

Одиночные лазерные диоды спектрального диапазона 808 нм с максимальной мощностью 25 Вт

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

Осуществлен монтаж кристаллов мощных лазерных диодов непосредственно на медные теплоотводящие элементы. Многократно получена максимальная мощность излучения 25 Вт лазера с шириной полоскового контакта 150 мкм и длиной волны 808 нм в непрерывном режиме при 20 °С. После тренировочных испытаний при мощности излучения 6 Вт в течение 200 ч выход годных образцов составил 80 %. После испытаний в течение 70 ч при мощности 8.5 Вт изменения выходных параметров не зафиксированы; испытания продолжаются.

1. Введение

Цель настоящей работы – увеличение выходной мощности и обеспечение заданного срока службы лазерного диода, а также повышение технологичности и снижение стоимости операций сборки. Операции монтажа лазерного кристалла являются весьма сложными и дорогостоящими и определяют выходные параметры готовых приборов (мощность излучения, полный КПД, спектральные параметры излучения, надёжность и срок службы). Операции монтажа должны обеспечить не только заданный тепловой режим работы лазерного кристалла, но и контроль в допустимых пределах термоупругих напряжений для его надёжной и долговременной работы.

Лазерный кристалл (чип одиночного лазера или лазерной линейки) изначально напряжен из-за различия в коэффициентах термического расширения (КТР) материалов гетероструктуры, а также вследствие технологических операций травления мезаструктур, нанесения контактов, шлифовки и полировки гетероструктуры, скалывания зеркал и боковых граней, нанесения защитно-просветляющих и отражающих покрытий на зеркала кристалла.

Для решения проблемы термоупругих напряжений используются два основных подхода – применяется либо очень пластичный припой (например, на основе индия), либо промежуточный термокомпенсирующий элемент, КТР которого близок к КТР лазерного кристалла.

При сборке чипов на индиевый припой мы не смогли достичь повторяемости результатов, максимальная мощность излучения составила 6.3 Вт, лазер работал не более 1 ч. Причиной деградации была ползучесть припоя, поэтому максимальная ресурсная мощность лазера не превышала 4 Вт [1].

В.В.Безотосный, В.Ю.Бондарев, 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

Г.Т.Микаелян. ОАО Научно-производственное предприятие «Инжекст», Россия, 410052 Саратов, просп. 50 лет Октября, 101; e-mail: ingect@overta.ru

Поступила в редакцию 15 октября 2008 г., после доработки – 12 декабря 2008 г.

Термокомпенсаторы изготавливаются из диэлектриков (BeO, AlN, SiC) либо из порошков металлов (медь – молибден, медь – вольфрам). Их теплопроводность составляет около 50 % от теплопроводности меди. Наиболее продвинутые термокомпенсаторы изготавливаются фирмой Sumitomo Electric (Япония) из композита медь – алмаз и имеют по паспорту теплопроводность, не уступающую теплопроводности меди, однако стоимость таких термокомпенсаторов с металлизацией превышает стоимость самого лазерного кристалла.

Существенным недостатком термокомпенсаторов является невысокая технологичность с точки зрения как прецизионной обработки для получения поверхности с малой шероховатостью и высоким качеством выходного ребра, так и их металлизации, необходимой для пропуска больших токов накачки (10 А и более).

Нам удалось решить указанные проблемы без использования термокомпенсаторов, что значительно повышает технологичность и снижает стоимость операций сборки. Монтаж лазерных кристаллов осуществлялся нами непосредственно на медные теплоотводящие элементы с помощью твердого припоя.

При сборке лазерных кристаллов следует учитывать, что вносимые термоупругие напряжения (в паяном шве и в зонах приварки верхних электродов) накладываются на уже существующие в кристалле механические напряжения. Кроме того, для обеспечения долговременной работы лазерного диода нужно создать соединение, сохраняющее стабильность однородной по площади теплопередачи (тепловое сопротивление лазера) и электрического контакта (последовательное электрическое сопротивление лазера).

Операции сборки увеличивают стоимость готового лазера минимум в 5–10 раз при выходе годных изделий около 50 %. Расширение сферы применения мощных лазерных диодов требует значительного повышения выхода годных образцов и снижения стоимости готового излучателя.

2. Кристаллы (чипы) мощных лазерных диодов и их сборка

Наилучшие результаты по увеличению выходной мощности как на одиночных чипах лазерных диодов,

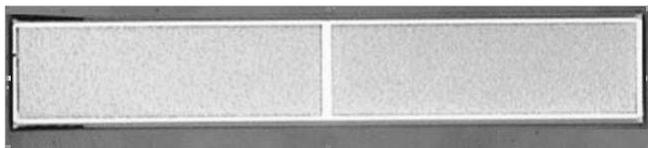


Рис.1. Вид чипа со стороны эпитаксиальной структуры. Длина резонатора 3 мм, ширина – 0.5 мм.

так и на лазерных линейках были получены при увеличении длины резонатора лазерного кристалла с 1–1.5 мм до 3–4 мм. Это стало возможным при использовании лазерных гетероструктур со сверхшироким волноводом, в которых внутренние потери снижены до 0.5 см^{-1} [2]. Такие длинные лазерные диоды, изготовленные из подобных гетероструктур, имеют и другие важные преимущества: у них снижена тепловая нагрузка (она пропорциональна площади активной среды), уменьшена лучевая нагрузка на зеркалах и снижена расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной p–n-переходу. Двукратное снижение расходимости (до $20^\circ - 25^\circ$) позволяет более эффективно фокусировать излучение, а уменьшение удельной тепловой нагрузки при условии равномерного отвода тепла от чипа делает принципиально возможным рост выходной мощности в ресурсном режиме. Исползованный в работе чип показан на рис.1.

Сборка лазерных диодов проводилась в условиях чистого помещения (класс 10000), установка для пайки лазерных кристаллов Fineplacer Lambda A6 (Finetech, Германия) была размещена под ламинарным шкафом (Stangl, Германия), обеспечивающим класс чистоты воздуха 100. Для приварки верхних электродов использовалась установка ультразвуковой сварки НВ12 (ТРТ, Германия), также размещенная под ламинарным шкафом класса 100. Собранный лазер (вид сверху) показан на рис.2.

Выходная мощность лазера до 10 Вт измерялась 10 раз, и никаких признаков насыщения мощности и повреждения кристалла обнаружено не было. Контроль

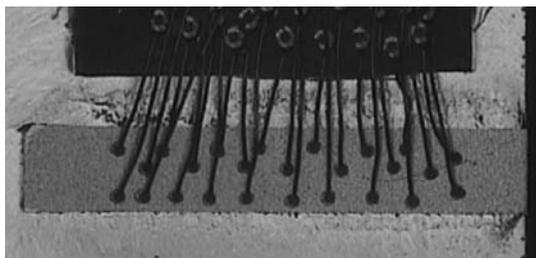


Рис.2. Вид собранного лазерного чипа сверху.

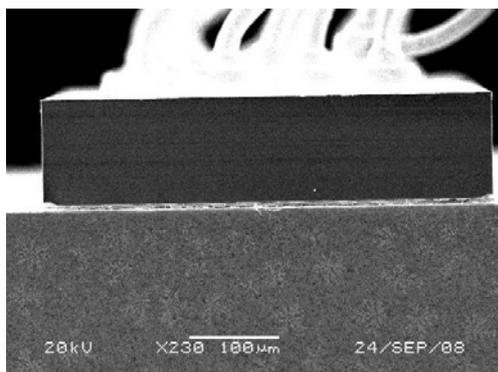


Рис.3. Микрофотография на СЭМ собранного лазерного диода ($\lambda = 808 \text{ нм}$). Вид со стороны выходного зеркала.

зеркал лазера проводился на оптическом микроскопе и сканирующем электронном микроскопе (рис.3).

3. Выходные характеристики лазерных диодов

Для определения устойчивости найденного оптимума диаграммы процесса монтажа лазерного кристалла (степени отклонения выходных параметров лазеров от оптимальных при вариации основных параметров процесса сборки вблизи оптимума) были рассмотрены параметры лазеров, собранных при 10 %-ной вариации максимума температуры и 50 %-ной вариации времени сборки. Установлено, что вблизи оптимума разработанный процесс сборки достаточно устойчив, разброс выходной мощности при токе накачки 8 А составил 7–8.3 Вт. Разброс значений пороговых токов был незначительным, разброс наклона ватт-амперных характеристик (ВтАХ) находился в пределах 1.03–1.22 Вт/А.

Варьирование режимов позволило определить оптимальные параметры диаграммы процесса. Ватт- и вольт-амперные характеристики образцов, собранных в фиксированном режиме, близком к оптимальному, до мощности 6 Вт воспроизводятся с точностью, близкой к точности измерений, а при выходной мощности около 10 Вт разброс её значений составляет около 10% (1 Вт), вероятно, из-за неоднородностей теплового контакта кристалла и теплоотводящего элемента. На рис.4 показаны ВтАХ лазеров, собранных в фиксированном режиме.

Выходные параметры (мощность и полный КПД) лазера LD-117 представлены на рис.5. Для измерения мощности более 10 Вт использовалась интегрирующая сфера, калиброванная до максимальной мощности 120 Вт; паспортный диапазон линейности измерительной схемы составляет 10–120 Вт. Диапазон линейности измерений был нами проверен с использованием выходной мощности непрерывной лазерной линейки от 10 до 60 Вт. Калибровка интегрирующей сферы была дополнительно проверена при выходной мощности 10 Вт (верхний предел измерителя мощности Laser Mate (Coherent) и нижний предел диапазона линейности интегрирующей сферы). Калибровка этих приборов при мощности 10 Вт совпала в пределах 2%.

Максимальный полный КПД лазера составил 53% при токе накачки 13.3 А и мощности 14.5 Вт. Достигнута выходная мощность до 25 Вт при температуре тепло-

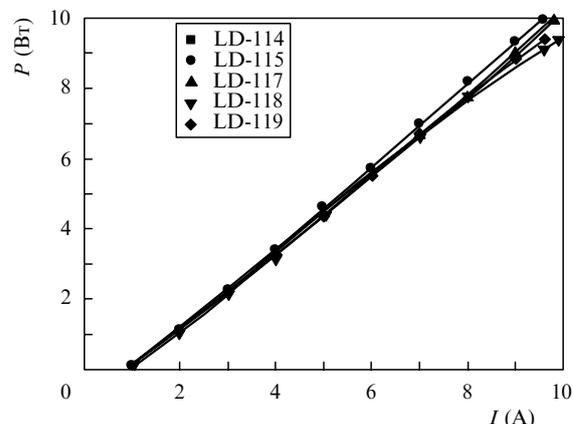


Рис.4. Ватт-амперные характеристики серии лазерных диодов, собранных в фиксированном режиме.

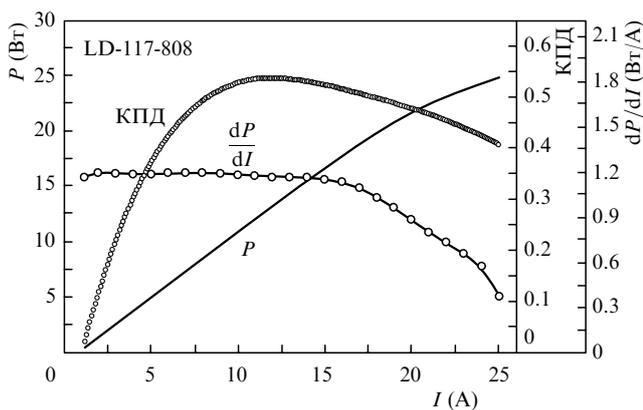


Рис.5. Зависимости мощности, КПД и дифференциальной эффективности от непрерывного тока накачки. Температура теплоотводящего элемента 20 °С.

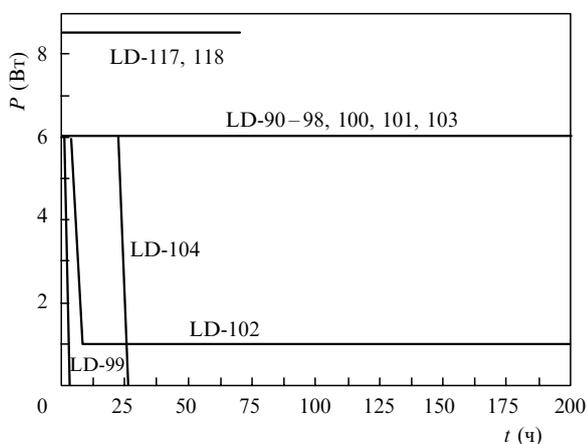


Рис.6. Данные по надёжности 15 образцов лазеров, собранных в одной серии, при мощности 6 Вт, и двух образцов (LD-117 и LD-118) при мощности 8.5 Вт .

отводящего элемента 20 °С, причем ВтАХ не изменялась в случае многократного повторения. Заметное отклонение ВтАХ от линейности наблюдалось при мощности более 12 Вт, что, как видно из рис.5, соответствует выходной мощности вблизи максимума КПД. Ширина полоскового контакта лазерного чипа была равна 150 мкм, поэтому полная предельная повторяемая выходная мощность 25 Вт и предельная мощность 0.167 Вт, получаемая с одного микрона ширины активной среды, соответствуют лучшим мировым достижениям для лазерных диодов на длине волны 808 нм [3].

4. Ресурсные испытания

Данные ресурсных испытаний образцов одной из серий лазеров при мощности излучения 6 и 8.5 Вт приведены на рис.6. В результате оптимизации диаграммы

процесса были подобраны такие режимы, при которых все отказы в серии (выявление потенциально ненадёжных приборов) происходят за довольно непродолжительное (до 30 ч) время, поэтому для прогнозирования ресурса разработанных лазеров не требуются дорогостоящие долговременные испытания, к тому же «съедающие» у потребителя значительную часть срока службы прибора. Полученные данные свидетельствуют о том, что для отбора надёжных лазеров нужно не более 100 ч испытаний.

Приведённые на рис.6 данные дают основания для оптимизма, поскольку в серии из 15 лазеров вышли из строя при мощности 6 Вт в течение 28 ч только три, а у оставшихся приборов в течение последующих 170 ч работы отказов и изменения мощности не зафиксировано. Уровень мощности образцов LD-117 и LD-118 после 70 ч испытаний при мощности 8.5 Вт не изменился, испытания продолжаются. Очевидно, что только после натуральных испытаний серии из не менее чем 100 образцов в течение 1000–2000 ч можно будет ответить на вопрос о реальном прогнозируемом сроке службы этих лазеров и о надёжности разработанной технологии.

5. Выводы

1. Разработан новый метод монтажа кристаллов мощных одиночных лазерных диодов без применения термокомпенсаторов. В качестве теплоотводящих элементов использованы С-маунты, изготовленные из меди.

2. Получена высокая повторяемость параметров при первом их измерении после сборки (выходная мощность 10 Вт при токе 10 А) и достигнут достаточно высокий выход годных образцов (80 % на длине волны 808 нм) после тренировочных испытаний в течение 200 ч при мощности 6 Вт.

3. После испытаний в течение 70 ч при мощности 8.5 Вт выходная мощность и электрические параметры лазеров не изменились, повреждений зеркал резонаторов не зафиксировано. Испытания при мощности 8.5 Вт продолжаются.

4. Максимальная повторяемая выходная мощность лазера с шириной полоскового контакта 150 мкм составила 25 Вт, что соответствует лучшим результатам, достигнутым на длине волны 808 нм. [3] .

1. Безотосный В.В., Бондарев В.Ю., Коваленко В.И., Крохин О.Н., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Токарев В.Н., Чешев Е.А. *Квантовая электроника*, **37** (11), 1055 (2007).
2. Безотосный В.В., Васильева В.В., Винокуров Д.А., Капитонов В.А., Крохин О.Н., Лешко А.Ю., Лютетский А.В., Мурашова А.В., Налет Т.А., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Попов Ю.М., Слипенченко С.О., Станкевич А.Л., Фетисова Н.В., Шамахов В.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **42** (3) 357 (2008).
3. Wei Gao, Zuntu Xu, Lisen Cheng, Kejian Luo, Andre Mastrovito, Kun Shen. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6456**, 64560B1 (2007).