

# Полупроводниковые AlGaInAs/InP-лазеры ( $\lambda = 1450–1500$ нм) с сильно асимметричным волноводом

Н.А.Волков, А.Ю.Андреев, И.В.Яроцкая, Ю.Л.Рябоштан, В.Н.Светогоров, М.А.Ладугин, А.А.Падалица, А.А.Мармалюк, С.О.Слипченко, А.В.Лютецкий, Д.А.Веселов, Н.А.Пихтин

*Изучены полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур AlGaInAs/InP с сильно асимметричным волноводом. Показано, что применение такого волновода при одновременном увеличении энергетической глубины квантовой ямы обеспечивает условия для достижения повышенной мощности излучения. Полупроводниковые AlGaInAs/InP-лазеры на основе сильно асимметричного волновода с полосковым контактом шириной 100 мкм продемонстрировали выходную оптическую мощность 5 Вт (ток накачки 11.5 А) в непрерывном и 19 Вт (100 А) в импульсном (100 нс, 1 кГц) режимах работы при комнатной температуре на длине волны генерации 1450–1500 нм. Проведено сравнение полученных данных с выходными характеристиками лазеров на основе симметричного волновода.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер, гетероструктура, AlGaInAs/InP, асимметричный волновод.

## 1. Введение

Области применения полупроводниковых лазеров постоянно расширяются, и во многих случаях одним из главных требований является повышение излучаемой оптической мощности. Это требование реализуется путем расширения волновода [1–3], увеличения энергетической глубины квантовых ям (КЯ) [4, 5], применения дополнительных барьерных слоев вблизи активной области [6–8], повышения лучевой прочности зеркал резонатора [9–11]; в последнее время отмечено также положительное влияние легирования волноводов [12–14]. Для мощных многоэлементных излучателей (линеек и решеток лазерных диодов) показана целесообразность использования узких волноводов, способствующих меньшему тепловыделению и улучшению теплоотвода от активной области гетероструктуры [5, 15]. В работах [16, 17] показано, что важным фактором, ограничивающим выходную мощность полупроводниковых лазеров, является накопление носителей заряда в р-части волновода по мере увеличения тока накачки и, соответственно, рост внутренних оптических потерь. Для снижения влияния указанного эффекта перспективны конструкции лазеров со сверхузкими волноводами [18–20], а также с сильно асимметричными волноводами, в которых КЯ приближены к Р-эмиттеру [21–25].

При создании мощных полупроводниковых излучателей спектрального диапазона 1400–1600 нм важно обращать внимание на необходимость снижения вероятности

протекания процессов оже-рекомбинации, что, как правило, реализуется посредством использования напряженных КЯ [26].

Конструкция со смещением КЯ к Р-эмиттеру активно исследуется при создании полупроводниковых излучателей спектрального диапазона 800–1100 нм в системе материалов InGaAs/AlGaAs/GaAs [21–23, 27–29]. Авторы [21], помимо смещения КЯ к Р-эмиттеру, использовали широкий п-волновод (слой вытекания), ограниченный N-эмиттером с малым перепадом коэффициента преломления и назвали такую конструкцию лазером с вытекающим излучением. Теоретический анализ такой гетероструктуры, выполненный в работе [30], показал возможность повышения выходной мощности и сужения диаграммы направленности. Важно подчеркнуть, что рассматриваемый вариант предусматривает вытекание излучения в п-волновод, а не в подложку, как в некоторых конструкциях лазеров с вытекающей модой [31, 32]. В работах [22, 27, 28] предложена концепция гетероструктуры с двойной асимметрией, когда КЯ InGaAs смещается к Р-волноводу (асимметрия положения КЯ) и сам волновод ограничен эмиттерными слоями AlGaAs различного состава, а следовательно, и с различными коэффициентами преломления (асимметрия ограничивающих слоев). Такая конструкция призвана снизить оптические потери, уменьшить электрическое и тепловое сопротивления, увеличить дифференциальную квантовую эффективность. Дальнейшим ее развитием стала гетероструктура с тройной асимметрией, где дополнительно использованы различные барьерные слои, примыкающие к КЯ [23, 29]. Целью такого изменения конструкции было увеличение фактора оптического ограничения в КЯ для снижения пороговой плотности тока и повышения температурной стабильности.

Применительно к спектральному диапазону 1400–1600 нм можно отметить работы двух групп исследователей. Авторы первой из них, оставаясь в рамках традиционной конструкции двойной гетероструктуры с отдельным ограничением AlGaInAs/InP рассматриваемого спектрального диапазона, изучали смещение КЯ ближе к

Н.А.Волков, А.Ю.Андреев, И.В.Яроцкая, Ю.Л.Рябоштан, В.Н.Светогоров, М.А.Ладугин, А.А.Падалица. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: volkov\_n\_a@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  
С.О.Слипченко, А.В.Лютецкий, Д.А.Веселов, Н.А.Пихтин. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26

Поступила в редакцию 11 ноября 2020 г.

P-эмиттеру, избегая появления мод высокого порядка [24, 33]. В работах другой группы [34, 35] также использовалось смещение активной области, но гетероструктура базировалась на системе материалов InGaAsP/InP. Для оптимизации выходных параметров излучателей предложено вместо КЯ использовать объемную активную область и дополнительно уменьшить разность коэффициентов преломления на границе волновод/N-эмиттер (гетероструктура с двойной асимметрией).

Настоящая работа, продолжая подход [34, 35], отличается использованием сильно асимметричного волновода с КЯ увеличенной глубины для уменьшения выброса носителей и уменьшенной толщиной P-эмиттера для улучшения теплоотвода активной области, как в [36]. Ее целью является изучение возможности повышения выходной мощности полупроводниковых лазеров с сильно асимметричным волноводом, излучающих в диапазоне 1450–1500 нм.

## 2. Эксперимент

Лазерные AlGaInAs/InP-гетероструктуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии. Исследовались два типа гетероструктур, отличающихся положением КЯ в волноводе. Первая (базовая) гетероструктура, аналогичная [19], представляла собой активную область из двух упруго-компенсированных КЯ InGaAs, расположенных в центре расширенного волновода AlGaInAs. Параметры КЯ подбирались таким образом, чтобы обеспечить получение генерации в заданном спектральном диапазоне 1450–1500 нм. Волновод ограничивался эмиттерными слоями InP. Для снижения утечек на границе волновод/эмиттер помещались блокирующие барьерные слои AlInAs, изопериодные с подложкой InP. Во второй гетероструктуре р-часть волновода была уменьшена так, чтобы КЯ (по аналогии с [35]) оказались в непосредственной близости к P-эмиттеру. Схемы зонных диаграмм исследованных гетероструктур обоих типов приведены на рис.1.

На основе полученных гетероструктур изготавливались полупроводниковые лазеры с полосковым контактом шириной 100 мкм и длиной резонатора 2000–3000 мкм. На грани резонатора наносились просветляющие и отражающие покрытия с коэффициентами отражения  $R_1 \sim 0.05$  и  $R_2 \sim 0.95$ . Кристаллы монтировались на медный теплоотвод, их выходные характеристики изучались в им-

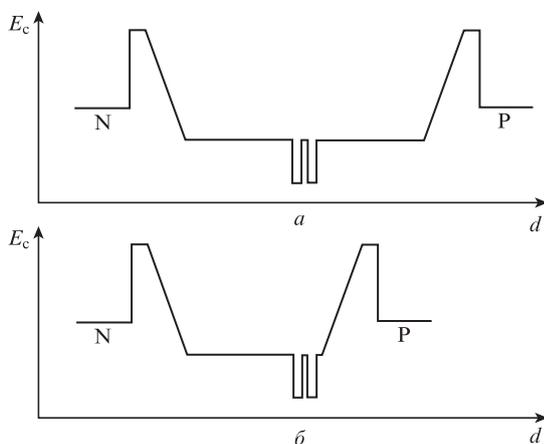


Рис.1. Схема зонной диаграммы активной области полупроводниковых AlGaInAs/InP-лазеров с симметричным (а) и асимметричным (б) волноводами.

пульсном (длительность импульсов 100 нс, частота следования 1 кГц) и непрерывном режимах работы при температуре теплоотвода 25 °С.

## 3. Результаты и их обсуждение

Ватт-амперные характеристики (ВтАХ) исследованных лазеров обоих типов представлены на рис.2. Видно, что пороговые токи лазеров близки, но наклоны их ВтАХ различаются уже на начальном участке. Повышение дифференциальной квантовой эффективности лазера с асимметричным волноводом связывается с использованием КЯ увеличенной энергетической глубины. По мере увеличения тока накачки ВтАХ лазера со смещенными КЯ насыщается в меньшей степени, что обусловлено снижением внутренних оптических потерь на носителях заряда, накапливаемых в р-волноводе. Максимально достижимая оптическая мощность при токе накачки 11.5 А, ширине полоскового контакта  $w = 100$  мкм и длине резонатора  $L = 2000$  мкм у образцов с симметричным волноводом составляла 3.6 Вт, а у образцов с сильно асимметричным волноводом – 5.0 Вт.

Плотность тока прозрачности ( $J_0 = 120–150$  А/см<sup>2</sup>) и внутренняя квантовая эффективность ( $\eta_i = 0.95–0.96$ ) в изучаемых лазерах оказались близки, а вот уровень внутренних оптических потерь в образце с асимметричным волноводом был ниже ( $\alpha_i = 1.0–1.5$  см<sup>-1</sup>), чем у образца с симметричным волноводом ( $\alpha_i = 2.0–2.5$  см<sup>-1</sup>). Благодаря этому увеличение длины резонатора с 2000 до 3000 мкм благоприятно сказалось на выходной мощности последних.

В импульсном режиме генерации (100 нс, 1 кГц) лазеры с сильно асимметричным волноводом продемонстрировали увеличенную на 50% выходную мощность (рис.3). Так, при токе накачки 60 А,  $w = 100$  мкм и  $L = 3000$  мкм они достигали выходной мощности 16 Вт против 12.5 Вт у образцов с симметричным волноводом. Увеличение тока накачки до 100 А позволило довести выходную мощность образцов с асимметричным волноводом до 19 Вт, тогда как увеличение тока накачки образца с симметричным расширенным волноводом не привело к росту выходной мощности из-за насыщения ВтАХ.

Длина волны генерации исследованных лазеров в зависимости от условий накачки находилась в диапазоне 1450–1480 нм. Типичные спектральные характеристики лазера с асимметричным волноводом в режиме непрерыв-

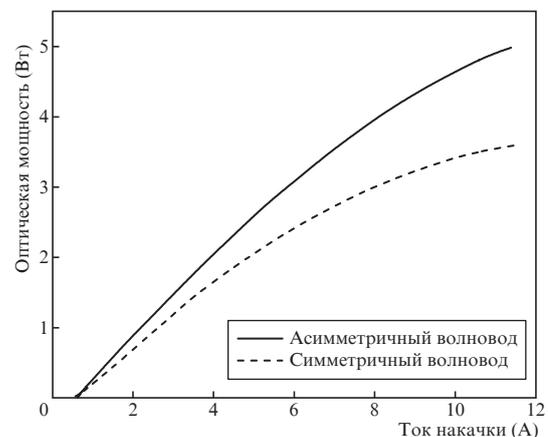


Рис.2. Ватт-амперные характеристики полупроводниковых лазеров на основе AlGaInAs/InP-гетероструктур с асимметричным и симметричным волноводами в непрерывном режиме генерации.

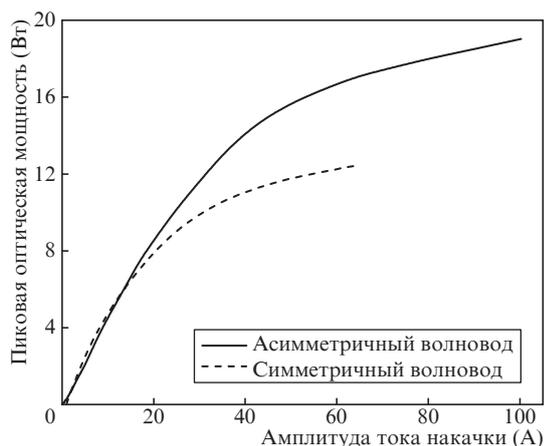


Рис.3. ВТХ полупроводниковых лазеров на основе AlGaInAs/InP-гетероструктур с асимметричным и симметричным волноводами в импульсном режиме генерации (100 нс, 1 кГц).

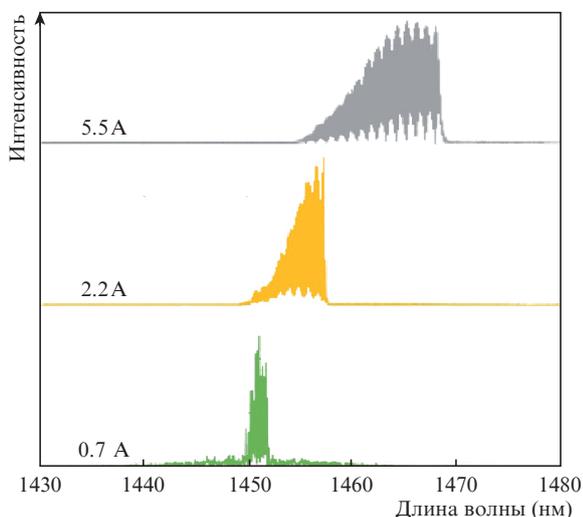


Рис.4. Типичные спектральные характеристики полупроводникового лазера на основе AlGaInAs/InP-гетероструктуры с асимметричным волноводом в непрерывном режиме генерации при токах инжекции 0.7, 2.2 и 5.5 А.

ной генерации при различных уровнях тока накачки приведены на рис.4. Расходимость излучения таких лазеров в дальней зоне по уровню 0.5 в плоскости, перпендикулярной р–п-переходу, составляла 40–43°, а в плоскости, параллельной р–п-переходу, она была равна 7–9°.

Таким образом, проведенные измерения показали, что смещение активной области полупроводникового лазера к Р-эмиттеру, наряду с увеличением энергетической глубины КЯ и уменьшением толщины Р-эмиттера, способствует достижению более высокой выходной мощности. Создание условий для снижения накопления носителей в р-волноводоме и улучшения теплоотвода от активной области позволило получить максимальную выходную мощность 5 Вт в непрерывном режиме генерации на длине волны 1450–1500 нм.

#### 4. Заключение

В настоящей работе представлены результаты сравнительных экспериментальных исследований полупроводниковых лазеров на основе AlGaInAs/InP-гетероструктур с волноводами различной конструкции. В сильно асиммет-

ричном волноводоме смещение КЯ к Р-эмиттеру уменьшенной толщины снижает накопление носителей в р-волноводоме и способствует отводу тепла, а одновременное увеличение глубины КЯ улучшает локализацию электронов в активной области и увеличивает дифференциальную квантовую эффективность. Это способствует повышению выходной мощности этих лазеров приблизительно в 1.5 раза по сравнению с лазерами, имеющими такой же, но симметричный волновод, при одинаковых геометрических размерах излучающей области и токах накачки как в импульсном, так и в непрерывном режимах работы.

Работа выполнена при частичной поддержке программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (договор №02.a03.21.0005).

- Mawst L.J., Bhattacharya A., Lopez J., Botez D., Garbuzov D.Z., DeMarco L., Connolly J.C., Jansen M., Fang F., Nabiev R.F. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 1532 (1996).
- Pikhtin N.A., Slipchenko S.O., Sokolova Z.N., Stankevich A.L., Vinokurov D.A., Tarasov I.S., Alferov Zh.I. *Electron. Lett.*, **40**, 1413 (2004).
- Pietrzak A., Crump P., Wenzel H., Erbert G., Bugge F., Trankle G. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **17**, 1715 (2011).
- Шашкин И.С., Винокуров Д.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Растегаева М.Г., Соколова З.Н., Слипенченко С.О., Станкевич А.Л., Шамахов В.В., Веселов Д.А., Бондарев А.Д., Тарасов И.С. *ФТП*, **46**, 1230 (2012) [*Semicond.*, **46**, 1211 (2012)].
- Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Андреев А.Ю., Телегин К.Ю., Яроцкая И.В., Мешков А.С., Коляев В.П., Сапожников С.М., Лебедева Е.И., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **43**, 895 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 895 (2013)].
- Asryan L.V., Kryzhanovskaya N.V., Maximov M.V., Egorov A.Yu., Zhukov A.E. *Semicond. Sci. Technol.*, **26**, 055025 (2011).
- Garrod T., Olson D., Klaus M., Zenner C., Galstad C., Mawst L., Botez D. *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 071101 (2014).
- Zubov F.I., Muretova M.E., Asryan L.V., Semenova E.S., Maximov M.V., Zhukov A.E. *J. Appl. Phys.*, **124**, 133105 (2018).
- Syrbu A.V., Yakovlev V.P., Suruceanu G.I., Mereutza A.Z., Mawst L.J., Bhattacharya A., Nesnidal M., Lopez J., Botez D. *Electron. Lett.*, **32**, 352 (1996).
- Walker C.L., Bryce A.C., Marsh J.H. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14**, 1394 (2002).
- Rinner F., Rogg J., Kelemen M., Mikulla M., Weimann G., Tomm J., Thamm E., Poprawe R. *J. Appl. Phys.*, **93**, 1848 (2003).
- Zhao J., Li L., Wang W., Lu Y. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**, 1507 (2003).
- Kanskar M., Earles T., Goodnough T.J., Stiers E., Botez D., Mawst L.J. *Electron. Lett.*, **41**, 245 (2005).
- Kageyama N., Torii K., Morita T., Takauji M., Nagakura T., Maeda J., Miyajima H., Yoshida H. *IEEE J. Quantum. Electron.*, **48**, 991 (2012).
- Ладугин М.А., Коваль Ю.П., Мармалюк А.А., Петровский В.А., Багаев Т.А., Андреев А.Ю., Падалица А.А., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **43**, 407 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 407 (2013)].
- Ryvkin B.S., Avrutin E.A. *J. Appl. Phys.*, **100**, 023104 (2006).
- Веселов Д.А., Шашкин И.С., Бахвалов К.В., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Растегаева М.Г., Слипенченко С.О., Бечвай Е.А., Стрелец В.А., Шамахов В.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **50**, 1247 (2016) [*Semicond.*, **50**, 1225 (2016)].
- 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)].
- 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)].
- 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)].

21. Швейкин В.И., Геловани В.А. *Квантовая электроника*, **32**, 683 (2002) [*Quantum Electron.*, **32**, 683 (2002)].
22. Crump P., Erbert G., Wenzel H., Frevert C., Schultz C.M., Hasler K.-H., Staske R., Sumpf B., Maaßdorf A., Bugge F., Knigge S., Trankle G. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **19**, 1501211 (2013).
23. Веселов Д.А., Шашкин И.С., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Тарасов И.С. *Письма в ЖТФ*, **41**, 10 (2015) [*Techn. Phys. Lett.*, **41**, 263 (2015)].
24. Hallman L.W., Ryvkin B.S., Avrutin E.A., Aho A.T., Viheriala J., Guina M., Kostamovaara J.T. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **31**, 1635 (2019).
25. Жуков А.Е., Гордеев Н.Ю., Шерняков Ю.М., Паюсов А.С., Серин А.А., Кулагина М.М., Минтаиров С.А., Калужный Н.А., Максимов М.В. *ФТП*, **52**, 1351 (2018) [*Semicond.*, **52**, 1462 (2018)].
26. Андреев А.Д., Зегря Г.Г. *ФТП*, **31**, 358 (1997) [*Semicond.*, **31**, 297 (1997)].
27. Hasler K.-H., Wenzel H., Crump P., Knigge S., Maasdorf A., Platz R., Staske R., Erbert G. *Semicond. Sci. Technol.*, **29**, 045010 (2014).
28. Kaul T., Erbert G., Maaßdorf A., Knigge S., Crump P. *Semicond. Sci. Technol.*, **33**, 035005 (2018).
29. Kaul T., Erbert G., Klehr A., Maaßdorf A., Martin D., Crump P. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **25**, 1501910 (2019).
30. Богатов А.П., Гущик Т.И., Дракин А.Е., Некрасов А.П., Поповичев В.В. *Квантовая электроника*, **38**, 935 (2008) [*Quantum Electron.*, **38**, 935 (2008)].
31. Швейкин В.И., Богатов А.П., Дракин А.Е., Курнявко Ю.В. *Квантовая электроника*, **26**, 33 (1999) [*Quantum Electron.*, **29**, 33 (1999)].
32. Дикарева Н.В., Некоркин С.М., Карзанова М.В., Звонков Б.Н., Алешкин В.Я., Дубинов А.А., Афоненко А.А. *Квантовая электроника*, **44**, 286 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 286 (2014)].
33. Ryvkin B.S., Avrutin E.A., Kostamovaara J.T. *Semicond. Sci. Technol.*, **35**, 085008 (2020).
34. Горлачук П.В., Иванов А.В., Курносов В.Д., Курносов К.В., Мармалок А.А., Романцевич В.И., Симаков В.А., Чернов Р.В. *Квантовая электроника*, **48**, 495 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 495 (2018)].
35. Багаева О.О., Данилов А.И., Иванов А.В., Курносов В.Д., Курносов К.В., Курнявко Ю.В., Мармалок А.А., Романцевич В.И., Симаков В.А., Чернов Р.В. *Квантовая электроника*, **49**, 649 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 649 (2019)].
36. Malag A., Dabrowska E., Teodorczyk M., Sobczak G., Kozłowska A., Kalbarczyk J. *IEEE J. Quantum. Electron.*, **48**, 465 (2012).