

## Мощные импульсные лазерные излучатели спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм

© П.В. Горлачук, Ю.Л. Рябоштан, А.А. Мармалюк, В.Д. Курносов, К.В. Курносов, О.В. Журавлева, В.И. Романцевич, Р.В. Чернов, А.В. Иванов, В.А. Симмаков

ОАО „НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха“,  
117342 Москва, Россия

(Получена 1 июня 2013 г. Принята к печати 16 июня 2013 г.)

Методом МОС-гидридной эпитаксии выращены гетероструктуры в системе материалов AlGaInAs/InP с различными вариантами геометрии активной области. Из полученных гетероструктур изготовлены лазерные диоды; с целью повышения выходной оптической мощности применен подход интеграции лазерных диодов в линейки и решетки. Одиночные лазерные диоды показали выходную мощность в импульсном режиме  $\sim 6$  Вт. Лазерные линейки продемонстрировали выходную мощность 20 Вт в импульсном режиме. Максимальная достигнутая импульсная выходная оптическая мощность на решетке из 30 элементов составила  $\sim 110$  Вт.

### 1. Введение

В последние годы интерес к лазерным излучателям спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм не прекращает расти. Специфика данного диапазона длин волн позволяет использовать излучатели для передачи импульсов на значительные расстояния с пониженными потерями на рассеяние в атмосфере. К тому же ввиду удаленности от видимой части спектра данные излучатели безопасны для зрения. К сожалению, выходная мощность таких излучателей на сегодняшний день существенно уступает мощности излучателей, работающих в более коротковолновом спектральном диапазоне [1–4].

Как правило, лазерные диоды (ЛД) в диапазоне 0.9–1.06 мкм создаются на основе гетероструктур (ГС) InGaAs/AlGaAs/GaAs [2], которые характеризуются существенно большим электронным ограничением носителей в квантовой яме по сравнению с ГС AlGaInAs/InP [5] и InGaAsP/InP [5,6], применяемыми для спектрального диапазона 1.3–1.6 мкм. Это обеспечивает лучшую локализацию носителей заряда в квантовых ямах и повышает долю излучательной рекомбинации по сравнению с оже-процессом [7] и другими механизмами безызлучательной рекомбинации, а также препятствует тепловому выбросу носителей из КЯ [8]. Различие в типичных уровнях мощности для ЛД с  $\lambda = 0.9–1.06$  мкм и  $\lambda = 1.5–1.6$  мкм составляет более порядка величины [1], причем данная тенденция характерна как для непрерывного, так и для импульсного режима работы [9].

Типичный уровень мощности ЛД, излучающих в диапазоне 1.5–1.6 мкм, составляет 1.5 Вт в непрерывном режиме [10] и может достигать 5 Вт в отдельных случаях [11]. При работе в импульсном режиме следует ожидать большей мощности излучения по сравнению с непрерывным, поскольку тепловой загиб ватт-амперной характеристики является одной из главных причин низкой выходной мощности ЛД, работающих в непрерывном режиме. Для импульсных ЛД с высокой скважностью разогрев не является фактором, в первую

очередь влияющим на достижимый уровень мощности. Вместе с тем импульсные ЛД не позволяют добиться высоких выходных характеристик ввиду загиба ватт-амперной характеристики вследствие выброса носителей и безызлучательной рекомбинации.

Очевидным путем повышения выходной мощности является переход от ЛД к их линейкам (ЛЛД) и решеткам (РЛД) [12]. Ключевым моментом в получении эффективного излучателя является подбор и выращивание гетероструктуры, которая бы обеспечила высокую дифференциальную квантовую эффективность при больших токах накачки. В проведенных ранее исследованиях было установлено преимущество ГС AlGaInAs/InP [13]. Типичная величина электронного ограничения в квантовой яме, обеспечивающей генерацию в спектральном диапазоне 1.5–1.6 мкм, для данного типа ГС составляет  $\Delta E_c = 0.72\Delta E_g$  [4,5], тогда как для InGaAsP/InP это значение  $\Delta E_c = 0.4\Delta E_g$  [4,6]. Таким образом, традиционные для данного спектрального диапазона ЛД на основе ГС InGaAsP/InP характеризуются значениями характеристической температуры  $T_0 = 50–60$  К [14]. В то же время ГС на основе AlGaInAs/InP позволяют достичь значения около 100 К [13] и выше при использовании особых подходов [15]. Одним из перспективных путей повышения выходной мощности является применение конструкции активной области с расширенным волноводом [16], хорошо зарекомендовавшим себя при создании ЛД спектрального диапазона 0.8–1.06 мкм. Данная работа нацелена на изучение подходов к созданию импульсных излучателей с выходной мощностью свыше 100 Вт в диапазоне 1.5–1.6 мкм.

### 2. Описание эксперимента

ГС раздельного ограничения AlGaInAs/InP выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии на установке с горизонтальным щелевым реактором при пониженном давлении. Изучались два типа ГС, отличающихся конструкцией волноводной области. Первая из них имела ширину волновода 0.3 мкм, а вторая была представлена

✉ E-mail: gorlachuk@bk.ru

асимметричным волноводом шириной 1 мкм. Во всех случаях ширина запрещенной зоны волноводного слоя составляла 1.08 эВ. Из полученных ГС были изготовлены ЛД с резонаторами разной длины и ширины. Грани резонатора имели покрытия с показателями отражения 95 и 5%.

Измерения проводились в импульсном режиме при комнатной температуре; длительность импульса составляла 100 нс, частота повторения 5 кГц. Образцы ЛД монтировались эпитаксиальной стороной вниз на медный теплоотвод.

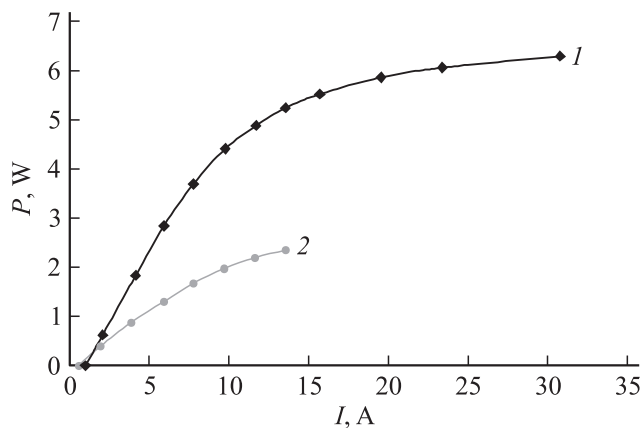
Изготовленные ЛД были собраны в линейки с различным количеством элементов. Число излучающих областей составило 3 и 6 элементов в линейке.

Далее линейки были собраны в решетки, состоящие из 5 линеек. Таким образом, максимальное количество излучающих элементов составило 30. Для данных решеток исследовались ватт-амперные и спектральные характеристики.

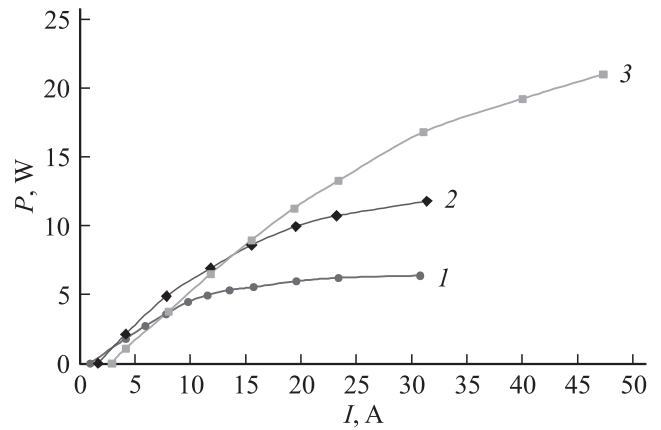
### 3. Обсуждение результатов

На первом этапе исследований решалась задача выбора конструкции ГС, обеспечивающей реализацию повышенной выходной мощности в импульсном режиме. Для этого были изготовлены ЛД на основе ГС со стандартным ( $\sim 0.3$  мкм) и расширенным ( $\sim 1$  мкм) волноводом. Предполагалось, что ГС с узким волноводом будет обладать более высокими внутренними потерями, следовательно, ГС с широким волноводом позволит достичь большей мощности при увеличенных длинах резонатора. Проведенные исследования ватт-амперных характеристик на полученных ЛД показали достижение мощностей до 10 Вт в импульсном режиме на лучших образцах, представленных ГС с расширенным волноводом.

Исследования выходных характеристик ЛД проводились на разных длинах резонатора от 0.8 до 2.0 мм. Для образца с узким волноводом оптимальной оказалась



**Рис. 1.** Импульсные ватт-амперные характеристики одиночных ЛД: 1) — ГС с расширенным волноводом и 2) — ГС с узким волноводом.

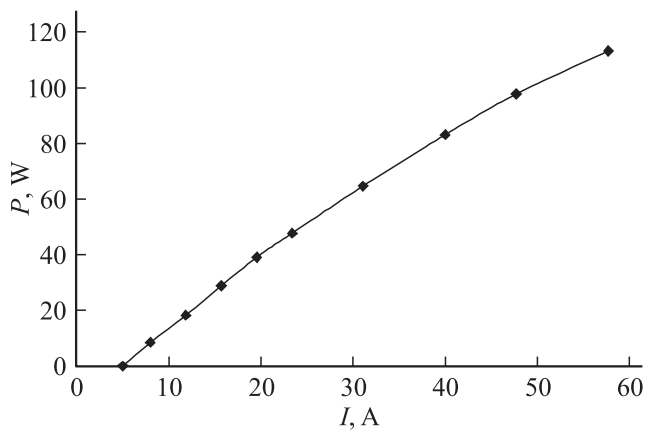


**Рис. 2.** Ватт-амперные характеристики для 1 — одиночного диода, 2 — линеек из 3 элементов и 3 — линеек из 6 элементов, изготовленных из гетероструктур с расширенным волноводом.

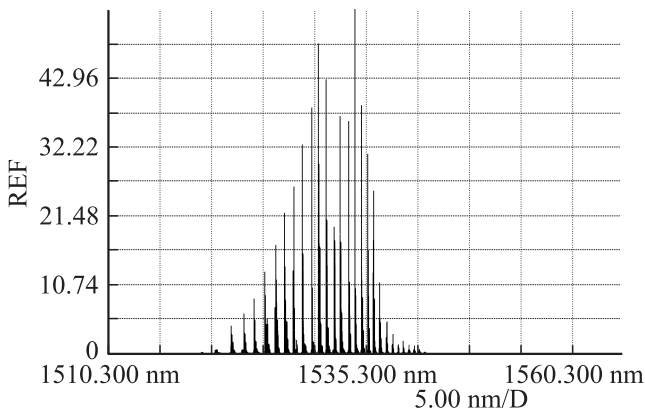
длина резонатора 0.8 мм (рис. 1), при этом выходная мощность превысила 2 Вт. В то же время для образца с расширенным волноводом, вполне закономерно, более высокая мощность получена на резонаторах с длиной 2.0 мм (рис. 1). Низкие внутренние оптические потери в ЛД на основе ГС с широким волноводом позволяют использовать резонаторы большей длины и достигать более высокой мощности. Максимально достигнутое значение импульсной мощности для таких ЛД составило 6.3 Вт. Примечательно, что для всех представленных длин резонаторов наклон ватт-амперной характеристики (Вт/А) на линейном участке оказался практически одинаковым и составил  $\sim 0.45$  Вт/А для структуры с широким волноводом, а для ГС со стандартным волноводом —  $\sim 0.2$  Вт/А. Ввиду значительного преимущества ГС с расширенным волноводом последующая работа проводилась именно на этом типе ГС.

Для дальнейшего повышения мощности были исследованы подходы к интеграции ЛД в линейки и решетки. На рис. 2 представлены ВтАХ одиночных диодов и линеек по 3 и 6 элементов. Пороговый ток для линеек оказался пропорционально выше по сравнению с одиночными ЛД. Наклон характеристики для линейки из 6 элементов достигает  $\sim 0.45$  Вт/А на линейном участке, что соответствует аналогичному значению одиночного ЛД. В силу загиба ВтАХ выходная мощность таких ЛД составила 20–22 Вт. Поскольку конструкции ЛД с более высоким коэффициентом заполнения продемонстрировали заметные лучшие параметры, дальнейшие эксперименты по созданию РЛД проводились на основе ЛД с 6 элементами.

Ватт-амперные характеристики исследованных РЛД показывают наклон порядка 2 Вт/А. Типичная характеристика приведена на рис. 3. Особенностью данной характеристики является незначительный тепловой загиб. С учетом последовательно-параллельного подключения элементов в решетке ток через каждую излучающую



**Рис. 3.** Ватт-амперная характеристика для лазерной решетки, состоящей из 5 линеек по 6 элементов (гетероструктура с расширенным волноводом).



**Рис. 4.** Спектр излучения лазерной решетки из 30 элементов, изготовленной из гетероструктуры с расширенным волноводом.

область не превышал 10 А. Сопоставление тока через элемент в решетке с приведенными на рис. 2 и 3 значениями токов накачки показывает, что при 10 А характеристика находится на участке, близком к линейному. Поэтому ВтАХ решетки из 30 элементов не показывает существенного изменения наклона вплоть до тока накачки 60 А. Благодаря этому на РЛД данного типа достигнута выходная импульсная мощность в 110 Вт при токе накачки  $\sim 55$  А.

На рис. 4 приведена спектральная характеристика одного из образцов РЛД. Центр спектра находился на длине волны 1532 нм, ширина его составляла 7.4 нм. Интенсивность излучения в дальнем поле описывалась гауссовым распределением в плоскости, перпендикулярной  $p$ - $n$ -переходу. При этом расходимость лазерного луча по уровню 0.5 в данной плоскости составляла  $48^\circ$ , а в параллельной —  $7.5^\circ$ .

Таким образом, применение ЛД, изготовленных из ГС с расширенным волноводом и собранных в РЛД,

позволило достичь и превысить уровень импульсной мощности в 100 Вт в диапазоне длин волн 1.5–1.6 мкм.

#### 4. Заключение

Несмотря на использование ГС AlGaInAs/InP с расширенным волноводом, одиночные ЛД, излучающие в диапазоне 1.5–1.6 мкм, продемонстрировали ранний загиб ВтАХ. Поэтому естественным путем создания излучателей повышенной мощности является использование РЛД, в которой каждый излучающий элемент работает при токах, обеспечивающих незначительное отклонение от линейности ВтАХ.

В данной работе исследованы способы повышения мощности излучателей спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм путем подбора оптимальной геометрии ГС и интеграции ЛД. Такие ЛД показали пиковую мощность 6 Вт и наклон ВтАХ на линейном участке  $\sim 0.45$  Вт/А. ЛЛД из 6 излучающих элементов продемонстрировали выходную мощность свыше 20 Вт, а РЛД, состоящие из 30 элементов, — более 110 Вт в импульсном режиме.

#### Список литературы

- [1] C.C. Lin, M.C. Wu, H.P. Shiao, K.S. Liu. IEEE Trans. Electron. Dev., **46** (8), 1614 (1999).
- [2] М.А. Ладугин, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, А.А. Подоскин, Н.А. Рудова, С.О. Слипченко, И.С. Шашкин, А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов. ФТП, **44** (10), 1417 (2010).
- [3] Д.А. Лившиц, А.Ю. Егоров, И.В. Кочнев, В.А. Капитонов, В.М. Лантратов, Н.Н. Леденцов, Т.А. Налет, И.С. Тарасов. ФТП, **35** (3), 380 (2001).
- [4] П.В. Булаев, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, Д.Б. Никитин, А.В. Петровский, И.Д. Залевский, В.П. Коняев, В.В. Оськин, М.В. Зверков, В.А. Симаков, Г.М. Зверев. Квант. Электрон., **32** (3) 213 (2002).
- [5] S. Adachi. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*. (Wiley, 2009).
- [6] A. Mircea, A. Ougazzaden, G. Primot, C. Kazmierski. J. Cryst. Growth, **124** (1–4), 737 (1992).
- [7] А.В. Лютецкий, К.С. Боршев, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов. ФТП, **42** (1), 106 (2008).
- [8] З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, Л.В. Асрян. ФТП, **45** (11), 1553 (2011).
- [9] А.А. Мармалюк, Е.И. Давыдова, М.В. Зверков, В.П. Коняев, В.В. Кричевский, М.А. Ладугин, Е.И. Лебедева, С.В. Петров, С.М. Сапожников, В.А. Симаков, М.Б. Успенский, И.В. Яроцкая, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов. ФТП, **45** (4), 528 (2011).
- [10] T.C. Newell, P.M. Varangis, E. Pease, A. Stintz, G.T. Liu, K.J. Malloy, L.F. Lester. Electron. Lett., **36** (11), 955 (2000).
- [11] J.F. Boucher, J.J. Callahan. Proc. SPIE, **8039**, 1 (2011).
- [12] C.C. Lin, K.S. Liu, M.C. Wu, H.P. Shiao. Electron. Lett., **34** (2), 186 (1998).
- [13] С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова, А.Ю. Лешко, Ю.А. Рябоштан, Е.Г. Голикова, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **29** (3), 65 (2003).

- [14] Г.Г. Зегря, Н.А. Пихтин, Г.В. Скрынников, С.О. Слипченко, И.С. Тарасов. ФТП, **35** (8), 1001 (2001).
- [15] N. Ohnoki, G. Okazaki, F. Koyama, K. Iga. Electron. Lett., **35** (1), 51 (1999).
- [16] Д.А. Винокуров, В.В. Васильева, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов. ФТП, **44** (2), 246 (2010).

*Редактор Т.А. Полянская*

## **High power pulsed emitting lasers in 1.5–1.6 $\mu\text{m}$ spectral region**

*P.V. Gorlachuk, Yu.L. Ryaboshtan, A.A. Marmalyuk,  
V.D. Kurnosov, K.V. Kurnosov, O.V. Zhuravleva,  
V.I. Romantsevich, R.V. Chernov, A.V. Ivanov,  
V.A. Simakov*

Polyus R&D Institute,  
117342 Moscow, Russia

**Abstract** Heterostructures in AlGaInAs/InP material system have been grown by MOCVD. Laser diodes have been created; in order to increase optical power output laser bars and arrays integration approach has been incorporated. Single laser diodes shown output power of  $\sim 6$  W in pulsed mode. Laser bars demonstrated output pulsed power of 20 W. Maximum pulsed optical power of 30 element array has reached  $\sim 110$  W.