

Исследование свойств ферромагнитных нанослоёв (А³,Mn)В⁵, полученных методом лазерного нанесения

© 2012 г. Д.А. Суровегина¹, Ю.А. Данилов^{1,2}

¹ Нижегородский государственный университет им.Н.И.Лобачевского

² Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ, Нижний Новгород
surovegina_da@mail.ru

Разбавленные ферромагнитные полупроводники (РМП) на основе соединений А³В⁵ при сильном (до 5-10 ат.%) легировании магнитными примесями (как правило, Mn) совмещает в себе и полупроводниковые, и ферромагнитные свойства. Эти соединения считаются перспективным поколением материалов спинтроники. Наиболее изученными РМП являются (Ga,Mn)As, а другие полупроводники этого типа изучены в гораздо меньшей степени.

Ключевые слова: спинтроника, ферромагнитные полупроводники, метод лазерного нанесения, температура Кюри

Спинтроника - новая активно развивающаяся область науки и техники, которая изучает и использует спин-зависимые эффекты в твёрдых телах.

В отличие от электроники, которая в качестве степени свободы использует заряд частицы, спинтроника имеет дело со спинами. Для того чтобы перевернуть спин, требуется значительно меньше энергии магнитного поля, и данный процесс происходит быстрее перемещений зарядов электрическим полем. У спинтроники есть ещё одна особенность: совместное действие заряда и спина электрона, которое проявляется тем сильнее, чем меньше размер объекта. Таким образом, управление спиновыми состояниями позволяет создавать приборы, которые обладают меньшими размерами, большими скоростями обработки, с большой информационной ёмкостью и меньшими энергопотреблениями[1,2].

На основе спин-зависимых эффектов создаются новые приборы и устройства, например такие, как: свето-излучающий диод со спиновой поляризацией (спин-СИД), лазеры со спиновой поляризацией (спин-лазеры). Принцип работы таких приборов аналогичен тому, что используется в оптоэлектронике. Главное отличие состоит в том, что испускаемый свет поляризован. Для реализации указанных приборов необходимы обладающие ферромагнитными свойствами материалы, которые могли бы быть использованы в качестве инжекторов спин-поляризованных носителей. Можно сформулировать три основных требования, предъявляемые к спинтронным материалам:

- 1) ферромагнитные свойства таких материалов с подвижными их носителями тока *n*- и *p*-типа должны сохраняться при температурах, соответствующих условиям эксплуатации полупроводниковых приборов и устройств (≥ 300 К);
- 2) методы изготовления таких структур должны быть достаточно просты и дешевы;

3) при формировании слоев таких материалов в составе гетероструктур полупроводниковая базовая их часть должна сохранять (или незначительно ухудшать) структуру и физико-химические свойства.

Перспективным является использование магнитных полупроводников на основе соединений A^3B^5 , которые при легировании магнитными примесями проявляют ферромагнитные свойства; следовательно, они совмещают в себе и полупроводниковые, и ферромагнитные свойства. Часто их называют разбавленными магнитными полупроводниками (РМП), поскольку содержание магнитной примеси в них достигает нескольких процентов (5-10 ат.%). Первые РМП типа $(A^3,Mn)B^5$ были получены в 1990-ые годы. В этих материалах атомы Mn являются не только акцепторами (т.к. часть атомов 3 группы замещена атомами марганца), но и поставляют в них нескомпенсированные магнитные моменты, появление которых обусловлено свойствами незаполненной 3d-электронной оболочки.

К настоящему времени наиболее изученным (в какой-то степени, эталонным) РМП является $(Ga,Mn)As$, в котором двухвалентные атомы Mn замещают трехвалентные атомы Ga, что приводит к появлению дырки в валентной зоне и локализованного магнитного момента. Существует несколько моделей, объясняющих появление ферромагнетизма в РМП. Наиболее принятая заключается в следующем[3]. В результате взаимодействия иона Mn со свободными дырками они становятся ориентированными по спине. Далее эти дырки, перемещаясь по кристаллу, передают информацию о спине первого иона Mn второму и т.д. В результате магнитные моменты дырок и ионов становятся упорядоченными. Ферромагнетизм будет наблюдаться, если время между двумя актами взаимодействия будет меньше времени рассеяния дырок на тепловых колебаниях решётки (времени релаксации). В противном случае система будет парамагнитной. С увеличением температуры колебания решётки увеличиваются, следовательно, время релаксации уменьшается, ферромагнетизм пропадает. Температура, при которой пропадает ферромагнетизм, называется температурой Кюри. Таким образом, магнитные свойства полупроводников A^3B^5 , легированных марганцем (например, $GaMnAs$ и $InMnAs$), обусловлены механизмом косвенного обмена между магнитными моментами атомов Mn посредством носителей заряда (дырок).

Для РМП наблюдается специфическое явление - аномальный эффект Холла, который описывается формулой следующего вида:

$$R_H = \frac{R_0}{d} H + \frac{R_S}{d} M,$$

где R_H – сопротивление Холла, R_0 – обыкновенная (нормальная) постоянная Холла, R_S – аномальная постоянная Холла, H - внешнее магнитное поле, M - намагниченность.

Данная зависимость изображена на рис.1 [4].

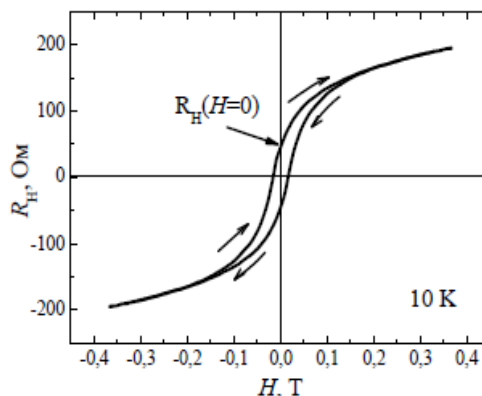


Рис.1. Магнитополевая зависимость сопротивления Холла при 10 К для слоя GaMnAs. Стрелками указано направление изменения магнитного поля.

Когда кривая гистерезиса выходит на насыщение, $M = \text{const}$, следовательно, изменения коэффициента Холла будут связаны с нормальным эффектом Холла, а на графике будет наблюдаться прямая, по наклону которой можно определить

$$R_0 = \frac{1}{sp},$$

откуда и определяют концентрацию дырок p . А подвижность дырок μ_H определяется:

$$\mu_H = \frac{R_0}{\rho},$$

где ρ - удельное сопротивление.

Таким образом, эффект Холла позволяет установить ферромагнетизм вещества, а также определить его электрические свойства.

Для получения нанослоёв (Ga,Mn)As хорошо отработана технология низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии, описанная в работе[2].

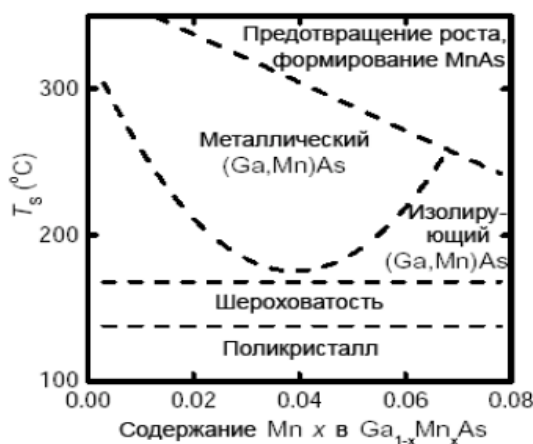


Рис.2. Схематическая диаграмма свойств пленок (Ga,Mn)As в связи с параметрами их выращивания (T_s – температура выращивания; x – доля Mn в твердом растворе $Ga_{1-x}Mn_xAs$).

Фазовая диаграмма для выращивания (Ga,Mn)As приведена на рис.2, где показаны фазы получаемого материала при изменении температуры выращивания и концентрации Mn в сплаве. При снижении температуры от оптимальной температуры $\approx 250^\circ\text{C}$, слои имеют тенденцию быть изолирующими, а при $T_s < 180^\circ\text{C}$ получаются только поликристаллические пленки. Когда поток Mn и/или температура выращивания слишком велики, то появляется вторая фаза MnAs (имеющая кристаллическую структуру типа NiAs). Многофазность и понижение симметрии кристаллической решётки до гексагональной (типа NiAs) резко ухудшают оптоэлектронные свойства структур. Оптимальной для получения слоев (Ga,Mn)As считается концентрация Mn $x \approx 0.05$. При этом в лучшем случае температура Кюри для материала $T_C \approx 110$ К.

В нашей работе мы исследовали слои $(\text{A}^3, \text{Mn})\text{B}^5$, сформированные методом лазерного нанесения на подложки $i\text{-GaAs}$ (100) в реакторе МОС-гидридной эпитаксии в потоке водорода. Сначала при 600°C наносился нелегированный слой GaAs толщиной 0.3 μm . Далее подложка охлаждалась до $300\text{-}400^\circ\text{C}$, а осаждение слоёв $(\text{A}^3, \text{Mn})\text{B}^5$ производилось методом поочерёдного лазерного (импульсный АИГ:Nd лазер) распыления мишеней нелегированного A^3B^5 и металлического Mn. Выбитые из мишени атомы переносились на подложку. Содержание Mn в выращенном слое оценивалось по соотношению времён распыления $Y_{\text{Mn}} = \frac{t_{\text{Mn}}}{t_{\text{ss}} + t_{\text{Mn}}}$ где t_{Mn} и t_{s} – времена распыления Mn и полупроводникового материала.

К примеру, были получены и исследованы слои (Ga,Mn)Sb с $Y_{\text{Mn}} = 0.06 - 0.5$. На рис.3 приведена магнитополевая зависимость $R_{\text{H}}(H)$ для (Ga,Mn)Sb ($Y_{\text{Mn}} = 0.5$) при 10К и 300К.

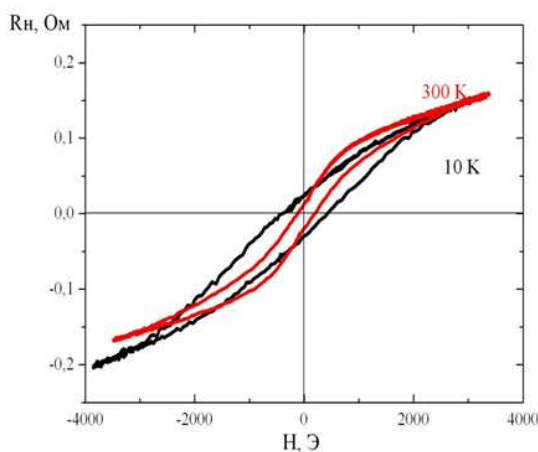


Рис.3. Магнитополевая зависимость $R_{\text{H}}(H)$ для (Ga,Mn)Sb ($Y_{\text{Mn}} = 0.5$) при 10К и 300К.

Из рисунка 3 видно, зависимости сопротивления Холла от магнитного поля $R_{\text{H}}(H)$ вплоть до 300 К имели нелинейный вид с ярко выраженным гистерезисным характером, следовательно, температура Кюри слоев GaMnSb превышает комнатную.

В заключение следует отметить, что в данной работе ферромагнитные нанослои $(\text{A}^3, \text{Mn})\text{B}^5$ были сформированы методом лазерного распыления. Было показано, что слои GaMnSb вплоть до 300 К обладают аномальным эффектом Холла, характерным для ферромагнитных материалов. Значит, температура Кюри слоев GaMnSb превышает комнатную, что является необходимым требованием для реализации спинтронных приборов.

Список литературы

1. Спинтроника и спинтронные материалы / В.А. Иванов, Т.Г. Аминов, В.М. Новоторцев, В.Т. Калинин // Известия Академии наук. Серия химическая. - 2004. - В.11. - С.2255-2296.
2. Данилов Ю.А. Основы спинтроники / Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, А.А. Ежевский // Учебное пособие. Изд. ННГУ. - 2009, 173 с.
3. Дорохин М.В. Измерение поляризационных характеристик люминесценции спиновых светоизлучающих диодов. Учебно-методическое пособие / М.В. Дорохин // Изд. ННГУ. - 2010, 78 с.
4. Кудрин А.В. Гальваномагнитные свойства ферромагнитных наноструктур. Учебно-методическое пособие / А.В. Кудрин // Изд. ННГУ. - 2010, 77 с.