

07:08

## Излучательные характеристики лазерных диодов на основе соединений АЗВ5, выращенных на германиевой подложке

© В.Я. Алёшкин<sup>1,2</sup>, Н.В. Дикарева<sup>3</sup>, А.А. Дубинов<sup>1,2</sup>,  
Б.Н. Звонков<sup>3</sup>, З.Ф. Красильник<sup>1,2</sup>, С.М. Некоркин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН

(Institute for Physics of Microstructures RAS), Нижний Новгород

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
(N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod), Нижний Новгород

<sup>3</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского  
(Physical-Technical Institute, N.I. Lobachevsky State University of Nizhny  
Novgorod), Нижний Новгород

E-mail: sanya@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 2014 г.

Проведены сравнительные исследования электрофизических и излучательных свойств лазеров на основе GaAs и  $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$  с квантовыми ямами, выращенных на подложке Ge. Показано, что лазеры на основе  $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$  более совершенны и обладают характеристиками, сравнимыми с лазерами, выращенными на подложке GaAs.

Кремний является основным материалом для электроники, однако из-за его непрямозонности он до настоящего времени не нашел широкого применения в светоизлучающих оптоэлектронных устройствах. Для оптических межсоединений, особенно внутри процессоров, крайне желательно опираться на чисто кремниевые технологии, но удовлетворительных решений на сегодняшний день пока нет. Как альтернативное решение рассматриваются гибридные системы и технологии, к которым относится рост на подложке Si прямозонных полупроводников АЗВ5 и изготовление на их основе полупроводниковых лазеров. В последние годы рассматривались технологии, предполагающие использование буфера Ge между подложкой Si и полупроводником АЗВ5 [1]. На этом пути видится ряд фундаментальных проблем, требующих проведения

систематических исследований. Так, важной проблемой является проблема формирования совершенного гетероперехода при выращивании полярного полупроводника на неполярной подложке (GaAs на Ge) [2]. Кроме этого, существует большая вероятность неконтролируемой диффузии атомов Ge в слои GaAs, что существенно ухудшает характеристики лазерных диодов [3]. Решение этих проблем может открыть дорогу для широкого использования гибридных структур в оптоэлектронике.

В данной работе представлены два метода роста лазерных гетероструктур InGaAs/GaAs/InGaP на подложке Ge и проведено сравнение электрофизических и излучательных свойств этих структур с целью нахождения оптимального метода роста.

Постоянная решетки GaAs меньше постоянной решетки Ge на 0.08% [4], поэтому деформация достаточно толстых слоев GaAs (несколько  $\mu\text{m}$ ), выращенных на подложке Ge, может сказаться на качестве лазерных структур. Добавление небольшого количества In в GaAs может исправить эту проблему, так как решетки  $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$  и Ge практически согласованы. Поэтому целью работы было сравнение характеристик лазерных структур на основе GaAs и  $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$ .

Гетероструктуры были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии в горизонтальном реакторе при атмосферном давлении. Использовались подложки Ge (100) с отклонением  $6^\circ$  к [111] для предотвращения появления антифазных дефектов. Рост гетероструктур проходил в несколько этапов: 1) отжиг подложки Ge в атмосфере  $\text{H}_2$  в течение 10 min, 2) отжиг подложки Ge в атмосфере  $\text{AsH}_3$  в течение 30 min, 3) рост буферного слоя GaAs при температуре  $470^\circ\text{C}$ , 4) рост буферного слоя GaAs или  $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$  при температуре  $700^\circ\text{C}$ , 5) рост лазерной структуры с волноводным слоем GaAs или  $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$ . Толщины и легирование слоев структур приведены в таблице.

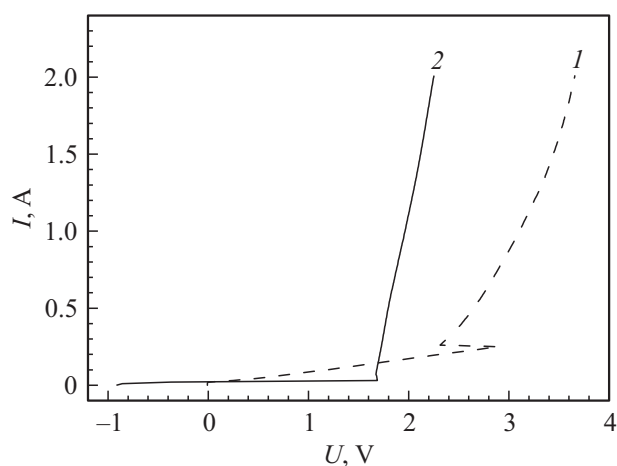
Лазерные диоды с шириной активной области  $100\ \mu\text{m}$  и длиной 1 mm изготавливались путем химического травления контактного слоя вне активной полоски с последующей ионно-имплантационной изоляцией (ионы водорода с энергией 80 keV и дозой  $6.25 \cdot 10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup>). Металлические контакты наносились на германиевую подложку и на контактный слой  $p^{++}$ -GaAs. Зеркалами служили сколотые грани структуры. Генерация стимулированного излучения в лазере на основе  $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$  наблюдалась при комнатной температуре в непрерывном режиме на длине волны  $1\ \mu\text{m}$ . В лазере на основе GaAs генерацию стимулированного излучения при комнатной температуре удалось наблюдать только

Параметры лазерных гетероструктур

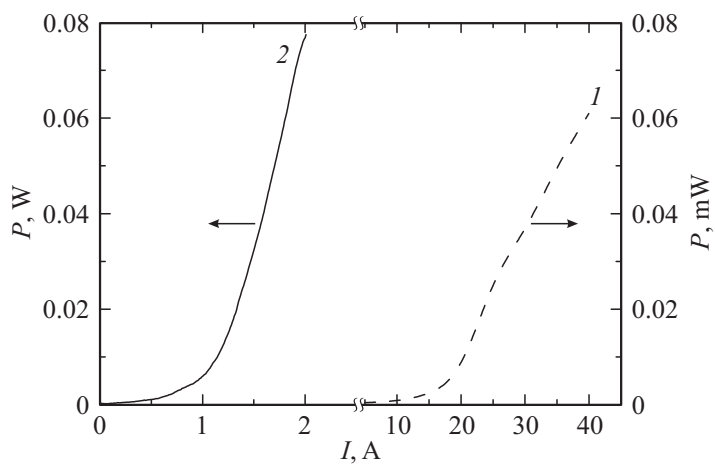
Слой	Концентрация примеси, $\text{cm}^{-3}$	Толщина, $\mu\text{m}$
Подложка $n$ -Ge	$5 \cdot 10^{16}$	$\sim 150$
Буфер $n^+$ -GaAs	$10^{18}$	0.5
Буфер $n^+$ -GaAs ( $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ )	$10^{18}$	0.5
Ограничительный слой $n^+$ - $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	$5 \cdot 10^{17}$	0.7
Волноводный слой $i$ -GaAs ( $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ )	—	0.35
Квантовая яма $\text{In}_{0.19}\text{Ga}_{0.81}\text{As}$ ( $\text{In}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{As}$ )	—	0.008
Волноводный слой $i$ -GaAs ( $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ )	—	0.135
Квантовая яма $\text{In}_{0.19}\text{Ga}_{0.81}\text{As}$ ( $\text{In}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{As}$ )	—	0.008
Волноводный слой $i$ -GaAs ( $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ )	—	0.35
Ограничительный слой $p^+$ - $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	$5 \cdot 10^{17}$	0.7
Контактный слой $p^{++}$ -GaAs	$2 \cdot 10^{19}$	0.2

в импульсном режиме (длительность импульсов тока 360 ns с частотой повторения 1.5 kHz) на длине волны 0.985  $\mu\text{m}$ .

Сильное влияние на электрофизические свойства лазерной структуры оказывает граница гетероперехода между Ge и  $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$  (GaAs). С одной стороны наблюдается проникновение атомов Ge в растущий слой  $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$  (GaAs), а с другой стороны наблюдается диффузия атомов In, Ga и As в Ge [5]. В результате этих процессов вольт-амперная характеристика (ВАХ) изучаемых лазеров отличается от нормальной ВАХ лазерных диодов [6]. На рис. 1 приводятся ВАХ двух лазерных диодов на основе разных гетероструктур. Из рисунка видно, что лазер на основе  $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$  имеет более близкую к нормальной ВАХ, что говорит о лучшем качестве структуры со слоями  $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$  по сравнению со структурой со слоями GaAs. Кроме того, на ВАХ лазера со слоями GaAs наблюдается участок отрицательной дифференциальной проводимости S-типа, аналогичный существующему в лазерах с несовершенным туннельным переходом [7,8]. Возможно, это свидетельствует о возникновении на границе Ge и GaAs дополнительных паразитных  $p$ - $n$ -переходов, образовавшихся из-за взаимной диффузии атомов Ga, As и Ge [9].



**Рис. 1.** ВАХ лазерных диодов на основе GaAs (1) и  $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$  (2) при комнатной температуре.



**Рис. 2.** ВтАХ лазерных диодов на основе GaAs (1, импульсный режим) и  $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$  (2, непрерывный режим) при комнатной температуре.

На разное качество двух структур указывают и ватт-амперные характеристики (ВтАХ) этих лазеров, измеренные при комнатной температуре (рис. 2). Кроме того, что пороговый ток в лазере на основе GaAs почти в 20 раз выше по сравнению с пороговым током в лазере на основе  $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$  (по-видимому, именно из-за перегрева лазер на основе GaAs работает только при импульсной накачке), мощность излучения лазера на основе GaAs на три порядка меньше, чем другого лазера. В аналогичных лазерах, выращенных на подложке GaAs, пороговый ток существенно ниже, а мощность существенно выше по сравнению с лазером на основе  $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ , выращенном на подложке Ge. Отметим, что это обусловлено перегревом последнего вследствие высокого последовательного сопротивления лазерной структуры, которое составило  $0.2 \Omega$ , что значительно больше по сравнению с подобными лазерами на подложке GaAs [10,11].

В заключение можно сделать вывод о том, что использование более согласованного по решетке с Ge раствора  $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$  по сравнению с GaAs продемонстрировало создание более совершенных лазерных структур.

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

## Список литературы

- [1] Liu A.Y., Zhang C., Norman J. et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. P. 041 104-1–041 104-4.
- [2] Schulte K.L., Wood A.W., Reedy R.C. et al. // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. P. 174 903-1–174 903-9.
- [3] Chia C.K., Dalapati G.K., Chai Y. et al. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 066106-1–066106-3.
- [4] Madelung O. Semiconductors: Data Handbook. N.Y.: Springer-Verlag, 2003. 692 p.
- [5] Алешкин В.Я., Дубинов А.А., Дроздов М.Н. и др. // ФТП. 2013. Т. 47. В. 5. С. 621–625 (Aleshkin V.Ya., Dubinov A.A., Drozdov M.N. et al. // Semiconductors. 2013. V. 47. P. 636–640.).
- [6] Chand N., Klem J., Henderson T., Morkoc H. // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. P. 3601–3604.
- [7] Nekorkin S.M., Biryukov A.A., Demina P.B. et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 171 106-1–041 104-3.

- [8] Бирюков А.А., Звонков Б.Н., Некоркин С.М. и др. // ФТП. 2007. Т. 41. В. 10. С. 1226–1230 (*Biryukov A.A., Zvonkov B.N., Nekorkin S.M. et al. // Semiconductors. 2007. V. 41. P. 1209–1213*).
- [9] Bai Y., Bulsara M.T., Fitzgerald E.A. // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. P. 013 502-1–013 502-8.
- [10] Слипченко С.О., Подоскин А.А., Пихтин Н.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 8. С. 9–16 (*Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Pikhtin N.A. et al. // Tech. Phys. Lett. 2013. V. 39. P. 364–366*).
- [11] Некоркин С.М., Карзанова М.В., Дикарева Н.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 10. С. 52–57 (*Nekorkin S.M., Karzanova M.V., Dikareva N.V. et al. // Tech. Phys. Lett. 2014. V. 40. P. 432–434*).