

## Технология изготовления лазерных диодов из структур GaAs/InGaAs/AlGaAs, выращенных на Ge/Si подложке

© В.Я. Алешкин<sup>1,2</sup>, Н.В. Байдусь<sup>1,2</sup>, А.А. Дубинов<sup>1,2</sup>, К.Е. Кудрявцев<sup>1,2</sup>, С.М. Некоркин<sup>2</sup>,  
А.В. Новиков<sup>1,2</sup>, А.В. Рыков<sup>2</sup>, И.В. Самарцев<sup>2</sup>, А.Г. Фефелов<sup>3</sup>,  
Д.В. Юрасов<sup>1,2</sup>, Ф. Красильник<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603087 д. Афонино, Костовский р-он, Нижегородская обл., Россия

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

<sup>3</sup> ОАО НПП „Салют“,  
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: aleshkin@ipmras.ru

(Получена 15 мая 2017 г. Принята к печати 31 мая 2017 г.)

Созданы InGaAs/GaAs/AlGaAs лазерные диоды с квантовыми ямами, выращенными методом МОГФЭ на неотклоненной Si (001)-подложке с буферным слоем Ge. Диоды генерируют стимулированное излучение в импульсном режиме при комнатной температуре в спектральном диапазоне 1.09–1.11 мкм.

DOI: 10.21883/FTP.2017.11.45105.19

### 1. Введение

Одним из возможных путей развития компьютеров является использование оптической связи между элементами одного чипа и между различными чипами. Преимущество оптических межсоединений по сравнению с металлическими состоит в большем быстродействии и меньших потерях энергии при передаче сигналов. В конце 2015 г. был продемонстрирован первый микропроцессор, в котором были использованы оптические соединения между чипами процессора и памяти [1]. Микропроцессор был изготовлен по стандартной CMOS технологии на подложках „кремний на изоляторе“ и содержал в себе оптические приемники и электрооптические передатчики (модуляторы). В качестве источника света использовался внешний лазер с длиной волны 1.18 мкм. Очевидно, что для таких процессоров необходимо создавать лазеры, расположенные непосредственно на чипе. Поскольку кремний плохо испускает свет, то одним из решений данной проблемы является использование прямозонных полупроводников  $A^{III}B^V$ , выращенных на кремнии для создания лазера. Такие лазеры получили название гибридных.

К настоящему времени был создан ряд гибридных лазерных диодов на основе полупроводников  $A^{III}B^V$ , выращенных на кремниевых подложках, отклоненных на несколько градусов от направления [001], для уменьшения количества антифазных дефектов [2,3]. Недавно появились работы, в которых такие лазерные диоды были выращены на неотклоненных кремниевых подложках [4–7].

Отметим, что конструкция лазерных диодов, пригодных для использования в чипах, должна заметно отличаться от стандартной, поскольку оба контакта такого лазера должны располагаться сверху. Поэтому технология создания такого лазерного диода из вы-

ращенной структуры сложнее в сравнении с таковой для обычного. В настоящей работе описана технология создания гибридного лазерного диода, генерирующего стимулированное излучение с длиной волны 1.11 мкм при комнатной температуре.

### 2. Технология создания лазерной структуры

Лазерная структура была выращена в два этапа [5,6]. На первом этапе на подложке Si (001) на установке молекулярно-пучковой эпитаксии Riber SIVA-21 выращивался слой германия толщиной 1 мкм — создавалась „виртуальная подложка“ Ge/Si (001). Слой германия играет роль буфера при росте соединений  $A^{III}B^V$  на кремнии, так как он обладает постоянной решеткой, близкой к GaAs.

На втором этапе на виртуальной подложке выращивался специальный буферный слой, на котором затем формировалась лазерная  $A^{III}B^V$  структура на установке МОГФЭ AIX 200RF. Буферный слой, состоящий из чередующихся слоев AlAs (10 нм)/GaAs (50 нм)/AlAs (10 нм), помогал решить две задачи. Во-первых, осаждение тонкого слоя AlAs на Ge подавляет взаимодиффузию атомов Ge, Ga и As благодаря высокой энергии связи пары атомов Al–As [8]. Кроме того, второй слой AlAs в таком AlAs/GaAs/AlAs буфере уменьшал количество прорастающих дефектов в активную область структуры [6]. Лазерная структура представляла собой волноведущий слой GaAs с квантовой ямой InGaAs посередине. Снизу и сверху от волноведущего слоя располагались ограничивающие слои AlGaAs. Состав лазерной структуры приведен в таблице. Подробности процедуры роста лазерных структур приведены в [5,6].

Параметры лазерной структуры

Слой	Толщина, нм	Уровень легирования, см <sup>-3</sup>
Si-подложка	—	—
Ge	1000	—
AlAs	10	—
GaAs	50	—
AlAs	10	—
GaAs : Si	2500	$2 \cdot 10^{18}$
Градиент	100	Градиент
GaAs : Si—Al <sub>0,3</sub> Ga <sub>0,7</sub> As : Si		$2 \cdot 10^{18} - 5 \cdot 10^{17}$
Al <sub>0,3</sub> Ga <sub>0,7</sub> As : Si	1000	$5 \cdot 10^{17}$
GaAs	350	
In <sub>0,4</sub> Ga <sub>0,6</sub> As	6	
GaAs	200	
GaAs	150	$3 \cdot 10^{16}$
Al <sub>0,3</sub> Ga <sub>0,7</sub> As : C	1000	$5 \cdot 10^{17}$
Градиент	100	Градиент
Al <sub>0,3</sub> Ga <sub>0,7</sub> As : C—GaAs : C		$5 \cdot 10^{17} - 2 \cdot 10^{19}$
GaAs : C	200	$2 \cdot 10^{19}$

### 3. Технология изготовления лазерных диодов

После обезжиривания структуры путем кипячения в толуоле была выполнена первая фотолитография, предназначенная для формирования омического контакта к слою *p*-типа. В этой операции использовался положительный фоторезист. С помощью процесса фотолитографии был сформирован рисунок, представляющий собой защитный слой с открытыми окнами. На следующем этапе было проведено напыление системы металлов хром—золото в вакуумной камере, при давлении порядка  $10^{-6}$  мм рт. ст. Для удаления ненужной металлизации использовалась операция взрывной фотолитографии. Для формирования омического контакта к слою GaAs *p*-типа структура, с напыленными на предыдущей операции металлами, нагревалась в атмосфере сухого азота до температуры 360–370°C.

После этого была проведена вторая фотолитография с дальнейшим формированием рельефа структуры с помощью химического травления. Использовался травитель, состоящий из 8 частей серной кислоты, одной части перекиси водорода и 1 части воды. Этот травитель является неселективным по отношению к алюминий-содержащим слоям, имеет оптимальную скорость травления (1 мкм/мин) и обеспечивает в сечении (110) практически вертикальную стенку. Травление проводилось на глубину 1.8 мкм. С помощью травления формировался полосок лазера шириной 15 мкм.

После операции травления была проведена третья фотолитография, необходимая для осуществления бомбардировки протонами незащищенных фоторезистом участ-

ков структуры. Бомбардировка протонами обеспечивает отсутствие электрического контакта между металлом, по которому будет подводиться ток к *p*-контакту, и слоем *n*-GaAs, на котором будет располагаться часть этого металла. После этого этапа проводилась четвертая фотолитография для формирования из фоторезиста перемычек, которые на следующих операциях обеспечат электрический мостиковый контакт центральной области прибора с периферией без паразитных замыканий промежуточных областей (формирование воздушных мостов).

Для изготовления контактной площадки шириной 200 мкм к контакту *p*-типа была выполнена взрывная фотолитография и металлизация второго уровня (рис. 1) путем напыления системы металлов титан—золото. На рис. 1 виден полосок лазера с двумя частично перекрывающимися уровнями металлизации. Следующая взрывная фотолитография была использована для формирования омического контакта к *n*-GaAs. Для этого использовалось вакуумное напыление системы металлов золото—германий—никель—золото.

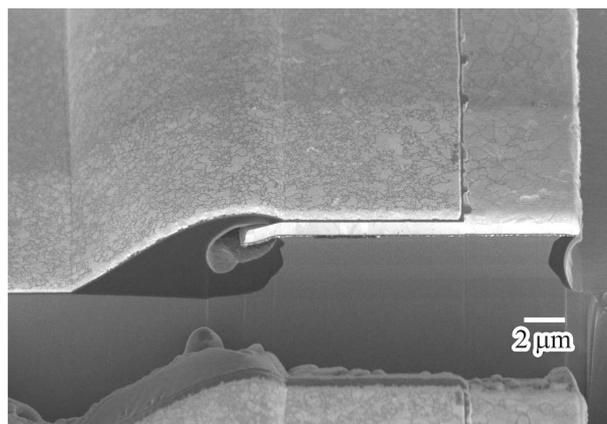


Рис. 1. Изображение поперечного сечения лазерного диода, полученное методом сканирующей электронной микроскопии.

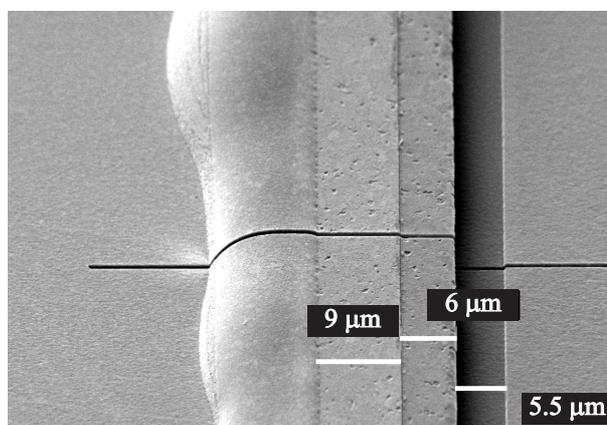


Рис. 2. Вид сверху лазерного диода, полученный методом сканирующей электронной микроскопии.

Золото–германий напылялись из сплава — этот слой обеспечивает омический контакт к  $n$ -типу; верхний слой золота обеспечивает низкое электрическое сопротивление. На рис. 2 омический контакт к  $n$ -GaAs располагается справа в 5.5 мкм от полоска. Его ширина составляла 200 мкм. На рис. 2 показано расположение контактов к структуре сверху.

Структура после металлизации нагревалась в атмосфере сухого азота до температуры 360–370°C для формирования омического контакта.

Для обеспечения зеркального качества сколов подложка кремния утонялась до 80 мкм, после чего структура раскалывалась на чипы длиной 1 мм. Зеркалами лазера служили сколотые грани структуры.

#### 4. Результаты измерений характеристик лазера

Спектр излучения гибридного диода в режиме лазерной генерации приведен на рис. 3. Измерения проводились при комнатной температуре при импульсном токовом возбуждении (длительность импульса 360 нс, частота повторения 1.47 кГц). На рисунке видно несколько линий генерации, при этом расстояние между этими линиями почти постоянно и примерно соответствует 2 нм ( $\sim 2$  мэВ), что примерно на порядок больше расстояния между продольными модами. Причина этого явления нами не установлена. Возможно, из-за дефектов возникает волнистость поверхности, которая наблюдалась в работах [9,10]. Эта волнистость может приводить к волнистости волноведущего и ограничивающих слоев, таким образом формируя своеобразное брэгговское зеркало для излучения, распространяющегося в волноводе.

На рис. 4 представлены вольт-амперная характеристика (ВАХ) и ватт-амперная характеристика (ВтАХ) гибридного лазерного диода при комнатной температуре. Такой вид ВАХ есть следствие высокого последовательного сопротивления лазерной структуры, которое составило 0.1 Ом. По ВтАХ можно определить пороговый ток

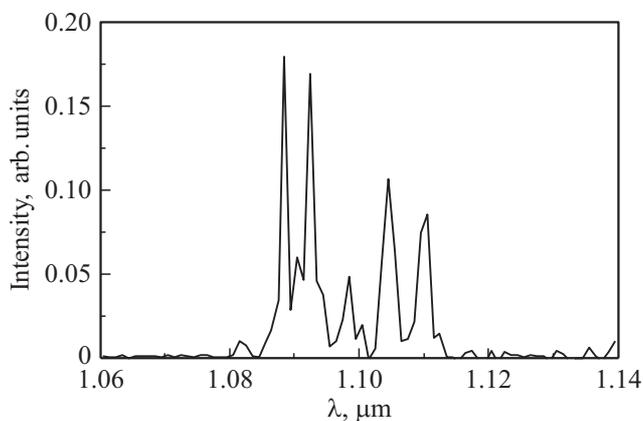


Рис. 3. Спектр лазерной генерации гибридного лазера при комнатной температуре и токе накачки  $I = 40$  А.

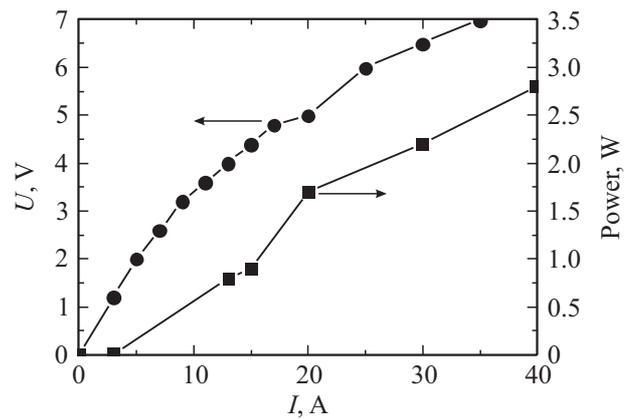


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика (кружки) и ватт-амперная характеристика (квадраты) гибридного лазера при комнатной температуре.

возникновения лазерной генерации, который составил 3 А. Отметим, что пороговый ток у гибридного лазера на порядок больше, чем у лазера на „родной“ подложке GaAs, созданного по той же технологии изготовления, что указывает на меньшее структурное совершенство гибридного лазера.

#### 5. Заключение

В результате выполнения данной работы был создан гибридный лазерный диод с квантовой ямой, генерирующий стимулированное излучение при комнатной температуре в импульсном режиме. Энергия квантов стимулированного излучения созданного лазерного диода меньше ширины запрещенной зоны объемного кремния, что позволяет использовать излучение этого лазера для межчиповых соединений. Лазерная структура была выращена методом МОГФЭ на неотклоненной Ge/Si(001)-подложке.

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

#### Список литературы

- [1] C. Sun, M.T. Wade, Y. Lee, J.S. Orcutt, L. Alloatti, M.S. Georgas, A.S. Waterman, J.M. Shainline, R.R. Avizienis, S. Lin, B.R. Moss, R. Kumar, F. Pavanello, A.H. Atabaki, H.M. Cook, A.J. Ou, J.C. Leu, Y.-H. Chen, K. Asanović, R.J. Ram, M.A. Popović, V.M. Stojanović. *Nature*, **528**, 534 (2015).
- [2] A.Y. Liu, C. Zhang, J. Norman, A. Snyder, D. Lubyshov, J.M. Fastenau, A.W.K. Liu, A.C. Gossard, J.E. Bowers. *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 041104 (2014).
- [3] 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).
- [4] X. Huang, Y. Song, T. Masuda, D. Jung, M. Lee. *Electron. Lett.*, **50**, 1226 (2014).

- [5] 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).
- [6] В.Я. Алешкин, Н.В. Байдусь, А.А. Дубинов, З.Ф. Красильник, С.М. Некоркин, А.В. Новиков, А.В. Рыков, Д.В. Юрасов, А.Н. Яблонский. *ФТП*, **51**, 702 (2017).
- [7] A.Y. Liu, J. Peters, X. Huang, D. Jung, J. Norman, M.L. Lee, A.C. Gossard, J.E. Bowers. *Optics Lett.*, **42**, 338 (2017).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] В.Я. Алешкин, Н.В. Дикарева, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, К.Е. Кудрявцев, С.М. Некоркин, А.В. Новиков, П.А. Юнин, Д.В. Юрасов. *Письма ЖТФ*, **41** (13), 72 (2015).

Редактор А.Н. Смирнов

## The manufacturing technology of laser diodes from GaAs/InGaAs/AlGaAs structures grown on a Ge/Si substrate

V.Ya. Aleshkin<sup>1,2</sup>, N.V. Baidus<sup>1,2</sup>, A.A. Dubinov<sup>1,2</sup>,  
K.E. Kudryavtsev<sup>1,2</sup>, S.M. Nekorkin<sup>2</sup>, A.V. Novikov<sup>1,2</sup>,  
A.V. Rykov<sup>2</sup>, I.V. Samartsev<sup>2</sup>, A.G. Fefelov<sup>3</sup>,  
D.V. Yurasov<sup>1,2</sup>, Z.F. Krasilnik<sup>1,2</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> OJSC «RPE „Salut“»,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** We have produced InGaAs/GaAs/AlGaAs laser diodes with quantum wells grown by the MOCVD method on an exact Si (001) substrate with a Ge buffer layer. Diodes generate stimulated emission in a pulsed mode at room temperature in the spectral range 1.09–1.11  $\mu\text{m}$ .