

Решетки лазерных диодов на основе квантоворазмерных гетероструктур AlGaAs/GaAs с КПД до 62%

М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица, К.Ю.Телегин, А.В.Лобинцов, С.М.Сапожников, А.И.Данилов, А.В.Подкопаев, В.А.Симаков

Продемонстрированы результаты создания решеток лазерных диодов, работающих в квазинепрерывном режиме на длине волны 808 нм с высоким КПД. Излучатели были изготовлены на основе полупроводниковых квантоворазмерных гетероструктур AlGaAs/GaAs, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Приведены данные измерений спектральных, пространственных, электрических и мощностных характеристик. Выходная оптическая мощность излучателя с размерами тела свечения 5×10 мм составляла 2.7 кВт при рабочем токе накачки 100 А, максимальный КПД достигал 62%.

Ключевые слова: решетки лазерных диодов, КПД, квантоворазмерные гетероструктуры, МОС-гидридная эпитаксия, AlGaAs/GaAs.

1. Введение

В работе [1] описаны мощные и высокоэффективные линейки лазерных диодов (ЛЛД) спектрального диапазона 800–810 нм, полученные в результате совершенствования ряда технологий – МОС-гидридной эпитаксии квантоворазмерных гетероструктур (ГС), формирования активного элемента и монтажа ЛЛД на теплоотвод [2–5]. В итоге стало возможным более энергоэффективное использование подобных многоэлементных полупроводниковых излучателей в современных системах накачки, обработки материалов и передачи информации.

Известно, что для большинства практических применений необходима высокая плотность выходной оптической мощности лазерных излучателей, составляющая в настоящее время не менее 1 кВт/см² [6]. Постоянно растущие требования к конструируемым изделиям квантовой электроники, например к системам полупроводниковой накачки активных сред твердотельных лазеров на основе алюмо-иттриевого граната с неодимом (YAG: Nd³⁺), привели к тому, что импульсные излучатели с длиной волны 808 нм должны иметь выходную оптическую мощность на уровне 2–3 кВт и площадь тела свечения 0.5–2.0 см². Следовательно, желаемая плотность выходной оптической мощности в этом случае может достигать 5 кВт/см². Очевидно, что для удовлетворения таким серьезным требованиям необходимо обращать пристальное внимание и на тепловую нагрузку, которой подвергаются полупроводниковые линейки и решетки лазерных диодов (РЛД) в рабочем режиме квазинепрерывной накачки. Сущест-

венная нагрузка на теплоотводящую конструкцию обусловлена плотной упаковкой активных излучающих каналов генерации (фактор заполнения, как правило, превышает 70%) и большим количеством ЛЛД в решетке.

В связи с этим настоящая работа посвящена разработке, изготовлению и экспериментальному исследованию РЛД с улучшенными мощностными и спектральными характеристиками, а также достижению высокого КПД излучателя.

2. Результаты экспериментов

Эпитаксиальные ГС Al_xGa_{1-x}As/GaAs с одной квантовой ямой были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии, хорошо себя зарекомендовавшим при производстве изделий в промышленном масштабе. Гетероструктура, оптимизированная из расчета обеспечения минимальных оптических потерь, напряжения отсечки и последовательного электрического сопротивления, описана в [1]. С этой целью выбирались такие толщины волноводящих слоев, которые позволяли получать внутренние оптические потери на уровне 0.5–1.0 см⁻¹. Для оптимизации электрического и теплового сопротивлений структуры ее общая толщина не должна превышать 4 мкм. Более того, увеличение толщины ГС может приводить к искривлению эпитаксиальной пластины и, соответственно, к технологическим трудностям, возникающим на этапе монтажа активного элемента на теплоотвод [7]. В результате разработанная конструкция и технология получения квантоворазмерной активной области с ограничивающими ее барьерными слоями Al_xGa_{1-x}As позволила обеспечить малую пороговую плотность тока прозрачности ($j_{tr} = 120$ А/см²) и высокую внутреннюю квантовую эффективность ($\eta_{int} = 99\%$).

Результаты измерений спектров излучения РЛД (рис.1) свидетельствуют об однородности распределения параметров слоев ГС, т.к. все ЛЛД, изготовленные на ее основе, характеризовались длиной волны $\lambda_{max} \sim 807.5–808.0$ нм, а ширина спектра на полувысоте оставалась неизменной ($\Delta\lambda_{FWHM} \approx 2.3–2.5$ нм). Поскольку положение максиму-

М.А.Ладугин, А.А.Падалица, К.Ю.Телегин, А.В.Лобинцов, С.М.Сапожников, А.И.Данилов, А.В.Подкопаев, В.А.Симаков. АО «НИИ “Полус” им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: M.Ladugin@splus.ru

А.А.Мармалюк. АО «НИИ “Полус” им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 31 мая 2017 г.

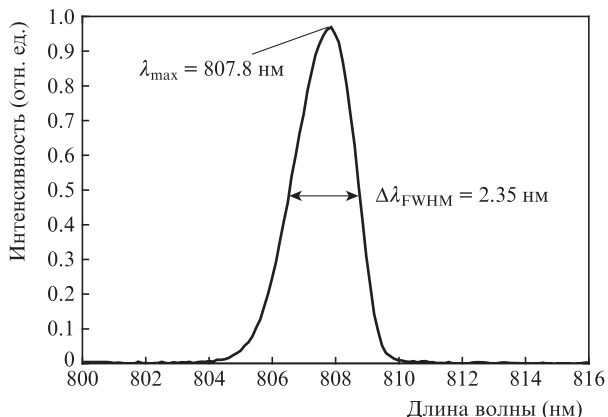


Рис.1. Спектр излучения решетки лазерных диодов с размерами 5×10 мм, работающей в квазинепрерывном режиме накачки (200 мкс, 22 Гц).

ма и ширина спектра излучения имеют большое значение, достигнутый результат позволял обеспечить лучшее спектральное согласование полосы излучения с полосой поглощения материала активной среды твердотельных лазеров на основе YAG: Nd³⁺.

Ряд оптимизаций был проведен на этапе изготовления активных излучающих элементов с низкоомными контактами и повышенной лучевой прочностью зеркальных граней. Параметры конструкции активного элемента, а именно длина резонатора, ширина полоскового контакта, длина ЛЛД и их количество в составе РЛД, были выбраны таким образом, чтобы обеспечивать высокое значение полного КПД излучателя на рабочем токе накачки ($I_p \approx 95-100$ А). В соответствии с этим РЛД представляла собой излучатель шириной 5 мм и высотой 10 мм. Хорошая однородность излучения всех активных элементов разработанной РЛД видна из анализа картины ближнего поля (рис.2).

Для получения малых значений омического сопротивления была использована комбинация слоев металлизации Ti-Pt-Au, а сборка РЛД осуществлялась с применением припоя Au-Sn эвтектического состава на CuW-теплоотводы. Коэффициенты отражения переднего и заднего зеркал лазерного резонатора составляли 0.07 и 0.98 соответственно. С целью снижения скорости безызлучательной рекомбинации на границе между полупроводниковым кристаллом и оптическим покрытием была применена технология ионной обработки излучающей грани в вакуумной камере.

Измерения электрических, мощностных, спектральных и пространственных характеристик проводились в квазинепрерывном режиме накачки ($\tau_{pulse} = 200$ мкс, $f_{pulse} = 20$ Гц). Напряжение отсечки U_0 для РЛД составляло около

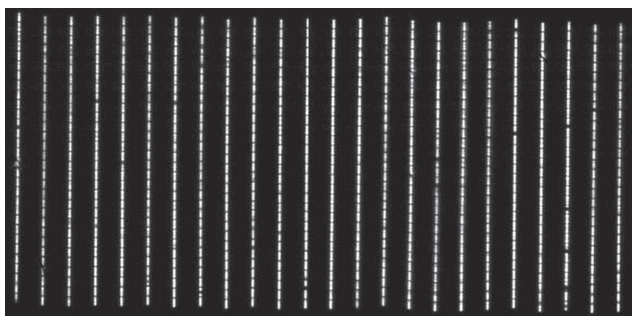


Рис.2. Ближнее поле решетки лазерных диодов с размерами 5×10 мм.

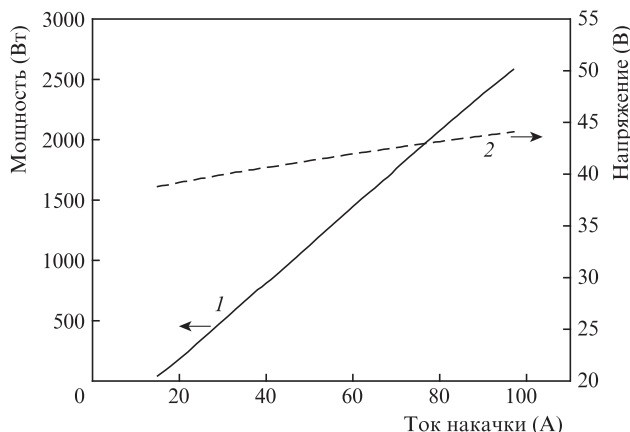


Рис.3. Типичные ватт-амперная (1) и вольт-амперная (2) характеристики решетки лазерных диодов с размерами 5×10 мм.

37.5 В, а последовательное сопротивление R_s находилось на уровне 60 мОм (рис.3). Выходная оптическая мощность изготовленных РЛД с размерами тела свечения 5×10 мм достигала 2.7 кВт при токе накачки 100 А, что почти в два раза больше предельных значений мощности (5.0–5.1 кВт). Наклон ватт-амперной характеристики составил 31–32 Вт/А. В пересчете на одну ЛЛД это 1.3 Вт/А, что практически равно значению, полученному при измерении для отдельной лазерной линейки в [1].

Максимальное значение КПД, зависимость которого от тока показана на рис.4, для большинства образцов составляло 60%–62%. Пороговый ток накачки равнялся 14 А при температуре окружающей среды 20°C. При повышении температуры до 50°C пороговый ток возрастал до 17 А. Параметр T_0 , отражающий эту температурную зависимость, составил 105–110 К, что примерно соответствует значению T_0 для ЛЛД, разработанных в предыдущей работе [1]. Излучатель продемонстрировал хорошую работу при повышенной температуре ($T = 50^\circ\text{C}$), при которой КПД незначительно снижился (до 55%–56%), а эффективная рабочая точка смещалась к току $I_p = 105-107$ А.

Рассчитанное тепловое сопротивление разработанной конструкции РЛД составило примерно 0.5–0.8 К/Вт, а температура активной области превысила температуру теплоотвода всего на 5–10°C. Данное значение оказалось выше указанного для ЛЛД в работе [1] вследствие заметного усложнения процедуры монтажа большого

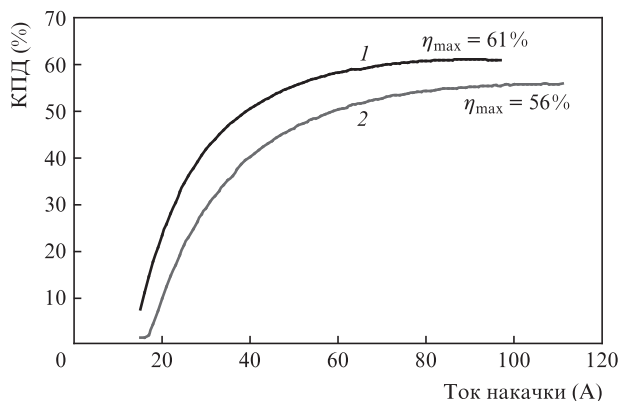


Рис.4. Зависимости КПД решетки лазерных диодов с размерами 5×10 мм от тока накачки при температуре окружающей среды 20°C (1) и 50°C (2).

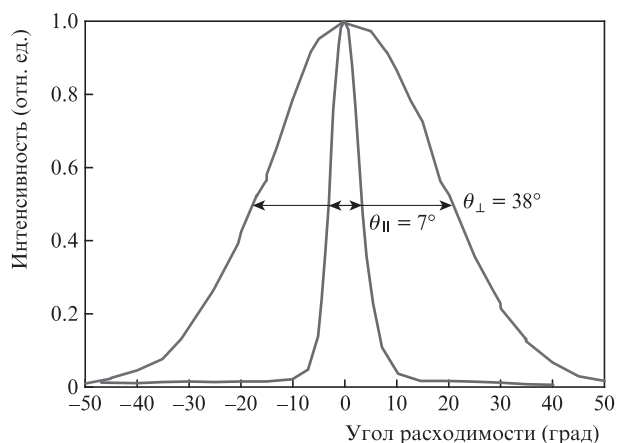


Рис.5. Распределение излучения в дальнем поле.

количества излучающих элементов. Скорость изменения длины волны излучения λ_{\max} с температурой окружающей среды составляла 0.29–0.30 нм/К, при этом ширина спектра на полувывоте в исследованном температурном диапазоне при токах накачки от 20 до 100 А практически не изменялась.

Расходимость излучения в дальней зоне по уровню 0.5 от максимума составила 38° в плоскости, перпендикулярной р–п-переходу (перпендикулярно плоскости эпитаксиальных слоев), и 7° в плоскости р–п-перехода (параллельно плоскости эпитаксиальных слоев) (рис.5). Данные значения соответствовали измеренным для каждой ЛЛД, входящей в состав РЛД.

Совокупным результатом оптимизации технологических этапов стало улучшение параметров разрабатываемого изделия. По сравнению со стандартной конструкцией излучателя имело место повышение внешней дифференциальной эффективности на 10%–15% и снижение последовательного сопротивления и рабочего напряжения на 10%. Полный коэффициент полезного действия РЛД с размерами тела свечения 5×10 мм при температуре теплоотвода 20°C достигал 62% при токе накачки 95 А, что существенно выше ранее достигнутых значений (50%–55%). На настоящий момент результаты продол-

жающихся ресурсных испытаний РЛД демонстрируют их работоспособность в квазинепрерывном режиме на уровне не менее 5×10^8 импульсов без ухудшения выходных параметров.

Итак, в работе предложена и создана усовершенствованная конструкция и технология изготовления мощных РЛД спектрального диапазона 800–810 нм с размерами тела свечения 5×10 мм. Данный многоэлементный лазерный излучатель был получен на основе полупроводниковых квантоворазмерных гетероструктур AlGaAs/GaAs с высоким внутренним квантовым выходом и низкими оптическими потерями. Выходная оптическая мощность РЛД, работающей в квазинепрерывном режиме, составила 2.7 кВт при рабочем токе накачки 100 А, а максимальный КПД большинства образцов был равен 60%–62%.

Работа выполнена при частичной поддержке программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

1. 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)].
2. 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., Слипченко С.О., Хомылев М.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **40**, 628 (2006).
3. Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Андреев А.Ю., Телегин К.Ю., Яроцкая И.В., Мешков А.С., Коняев В.П., Сапожников С.М., Лебедева Е.И., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **43**, 895 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 895 (2013)].
4. 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)].
5. Мармалюк А.А., Андреев А.Ю., Коняев В.П., Ладугин М.А., Лебедева Е.И., Мешков А.С., Морозюк А.Н., Сапожников С.М., Данилов А.И., Симаков В.А., Телегин К.Ю., Яроцкая И.В. *ФТП*, **48**, 120 (2014).
6. Bachmann F., Loosen P., Poprawe R. *High Power Diode Lasers: Technology and Applications* (New York: Springer Series in Opt. Sci., 2007, v. 128, p. 554).
7. Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Яроцкая И.В., Панарин В.А., Микаелян Г.Т. *Квантовая электроника*, **42**, 15 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 15 (2012)].