

## Лазерные диоды на длине волны 980 нм с непрерывной мощностью 15 Вт на теплоотводящих элементах типа F-маунтов

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

*Исследованы основные излучательные параметры лазерных диодов (длина волны 980 нм, ширина полоскового контакта 95 мкм), смонтированных непосредственно на медных теплоотводящих элементах типа F- и C-маунтов без использования промежуточных элементов (сабмаунтов). При эффективном охлаждении с помощью термоэлектрического микроохлаждителя лазеры на F-маунте устойчиво работали до мощности 20 Вт. Проведены ресурсные испытания таких лазеров при выходной мощности 15 Вт в течение 100 ч; снижения мощности в пределах точности измерений не обнаружено. Измеренный экспериментально полный КПД в максимуме составил 71.7%, а при номинальной выходной мощности 15 Вт он был равен 61%. Проведено сравнение параметров лазерных диодов, собранных на C- и F-маунтах, обсуждаются преимущества F-маунтов.*

**Ключевые слова:** мощные лазерные диоды, КПД, ресурсная мощность.

Задача повышения ресурсной мощности и яркости лазерных диодов остается весьма актуальной [1–7]. Для повышения эффективности отвода тепла и получения ресурсного режима при более высоком уровне выходной оптической мощности продолжается совершенствование конструкций базовых гетероструктур, операций планарного процессинга, пассивации и защиты зеркал резонаторов, а также методов монтажа. В частности в [1, 2] для повышения КПД лазеров на  $\lambda = 980$  нм с 65% до 70% использовались пониженные до  $-50^\circ\text{C}$  температуры теплоотводящего элемента. Температуры ниже точки росы требуют использования вакуумной камеры, что осложняет практические применения лазеров. Сравнительному исследованию параметров мощных лазерных диодов на длине волны 808 нм, собранных на F- и C-маунтах, посвящена работа [7], в которой в непрерывном режиме были получены максимальные мощности 12.6 и 10.9 Вт соответственно. Этот результат свидетельствует о незначительном повышении выходной мощности лазера на F-маунте, но не позволяет определить вклад геометрии самого теплоотводящего элемента, поскольку, кроме базовых теплоотводящих элементов, были применены термокомпенсаторы разного типа: диэлектрический (из керамики) в случае F-маунта и композиционный металлический (из CuW) в случае C-маунта, что, несомненно, существенно повлияло на тепловой режим.

В настоящей работе теплоотводящие элементы обоих типов были изготовлены на одном и том же оборудовании, одним методом, из одной партии меди, с одинаковым качеством обработки поверхностей и ребер и различа-

лись только геометрией, что гарантирует более адекватные для сравнения экспериментальные результаты, а также возможность их сопоставления с расчётными данными. Для монтажа использовались идентичные чипы лазерных кристаллов из одной партии и одного геля-пака. Лазеры монтировались на теплоотводящие элементы F- и C-маунты с одинаковыми параметрами планарности и шероховатостями рабочей и базовой теплоотводящих поверхностей. В экспериментах применялся один и тот же припой одинаковой толщины и близкие тепловые режимы сборки.

Ранее мы сообщали о получении ресурсной выходной мощности 10 Вт на длине волны 980 нм от лазерных диодов, смонтированных на C-маунте. Максимальный КПД этих лазеров составил в среднем 65% [8]. В этой работе были получены расчётные тепловые параметры лазеров (средняя температура активного слоя и температуры выходного и глухого зеркал резонаторов) в зависимости от тепловой нагрузки при монтаже на C- и F-маунты. В работе [9] был проведён сравнительный расчётный анализ теплового режима при сборке лазерных кристаллов на всех известных типах сабмаунтов, включая проводящие и диэлектрические термокомпенсаторы, а также алмазные сабмаунты с высокой теплопроводностью.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию лазерного чипа на F-маунте, а также проверке полученных в [8] расчётных результатов при монтаже лазерных кристаллов непосредственно (без использования сабмаунтов) на C- и F-маунты.

Проведённые в [8] расчёты показали, что применение F-маунта предпочтительнее, поскольку в этом случае тепловой поток от активного слоя лазерной гетероструктуры более однороден, чем при использовании C-маунта. Различия между указанными теплоотводящими элементами обусловлены тем, что в C-маунте базовая теплоотводящая поверхность расположена перпендикулярно теплоотводящей поверхности основного теплоотводящего блока, а в F-маунте эти поверхности параллельны, поэтому тепловой поток в нем существенно более однороден.

**В.В.Безотосный, О.Н.Крохин, Ю.М.Попов, Е.А.Чешев.** Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31 e-mail: victorbe@sci.lebedev.ru

**В.А.Олещенко, В.Ф.Певцов.** Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53;

Поступила в редакцию 6 октября 2015 г.

Это дает принципиальную возможность снизить температуру активного слоя при высоких тепловых нагрузках и существенно уменьшить перепад температуры по длине лазерного кристалла, что также может благоприятно повлиять на тепловой режим кристалла и повысить выходные параметры лазера.

Экспериментальная проверка этих соображений подтвердила указанные преимущества F-маунта. С точки зрения технологии монтажа лазерного чипа при переходе на F-маунт существенных сложностей не возникло – были лишь незначительно скорректированы термоциклы сборки чипа с учётом отличной от C-маунта геометрии и более высокой теплоёмкости F-маунта, а также учтены его размеры при обеспечении ламинарного потока инертного газа. Кроме того, были выявлены некоторые особенности монтажа F-маунтов на базовый теплоотводящий блок. Как показали детальные измерения локальной температуры, проведённые с помощью микротермодатчика при высоких тепловых нагрузках, в различных зонах конструкции F-маунта вследствие использования двух крепёжных винтов несколько сложнее обеспечить равномерный прижим и соответственно более однородный тепловой контакт с базовым блоком термоэлектрического охлаждения, чем при использовании одного крепёжного винта в случае C-маунта. Для улучшения теплового контакта была повышена планарность и снижена шероховатость теплоотводящей поверхности базового блока, а также использована отвёртка с динамометрической головкой для контроля усилия прижима. Очевидно, что для снижения перепада температуры по толщине F-маунта желательно уменьшить его толщину, однако слишком тонкая пластина из пластичной меди при креплении двумя винтами по краям деформируется и прогибается, что может ухудшать отвод тепла в центре пластины (в месте расположения чипа лазерного диода); исходя из этих соображений оптимальная толщина F-маунта была выбрана равной 2.5 – 3 мм.

Ватт-амперные характеристики (ВтАХ) образцов, собранных на C- и F-маунтах, показаны на рис.1. Пороговые токи лазеров практически одинаковы и до мощности 10 Вт ВтАХ близки к линейным; при этом дифференциальная эффективность лазера на F-маунте несколько больше. При токе накачки свыше 10 А и, соответственно, выходной мощности более 11 Вт различия во ВтАХ увеличиваются, обе характеристики становятся сублинейными. При мощности 20–21 Вт наблюдалась ката-

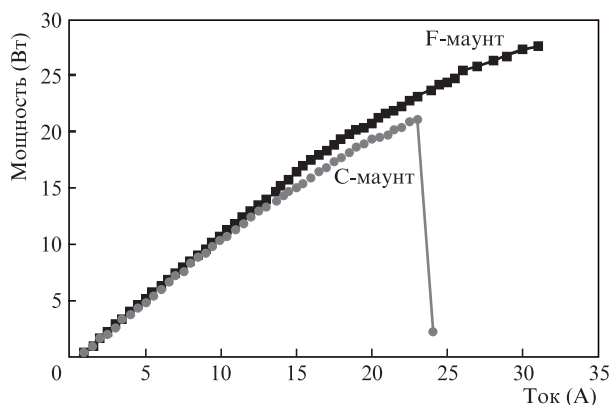


Рис.1. Ватт-амперные характеристики лазерных диодов (длина волны 980 нм, ширина полоскового контакта 95 мкм, длина резонатора 4 мм), собранных на медных C-и F-маунтах.

строфическая оптическая деградация (КОД) лазеров на C-маунте, тогда как лазеры на F-маунте работали без КОД до мощности 27–28 Вт. Заметим, что измерения ВтАХ многократно повторялись и максимальная выходная мощность воспроизводилась.

Таким образом, наиболее важный экспериментальный результат, представленный на рис.1, – это повышение предельной мощности при использовании F-маунта. По нашему мнению, наряду с уменьшением средней температуры активного слоя лазера на F-маунте, важную роль в повышении предельной мощности играет согласно [8] существенное снижение температуры выходного зеркала и перепада температуры по длине кристалла.

Исследование выходного зеркала под микроскопом после 10 циклов испытаний до достижения максимальной мощности не выявило видимых повреждений образцов на F-маунте, тогда как зеркала лазеров на C-маунтах имели характерные для КОД повреждения.

На рис.2 представлены зависимости полного КПД лазеров, смонтированных на C-и F-маунтах, от тока накачки, рассчитанные по экспериментальным ватт- и вольт-амперным характеристикам. Видно, что при токах накачки до 3 А кривые для КПД практически совпадают, т.к. тепловые режимы лазеров при малой тепловой нагрузке различаются незначительно. Максимальное значение полного КПД

$$\eta_{\text{tot}}^{\text{max}} = \frac{\eta_d J E_g}{I_{\text{max}} (U_{\text{th}} + R_s J)} \quad (1)$$

достигается [10] при токе накачки

$$I_{\text{max}} = I_{\text{th}} + J, \quad (2)$$

где  $I_{\text{th}}$  – пороговый ток;  $J = \sqrt{I_{\text{th}} U_{\text{th}} / R_s}$ ;  $U_{\text{th}}$  – напряжение на пороге генерации;  $R_s$  – последовательное сопротивление лазерного диода;  $\eta_d$  – дифференциальная эффективность;  $E_g$  – ширина запрещённой зоны. Найденные экспериментально значения  $I_{\text{max}}$ , как следует из рис.2, несколько различаются: для лазера на F-маунте  $I_{\text{max}} = 5$  А, а для лазера на C-маунте  $I_{\text{max}} = 4.5$  А. Ввиду слишком упрощённого анализа по формулам (1), (2) сложно определить вклады в этот эффект различных зависящих от температуры параметров, в частности  $I_{\text{th}}$ ,  $\eta_d$ ,  $E_g$ ,  $U_{\text{th}}$  и  $R_s$ . Можно лишь отметить, что  $I_{\text{th}}$  и  $U_{\text{th}}$  измеряются при незначительной тепловой нагрузке, поэтому, вероятно, основную

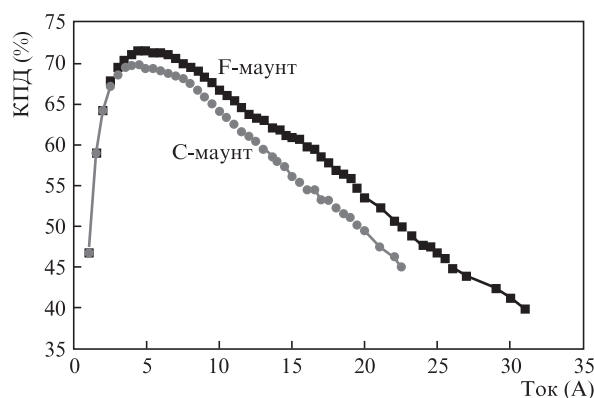


Рис.2. Зависимости полного КПД, рассчитанного по формуле (1), от тока накачки для лазерных диодов (980 нм, 95 мкм, 4 мм), собранных на медных C-и F-маунтах.

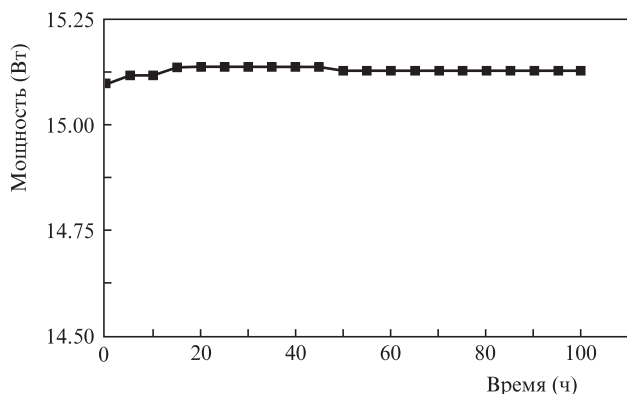


Рис.3. Кратковременный ресурсный тест лазерного диода, собранного на F-маунте, при выходной мощности 15 Вт в течение 100 ч.

роль играет температурная зависимость  $\eta_d$ , а вклады  $R_s$  и  $E_g$  менее значительны.

Более высокий максимальный КПД при монтаже лазера на F-маунте согласно (1) может быть также объяснён большей дифференциальной эффективностью, обусловленной более эффективным отводом тепла. При увеличении тока накачки, согласно данным рис.2, прослеживается тенденция к увеличению разности значений КПД, что также ожидаемо, т. к. с ростом тепловой нагрузки увеличиваются различия в дифференциальной эффективности, пороговом токе и энергии кванта. При выходной мощности 15 Вт КПД лазеров на F- и C-маунтах составили 61% и 56% соответственно, что весьма существенно. Согласно результатам тепловых расчётов [8], с повышением тепловой нагрузки различия в эффективности и равномерности отвода тепла проявляются более явно, при этом в случае F-маунта перепад температуры по длине кристалла значительно меньше, что особенно актуально для больших длин лазерного резонатора (в нашем случае длина резонатора равнялась 4 мм). Вероятно, именно это преимущество F-маунта является определяющим в повышении максимальной ресурсной мощности и предельной мощности КОД, которые достигаются благодаря снижению температуры выходного зеркала и градиента температур между глухим и выходным зеркалами; кроме того, немалую роль в повышении максимальной ресурсной мощности играет снижение термоупругих напряжений по длине кристалла. На рис.3 представлены результаты контроля мощности при испытании лазерного диода, смонтированного на F-маунте, в течение 100 ч при мощности излу-

чения не менее 15 Вт. В первые 15 ч наблюдалось небольшое увеличение мощности, затем её незначительные колебания, и после 50 ч наработки выходная мощность стабилизировалась на уровне 15.1 Вт.

Итак, изготовлены экспериментальные образцы мощных лазерных диодов на основе идентичных чипов, собранные на C-и F-маунтах, с длиной волны 980 нм, шириной полоскового контакта 95 мкм и длиной резонатора 4 мм. Максимальная выходная мощность при монтаже на C-маунте составила 21 Вт, на F-маунте – 28 Вт. При монтаже непосредственно на медном F-маунте без сабмаунтов выходная мощность стабилизировалась на уровне 15 Вт после 50 ч наработки при длительности испытаний 100 ч.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 14.575.21.0047, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0047) и РФФИ (грант РФФИ № 14-02-31718 мол\_а).

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. Crump P., Erbert G., Wenzel H., Frevert C., Schultz C.M., Hasler K.-H., Staske R., Sumpf B., Maaßdorf A., Bugge F., Knigge S., Trankle G. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **19** (4), 1501211 (2013).
3. 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).
4. 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**, 864011-1 (2013).
5. Винокуров Д.А., Станкевич А.Л., Шамахов В.В., Капитонов В.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Николаев Н., Пихтин Н.А., Рудова Н.А., Соколова З.Н., Слипченко С.О., Хомылев М.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **40** (6), 764 (2006).
6. Тер-Мартirosян А.Л., Демидов Д.М., Свердлов М.А., Кулик А.В., Карпов С.Ю. *Научное приборостроение*, **23** (4), 45 (2013).
7. Xiaoning Li, Yanxin Zhang, Jingwei Wang, Lingling Xiong, Pu Zhang, Zhiqiang Nie, Zhenfu Wang, Hui Liu, Xingsheng Liu. *IEEE Trans. Components, Packaging and Manufacturing Technol.*, **2** (10), 1592 (2012).
8. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. *Квантовая электроника*, **44** (2), 145 (2014).
9. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. *Квантовая электроника*, **44** (10), 899 (2014).
10. Bezotosnyi V.V., Krokhin O.N., Oleshchenko V.A., Pevtsov V.F., Popov Yu.M., Cheshev E.A. *Phys. Procedia*, **72**, 399 (2015).