрационных сдвигов вкладов от этих областей.

Магнитную (фазовую) неоднородность образцов можно зондировать, измеряя температурные зависимости ЭЭК. Для однородных образцов кривые $\delta(T)$ воспроизводят монотонный рост намагниченности при охлаждении, а приведенные к максимуму зависимости $\delta(T)/\delta_{\max}$ не

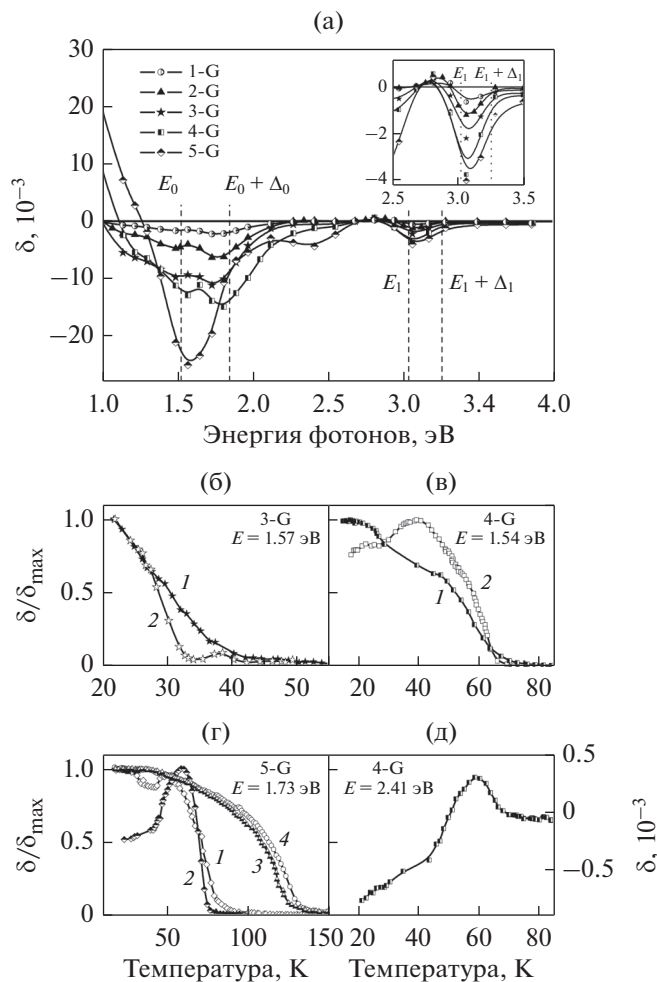


Рис. 2. (а) Спектры ЭЭК образцов 1-G–5-G при $T = 17$ К. Пунктирные линии – энергии переходов в Γ и L точках GaAs. На вставке – увеличенное изображение полосы в области переходов в L точке GaAs. (б–г) Зависимости $\delta(T)/\delta_{\max}$ образцов 3-G–5-G для двух амплитуд магнитного поля. H , Э; (б) 1 – 1300, 2 – 100; (в) 1 – 2500, 2 – 95; (г) 1 – 1600, 2 – 90. Для образца сравнения НТ-МЛЭ (Ga,Mn)As $H = 2500$ Э; E , эВ: 3 – 1.65, 4 – 3.06; (д) – зависимость $\delta(T)$ образца 4-G, $H = 150$ Э.

зависят от энергии фотонов. В неоднородных образцах области с различающимися характеристиками могут вносить вклады противоположной полярности, и при сопоставимых вкладах возможно уменьшение суммарного сигнала. Достаточно сильное измерительное поле может упорядочивать наноразмерные ферромагнитные области, возникающие немного выше T_C , размывать зависимости $\delta(T)$ и повышать эффективное значение T_C , определяемое экстраполяцией участка резкого спада на кривой $\delta(T)$. Для ослабления этого эффекта зависимости $\delta(T)$ измеряли в сильном и слабом магнитных полях. Сигнал ЭЭК падает при уменьшении H , и для обнаружения качественных изменений на температурных кривых мы сравниваем приведенные зависимости $\delta(T)/\delta_{\max}$. На рис. 2б–2д приведено несколько примеров температурных зависимостей образцов 3-G–5-G, полученных вблизи экстремумов отрицательной

полосы ($E = 1.54$ – 1.73 эВ) и в области малых сигналов ($E = 2.41$ эВ). Для сравнения на рис. 2г показаны также зависимости $\delta(T)/\delta_{\max}$ (кривые 3, 4) НТ-МЛЭ образца $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ($x = 0.06$) с металлическим типом проводимости и $T_C \approx 130$ К. Кривые 3, 4, измеренные для двух энергий в поле $H = 2500$ Э, отличаются незначительно и демонстрируют монотонный рост при охлаждении, характерный для однородных образцов.

Рисунок 2б иллюстрирует изменение зависимости $\delta(T)/\delta_{\max}$ образца 3-G ($x = 0.012$) при уменьшении H от 1300 до 100 Э. Оценка T_C в поле 1300 Э, кривая 1, дает значение $T_C \approx 40$ К. На кривой 2, измеренной в слабом поле, видны вклады областей с $T_C \approx 32$ К (основной вклад с T_C , близкой к данным магнитометрии) и с $T_C \approx 42$ К (слабый вклад), которые подтверждают магнитную неоднородность образца. На рис. 2в, 2г приведены за-

висимости $\delta(T)/\delta_{\max}$ образцов 4-G и 5-G, в которых концентрация Mn и дырок превышает граничное значение ($x = 0.014$) формирования “глобального” ферромагнетизма [13]. Видно существенное различие формы кривых 1 и 2. При низких температурах на них присутствуют особенности, которые наиболее ярко выражены при измерениях в малом поле, когда рост ЭЭК при охлаждении сменяется спадом.

В области измерений зависимостей 1 и 2 полярность сигналов ЭЭК отрицательна (рис. 2а), и спад сигнала указывает на наличие положительного вклада и его рост при охлаждении. Присутствие в спектре вклада положительной полярности было обнаружено при измерениях в области слабых сигналов. На рис. 2д показана зависимость $\delta(T)$ образца 4-G ($E = 2.41$ эВ), которая демонстрирует появление положительного сигнала при $T \approx 70$ К и смену полярности ниже 50 К. Относительное уменьшение сигнала ЭЭК при понижении T зависит от области измерений, причем положительный вклад ЭЭК нельзя объяснить только монотонно спадающим “хвостом” примесной полосы, которая наблюдалась в [3]. Источниками сигналов положительной полярности могут быть также металлические ферромагнитные включения с повышенной T_C и области с более низкими значениями концентрации дырок и T_C , в спектрах которых присутствует “положительная” полоса вблизи переходов $E_0 + \Delta_0$.

В [13] граничное значение $x = 0.014$, при котором в ИИ-ИЛО слоях $Ga_{1-x}Mn_xAs$ возникает “глобальный” ферромагнетизм без суперпарамагнитной фазы, определено по отсутствию проявления блокировки суперпарамагнитных кластеров на кривых термоостаточной намагниченности. В то же время немонотонный характер зависимостей $\delta(T)$ обнаруживает магнитную неоднородность в образцах 4-G и 5-G, концентрация Mn в которых превосходит граничное значение x . Причиной этого различия может быть рост ферромагнитных включений при увеличении концентрации Mn и возможности МО регистрации частиц, превосходящих по размеру суперпарамагнитные кластеры.

Изучены также МО-свойства образцов $In_{1-x}Mn_xAs$, 1-I–4-I, полученных технологией ИИ-ИЛО. Вблизи края поглощения наблюдаются сильные сигналы ЭЭК. Собственная природа ферромагнетизма подтверждается наличием экстремумов в МО-спектрах в области E_1 и $E_1 + \Delta_1$ -переходов в InAs. Немонотонный характер кривых $\delta(T)$ и $\delta(H)$ при охлаждении обнаруживает магнитную неоднородность образцов $In_{1-x}Mn_xAs$ при более высоких концентрациях Mn, чем было выявлено в [13] ($x \leq 0.012$). Результаты этих исследований будут опубликованы в другой работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование МО-спектроскопии позволило детектировать собственный ферромагнетизм с $T_C \leq 80$ К в образцах GaMnAs, полученных методом ИЛР при низких значениях технологических параметров. Источником сигнала ЭЭК являются локальные ферромагнитные области (Ga,Mn)As, содержащиеся в слабо легированной парамагнитной матрице. Особенность спектра ЭЭК (голубой сдвиг полос) может быть вызвана смещением уровня Ферми вглубь валентной зоны и размерным квантованием в ферромагнитных нанобластях. Увеличение ростовых параметров приводит к сосуществованию кубических, (Ga,Mn)As, и гексагональных, MnAs, нанобластей, затем к образованию частиц MnAs, сохраняющих свойства объемного материала.

В слоях Ga(In)MnAs, полученных технологией ИИ-ИЛО, при низких температурах регистрируется сильный сигнал ЭЭК. Вторичные магнитные фазы в слоях отсутствуют. Наличие в спектрах ЭЭК характеристической полосы в области переходов в L точке зонной структуры Ga(In)As подтверждает собственный ферромагнетизм слоев. Немонотонное поведение температурных зависимостей ЭЭК свидетельствует о магнитной неоднородности слоев. Особенности, ранее не наблюдавшиеся в МО спектрах GaMnAs, объяснены наличием в легированной полупроводниковой матрице нанобластей с более высокой концентрацией носителей, с большей температурой Кюри и смещением уровня Ферми вглубь валентной зоны. Представленные результаты демонстрируют чувствительность ЭЭК к фазовой неоднородности Ga(In)MnAs и эффективность ЭЭК при изучении электронного спектра и магнитной структуры РМП, а также для характеристики образцов.

Работа выполнена в рамках государственного задания. Авторы благодарны д-р-м S. Zhou, Ю.А. Данилову и Б.Н. Звонкову за предоставленные образцы РМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pereira L.M.C.* Experimentally evaluating the origin of dilute magnetism in nanomaterials // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017. V. 50. № 39. P. 393002 (26pp).
2. *Ando K.* Magneto-Optics of Diluted Magnetic Semiconductors: New Materials and Applications // *Magneto-Optics* / Ed. by S. Sugano, N. Kojima / Springer Series in Solid-State Sciences. Berlin: Springer, 2000. V. 128. P. 211–241.
3. *Ando K., Saito H., Agarwal K.C., Debnath M.C., Zayets V.* Origin of the Anomalous Magnetic Circular Dichroism Spectral Shape in Ferromagnetic $Ga_{1-x}Mn_xAs$: Impurity Bands inside the Band Gap // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. № 6. P. 067204 (4pp).

4. Gan'shina E.A., Golik L.L., Kovalev V.I., Kun'kova Z.E., Temiryazev A.G., Danilov Yu.A., Vikhrova O.V., Zvonkov B.N., Rubacheva A.D., Tcherbak P.N., Vinogradov A.N., Zhigalina O.M. Resonant enhancement of the transversal Kerr effect in the InMnAs layers // *J. Phys. Cond. Mat.* 2010. V. 22. № 39. P. 396002–396010.
5. Dieltl T., Ohno H., Matsukura F., Cibert J., Ferrand D. Zener model description of ferromagnetism in zinc-blende magnetic semiconductors // *Science*. 2000. V. 287. № 5455. P. 1019–1022.
6. Dieltl T. Interplay between carrier localization and magnetism in diluted magnetic and ferromagnetic semiconductors // *J. Phys. Soc. Jpn.* 2008. V. 77. № 3. P. 031005 (10pp).
7. Sawicki M., Chiba D., Korbecka A., Nishitani Y., Majewski J. A., Matsukura F., Dieltl T., Ohno H. Experimental probing of the interplay between ferromagnetism and localization in (Ga,Mn)As // *Nat. Phys.* 2010. V. 6. P. 22–25.
8. Gray A. X., Minar J., Ueda S., Stone P.R., Yamashita Y., Fujii J., Braun J., Plucinski L., Schneider C.M., Panaccione G., Ebert H., Dubon O.D., Kobayashi K., Fadley C.S. Bulk electronic structure of the dilute magnetic semiconductor $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ through hard X-ray angle-resolved photoemission // *Nat. Mater.* 2012. V. 11. № 11. P. 957–962.
9. Dieltl T., Sato K., Fukushima T., Bonanni A., Jamet M., Barski A., Kuroda S., Tanaka M., Pham Nam Hai, Katayama-Yoshida H. Spinodal nanodecomposition in semiconductors doped with transition metals // *Rev. Mod. Phys.* 2015. V. 87. № 4. P. 1311–1377.
10. Richardella A., Roushan P., Mack S., Zhou B., Huse D.A., Awschalom D.D., Yazdani A. Visualizing Critical Correlations Near the Metal-Insulator Transition in $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ // *Science*. 2010. V. 327. № 5966. P. 665–669.
11. Gluba L., Yastrubchak O., Domagala J.Z., Jakiela R., Andreczyk T., Żuk J., Wosinski T., Sadowski J., Sawicki M. Band structure evolution and the origin of magnetism in (Ga,Mn)As: From paramagnetic through superparamagnetic to ferromagnetic phase // *Phys. Rev. B*. 2018. V. 97. № 11. P. 115201 (10pp).
12. Zhou S. Dilute ferromagnetic semiconductors prepared by the combination of ion implantation with pulse laser melting // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2015. V. 48. № 26. P. 263001-1–263001-29.
13. Yuan Y., Xu C., Hübner R., Jakiela R., Böttger R., Helm M., Sawicki M., Dieltl T., Zhou S. Interplay between localization and magnetism in (Ga,Mn)As and (In,Mn)As // *Phys. Rev. Mater.* 2017. V. 1. № 5. P. 054401 (9pp).
14. Gan'shina E.A., Golik L.L., Kovalev V.I., Kun'kova Z.E., Temiryazeva M.P., Danilov Yu.A., Vikhrova O.V., Zvonkov B.N., Rubacheva A.D., Tcherbak P.N., Vinogradov A.N. On Nature of Resonant Transversal Kerr Effect in InMnAs and GaMnAs Layers // *Sol. St. Phenom.* 2011. V. 168–169. P. 35–38.
15. Gan'shina E.A., Golik L.L., Kun'kova Z.E., Kovalev V.I., Markin Yu.V., Novikov A.I., Zykov G.S., Danilov Yu.A., Kudrin A.V., Vikhrova O.V., Zvonkov B.N. Magneto-Optical Evidence for Intrinsic Ferromagnetism in (Ga, Mn)As Layers Grown by Pulsed Laser Deposition // *Sol. St. Phenom.* 2015. V. 233–234. P. 101–104.
16. Gan'shina E.A., Golik L.L., Kun'kova Z.E., Zykov G.S., Bykov I.V., Rukovichnikov A.I., Yuan Y., Böttger R., and Zhou S. Magneto-optical spectroscopy of diluted magnetic semiconductors GaMnAs prepared by ion implantation and further impulse laser annealing // *J. Magn. Magn. Mat.* 2018. V. 459. P. 141–146.
17. Кунькова З.Э., Ганьшина Е.А., Голик Л.Л., Данилов Ю.А., Кудрин А.В., Ковалев В.И., Зыков Г.С., Маркин Ю.В., Вихрова О.В., Звонков Б.Н. Фазовое разделение в слоях GaMnAs, сформированных импульсным лазерным осаждением // *ФТТ*. 2018. Т. 60. № 5. С. 940–946.
18. Звонков Б.Н., Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Демидов Е.С., Демина П.Б., Дорохин М.В., Дроздов Ю.Н., Подольский В.В., Сапожников М.В. Применение лазерного распыления для нанесения полупроводниковых наногетеро-структур // *Опт. журн.* 2008. Т. 75. № 6. С. 56–61.
19. Bürger D., Zhou S., Pandey M., Viswanadham Ch.S., Grenzer J., Roshchupkina O., Anwand W., Reuther H., Gottschalch V., Helm M., Schmidt H. Application of pulsed laser annealing to ferromagnetic GaMnAs // *Phys. Rev. B*. 2010. V. 81. № 11. P. 115202-1–115202-12.
20. Yuan Y., Wang Y., Gao K., Khalid M., Wu C., Zhang W., Munnik F., Weschke E., Baetz C., Skorupa W., Helm M., Zhou S. High Curie temperature and perpendicular magnetic anisotropy in homoepitaxial InMnAs films // *J. Phys. D*. 2015. V. 48. № 23. P. 235002-1–235002-6.
21. Gan'shina E.A., Golik L.L., Kovalev V.I., Kun'kova Z.E., Zvonkov B.N., Vinogradov A.N. Optical and magneto-optical properties of room-temperature ferromagnetic In(Ga)MnAs layers, deposited by pulse laser ablation // *J. Magn. Magn. Mat.* 2009. V. 321. P. 829–832.
22. Lautenschlager P., Garriga M., Logothetidis S., Cardona M. Interband critical points of GaAs and their temperature dependence // *Phys. Rev. B*. 1987. V. 35. № 17. P. 9174–9189.