

# Излучательные параметры и тепловой режим мощных одиночных лазерных диодов спектрального диапазона 980 нм

В.В.Безотосный, О.Н.Крохин, В.А.Олещенко, В.Ф.Певцов, Ю.М.Попов, Е.А.Чешев

*Исследованы излучательные параметры мощных непрерывных лазерных диодов (ЛД) спектрального диапазона 980 нм с шириной полоскового контакта 100 мкм. При монтаже на медные теплоотводящие элементы типа С-маунт получена ресурсная мощность 10 Вт при токе накачки 10 А. С использованием модели тепловых потоков на основе анализа расчетного и экспериментально измеренного полного КПД в диапазоне токов накачки до 20 А исследованы возможности повышения ресурсной мощности в модифицированной конструкции мощного ЛД, смонтированного на теплоотводящих элементах типа F-маунт с применением оптимизированных по геометрическим параметрам сабмаунтов с высокой теплопроводностью. Обсуждается возможность повышения максимальной непрерывной ресурсной мощности до 20 Вт при использовании аналогичных лазерных кристаллов.*

**Ключевые слова:** мощные лазерные диоды, КПД, спектр, тепловой режим, С-маунт, F-маунт, алмазный сабмаунт.

Необходимость повышения мощности и яркости излучения лазерных диодов при обеспечении высокой надежности и продолжительного срока службы связана с возрастающими перспективами непосредственного использования их излучения для обработки материалов и ряда других применений [1–3]. Настоящая работа является продолжением наших исследований и разработок, направленных на решение проблемы повышения выходной мощности, яркости, КПД и срока службы мощных лазерных диодов [4–6].

## 1. Экспериментальные результаты и расчет полного КПД

Представленные экспериментальные результаты измерения выходных параметров относятся к ЛД с длиной волны 980 нм, шириной полоскового контакта 100 мкм и длиной резонатора 4 мм, смонтированному в нашей лаборатории на стандартном теплоотводящем элементе типа С-маунт. На рис. 1 показана ватт-амперная характеристика (ВтАх) и изменение полного КПД в широком диапазоне токов накачки (от порога генерации (0.5 А) до 23 А) при работе ЛД в кратковременном непрерывном режиме. Поскольку время записи ВтАх, вольт-амперной характеристики (ВАХ) и спектров излучения составляет 1.5 мин, стационарный тепловой режим с тепловым равновесием всех элементов конструкции не успевает полностью установиться.

Как видно из рис. 1, ВтАх в таком нестационарном непрерывном режиме сохраняет линейность до тока 14 А, а при больших токах наблюдается ощутимое уменьшение наклона ВтАх. Максимальное значение полного КПД (68%) достигается при токе накачки 7 А. Предельная мощность из-

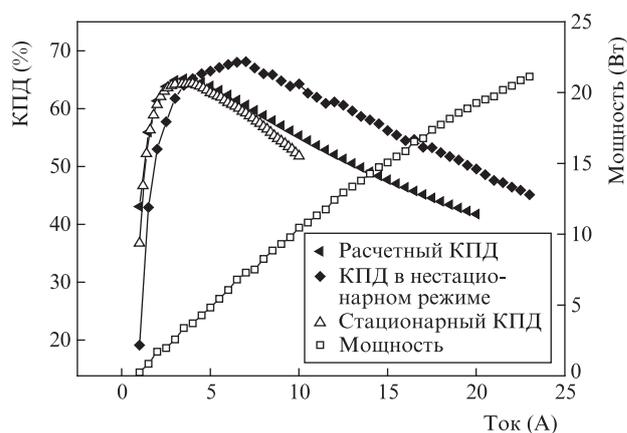


Рис. 1. Ватт-амперная характеристика и полный КПД лазерного диода спектрального диапазона 980 нм.

лучения составляла 22–23 Вт и была ограничена катастрофическим оптическим разрушением выходного зеркала.

Измерения ВтАх в диапазоне температур 10–50 °С показали, что данные ЛД имеют достаточно высокую температурную стабильность и вычисленные из этих зависимостей температурные константы для порогового тока  $I_{th}(T_0)$  и эффективности  $\eta_d(T_1)$  соответственно равны 175 и 303 К. В режиме теплового равновесия максимальные значения экспериментального и расчетного КПД заметно ниже (64% и 65% соответственно) и достигаются при токах накачки 4 и 4.5 А. В диапазоне токов до 7 А расчетные и экспериментальные значения практически совпадают, а при большем уровне накачки экспериментальные значения существенно ниже, что объясняется недостаточно эффективным отводом тепла при высоком уровне возбуждения и монтаже на медном С-маунте.

В соответствии с рис. 1 в нестационарном режиме выходная мощность 20 Вт достигается при токе накачки 23 А, при этом полный КПД равен 46%. Более реалистичная оценка полного КПД для уровня мощности 20 Вт была получена при изучении температурных зависимостей полного КПД в стационарном непрерывном режиме и их

В.В.Безотосный, О.Н.Крохин, В.А.Олещенко, В.Ф.Певцов, Ю.М.Попов, Е.А.Чешев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: victorbe@sci.lebedev.ru, pvf@sci.lebedev.ru, on-vlad@yandex.ru

Поступила в редакцию 18 декабря 2013 г.

сравнении с расчетными значениями в диапазоне токов до 20 А. При токе 20 А расчет дает КПД 41%, а при 23 А с учетом коррекции на основе аппроксимации экспериментальных данных имеем 35%–38%. В соответствии с этим уровнем был выбран диапазон тепловых нагрузок при моделировании теплового режима, соответствующего выходной мощности 20 Вт.

## 2. Спектральные параметры и критерий ресурсного режима

На рис.2 показана зависимость длины волны излучения в максимуме огибающей  $\lambda_{\max}$  спектра от тока накачки и тепловой нагрузки  $P_{\text{therm}}$ , определенной из экспериментальной базы данных по току накачки  $I$  и напряжению  $U$  и выраженной через полный КПД  $\eta_{\text{tot}}$ :

$$P_{\text{therm}} = IU(1 - \eta_{\text{tot}}). \quad (1)$$

Зависимость  $\lambda_{\max}(I)$  в соответствии с квадратичной зависимостью джоулевых потерь от тока накачки является сверхлинейной, а зависимость  $\lambda_{\max}(P_{\text{therm}})$ , как и предполагалось, близка к линейной. Небольшое отклонение от линейности частично связано с погрешностью определения максимума огибающей, которая растет при высоком уровне накачки из-за существенного уширения спектра и появления нескольких (2–3) небольших пиков на максимуме огибающей вследствие нестационарности теплового режима в процессе измерений. Таким образом, при увеличении тока накачки от 0.5 до 23 А спектральный сдвиг  $\lambda_{\max}$  в длинноволновую сторону составляет 25 нм, перегрев активной области при токе 23 А по оценке равен 83°C, а температура активной области – 103°C.

Важно отметить, что режим работы при мощности излучения 10.5 Вт по данным испытаний является ресурсным для более чем 90% исследованных образцов, а режим мощности 11.5 Вт выдерживают только около 50% образцов. Таким образом, по данным рис.2 можно установить эмпирический критерий долговременного стабильного непрерывного ресурсного режима работы при температуре базовой грани теплоотводящего элемента 20°C – перегрев активной области не должен превышать 20–25°C. Согласно данным, приведенным на рис.3, ширина спектра на половине высоты огибающей  $\Delta\lambda_{\max}$  в указанном диапазоне токов накачки возрастает почти в 5 раз – с 1.1 до 5.2 нм. Интересной особенностью зависимости ширины спектра от тока накачки является ее немонотон-

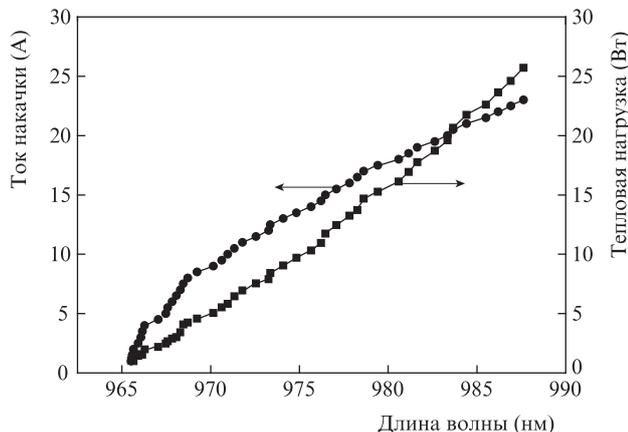


Рис.2. Изменение длины волны в максимуме огибающей спектра.

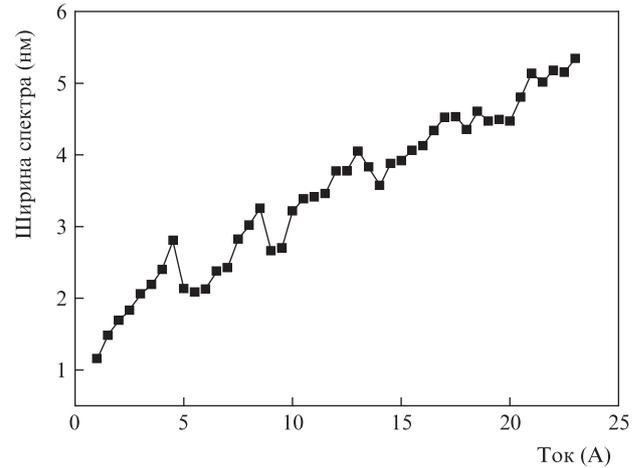


Рис.3. Ширина спектра излучения на половине высоты огибающей при различных токах накачки.

ность – наличие на ней достаточно регулярно расположенных максимумов. Возможной причиной этого является ступенчатый рост тока накачки и, как следствие, колебательный характер установления теплового равновесия в процессе измерений. Некоторая немонотонность зависимости  $\Delta\lambda_{\max}(I)$  наблюдалась и в стационарном режиме, но период максимумов с изменением тока накачки и их амплитуда были в несколько раз меньше. Выяснение механизма этих особенностей требует более детальных исследований.

## 3. Моделирование тепловых потоков и оптимизация параметров сабмаунтов

Тепловая проблема, наряду с проблемой оптической стойкости зеркал, является одной из основных для мощных диодных лазеров. Моделированию теплового режима посвящено множество работ, в частности [7–11]. В настоящей работе, в отличие от [10, 11], моделирование тепловых потоков проводилось в трехмерной модели, что позволило получить профили распределения температур по всем координатам в зависимости от геометрических параметров конструкции, материалов и тепловой нагрузки  $P_{\text{therm}}$  (см. (1)).

Опорные значения  $P_{\text{therm}}$ , использованные при моделировании теплового режима, выбраны из соображений необходимости разработки более эффективной конструкции мощного ЛД, позволяющей повысить ресурсную мощность с 10 Вт (при монтаже данных чипов ЛД на медном С-маунте) до 20 Вт (для нового дизайна теплоотводящей конструкции при тех же параметрах лазерного кристалла). Принципиальная возможность получения ресурсного режима при мощности, близкой к 20 Вт, для ЛД диапазона 980 нм реализована при монтаже лазерного кристалла с использованием сабмаунта из композита медь–алмаз в [1]. К сожалению, работа ЛД при температурах ниже точки росы существенно осложняется на практике, т.к. для предотвращения образования конденсата требуется изолированная камера со специальной средой, поэтому в настоящей работе мы моделировали возможность получения ресурсного режима при температуре базовой грани теплоотводящего элемента +20°C.

Монтаж на медные С-маунты позволил обеспечить уровень ресурсной выходной мощности 10 Вт при полном КПД 50%, ширине полоскового контакта 100 мкм и

длине резонатора 4 мм; плотность теплового потока при этом составляет 2.5 кВт/см<sup>2</sup>. Увеличение выходной мощности до 20 Вт, согласно проведенным нами оценкам, ведет к необходимости отвода непрерывных тепловых потоков плотностью 7.5–10 кВт/см<sup>2</sup>.

Такая плотность непрерывных тепловых потоков является экстремально высокой, еще сложнее отводить их в случае ЛД, поскольку параметры лазерного кристалла, изготовленного из полупроводниковой гетероструктуры, имеют сильную температурную зависимость, в связи с чем перегрев активной области, как было отмечено выше, не должен превышать 20–25 °С.

Тепловые потоки моделировались для конструкции ЛД на основе стандартного, но более эффективного, чем С-маунт, базового теплоотводящего элемента типа F-маунт с применением сабмаунтов с высокой теплопроводностью (диапазон использованных при моделировании значений теплопроводности соответствует синтетическим алмазам [5]). Результаты моделирования приведены на рис.4 и 5.

На рис.4 представлены расчетные значения температур на выходном переднем и глухом заднем зеркалах, а также средней температуры активного слоя по длине кристалла для базового теплоотводящего элемента типа F-маунт в зависимости от тепловой нагрузки без сабмаунта и с применением алмазного сабмаунта с теплопроводностью 1200 Вт/мК. Размеры сабмаунта – толщина 0.3 мм, ширина 2 мм и длина 4.2 мм – соответствуют использованному в эксперименте [5]. Как видно из рис.4, при тепловой нагрузке 35 Вт перепад температуры активной области по длине резонатора  $\Delta T = T_{M1} - T_{M2}$  в отсутствие сабмаунта составляет 16.5 °С и снижается до 2.5 °С при монтаже с использованием алмазного сабмаунта, средние температуры активной области  $T_m$  без сабмаунта и с сабмаунтом равны соответственно 54 и 48 °С, причем в отсутствие сабмаунта  $T_m$  ближе к  $T_{M1}$ , а при монтаже на сабмаунт – к  $T_{M2}$ . Данный пример показывает, что если теплопроводность далеко не оптимального по параметрам сабмаунта достаточно велика, то эффект отрицательной тепловой линзы компенсирует дополнительное тепловое сопротивление, вносимое толщиной сабмаунта, и его наличие позволяет не только уменьшить абсолютное значение температуры активной области, но и значительно снизить перепад температур по длине кристалла, что должно по-

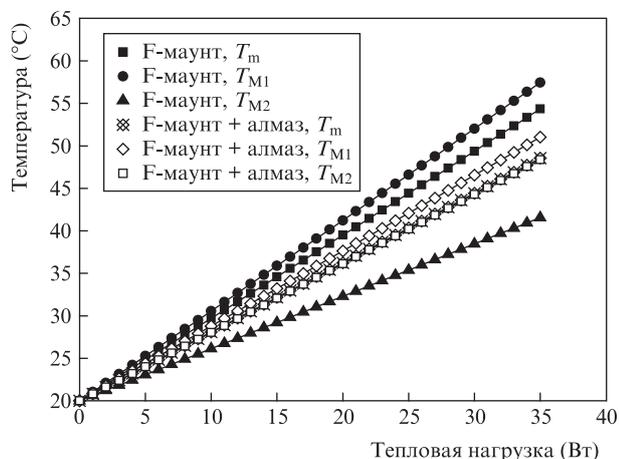


Рис.4. Расчетные зависимости температуры от тепловой нагрузки при монтаже кристаллов ЛД на F-маунт ( $T_m$  – средняя температура активной области по длине кристалла,  $T_{M1}$  и  $T_{M2}$  – температуры активной области на переднем выходном и заднем глухом зеркалах соответственно).

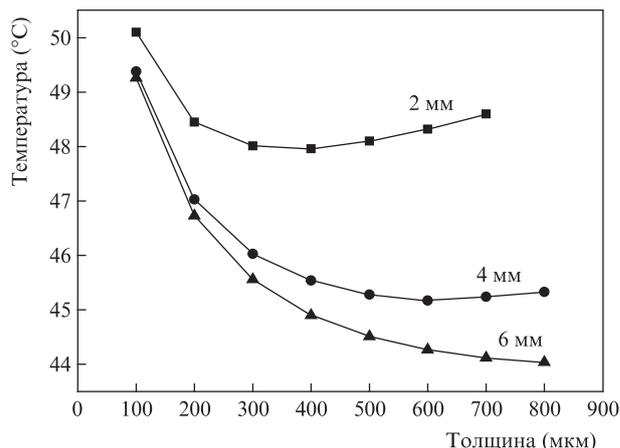


Рис.5. Зависимости средней температуры активной области от толщины алмазного сабмаунта шириной 2, 4 и 6 мм. Моделирование выполнено при тепловой нагрузке 35 Вт и теплопроводности сабмаунта 1200 Вт/мК.

ложительно повлиять на уровень выходной мощности, ширину спектра излучения, надежность и срок службы мощных лазеров.

Оптимизация размеров сабмаунта позволяет снизить среднюю температуру активной области ЛД (рис.5). Минимумы  $T_m$ , рассчитанные при тепловой нагрузке 35 Вт для сабмаунтов шириной 2 и 4 мм, обусловлены растеканием тепла по ширине сабмаунта. Видно, что указанному выше критерию ресурсного режима при теплопроводности 1200 Вт/мК соответствует сабмаунт с толщиной более 0.4 мм и шириной 6 мм. Чем толще алмаз, тем эффективнее отвод тепла, что в идеале позволяет отказаться от базового медного F-маунта с высоким тепловым сопротивлением. Применение алмазных сабмаунтов толщиной более 1 мм, шириной более 4 мм и теплопроводностью свыше 2000 Вт/мК дает возможность значительно снизить температуру активного слоя. Однако, к сожалению, увеличение объема алмазного сабмаунта сопряжено с возрастающими технологическими трудностями выращивания толстых пластин и с повышением их стоимости. Тем не менее, для получения экстремальной мощности и яркости в ряде случаев применение таких больших по размеру и дорогостоящих алмазных элементов оправданно. Кроме того, увеличение размеров сабмаунта влечет за собой необходимость разработки и оптимизации новых типов базовых теплоотводящих элементов с большими размерами.

#### 4. Заключение

Итак, нами изготовлено несколько партий лазерных диодов (около 70 штук) на длину волны 980 нм, собранных на медных С-маунтах. Исследованы их излучательные, электрические и ресурсные характеристики в широком диапазоне токов накачки. Получены высокий полный КПД, достигающий 65%, и большая однородность параметров ЛД в партии при выходной непрерывной мощности 10 Вт и выходе годных образцов более 90% после ресурсных испытаний. Изучены зависимости полного КПД от тока накачки, проведено сравнение с расчетными значениями, получена оценка тепловой нагрузки при расчетной непрерывной выходной мощности 20 Вт. На основе спектральных и ресурсных характеристик установлен критерий непрерывного ресурсного режима работы при температуре задней грани F-маунта 20 °С. Выполнено трех-

мерное моделирование тепловых потоков в лазерном кристалле, смонтированном на медном теплоотводящем элементе с сабмаунтом из синтетического алмаза. Получены данные о влиянии геометрических параметров алмазного сабмаунта и его теплопроводности на максимальную ресурсную мощность.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить сотрудников ИОФРАНа В.И.Конова, В.Г.Ральченко, Е.Е.Ашкинази и А.Ф.Поповича за предоставленные образцы алмазов, а также ценную информацию и плодотворные дискуссии.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 7ОФ.

1. Crump P., Blume G., Paschke K., Staske R., Pietrzak A., Zeimer U., Einfeldt S., Ginolas A., Bugge F., Häusler K., Ressel P., Wenzel H., Erbert G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7198**, 719814-1 (2012).
2. Sin Y., LaLumondiere S.D., Presser N., Foran B.J., Ives N.A., Lotshaw W.T., Moss S.C. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8241**, 824116-1 (2012).
3. Yanson D., Cohen S., Levy M., Shamay M., Geva A., Berk Y., Tesler R., Klumel G., Rappaport N., Karni Y. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8640**, 86401I-1 (2013).
4. Ашкинази Е.Е., Безотосный В.В., Бондарев В.Ю., Коваленко В.И., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. В сб. статей *Полупроводниковые лазеры и системы на их основе* (Минск: изд-е ИФ НАНБ, 2011, с. 29).
5. Ашкинази Е.Е., Безотосный В.В., Бондарев В.Ю., Коваленко В.И., Конов В.И., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Попович А.Ф., Ральченко В.Г., Чешев Е.А. *Квантовая электроника*, **42** (11), 959 (2012).
6. Безотосный В.В., Бондарев В.Ю., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. *Тез. докл. симп. «Полупроводниковые лазеры: физика и технология»* (Санкт-Петербург, 2012, с. 14).
7. Nakwaski W. *Int. J. Optoelectron.*, **5** (5), 451 (1990).
8. Nakwaski W. *IEE Proc. I*, **131** (3), 94 (1984).
9. Накваски В. *Квантовая электроника*, **11**, 391 (1984).
10. Безотосный В.В., Кумыков Х.Х., Маркова Н.В. *Квантовая электроника*, **23** (9), 775 (1996).
11. Безотосный В.В., Кумыков Х.Х. *Квантовая электроника*, **25** (3), 225 (1998).