

Влияние температурной обработки на излучательные свойства гетероструктур с квантово-размерным слоем GaAsSb

© Н.В. Дикарева[†], О.В. Вихрова, Б.Н. Звонков, Н.В. Малехонова*, С.М. Некоркин, А.В. Пирогов*, Д.А. Павлов*

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

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

Методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении были изготовлены гетероструктуры, содержащие одиночные квантовые ямы GaAsSb/GaAs и двухслойные квантовые ямы GaAsSb/InGaAs. Температура выращивания квантово-размерных слоев составляла 560–570°C. Структурное совершенство образцов и качество гетерограниц квантовых ям исследовались методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии на поперечном срезе. Излучающие свойства гетероструктур изучались посредством фотолюминесценции. Структуры подвергались термическому воздействию, условия которого были выбраны в соответствии с температурой и временем выращивания верхнего ограничивающего слоя InGaP *p*-типа в процессе формирования лазерных структур GaAs/InGaP с активной областью, содержащей квантово-размерные слои GaAsSb. Обнаружено, что подобное температурное воздействие значительным образом может влиять на излучательные свойства активной области только в случае формирования двухслойной квантовой ямы GaAsSb/InGaAs.

1. Введение

В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям напряженных квантовых ям на основе твердого раствора GaAsSb. Прежде всего это гетероструктуры на основе арсенида галлия с одиночными квантовыми ямами GaAsSb и двухслойными квантовыми ямами GaAsSb/InGaAs. Эти системы перспективны в качестве активных сред для полупроводниковых лазеров спектрального диапазона 1.3 мкм [1,2].

При выращивании лазерных структур на системе материалов A^{III}B^V с активной областью, содержащей наноразмерные слои GaAsSb, необходимо учитывать, что верхний ограничивающий слой *p*-типа выращивается при температуре, значительно превышающей оптимальную температуру роста материала GaAsSb. Цель настоящей работы — исследование влияния подобного повышения температуры в ростовом процессе на излучательные свойства активной области с одиночной квантовой ямой GaAsSb и двухслойной квантовой ямой GaAsSb/InGaAs.

2. Методика эксперимента

Исследуемые гетероструктуры были выращены на подложках полуизолирующего GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) при атмосферном давлении. Структура 1 содержала буферный слой GaAs толщиной 0.2 мкм, двухслойную квантовую яму, состоящую из слоя GaAsSb ($x_{Sb} \sim 0.25$) толщиной 10 нм и слоя InGaAs ($x_{In} \sim 0.33$) толщиной 5 нм, и покровный слой

GaAs толщиной около 40 нм. Структура 2 включала в себя буферный слой GaAs толщиной 0.2 мкм, квантовую яму GaAsSb ($x_{Sb} \sim 0.25$) толщиной 10 нм и покровный слой GaAs толщиной 30 нм. Буферные слои в обоих случаях выращивались при температуре 620°C, слой квантовой ямы — при 560–570°C. Структуры подвергались термическому отжигу в потоке азота при 620°C в течение 25 мин. Температура и время отжига были выбраны в соответствии с условиями выращивания верхнего ограничивающего слоя InGaP *p*-типа в процессе формирования лазерных структур МОСГЭ. Спектры фотолюминесценции исследовались при 77 К с использованием He–Ne-лазера мощностью 30 мВт. Структурный анализ проводился на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100F (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 200 кэВ. Снимки поперечного среза исследуемых структур были получены в темнопольном режиме сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (СПЭМ), так как в данном режиме контраст изображений, называемый Z-контрастом, связан с распределением элементов, обладающих различными атомными номерами [3,4]. Количественный анализ элементного состава проводился методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (EDX) с использованием рентгеновского энергодисперсионного спектрометра X-Max Oxford-Instruments, встроенного в электронный микроскоп JEM-2100F. Диаметр электронного пучка при сканировании составлял 0.7 нм. Концентрационные профили распределения компонентов в поперечном срезе структур были построены по Z-контрасту на СПЭМ снимках, где процентное содержание индия и сурьмы масштабировалось по данным EDX анализа.

[†] E-mail: dikareva@nifti.unn.ru

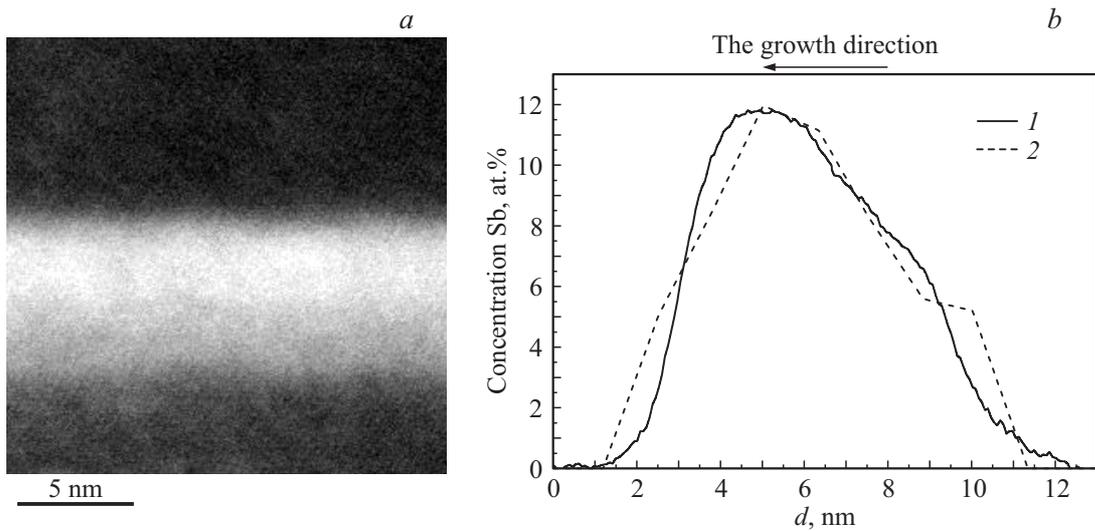


Рис. 1. *a* — СПЭМ снимок поперечного среза структуры с квантовой ямой GaAsSb. *b* — концентрационные профили распределения сурьмы в области квантовой ямы, полученные с применением рентгеновского энергодисперсионного анализа (2) и согласно расчетам по Z-контрасту (1).

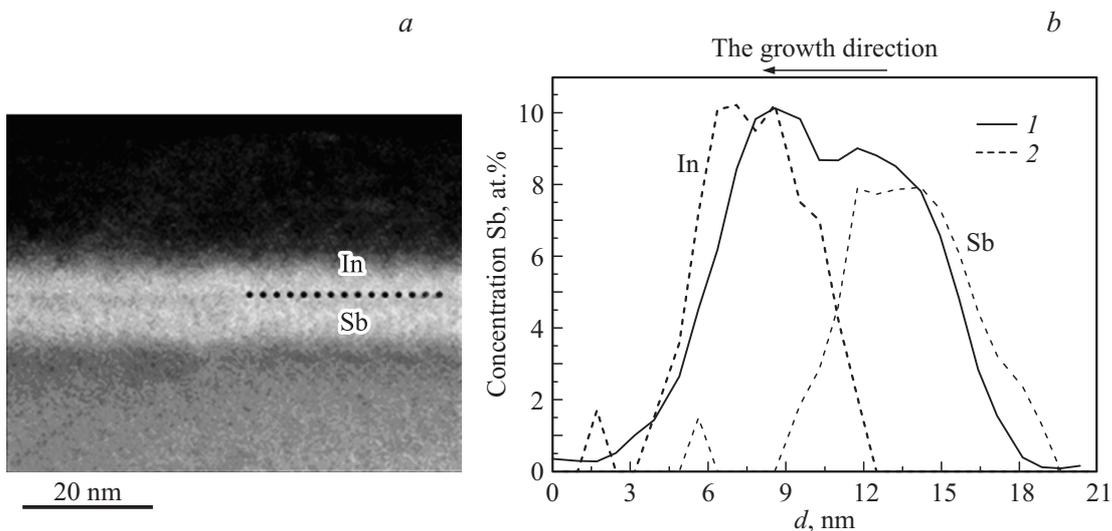


Рис. 2. *a* — СПЭМ снимок поперечного среза структуры с двухслойной квантовой ямой GaAsSb/InGaAs. *b* — концентрационные профили распределения сурьмы и индия в области квантовой ямы, полученные с применением рентгеновского энергодисперсионного анализа (2) и согласно расчетам по Z-контрасту (1).

3. Обсуждение результатов

СПЭМ снимки (рис. 1, *a* и 2, *a*) исходных структур содержат отчетливые изображения соответствующих квантовых ям. Из представленных данных видно, что толщина слоев GaAsSb и InGaAs составляет порядка 10 и 5 нм, что согласуется с ростовыми параметрами структур. Результаты энергодисперсионного анализа демонстрируют неоднородное распределение сурьмы в слое одиночной квантовой ямы GaAsSb (рис. 1, *b*). Более наглядно неоднородности распределения видны на профилях Z-контраста, обладающих лучшим пространственным разрешением, нежели EDX профили. Это связано с уширением профиля EDX анализа в зависимости от

диаметра электронного пучка, используемого при исследовании. Содержание сурьмы в атомных процентах вблизи границы квантовой ямы, ближайшей к поверхности, практически в 2 раза превышает аналогичный параметр на границе квантовой ямы, ближайшей к буферному слою GaAs. Такой характер распределения обусловлен значительными процессами сегрегации, которые, по-видимому, не удается подавить при температурах выращивания 560–570°C.

Подобным образом выглядит концентрационное распределение сурьмы и в случае двухслойной квантовой ямы (рис. 2, *b*). Кроме того, энергодисперсионный анализ выявил протяженную область (около 3–5 нм) перекрытия концентрационных профилей In и Sb в двух-

слоистой квантовой яме. Максимумы концентрационных профилей разнесены на расстояние порядка 10 нм. Это значение можно считать оценкой расстояния между потенциальной ямой для электронов в слое InGaAs и потенциальной ямой для дырок в слое GaAsSb. Концентрационный профиль, построенный по Z-контрасту СПЭМ снимков, не позволяет проиллюстрировать перекрытие распределения индия и сурьмы в квантовой яме. Вместе с тем он подтверждает положение максимумов концентрационных профилей In и Sb.

Результаты исследования излучательных свойств структур с двухслойной квантовой ямой InGaAs/GaAsSb и одиночной квантовой ямой GaAsSb представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Видно, что в спектре фотолюминесценции исходного образца с двухслойной квантовой ямой присутствует интенсивный пик *A* в области 1.227 эВ, обусловленный непрямыми в реальном пространстве переходами между зоной проводимости слоя InGaAs и валентной зоной слоя GaAsSb, и пик *B*, отвечающий основному прямому переходу в квантовой яме InGaAs (рис. 3). Температурная обработка структуры при температурах, больших температуры выращивания слоев, привела к низкоэнергетическому (красному) сдвигу пика *A* (30 мэВ), уменьшению его интенсивности и увеличению ширины на полувысоте. Положение пика *B* не изменилось, а интенсивность также понизилась.

Напротив, в случае структуры с одиночной квантовой ямой отжиг способствует небольшому увеличению интенсивности излучения и смещению спектра фотолюминесценции квантовой ямы на величину порядка 14 мэВ в область высоких энергий (синий сдвиг) (рис. 4).

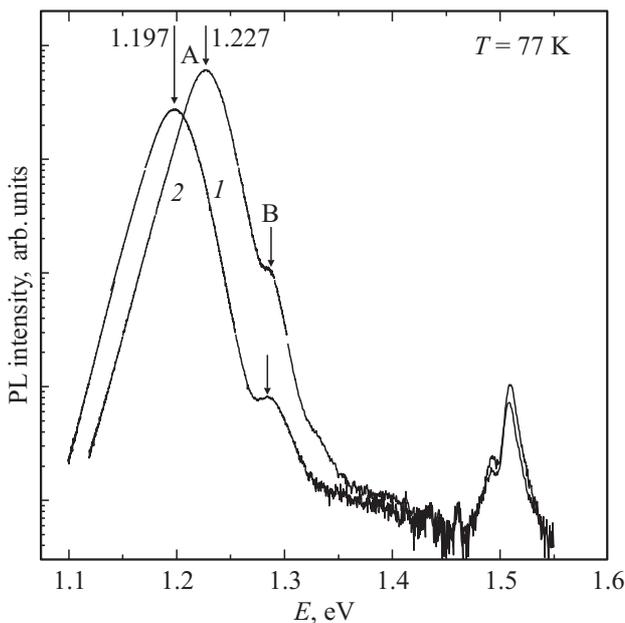


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции структуры с двухслойной квантовой ямой InGaAs/GaAsSb: 1 — спектр исходного образца; 2 — спектр образца, подвергнувшегося отжигу в потоке азота при 620°C в течение 25 мин.

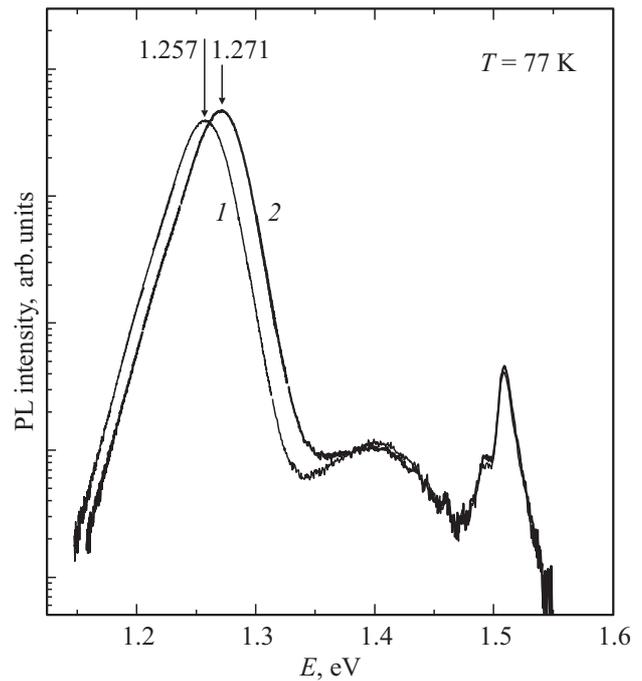


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции структуры с квантовой ямой GaAsSb: 1 — спектр исходного образца; 2 — спектр образца, подвергнувшегося отжигу в потоке азота при 620°C в течение 25 мин.

Эффекты влияния термического отжига на фотолюминесценцию, наблюдаемые для одиночной квантовой ямы GaAsSb, известны из литературы и их связывают с диффузионным перемешиванием на гетерогранице барьер/квантовая яма. В системе материалов GaAsSb/GaAs высокотемпературное воздействие приводит к проникновению сурьмы в барьеры GaAs, расплыванию границ квантовой ямы и эффективному уменьшению ее глубины [5,6]. Как следствие, увеличивается энергия основного перехода (наблюдается синий сдвиг в спектре фотолюминесценции) [6]. Аналогичным образом термический отжиг влияет и на фотолюминесцентные свойства одиночной квантовой ямы InGaAs/GaAs. В данном случае происходит взаимодиффузия In и Ga на границе раздела барьер/квантовая яма, причем в подрешетке элементов третьей группы этот процесс идет с участием вакансий галлия [7].

Отличающееся поведение излучательных характеристик двухслойной квантовой ямы в результате отжига может быть обусловлено тем, что, кроме процессов диффузионного перемешивания на границах раздела слоев InGaAs и GaAsSb с барьерами GaAs, происходит взаимная диффузия элементов в подрешетках элементов III и V групп в области металлургической границы раздела слоев InGaAs/GaAsSb. Учитывая результаты просвечивающей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа, можно предположить, что наблюдаемые эффекты термического отжига могут быть связаны с образованием области четвертого твердого

раствора InGaAsSb и соответствующими изменениями зонной структуры, приводящими в итоге к уменьшению энергии излучения двухслойной квантовой ямы.

4. Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что повышение температуры до 620°C при формировании верхнего ограничивающего *p*-InGaP слоя в процессе выращивания лазерной структуры GaAs/InGaP оказывает влияние на излучательные свойства активной области, содержащей квантовые ямы GaAsSb или GaAsSb/InGaAs, сформированные при температурах 560–570°C. Причем в случае активной области, содержащей одиночную квантовую яму GaAsSb, наблюдается увеличение интенсивности и энергии фотолуминесцентного излучения квантовой ямы, а в случае двухслойной квантовой ямой GaAsSb/InGaAs — значительное уменьшение этих параметров.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-02-31287 мол_а и 13-02-97062 р_поволжье_а) и фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (грант УМНИК 0001285).

Список литературы

- [1] K. Hild, S.J. Sweeney, S. Wright, D.A. Lock, S.R. Jin, I.P. Marko, S.R. Johnson, S.A. Chaparro, S.-Q. Yu, Y.-H. Zhang. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 173 509, (2006).
- [2] J.F. Klem, O. Blum, S.R. Kurtz, I.J. Fritz, K.D. Choquette. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **18** (3), 1605 (2000).
- [3] S.J. Pennycook, B. Rafferty, P.D. Nellist. *Microsc. Microanal.*, **6**, 343 (2000).
- [4] С.В. Хазанова, Н.В. Байдусь, Б.Н. Звонков, Н.В. Малехонова, Д.А. Павлов, А.И. Бобров, В.Е. Дегтярев, Д.С. Смотрин. *ФТП*, **46** (12), 1510 (2012).
- [5] O.M. Khreis, K.P. Homewood, W.P. Gillin, K.E. Singer. *J. Appl. Phys.*, **84**, 4017 (1998).
- [6] O.M. Khreis. *Sol. St. Commun.*, **132**, 767 (2004).
- [7] L. Fu, H.H. Tan, M.B. Johnston, M. Gal, C. Jagadish. *J. Appl. Phys.*, **85**, 6786 (1999).

Редактор А.Н. Смирнов

Annealing effect on emission properties of heterostructures with quantum-size GaAsSb layer

N.V. Dikareva, O.V. Vikhrova, B.N. Zvonkov, N.V. Malekhonova, S.M. Nekorkin, A.V. Pirogov*, D.A. Pavlov**

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

Abstract Heterostructures containing single GaAsSb/GaAs quantum wells and bilayer GaAsSb/InGaAs quantum wells were grown by MOCVD epitaxy at atmospheric pressure. Growth temperature of quantum-size layers was 560–570°C. The structural quality of the samples and perfection of quantum well interfaces were studied by cross-section high-resolution transmission electron microscopy. Emitting properties of heterostructures have been studied by photoluminescence spectroscopy. Structures were subjected to thermal annealing. The annealing conditions were selected according to the temperature and formation time of upper *p*-InGaP cladding layer in MOCVD growth process of GaAs/InGaP laser structures with an active region containing quantum-well layers of GaAsSb. It is found that such a thermal treatment can significantly influence on the emission properties of the active region only in the case of bilayer quantum well GaAsSb/InGaAs.