

Получение и свойства гетероструктур GaAsSb/GaAs, легированных магнитной примесью

© Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова[¶], Ю.А. Данилов, Ю.Н. Дроздов*, М.Н. Дроздов*,
И.Л. Калентьева, А.В. Кудрин

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950, Нижний Новгород, Россия

* Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950, ГСП-105 Нижний Новгород, Россия

(Получена 15 апреля 2012 г. Принята к печати 25 апреля 2012 г.)

Впервые выращены и исследованы структуры, содержащие квантовую яму GaAsSb/GaAs и δ -слои марганца и углерода в покровном слое GaAs. Полученные гетеронаноструктуры имеют хорошее кристаллическое качество, что подтверждается рентгенодифракционным анализом и фотолюминесцентными исследованиями. Обнаружено, что при температурах ниже 20–25 К они обладают ферромагнитными свойствами, поскольку демонстрируют нелинейные магнитопольные зависимости сопротивления Холла и отрицательное магнетосопротивление. Профилирование элементного состава методом вторичной ионной масс-спектрометрии выявило противоположное влияние δ -легирования углеродом и марганцем покровного GaAs слоя на профиль квантовой ямы GaAsSb: введение углерода приводит к размытию гетерограницы GaAsSb/GaAs из-за сегрегации сурьмы, а легирование марганцем практически не оказывает влияния на профиль распределения сурьмы в квантовой яме.

1. Введение

Развитие спиновой электроники зависит от получения новых полупроводниковых ферромагнитных материалов и наноструктур. Наибольшие достижения в области получения ферромагнитных полупроводников связаны с выращиванием слоев полупроводников $A^{III}B^V$, однородно легированных примесью марганца (GaMnAs, InMnAs и GaMnSb). Как правило, рост данных материалов реализуется при низких температурах, поэтому их кристаллическое качество недостаточно высокое, и они могут содержать значительное количество дефектов и включения полуметаллических фаз. Указанные факторы существенно затрудняют их применение в качестве источников спин-поляризованных носителей при разработке таких приборов спинтроники как спиновый светоизлучающий диод и спиновый полевой транзистор. Значительный интерес представляет прием δ -легирования магнитной примесью [1], поскольку именно такой способ легирования дает больше возможностей по управлению расположением магнитных моментов примесных атомов в гетеронаноструктурах и позволяет сохранять достаточно высокое кристаллическое качество структур. Так, были обнаружены и исследованы ферромагнитные свойства структур с δ -слоем Mn, расположенным вблизи квантовой ямы InGaAs/GaAs или вблизи двумерного дырочного канала в гетероструктурах GaAs/p-AlGaAs [2,3]. Как показано ранее [4], проявление ферромагнетизма удалось наблюдать в гальваномагнитных свойствах структур на основе GaAs с одиночным δ -слоем марганца, полученных сочетанием методов МОС-

гидридной эпитаксии (МОСГЭ) и лазерного осаждения в едином ростовом цикле [5].

В процессе выполнения данной работы впервые были выращены и исследованы ферромагнитные полупроводниковые структуры, содержащие квантовую яму GaAsSb/GaAs и δ -слой марганца.

2. Методика изготовления структур

Исследуемые гетеронаноструктуры GaAsSb/GaAs с δ -слоем марганца были выращены комбинированным методом МОСГЭ и лазерного осаждения [5]. Процесс выращивания осуществлялся с использованием оригинальной автоматизированной технологической установки, которая помимо получения слоев соединений $A^{III}B^V$ методом МОС-гидридной эпитаксии позволяет использовать лазерное распыление твердотельных мишеней в газовой среде для легирования полупроводников различными примесями и низкотемпературного формирования полупроводниковых слоев. Распыление мишеней производилось сфокусированным излучением лазера АИГ: Nd ($\lambda = 1.06$ мкм), работающего в режиме модуляции добротности.

На подложках полуизолирующего GaAs, вырезанных с отклонением 2° от плоскости (100), методом МОСГЭ при температуре $T_g = 620^\circ\text{C}$ формировался буферный слой GaAs толщиной 0.4–0.5 мкм. Затем T_g понижалась до 580°C и тем же методом выращивались квантовая яма GaAs_{1-x}Sb_x шириной 12–18 нм с содержанием сурьмы $x = 0.12$ –0.16, δ -слой углерода и спейсерные слои GaAs, разделяющие квантовую яму и δ -слои углерода и марганца. Содержание сурьмы в квантовых ямах определялось соотношением потоков арсина, три-

[¶] E-mail: vikhrova@nifti.unn.ru

Характеристики исследованных гетеронаноструктур GaAsSb/GaAs

№	Q_{Mn} , МС	Наличие δ -слоя С	300 К		77 К	
			μ_{eff} , $cm^2/(V \cdot c)$	p_s , cm^{-2}	μ_{eff} , $cm^2/(V \cdot c)$	p_s , cm^{-2}
1	Нет	Нет	—	—	—	—
2	Нет	Есть	210	$8.8 \cdot 10^{12}$	800	$2.7 \cdot 10^{12}$
3	0.15	Есть	160	$2.2 \cdot 10^{13}$	490	$6.5 \cdot 10^{12}$
4	0.35	Нет	45	$1.8 \cdot 10^{13}$	15	$1.4 \cdot 10^{13}$
5	0.7	Есть	150	$2.3 \cdot 10^{13}$	490	$6 \cdot 10^{12}$

Примечание. Толщина спейсерных слоев, разделяющих квантовую яму и δ -слои примесей, составляла 3–4 нм.

метилсурьмы и триметилгаллия в процессе МОСГЭ. Далее методом лазерного осаждения при $T_g = 400^\circ C$ были получены δ -слой марганца и покровный слой GaAs толщиной 20–40 нм. Содержание марганца в δ -слое (Q_{Mn}) варьировалось в пределах 0.15–0.7 монослоя (МС) посредством изменения времени распыления соответствующей мишени и использования ослабляющих лазерное излучение стекол. Особенностью такого метода выращивания является то, что уменьшение T_g в процессе лазерного распыления существенно снижает диффузию примеси Mn, а высокотемпературные слои, полученные МОСГЭ, обеспечивают хорошее кристаллическое качество всей структуры. По данным [6], при выращивании квантовой ямы GaAs_{1-x}Sb_x/GaAs с составом $x \approx 0.15$ может образовываться гетеропереход 2-го рода. δ -слой углерода в структурах формировался как дополнительный источник носителей заряда — дырок.

Аналогичным образом были получены контрольные гетеронаноструктуры: структура без марганца, но с δ -слоем углерода; структура без углерода и марганца, содержащая только квантовую яму GaAsSb. Основные технологические параметры формирования структур представлены в таблице.

Кристаллическое качество структур изучалось с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-4, функционирующего по двухкристальной схеме с монокроматором Ge(400). На структурах осуществлялось профилирование элементного состава методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на установке TOFSIMS-5 (производитель IONTOF, Германия). Пოსлойный анализ проводился с использованием распыляющих пучков ионов O₂ или Cs и анализирующего пучка ионов Вi. Глубина и размеры кратеров травления измерялись с помощью интерференционного микроскопа Talysurf CCI 2000 [7]. Светоизлучающие характеристики исследовались посредством спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) при 77 и 300 К. Для возбуждения излучения использовался He–Ne-лазер (632.5 нм) мощностью 30 мВт. Гальваномагнитные свойства структур изучались с использованием автоматизированной установки, включающей в себя гелиевый криостат замкнутого цикла Janis CCS-300S/202 (температурный диапазон измерений от 10 до 300 К), электромагнит с блоком питания (величина магнитного поля варьировалась в пре-

делах ± 3800 Э), датчик Холла, измеритель KEITHLEY 2400 и персональный компьютер.

3. Экспериментальные результаты

Рентгенодифракционный анализ показал, что понижение температуры T_g в процессе осаждения покровного слоя GaAs и введение δ -слоя марганца не привели к ухудшению кристаллического качества структуры в целом, о чем свидетельствует наличие интерференции между покровным слоем GaAs и подложкой. Были выполнены расчеты подгоночных спектров рентгеновской дифракции, достаточно хорошо совпадающих с экспериментальными данными. Установлено, что такие подгоночные параметры, как содержание сурьмы в квантовой яме и толщина покровного слоя GaAs, практически совпадают с оценкой их значений по технологическим условиям роста (см. выше).

Фотолюминесцентные характеристики гетеронаноструктур подтверждают эти данные (рис. 1). Кроме того, наблюдается возрастание интенсивности излучения пика фотолюминесценции, соответствующего квантовой

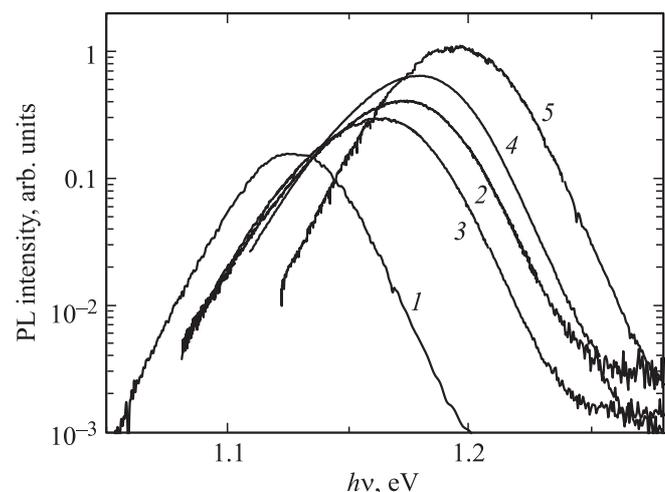


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции (77 К) структур: 1 — одиночная квантовая яма GaAsSb; 2 — структура с квантовой ямой GaAsSb и δ -слоем С. Структуры GaAsSb/GaAs с δ -слоем С и различным содержанием примеси Mn в δ -слое, МС: 3 — 0.15, 4 — 0.3, 5 — 0.7.

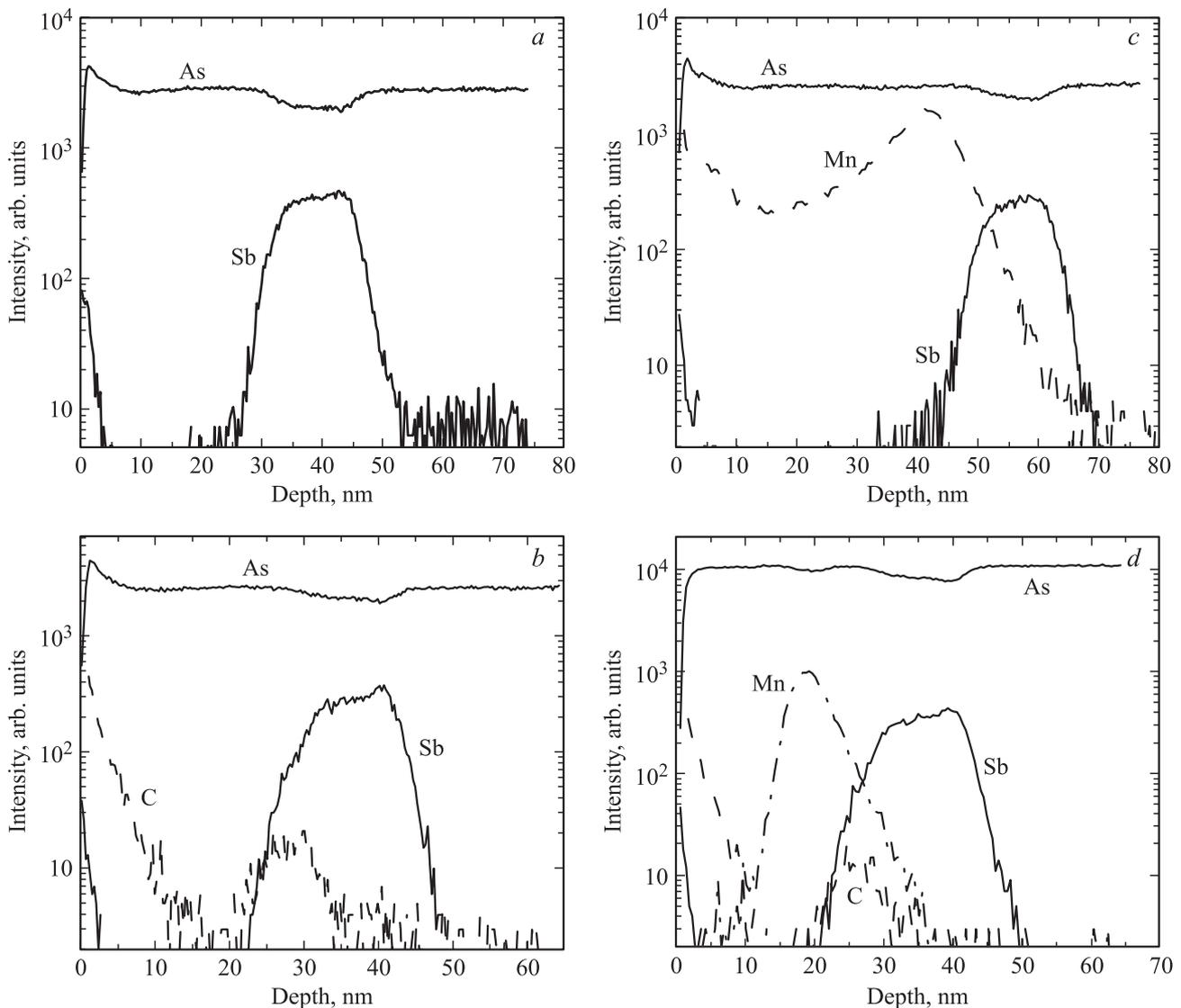


Рис. 2. ВИМС профили основных и примесных элементов: *a* — структура с одиночной квантовой ямой GaAsSb/GaAs; *b* — квантовая яма GaAsSb/GaAs и δ -слой C; *c* — квантовая яма GaAsSb/GaAs и δ -слой Mn (0.35 MC); *d* — квантовая яма GaAsSb/GaAs, δ -слой Mn (0.15 MC) и δ -слой C.

яме GaAsSb, и его смещение в область больших энергий при введении в структуру δ -слоев акцепторных примесей углерода и марганца. Причем легирование образцов только углеродом (спектр 2) приводит к увеличению полной ширины пика на полувысоте (FWHM) до 56 мэВ против 42 мэВ для нелегированной структуры (спектр 1), а при легировании марганцем происходит уменьшение FWHM до 40 мэВ с ростом содержания примеси в δ -слое от 0.15 до 0.7 MC (спектры 3, 4 и 5 на рис. 1).

Увеличение интенсивности фотолуминесцентного излучения квантовой ямы может быть связано с изменениями зонной структуры в приповерхностной области образцов, приводящими к увеличению барьера для дырок и электронов и, вследствие этого, возрастанию излучательной рекомбинации носителей в области квантовой

ямы GaAsSb. Уширение пика фотолуминесценции при δ -легировании углеродом вызвано влиянием углерода на распределение сурьмы в слое GaAsSb. Это видно из сравнения представленных на рис. 2 ВИМС-профилей распределения Sb, As и C для гетеронаноструктур без легирования (*a*) и с δ -слоем углерода (*b*).

Наблюдается изменение профиля квантовой ямы, проявляющееся в размытии гетерограницы GaAsSb/GaAs из-за сегрегации сурьмы, вызванной вытеснением атомов Sb атомами C, поскольку углерод, как и Sb замещает в GaAs элемент V группы — As. Кроме того, вследствие этого квантовая яма становится эффективно мельче, и поэтому в спектрах фотолуминесценции регистрируется сдвиг пика в область больших энергий.

Напротив, δ -легирование структур марганцем практически не оказывает влияния на профиль распределения

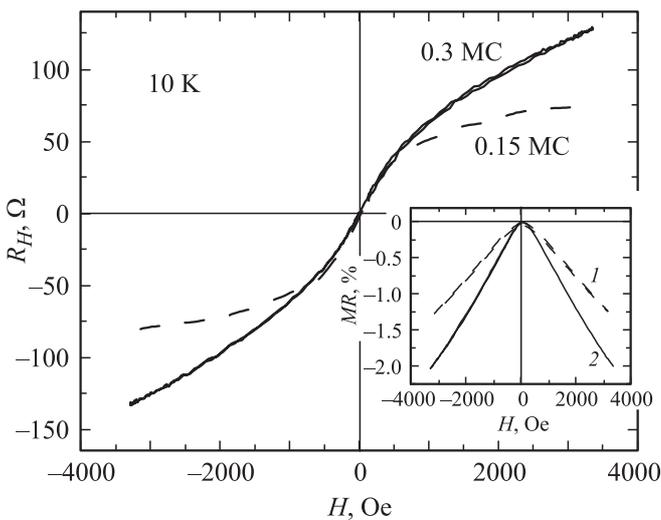


Рис. 3. Магнитополевые зависимости сопротивления Холла при температуре 10 К. На вставке приведено магнетосопротивление. Величина Q_{Mn} составляет, МС: 1 — 0.15, 2 — 0.3.

сурьмы в квантовой яме GaAsSb/GaAs (рис. 2, с). Вместе с тем видно, что примесь марганца проникает в квантовую яму, но при этом гашения фотолуминесцентного излучения от ямы, как это было в случае структур InGaAs/GaAs [8], не наблюдается. Этот факт требует дополнительного исследования и объяснения.

Особый интерес представляет случай совместного легирования структур углеродом и марганцем (рис. 2, д). Как видно из представленных ВИМС профилей, марганец в количестве 0.15 МС не оказывает значительного влияния на распределение примеси углерода. По-прежнему наблюдается значительное уширение квантовой ямы и сегрегация сурьмы. Вместе с тем интенсивность пика фотолуминесценции, отвечающего квантовой яме, немного снижается, а его полная ширина на полувысоте уменьшается до 52 мэВ. Последний факт может свидетельствовать о том, что марганец каким-то образом начинает участвовать в процессе сегрегации сурьмы и нейтрализовать влияние углерода.

Температурные зависимости слоевого сопротивления образцов имеют полупроводниковый характер: сопротивление увеличивается с понижением температуры. Все образцы имеют p -тип проводимости (см. таблицу), причем, как видно из представленных данных, при введении уже небольшого количества примеси марганца (0.15 МС) концентрация дырок возрастает значительным образом, а увеличение Q_{Mn} до 0.35 и 0.7 МС не приводит к дальнейшему росту концентрации p_s . Подобная тенденция в зависимости слоевой концентрации от содержания Mn наблюдалась ранее для одиночных δ -слоев марганца и может быть обусловлена процессами самокомпенсации и перехода части атомов марганца в электрически неактивное состояние [4].

В температурном диапазоне от 10 до 180 К были исследованы зависимости сопротивления Холла от при-

ложенного магнитного поля ($R_H(H)$) и магнетосопротивление структур. Все структуры, содержащие δ -слой Mn, демонстрировали нелинейные зависимости $R_H(H)$ при температурах ниже 20–25 К (рис. 3). Примерно в этом же температурном диапазоне регистрировалось отрицательное магнетосопротивление (MR). Обнаружено, что величина MR зависела от содержания примеси марганца в δ -слое. Максимальная величина $MR = 12.5\%$ наблюдалась в магнитном поле 3800 Э при 10 К для структуры с $Q_{Mn} = 0.35$ МС, не содержащей δ -слоя углерода. С уменьшением количества примеси марганца наблюдалось уменьшение величины MR по модулю (см. вставку на рис. 3).

4. Заключение

Таким образом, установлено, что структуры, содержащие квантовую яму GaAsSb/GaAs и δ -слой Mn, имеют хорошее кристаллическое качество. Это подтверждается рентгенодифракционным анализом и фотолуминесцентными исследованиями. При температурах ниже 20–25 К образцы обладают ферромагнитными свойствами, что проявляется в наличии отрицательного магнетосопротивления и нелинейном характере зависимости сопротивления Холла от магнитного поля.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-02-00645а) и Министерства образования и науки России (ГК 16.552.11.7007).

Список литературы

- [1] M. Nazmul, T. Amemiya, Y. Shyto. Phys. Rev. Lett., **95**, 017 201 (2005).
- [2] A.M. Nazmul, S. Sugahara, M. Tanaka. J. Cryst. Growth, **251**, 303 (2003).
- [3] Б.А. Аронзон, А.С. Лагутин, В.В. Рыльков, В.В. Тугушев, В.Н. Меньшов, А.В. Лейскул, Р. Лайхо, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков. Письма ЖЭТФ, **87** (3), 192 (2008).
- [4] О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, И.Л. Калентьева, А.В. Кудрин. Письма ЖТФ, **35** (14), 8 (2009).
- [5] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, П.Б. Дёмина, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, В.В. Подольский, М.В. Сапожников. Опт. журнал, **75** (6), 56 (2008).
- [6] S.P. Bremner, K. Ghosh, L. Nataraj, S.G. Cloutier, C.V. Honsberg. Thin Sol. Films. **519**, 64 (2010).
- [7] R.T. Blunt. CS MANTECH Conf. (Vancouver, British Columbia, Canada, 2006) p. 59.
- [8] О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.Н. Дроздов, Б.Н. Звонков, И.Л. Калентьева. Тр. XV Междунар. симп. „Нанофизика и нанoeлектроника“ (Н. Новгород, 2011) т. 2, с. 424.

Редактор Т.А. Полянская

Fabrication and properties of the GaAsSb/GaAs heterostructures, doped with magnetic impurity

*B.N. Zvonkov, O.V. Vikhrova, Yu.A. Danilov,
Yu.N. Drozdov*, M.N. Drozdov*, I.L. Kalenteva,
A.V. Kudrin*

Physicotechnical Research Institute,
Nizhny Novgorod State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

* Institute for Physics of Microstructures
of Russian Academy of Sciences,
603950, GSP-105 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract For the first time the structures containing quantum well GaAsSb/GaAs and delta-layers of manganese and carbon in the cap layer of GaAs were grown and studied. These heteronanostructures have good crystal quality, as evidenced by X-ray diffraction analysis and photoluminescence studies. At temperatures below 20–25 K the structures have the ferromagnetic properties, that were demonstrated by the Hall resistance nonlinear dependences on magnetic field and the negative magnetoresistance. Profiling of elemental composition by secondary ion mass spectrometry revealed the different effect of carbon and manganese δ -doping of the cap GaAs layer on the GaAsSb quantum well profile: the introduction of carbon leads to a broadening of the hetero-junction GaAsSb/GaAs due to the segregation of antimony and manganese doping has almost no effect on the profile of the distribution of antimony in the quantum well.