

07; 09

## Мощностные характеристики и температурная зависимость угловой расходимости излучения лазеров с приповерхностной активной областью

© А.Е. Жуков<sup>1,2</sup>, Н.Ю. Гордеев<sup>3,1</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>3,1</sup>,  
А.С. Паюсов<sup>3,1,2</sup>, А.А. Серин<sup>2,3</sup>, М.М. Кулагина<sup>3</sup>,  
С.А. Минтаиров<sup>3,1</sup>, Н.А. Калюжный<sup>3,1</sup>, М.В. Максимов<sup>1–3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: zhukale@gmail.com

Поступило в Редакцию 19 апреля 2018 г.

Представлены результаты исследований ватт-амперных характеристик и картин дальнего поля излучения полосковых лазеров, в которых используются связанные планарные волноводы, позволяющие подавить генерацию возбужденных мод и реализовать малую (около  $0.9 \mu\text{m}$ ) глубину залегания активной области по отношению к поверхности лазерного кристалла. Продемонстрирована высокая температурная стабильность угловой расходимости излучения ( $34.0 \pm 1.5^\circ$ ) в диапазоне  $20\text{--}80^\circ\text{C}$ . Наибольшее значение выходной мощности ограничено катастрофическим разрушением зеркала и составляет  $12.2 \text{ W}$  в непрерывном режиме.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.15.46439.17345

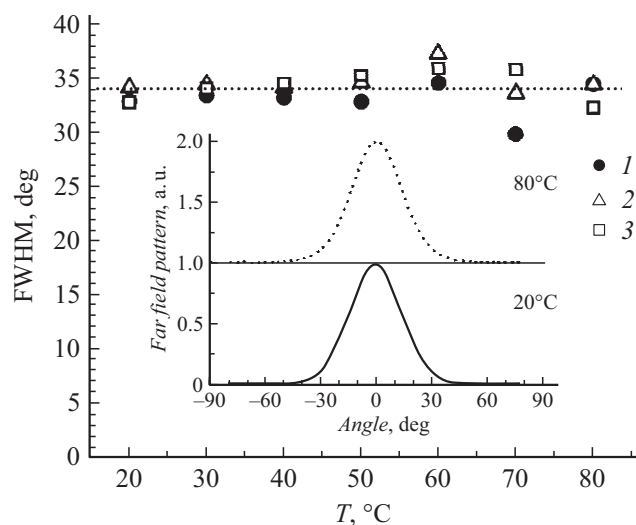
Увеличение температуры активной области полупроводникового лазера, работающего в непрерывном режиме, является одной из основных причин изменения лазерных характеристик с ростом тока накачки, а также ограничения предельной мощности лазерного излучения [1]. Снижение теплового сопротивления лазерного диода позволяет снизить влияние саморазогрева. Заметное влияние на тепловое сопротивление оказывает совокупная толщина полупроводниковых слоев, расположен-

ных между активной областью лазера и его поверхностью, примыкающей к теплоотводу [2]. Типично она составляет не менее  $1.4 \mu\text{m}$  [3–5], однако нами была продемонстрирована возможность ее существенного уменьшения вплоть до  $0.92 \mu\text{m}$  и как результат достижения удельного теплового сопротивления  $6.0 \pm 0.6 \text{ mm} \cdot \text{K/W}$  [6], что, насколько нам известно, является наименьшим из приведенных в литературе значений для лазерных диодов ближнего ИК-диапазона, смонтированных на медный теплоотвод.

В настоящей работе представлены первые результаты экспериментальных исследований выходной мощности и углового распределения выходного излучения лазерных диодов, изготовленных из лазерной гетероструктуры оригинальной конструкции со связанными волноводами и асимметричным расположением квантовых ям, обладающей рекордно малой глубиной залегания активной области по отношению к поверхности.

Лазерная гетероструктура синтезировалась на подложке  $n^+$ -GaAs методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. В соответствии с концепцией лазера со связанными волноводами [7] гетероструктура содержала расположенный ближе к подложке легированный пассивный волновод GaAs толщиной  $0.55 \mu\text{m}$  и отделенный от него оптическим барьером  $n\text{-Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  толщиной  $0.25 \mu\text{m}$  нелегированный активный волновод GaAs толщиной  $1.35 \mu\text{m}$ , содержащий две квантовые ямы InGaAs, излучающие на длине волны около  $1 \mu\text{m}$ . Квантовые ямы были сильно смещены относительно центра активного волновода в сторону  $p$ -эмиттера и располагались на расстоянии  $270 \text{ nm}$  от него. Нижний ( $n$ -типа) и верхний ( $p$ -типа) эмиттеры  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  имели толщину  $1.2$  и  $0.5 \mu\text{m}$  соответственно. Структура заканчивалась контактным слоем  $p^+$ -GaAs ( $0.15 \mu\text{m}$ ). Использование пассивного волновода и сдвиг активной области в пределах активного волновода позволяют подавить генерацию на возбужденных поперечных модах, характерную для лазеров с расширенным волноводом, за счет уменьшения для этих мод фактора оптического ограничения и роста оптических потерь на свободных носителях.

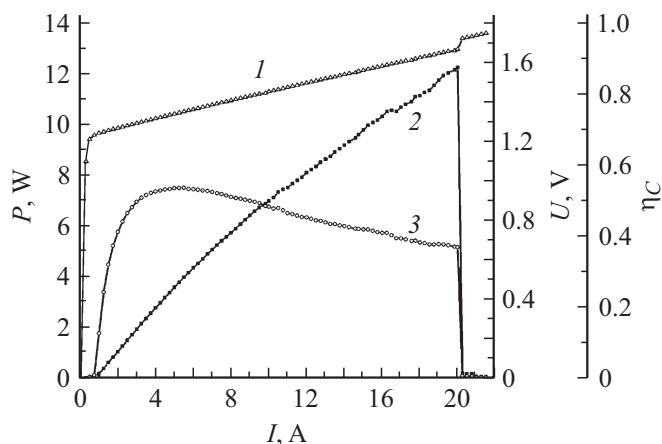
Из эпитаксиальной структуры были изготовлены полосковые лазеры шириной  $100 \mu\text{m}$  с вплавным  $n$ -контактом AuGe/Ni/Au и невплавным  $p$ -контактом AgMn/NiAu. Лазерные диоды имели длину  $1.5$ ,  $3$  и  $4 \text{ mm}$ . Сколотые грани не имели покрытия. Диоды были napаяны  $p$ -контактом на медный теплоотвод, установленный на термоэлектрический элемент.



**Рис. 1.** Зависимость от температуры угловой расходимости излучения (полная ширина на полувысоте) вдоль быстрой оси для лазерных диодов длиной 1.5 (1), 3 (2) и 4 мм (3). Пунктирная линия — среднее значение. На вставке — картины дальнего поля для длины лазерного диода 4 мм при температуре 20 и 80°C.

Вольт- и ватт-амперные характеристики были измерены при непрерывной накачке и стабилизированной температуре теплоотвода 20°C. Картины дальнего поля излучения лазеров измерялись при импульсной накачке (длительность импульсов 0.4  $\mu$ s, частота повторения 1 kHz) и температуре теплоотвода в диапазоне 20–80°C.

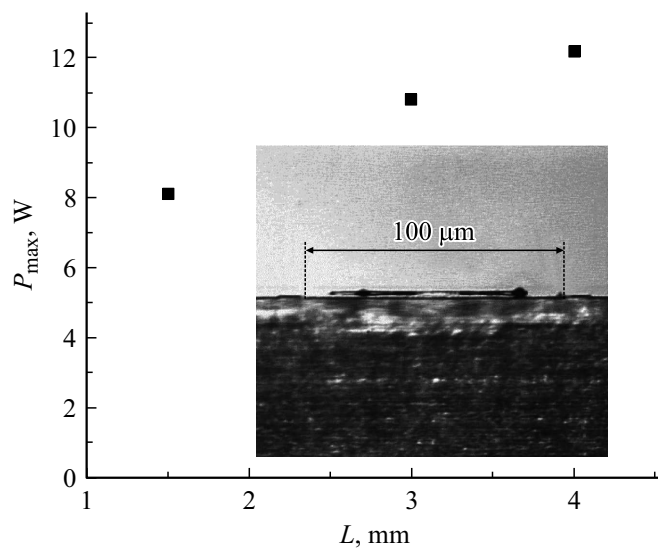
На вставке к рис. 1 приведены картины дальнего поля в направлении, перпендикулярном слоям гетероструктуры, полученные на границах исследованного температурного диапазона. Угловое распределение имеет один максимум, соответствующий оптической оси резонатора, а форма распределения близка к функции Гаусса во всем температурном диапазоне измерений, что свидетельствует о генерации на фундаментальной поперечной моде. На рис. 1 представлена зависимость угловой расходимости (полная ширина на половине высоты, FWHM) лазерного пучка от температуры для различных длин лазерного резонатора. Измерения проводились при токе, на 30% превышающем порог лазерной генерации при соответствующей температуре. Для всех



**Рис. 2.** ВАХ (1), ВтАХ (2) и КПД (3) для лазерного диода длиной 4 mm (непрерывный режим, 20°C).

исследованных лазерных диодов угловая расходимость не демонстрирует какого-либо закономерного изменения при увеличении температуры или длины лазерного резонатора. Среднее значение FWHM для всех диодов в изученном диапазоне температур составляет  $34.0 \pm 1.5^\circ$ , что превосходно согласуется с расчетным значением ( $33^\circ$ ), полученным для температуры 20°C с помощью моделирования волноводных характеристик исследуемой структуры с использованием программного пакета FIMMWAVE. Отметим, что мы также наблюдали сохранение картин дальнего поля и при изменении тока накачки (измерения были выполнены до 8 A). Стабильность полей излучения в исследуемой лазерной структуре обусловлена тем, что фундаментальная мода в ней сильно локализована в пределах активного волновода, так что ее пространственная ширина определяется в основном физическими размерами волновода и слабо меняется при изменениях показателя преломления, вызванных изменением тока накачки и/или температуры.

На рис. 2 приведены вольт-амперная (ВАХ) и ватт-амперная (ВтАХ) характеристики лазерного диода длиной 4 mm, а также представлена вычисленная зависимость КПД от тока накачки. Дифференциальная квантовая эффективность, оцененная по начальному участку ВтАХ, составила 74%, что лишь незначительно ниже величины (79%), ранее



**Рис. 3.** Зависимость максимальной мощности излучения (непрерывный режим, 20°C), ограниченной катастрофическим разрушением зеркала, от длины лазера. На вставке — микрофотография лазерного зеркала после разрушения: снизу — теплопровод, в средней части — лазерный полосок, сверху — подложка.

измеренной при импульсной накачке для лазеров той же длины [6]. Сочетание высокой внешней дифференциальной эффективности и низкого последовательного сопротивления, оцененного как 22 mΩ, позволило в лазерном диоде длиной 4 mm достичь максимального КПД 53.5% при токе 5.5 A. Среди всех исследованных лазерных диодов наибольший КПД 57.1% был измерен для лазера с длиной резонатора 1.5 mm. Для сравнения для лазеров с экстремальной дважды асимметричной (extreme-double-asymmetric) волноводной структурой, в которых глубина залегания активной области составляет 1.4 μm, максимальное значение КПД составило 59–62% [4].

На рис. 3 приведены наибольшие значения мощности для лазеров различной длины, работающих в непрерывном режиме при 20°C. При увеличении длины лазерного резонатора с 1.5 до 4 mm величина максимальной мощности возрастает от 8.1 до 12.2 W. Во всех случаях причиной ограничения мощности являлся не тепловой загиб ВтАХ, а

катастрофическое разрушение зеркала, о чем свидетельствует резкий обрыв ВтАХ, а также исследование поверхности лазерной грани. На вставке к рис. 3 приведена микрофотография грани лазера длиной 4 mm после протекания максимального тока накачки, на которой разрушения видны как темные пятна.

Таким образом, нами впервые исследованы температурные зависимости картин дальнего поля и мощностные характеристики в непрерывном режиме полупроводниковых лазеров с оптически связанными планарными волноводами, обладающих рекордно малой глубиной залегания активной области по отношению к поверхности. Показано, что угловая расходимость вдоль быстрой оси остается стабильной при изменении длины резонатора и температуры по крайней мере до 80°C. При увеличении длины лазерного резонатора от 1.5 до 4 mm наблюдается снижение максимального КПД с 57.1 до 53.5%, тогда как максимальная мощность растет с 8.1 до 12.2 W. Полученные значения КПД и мощности являются, насколько нам известно, наибольшими из приведенных в литературе для лазерных диодов со связанными волноводами.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-42-00006).

## Список литературы

- [1] Crump P., Erbert G., Wenzel H., Frevert C., Schultz C.M., Hasler K.-H., Staske R., Sumpf B., Maasdorf A., Bugge F., Knigge S., Traenkle G. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2013. V. 19. N 4. P. 1501211.
- [2] Тер-Мартirosян А.Л., Демидов Д.М., Свердлов М.А., Кулик А.В., Карпов С.Ю. // Науч. приборостроение. 2013. Т. 23. № 4. С. 40–44.
- [3] Kanskar M., Earles T., Goodnough T.J., Stiers E., Botez D., Mawst L.J. // Electron. Lett. 2005. V. 41. N 5. P. 245–247.
- [4] Hasler K.H., Wenzel H., Crump P., Knigge S., Maasdorf A., Platz R., Staske R., Erbert G. // Semicond. Sci. Technol. 2014. V. 29. N 4. P. 045010.
- [5] Winterfeldt M., Rieprich J., Knigge S., Maasdorf A., Hempel M., Kernke R., Tomm J.W., Erbert G., Crump P. // Proc. of SPIE. 2016. V. 9733. P. 973300.
- [6] Жуков А.Е., Гордеев Н.Ю., Крыжановская Н.В., Шерняков Ю.М., Паюсов А.С., Кулагина М.М., Минтаиров С.А., Калужный Н.А., Максимов М.В., Мусеев Э.И. // Нанопизика и наноэлектроника. Тр. XII Междунар. симп. Н. Новгород, 2018. Т. 2. С. 614–617.
- [7] Gordeev N.Yu., Maximov M.V., Zhukov A.E. // Laser Phys. 2017. V. 27. N 8. P. 086201.