

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ТРАНСПОРТ И ФЕРРОМАГНЕТИЗМ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ GaAs с Mn

В. А. Кульбачинский, П. В. Гурин*

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
119992, Москва, Россия*

Ю. А. Данилов, Е. И. Малышева

*Научно-исследовательский физико-технический институт при Государственном университете г. Нижний Новгород
603950, Нижний Новгород, Россия*

*Й. Хорикоши**, К. Ономитсу***

*School of Science and Engineering, Waseda University
Tokyo 169-8555, Japan*

Поступила в редакцию 25 октября 2006 г.

Синтезированы и исследованы структуры GaAs, в которые имплантирован Mn и добавочно Mg для увеличения концентрации дырок в имплантированном Mn слое. Измерения с помощью сквид-магнетометра показали наличие ферромагнетизма в интервале температур $4.2 \text{ K} \leq T \leq 400 \text{ K}$, связанного с образованием в образце твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ и кластеров MnAs, $\text{Ga}_{1-y}\text{Mn}_y$ в результате быстрого высокотемпературного отжига. При температурах от 4.2 К примерно до 200 К наблюдался аномальный эффект Холла, вызванный добавочной намагниченностью образца. При увеличении температуры от 4.2 К колоссальное отрицательное магнитосопротивление переходило в положительное при $T \approx 35 \text{ K}$.

PACS: 72.15.Gd, 75.47.-m, 75.50.Cc

1. ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

Различными исследователями было показано, что ферромагнитная температура Кюри T_c в твердых растворах $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ увеличивается как при росте концентрации дырок, так и при увеличении содержания Mn [1]. Поэтому обычно используется добавочное легирование для увеличения концентрации дырок. Увеличение дырочной концентрации возможно также при уменьшении дефектности структур. Такой эффект наблюдается при низкотемпературном росте структур при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), с помощью которого недавно в гетероструктурах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ с Mn получена температура Кюри $T_c = 250 \text{ K}$ [2].

Перспективным методом получения ферромагнитных структур на основе GaAs является ионная имплантация. Этот метод успешно использо-

вался для получения ферромагнитных образцов с дырочной проводимостью (Ga,Mn)As [3–5]. Хотя Mn является акцептором в GaAs, концентрации получающихся дырок оказывается недостаточно, так как эффективность Mn низка из-за возникающих компенсирующих дефектов [6]. Компенсирующими дефектами могут быть антиструктурные дефекты As_{Ga} (они преобладают в случае низкотемпературной МЛЭ). Могут быть также междоузельные атомы Mn_i и As_i (доноры). В случае же ионной имплантации компенсирующие дефекты — это остаточные (выжившие после отжига) глубокие доноры As_{Ga} и глубокие акцепторы Ga_{As} , в принципе образующиеся непосредственно в актах торможения ионов [7]. Эти два типа антиструктурных дефектов присутствуют приблизительно в одинаковых количествах. В случае слоев p -типа (Ga,Mn)As в качестве компенсирующих дефектов могут работать как As_{Ga} , так и междоузельные атомы.

Исследованные структуры были сформированы

*E-mail: kulb@mig.phys.msu.ru

**Y. Horikoshi, K. Onomitsu

Параметры ионно-имплантированных структур: температура отжига T_a , сопротивление на квадрат R_s при трех температурах

№ образца	Доза Mg, $10^{14}/\text{см}^2$	$T_a, \text{ }^\circ\text{C}$	$R_s, \text{ кОм}/\square$		
			$T = 300 \text{ K}$	$T = 77 \text{ K}$	$T = 4.2 \text{ K}$
1	0	700	3.93	2360	Не измеримо
5	0	800	1.30	12	Не измеримо
13	3	800	1.27	9.1	Не измеримо
14	10	700	5.07	29.5	Не измеримо
15	10	725	2.90	8.7	Не измеримо
16	10	750	2.38	20.5	29500

ионной имплантацией Mn^+ с энергией 100 кэВ и дозой 10^{16} см^{-2} в GaAs с ориентацией поверхности (100). Добавочная имплантация Mg использовалась для увеличения концентрации дырок. Энергия ионов Mg^+ составляла 45 кэВ и была подобрана так, чтобы профили распределений ионов Mn^+ и Mg^+ (объемные концентрации атомов в зависимости от расстояния от поверхности) в кристалле совпадали. Дозы добавочно имплантированного Mg и некоторые параметры образцов приведены в таблице.

Образцы подвергались быстрому термическому отжигу при температуре T_a от 700 до 800 °C. Проведенные нами исследования наших структур показали, что при этом образуются твердые растворы $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ и кластеры MnAs, $\text{Mn}_y\text{Ga}_{1-y}$ [3]. Без добавочной имплантации Mg сопротивление образцов быстро возрастает при понижении температуры, достигая десятков кОм при 77 К (см. таблицу). Увеличение температуры отжига с 700 °C до 800 °C: 1) существенно уменьшает сопротивление (таблица, образец 5); 2) приводит к возникновению особенности в зависимости $\rho(T)$. Но все же при $T < 50 \text{ K}$ носители тока полностью вымерзают. Только добавочная имплантация Mg понижает сопротивление в десятки раз (см. таблицу) и сопротивление становится измеримым вплоть до низких температур.

Поверхностная морфология образцов исследовалась атомно-силовым и магнитно-силовым микроскопами при комнатной температуре. Обнаружено, что на поверхности сформированы кластеры высотой до 50 нм и диаметром до 300 нм. Некоторые из наблюдающихся в атомно-силовой микроскоп кластеров показывают магнитный контраст и являются однодоменными ферромагнетиками.

2. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ФЕРРОМАГНЕТИЗМ

Во всем исследованном интервале температур вплоть до $T = 400 \text{ K}$ (ограничение СКВИДа) наблюдались петли гистерезиса, характерные для ферромагнетика (рис. 1). Измерение температурной зависимости намагниченности (вставка на рис. 1) в магнитном поле (FC) и нулевом магнитном поле (ZFC) показывает индуцированный дырками ферромагнитный переход при $T \approx 50 \text{ K}$, характерный для твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$. Однако и при более высоких температурах в образцах наблюдаются характерные для ферромагнетика петли гистерезиса

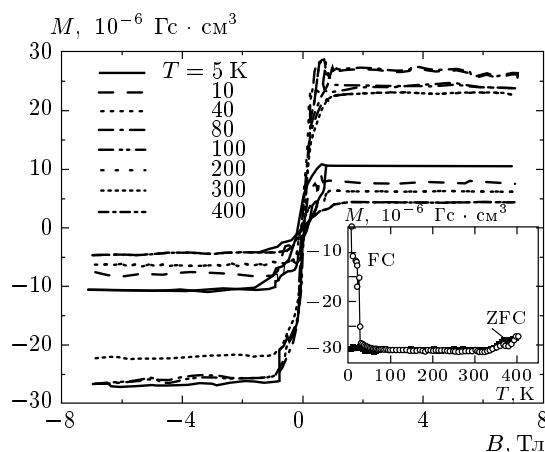


Рис. 1. Зависимость намагниченности M от магнитного поля для разных температур (диамагнитный вклад GaAs вычтен). На вставке показаны кривые намагниченности при охлаждении образца 16 в нулевом магнитном поле (ZFC) и в магнитном поле (FC)

са. Ферромагнетизм при более высоких температурах связан с наличием в образцах ферромагнитных кластеров MnAs и $\text{Mn}_x\text{Ga}_{1-x}$. Температура Кюри в $\text{Mn}_y\text{Ga}_{1-y}$ увеличивается с ростом содержания Mn и, например, при 56 % Mn составляет уже 600 К [8].

В исследованных неоднородных образцах имеет место как индуцированный дырками дальний магнитный порядок магнитных моментов Mn в $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$, так и ферромагнетизм кластеров MnAs и $\text{Mn}_y\text{Ga}_{1-y}$. Как следует из температурной зависимости магнитного момента, дальний ферромагнитный порядок подавляется при $T_c \approx 50$ К, т. е. при значении T_c , типичном для однородного магнетизма в пленках $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$, полученных методом лазерной абляции или распылением.

3. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ И АНОМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Во всех образцах наблюдается p -тип проводимости. При понижении температуры сопротивление на квадрат R_s увеличивается, и при $T \approx T_c$ в $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ наблюдается характерный для ферромагнитного перехода [9] излом (рис. 2).

Одним из проявлений спин-поляризованных носителей является аномальный эффект Холла. Экспериментально он наблюдается как отклонение зависимости холловского сопротивления от линейной и выходе на линейную зависимость после насыщения намагниченности образца. В исследованных образцах аномальный эффект Холла существует до $T \approx 200$ К и показывает влияние ферромагнитной фазы в об-

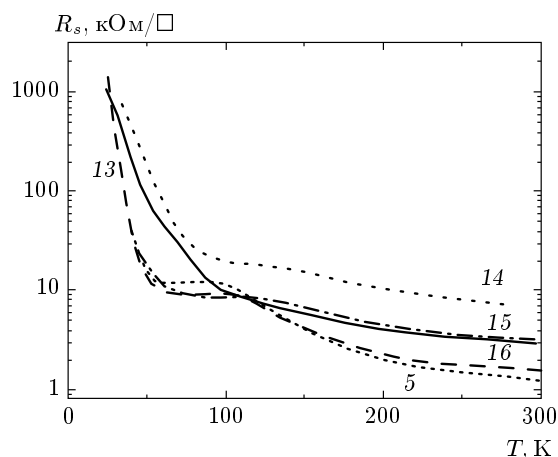


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления на квадрат R_s образцов

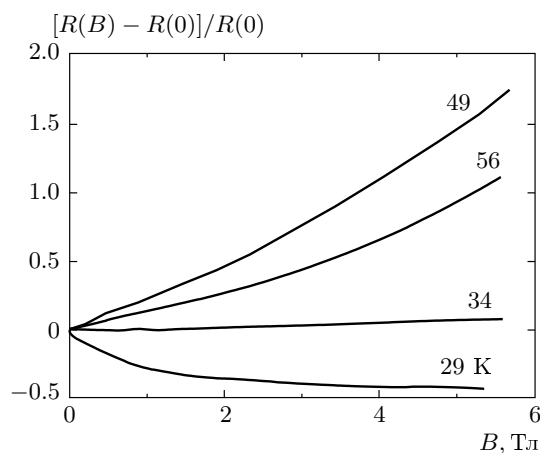


Рис. 3. Относительное магнитосопротивление образца 13 при разных температурах, $R(0)$ — сопротивление в нулевом магнитном поле

разце на дырки. До температуры $T \approx 50$ К это ферромагнетизм твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$. Выше этой температуры — ферромагнитными остаются кластеры MnAs и $\text{Ga}_{1-y}\text{Mn}_y$, но их влияние на носители тока меньше ввиду наличия барьеров Шоттки на поверхности и более слабого взаимодействия с дырками. Отметим, что в однородных твердых растворах $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ аномальный эффект Холла возможно наблюдать и выше температуры Кюри, в парамагнитной области [10]. Отметим, что во всех образцах при температурах ниже температуры Кюри твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ (приблизительно соответствующей перегибу на температурных зависимостях сопротивления, рис. 2) наблюдается активационная зависимость сопротивления от температуры. В нашем случае отмечается активационное поведение сопротивления при низких температурах. Знаки нормального и аномального эффектов Холла совпадают, как и в случае очень высокого содержания Mn [11].

На рис. 3 показано магнитосопротивление одного из образцов при нескольких температурах. При низких температурах заметно сильное отрицательное магнитосопротивление, связанное со спин-зависимым рассеянием. Обычно в структурах $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ отрицательное магнитосопротивление невелико, составляет не более 10% [12] и объясняется спин-зависимым рассеянием в рамках теории [13]. В исследованных образцах наблюдается колоссальное отрицательное магнитосопротивление как и в манганитах [14], но с выходом на значение насыщения. Подобное отрицательное магнитосо-

противление с выходом на значение насыщения характерно при спин-зависимом межгранульном туннелировании [15] и может объяснить колоссальное отрицательное магнитосопротивление.

При температуре около 34 К знак магнитосопротивления изменяется с отрицательного на положительный. Положительное сопротивление связано с геометрическим эффектом в неоднородных полупроводниках [16] и характерно для гранулированных проводников [17].

С нашей точки зрения, экспериментальные факты свидетельствуют о наличии флуктуационного потенциала в проводимости и неоднородное распределение Mn играет существенную роль в транспорте. Так как проводимость дырочная, а Mn является акцептором, то максимальная локальная концентрация Mn соответствует минимуму потенциального рельефа. Поэтому носители тока движутся по квазиодномерному перколяционному кластеру с максимальным содержанием Mn. Таким образом, увеличение концентрации Mn, как в целом, так и локальное, ведет к усилению магнитных свойств и к проявлению активации. Беспорядок и флуктуационный потенциал увеличиваются, что приводит к аномальному эффекту Холла.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Температурные зависимости сопротивления, магнитосопротивление и эффект Холла в ионно-имплантированных структурах GaAs⟨Mn,Mg⟩ были исследованы при температурах 4.2–300 К в магнитных полях до 6 Тл. В структурах GaAs⟨Mn,Mg⟩ наблюдается ферромагнетизм до $T = 400$ К, обусловленный наличием в образцах индуцированного дырками ферромагнетизма твердого раствора $Ga_{1-x}Mn_xAs$ и ферромагнитных кластеров MnAs, $Ga_{1-y}Mn_y$. Аномальный эффект Холла наблюдается до $T \approx 200$ К и показывает влияние ферромагнитной фазы на дырочный транспорт. При низких температурах наблюдается колоссальное отрицательное магнитосопротивление, переходящее в гигантское положительное при $T \approx 35$ К.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. Dietl, H. Ohno et al., *Science* **287**, 1019 (2000).
2. A. M. Nazmul, T. Amemiya, Y. Shuto, S. Sugahara, and M. Tanaka, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 017201 (2005).
3. O. D. D. Couto, Jr., M. J. S. P. Brasil, F. Iikawa et al., *Appl. Phys. Lett.* **86**, 071906 (2005).
4. C. Chen, M. Cai, X. Wang, S. Xu, M. Zhang, X. Ding, and Y. Sun, *J. Appl. Phys.* **87**, 5636 (2000).
5. Y. Shon, Y. S. Park, K. J. Chung et al., *J. Appl. Phys.* **96**, 7022 (2004).
6. A. Wolos, M. Kaminska, M. Palczewska et al., *J. Appl. Phys.* **96**(1), 530 (2004).
7. J. P. de Souza, Yu. A. Danilov, and H. Boudinov, *Radiation Effects and Defects in Solids* **147**, 109 (1998).
8. M. Tanaka, J. P. Harbison J. De Boeck, T. Sands, B. Philips, T. L. Cheeks, and V. G. Keramidas *Appl. Phys. Lett.* **62**, 1565 (1993).
9. F. Matsukura, H. Ohno, A. Shen, and Y. Sugawara, *Phys. Rev. B* **57**, R2037 (1998).
10. H. Ohno and F. Matsukura, *Sol. St. Comm.* **117**, 179 (2001).
11. K. W. Edmonds, R. P. Campion, K.-Y. Wang, A. C. Neumann, B. L. Gallagher, C. T. Foxon, and P. C. Main, *J. Appl. Phys.* **93**, 6787 (2003).
12. F. Matsukura, H. Ohno, A. Shen, and Y. Sugawara, *Phys. Rev. B* **57**, R2037 (1998).
13. T. Kasuya, *Prog. Theor. Phys.* **16**, 45 (1956).
14. S. Jin, T. H. Tiefel, M. McCormack, R. A. Fastnacht, R. Ramesh, and L. H. Chen, *Science* **264**, 413 (1994).
15. D. Serrate, J. M. De Teresa, P. A. Algarabel, M. R. Ibarra, and J. Galibert, *Phys. Rev. B* **71**, 104409-1 (2005).
16. Sh. U. Yuldashev, Y. Shon et al., *J. Appl. Phys.* **90**, 3004 (2001).
17. J. Wang, G. Cao, and Y. Li, *Materials Research Bulletin* **38**, 1645 (2003).