

## Стимулированное излучение из объемного метаморфного слоя GaAsSb на GaAs-подложке

© В.Я. Алешкин<sup>+</sup>, А.А. Дубинов<sup>+</sup>, К.Е. Кудрявцев<sup>+</sup>, П.А. Юнин<sup>+</sup>, М.Н. Дроздов<sup>+</sup>,  
О.В. Вихрова<sup>‡</sup>, С.М. Некоркин<sup>‡</sup>, Б.Н. Звонков<sup>‡</sup>

<sup>+</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>\*</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>‡</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: sanya@ipm.sci-nnov.ru

(Получена 27 октября 2015 г. Принята к печати 3 ноября 2015 г.)

Исследованы структурные и оптические свойства метаморфного объемного слоя GaAsSb, выращенного на GaAs-подложке. При достижении величины плотности мощности возбуждения (длина волны 0.65 мкм) 9 кВт/см<sup>2</sup> при температуре жидкого азота и 230 кВт/см<sup>2</sup> при комнатной температуре наблюдалась суперлюминесценция на длинах волн 0.943 и 0.992 мкм соответственно.

### 1. Введение

В настоящее время GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> рассматривается как перспективный материал для микроэлектронных и оптоэлектронных приложений. Сообщалось об использовании GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> в качестве материала активного слоя для полевых транзисторов [1], для транзисторов с высокой подвижностью электронов и сверхнизким уровнем шума [2] и для фотодетекторов ближнего инфракрасного диапазона длин волн [3]. GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> использовался в качестве волноводных слоев [4] и квантовой ямы для лазера на основе GaAs с длиной волны излучения 1.3 мкм [5]. Кроме того, GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> также может быть использован в качестве метаморфного буфера на GaAs или Ge/Si подложках, чтобы служить высококачественной „виртуальной“ подложкой для создания лазеров с длиной волны излучения 1.3–1.5 мкм. Было показано, что, в отличие от InGaAs метаморфного буфера, при росте GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> метаморфного буфера уменьшаются поверхностная шероховатость и число дефектов, что приводит, в частности, к росту плотности и однородности квантовых точек InAs, выращенных на таком буфере [6]. Отметим, что в большинстве исследований для роста GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> использовалась молекулярно пучковая эпитаксия.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении структуры на GaAs подложке с объемным метаморфным GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> слоем с целью оценки возможности создания на их основе лазеров, излучающих в области длин волн 1.3 и 1.5 мкм.

### 2. Изготовление и структурные исследования

На полуизолирующей подложке [001] GaAs был выращен метаморфный объемный GaAsSb слой (толщи-

ной 0.37 мкм), зарощенный тонким слоем GaAs. В качестве источника сурьмы использовался триметил сурьмы. Слой выращивался при температуре 600°C и был пролегирован кремнием. Концентрация носителей и подвижность по транспортным измерениям при комнатной температуре составили  $2.9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $1790 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  соответственно.

Методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре Bruker D8 Discover была исследована карта обратного пространства для отражения (224) подложки GaAs (рис. 1). На карте отмечены дифракционные пики подложки и слоя. Видно, что пик слоя асимметричный и вытянут в вертикальном направлении, что свидетельствует о наличии градиента состава и напряжений. Для наиболее интенсивного участка пика определены параметры твердого раствора GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>: состав  $x = 0.1$ , степень релаксации, рассчитанная для определенности относительно подложки,  $R = 0.48$ . Исследования морфологии поверхности образца с помощью интерференционного микроскопа белого света Talysurf CCI 2000 показали, что величина среднеквадратической шероховатости составляет 5 нм. Градиент состава подтверждается и при измерении профиля распределения атомов Sb и As по толщине структуры с помощью метода вторичной ионной масс-спектрометрии на установке TOFSIMS-5 (рис. 2). Из рис. 2 видно, что Sb сегрегировала к поверхности образца. Сопоставляя данные о распределении концентрации Sb по глубине с данными рентгенодифракционного анализа, можно сделать вывод, что практически полная пластическая релаксация в слое GaAsSb наступила уже в начале роста. На дальнейших стадиях роста концентрация Sb в слое увеличивалась (вплоть до  $x = 0.1$ ), а сам слой рос практически полностью упруго напряженным.

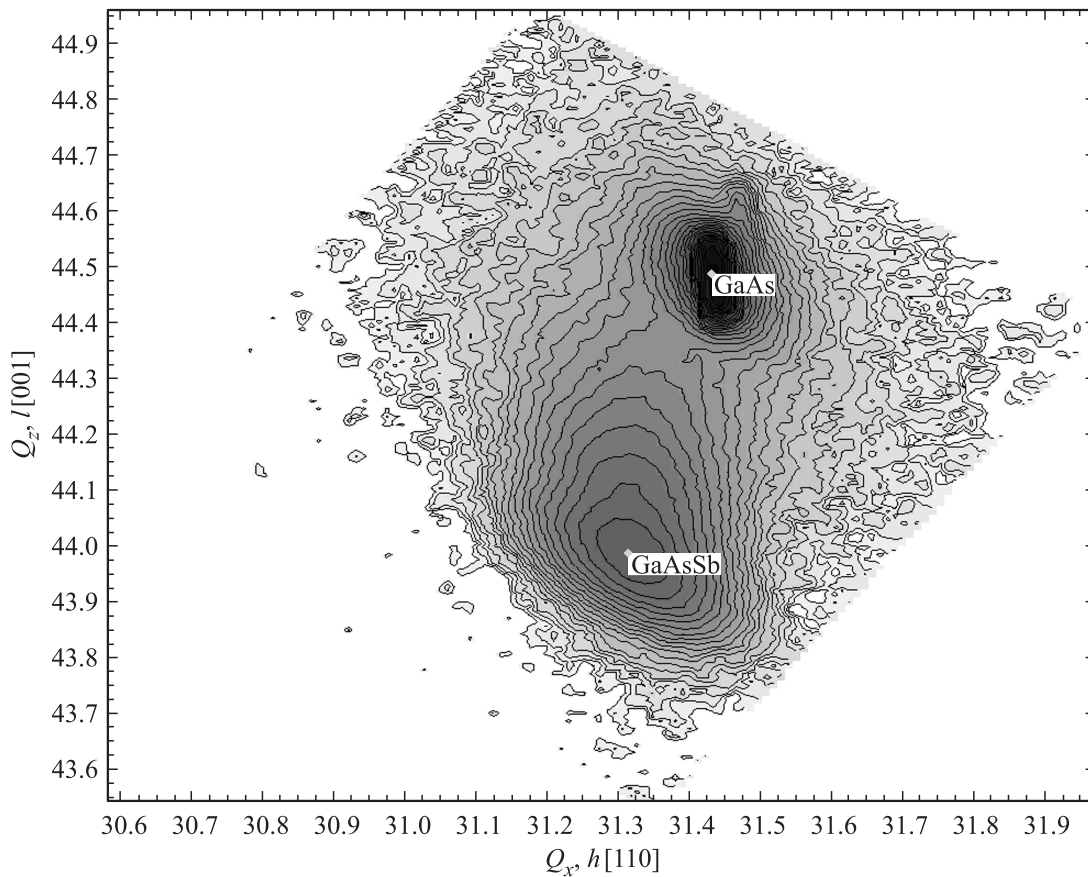


Рис. 1. Карта обратного пространства вблизи отражения (224) подложки GaAs. Размерность  $Q_x$  и  $Q_z$  —  $\text{нм}^{-1}$ .

### 3. Оптические исследования

Для возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) в качестве накачки использовалось излучение непрерывного Nd:YAG-лазера с удвоением частоты (длина волны 0.532 мкм), а также излучение импульсного парамет-

рического генератора света „Spectra-Physics“ MOPO-SL (длина волны излучения 0.65 мкм, длительность импульса  $\sim 10$  нс, частота повторения импульсов 10 Гц). В качестве приемников излучения из структур использовались диодная линейка на основе InGaAs (рабочий спектральный диапазон 0.62–2.2 мкм). Регистрация спектров пропускания осуществлялась с помощью фурье-спектрометра Bruker IFS125HR.

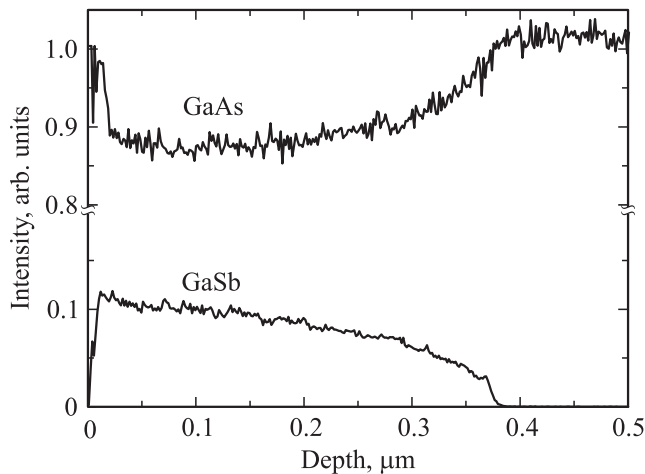


Рис. 2. Профиль распределения атомов As и Sb в структуре, полученный методом ВИС.

На рис. 3 представлены спектр пропускания (1) и спектры ФЛ (2, 3) исследуемого образца, измеренные при температуре жидкого азота. В спектре пропускания виден резкий край (b на рис. 3), соответствующий краю пропускания подложки GaAs. В то же время край пропускания слоя GaAsSb (a) нерезкий, что связано с неравномерностью распределения Sb в этом слое. В спектре ФЛ (кривая 2 на рис. 3) присутствуют два перекрывающихся пика. При этом более коротковолновый пик, наблюдаемый на длине волны 0.967 мкм (a), соответствует рекомбинации носителей со дна зоны проводимости узкозонной части слоя GaAsSb. Спектральное положение этого пика соответствует доле Sb в слое GaAsSb, равной 11% [7], что хорошо соотносится с данными рентгеноструктурных исследований. Более длинноволновый пик ( $\lambda \sim 0.998$  мкм, c) соответствует, вероятно, рекомбинации из примесной зоны акцепторов [8].

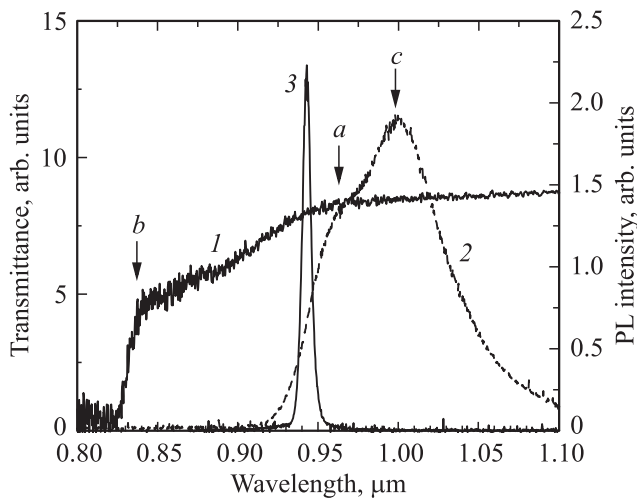


Рис. 3. Спектры пропускания (1), ФЛ (2) и СЛ (3) при температуре 77 К.

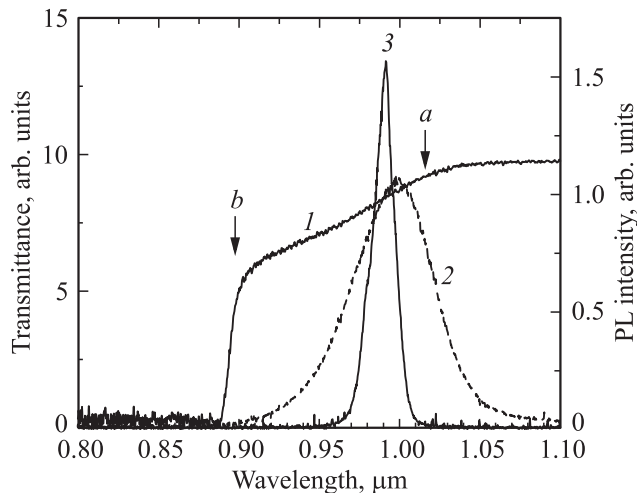


Рис. 4. Спектры пропускания (1), ФЛ (2) и СЛ (3) при температуре 300 К.

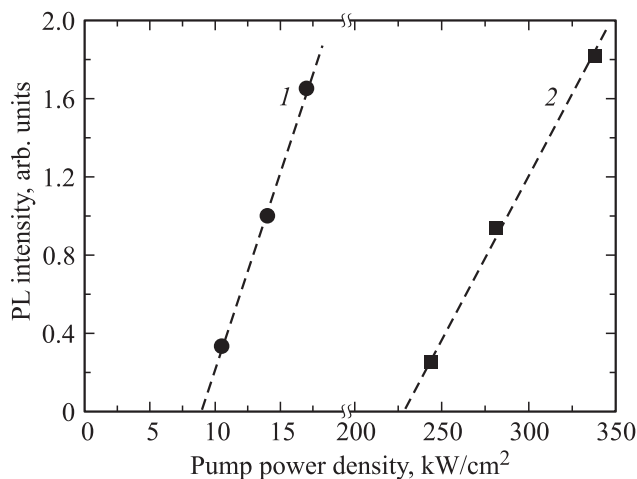


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения от плотности мощности накачки при температуре 77 (1) и 300 К (2).

Для исследования излучательных свойств выращенного образца в условиях интенсивной импульсной оптической накачки был сделан скол (110) грани структуры; при этом засвечивалась часть образца, расположенная вблизи скола, размером около 5 мм. При превышении порогового значения мощности возбуждения на коротковолновом крыле пика межзонной рекомбинации в GaAsSb (0.943 мкм) наблюдалось возникновение суперлюминесценции (СЛ). При этом имели место обужение спектра излучения с 40 до 6 нм и резкое увеличение интенсивности излучения. Возникновение стимулированного излучения объясняется тем, что слой GaAsSb образует потенциальную яму для носителей, поскольку при малых долях Sb гетеропереход GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/GaAs является гетеропереходом первого рода, и может служить волноводным слоем, так как показатель преломления GaAsSb выше, чем у GaAs [9].

Подобная картина наблюдается и при комнатной температуре (рис. 4). Сдвиг в область больших, относительно измерений при  $T = 77$  К, длин волн обусловлен уменьшением ширины запрещенных зоны GaAs и GaAsSb по мере увеличения температуры. В отличие от измерений при температуре жидкого азота, при комнатной температуре не наблюдается пик ФЛ, связанный с примесными переходами. При увеличении мощности накачки так же, как и при  $T = 77$  К, наблюдается возникновение СЛ на длине волны 0.992 мкм.

На рис. 5 приведены зависимости интенсивности СЛ от плотности мощности оптического возбуждения для двух температур наблюдения. Эти зависимости являются линейными и позволяют определить пороговую плотность мощности генерации стимулированного излучения на уровнях 9 кВт/см<sup>2</sup> при температуре жидкого азота и 230 кВт/см<sup>2</sup> при комнатной температуре. Столь высокие пороги генерации в данной структуре связаны, вероятно, со слабой локализацией волноводной моды (малым фактором оптического ограничения) и заметным количеством дефектов и прорастающих дислокаций в структуре, которые служат каналами безызлучательной рекомбинации. Кроме того, увеличение пороговой плотности мощности с ростом температуры может быть связано с малым разрывом энергий в зоне проводимости на гетерогранице GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/GaAs.

#### 4. Заключение

На подложке GaAs был выращен метаморфный объемный GaAsSb слой с долей Sb около 10% (по данным проведенного рентгеноструктурного анализа). При оптическом возбуждении выращенной структуры наблюдалась суперлюминесценция как при  $T = 77$  К, так и при  $T = 300$  К. Высокие пороги генерации стимулированного излучения обусловлены неоптимальной конструкцией волновода и заметным количеством дефектов. Отметим, что в дальнейшем использование InGaAs квантовых ям или точек в качестве активных областей в метаморфном

объемном GaAsSb слое должно привести к существенно меньшим порогам генерации.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 1 „Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий“, Министерства образования и науки (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ) и РФФИ (гранты № 16-02-00205, 16-02-00906).

## Список литературы

- [1] Y. Zhu, N. Jain, S. Vijayaraghavan, D.K. Mohata, S. Datta, D. Lubyshchev, J.M. Fastenau, W.K. Liu, N. Monsegue, M.K. Hudait. *J. Appl. Phys.*, **112**, 024306 (2012).
- [2] A. Bosacchi, S. Franchi, P. Allegri, V. Avanzini, A. Baraldi, R. Magnanini, M. Berti, D. De Salvador, S.K. Sinha. *J. Cryst. Growth*, **201-202**, 858 (1999).
- [3] S. Xiaoguang, W. Shuling, J.S. Hsu, R. Sidhu, X.G. Zheng, X. Li, J.C. Campbell, A.L. Holmes. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **8**, 817 (2002).
- [4] В.Я. Алешкин, А.А. Афоненко, Н.В. Дикарева, А.А. Дубинов, К.Е. Кудрявцев, С.В. Морозов, С.М. Некоркин. *ФТП*, **47** (11), 1486 (2013).
- [5] T. Anan, M. Yamada, K. Nishi, K. Kurihara, K. Tokutome, A. Kamei, S. Sugou. *Electron. Lett.*, **37**, 566 (2001).
- [6] H.Y. Liu, Y. Qiu, C.Y. Jin, T. Walther, A.G. Cullis. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 111906 (2008).
- [7] Ю.Ф. Бириулин, Р.Р. Ичкитидзе, В.К. Кригель, Ю.В. Шмарцев. *ФТП*, **13** (6), 1235 (1979).
- [8] G. Borghs, K. Bhattacharyya, K. Denette, P. Van Mieghem, R. Mertens. *J. Appl. Phys.*, **66**, 4381 (1989).
- [9] O. Madelung. *Semiconductors: Data Handbook* (Springer-Verlag, 2003).

Редактор Г.А. Оганесян

## Stimulated emission from a GaAsSb bulk metamorphic layer on GaAs substrate

V.Ya. Aleshkin<sup>+,\*</sup>, A.A. Dubinov<sup>+,\*</sup>,  
K.E. Kudryavtsev<sup>+,\*</sup>, P.A. Yunin<sup>+,\*</sup>, M.N. Drozdov<sup>+,\*</sup>,  
O.V. Vikhrova<sup>‡</sup>, S.M. Nekorkin<sup>‡</sup>, B.N. Zvonkov<sup>‡</sup>

<sup>+</sup> Institute for Physics of Microstructures  
of the Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>\*</sup> Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>‡</sup> Research Physical-Technical Institute  
of the Lobachevsky State University  
of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The structural and optical properties of a GaAsSb bulk metamorphic layer, grown on GaAs substrate, were investigated. Superluminescence (SL) was observed at wavelengths 0.943 and 0.992  $\mu\text{m}$  upon reaching the power density of excitation (wavelength 0.65  $\mu\text{m}$ ) 9 kW/cm<sup>2</sup> at the liquid nitrogen temperature, and 230 kW/cm<sup>2</sup> at room temperature, respectively.