

# Мощные полупроводниковые AlGaInAs/InP-лазеры спектрального диапазона 1.9–2.0 мкм со сверхузким волноводом

В.Н.Светогоров, Ю.Л.Рябоштан, Н.А.Волков, М.А.Ладугин, А.А.Падалица, А.А.Мармалюк, К.В.Бахвалов, Д.А.Веселов, А.В.Лютецкий, В.А.Стрелец, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин

*Созданы мощные полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур AlGaInAs/InP, излучающие в спектральном диапазоне 1.9–2.0 мкм. Компенсация упругих напряжений в активной области позволила использовать квантовые ямы InGaAs с напряжением сжатия около 2.0%–2.5%. Исследована работа лазера со сверхузким волноводом при увеличении длины волны излучения от 1.4–1.6 до 2.0 мкм. Полупроводниковые лазеры с полосковым контактом шириной 100 мкм продемонстрировали выходную оптическую мощность 1.0 Вт в непрерывном режиме работы при комнатной температуре при токе накачки 6.5 А на длине волны 1.91 мкм и 7.2 А на длине волны 1.98 мкм.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер, гетероструктура, AlGaInAs/InP, сверхузкий волновод, 2-мкм спектральная область.

## 1. Введение

В настоящее время большое внимание уделяется созданию полупроводниковых лазеров, излучающих на длинах волн свыше 1.8 мкм. Такие приборы находят применение в молекулярной спектроскопии, медицине, лидарах, для оптической накачки лазерных сред и в других областях [1–4]. Для создания лазеров рассматриваемого диапазона часто используются гетероструктуры с различными типами гетеропереходов на основе полупроводниковых твердых растворов, содержащие сурьму и выращиваемые на подложке GaSb в основном методом молекулярно-пучковой эпитаксии [2, 4–6]. Другой подход подразумевает применение гетероструктур с сильно напряженными квантовыми ямами In(Ga)As [7–10] или с квантовыми точками InAs [11]. Такие гетероструктуры не содержат сурьму и выращиваются на подложке InP преимущественно методом МОС-гидридной эпитаксии. В этом случае увеличение длины волны излучения в лазерах сопряжено с ростом упругих напряжений в квантовых ямах InGaAs, которые при превышении критических значений могут способствовать возникновению дислокаций несоответствия, ухудшающих излучательные характеристики. Отодвинуть границу образования кристаллических дефектов возможно путем использования напряженно-компенсированных квантовых ям (упругие напряжения в слое квантовой ямы компенсируются напряжени-

ями противоположного знака в слое барьера [12, 13]). Кроме того, наличие напряженно-компенсированных квантовых ям InGaAs, необходимых для достижения требуемой длины волны излучения, ведет к ослаблению влияния оже-рекомбинации, которая является одним из наиболее значимых параметров, отрицательно воздействующих на рабочие характеристики полупроводниковых лазеров этого спектрального диапазона [14–16].

В наших предыдущих работах сообщалось о создании мощных полупроводниковых лазеров с длиной волны излучения 1.8 мкм на основе гетероструктур с квантовыми ямами InGaAs/AlGaInAs и InGaAs/GaInAsP с расширенным асимметричным волноводом [8, 17]. Снижение внутренних оптических потерь позволило достигнуть выходной мощности 2.0–2.5 Вт в непрерывном режиме генерации. Вместе с тем в [18, 19] показано, что для лазеров спектрального диапазона 1.4–1.6 мкм переход от расширенного волновода к сверхузкому способствует повышению выходной мощности благодаря снижению темпа роста внутренних оптических потерь на выброшенных в волновод носителях заряда по мере увеличения тока накачки, а также уменьшению последовательного и теплового сопротивления.

Настоящая работа посвящена изучению применимости гетероструктур InGaAs/AlGaInAs/InP со сверхузким волноводом для создания мощных полупроводниковых лазеров, излучающих вблизи 2.0 мкм.

## 2. Эксперимент

Лазерные гетероструктуры InGaAs/AlInGaAs/InP выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии. Конструкция гетероструктур представляла собой активную область из двух напряженно-компенсированных квантовых ям InGaAs, расположенных в центре волновода AlGaInAs толщиной 0.1 мкм. Волновод ограничивался эмиттерными слоями InP. Для снижения утечек на границе волновод–р-эмиттер был введен напряженный барьерный слой AlInAs, ширина запрещенной зоны кото-

В.Н.Светогоров, Ю.Л.Рябоштан, Н.А.Волков, М.А.Ладугин, А.А.Падалица. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: svetogorvlad@mail.ru  
А.А.Мармалюк. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31  
К.В.Бахвалов, Д.А.Веселов, А.В.Лютецкий, В.А.Стрелец, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26

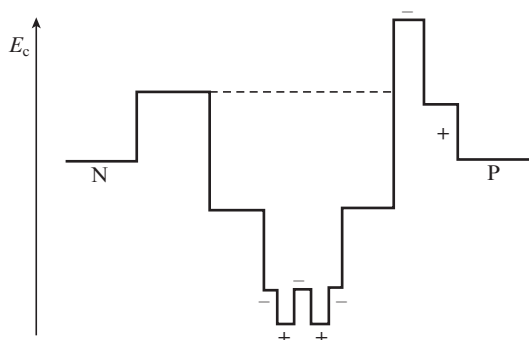


Рис.1. Схематическое изображение диаграммы зоны проводимости  $E_c$  активной области лазерных гетероструктур InGaAs/AlGaInAs/InP (знаком «+» обозначены слои с напряжениями сжатия, знаком «-» – с напряжениями растяжения).

рого превышала таковую для согласованного барьера [20]. Схематическое изображение зонной диаграммы активной области представлено на рис.1. Исследовались два типа гетероструктур, различающихся квантовыми ямами. В первом из них (тип А) параметры квантовых ям InGaAs и барьеров AlGaInAs подбирались для получения излучения в районе 1.9 мкм, а во втором (тип В) – в районе 2.0 мкм.

На основе полученных гетероструктур изготавливались полупроводниковые лазеры с полосковым контактом шириной 100 мкм и длиной резонатора 2000 мкм. Кристаллы монтировались с помощью индиевого припоя на медный теплоотвод р-стороной вниз, и изучались их выходные характеристики в непрерывном режиме работы при температуре теплоотвода 25 °С.

### 3. Результаты и обсуждение

Идея использования сверхузких волноводов [18, 19] хорошо зарекомендовала себя при создании мощных полупроводниковых лазеров InGaAs/AlGaInAs/InP, излучающих на длинах волн 1.4–1.6 мкм. Увеличение ширины запрещенной зоны барьерного слоя AlInAs на границе волновод–р-эмиттер способствует повышению выходной мощности [20]. Указанные моменты использованы в настоящей работе для создания лазеров с увеличенной длиной волны излучения. Для формирования активной области выбраны квантовые ямы InGaAs с расчетным напряжением сжатия от +2.0% до 2.5% и барьерные слои AlGaInAs с расчетным напряжением растяжения от –0.5% до –0.4%. Важно отметить, что, несмотря на преимущества сверхузких волноводов, такие лазеры характеризуются увеличенными внутренними оптическими потерями, и это может оказаться значимым при переходе к длинам волн ближе к 2.0 мкм.

Ватт-амперные характеристики исследованных лазеров представлены на рис.2. Видно, что хотя лазеры обоих типов и продемонстрировали выходную мощность 1 Вт, дифференциальная эффективность длинноволновых образцов типа В закономерно ниже. Такие лазеры характеризуются также повышенным значением порогового тока (0.75 А) по сравнению с 0.60 А для образцов типа А. Кроме того, заметно более сильное насыщение выходной мощности лазеров типа В с увеличением тока накачки, особенно при превышении 6 А.

Спектральные характеристики образцов приведены на рис.3. Длина волны излучения лазеров типа А нахо-

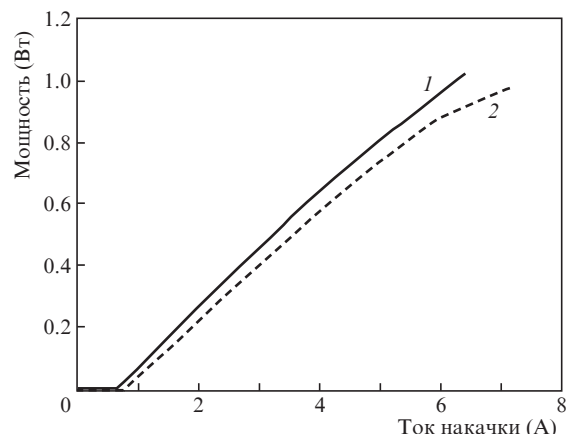


Рис.2. Ватт-амперные характеристики полупроводниковых лазеров на основе InGaAs/AlGaInAs/InP со сверхузким волноводом типа А (1) и В (2) в непрерывном режиме генерации.

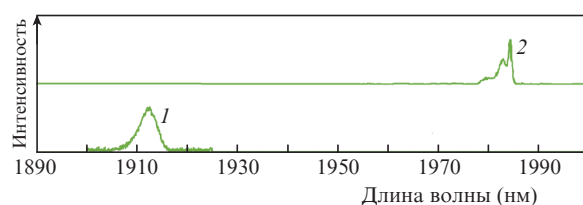


Рис.3. Спектральные характеристики полупроводниковых лазеров на основе InGaAs/AlGaInAs/InP со сверхузким волноводом типа А (1, ток инжекции 1.3 А) и В (2, ток инжекции 1.2 А).

дилась в районе 1.91 мкм, а лазеры типа В ожидаемо продемонстрировали увеличенную длину волны в районе 1.98 мкм.

Таким образом, использование выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии гетероструктур InGaAs/AlGaInAs/InP с напряженно-компенсированными квантовыми ямами и сверхузким волноводом позволяет создавать полупроводниковые лазеры с выходной непрерывной мощностью 1 Вт в спектральном диапазоне 1.9–2.0 мкм. Для определения максимально достижимой мощности таких лазеров и особенностей их функционирования требуются дополнительные исследования.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (дог. № 02.а03.21.0005) и проекта РФФ № 19-79-30072.

- Kohler D., Kissel H., Flament M., Wolf P., Brand T., Biesenbach J. *SPIE*, **7583**, 75830-F (2010).
- Tournie E., Baranov A.N. *Semiconductors and Semimetals*, **86**, 183 (2012).
- Waynant R.W., Ilev I.K., Gannot I. *C. Phil. Trans. R. Soc. A*, **359**, 635 (2001).
- Godard A. *C. R. Phys.*, **8**, 1100 (2007).
- Lei W., Jagadish C. *J. Appl. Phys.*, **104**, 091101 (2008).
- Jung D., Bank S., Lee M.L., Wasserman D. *J. Opt.*, **19**, 123001 (2017).
- Luo S., Ji H.M., Gao F., Xu F., Yang X.G., Liang P., Yang T. *Opt. Express*, **23**, 8383 (2015).
- Лютетский А.В., Борщев К.С., Бондарев А.Д., Налет Т.А., Пихтин Н.А., Слипенченко С.О., Фетисова Н.В., Хомылев М.А., Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Симаков В.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **41**, 883 (2007) [*Semicond.*, **41**, 883 (2007)].
- Sato T., Mitsuhashi M., Kakitsuka T., Fujisawa T., Kondo Y. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **14**, 992 (2008).
- Kim S., Kirch J., Mawst L. *J. Cryst. Growth*, **312**, 1388 (2010).
- Kotani J., Veldhoven P.J., Nötzel R. *J. Appl. Phys.*, **106**, 093112 (2009).

12. Miller B.I., Koren U., Young M.G., Chien M.D. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 1952 (1991).
13. Ogasawara M., Sugiura H., Mitsuhashi M., Yamamoto M., Nakao M. *J. Appl. Phys.*, **84**, 4775 (1998).
14. Lui W.W., Yamanaka T., Yoshikuni Y., Seki S., Yokoyama K. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 1475 (1994).
15. Андреев А.Д., Зегря Г.Г. *ФТП*, **31**, 358 (1997) [*Semicond.*, **31**, 297 (1997)].
16. Gilard O., Lozes-Dupuy F., Vassiliev G., Bonnefont S., Arguel P., Barrau J., Le Jeune P. *J. Appl. Phys.*, **86**, 6425 (1999).
17. Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Фетисова Н.В., Лешко А.Ю., Слипенченко С.О., Соколова З.Н., Рябоштан Ю.А., Мармалюк А.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **43**, 1646 (2009) [*Semicond.*, **43**, 1646 (2009)].
18. Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Горлачук П.В., Ладугин М.А., Падалица А.А., Слипенченко С.О., Лютецкий А.В., Веселов Д.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **47**, 272 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 272 (2017)].
19. Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Горлачук П.В., Ладугин М.А., Падалица А.А., Слипенченко С.О., Лютецкий А.В., Веселов Д.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **48**, 197 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 197 (2018)].
20. Светогоров В.Н., Рябоштан Ю.Л., Ладугин М.А., Падалица А.А., Волков Н.А., Мармалюк А.А., Слипенченко С.О., Лютецкий А.В., Веселов Д.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **50**, 1123 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 1123 (2020)].