

06

Анизотропное магнетосопротивление и планарный эффект Холла в GaAs структуре с дельта-легированным Mn слоем

© А.В. Кудрин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород
E-mail: vikhrova@nifti.unn.ru

Поступило в Редакцию 20 января 2010 г.

Анизотропное магнетосопротивление и планарный эффект Холла обнаружены и исследованы в структуре GaAs с одиночным дельта-легированным слоем марганца (содержание марганца 0.18 ML) при температурах ниже ≈ 20 К. Структуры были изготовлены комбинированным методом МОС-гидридной эпитаксии и лазерного нанесения. Характер магнитополевой зависимости холловского сопротивления указывает на наличие кубической плоскостной магнитной анизотропии.

В связи с развитием полупроводниковой спинтроники ведутся активные работы в направлении получения полупроводниковых структур, обладающих ферромагнитными свойствами. Одним из направлений совмещения полупроводниковых и магнитных свойств является метод введения магнитной примеси в полупроводник в виде дельта-легированного слоя. Это позволяет получить локальную область с высоким содержанием магнитной примеси при сохранении кристаллического совершенства полупроводника [1].

Ранее сообщалось о ферромагнетизме в серии структур GaAs с одиночным дельта-легированным слоем марганца, полученных сочетанием методов МОС-гидридной эпитаксии и лазерного распыления в едином ростовом цикле [2]. Содержание марганца в дельта-слое варьировалось в диапазоне 0.18–0.35 ML. В данной работе рассматриваются эффект анизотропного магнетосопротивления и планарный эффект Холла в структуре с содержанием марганца в дельта-слое 0.18 ML.

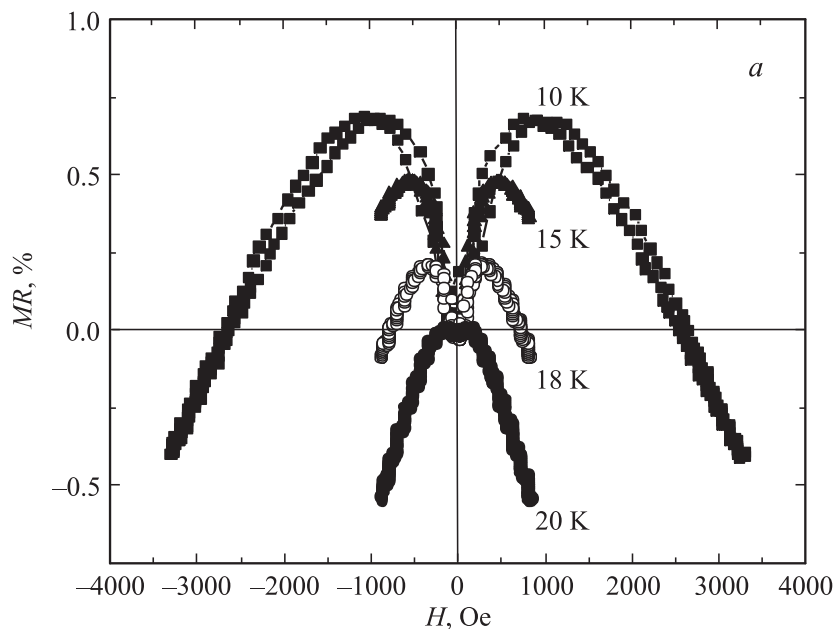


Рис. 1. *a* — магнетосопротивление структуры при различных температурах; *b* — магнитолевая зависимость сопротивления Холла при 10 К. На вставке представлена схема измерения магнетосопротивления и планарного эффекта Холла. R_{PH} — сопротивление планарного эффекта Холла, ρ — удельное сопротивление структуры, H — внешнее магнитное поле, I — ток, протекающий в структуре.

Следует отметить, что эта структура содержала наибольшее количество электрически активной примеси марганца среди образцов серии [2]. Слоевая концентрация дырок составляла $2.7 \cdot 10^{13}$ и $5.4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, а подвижность 30 и $1100 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ при 300 и 77 К соответственно.

Зависимости сопротивления Холла (R_{PH}) и магнетосопротивления от величины магнитного поля (до $H = \pm 3500 \text{ Oe}$) исследовались с использованием мезаструктур типа „холловский мостик“. Магнитное поле при измерениях эффекта Холла и магнетосопротивления было ориентировано в плоскости структуры, как схематично изображено на вставке рис. 1, *b*. Величина магнетосопротивления определялась

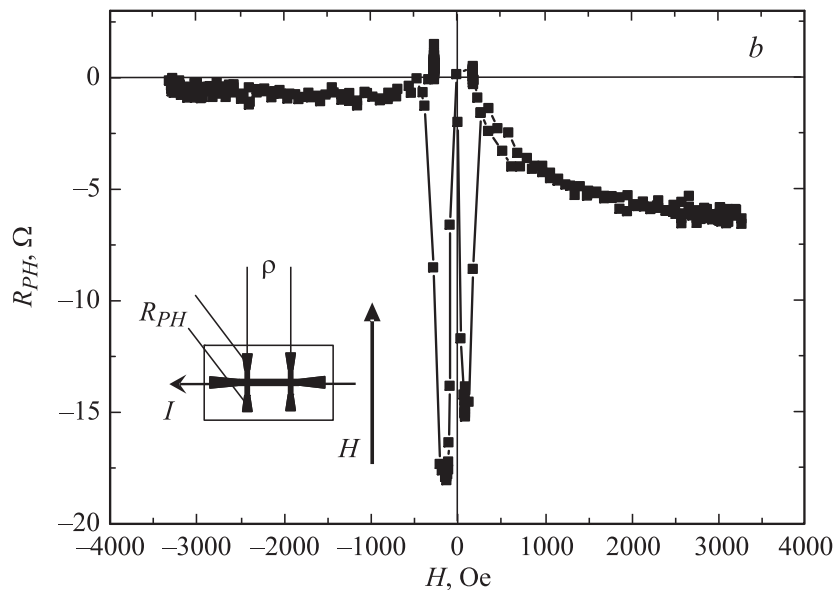


Рис. 1 (продолжение).

следующим образом:

$$MR = \frac{\rho(0) - \rho(H)}{\rho(0)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\rho(0)$ — удельное сопротивление в нулевом магнитном поле, $\rho(H)$ — удельное сопротивление в магнитном поле.

В массивных ферромагнитных материалах, в том числе в ферромагнитных полупроводниковых слоях толщиной порядка десятых микрометра, наблюдаются специфические гальваномагнитные эффекты, такие как эффект анизотропного магнетосопротивления (АМС) и планарный эффект Холла [3]. Эффект АМС состоит в том, что сопротивление ферромагнитного материала зависит от взаимной ориентации направления намагниченности материала и направления протекающего тока. Для однодоменной ферромагнитной пленки в случае, когда вектор намагниченности расположен в плоскости и направление протекания тока совпадает с осью x , выражение для удельного сопротивления имеет

следующий вид [3,4]:

$$\rho_{xx} = \frac{1}{2}(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos 2\varphi + \rho_0, \quad (2)$$

где ρ_{\perp} — удельное сопротивление для случая, когда вектор намагниченности перпендикулярен направлению тока, ρ_{\parallel} — удельное сопротивление для случая, когда вектор намагниченности параллелен направлению тока, φ — угол между направлением намагниченности и направлением тока, $\rho_0 = \frac{1}{2}(\rho_{\parallel} + \rho_{\perp})$ — „среднее“ удельное сопротивление структуры (сопротивление без учета анизотропии). Возникновение слагаемого, пропорционального $(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})$, является следствием анизотропии сопротивления.

Анизотропия сопротивления ферромагнетиков приводит к появлению отличных от нуля недиагональных компонент тензора сопротивления и, как следствие, к возникновению электрического поля в направлении, перпендикулярном протеканию тока (планарный эффект Холла), даже в случае ориентации внешнего магнитного поля в плоскости ферромагнитной пленки [3,4]. Выражение для удельного сопротивления планарного эффекта Холла имеет вид [4]:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{2}(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \sin 2\varphi. \quad (3)$$

На рис. 1, *a* представлено магнетосопротивление для данной структуры, полученное при различных температурах. На зависимостях различаются два участка: участок положительного магнетосопротивления, наблюдаемый в магнитном поле до 1000 Ое (при 10 К), и участок отрицательного сопротивления, наблюдаемый в более высоких магнитных полях. С повышением температуры величина положительного магнетосопротивления уменьшается, также уменьшается величина магнитного поля, в котором происходит переход к отрицательному магнетосопротивлению. При температурах выше 20 К участок положительного магнетосопротивления пропадает.

Наличие двух ярко выраженных участков на магнитополевых зависимостях сопротивления характерно для ферромагнитных материалов, в частности для слоев GaMnAs, и является следствием проявления эффекта анизотропного магнетосопротивления [3]. Внешнее магнитное поле изменяет величину и направление намагниченности (следовательно, соотношение величин ρ_{\perp} и ρ_{\parallel}), что приводит к изменению слагаемого $\frac{1}{2}(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos 2\varphi$ в выражении (2). В данном случае это является

причиной появления участка положительного магнетосопротивления. В более высоких магнитных полях (> 1000 Ое при 10 К) намагниченность структуры достигает насыщения, и ее направление с дальнейшим увеличением поля не меняется, поэтому слагаемое $\frac{1}{2}(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos 2\varphi$ остается постоянным, а магнитополевая зависимость сопротивления определяется характерным для магнитных полупроводников эффектом отрицательного магнетосопротивления [3]. С повышением температуры величина собственной намагниченности уменьшается, что приводит к уменьшению величины эффекта АМС.

На рис. 1, *b* представлена магнитополевая зависимость сопротивления Холла ($R_{PH}(H)$) при 10 К. Эффект АМС, как рассматривалось выше (выражение (2)), приводит к появлению сопротивления Холла при ориентации внешнего магнитного поля в плоскости структуры. Несимметричный вид зависимости $R_{PH}(H)$ относительно смены знака поля может быть связан с влиянием аномального эффекта Холла, поскольку внешнее магнитное поле, возможно, ориентировано недостаточно строго в плоскости структуры и присутствует некая его перпендикулярная компонента.

На магнитополевых зависимостях R_{PH} в области малых полей (± 400 Ое) наблюдаются практически симметричные участки значительного изменения сопротивления Холла (рис. 1, *b*). На рис. 2 приведены зависимости $R_{PH}(H)$, полученные в меньшем диапазоне магнитного поля ± 600 Ое и при малой скорости его развертки.

При 10 К наблюдается резкое, значительное (амплитудой $\approx 50 \Omega$) изменение сопротивления Холла. Данный эффект (гигантский планарный эффект Холла) характерен для ферромагнитных слоев GaMnAs [3,5]. Также планарный эффект Холла подобного вида наблюдался в гетероструктурах GaAs/AlGaAs, содержащих дельта-слой марганца и двухмерный дырочный канал проводимости [6].

Известно, что эпитаксиальные слои GaMnAs, полученные на подложках GaAs(001), имеют кубическую магнитную анизотропию, т.е. обладают двумя эквивалентными осями легкого намагничивания [100] и [010], расположенными в плоскости слоя [3]. Переход вектора намагниченности от одной оси легкого намагничивания к другой (перпендикулярной предыдущей) приводит к резкому изменению соотношения величин ρ_{\perp} и ρ_{\parallel} и, следовательно, к изменению величины сопротивления планарного эффекта Холла. Полученные зависимости $R_{PH}(H)$ позволяют заключить, что исследуемая структура также облада-

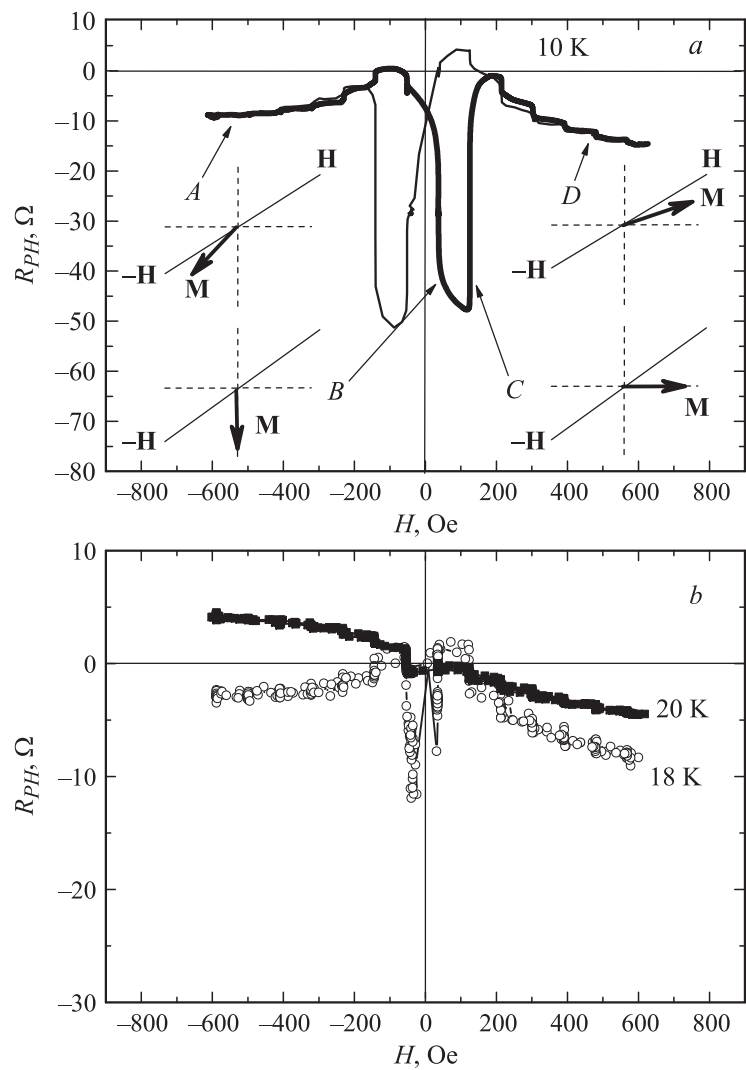


Рис. 2. Магнитополевая зависимость сопротивления Холла при различных температурах.

ет двумя осями легкого намагничивания, расположенными в плоскости. На вставках рис. 2, *a* схематично изображена ориентация вектора собственной намагниченности (\mathbf{M}) относительно осей легкого намагничивания (пунктирные линии) и направления внешнего магнитного поля (\mathbf{H}).

При изменении внешнего магнитного поля от максимального отрицательного значения до максимального положительного (от точки A до точки D на рис. 2, *a*) происходит последовательное изменение направления вектора намагниченности структуры. В большом магнитном поле (точка A) вектор намагниченности структуры ориентирован преимущественно вдоль внешнего магнитного поля (левая верхняя вставка на рис. 2, *a*). При уменьшении величины внешнего магнитного поля до нуля (точка B) происходит переориентация вектора намагниченности вдоль оси легкого намагничивания от направления внешнего магнитного поля (левая нижняя вставка на рис. 2, *a*), что сопровождается резким изменением величины R_{PH} . Увеличение магнитного поля (точка C) приводит к переориентированию вектора намагниченности вдоль другой оси легкого намагничивания (правая нижняя вставка на рис. 2, *a*), что снова приводит к резкому изменению R_{PH} . Дальнейшее увеличение внешнего магнитного поля (точка D) приводит к ориентации вектора намагниченности преимущественно вдоль магнитного поля, что также сопровождается изменением сопротивления Холла, но менее значительным (правая верхняя вставка на рис. 2, *a*). С повышением температуры величины полей, в которых происходит ориентация вектора \mathbf{M} вдоль осей легкого намагничивания (точки B и C), и амплитуда изменения величины сопротивления Холла уменьшаются, что связано с уменьшением величины намагниченности структуры. При температурах выше 20 К участки резкого изменения R_{PH} (как и эффект АМС) пропадают (рис. 2, *b*), что связано с приближением к температуре Кюри (T_C). Ранее проведенные исследования показали, что T_C для данной структуры составляет ≈ 30 К.

Таким образом, в GaAs структуре с одиночным дельта-легированным слоем марганца при температурах ниже 20 К наблюдаются значительные эффекты, связанные с магнитной анизотропией, такие как анизотропное магнетосопротивление и планарный эффект Холла, что необходимо учитывать при анализе результатов гальваномагнитных исследований. Планарный эффект Холла в структуре, содержащий только одиночный дельта-слой марганца, наблюдался впервые.

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 BR4MO1.

Список литературы

- [1] *Nazmul A.M., Sugahara S., Tanaka M.* // J. Crystal Growth. 2003. V. 251. P. 303–310.
- [2] *Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Дорохин М.В., Звонков Б.Н., Калентьева И.Л., Кудрин А.В.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 14. С. 8–17.
- [3] *Wang K.Y., Edmonds K.W., Campion R.P., Zhao L.X., Foxon C.T., Gallagher B.L.* // Phys. Rev. B. 2005. V. 72. P. 085201-1-7.
- [4] *Coren R.L., Juretschke H.J.* // Phys. Rev. 1962. V. 126. N 4. P. 1378–1385.
- [5] *Tang H.X., Kawakami R.K., Awschalom D.D., Roukes M.L.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 90. N 10. P. 107201-1-4.
- [6] *Nazmul A.M., Lin H.T., Tran S.N., Ohya S., Tanaka M.* // Phys. Rev. B. 2008. V. 77. P. 155203-1-8.