

Структурные и оптические свойства гетероструктур с квантовыми ямами GaAsSb, выращенных методом лазерного осаждения

© Б.Н. Звонков*, О.В. Вихрова*[†], М.В. Дорохин*⁺, И.Л. Калентьева*⁺,
С.В. Морозов*[•], Д.И. Крыжков*[•], П.А. Юнин*[•]

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

⁺ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

[•] Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 23 мая 2014 г. Принята к печати 15 июня 2014 г.)

Впервые экспериментально показана возможность применения метода лазерного осаждения для выращивания кристаллических, излучающих структур с квантовыми ямами GaAsSb/GaAs. Температура выращивания слоев GaAs_{1-x}Sb_x варьировалась в пределах 450–550°C, содержание сурьмы, согласно рентгеноструктурным исследованиям, достигало $x_{\text{Sb}} \approx 0.37$ для температуры выращивания 450°C. При этом низкотемпературные измерения спектроскопии фотолюминесценции (4 К) показали наличие пика от квантовой ямы GaAsSb/GaAs в области 1.3 мкм при минимальном уровне накачки лазерным излучением.

Определены оптимальные значения температуры выращивания $T_g = 500^\circ\text{C}$ и скорости потока арсина $P_A = 2.2 \times 10^{-8}$ моль/с для наблюдения наилучших излучательных свойств квантовых ям с $x_{\text{Sb}} \sim 0.17-0.25$ при температурах 77 и 300 К. Показано сопоставимое оптическое качество квантовых ям GaAsSb/GaAs с аналогичными параметрами (ширина и состав), выращенных методом лазерного осаждения при 500°C и МОС-гидридной эпитаксией при 580°C.

1. Введение

Получение структур с квантовыми ямами GaAsSb/GaAs реализуется, как правило, двумя методами: молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ) и МОС-гидридной эпитаксией (МОСГЭ) [1,2]. Основными проблемами остаются недостаточно высокое кристаллическое и оптическое качество структур, связанное с трудностью достижения оптимальных условий роста, позволяющих сочетать высокий процент вхождения сурьмы, подавление процессов сегрегации, бездефектность и однородность слоев. В связи со сказанным является актуальным поиск новых методов выращивания гетероструктур с квантовыми ямами GaAsSb. В данной работе исследуется возможность получения напряженных наноразмерных слоев GaAsSb методом лазерного осаждения.

2. Методика эксперимента

Процесс формирования структур включал в себя два этапа. Вначале методом МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) при атмосферном давлении выращивался высокотемпературный (600°C) буферный слой GaAs. Затем температура подложки понижалась до 450–550°C и при пониженном давлении в потоке водорода и арсина посредством поочередного распыления импульсным лазером мишеней GaAs и GaSb осаждался напряженный слой GaAsSb нанометровой толщины. Для формирования покровного слоя GaAs также использовался метод лазерного осаждения. Температура при выращивании

слоя GaAsSb и покровного слоя GaAs была одинаковой. В качестве подложек использовались пластины полуизолирующего GaAs (001). Контрольные образцы, с подобными параметрами квантовых ям (содержание сурьмы и ширина квантовой ямы), были изготовлены методом МОСГЭ при температуре 580°C.

Кристаллическое качество структур, содержание сурьмы, ширина квантовой ямы и толщина покровного слоя GaAs контролировались методом рентгеновской дифракции с применением дифрактометра Bruker D8 Discover (оборудование ЦКП ИФМ РАН). Излучательные характеристики при 77 К исследовались спектроскопией фотолюминесценции с помощью He–Ne-лазера мощностью 30 мВт. Температурные зависимости интенсивности фотолюминесцентного излучения квантовых ям в диапазоне температур от 10 до 300 К изучались с применением гелиевого криостата замкнутого цикла (Janis CCS-300S/202) и He–Ne-лазера мощностью 16 мВт. При температуре измерений 4 К для возбуждения фотолюминесценции в непрерывном режиме использовался лазер с длиной волны 700 нм. Плотность мощности при измерениях варьировалась от 1.5 до 250 Вт/см². Спектры фотолюминесценции при 4 К анализировались с использованием решеточного монохроматора TriVista Acton Research, а в качестве приемника использовался Ge-детектор, охлаждаемый жидким азотом.

3. Результаты и обсуждение

В процессе исследований основное внимание было уделено влиянию на кристаллическое качество и оптические свойства структур следующих технологических

[†] E-mail: vikhrova@nifti.unn.ru

Параметры квантовых ям, рассчитанные по спектрам рентгеновской дифракции в зависимости от технологических условий лазерного осаждения и для контрольного образца, выращенного методом МОСГЭ

№	$T_g, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{GaSb}}/t_{\text{GaAs}}$	$P_A, \text{моль/с}$	x_{Sb}	$h_{\text{QW}}, \text{НМ}$	$d_c, \text{НМ}$
A1	500	1	$2.2 \cdot 10^{-8}$	0.17	7.5	46
A2	500	1	$0.5 \cdot 10^{-8}$	0.24	6	35
A3	450	2	$1.5 \cdot 10^{-8}$	0.37	5	34
A4	500	2	$1.5 \cdot 10^{-8}$	0.21	5	25
A5	550	2	$1.5 \cdot 10^{-8}$	0.23	3.5	26
B0	580	МОСГЭ		0.17–0.18	8	157

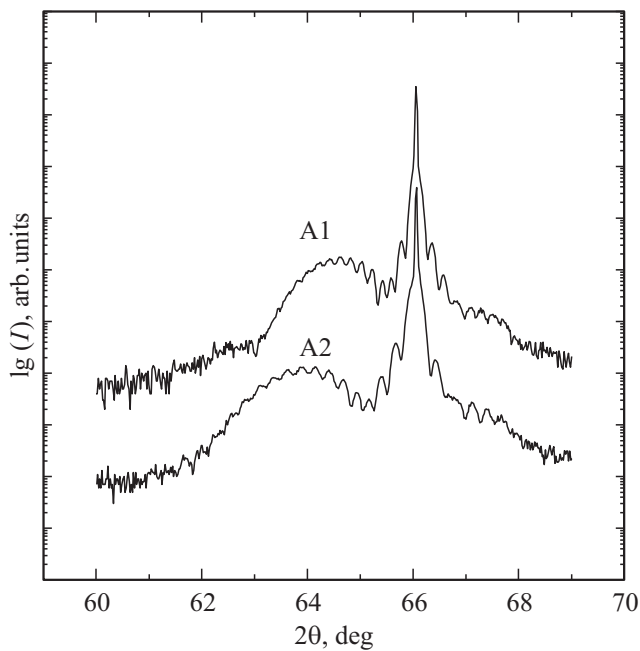


Рис. 1. Спектры рентгеновской дифракции структур A1 и A2 (см. таблицу), выращенных при температуре 500°C и различной скорости потока арсина при формировании слоя GaAsSb.

параметров процесса лазерного осаждения: температуры выращивания (T_g), скорости потока арсина при формировании слоя GaAsSb (P_A) и соотношения времен распыления мишеней GaSb и GaAs ($t_{\text{GaSb}}/t_{\text{GaAs}}$).

Рентгено-дифракционные исследования показали, что структуры имеют достаточно высокое кристаллическое качество. В спектрах рентгеновской дифракции ($\theta/2\theta$ -сканирование) для всех образцов наблюдается интерференция верхних слоев GaAs с подложкой, что свидетельствует о достаточно высоком эпитаксиальном качестве слоя GaAsSb и резкости гетерограниц с GaAs (рис. 1). Подгонка расчетных спектров к экспериментальным кривым в программном комплексе Diffrac Leptos 7 [3] позволяет вычислить параметры структур: ширину квантовой ямы h_{QW} , содержание сурьмы в материале квантовой ямы x_{Sb} и толщину покровного слоя GaAs d_c . Результаты расчетов для исследованных структур представлены в таблице. Эти данные позволили определить среднюю скорость роста покровного

слоя GaAs и квантовой ямы GaAsSb при лазерном осаждении ~ 0.3 и $\sim 0.4 \text{ \AA/с}$ соответственно. Из представленных в таблице данных видно, что содержание сурьмы в квантовой яме зависит от температуры выращивания, скорости потока арсина и соотношения времен распыления мишеней GaAs и GaSb. Согласно проведенной подгонке спектров рентгеновской дифракции, количество сурьмы в квантовых ямах исследуемых структур варьируется от 0.17 до 0.37. Кроме того, исследовался спектр рентгеновской дифракции контрольного, выращенного методом МОСГЭ при 580°C образца (B0 в таблице) с параметрами квантовой ямы, подобными образцу A1, изготовленному методом лазерного осаждения. Анализ структуры выявил удовлетворительное

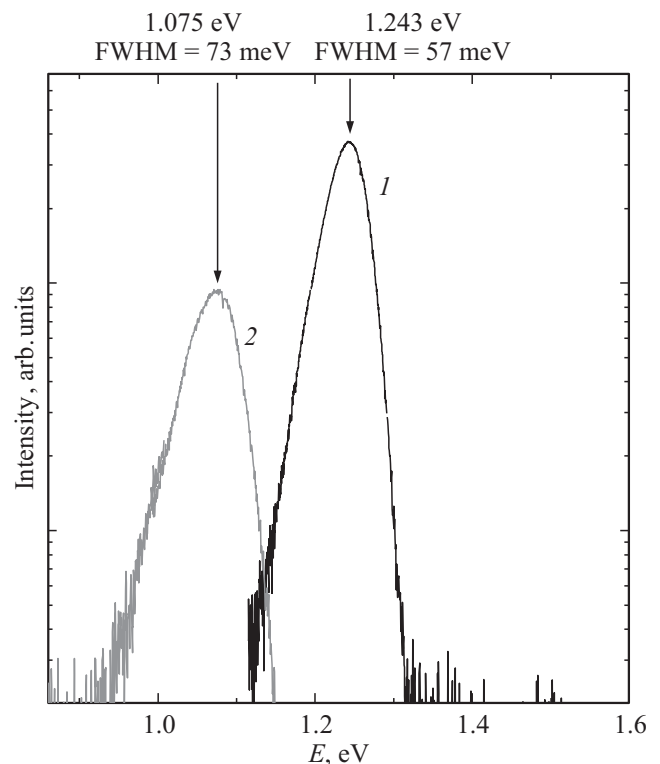


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции (77 K) структур A1 и A2 (см. таблицу), выращенных при температуре 500°C и различной скорости потока арсина при формировании слоя GaAsSb. Спектр 1 соответствует структуре A1 в таблице; спектр 2 соответствует структуре A2 в таблице.

совпадение расчетных параметров квантовой ямы с ростовыми параметрами только в условиях моделирования квантовой ямы переменного состава, т.е. если полагать, что содержание сурьмы в слое GaAsSb увеличивается от 0.07 со стороны буферного слоя GaAs до 0.18 в области покрывного слоя GaAs.

В процессе изучения полученных гетеронаноструктур спектроскопией фотолюминесценции были определены оптимальные значения $T_g = 500^\circ\text{C}$ и $P_A = 2.2 \cdot 10^{-8}$ моль/с с точки зрения наблюдения наилучших излучательных свойств квантовых ям с $x_{\text{Sb}} \sim 0.17-0.25$ при температурах 77 и 300 К. Уменьшение скорости потока арсина примерно в 4 раза в процессе лазерного распыления мишеней GaAs и GaSb приводит к увеличению содержания сурьмы в растущем слое GaAsSb в 1.5 раза (образцы A1 и A2). При этом наблюдается значительное смещение пика фотолюминесцентного излучения соответствующей квантовой ямы в область длинных волн, снижение его интенсивности и увеличение ширины пика на полувысоте (FWHM) (рис. 2). Эти изменения спектральных характеристик свидетельствуют о более неоднородном распределении сурьмы и образовании центров безызлучательной рекомбинации. К аналогичным изменениям излучательных характеристик приводило уменьшение температуры выращивания структур.

При температуре роста 450°C одновременно со сдвигом линии фотолюминесценции от квантовой ямы GaAsSb/GaAs в длинноволновую область (вплоть до 1.4 мкм при 300 К), связанным с увеличением доли встраиваемой сурьмы ($x_{\text{Sb}} \approx 0.37$), наблюдается существенное уменьшение сигнала фотолюминесценции,

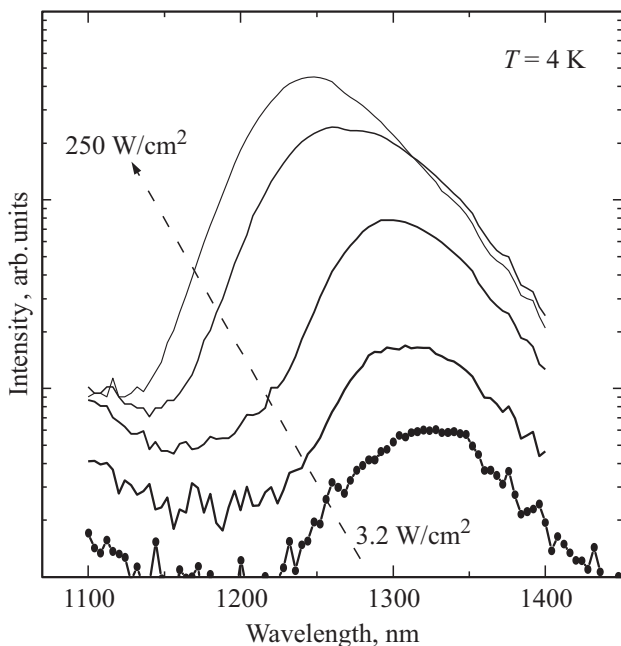


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции (4 К) структуры A3 (см. таблицу), выращенной при температуре 450°C . Спектры снимались при различной мощности возбуждающего лазерного излучения. Плотность мощности изменялась в пределах от 3.2 до 250 Вт/см².

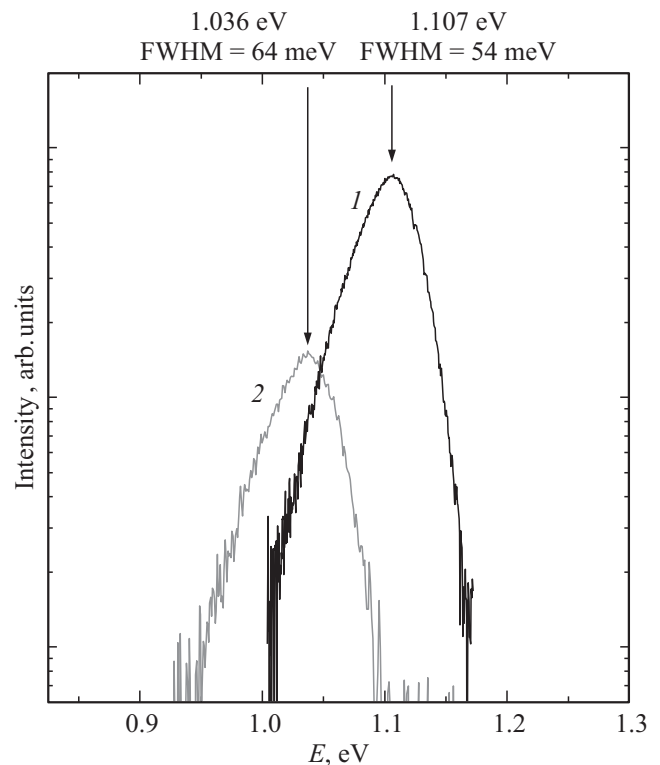


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции (77 К) структур A4 и A5 (см. таблицу), выращенных при одинаковой скорости потока арсина и различных температурах формирования слоя GaAsSb, 500 и 550°C соответственно. Спектр 1 соответствует структуре A5 в таблице; спектр 2 соответствует структуре A4 в таблице.

свидетельствующее о понижении оптического качества структуры за счет увеличения каналов рекомбинации с участием дефектов. Как видно из рис. 3, исследование оптических свойств образца A3 при низких температурах (4 К) выявило наличие синего сдвига в зависимости от мощности накачки возбуждающим лазерным излучением, обусловленного изгибом зон вблизи границы раздела квантовая яма/барьер в гетероструктурах II типа с ростом концентрации электронов [4].

Повышение T_g до 550°C способствует существенно смещению (~ 70 мэВ) положения пика фотолюминесценции квантовой ямы в коротковолновую область (рис. 4). Причем, с учетом представленных в таблице расчетных данных, можно полагать, что смещение в область больших энергий происходит главным образом из-за эффективного уменьшения ширины квантовой ямы. Подобное „уменьшение“ расчетного значения h_{QW} может быть обусловлено снижением количества встраиваемой сурьмы с повышением температуры роста и усилением процессов диффузии сурьмы в барьеры GaAs. При этом ширина пика уменьшается, и интенсивность излучения возрастает на порядок величины вследствие снижения числа точечных дефектов в полученном лазерным осаждением слое GaAsSb благодаря существенному повышению температуры процесса.

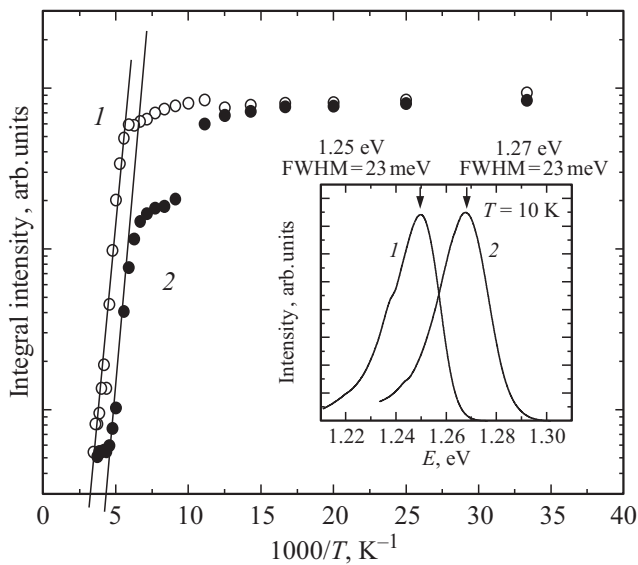


Рис. 5. Температурные зависимости интегральной интенсивности фотолюминесценции структур, выращенных МОСГЭ при 580°C (зависимость 1) и методом лазерного осаждения при 500°C (структура А1, зависимость 2). На вставке представлены соответствующие спектры фотолюминесценции при температуре измерений 10 К.

Исследовались температурные зависимости излучательных (фотолюминесценция) характеристик квантовых ям GaAsSb/GaAs с аналогичными параметрами (ширина и состав), выращенных методом лазерного осаждения при 500°C и МОС-гидридной эпитаксией при 580°C. Результаты исследований образцов А1 и В0 (см. таблицу) представлены на рис. 5 и вставке к нему. Видно, что интенсивность фотолюминесценции и ширина пиков на полувысоте для обоих образцов практически совпадают при температуре измерений 10 К. Вместе с тем в спектре фотолюминесценции структуры В0, изготовленной методом МОСГЭ, наблюдается интенсивное плечо в области меньших энергий. Появление данной особенности для высокотемпературного образца можно связать с флуктуациями потенциала внутри квантовой ямы [4]. Очевидно, что неоднородное расположение сурьмы в слое квантовой ямы, определенное из моделирования рентгеновских спектров для данного образца (см. таблицу), будет значительным образом влиять на распределение этого потенциала.

Температурные зависимости интегральной интенсивности фотолюминесцентного излучения исследуемых структур совпадают в диапазоне от 10 до 70 К (рис. 5). Зависимости Аррениуса при высоких температурах (> 100 К) также выглядят подобными, а энергия активации составляет порядка 20 мэВ. Вместе с тем для структуры с квантовой ямой GaAsSb, выращенной методом лазерного осаждения при 500°C, наблюдается двухступенчатый участок зависимости в области температур от 70 до ~ 100 К.

Подобные двухступенчатые температурные зависимости интегральной интенсивности наблюдали в работе [5]

для структур с квантовыми точками InAs/GaAs после облучения их протонами с дозой $\sim 10^{12}$ p/cm⁻². Такое воздействие приводит к созданию точечных дефектов в структурах. По-видимому, уместно и в нашем случае предположить, что, поскольку полученные лазерным осаждением слои GaAsSb могут содержать большее количество дефектов по сравнению со слоями, полученными методом МОСГЭ, этот факт влияет на процессы температурного гашения фотолюминесценции квантовой ямы.

4. Заключение

Таким образом, представленные в данной работе результаты продемонстрировали возможность посредством лазерного осаждения получать при пониженной температуре кристаллические наноразмерные слои GaAsSb с содержанием сурьмы до 0.37. Наблюдение удовлетворительных оптических свойств в сочетании с возможностью введения высокого содержания сурьмы позволяет предположить, что данный метод позволяет реализовать более однородное распределение сурьмы в квантовых ямах и уменьшить процессы сегрегации.

Сравнительный анализ температурных зависимостей фотолюминесцентного излучения квантовых ям GaAsSb/GaAs с аналогичными параметрами (ширина и состав), выращенных методом лазерного осаждения при 500°C и МОС-гидридной эпитаксией при 580°C, показал их сопоставимое оптическое качество.

Работа выполнялась в рамках проектной части государственного задания (№ 8.1054.2014/К) Минобрнауки России, при финансовой поддержке грантов РФФИ (гранты 13-07-00982_a, 13-02-97062p_поволжье_a, 13-02-01314a) и РФ НШ-1214.2014.2. В работе было использовано оборудование „Центра коллективного пользования ИФМ РАН“ (ЦКП ИФМ РАН).

Список литературы

- [1] Ю.Г. Садофьев, N. Samal, Б.А. Андреев, В.И. Гавриленко, С.В. Морозов, А.Г. Спиваков, А.Н. Яблонский. ФТП, **44**, 422 (2010).
- [2] Y.K. Su, C.T. Wan, R.W. Chuang, C.Y. Huang, W.C. Chen, Y.S. Wang, H.C. Yu. J. Cryst. Growth, **310**, 4850 (2008).
- [3] *Diffrac. Leptos 7. User Manual* (Karlsruhe, Bruker AXS GmbH, 2009).
- [4] M. Dinu, J.E. Cunningham, F. Quochi, J. Shah. J. Appl. Phys., **94** (3), 1506 (2003).
- [5] A. Chahboun, M.I. Vasilevskiy, N.V. Baidus, A. Cavaco, N.A. Sobolev, M.C. Carmo, E. Alves, B.N. Zvonkov. J. Appl. Phys., **103**, 083 548 (2008).

Редактор А.Н. Смирнов

Structural and optical properties of heterostructures with GaAsSb quantum wells, grown by laser deposition

*B.N. Zvonkov**, *O.V. Vihrova**, *M.V. Dorohin*+*,
I.L. Kalenteva+*, *S.V. Morozov+•*, *D.I. Kryzhkov+•*,
P.A. Yunin•

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

+ Nizhny Novgorod State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

• Institute for Physics of Microstructures RAS,
GSP-105, Nizhny Novgorod,
603950 Russia

Abstract First experimentally it shown that the method of laser deposition may be use for growth of crystalline emitting quantum well structures GaAsSb/GaAs. Temperature of GaAs_{1-x}Sb_x layer growth varied of ranged 450–550°C, the antimony amount reached $x_{\text{Sb}} \approx 0.37$ of according to X-ray studies for the growth temperature of 450°C. At this low-temperature photoluminescence spectroscopy measurement (4 K) showed a peak of the quantum well GaAsSb/GaAs in the region of 1.3 microns at a minimum level of the pump laser radiation.

The optimal values of the growth temperature $T_g = 500^\circ\text{C}$ and a arsine flow rate $P_A = 2.2 \cdot 10^{-8}$ mol/c are defined for observation of best radiative properties of quantum wells with $x_{\text{Sb}} \sim 0.17$ –0.25 at 77 and 300 K. It is shown the comparable optical quality of the quantum wells GaAsSb/GaAs with the same parameters (width and composition), grown by laser deposition at 500°C and MOCVD at 580°C.