

## ПИСЬМА

# Линейки лазерных диодов на основе квантоворазмерных гетероструктур AlGaAs/GaAs с КПД до 70 %

М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица, Т.А.Багаев, А.Ю.Андреев,  
К.Ю.Телегин, А.В.Лобинцов, Е.И.Давыдова, С.М.Сапожников,  
А.И.Данилов, А.В.Подкопаев, Е.Б.Иванова, В.А.Симаков

*Представлены результаты разработки и создания линеек лазерных диодов ( $\lambda = 800–810$  нм) на основе квантоворазмерных гетероструктур AlGaAs/GaAs с высоким коэффициентом полезного действия. Повышение внутренней квантовой и внешней дифференциальной эффективности, снижение рабочего напряжения и последовательного сопротивления позволили в совокупности улучшить выходные параметры полупроводникового излучателя, работающего в квазинепрерывном режиме накачки. Выходная мощность для линеек лазерных диодов с поперечной длиной (протяженностью) 5 мм достигала 210 Вт, а КПД был  $\sim 70$  %.*

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

## 1. Введение

Полупроводниковые лазерные излучатели спектрального диапазона 790–810 нм уже давно и широко используются в ключевых направлениях науки и техники. Это касается их многочисленных применений для оптической накачки различных активных сред твердотельных лазеров, в дальнометрии и системах связи (навигация, локация), в автомобиле- и судостроении, в электронной, оптико-механической и других отраслях промышленности. Благодаря улучшению параметров излучателей на основе лазерных диодов, линеек и решеток стало возможным их прямое применение для технологических целей, в результате чего возросла их роль в таких областях, как обработка материалов, медицина и полиграфия.

Значительные успехи при создании мощных полупроводниковых лазеров, обсуждаемых в настоящей работе, были достигнуты благодаря развитию и совершенствованию следующих основных технологических этапов их изготовления: технологии МОС-гидридной эпитаксии высококачественных квантоворазмерных гетероструктур (ГС), технологии формирования активного элемента с повышенной лучевой прочностью выходных граней, технологии сборки линеек лазерных диодов (ЛЛД).

Настоящая работа является продолжением серии исследований и разработок [1–6], направленных на повышение выходной оптической мощности, КПД и температурной стабильности лазерных излучателей, в частности ЛЛД с длиной волны излучения 800–810 нм. Основными

задачами работы являлись выбор оптимальной конструкции и технологии получения квантоворазмерных ГС AlGaAs/GaAs, снижение электрических и тепловых сопротивлений активного элемента для повышения полной эффективности преобразования электрической мощности в оптическую мощность.

## 2. Эксперимент и его результаты

Полупроводниковые ГС  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  с одиночными квантовыми ямами были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии. При проведении серии экспериментов в качестве материала активной области использовались квантовые ямы AlGaAs, GaAsP и InAlGaAs. Волноводные слои варьировались по толщине (от 0.2 до 1.7 мкм) и мольной доле AlAs в тройном твердом растворе  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (от  $x = 0.25$  до 0.55). Особое значение уделялось легированию волноводных, эмиттерных и контактных слоев для обеспечения, с одной стороны, низкого последовательного сопротивления слоев гетероструктуры и, с другой стороны, малых внутренних оптических потерь. Оптимизация всех параметров лазерной ГС проводилась с целью достижения максимального значения полного КПД в рабочей точке, т.е. при токах накачки, обеспечивающих требуемую мощность и длину волны излучения. Кроме того, важно было, чтобы после преодоления точки максимума значения КПД не падало резко (особенно при токах накачки  $I_p \sim 10I_{th}$ ), поэтому помимо высокой внешней дифференциальной эффективности лазерной гетероструктуры обращалось особое внимание на достижение низкого последовательного сопротивления излучателя.

Из известного уравнения, связывающего КПД лазера со значениями тока накачки, порогового тока, напряжения отсечки, последовательного сопротивления и внутренней эффективности, определяемой параметрами резонатора и внутренними потерями [7],

$$\eta_c = \eta_d \frac{h\nu}{q} \frac{I - I_{th}}{I(V_0 + IR_s)}, \quad (1)$$

М.А.Ладугин, А.А.Падалица, Т.А.Багаев, А.Ю.Андреев, К.Ю.Телегин, А.В.Лобинцов, Е.И.Давыдова, С.М.Сапожников, А.И.Данилов, А.В.Подкопаев, Е.Б.Иванова, В.А.Симаков. АО «НИИ «Полос» им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1; e-mail: maximladugin@mail.ru, m.ladugin@siplus.ru  
А.А.Мармалюк. АО «НИИ «Полос» им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

где

$$\eta_d = \eta_i \left( \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_f R_r} \right) / \left( \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_f R_r} \right),$$

можно получить выражение для тока накачки, при котором достигается максимальное значение КПД:

$$I_{\max} = I_{\text{th}} \left( 1 + \sqrt{\frac{V_0}{I_{\text{th}} R_s} + 1} \right). \quad (2)$$

Тогда при ширине контакта ЛЛД  $W = 100$  мкм, длине резонатора  $L = 1000$  мкм, поперечной длине (протяженности) линейки  $l_{\text{LDB}} = 5$  мм, а также при типичных значениях порогового тока  $I_{\text{th}} = 12-14$  А, напряжения отсечки  $V_0 = 1.54-1.60$  В и последовательного сопротивления  $R_s = 3-4$  мОм получим  $I_{\max} \approx 80-90$  А. Если необходимо сместить  $I_{\max}$  в область меньших значений, например к 60–70 А, то следует уменьшить  $L$  или  $W$ . И наоборот, если необходимо сместить данный параметр в область больших значений, например к 110–120 А, то следует увеличить  $L$  или  $W$ . В нашем случае оптимизация лазерного излучателя и выбор указанных параметров осуществлялись для того, чтобы рабочий ток накачки составлял  $\sim 95-100$  А.

Одним из первых шагов в создании эпитаксиальных ГС в настоящей работе был выбор конструкции и технологии выращивания квантоворазмерной активной области, которая предназначена для излучения в данном спектральном диапазоне выполнялась на основе AlGaAs, InAlGaAs и GaAsP. Лучшие результаты в целом продемонстрировали лазеры с более отработанными и проверенными одиночными квантовыми ямами AlGaAs, хотя в ряде экспериментов лазеры с напряженно-сжатыми ямами InAlGaAs и с напряженно-растянутыми ямами GaAsP превосходили их по отдельным параметрам (по пороговому току, наклону ватт-амперной характеристики (ВтАХ) или предельной выходной мощности). Толщина, состав и технологические режимы получения материала квантовой ямы подбирались с учетом обеспечения минимального порога прозрачности и внутренней квантовой эффективности, близкой к 100%.

В предыдущих исследованиях [5,6] было экспериментально продемонстрировано преимущество глубоких квантовых ям, а также узких (0.2–0.4 мкм) волноводов по сравнению с расширенными (1.5–2.5 мкм) в части повышения температурной стабильности параметров линеек, работающих при больших импульсных токах и в широком температурном диапазоне (от  $-40^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$ ). Характеристическая температура  $T_0$  лазерных излучателей на основе ГС с узким волноводом была больше, чем у лазеров с расширенным волноводом [6].

Однако следует отметить и недостатки конструкций ГС с узким волноводом. Предельная выходная оптическая мощность лазерных излучателей на их основе заметно ниже, чем у излучателей, изготовленных из ГС с широким волноводом. Кроме того, поле основной фундаментальной моды глубоко проникает в легированные эмиттерные слои, что приводит к увеличению внутренних оптических потерь на свободных носителях. Эмиттерные инжектирующие слои при этом варианте должны быть достаточной толщины (1.5–2.0 мкм), чтобы эффективно удерживать поле основной моды и не давать ему проникать в контактные слои [8]. При этом сильное увеличение толщины эпитаксиальных слоев нежелательно ввиду затруднения отвода тепла от активной области.

Учитывая преимущества ГС с узкими и расширенными волноводами, в настоящей работе мы предложили конструкцию ГС с промежуточной толщиной волновода (0.6–1.0 мкм). Благодаря квантовой яме с увеличенной энергетической глубиной и соответствующему снижению вероятности делокализации носителей заряда при больших токах накачки (подход, описанный в [5,9]), сохранялась хорошая температурная стабильность порогового тока и внешней дифференциальной эффективности, а за счет небольшого расширения волновода повысилась предельная выходная мощность и снизились внутренние оптические потери (до  $0.7 \text{ см}^{-1}$ ). Предложенный вместе с этим подход профильного легирования волноводных слоев, а также сильного легирования эмиттерных и контактных слоев позволил уменьшить напряжение отсечки и последовательное сопротивление лазерного излучателя [10].

Были сделаны соответствующие процедуры в части изготовления активных элементов, формирования низкоомных контактов и повышения лучевой прочности выходных граней, влияющих на предельные характеристики изготавливаемых излучателей.

Активные элементы (30 шт.) полосковой конструкции с шириной излучающей области примерно 120 мкм были сформированы на длине 5 мм. Коэффициент заполнения, т. е. отношение суммарной ширины излучающих каналов генерации к общей протяженности ЛЛД, составил 72%. С целью повышения предельной мощности использовалась конструкция с ненакачиваемыми участками резонатора в призеркальных областях [11].

Полупроводниковые излучатели с высокой плотностью выходной оптической мощности требуют специальной подготовки излучающих поверхностей с целью снижения скорости безызлучательной рекомбинации на границе между полупроводниковым кристаллом и оптическим покрытием. В настоящей работе была применена технология ионной обработки излучающей грани в вакуумной камере напылительной установки непосредственно перед напылением оптического покрытия. Коэффициент отражения переднего зеркала  $R_1 = 0.05-0.10$ , а заднего  $R_2 = 0.95-0.99$ .

Благодаря высокому уровню легирования контактных слоев в качестве омических контактов использовалась комбинация металлических пленок Ti–Pt–Au, хорошо зарекомендовавшая себя при создании мощных полупроводниковых приборов [12]. В результате напряжение отсечки для ЛЛД оказалось близким к теоретическому ( $V_0 = 1.54-1.56$  В), а последовательное сопротивление  $R_s$  находилось на уровне 2–3 мОм (рис.1).

Сборка ЛЛД осуществлялась с применением припоя эвтектического состава Ag–Sn и Au–Sn на CuW-теплотводы, коэффициент теплового расширения которых близок к таковому у GaAs. Достигнутые значения выходной оптической мощности разработанных и изготовлен-

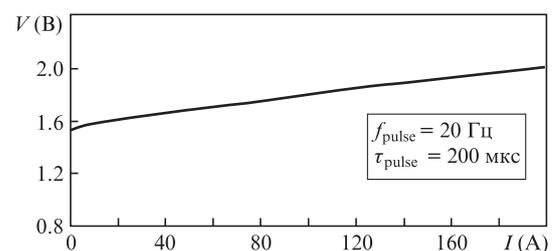


Рис.1. Типичная вольт-амперная характеристика ЛЛД ( $l_{\text{LDB}} = 5$  мм).

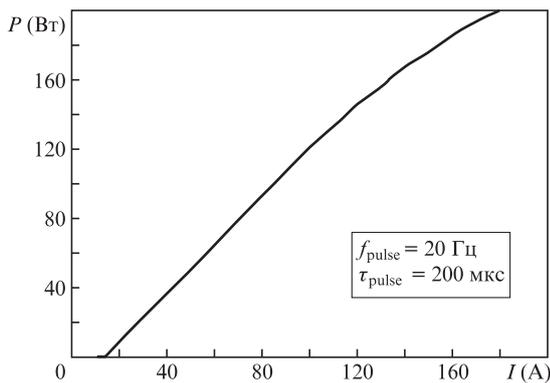


Рис.2. Типичная ватт-амперная характеристика ЛЛД ( $l_{LDB} = 5$  мм).

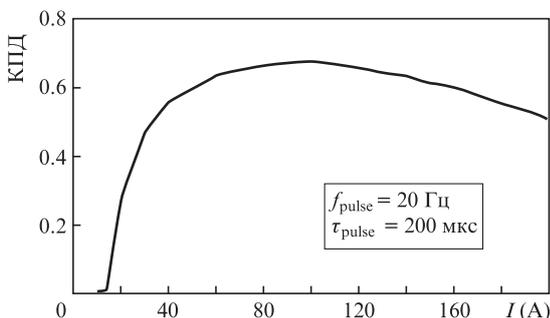


Рис.3. Зависимость КПД от тока накачки ЛЛД ( $l_{LDB} = 5$  мм).

ных ЛЛД, работающих в квазинепрерывном режиме накачки ( $\tau_{pulse} \approx 200$  мкс,  $f_{pulse} \approx 20$  Гц), составили 200–210 Вт при  $l_{LDB} = 5$  мм и до 400 Вт для  $l_{LDB} = 10$  мм. Наклон ВтАХ, показанной на рис.2, на начальном участке кривой был около 1.3–1.35 Вт/А, а ближе к токам накачки 100–120 А незначительно снижался (до 1.2–1.25 Вт/А).

Конструкция ЛЛД была спроектирована таким образом, чтобы максимум КПД (рис.3) приходился на рабочие токи накачки  $I_p \approx 95$ –100 А, обеспечивающие требуемый уровень выходной мощности. В итоге для большинства образцов КПД составил 65%–68%, а для лучших образцов он достиг 70%. Пороговый ток накачки при 20 °С равнялся 13–14 А и незначительно увеличивался при повышении температуры окружающей среды до +50 °С. Параметр  $T_0$ , характеризующий эту температурную чувствительность, составил  $\sim 110$  К.

Наряду с полным КПД температура активной области ЛЛД является важной характеристикой, показывающей эффективность управления тепловыми процессами в конструкции лазерного излучателя. Она может быть рассчитана по результатам измерения длины волны  $\lambda_{max}$  излучения в режиме одиночного импульса и в стационарном режиме работы лазера (рис.4). В нашем случае температура активной области превышала температуру теплоотвода всего на 3 °С. Рассчитанные значения теплового сопротивления конструкции ЛЛД составили  $\sim 0.1$ –0.2 К/Вт. Ресурсные испытания линеек продемонстрировали устойчивую работу на уровне  $10^8$ – $10^9$  импульсов без снижения выходных параметров.

Таким образом, в ходе проведения оптимизации конструкции и технологии изготовления лазерного излучате-

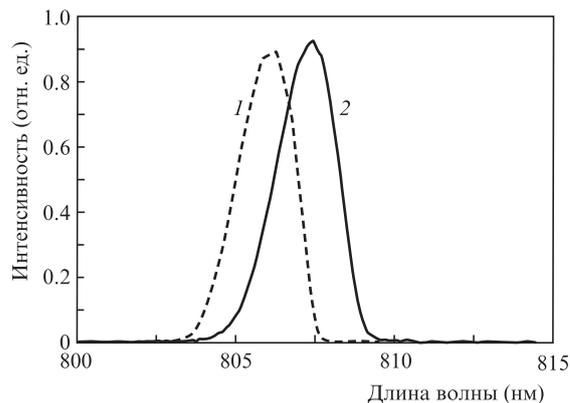


Рис.4. Длина волны излучения ( $\lambda_{max}$ ) линейки лазерных диодов протяженностью 5 мм в режиме одиночного импульса (1) и в стационарном режиме работы (2).

ля спектрального диапазона 800–810 нм были разработаны и выращены квантоворазмерные гетероструктуры AlGaAs/GaAs с высокой дифференциальной эффективностью и низкими оптическими потерями, предложена усовершенствованная конструкция активного элемента с низкими контактными сопротивлениями, а также разработана технология сборки лазерных линеек, обеспечивающая эффективный теплоотвод. Выходная оптическая мощность для линеек протяженностью 5 мм достигала 210 Вт, а КПД составлял  $\sim 70\%$ .

Работа выполнена при частичной поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

1. 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).
2. Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Яроцкая И.В., Панарин В.А., Микаелян Г.Т. *Квантовая электроника*, **42**, 15 (2012).
3. 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).
4. Дегтярева Н.С., Кондаков С.А., Микаелян Г.Т., Горлачук П.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Яроцкая И.В. *Квантовая электроника*, **43**, 509 (2013).
5. 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).
6. 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).
7. Елисеев П.Г. *Введение в физику инжекционных лазеров* (М.: Наука, 1983).
8. Давыдова Е.И., Коняев В.П., Ладугин М.А., Лебедева Е.И., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Петров С.В., Сапожников С.М., Симаков В.А., Успенский М.Б., Яроцкая И.В. *Квантовая электроника*, **40**, 682 (2010).
9. 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).
10. Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Сухарев А.В., Стрельченко С.С. *Изв. вузов. Материалы электронной техники*, **4**, 36 (2009).
11. Rinner F., Rogg J., Kelemen M., Mikulla M., Weimann G., Tomm J., Thamm E., Poprawe R. *J. Appl. Phys.*, **93**, 1848 (2003).
12. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. *ФТП*, **41**, 1417 (2007).