

Аномальный ферромагнитный резонанс в осажденных из лазерной плазмы слоях германия, легированного марганцем и алюминием

Е. С. Демидов¹⁾, В. В. Подольский⁺, В. П. Лесников⁺, С. А. Левчук, С. Н. Гусев, В. В. Карзанов, Д. О. Филатов⁺

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

⁺ Научно-исследовательский физико-технический институт при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 9 ноября 2009 г.

В наноразмерных слоях Ge:(Mn,Al)/GaAs, осажденных из лазерной плазмы при пониженной до 150 °С температуре, наблюдался ферромагнитный резонанс (ФМР) с аномальной угловой зависимостью, который связывается с иглообразными включениями высокотемпературной ферромагнитной фазы с точкой Кюри $T_c > 293$ К. Такая магнитная анизотропия подтверждается атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопией бокового скола. В промежутках между иглообразными включениями сформировалась низкотемпературная ферромагнитная фаза с нормальным ФМР и величиной $T_c < 212$ К. Эта фаза проявляется в аномальном эффекте Холла при 77 К и, вероятно, представляет собой твердый раствор марганца в германии.

PACS: 71.55.Cn, 72.20.Mu, 75.50.Pp, 76.50.+g, 78.20.Ls

1. Введение. Разбавленные магнитные полупроводники (РМП) на основе алмазоподобных соединений III–V Ge и Si, сильно легированных 3d-примесями, считаются перспективными материалами современной технологии, в которых предполагается сочетание транспортных свойств полупроводниковых и магнитных свойств ферромагнетиков с физической существенным взаимодействием между ними [1–4]. По-видимому, не меньший интерес представляет самоорганизация наноразмерных включений ферромагнитных фаз, возникающих в результате распада пересыщенного твердого раствора 3d-примеси в легированном полупроводнике. В работе [5] изучались свойства легированных до 5% марганцем слоев германия толщиной 70 нм, осажденных при низкой температуре 80 °С на монокристаллические подложки Ge с ориентацией (100) методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Авторы [5] непосредственно наблюдали с помощью НТМЕ наноразмерные диаметром 2 нм иглообразные включения или кластеры состава $Ge_{0.83}Mn_{0.17}$, ориентированные перпендикулярно плоскости пленки. Ферромагнетизм слоев проявился в нелинейной гистерезисной зависимости намагниченности, которая была существенной при температурах до 120 К. Но самое примечательное обстоятельство состояло в наблюдении гигантского магнетосопротивления 130% при 50 К и 25% при 200 К в полях до 10 Тл. Ранее [6–8] с применением технологии осаждения из лазерной плазмы на монокристал-

лические подложки GaAs были получены слои толщиной 110 нм РМП Ge с 13% Mn с температурой Кюри T_c до 420 К. Они синтезировались при температуре $T_g = 530$ °С. Ферромагнетизм слоев подтвержден наблюдениями ферромагнитного резонанса (ФМР), аномального эффекта Холла (АЭХ), отрицательного магнетосопротивления (ОМС), магнитооптического эффекта Керра (МОЭК). При 293 К АЭХ проявился в нелинейной полевой зависимости постоянной Холла. Из данных эффекта Холла и электропроводности дырочная проводимость с удельным сопротивлением $\rho = 0.004$ Ом·см определялась концентрацией носителей $p = 6.6 \cdot 10^{19}$ см⁻³ и их подвижностью $\mu = 23$ см²/В·с. В широком интервале температур (77–400) К анизотропия спектров ФМР этих слоев согласуется с классической формулой влияния размагничивающих факторов N плоского образца на резонансную частоту [9]:

$$\omega_B^2 = \gamma^2 [B_0 + (N_y - N_z) \mu_0 M] \cdot [B_0 + (N_x - N_z) \mu_0 M], \quad (1)$$

где γ – магнетомеханическое отношение, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, M – намагниченность, размагничивающие факторы для нормальной к полю ориентации плоскости образца равны $N_x = N_y = 0$, $N_z = 1$, для параллельной ориентации с осями x и z в плоскости пленки $N_x = N_z = 0$, $N_y = 1$. Вероятной причиной упорядочения спинов ионов Mn является косвенное обменное взаимодействие Рудермана-Киттеля-Касуя-Иосиды (РККИ) посредством дырок в валентной зоне полупроводника. В свя-

¹⁾ e-mail: demidov@phys.unn.ru

Сравнительные характеристики слоев Ge:Mn, полученных при $T_g = 530^\circ\text{C}$ [6, 7] и образцов Ge:(Mn,Al) настоящей работы

Образец	T_g , К	T_c , К	ρ , Ом·см	p , см $^{-3}$	μ , см 2 /В·с
Ge $_{0.87}$ Mn $_{0.13}$ /GaAs	550	420	0.004(293 К)	$6.6 \cdot 10^{19}$ (293 К)	23(293 К)
Ge $_{0.8}$ Mn $_{0.1}$ Al $_{0.1}$ /GaAs	150	> 293	0.01(293 К)	$1.4 \cdot 10^{20}$ (293 К) $1.7 \cdot 10^{20}$ (77 К)	4(293 К) 7(77 К)

зи с этим в настоящей работе для усиления ферромагнетизма слоев РМП Ge:Mn варьировался уровень Ферми в материале путем введения дополнительно к марганцу поставщика дырок – мелкой акцепторной примеси – алюминия. Показано, что добавление Al позволяет снизить температуру формирования T_g ферромагнитного состояния слоев Ge:Mn до 150°C . В таких слоях обнаружен спектр ФМР с аномальной угловой зависимостью, который связывается с иглообразными включениями ферромагнитной фазы, подобный неоднородностям, описанным в статье [5].

2. Эксперимент. Лазерное напыление слоев толщиной 30–150 нм производилось, как и в [8, 9], на подогретые до 200 – 500°C пластины монокристаллического арсенида галлия (GaAs) на импульсной лазерной установке LQ 529 Белорусской фирмы “Солар ЛС” с активным элементом на АИГ:Nd и возможностью испарения мишени излучением на второй и третьей гармониках. Распыление мишеней из германия и марганца производилось двухлучевым методом с расщепленным световым пучком лазера. Элементный состав слоя Ge:Mn задавался соотношением интенсивностей двух лучей, одновременно испаряющих Ge и Mn. Проводились измерения ФМР в полях до 1.5 Тл на ЭПР-спектрометре ЕМХ фирмы Bruker, эффекта Холла и электропроводности в полях до 0.75 Тл, меридионального МОЭК с лазерной подсветкой на длине волны 0.63 мкм в полях до 0.4 Тл. Для определения кристаллической структуры слоев применялась электронография. Морфология слоев и распределение намагниченности изучались атомно-силовой и магнитно-силовой зондовой микроскопией.

3. Результаты и их обсуждение. Результаты измерения эффекта Холла слоев Ge с 15% Mn и 15% Al, осажденных при температуре 150°C , показаны на рис.1. В отличие от образцов Ge:Mn/GaAs [6, 7], синтезированные при пониженной температуре слои Ge:(Mn,Al)/GaAs показали при комнатной температуре 293 К обычную для немагнитного материала линейную зависимость поперечного сопротивления R_{xy} от магнитного поля. Наклону графика соответствует дырочная проводимость с концентрацией дырок $p = 1.4 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$, согласно которой и измерениям электропроводности подвижность дырок составля-

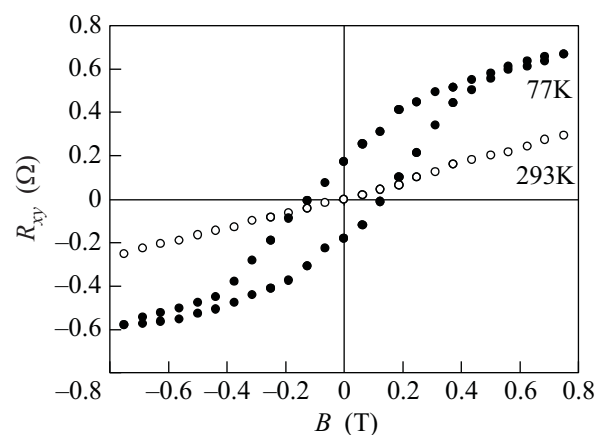


Рис.1. Зависимость холловского сопротивления R_{xy} образца Ge:(Mn,Al)/GaAs от магнитного поля при 77 и 293 К. Пленка Ge:(Mn,Al) осаждена на подложку GaAs с ориентацией (100) при температуре роста $T_g = 150^\circ\text{C}$

ет $\mu = 4$ см 2 /В·с. При 77 К на рис.1 имеет место характерная для ферромагнетика аномальная – нелинейная и гистерезисная – зависимость $R_{xy}(B)$ с коэрцитивной силой ≈ 0.1 Тл. Наклон “нормальной” высокополевой части этой зависимости дает несколько большую, чем при 293 К, концентрацией дырок $p = 1.7 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$. Электропроводности слоя с этой концентрацией дырок соответствует их подвижность $\mu = 7$ см 2 /В·с.

В таблице приведены сравнительные характеристики слоев Ge:Mn, полученных при $T_g = 530^\circ\text{C}$ [6, 7], и образцов Ge:(Mn,Al) настоящей работы. Видно, что добавление алюминия привело к росту концентрации дырок, но проводимость оказалась в 2.5 раза ниже из-за меньшей подвижности дырок, что объяснимо менее упорядоченной структурой пленки, синтезированной при пониженной температуре.

Температурное изменение спектров ФМР на рис.2 свидетельствует о неоднородном распределении магнитных свойств внутри слоев Ge:(Mn,Al). Как видно при температурах ниже 212 К, на рис.2 имеет место нормальный, соответственно формуле (1) и вышеприведенным размагничивающим факторам, угловой сдвиг линии ФМР в сторону больших полей при повороте образца от параллельной ориентации поля к

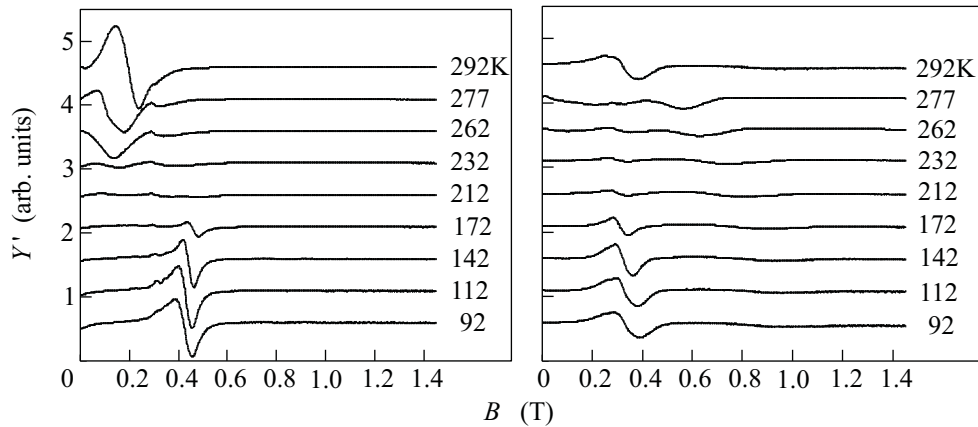


Рис.2. Температурное изменение спектров ФМР структуры Ge:(Mn,Al)/GaAs от толщины слоя Ge:(Mn,Al) 110 нм при перпендикулярной слева и параллельной справа ориентациях плоскости образца к магнитному полю. Справа у кривых показана температура в градусах Кельвина

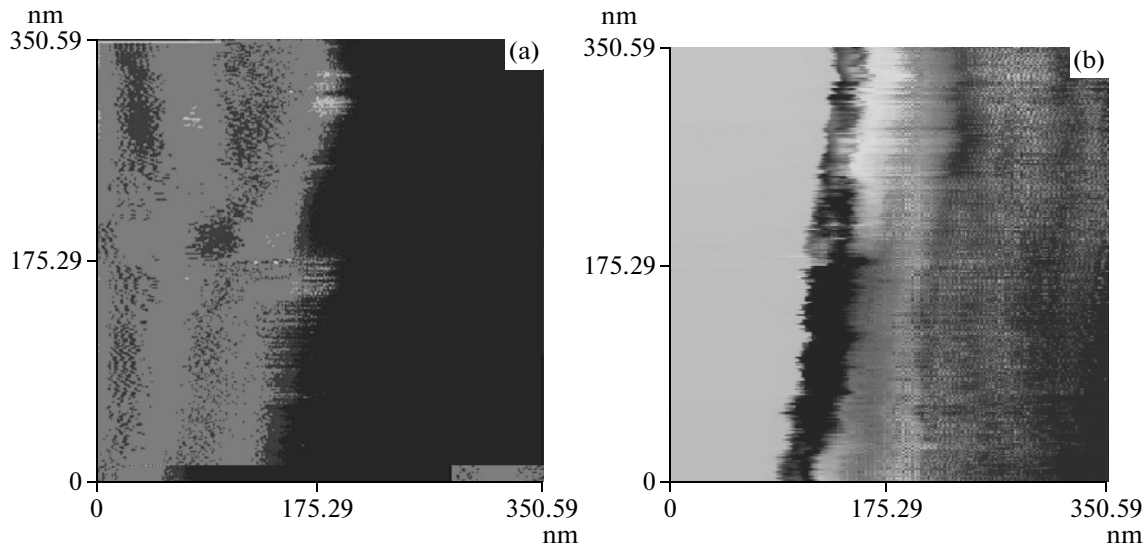


Рис.3. АСМ слева и МСМ справа изображения бокового склоа структуры Ge:(Mn,Al)/GaAs со слоем Ge:(Mn,Al) толщиной 110 нм. Подложка GaAs расположена слева

перпендикулярной. Вместе с тем, при температурах свыше 230 К слои отличаются, необычной угловой зависимостью другой линии ФМР с усилением вместо ослабления, согласно (1), намагниченности при нормальной ориентации магнитного поля. При параллельной ориентации замечен аномальный сдвиг линии ФМР до величины индукции поля $B \approx 1$ Тл при 92 К.

Аномальное поведение высокотемпературного спектра ФМР на рис.2 при $T > 230$ К обусловлено внутренней анизотропией в пленках Ge:(Mn,Al)/GaAs с осью легкого намагничивания, ориентированной нормально к ее плоскости. Природа этой

анизотропии может быть связана с существованием в пленках иглоподобных областей с повышенной намагниченностью, которые ориентированы перпендикулярно плоскости магнитного слоя. Для иглообразного ферромагнетика размагничивающие факторы имеют величины $N_x = N_y = 1$, $N_z = 0$, когда магнитное поле и ось z направлены вдоль иглы. Согласно (1), резонансное поле ФМР определяется формулой

$$B_0 = \omega_B / \gamma - \mu_0 M. \quad (2)$$

При направлении магнитного поля перпендикулярно оси иглообразного ферромагнетика можно положить

$N_x = N_z = 1$, $N_y = 0$, тогда для резонансного поля ФМР из (1) получаем выражение

$$B_0 = \sqrt{(\omega_B/\gamma)^2 + (\mu_0 B/2)^2} - \mu_0 B/2. \quad (3)$$

Из сравнения (2) и (3) следует сдвиг линии ФМР в сторону меньших полей при ориентации магнитного поля вдоль иглообразных ферромагнитных включений, как это имеет место для высокотемпературных спектров на рис.2. Анизотропия намагниченности перпендикулярно плоскости слоя в наших образцах подтверждается данными АСМ и МСМ при комнатной температуре бокового скола на рис.3. Как можно видеть, картина АСМ на рис.3 показывает сравнительно гладкую поверхность без резких скачков профиля на границе пленка-подложка. Изображение МСМ отображает повышенную неоднородность намагниченности на этой границе, которую можно связать с наличием ориентированных перпендикулярно плоскости слоя иглообразных ферромагнитных включений.

Сопоставление вышеприведенных экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что в выращенных при пониженной температуре слоях Ge:(Mn,Al) в промежутках между иглообразными ферромагнитными включениями, в которых спиновое упорядочение сохраняется до комнатной температуры, имеется низкотемпературная ферромагнитная фаза. Именно эта низкотемпературная

фаза, видимо представляющая собой твердый раствор марганца и алюминия в кремнии, обеспечивает АЭХ при 77 К на рис.1. При 293 К эта фаза становится парамагнитной, и в эффекте Холла (рис.1) отсутствует ее аномальный вклад, а пространственно разнесенные иглообразные ферромагнитные включения никак не проявляются в холловском сопротивлении.

Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований # 05-02-17362, # 08-02-01222, МНТЦ G1335, Рособразования РНП # 2.1.1/2833.

1. J. K. Furdyna, J. Appl. Phys. **64**, R29 (1988).
2. S. A. Wolf et al., Science **294**, 1488 (2001).
3. I. Žutić, J. Fabian, and S. Das Sarma, Rev. Mod. Phys. **76**, 323 (2004).
4. V. Ко, К. Л. Тео, Т. Лiew et al., J. Appl. Phys. **103**, 053912 (2008).
5. P. Li, C. Zeng, van Benthem et al., Phys. Rev. B **75**, 201201 (2007).
6. Е. С. Демидов, Ю. А. Данилов, В. В. Подольский и др., Письма в ЖЭТФ **83**, 664 (2006).
7. Е. С. Демидов, В. В. Подольский, В. П. Лесников и др., ЖЭТФ **133**, 1 (2008).
8. E. S. Demidov, B. A. Aronzon, S. N. Gusev et al., JMMM **321**, N7, 690 (2009).
9. Ч. Киттель, Введение в физику твердого тела, М.: Наука, 1978.