

## Стимулированное излучение лазерных структур InGaAs/GaAs/AlGaAs, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на неотклоненной и отклоненной подложках Ge/Si(001)

© В.Я. Алешкин<sup>1,2</sup>, Н.В. Байдусь<sup>3</sup>, А.А. Дубинов<sup>1,2,¶</sup>, З.Ф. Красильник<sup>1,2</sup>, С.М. Некоркин<sup>1,3</sup>,  
А.В. Новиков<sup>1,2</sup>, А.В. Рыков<sup>3</sup>, Д.В. Юрасов<sup>1,2</sup>, А.Н. Яблонский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> Нижегородский научно-исследовательский институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

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

(Получена 16 ноября 2016 г. Принята к печати 21 ноября 2016 г.)

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений получены лазерные структуры GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами InGaAs на неотклоненной и отклоненной на  $4^\circ$  к оси [011] подложках Si(001) с релаксированным буфером Ge, излучающие в области прозрачности объемного кремния (длина волны больше 1100 нм при комнатной температуре). Пороговые плотности мощности наблюдения стимулированного излучения для структур, выращенных на неотклоненной и отклоненной подложках, составили 45 и 37 кВт/см<sup>2</sup> соответственно.

DOI: 10.21883/FTP.2017.05.44431.8449

Переход от медных проводов к оптическим межсоединениям в высокопроизводительных процессорах может быть осуществлен с использованием гибридных  $A^{III}B^V$ -гетеролазеров, совместимых с комплементарной металлооксидной полупроводниковой технологией (CMOS) на кремнии [1]. Значительный прогресс был достигнут в создании лазеров на Si-подложках с использованием гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами (КЯ) InGaAs [2–4], а также с квантовыми точками (КТ) InAs [5,6]. Практически во всех случаях рост лазерных структур  $A^{III}B^V$  был осуществлен на кремниевых подложках, отклоненных на несколько градусов от оси [001], чтобы избежать формирования антифазных дефектов на границе полярного и неполярного материалов [7]. В то же время существующие технологии изготовления кремниевых процессоров развиты для точно ориентированных подложек Si(001), с отклонением, не превышающим  $0.5^\circ$  [8].

Недавно был достигнут успех в создании лазера GaAs/AlGaAs с 3 КЯ InGaAs, выращенного методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) на неотклоненной подложке Si(001) с буферным слоем Ge [9]. Лазер излучает на длине волны 992 нм при комнатной температуре. Однако для использования  $A^{III}B^V$ -лазеров в кремниевых оптических межсоединениях необходимо, чтобы длина волны ( $\lambda$ ) излучения лазера попадала в область прозрачности объемного кремния ( $\lambda > 1100$  нм при комнатной температуре). Отметим, что достичь этого диапазона длин волн удалось в лазерной структуре с двойными квантовыми ямами

InGaAs/GaAsSb/GaAs, выращенной на отклоненной подложке Si(001) с использованием релаксированного буфера Ge, но только при температуре жидкого азота [10].

В связи с этим в настоящей работе созданы и исследованы лазерные структуры GaAs/AlGaAs с одиночными КЯ InGaAs с большим по сравнению со структурой, исследованной в работе [9], содержанием индия для увеличения длины волны излучения. Лазерные структуры выращивались методом МОГФЭ на подложках Si(001) с использованием релаксированного буферного слоя Ge. Для сравнения излучательных характеристик при оптической накачке лазерные структуры были выращены как на точно ориентированной (неотклоненной) подложке Si(001), так и на подложке, отклоненной на  $4^\circ$  от оси [001] к оси [011].

Неотклоненная и отклоненная на  $4^\circ$  к оси [011] виртуальные подложки Ge/Si(001) были выращены в сверхвысоковакуумной установке молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) Riber SIVA-21 по методике так называемого „двухстадийного“ роста [11–13]. Температура роста контролировалась с помощью откалиброванной термопары [14] и специализированного инфракрасного пирометра IMPAC IS 12. Осаждение Si и Ge осуществлялось путем электронно-лучевого испарения. Контроль состояния поверхности в процессе эпитаксии осуществлялся методом дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Морфология поверхности выращенных образцов исследовалась с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе NTEGRA Prima. Кристаллическое качество образцов исследовалось с помощью рентгено-

дифракционного анализа, а также с помощью метода селективного травления дефектов [15].

Суть метода двухстадийного роста заключается в следующем. На первом этапе осаждается относительно тонкий ( $\sim 50$  нм) слой Ge при пониженной температуре ( $275^\circ\text{C}$ ), чтобы исключить релаксацию упругих напряжений через образование трехмерных островков. При этом релаксация происходит путем образования большого числа дислокаций несоответствия и образуется относительно гладкий ( $\sim 1$  нм) слой с большой плотностью прорастающих дислокаций ( $> 10^{10}$  см $^{-2}$ ). На втором этапе температура роста повышается до  $600^\circ\text{C}$  и основная часть слоя Ge ( $\sim 1$  мкм в настоящей работе) выращивается при данной температуре, что способствует повышению кристаллического качества. Для снижения плотности прорастающих дислокаций после формирования структуры применялся циклический отжиг:  $\{850^\circ\text{C}/2$  мин,  $550^\circ\text{C}/2$  мин $\} \times 5$  повторений. Согласно результатам измерения с использованием метода АСМ в силу достаточно короткого времени выдержки при высокой температуре удается сохранить малую шероховатость поверхности после цикла отжига (среднеквадратичная шероховатость  $\text{RMS} < 1$  нм на площади скана  $30 \times 30$  мкм), при этом эффективно снижая плотность прорастающих дислокаций до значений  $\sim (1-2) \cdot 10^7$  см $^{-2}$  (по подсчету ямок травления). Сравнение образцов со слоями Ge одинаковой толщины, выращенных на отклоненных и неотклоненных подложках Si, не выявило существенных различий в значениях плотности прорастающих дислокаций. Кроме того, при выбранных условиях отжига (и толщине слоя Ge) процесс диффузии Si из подложки практически не затрагивает верхний, приповерхностный слой Ge, на котором впоследствии осуществляется рост слоев  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  [16]. Высокое качество получаемых виртуальных подложек Ge/Si также подтверждается данными рентгеновской дифракции, согласно которым слой Ge характеризуется малой шириной кривой качания ( $\sim 0.05^\circ$ ).

На отклоненной и неотклоненной подложках Ge/Si в установке МОГФЭ AIX 200RF при пониженном давлении (100 мбар) осуществлялся рост лазерных гетероструктур. В качестве источников основных элементов использовались триметилгаллий, триметилалюминий, триметилиндий и арсин. Перед началом роста проводился 5-минутный отжиг виртуальных подложек Ge/Si в потоке водорода и арсина при  $670^\circ\text{C}$ . При этой же температуре со скоростью 0.33 нм/с выращивался буферный слой, состоящий из слоев AlAs(10 нм)/GaAs(50 нм)/AlAs(10 нм). Отношение элементов V и III групп для этих слоев составляло 30. Предварительные исследования показали, что такие буферные слои обеспечивают зеркальную поверхность, а в сигнале фотолюминесценции — отсутствие линий, связанных с комплексами германия [17]. Это обеспечивается встраиванием тонкого слоя AlAs на границе раздела GaAs/Ge, благодаря чему уменьшается взаимодиффузия атомов из-за высокой энергии связи Al-As [18]. После

Параметры лазерных структур

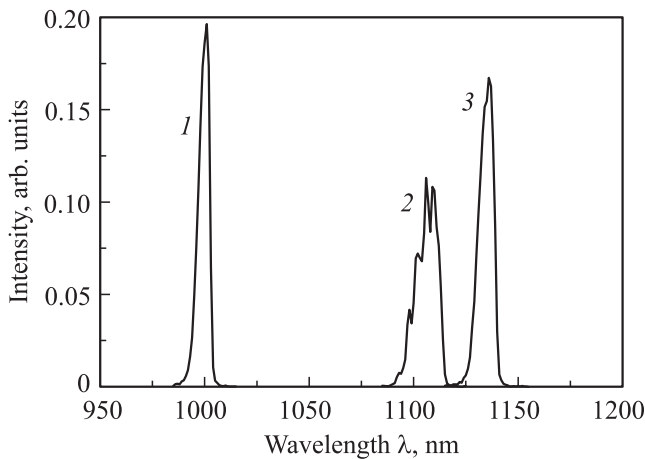
Номер слоя	Состав слоя	Толщина, нм
1	AlAs	10
2	GaAs	50
3	AlAs	10
4	GaAs	500
5	Градиент GaAs $\rightarrow$ Al $_{0.3}$ Ga $_{0.7}$ As	100
6	Al $_{0.3}$ Ga $_{0.7}$ As	1000
7	GaAs	250
8	In $_x$ Ga $_{1-x}$ As	10
9	GaAs	350
10	Al $_{0.3}$ Ga $_{0.7}$ As	20
11	Градиент Al $_{0.3}$ Ga $_{0.7}$ As $\rightarrow$ GaAs	10
12	GaAs	10

слоя GaAs толщиной 500 нм выращивался ограничивающий слой AlGaAs при температуре  $720^\circ\text{C}$ . Окружающие КЯ слои InGaAs выращивались при  $620^\circ\text{C}$ . Отношение элементов V и III групп составляло 80. У поверхности располагался тонкий (20 нм) слой AlGaAs для уменьшения влияния поверхностной рекомбинации, а также тонкий покровный слой GaAs для предотвращения окисления. Подробные параметры слоев лазерных структур приведены в таблице.

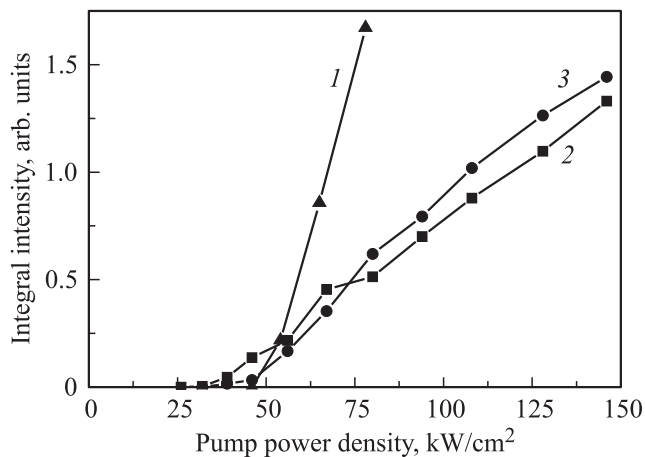
Оптические свойства выращенных структур исследовались на выколотых образцах шириной  $\sim 10$  мм. Возбуждение стимулированного излучения осуществлялось излучением параметрического генератора света „Spectra-Physics“ МОРО-SL (длина волны излучения 760 нм, длительность импульса 5 нс, частота повторения импульсов 10 Гц). Накачивалась полоска размерами  $10 \times 0.2$  мм. Для регистрации сигнала ФЛ использовался решеточный монохроматор Acton 2300i и многоканальный фотоприемник на основе линейки фотодиодов InGaAs (спектральный диапазон 600–2200 нм). Измерения проводились при комнатной температуре.

На рис. 1 представлены спектры стимулированного излучения трех лазерных структур. Из рисунка видно, что использование в структурах 2 и 3 КЯ с большим содержанием индия по сравнению со структурой 1 привело к существенному сдвигу линий излучения в длинноволновую область. Также видно, что, несмотря на одновременное выращивание частей  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  в структурах 2 и 3, положение линий стимулированного излучения в этих структурах существенно различается. Вероятно, различие связано с зависимостью встраивания In в КЯ InGaAs от ориентации подложки. Другой причиной может служить частичная релаксация напряжений в КЯ InGaAs в структуре, выращенной на неотклоненной подложке.

В структуре 2 длина волны стимулированного излучения составляет  $\sim 1110$  нм, в структуре 3 длина волны стимулированного излучения  $> 1130$  нм. Отметим, что и в том, и в другом случае длина волны излучения лежит в области прозрачности объемного кремния, вследствие



**Рис. 1.** Спектры стимулированного излучения лазерных структур: 1 — структура, использованная в работе [9] (доля In  $x \approx 0.17$ ), 2 — структура на отклоненной подложке Ge/Si ( $x \approx 0.33$ ), 3 — структура на неотклоненной подложке Ge/Si ( $x \approx 0.35$ ).



**Рис. 2.** Зависимости интегральной интенсивности стимулированного излучения лазерных структур: 1 — структура, исследованная в работе [9], 2 — структура на отклоненной подложке Ge/Si, 3 — структура на неотклоненной подложке Ge/Si.

чего эти источники оказываются пригодными для канализования и распространения излучения с малыми потерями в кремниевых волноводах.

На рис. 2 представлены зависимости интегральной интенсивности стимулированного излучения трех лазерных структур от плотности мощности оптического возбуждения. Из измеренных зависимостей были получены значения пороговой плотности мощности возникновения стимулированного излучения:  $\sim 37$  кВт/см<sup>2</sup> для структуры на отклоненной подложке и  $\sim 45$  кВт/см<sup>2</sup> для структур на неотклоненной подложке. Отметим, что порог генерации при комнатной температуре для лазерного диода, изготовленного из структуры 1, составлял  $\sim 5.5$  кА/см<sup>2</sup> [9]; следовательно, аналогичные значе-

ния пороговой плотности тока ожидаются при электрической накачке и для лазерных диодов, изготовленных из структур 2 и 3. Кроме того, видно, что использование буферного слоя, состоящего из чередующихся слоев AlAs и GaAs, существенно уменьшает количество дефектов и приводит к уменьшению пороговой плотности мощности в 2 раза по сравнению с лазерной структурой A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> на подложке Ge/Si, но без такого буфера [3]. Хотя порог генерации для структуры 2 ниже, чем для структуры 3, за порогом генерации интенсивность излучения структуры 3 выше, чем структуры 2, что говорит о большей квантовой эффективности структуры на неотклоненной подложке. Большой наклон зависимости интегральной интенсивности стимулированного излучения от плотности мощности накачки для структуры 1 на рис. 2, возможно, связан с большим числом КЯ (3 КЯ) в этой структуре по сравнению с остальными структурами (1 КЯ).

Таким образом, показано, что использование буферного слоя, состоящего из чередующихся слоев AlAs и GaAs, приводит к значительному уменьшению дефектов в лазерных структурах A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>, выращенных как на неотклоненной, так и на отклоненной на 4° к оси [011] подложках Ge/Si(001). Это подтверждается уменьшением в 2 раза пороговой плотности мощности возбуждения. Формирование антифазных дефектов на неотклоненной подложке несущественно сказывается на излучательных свойствах. Полученные результаты свидетельствуют о возможности получения на точно ориентированных подложках Ge/Si(001) низкопороговых гибридных лазеров, излучающих в области прозрачности объемного кремния.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 14-12-00644).

## Список литературы

- [1] D. Liang, A.W. Fang, J.E. Bowers. In: *Fibre Optic Communication* [Springer Series in Optical Sciences, Vol. 161], ed. by H. Venghaus, N. Grote (Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2012) p. 625.
- [2] Y. Chriqui, G. Saint-Girons, S. Bouchoule, J.-M. Moison, G. Isella, H. von Kaenel, I. Sagnes. *Electron. Lett.*, **39**, 1658 (2003).
- [3] В.Я. Алешкин, Н.В. Дикарева, А.А. Дубинов, С.А. Денисов, З.Ф. Красильник, К.Е. Кудрявцев, С.А. Матвеев, С.М. Некоркин, В.Г. Шенгуров. *Письма ЖЭТФ*, **100**, 900 (2014).
- [4] J. Wang, X. Ren, C. Deng, H. Hu, Y. He, Z. Cheng, H. Ma, Q. Wang, Y. Huang, X. Duan, X. Yan. *J. Lightwave Technol.*, **33**, 3163 (2015).
- [5] A.Y. Liu, C. Zhang, J. Norman, A. Snyder, D. Lubyshev, J.M. Fastenau, A.W.K. Liu, A.C. Gossard, J.E. Bowers. *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 041104 (2014).
- [6] S. Chen, W. Li, J. Wu, Q. Jiang, M. Tang, S. Shutts, S.N. Elliott, A. Sobiesierski, A.J. Seeds, I. Ross, P.M. Smowton, H. Liu. *Nature Photonics*, **10**, 307 (2016).

- [7] H. Kroemer, K.J. Polasko, S.C. Wright. *Appl. Phys. Lett.*, **36**, 763 (1980).
- [8] K. Volz, A. Beyer, W. Witte, J. Ohlmann, I. Németh, B. Kunert, W. Stolz. *J. Cryst. Growth*, **315**, 37 (2011).
- [9] V.Ya. Aleshkin, N.V. Baidus, A.A. Dubinov, A.G. Fefelov, Z.F. Krasilnik, K.E. Kudryavtsev, S.M. Nekorkin, A.V. Novikov, D.A. Pavlov, I.V. Samartsev, E.V. Skorokhodov, M.V. Shaleev, A.A. Sushkov, A.N. Yablonskiy, P.A. Yunin, D.V. Yurasov. *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 061111 (2016).
- [10] А.Н. Яблонский, С.В. Морозов, Д.М. Гапонова, В.Я. Алешкин, В.Г. Шенгуров, Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Н.В. Байдусь, З.Ф. Красильник. *ФТП*, **50**, 1455 (2016).
- [11] L. Colace, G. Masini, F. Galluzzi, G. Assanto, G. Capellini, L. Di Gaspare, E. Palange, F. Evangelisti. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 3175 (1998).
- [12] H.-C. Luan, D.R. Lim, K.K. Lee, K.M. Chen, J.G. Sandland, K. Wada, L.C. Kimerling. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2909 (1999).
- [13] Д.В. Юрасов, А.И. Бобров, В.М. Данильцев, А.В. Новиков, Д.А. Павлов, Е.В. Скороходов, М.В. Шалеев, П.А. Юнин. *ФТП*, **49**, 1463 (2015).
- [14] П.В. Волков, А.В. Горюнов, А.Ю. Лукьянов, А.Д. Тертышник, А.В. Новиков, Д.В. Юрасов, Н.А. Байдакова, Н.Н. Михайлов, В.Г. Ремесник, В.Д. Кузьмин. *ФТП*, **46**, 1505 (2012).
- [15] L. Souriau, T. Atanasov, V. Terzieva, A. Moussa, M. Caymax, R. Loo, M. Meuris, W. Vandervorst. *J. Electrochem. Soc.*, **155**, H677 (2008).
- [16] J.M. Hartmann, A. Abbadie, J.P. Barnes, J.M. Fedeli, T. Billon, L. Vivien. *J. Cryst. Growth*, **312**, 532 (2010).
- [17] V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, K.E. Kudryavtsev, V.V. Rummyantsev, A.A. Tonkikh, N.D. Zakharov, B.N. Zvonkov. *J. Appl. Phys.*, **115**, 043512 (2014).
- [18] C.K. Chia, J.R. Dong, D.Z. Chi, A. Sridhara, A.S.W. Wong, M. Suryana, G.K. Dalapati, S.J. Chua, S.J. Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 141905 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

## Stimulated emission of InGaAs/GaAs/AlGaAs laser structures, grown by MOCVD on exact and offcut Ge/Si(001) substrates

V.Ya. Aleshkin<sup>1,2</sup>, N.V. Baidus<sup>3</sup>, A.A. Dubinov<sup>1,2</sup>, Z.F. Krasilnik<sup>1,2</sup>, S.M. Nekorkin<sup>1,3</sup>, A.V. Novikov<sup>1,2</sup>, A.V. Rykov<sup>3</sup>, D.V. Yurasov<sup>1,2</sup>, A.N. Yablonskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>3</sup> Physical-Technical Research Institute of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** GaAs/AlGaAs laser structures with InGaAs quantum well were obtained by metalloorganic chemical vapor deposition (MOCVD) on an exact and 4° offcut Si(001) substrates with a Ge buffer layer. Laser structures radiated in transparency region of bulk silicon (wavelength is greater than 1100 nm at room temperature). The threshold power density for stimulated emission observing of structures grown on exact and offcut substrates accounted for 45 and 37 kW/cm<sup>2</sup>, respectively.