

Влияние легирования волновода на выходные характеристики лазерных излучателей на основе AlGaAs/GaAs

К.Ю.Телегин, М.А.Ладугин, А.Ю.Андреев, И.В.Яроцкая, Н.А.Волков,
А.А.Падалица, А.В.Лобинцов, А.Н.Апарников, С.М.Сапожников, А.А.Мармалюк

Проанализировано влияние легирования волноводных слоев на выходные характеристики лазерных излучателей на основе двойных гетероструктур раздельного ограничения AlGaAs/GaAs. Изучены гетероструктуры с узким и расширенным волноводами. Экспериментально получены образцы линеек лазерных диодов с нелегированными и легированными волноводными слоями, и проведено их сравнение. Показано, что последний вариант конструкции структур с расширенным волноводом позволяет при прочих равных условиях увеличить выходную мощность линеек лазерных диодов на 10%–15%.

Ключевые слова: полупроводниковый лазер, линейка лазерных диодов, волновод, легирование, выходная мощность.

1. Введение

В настоящее время одной из важных областей применения полупроводниковых лазерных диодов (ЛД) является их использование в качестве источников излучения накачки (диодная накачка) твердотельных и волоконных лазеров, что позволяет существенно повысить эффективность накачиваемых лазеров, снизить их массогабаритные параметры и энергопотребление. Все это требует разработки ЛД, излучающих на совпадающей с полосой поглощения активной среды длине волны и имеющих повышенную выходную мощность и повышенный КПД. В частности, для диодной накачки YAG:Nd³⁺-лазеров широкое распространение получили линейки и решетки ЛД на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, излучающие в районе 808 нм.

Традиционно в ЛД используются двойные гетероструктуры раздельного ограничения с одной или несколькими квантовыми ямами. Для достижения повышенной выходной мощности хорошо зарекомендовали себя конструкции с расширенным волноводом, позволяющим снизить уровень внутренних оптических потерь и тем самым повысить дифференциальную квантовую эффективность. При этом для уменьшения рассеяния на свободных носителях волноводные слои, как правило, преднамеренно не легируются [1–3]. В этом случае максимальная оптическая мощность ограничивается в основном рассеянием на свободных носителях, которые накапливаются в части волновода, примыкающей к р-эмиттеру (при этом роль других механизмов насыщения выходной мощности за-

метно меньше) [4, 5]. Вместе с тем низкая концентрация носителей в волноводных слоях может приводить к повышению последовательного сопротивления диода и, как следствие, к увеличению тепловыделения, что снижает КПД лазера и ограничивает его максимально достижимую выходную мощность. Особенно этот эффект проявляется в слоях р-типа проводимости [6, 7]. Более того, авторы [8] отмечали повышение напряжения отсечки вольт-амперной характеристики (ВАХ) при увеличении ширины волновода, что также негативно сказывается на величине КПД и ухудшает температурные характеристики ЛД. Негативное влияние расширенного нелегированного волновода особенно сказывается в многоэлементных приборах с увеличенным тепловыделением (линейках и решетках ЛД), что заставляет пересмотреть взгляды на оптимальные значения ширины волноводных слоев для тех или иных применений в сторону их уменьшения, особенно для волноводных слоев, примыкающих к р-эмиттеру [7, 9–14].

В этой ситуации одним из способов реализации преимуществ расширенных волноводов в многоэлементных лазерных излучателях является создание лазерных гетероструктур с легированным волноводом. При этом должно осуществляться профильное легирование волноводных слоев на относительно низком уровне (10^{16} – 10^{17} см⁻³), что позволяет уменьшить напряжение отсечки ВАХ и понизить последовательное сопротивление диода при незначительном увеличении внутренних оптических потерь [15, 16]. В [4] дополнительно отмечается, что увеличение уровня легирования р-волновода позволяет снизить токовые утечки и уменьшить насыщение ватт-амперной характеристики (ВтАХ). Такой подход был опробован при создании ЛД с длинами волн излучения от 800 до 1550 нм [7, 16–20]. В каждом случае предложенные профили легирования волноводных слоев варьировались в зависимости от выбранной системы материалов и конструкции лазерной гетероструктуры в целом.

Настоящая работа посвящена изучению влияния легирования волноводов различной ширины на выходные характеристики линеек ЛД на основе AlGaAs/GaAs, излучающих в районе 808 нм.

К.Ю.Телегин, М.А.Ладугин, А.Ю.Андреев, И.В.Яроцкая, Н.А.Волков, А.А.Падалица, А.В.Лобинцов, А.Н.Апарников, С.М.Сапожников. АО «НИИ “Полос” им. М.Ф.Степанаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1; e-mail: k.telegin@splus.ru
А.А.Мармалюк. АО «НИИ “Полос” им. М.Ф.Степанаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 24 января 2020 г.

2. Эксперимент и обсуждение его результатов

Лазерные квантоворазмерные гетероструктуры AlGaAs/GaAs раздельного ограничения формировались методом МОС-гидридной эпитаксии. Активная область содержала одну квантовую яму, окруженную волноводными слоями $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, что обеспечивает повышенную квантовую эффективность линеек ЛД [9]. Ширина волновода AlGaAs варьировалась от 0.3 до 1.5 мкм. Исследовались образцы с преднамеренно нелегированными $((1-5) \times 10^{15} \text{ см}^{-3})$ и легированными $((5-10) \times 10^{16} \text{ см}^{-3})$ волноводными слоями. В последнем случае волноводные слои, примыкающие к п-эмиттеру, легировались донорной примесью, а примыкающие к р-эмиттеру – акцепторной примесью. Причем осуществлялось профильное легирование – концентрация примеси в волноводе увеличивалась от границы с активной областью по направлению к границе с эмиттерным слоем. Из полученных гетероструктур изготавливались линейки ЛД длиной 5 мм с коэффициентом заполнения 0.7. На грани резонатора наносились просветляющие и отражающие покрытия с коэффициентами отражения $R_1 \approx 0.05$ и $R_2 \approx 0.95$. Линейки ЛД монтировались на медном теплоотводе и их выходные характеристики изучались в квазинепрерывном (200 мкс, 20 Гц) режиме при температуре теплоотвода 25 °С.

Во многих практических случаях для обеспечения низкого уровня оптических потерь волноводные слои ЛД преднамеренно не легируются. При этом продемонстрировано увеличение максимально достижимой выходной мощности лазеров (в том числе излучающих на длине волны 808 нм) с ростом ширины волновода [21–23]. Вместе с тем в работах [9, 13, 24] отмечено, что при создании линеек ЛД более предпочтительной оказывается геометрия лазерных гетероструктур с узким волноводом или с волноводными слоями, примыкающими к р-эмиттеру, уменьшенной толщины. В таких случаях улучшается отвод тепла от активной области, что особенно значимо в многоэлементных линейках и решетках ЛД.

На рис.1 показаны ВтАХ линеек ЛД с шириной нелегированного волновода 0.3, 0.7 и 1.5 мкм, измеренные в квазинепрерывном режиме работы. Видно, что по мере расширения волновода растет пороговый ток и снижается дифференциальная квантовая эффективность линеек ЛД. Особенно заметно уменьшение наклона ВтАХ для

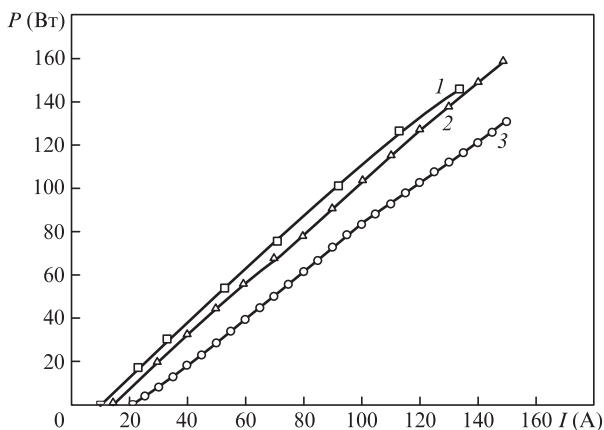


Рис. 1. ВтАХ (200 мкс, 20 Гц) линеек ЛД с нелегированными волноводами шириной 0.3 (1), 0.7 (2) и 1.5 мкм (3).

образца с шириной волновода 1.5 мкм, тогда как у образцов с шириной волновода 0.3 и 0.7 мкм наклоны ВтАХ близки.

Зависимость выходной оптической мощности ЛД от тока накачки I удобно представить в виде [25]:

$$P = \eta_i \frac{\alpha_{\text{ext}}}{\alpha_{\text{ext}} + \alpha_i} \frac{h\nu}{q} (I - I_{\text{th}}), \quad (1)$$

где η_i – внутренний квантовый выход; α_{ext} – оптические потери на выход; α_i – внутренние оптические потери; q – заряд электрона; $h\nu$ – энергия фотона; I_{th} – пороговый ток, а расширение волновода помимо увеличения I_{th} должно одновременно приводить к уменьшению α_i [26] и падению η_i [27]. Снижение α_i будет способствовать повышению дифференциальной квантовой эффективности, а уменьшение η_i , наоборот, – ее снижению. В итоге наклон ВтАХ будет определяться разнонаправленным вкладом указанных параметров и, следовательно, будет сильно зависеть от конструкции лазерной гетероструктуры. В условиях проведенного эксперимента расширение волновода от 0.3 до 0.7 мкм не привело к заметному падению наклона ВтАХ на начальном участке. Вместе с тем расширение волновода снижает плотность оптической мощности на выходном зеркале, что позволяет «отодвинуть» порог катастрофической оптической деградации зеркала и достичь более высокой выходной мощности. Образец с узким волноводом (0.3 мкм) имеет большее значение α_i , но меньшие последовательное и тепловое сопротивления, что позволяет сохранять наклон его ВтАХ до достаточно высоких уровней накачки. Однако при токах свыше 100 А оптические потери в этой линейке ЛД начинают расти, а выходная мощность начинает насыщаться. Расширение волновода до 1.5 мкм приводит к еще большему снижению фактора оптического ограничения в активной области, что увеличивает I_{th} и в совокупности с ростом последовательного электрического и теплового сопротивлений излучателя приводит к более значительному снижению наклона ВтАХ.

Мощные одиночные ЛД, как правило, работают при токах накачки, в десятки (20–30) раз превышающих пороговый ток. В таких условиях различия в пороговом токе лазеров с узкими и расширенными волноводами становятся незначительными. Ситуация заметно меняется в случае линеек ЛД – для них типичные превышения рабочего тока над пороговым током гораздо меньше и, как правило, составляют 5–10 раз. Поэтому линейки ЛД с расширенным волноводом, даже имея более низкие оптические потери, но испытывая повышенную температурную нагрузку из-за увеличенных последовательного электрического и теплового сопротивлений, могут не обеспечить требуемую высокую выходную мощность при таких низких рабочих токах. Поэтому легирование расширенного волновода позволит снизить последовательное сопротивление, а следовательно, и тепловыделение, что должно благоприятно сказаться на повышении выходных характеристик лазерных излучателей [6, 7, 16, 20, 28]. Из-за низкой подвижности дырок особенно значимым является легирование волноводного слоя, примыкающего к р-эмиттеру. При правильном выборе уровня и профиля легирования волноводных слоев использование такого приема позволяет ограничить рост уровня внутренних оптических потерь и добиться повышения выходной мощности и

КПД. Более того, легирование волновода способствует снижению токовых утечек в нем [29], что увеличивает дифференциальную квантовую эффективность.

Сравнение ВТАХ для линеек ЛД с расширенным нелегированным и легированным волноводами приведено на рис.2. Использовались линейки ЛД с волноводом шириной 0.7 мкм. Это позволяет, с одной стороны, снизить внутренние оптические потери по сравнению с потерями в узком волноводе шириной 0.3 мкм и, с другой стороны, лишь незначительно увеличить последовательное и тепловое сопротивление. Среднее значение уровня легирования волноводных слоев составило $\sim 8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. ВТАХ линеек ЛД с легированным расширенным волноводом заметно лучше, в первую очередь, благодаря более высокой эффективности при больших токах накачки. Для лазеров с расширенным волноводом характерно накопление носителей в р-части волновода, приводящее к росту внутренних оптических потерь [30]. Легирование позволяет снизить влияние этого эффекта.

На рис.3 представлены ВТАХ линеек ЛД с расширенным легированным и узким нелегированным волноводами. Как и ожидалось, ЛД с расширенным волноводом имеет больший пороговый ток (это согласуется с рис.1), однако легирование волновода позволило увеличить дифференциальную квантовую эффективность линейки, что не наблюдалось у образцов с нелегированными волноводами

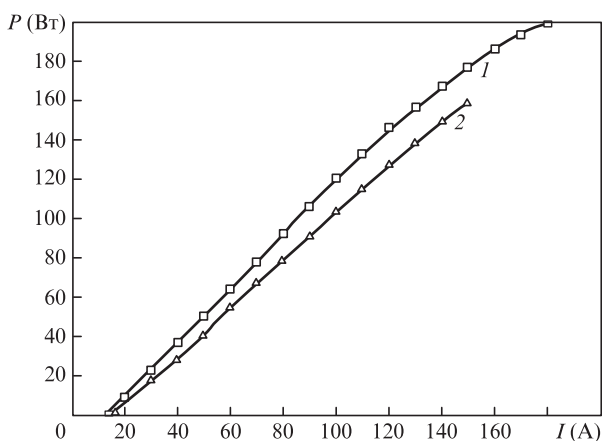


Рис.2. ВТАХ (200 мкс, 20 Гц) линеек ЛД с расширенными (0.7 мкм) легированным (1) и нелегированным (2) волноводами.

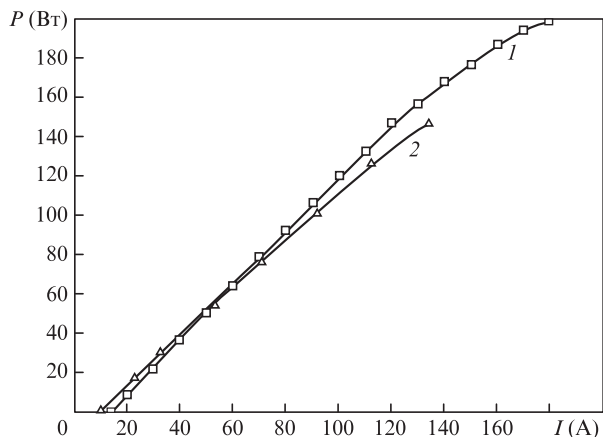


Рис.3. ВТАХ (200 мкс, 20 Гц) линеек ЛД с расширенным легированным (1) и с узким (0.3 мкм) нелегированным (2) волноводами.

различной ширины. У легированных ЛД меньше изгиб зон в волноводной области и, следовательно, меньше накопление носителей и ниже оптические потери.

Таким образом, можно заключить, что, наряду с другими подходами повышения мощности линеек ЛД, использование легированных волноводов увеличенной ширины позволяет сбалансированно использовать локальные преимущества узких и расширенных волноводов для создания излучателей с повышенной эффективностью. Так, гетероструктуры с легированными волноводами позволили создать линейки ЛД с КПД свыше 70% [31] и решетки ЛД с КПД свыше 60% [32].

Итак, проведенные исследования влияния легирования волновода на выходные характеристики линеек ЛД на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs показали, что использование умеренно легированных волноводных слоев ($(5-10) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) способствует реализации преимуществ расширенного волновода и позволяет увеличить выходную мощность линеек ЛД на 10%–15% при прочих равных условиях.

Работа выполнена при частичной поддержке программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (дог. №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).
- Wenzel H., Crump P., Pietrzak A., Wang X., Erbert G., Tränkle G. *New J. Phys.*, **12**, 085007 (2010).
- Piprek J., Li Z.-M. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **30**, 963 (2018).
- Avrutin E.A., Rvkin B.S. *J. Appl. Phys.*, **113**, 113108 (2013).
- 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).
- 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).
- 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)].
- Rvkin B.S., Avrutin E.A., Kostamovaara J.T. *J. Appl. Phys.*, **114**, 013104 (2013).
- 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)].
- Crump P., Frevert C., Ginolas A., Knigge S., Maaßdorf A., Lotz J., Fassbender W., Neukum J., Körner J., Töpfer T., Pranovich A., Divoky M., Lucianetti A., Mocek T., Ertel K., De Vido M., Erbert G., Tränkle G. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **27**, 1663 (2015).
- Kaul T., Erbert G., Maaßdorf A., Knigge S., Crump P. *Semicond. Sci. Technol.*, **33**, 035005 (2018).
- Жуков А.Е., Гордеев Н.Ю., Шерняков Ю.М., Паюсов А.С., Серин А.А., Кулагина М.М., Минтаилов С.А., Калужный Н.А., Максимов М.В. *Физика и техника полупроводников*, **52**, 1351 (2018) [*Semiconductors*, **52**, 1462 (2018)].
- Безотосный В.В., Кумыков Х.Х., Маркова Н.В. *Квантовая электроника*, **24**, 495 (1997) [*Quantum Electron.*, **27**, 481 (1997)].
- Kanskar M., Goodnough T., Stiers E., Botez D., Mawst L.J. *Proc. ICALOE 2005* (Miami, USA, 2005, p. 401).
- Zhao J., Li L., Wang W., Lu Y. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **15**, 1507 (2003).

18. Kanskar M., Earles T., Goodnough T.J., Stiers E., Botez D., Mawst L.J. *Electron. Lett.*, **41**, 245 (2005).
19. Kageyama N., Torii K., Morita T., Takauji M., Nagakura T., Maeda J., Miyajima H., Yoshida H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **48**, 991 (2012).
20. Garrod T., Olson D., Klaus M., Zenner C., Galstad C., Mawst L., Botez D. *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 071101 (2014).
21. Wade J.K., Mawst L.J., Botez D., Nabiev R.F., Jansen M., Morris J.A. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 4 (1998).
22. Knauer A., Erbert G., Staske R., Sumpf B., Wenzel H., Weyers M. *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, 621 (2005).
23. Андреев А.Ю., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Налет Т.А., Падалица А.А., Пихтин Н.А., Сабитов Д.Р., Симаков В.А., Слипенченко С.А., Хомылев М.А., Тарасов И.С. *Физика и техника полупроводников*, **40**, 628 (2006) [*Semiconductors*, **40**, 611 (2006)].
24. Malag A., Dabrowska E., Teodorczyk M., Sobczak G., Kozłowska A., Kalbarczyk J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **48**, 465 (2012).
25. Coldren L.A., Corzine S.W. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits. Second Edition* (Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012).
26. Пихтин Н.А., Слипенченко С.О., Соколова З.Н., Тарасов И.С., *Физика и техника полупроводников*, **38**, 374 (2004) [*Semiconductors*, **38**, 360 (2004)].
27. Ryvkin B.S., Avrutin E.A. *J. Appl. Phys.*, **97**, 113106 (2005).
28. Fecioru A., Boohan N., Justice J., Gocalinska A., Pelucchi E., Gubbins M., Mooney M., Corbett B. *Semicond. Sci. Technol.*, **31**, 045002 (2016).
29. Bulashevich K.A., Mymrin V.F., Karpov S.Yu., Demidov D.M., Ter-Martirosyan A.L. *Semicond. Sci. Technol.*, **22**, 502 (2007).
30. Avrutin E.A., Ryvkin B.S., Payusov A.S., Serin A.A., Gordeev N.Y. *Semicond. Sci. Technol.*, **30**, 115007 (2015).
31. Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Багаев Т.А., Андреев А.Ю., Телегин К.Ю., Лобинцов А.В., Давыдова Е.И., Сапожников С.М., Данилов А.И., Подкопаев А.В., Иванова Е.Б., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **47**, 291 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 291 (2017)].
32. Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Телегин К.Ю., Лобинцов А.В., Сапожников С.М., Данилов А.И., Подкопаев А.В., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **47**, 693 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 693 (2017)].