

05,03

## Особенности переноса заряда и ферромагнитный порядок в полупроводниковых гетероструктурах с $\delta$ -легированием марганцем

© А.М. Луговых<sup>1</sup>, Т.Б. Чарикова<sup>¶1,2</sup>, В.И. Окулов<sup>1,2</sup>, К.Д. Моисеев<sup>3</sup>, Ю.А. Кудрявцев<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Национальный политехнический институт, Синвестав, Мексика

<sup>¶</sup> E-mail: charikova@imp.uran.ru

Приводятся результаты исследований температурных и полевых зависимостей удельной намагниченности и магнитосопротивления в гетероструктурах с квантовой ямой GaAs/Ga<sub>0,84</sub>In<sub>0,16</sub>As/GaAs и с  $\delta$ -слоем атомарного Mn, расположенным в барьерном слое вблизи квантовой ямы, заполненной дырками. Обнаружено изменение в поведении сопротивления и намагниченности при упорядочении локализованных магнитных моментов в покровном слое вследствие изменения топологии распределения ионов марганца.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы „Электрон“ № 01201463326 при частичной финансовой поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (грант № 15-7-2-32) и РФФИ (грант № 15-02-08909).

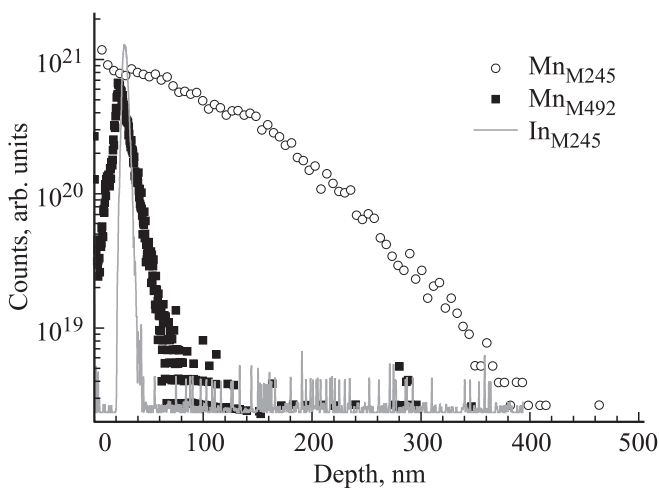
### 1. Введение

В последнее десятилетие наблюдается большой интерес к устройствам спинтроники, что вызывает новые физические и технологические подходы в изготовлении полупроводниковых магнитных гетероструктур. Уникальные физические свойства полупроводниковых гетероструктур на основе соединений  $A^{III}B^V$  с примесью переходных элементов демонстрируют более широкие перспективы в применениях для спинтроники, чем ферромагнитные металлы, что связано с возможностью управлять ферромагнетизмом в них посредством электрических полей [1–3]. До настоящего времени большинство исследований спин-электронных материалов было связано с использованием свойств магнитных разбавленных сплавов, таких как InMnAs, GaMnAs и GaInMnAsSb [4–6] и гетероструктур с квантовой ямой GaAsIn/GaAs и тонким слоем марганца, вставленным в один из барьеров GaAs, комбинированным методом МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) и лазерного осаждения [7]. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МПЭ) имеет значительные преимущества в технологии наращивания по сравнению с другими эпитаксиальными методами, что позволяет получать гетероструктуры ферромагнетик/полупроводник, где атомарно масштабируется магнитный слой с резким профилем легирования, помещенный в полупроводниковый твердый раствор. В случае если распределение легирующей примеси ограничивается одним или несколькими атомными монослоями (МС), то профиль легирования может быть

описан дираковской  $\delta$ -функцией. Такой слой может обеспечить высокую концентрацию легирующей примеси, созданную в ограниченном пространстве в пределах ширины, сравнимой с постоянной решетки матричного материала. Недавно было показано, что введение  $\delta$ -слоя магнитной примеси Mn в матрицу GaAs вблизи дырочного канала с высокой концентрацией носителей заряда, образованного на гетерогранице  $p$ -GaAs/ $p$ -AlGaAs, обеспечило формирование ферромагнитного порядка среди спинов марганца [8]. С другой стороны, для выявления люминесцентных свойств спин-ориентированной системы могут быть использованы гетероструктуры с квантовой ямой I типа (КЯ) вместо одиночного гетероперехода с 2D-дырочным каналом на гетерогранице. В данной работе будут рассмотрены транспортные и магнитные свойства гетероструктур, выращенные методом МПЭ, с одиночной квантовой ямой GaAs/InGaAs/GaAs, содержащей барьерный слой GaAs, легированный с помощью  $\delta$ -слоя атомарного марганца, дистанционно расположенного от гетерограницы InGaAs/GaAs.

### 2. Методика приготовления гетероструктур и экспериментальные методы

Гетероструктуры, содержащие одиночную квантовую яму GaAs/Ga<sub>0,84</sub>In<sub>0,16</sub>As/GaAs были получены на монокристаллической подложке GaAs(001) методом МПЭ. Ширина КЯ составляла 5 nm. Эпитаксиальное наращивание осуществлялось в едином технологическом процессе



**Рис. 1.** Экспериментальные профили распределения марганца в образце *A* (светлые кружки) и образце *B* (темные квадраты) вдоль направления эпитаксиального роста, полученные с помощью метода Масс-Спектрометрии Вторичных Ионов (ВИМС) при использовании ионного микрозонда *ims-6f*, фирмы Самеса (Франция). Сплошная линия серого цвета отображает профиль распределения индия, т.е. профиль квантовой ямы GaAs/InGaAs/GaAs. Нулевое значение на оси абсцисс соответствует границе раздела воздух/поверхность образца.

в ростовой камере Riber C21 в температурном диапазоне 250–600°C. Для исследований были выбраны два типа образцов. В образце *A* один из барьерных слоев был легирован марганцем в процессе наращивания до концентрации примеси  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , тогда как образец *B* содержал барьерный слой GaAs со вставленным слоем атомарного Mn, дистанционно расположенным от гетерограницы InGaAs/GaAs на расстоянии 3 nm (рис. 1). Толщина слоя марганца в 1.2 монослоя (МС) была выбрана из соображений, чтобы не нарушить структурное совершенство гетероструктуры. Другой барьерный слой GaAs легировался Be для обеспечения заполнения квантовой ямы дырками. В результате в гетероструктуре одновременно существуют два канала спин-зависимых носителей заряда (квантовая яма, обогащенная дырками и дельта-слой ферромагнитной примеси), расположенных вблизи друг друга.

Измерения температурных и полевых зависимостей удельного сопротивления проводились на постоянном токе с использованием четырех-контактного метода в интервале температур  $T = 1.8\text{--}300 \text{ K}$  на установке для измерения гальваномагнитных эффектов в лаборатории полупроводников и полуметаллов и на установке PPMS-9 в ЦКП „Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов“ (ИФМ УрО РАН). Контакты для всех образцов были подготовлены методом мокрого травления с использованием установки фотолитографического совмещения. Полевые и температурные зависимости удельной намагниченности исследовались в интервале температур  $T = 1.8\text{--}300 \text{ K}$  в магнитных по-

лях до  $H = \pm 50 \text{ kOe}$  с помощью СКВИД-магнетометра в ЦКП „Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов“.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

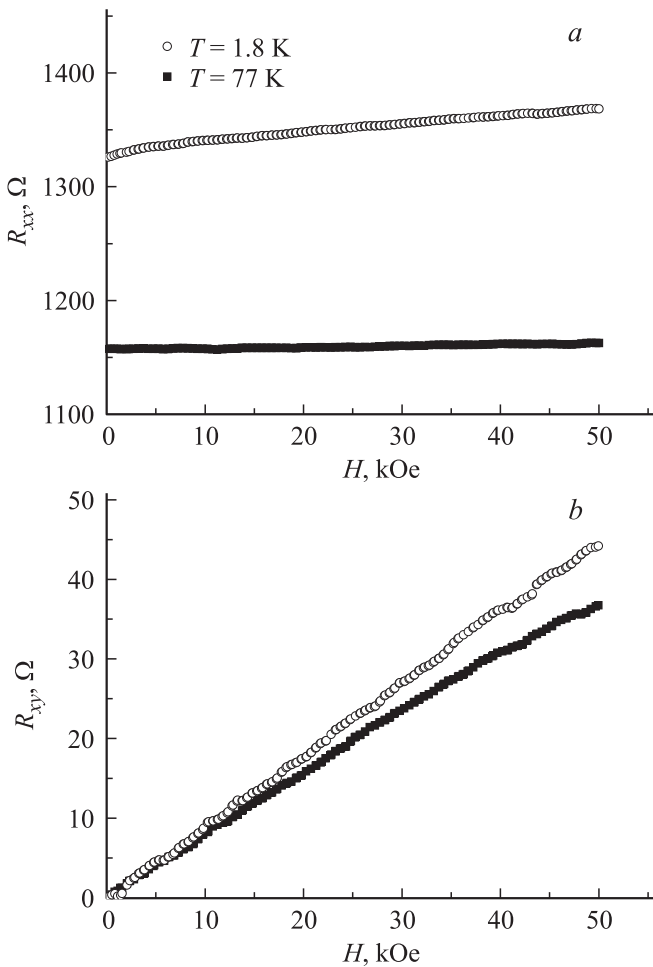
При введении марганца в барьерный слой GaAs непосредственно в процессе эпитаксиального наращивания атомы примеси статистически распределяются в объеме осажденного слоя и, более того, за счет диффузии проникают вглубь полупроводниковой матрицы на значительное расстояние (см. рис. 1, образец *A*). При начальном уровне легирования в накрывающем барьере около  $8 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  концентрация примеси в  $6 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  сохраняется в окрестности квантовой ямы (до 50 nm). В результате квантовая яма расположена в полупроводниковой матрице GaAs, легированной марганцем. В случае введения  $\delta$ -слоя атомарного Mn в барьерный слой GaAs (образец *B*) магнитная примесь локализована в узком пространстве, соизмеримом с постоянной кристаллической решетки матрицы, и диффузия ее вглубь гетероструктуры существенно ограничена. „Хвосты“ распределения на профилях ВИМС вызваны, скорее всего, аппаратным эффектом измерения (knock-on effect) [9], т.е. при толщине буферного слоя GaAs в 3 nm, отделяющего  $\delta$ -слой Mn от квантовой ямы GaAs/InGaAs/GaAs, можно исключить проникновение атомов марганца в квантовую яму. Таким образом, в образце *B* были сформированы две системы с полуметаллической проводимостью, включенные параллельно по току, пропускаемому в образце, и исследуемая гетероструктура демонстрирует металлическую проводимость (рис. 2). При этом основным путем протекания тока выступает двумерная квантовая яма.

На зависимости  $R_{XX}(H)$  в магнитном поле  $H = 3.7 \text{ kOe}$  при  $T = 1.8 \text{ K}$  наблюдается отклонение от линейности (рис. 2, *a*), что подтверждает предположение о наличии магнитного упорядочения и приводит к росту продольной проводимости в слабых магнитных полях. На зависимостях холловского сопротивления  $R_{XY}(H)$  мы наблюдаем лишь линейную зависимость от поля и уменьшение сопротивления по величине с ростом температуры (рис. 2, *b*). Анализ  $R_{XX}(H)$  и  $R_{XY}(H)$  позволил выяснить полевые зависимости подвижности дырок в гетероструктуре GaAs:Be/Ga<sub>0.84</sub>In<sub>0.16</sub>As/GaAs/ $\delta$ -Mn/GaAs с толщиной  $\delta$ -слоя в 1.2 МС. Было установлено, что подвижность и концентрация дырок в интервале температур  $T = (1.8\text{--}77) \text{ K}$  почти не изменяются при изменении магнитного поля вплоть до  $H = 50 \text{ kOe}$ . В поле  $H = 50 \text{ kOe}$  концентрация дырок составляла  $p \approx 7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , подвижность —  $\mu \approx 65 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Для сравнения, в гетероструктуре GaAs/Ga<sub>0.84</sub>In<sub>0.16</sub>As/Ga(Mn)As концентрация дырок при  $T = 100 \text{ K}$  составляла  $p \approx 1.6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , что на два порядка меньше, чем для гетероструктуры с

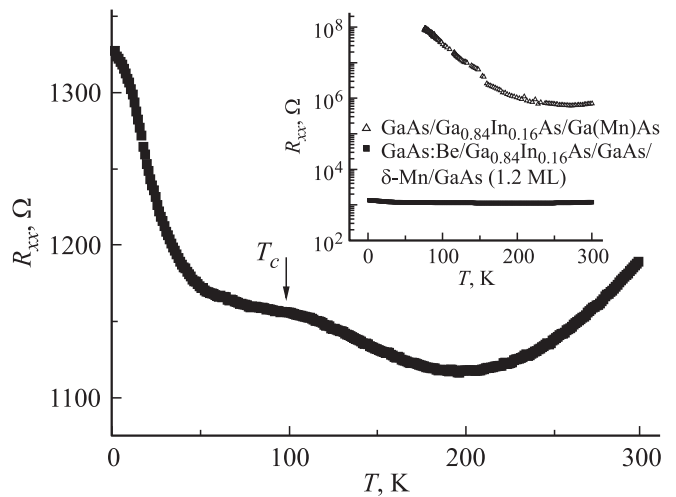
$\delta$ -слоем марганца. Следовательно, локализация атомов примеси, распределенных в объеме GaAs матрицы, в интервале нескольких нанометров позволяет повысить концентрацию дырок на два порядка.

Ранее было показано, что ферромагнитный порядок не может быть реализован в гетероструктурах, легированных  $\delta$ -слоями Mn, из-за отсутствия достаточной концентрации в дырочной системе [10]. Появление двумерного дырочного канала в результате заполнения квантовой ямы дырками из барьера GaAs, легированного немагнитной примесью Be, позволит сформировать ферромагнитный порядок за счет перекрытия волновых функций двумерного дырочного газа и спин-ориентированной системы атомарного  $\delta$ -слоя марганца.

Для изученных гетероструктур наблюдалось изменение температурной зависимости продольного сопротивления. Для гетероструктуры GaAs/Ga<sub>0.84</sub>In<sub>0.16</sub>As/Ga(Mn)As имеет место активационная зависимость  $R(T) \sim \exp(\Delta E/kT)$  с энергией активации  $\Delta E \approx 50$  meV



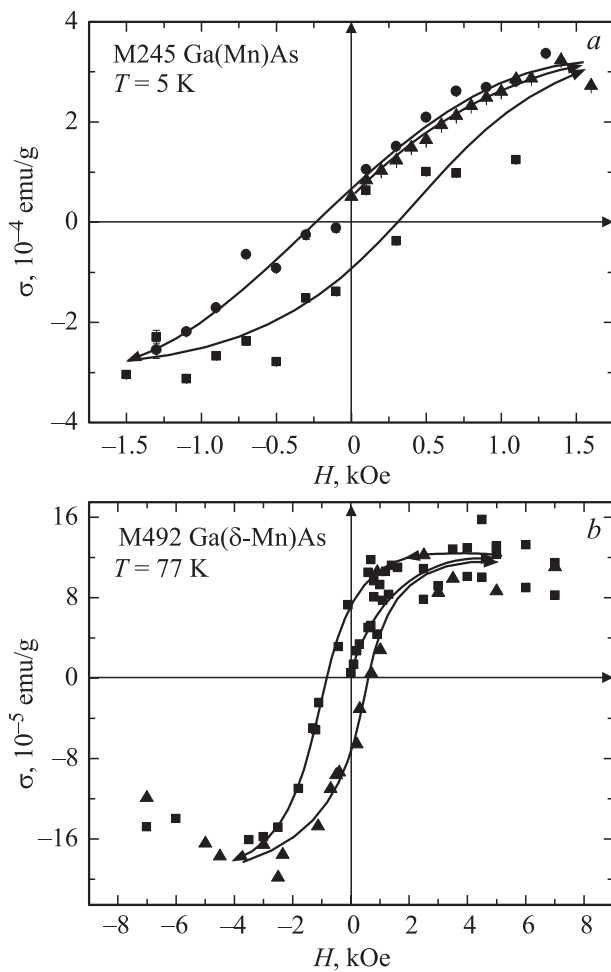
**Рис. 2.** Зависимости продольного (а) и холловского (б) сопротивления от внешнего магнитного поля гетероструктуры GaAs:Be/Ga<sub>0.84</sub>In<sub>0.16</sub>As/GaAs/ $\delta$ -Mn/GaAs с толщиной  $\delta$ -слоя 1.2 нм при  $T = 1.8$  К (светлые кружки) и  $T = 77$  К (темные квадраты).



**Рис. 3.** Температурная зависимость продольного сопротивления в гетероструктуре GaAs/Ga<sub>0.84</sub>In<sub>0.16</sub>As/GaAs/ $\delta$ -Mn/GaAs легированной  $\delta$ -слоем марганца (толщина  $\delta$ -слоя — 1.2 нм). На вставке приведены зависимости  $R_{xx}(T)$  для гетероструктур со слоем Ga(Mn)As (светлые треугольники) и с  $\delta$ -слоем марганца (темные квадраты).

в интервале температур  $T = (77-300)$  К (см. вставку на рис. 3), тогда как для гетероструктуры GaAs/Ga<sub>0.84</sub>In<sub>0.16</sub>As/GaAs/ $\delta$ -Mn/GaAs наблюдалось металлическое поведение с локальным максимумом в интервале температур  $T = 100-120$  К. Линейное уменьшение сопротивления с уменьшением температуры в интервале  $T = 200-300$  К сменялось дальнейшим ростом сопротивления в интервале  $T \approx (1.8-30)$  К, пропорциональным зависимости  $R \sim \ln T$  — слабая локализация в квантовой яме (рис. 3). Особенность в поведении продольного сопротивления в интервале температур  $T = (100-120)$  К связана, по-видимому, с перестройкой магнитной подсистемы и определяет величину температуры Кюри  $T_c \approx 100$  К. Значение  $T_c$  было подтверждено измерениями намагниченности. В работе [7] результаты исследований спектров фотолюминесценции и магнитопольных зависимостей эффекта Холла в гетеронаноструктурах с квантовой ямой GaAsIn/GaAs указывают на появление ферромагнитных свойств при температурах ниже 20–25 К. Изменение в поведении продольного сопротивления при изменении температуры в гетероструктурах на основе GaAs с различным содержанием марганца обсуждалось ранее в работах [11,12], где также наблюдался переход от полупроводниковой зависимости  $R_{xx}(T)$  к зависимости металлического типа при изменении уровня легирования марганцем.

На рис. 4 приведены зависимости удельной намагниченности от магнитного поля после учета диамагнитного вклада от подложки в общую удельную намагниченность  $\sigma(H)$  образцов. Для гетероструктуры GaAs/Ga<sub>0.84</sub>In<sub>0.16</sub>As/Ga(Mn)As с легированным марганцем поверхностным слоем GaAs петля гистерезиса удельной намагниченности существует при температуре



**Рис. 4.** Зависимости удельной намагниченности от магнитного поля для гетероструктуры GaAs/Ga<sub>0.84</sub>In<sub>0.16</sub>As/Ga(Mn)As (a) и для гетероструктуры GaAs:Ve/Ga<sub>0.84</sub>In<sub>0.16</sub>As/GaAs/ $\delta$ -Mn/GaAs с толщиной  $\delta$ -слоя 1.2 нм (b).

$T = 5$  К в интервале полей  $H = \pm 1.5$  кОе (рис. 4, a). Значение удельной намагниченности достигает величины  $\sigma \approx 6.4 \cdot 10^{-4}$  emu/g в поле  $H = \pm 10$  кОе, когда внешнее магнитное поле приложено вдоль легкой магнитной оси и было нами показано в работе [13]. Петля гистерезиса ясно указывает на формирование ферромагнитного порядка, что определяется влиянием отрицательного магнитосопротивления Холла. Для селективно легированной гетероструктуры GaAs:Ve/Ga<sub>0.84</sub>In<sub>0.16</sub>As/GaAs/ $\delta$ -Mn/GaAs проявление ферромагнитного порядка удалось достичь при более высоких температурах вплоть до  $T = 77$  К, а удельная намагниченность составила  $\sigma \approx 1.3 \cdot 10^{-4}$  emu/g в поле  $H = \pm 4$  кОе (рис. 4, b). Полученные результаты указывают, что наличие локализованных ионов в дельтаобразном профиле распределения и селективного легирования  $p$ -типа стимулируют ферромагнетизм в полупроводниковой матрице GaAs.

#### 4. Заключение

Использование  $\delta$ -легирования на основе сплавов марганца позволило выявить уникальные особенности в магнито-транспортных свойствах III-V полупроводниковых гетероструктур, а именно, то, что упорядочение локализованных магнитных моментов в покровном слое вследствие изменения топологии распределения ионов марганца приводит к изменению в поведении сопротивления — переходу полупроводник–металл и ферромагнитному упорядочению в слабых магнитных полях.

Авторы благодарят М. Лопеса-Лопеса (Национальный политехнический институт Синвестав, Мексика) за предоставленные гетероструктуры и А.Ф. Губкина (ИФМ УрО РАН, Екатеринбург) за помощь в проведении измерений магнитных свойств на установке MPMS-XL-5.

#### Список литературы

- [1] J.K. Furdyna. J. Appl. Phys. **64**, R29 (1988).
- [2] H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye. Appl. Phys. Lett. **69**, 363 (1996).
- [3] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura. IEEE Trans. On Electr. Dev. **54**, 945 (2007).
- [4] A.J. Blattner, J. Lensch, B.W. Wessels. J. Electron. Mat. **30**, 1408 (2001).
- [5] H. Ohno. J. Magn. Magn. Mater. **200**, 110 (1999).
- [6] К.Д. Моисеев, В.П. Лесников, В.В. Подольский, Ю. Кудрявцев, О. Кудрявцева, A. Escobosa, V. Sanchez-Resendiz. ФТП **45**, 788 (2011).
- [7] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Кудрин, М.В. Сапожников. ФТТ **52**, 2124 (2010).
- [8] A.M. Nazmul, S. Sugahara, M. Tanaka. Phys. Rev. B **67**, 241308R (2003).
- [9] E.F. Schubert, J.M. Kuo, R.F. Kopf, H.S. Luftman, L.C. Hopkins, N.J. Sauer. J. Appl. Phys. **67**, 1969 (1990).
- [10] A.M. Nazmul, S. Sugahara, M. Tanaka. Appl. Phys. Lett. **80**, 3120 (2002).
- [11] V. Tripathi, K. Dhorhak, B.A. Aronson, V.V. Rylkov, A.B. Davydov, B. Raquet, M. Goiran, K.I. Kugel. Phys. Rev. B **84**, 075305 (2011).
- [12] F. Matsukura, H. Ohno, A. Shen, Y. Sugawara. Phys. Rev. B **57**, R2037 (1998).
- [13] T. Charikova, V. Okulov, A. Gubkin, A. Lugovikh, K. Moiseev, V. Nevedomsky, Yu. Kudriavstev, S. Gallardo, M. Lopez-Lopez. Low Temp. Phys. **41**, 157 (2015).