

УДК 537.622.7

*А.И. Дмитриев¹, А.Д. Таланцев¹, С.В. Зайцев², Р.Б. Моргунов¹*¹ Институт проблем химической физики РАН² Институт физики твердого тела РАН**Блоховский и перколяционный типы магнитного упорядочения в гетероструктурах InGaAs/GaAs/ δ - < Mn >**

Обнаружено влияние ориентации подложек GaAs на магнитные свойства, спиновую динамику и фотолюминесценцию гетероструктур с квантовой ямой InGaAs/GaAs и δ - < Mn >-слоем. Для сингулярных и вицинальных гетероструктур InGaAs/GaAs/ δ - < Mn > получены качественно различные температурные зависимости намагниченности, спектры электронного спинового резонанса и температурные зависимости поляризации фотолюминесценции квантовой ямы.

Ключевые слова: гетероструктура, магнитный полупроводник, квантовая яма, спиновая поляризация.

Управление спиновой поляризацией носителей заряда — одно из ключевых направлений в физике твердого тела и спинтронике [1]. Гетероструктуры InGaAs/GaAs/ δ - < Mn > могут быть прототипом спиновых светодиодов. Ориентация подложек в молекулярной эпитаксии влияет на упорядоченность выращиваемых гетероструктур. Выбором угла Θ между какой-либо кристаллографической плоскостью и соответствующей гранью подложки можно контролировать степень неупорядоченности выращиваемых ферромагнитных слоев и соответственно их магнитные свойства. Целью настоящей работы является установление влияния ориентации подложки GaAs на магнитные свойства, спиновую динамику и фотолюминесценцию гетероструктур с квантовой ямой InGaAs/GaAs и тонким слоем твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ с концентрацией марганца $x \approx 4 - 10\%$ (δ - < Mn >-слоем).

Гетероструктуры InGaAs/GaAs/ δ - < Mn > выращены комбинированным методом. На первом этапе на подложке GaAs (001) методом металлорганической гидридной эпитаксии последовательно выращены буферный слой GaAs, легированный Si, далее имеется δ - < C >-слой, затем идет слой нелегированного GaAs, нелегированная квантовая яма InGaAs/GaAs и, наконец, разделяющий слой GaAs. На следующем этапе в том же реакторе методом лазерного распыления Mn и GaAs мишеней последовательно выращены δ - < Mn >-слой толщиной 2 нм и покровный слой GaAs. Исследовано две серии образцов. Сингулярные гетероструктуры, содержащие квантовую яму InGaAs/GaAs и однородный δ - < Mn >-слой на точно ориентированной подложке GaAs (001), когда угол Θ между кристаллографической плоскостью (001) и соответствующей гранью подложки равен нулю. Вицинальные гетероструктуры, содержащие квантовую яму InGaAs/GaAs и неупорядоченный δ - < Mn >-слой на подложке GaAs (001), когда угол между кристаллографической плоскостью (001) и соответствующей гранью подложки $\Theta = 3^\circ$. Ориентация подложек контролировалась методом рентгеновской дифракции с помощью дифрактометра ДРОН-4. Подробно методика выращивания гетероструктур и их аттестации описана ранее [2]. Измерения намагниченности проводили на высокочувствительном сверхпроводящем квантовом интерференционном магнетометре (СКВИД) MPMS 5XL, Quantum Design при температурах 2–300 К в постоянном магнитном поле 1 кЭ. Для исследования высокочастотной динамики спинов был использован спектрометр электронного парамагнитного резонанса Bruker E500, работающий в X-диапазоне частоты (9,650 ГГц). Фотолюминесценция возбуждалась He-Ne лазером (632,8 нм) и регистрировалась в геометрии Фарадея. Циркулярно-поляризованная фотолюминесценция исследовалась стандартным образом с использованием линейного поляризатора и четвертьволновой пластинки.

Обсудим сингулярные образцы на примере гетероструктуры 4838. Температурная зависимость намагниченности $M(T)$ образца 4838 представлена на рис. 1. Уменьшение намагниченности δ - < Mn >-слоя с ростом температуры описывается формулой Блоха (рис. 1) при температурах

ниже температуры Кюри $T_C = (35 \pm 5)$ К [3]:

$$M(T) = M_0(1 - BT^{3/2}). \quad (1)$$

В теории спиновых волн спин-волновой параметр B , входящий в формулу Блоха (1), связан с коэффициентом спин-волновой жесткости D выражением [5]:

$$B = 2.612 \frac{g\mu_B}{M_0} \left(\frac{k_B}{4\pi D} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

который в свою очередь связан с обменным интегралом J выражением [6]:

$$J = \frac{Dg\mu_B}{2Sr_S^2}, \quad (3)$$

где $S = 5/2$ — спин ионов марганца Mn^{2+} , r_S — расстояние между спинами: $r_S = \left(\frac{4\pi xn}{3} \right)^{-1/3}$ [6] (здесь n — концентрация катионных позиций Ga^{3+} , x — атомная доля примесных ионов марганца Mn^{2+}). В приближении молекулярного поля Вейсса обменный интеграл J определяет температуру Кюри T_C [7, 8]:

$$T_C = \frac{2S(S+1)}{3k_B} zJ, \quad (4)$$

которую можно также определить из зависимости $M(T)$ (здесь число ближайших соседей $z = 4$). Мы воспользовались системой уравнений (1-4) для определения $J = (0,18 \pm 0,04)$ мэВ, который оказался близок к соответствующему значению в слоях $Ga_{0,949}Mn_{0,051}As$ толщиной 330 нм, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [9]. Мы вычислили температуру Кюри $T_C = (35 \pm 8)$ К в приближении молекулярного поля Вейсса по формуле (2), используя значение обменного интеграла J , полученное из аппроксимации зависимости $M(T)$. Магнитные свойства δ - < Mn >-слоев, выращенных на ориентированных подложках, удастся описать на основе теории объемной намагниченности упорядоченных ферромагнетиков.

Обсудим теперь температурную зависимость намагниченности $M(T)$ серии вичинальных образцов на примере образца 4831 (рис. 1). Зависимость $M(T)$ имеет плавный (не блоховский) ход, характерный для перколяционного ферромагнитного упорядочения в неупорядоченных ферромагнетиках. Заметим, что образец 4831 уже исследовался ранее в работе [10]. Для объяснения наблюдаемых экспериментальных результатов авторы [10] предложили модель сильно неоднородного магнитного δ - < Mn >-слоя с резкими пространственными изменениями концентрации марганца. Интерпретация экспериментальных результатов в рамках предложенной модели [10] сильно затруднена и требует введения весьма искусственных предположений о ферромагнитных «островках», погруженных в антиферромагнитную матрицу. Наши же результаты указывают на применимость общепринятой теории протекания для неупорядоченных разбавленных магнитных полупроводников.

Представления, основанные на теории протекания, позволяют описать температурный ход намагниченности образца 4831 при температурах ниже температуры Кюри $T_C = (35 \pm 8)$ К [11]:

$$M(T) = M_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{R}{r_S} \right)^3 \ln^3 \frac{JzS(S+1)}{T} \right] \right\}. \quad (5)$$

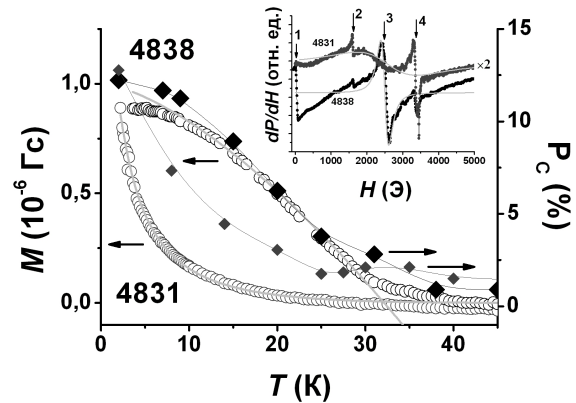


Рис. 1. Зависимости $M(T)$ образцов 4838 и 4831 в магнитном поле 1 кЭ. Сплошными линиями показаны аппроксимации формулой Блоха (1) и перколяционной формулой (3), а также зависимости степени циркулярной поляризации P_C от температуры в магнитном поле 2 кЭ и 5 кЭ соответственно. На врезке изображены спектры электронного спинового резонанса при температурах $T = 4$ К

Температура Кюри в свою очередь может быть найдена из выражения [11]:

$$T_C = JzS(S+1) \exp\left(-\frac{0,87rS}{R}\right). \quad (6)$$

Из аппроксимации температурной зависимости намагниченности $M(T)$ выражением (5) был определен обменный интеграл $J = (0,18 \pm 0,01)$ мэВ, который оказался близок к соответствующему значению в образце 4838. Оценка температуры Кюри по формуле (6) дает значение $T_C = (5 \pm 1)$ К.

Спектры электронного спинового резонанса также оказались чувствительны к ориентации подложки. Спектр электронного спинового резонанса сингулярного образца 4838 обсуждался ранее [13] и содержит: нерезонансную линию 1, связанную с микроволновым магнетосопротивлением, изотропные линии 2, 4, отвечающие фоновой примеси в подложке GaAs, и линию 3, обусловленную ферромагнитным резонансом в δ - < Mn >-слое (врезка на рис. 1). Спектр электронного спинового резонанса вицинального образца 4831 (врезка на рис. 1) существенно отличается от спектра сингулярного образца 4838 того же химического состава. При переходе от образца 4838 к 4831 происходит значительное уширение линии 3 ферромагнитного резонанса. Причина может быть в том, что вклад в спектр электронного спинового резонанса вицинального образца 4831 могут давать ферромагнитные участки, расположенные в местах с различающимися кристаллическими и магнитными параметрами (со своим определенным локальным магнитным полем). Каждой группе ферромагнитных участков соответствует линия со своим резонансным полем, определяемым формой и локальным окружением данного участка. Это приводит к тому, что наблюдаемая линия ферромагнитного резонанса является огибающей множества линий с различными резонансными полями и сильно уширяется (врезка на рис. 1).

Различия между образцами видны и из температурной зависимости степени поляризации P_C (рис. 1). Наблюдаемую в магнитооптике разницу структур, выращенных на точно ориентированных и разориентированных подложках, мы связываем с существенной разницей неоднородности δ - < Mn >-слоя. В случае структур на разориентированных подложках такая неоднородность будет существенно сильнее. В структурах, выращенных на разориентированных подложках, разориентация обычно приводит к появлению ступенек роста в плоскости структуры. Следовательно, можно ожидать образования сильно анизотропных, вытянутых в направлении ступенек роста ферромагнитных участков $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$. Действительно, при изучении гальваномагнитных свойств структур, аналогичных 4831, наблюдалась анизотропия магнитополевых зависимостей холловского сопротивления [13], что, на наш взгляд, обусловлено влиянием расположения ступеней роста на распределение примеси марганца в плоскости слоя.

Таким образом, обнаружено влияние ориентации подложки GaAs на магнитные свойства, спиновую динамику и фотолюминесценцию гетероструктур с квантовой ямой InGaAs/GaAs и δ - < Mn >-слоем. В сингулярных гетероструктурах InGaAs/GaAs/ δ - < Mn > температурная зависимость магнитного момента описывается формулой Блоха «3/2», а в вицинальных — имеет плавный не блоховский ход, описываемый в рамках теории протекания для неупорядоченных ферромагнетиков. Характер температурной зависимости намагниченности δ - < Mn >-слоя взаимосвязан с температурной зависимостью поляризации фотолюминесценции из квантовой ямы InGaAs/GaAs. Это объясняется беспорядком в вицинальной гетероструктуре InGaAs/GaAs/ δ - < Mn > и приводит к значительному уширению линий ферромагнитного резонанса и фотолюминесценции.

Работа поддержана грантом Президента РФ МК-1764.2011.3.

Литература

1. Morgunov R.B., Dmitriev A.I., Kazakova O.L. Percolation ferromagnetism and spin waves in Ge: Mn thin films // Phys. Rev. B. — 2009. — V. 80, I. 8. — P. 085205-1–085205-5.
2. Vikhrova O.V., Danilov Yu. A., Drozdov Yu. N., Zvonkov B.N., Iikawa F., and Brasil M.J.S.P. Properties of GaAs/InGaAs quantum-size structures containing Mn-doped layers // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2007. — V. 1, I. 1. — P. 64–66.
3. Bloch F. Zur Theorie des Ferromagnetismus // Z. Phys. — 1930. — V. 61, N 3–4. — P. 206–219.
4. Wijn H.P.J. Ferromagnetism. — Berlin: Springer-Verlag. 1966. — V. XVIII, Pt. 2, P. 1.

5. *Kittel C.* Introduction to Solid State Physics, 4th ed. — New York: Wiley, 1971.
6. *Dietl T., Ohno H., Matsukura F.* Hole-mediated ferromagnetism in tetrahedrally coordinated semiconductors // *Phys. Rev. B.* — 2001. — V 63, I. 19. — P. 195205-1-195205-21.
7. *Kaul S.N. Mohan Babu T.V.S.M.* Spin wave stiffness and the range of exchange interactions in amorphous $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_{75}\text{B}_{25}$ and $(\text{Fe}_{1-y}\text{W}_y)_{83}\text{B}_{17}$ alloys // *J. Phys.: Condes. Matter.* — 1989. — V. 1, N 44. — P. 8509-8522.
8. *Callen H.B.* Green Function Theory of Ferromagnetism // *Phys. Rev.* — 1963. — V. 130, I. 3. — P. 890-898.
9. *Goennenwein S.T.B., Graf T., Wassner T., Brandt M.S., Stutzmann M., Philipp J.B., Gross R., Krieger M., Zürn K., Ziemann P., Koeder A., Frank S., Schoch W., Waag A.* Spin wave resonance in $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ // *Appl. Phys. Lett.* — 2003. — V. 82, I. 5. — P. 730-732.
10. *Аронзон Б.А., Лагутин А.С., Рыльков В.В., Тугушев В.В., Меньшов В.Н., Лейскул А.В., Лайхо Р., Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Звонков Б.Н.* Магнитные свойства квантовых ям $\text{GaAs}/\delta < \text{Mn} > / \text{GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ // *Письма в ЖЭТФ.* — 2008. — Т. 87, вып. 3. — С. 192-198.
11. *Korenblit Ya ., Shender E.F.* Ferromagnetism of disordered systems // *Sov. Phys. Usp.* — 1978. — V. 21, I.10. — P. 832-851.
12. *Дмитриев А.И., Моргунов Р.Б., Зайцев С.В.* Электронный спиновый резонанс в гетероструктурах $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ с δ -слоем марганца // *ЖЭТФ.* — 2011. — Т. 139, Вып. 2. — С. 1-11.
13. *Вихрова О.В. Данилов Ю.А., Дроздов Ю.Н., Звонков Б.Н., Калентьева И.Л., Кудрин А.В.* Влияние ориентации подложек $i\text{-GaAs}$ на гальваномагнитные свойства структур GaAs с дельта-легированными Mn слоями // *Тезисы докладов конференции «XXVII Научные чтения имени академика Н.В. Белова».* — 2008. — С. 113-116.

Поступила в редакцию 27.04.2011.