

# Полупроводниковые InGaAs/AlGaAs/GaAs-лазеры ( $\lambda = 900–920$ нм) с расширенным асимметричным волноводом и улучшенной вольт-амперной характеристикой

Н.А.Волков, Т.А.Багаев, Д.Р.Сабитов, А.Ю.Андреев, И.В.Яроцкая, А.А.Падалица, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, К.В.Бахвалов, Д.А.Веселов, А.В.Лютецкий, Н.А.Рудова, В.А.Стрелец, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин

*Изучены полупроводниковые лазеры на основе двойных гетероструктур отдельного ограничения InGaAs/AlGaAs/GaAs с расширенным асимметричным волноводом. Проведено сравнение экспериментально полученных образцов лазеров с легированными и нелегированными волноводными слоями. Проанализированы различия их вольт-амперных характеристик. Установлено, что снижение последовательного сопротивления и напряжения отсечки вольт-амперной характеристики позволяет отодвинуть момент начала насыщения выходной оптической мощности и увеличить КПД исследованных полупроводниковых лазеров до 70%–72%.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер, асимметричный волновод, легирование, выходная мощность.

## 1. Введение

Полупроводниковые лазеры с повышенной выходной мощностью востребованы для многих практических применений. Традиционно такие приборы базируются на двойных гетероструктурах с отдельным ограничением (РО-ДГС) с одной или несколькими квантовыми ямами (КЯ) в активной области. Для достижения повышенной выходной мощности хорошо зарекомендовали себя конструкции полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом, обеспечивающим снижение уровня внутренних оптических потерь, что позволяет повысить дифференциальную квантовую эффективность и использовать лазеры с увеличенной длиной резонатора [1–3]. Дополнительным преимуществом такой конструкции является снижение плотности лазерного излучения на гранях резонатора, что отодвигает предел достижения катастрофической оптической деградации зеркал.

К сожалению, использование расширенных волноводов может приводить к повышению последовательного сопротивления структуры и, как следствие, к увеличенному тепловыделению, что снижает КПД полупроводниковых лазеров и ограничивает их максимально достижимую выходную мощность. Более того, в [4] отмечалось повышение напряжения отсечки вольт-амперной характеристики (ВАХ) при увеличении ширины волновода, что также не-

гативно сказывается на величине КПД и ухудшает температурные характеристики лазеров.

В [5, 6] показано, что одной из важных причин насыщения выходной оптической мощности полупроводниковых лазеров с ростом тока накачки в непрерывном режиме генерации выступает делокализация носителей заряда из активной области в волноводные слои. При этом особую роль играют выброс и накопление электронов в р-части волновода [7, 8]. Авторы [9] продемонстрировали, что действенной мерой снижения делокализации носителей заряда в волновод является увеличение энергетической глубины КЯ. Применительно к гетероструктурам InGaAs/AlGaAs/GaAs реализация такого подхода осуществляется путем использования широкозонных волноводных слоев AlGaAs с увеличенной мольной долей AlAs. Однако, наряду с увеличением ширины запрещенной зоны по мере роста мольной доли AlAs в слоях AlGaAs, увеличивается их последовательное электрическое и тепловое сопротивление, что негативно сказывается на температурной стабильности лазеров.

Одним из путей реализации преимуществ расширенных волноводов в таких условиях является создание лазерных гетероструктур с легированным волноводом. Легирование волноводных слоев позволяет снизить последовательное сопротивление и уменьшить рабочее напряжение полупроводникового лазера. При этом выбор профиля легирования способен обеспечить достаточно низкий уровень внутренних оптических потерь [10]. Гетероструктуры с легированными волноводами успешно использованы при создании полупроводниковых лазеров с длинами волн излучения от 800 до 1550 нм [7, 10–15]. В каждом случае предложенные профили легирования волноводных слоев варьировались в зависимости от выбранной системы материалов и конструкции лазерной гетероструктуры в целом.

В [16, 17] представлены результаты исследования температурной стабильности пороговой плотности тока и делокализации носителей заряда в полупроводниковых

Н.А.Волков, Т.А.Багаев, Д.Р.Сабитов, А.Ю.Андреев, И.В.Яроцкая, А.А.Падалица, М.А.Ладугин. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: volkov\_n\_a@mail.ru  
А.А.Мармалюк. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31  
К.В.Бахвалов, Д.А.Веселов, А.В.Лютецкий, Н.А.Рудова, В.А.Стрелец, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26

лазерах с расширенным асимметричным волноводом, излучающих в спектральном диапазоне 900–920 нм. Настоящая работа направлена на улучшение ВАХ таких лазеров с целью повышения их выходной оптической мощности и КПД.

## 2. Конструкция лазеров

РО-ДГС InGaAs/AlGaAs/GaAs формировались методом МОС-гидридной эпитаксии. Базовая конструкция гетероструктуры взята из [17]. Активная область состояла из двух КЯ InGaAs, асимметрично расположенных в расширенном волноводе AlGaAs. Исследовались образцы с преднамеренно нелегированными  $((1-5) \times 10^{15} \text{ см}^{-3})$  и легированными  $(10^{16}-10^{17} \text{ см}^{-3})$  волноводными слоями. Для образцов с легированными волноводами использовались более узкозонные волноводные слои  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ , а для образцов с нелегированными волноводами – более широкозонные  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . Ширина асимметричного волновода и состав эмиттерных слоев выбирались для обеспечения расходимости излучения в районе  $30^\circ$  по быстрой оси по уровню 0.5. Из полученных гетероструктур изготавливались полупроводниковые лазеры с полосковым контактом шириной 100 мкм. Длина резонатора составляла 3 мм. На грани резонатора наносились просветляющие и отражающие покрытия с коэффициентами отражения  $R_1 \approx 0.05$  и  $R_2 \approx 0.95$ . Монтаж кристалла осуществлялся на медный теплоотвод. Выходные характеристики лазеров изучались в непрерывном режиме работы при температуре теплоотвода  $25^\circ\text{C}$ .

## 3. Результаты и их обсуждение

В полупроводниковых лазерах с расширенными волноводами значительная часть электромагнитного излучения распространяется в пределах именно волноводных слоев, которые для обеспечения низкого уровня оптических потерь, как правило, преднамеренно не легируются. При этом насыщение выходной оптической мощности в непрерывном режиме генерации таких лазеров имеет тепловую природу и зависит от КПД излучателя и условий отвода тепла от активной области. В этом случае увеличенная толщина волноводных слоев может приводить к повышению последовательного сопротивления и ухудшать температурные характеристики полупроводниковых лазеров. Вместе с тем легирование волноводных слоев способно обеспечить баланс между снижением последовательного сопротивления и повышением внутренних оптических потерь. Поэтому в настоящей работе исследовались полупроводниковые лазеры как с нелегированным, так и с легированным асимметричным расширенным волноводом.

При поиске путей улучшения ВАХ без существенного ухудшения излучательных характеристик в гетероструктуре с легированными волноводами использовались более узкозонные волноводные и эмиттерные слои. В этом случае энергетическая глубина КЯ для электронов хотя и стала меньше, чем у структуры с нелегированными волноводами, но все равно превысила 230 мэВ, что достаточно для ослабления действия эффекта делокализации носителей [18]. Ожидалось, что снижение мольной доли AlAs в слоях лазерной AlGaAs-гетероструктуры, наряду с легированием волноводов, будет способствовать улучшению ВАХ таких приборов.

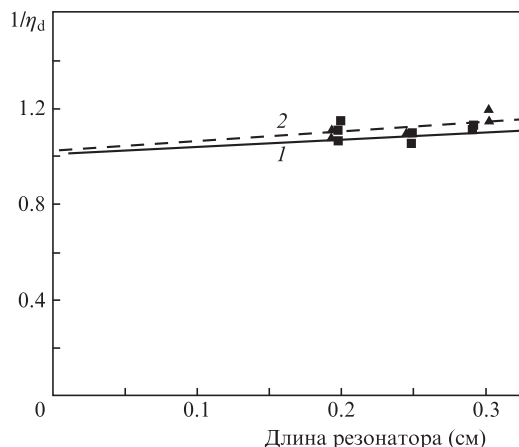


Рис.1. Зависимости обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с нелегированным (1) и легированным (2) расширенным асимметричным волноводом.

Плотность тока прозрачности у излучателей с нелегированным волноводом ( $J_0 = 160-190 \text{ A/см}^2$ ) оказалась слегка ниже, чем у образцов с легированным волноводом ( $J_0 = 180-210 \text{ A/см}^2$ ), тогда как внутренняя квантовая эффективность ( $\eta_i = 0.95-0.98$ ) и уровень внутренних оптических потерь ( $\alpha_i = 0.2-0.4 \text{ см}^{-1}$ ) в изученных лазерах обоих типов оказались близки. На рис.1 представлены экспериментальные зависимости обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора исследованных образцов, которые позволили определить величину внутреннего квантового выхода и внутренних оптических потерь.

Несмотря на легирование волноводов, внутренние оптические потери в образцах благодаря выбранному профилю легирования практически не увеличились. При этом лазеры с легированным волноводом продемонстрировали снижение последовательного сопротивления (у них  $R_s = 55-70 \text{ МОм}$  по сравнению с  $R_s = 95-110 \text{ МОм}$  у лазеров с нелегированным волноводом) и уменьшение напряжения отсечки ( $U_0 = 1.41-1.44 \text{ В}$  против  $1.50-1.53 \text{ В}$ ) ВАХ (рис.2).

Улучшение ВАХ, при прочих равных условиях, должно способствовать снижению насыщения выходной опти-

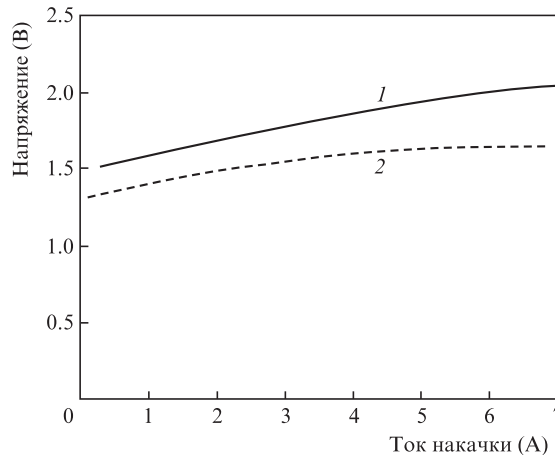


Рис.2. ВАХ полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с нелегированным (1) и легированным (2) расширенным асимметричным волноводом.

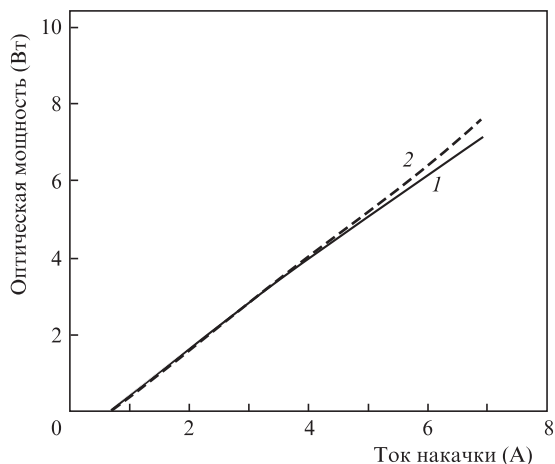


Рис.3. ВтАХ полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с нелегированным (1) и легированным (2) расширенным асимметричным волноводом.

ческой мощности при больших токах накачки благодаря увеличению КПД. На рис.3 представлены ватт-амперные характеристики (ВтАХ) исследованных излучателей.

Видно, что снижение последовательного сопротивления и уменьшение напряжения отсечки у лазеров с легированным волноводом при сохранении уровня внутренних оптических потерь способствует сохранению наклона ВтАХ при большем уровне накачки. Характер насыщения ВтАХ с ростом тока накачки хорошо виден на рис.4.

Длина волны генерации исследованных лазеров находилась в диапазоне 900–920 нм в зависимости от условий накачки, результаты измерений представлены на рис.5. Разность наклонов кривых указывает на более высокую тепловую нагрузку активной области лазера с нелегированным волноводом по сравнению с легированным. Данный результат хорошо соотносится с результатами анализа зависимости наклона ВтАХ исследованных лазеров.

Отметим, что максимальный КПД образцов с легированным расширенным асимметричным волноводом достигал 70%–72%, тогда как у образцов с нелегированным волноводом лишь 55%–60%.

Расходимость излучения исследованных лазеров с нелегированным волноводом в дальней зоне по уровню 0.5

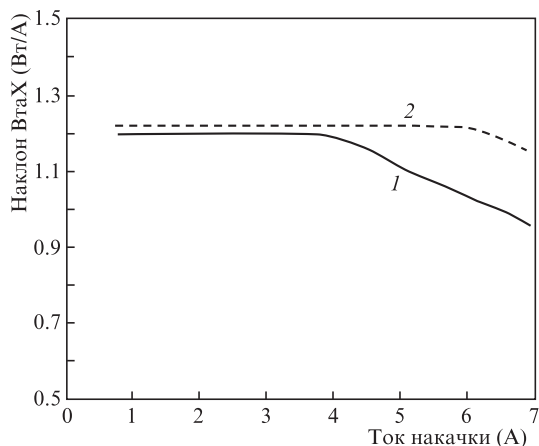


Рис.4. Зависимости наклона ВтАХ полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с нелегированным (1) и легированным (2) расширенным асимметричным волноводом от тока накачки в непрерывном режиме генерации.

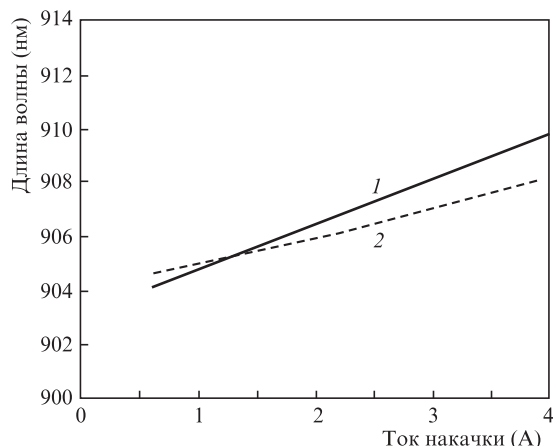


Рис.5. Зависимости длины волны генерации от тока накачки лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с нелегированным (1) и легированным (2) расширенным асимметричным волноводом в непрерывном режиме работы.

в плоскости, перпендикулярной р–п-переходу, составляла 30–32°, а в плоскости, параллельной р–п-переходу, она была равна 3–15°. В то же время у лазеров с легированным волноводом расходимость в плоскости, перпендикулярной р–п-переходу, равнялась 28–30°, а в параллельной ему плоскости она составляла 3–8°.

Настоящее исследование показало, что снижение последовательного сопротивления и напряжения отсечки способствует более длительному сохранению наклона ВтАХ с ростом тока накачки и реализации более высокой выходной оптической мощности полупроводниковых лазеров с расширенным асимметричным волноводом. Несмотря на снижение энергетического барьера для электронов в КЯ, улучшение ВАХ способствует уменьшению саморазогрева лазера при больших рабочих токах и сдерживает процесс делокализации носителей заряда из активной области в волновод. Подобный подход повышения выходной мощности, в том числе благодаря улучшению ВАХ, хорошо себя зарекомендовал и для полупроводниковых лазеров со сверхузким и сильно асимметричным типом волновода [19, 20].

Итак, проведенное в настоящей работе исследование выходных характеристик полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с улучшенными вольт-амперными характеристиками показало, что использование гетероструктур со сниженной мольной долей AlAs в слоях AlGaAs и с умеренно легированными волноводами ( $10^{16}\text{--}10^{17}$  см<sup>-3</sup>) способствует реализации преимуществ расширенного волновода и позволяет увеличить КПД таких лазеров до 70%–72%.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (дог. № 02.а03.21.0005).

1. 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).
2. 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).
3. Pietrzak A., Crump P., Wenzel H., Erbert G., Bugge F., Trankle G. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **17**, 1715 (2011).
4. Botez D., Mawst L.J., Bhattacharya A., Lopez J., Li J., Kuech T.F., Iakovlev V.P., Suruceanu G.I., Caliman A., Syrbu A.V. *Electron. Lett.*, **32**, 2012 (1996).

5. Wenzel H., Crump P., Pietrzak A., Wang X., Erbert G., Tränkle G. *New J. Phys.*, **12**, 085007 (2010).
6. Соколова З.Н., Веселов Д.А., Пихтин Н.А., Тарасов И.С., Асрян Л.В. *ФТП*, **51**, 998 (2017) [*Semicond.*, **51**, 959 (2017)].
7. Crump P., Erbert G., Wenzel H., Frevert C., Schultz C.M., Hasler K.-H., Staske R., Sumpf B., Maaßdorf A., Bugge F., Knigge S., Tränkle G. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **19**, 1501211 (2013).
8. Avrutin E.A., Ryvkin B.S. *J. Appl. Phys.*, **113**, 113108 (2013).
9. Шашкин И.С., Винокуров Д.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Рудова Н.А., Соколова З.Н., Слипченко С.О., Станкевич А.Л., Шамахов В.В., Веселов Д.А., Бахвалов К.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **46**, 1230 (2012) [*Semicond.*, **46**, 1211 (2012)].
10. Kanskar M., Goodnough T., Stiers E., Botez D., Mawst L.J. *Electron. Lett.*, **41**, 245 (2005).
11. Zhao J., Li L., Wang W., Lu Y. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**, 1507 (2003).
12. Kanskar M., Earles T., Goodnough T.J., Stiers E., Botez D., Mawst L.J. *Electron. Lett.*, **41**, 245 (2005).
13. Kageyama N., Torii K., Morita T., Takauji M., Nagakura T., Maeda J., Miyajima H., Yoshida H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **48**, 991 (2012).
14. Garrod T., Olson D., Klaus M., Zenner C., Galstad C., Mawst L., Botez D. *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 071101 (2014).
15. Телегин К.Ю., Ладугин М.А., Андреев А.Ю., Яроцкая И.В., Волков Н.А., Падалица А.А., Лобинцов А.В., Апарников А.Н., Сапожников С.М., Мармалюк А.А. *Квантовая электроника*, **50**, 489 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 489 (2020)].
16. Ладугин М.А., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Пихтин Н.А., Подоскин А.А., Рудова Н.А., Слипченко С.О., Шашкин И.С., Бондарев А.Д., Тарасов И.С. *ФТП*, **44**, 1417 (2010) [*Semicond.*, **44**, 1370 (2010)].
17. Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Шашкин И.С., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Подоскин А.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **44**, 1411 (2010) [*Semicond.*, **44**, 1365 (2010)].
18. Пихтин Н.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Шамахов В.В., Шашкин И.С., Бондарев А.Д., Вавилова Л.С., Тарасов И.С. *ФТП*, **48**, 1377 (2014) [*Semicond.*, **48**, 1342 (2010)].
19. Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Горлачук П.В., Ладугин М.А., Падалица А.А., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Веселов Д.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **47**, 272 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 272 (2017)].
20. Волков Н.А., Андреев А.Ю., Яроцкая И.В., Рябоштан Ю.Л., Светогоров В.Н., Ладугин М.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Веселов Д.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **51**, 133 (2021) [*Quantum Electron.*, **51**, 133 (2021)].