

Моделирование теплового режима мощных лазерных диодов, смонтированных с использованием сабмаунтов различного типа

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

На основе трёхмерной тепловой модели на примере излучающего на длине волны 980 нм мощного лазерного диода с шириной полоскового контакта 100 мкм проанализированы тепловые параметры мощных лазерных диодов, смонтированных с применением сабмаунтов. Рассмотрен диапазон значений теплопроводности сабмаунтов, включающий параметры широко используемых термокомпенсаторов на основе AlN, BeO, SiC и композитов CuW, CuMo, а также поликристаллических и монокристаллических синтетических алмазов с высокой теплопроводностью. С учётом экспериментальной зависимости полного КПД от уровня накачки рассчитаны температуры активного слоя при тепловых нагрузках, соответствующих выходной мощности около 10, 15 и 20 Вт в непрерывном режиме (в зависимости от ширины, толщины и теплопроводности сабмаунтов).

Ключевые слова: мощный лазерный диод, сабмаунт, КПД, тепловой режим.

1. Введение

Совершенствование технологии изготовления современных мощных лазерных диодов в течение нескольких последних лет позволило преодолеть новые технические и психологические рубежи повышения их выходных параметров: так, преодолены рубежи полного КПД в 50% и ресурсной выходной мощности 10 Вт от лазерного диода с шириной полоскового контакта 100 мкм. Хотя доступные промышленные непрерывные мощные лазерные диоды уже работают при экстремально высоких тепловых нагрузках (плотность тепловых потоков, отводимых от активной области, превышает 3 кВт/см²), резервы повышения их выходной мощности далеко не исчерпаны. В ряде лабораторий ведутся работы, направленные на повышение непрерывной ресурсной выходной мощности до 15–20 Вт [1–4]. Экстремально высокая плотность тепловыделения в активной области мощного лазерного диода обусловлена наноразмерной толщиной активного слоя в лазерной гетероструктуре. Действительно, при полном КПД 50%, выходной мощности 10 Вт, толщине активного слоя 10 нм, ширине полоскового контакта 100 мкм и длине резонатора 3 мм плотность тепловыделения превышает 3 ГВт/см³, т.е. является рекордной для оптоэлектронных приборов.

Поскольку, как показано в [4], повышение выходной мощности до 20 Вт в ресурсном режиме работы сопряжено с существенным снижением полного КПД, тепловая на-

грузка на теплоотводящий элемент при такой оптической мощности составляет 30–35 Вт, а плотность отводимых тепловых потоков возрастает до уровня более 10 кВт/см². Отведение указанных непрерывных тепловых потоков и тем более их существенное увеличение, необходимое для дальнейшего повышения выходной мощности при допустимых для обеспечения ресурсного режима работы полупроводникового кристалла перепадах температуры около 30°C относительно температуры нижней грани базового теплоотводящего элемента, требуют применения новых, более эффективных методов, технологий и материалов.

Наряду с тепловой проблемой, технология изготовления мощных лазерных диодов связана с необходимостью решения другой принципиальной проблемы, обусловленной существенными отличиями в тепловых и механических свойствах полупроводниковых и теплоотводящих материалов. Это проблема термоупругих напряжений в гибридных конструкциях смонтированных мощных диодных лазеров.

Проблема термоупругих напряжений в большинстве случаев решается с помощью так называемых термокомпенсаторов, представляющих собой прослойку между базовым медным теплоотводящим элементом и полупроводниковым лазерным кристаллом и состоящую из кристаллического, керамического или композитного материала. Наиболее часто в современных конструкциях встречаются термокомпенсаторы из AlN, BeO, SiC, а также композитов CuW и CuMo. Термокомпенсаторы из указанных материалов имеют коэффициент термического расширения (КТР), близкий к КТР полупроводника; их недостатком является существенно более низкая по сравнению с медью теплопроводность, находящаяся в интервале 150–250 Вт/мК. Наиболее продвинутым композитным материалом является композит медь–алмаз, разработанный в Sumitomo Electric (Япония), с теплопроводностью до 1000 Вт/мК, однако сабмаунты для лазерных диодов из этого материала обладают рядом недостатков. Кроме достаточно высокой стоимости таких элементов, имеются трудности, связанные с технологическими особенно-

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, Москва 119991 Ленинский просп., 53;

Поступила в редакцию 29 апреля 2014 г., после доработки – 26 мая 2014 г.

стями их изготовления, а именно с ограничениями на минимальный размер зерна композита. Этот параметр ограничивает их возможности с точки зрения эффективности теплопередачи, обусловленные, в частности, предельной шероховатостью рабочих поверхностей и геометрией рабочего ребра.

2. Моделирование теплового режима

Задача моделирования теплового режима сборки, представляющей собой гибридную конструкцию, которая состоит из полупроводникового лазерного кристалла, базового медного теплоотводящего элемента и промежуточного теплоотводящего элемента, является весьма актуальной. Результаты такого моделирования, осуществлённого с помощью пакета Comsol, как будет показано ниже, позволяют понять принципиальный характер зависимостей эффективности работы таких конструкций от тепловой нагрузки, геометрических параметров элементов, их теплопроводности и граничных условий. Трёхмерные тепловые расчёты обеспечивают возможность варьировать указанные выше параметры и найти дизайн гибридных конструкций, оптимальный для выбранного уровня выходной мощности и параметров материалов.

При вычислениях по тепловой модели мы использовали параметры мощного одиночного лазерного диода (ЛД) с длиной волны 980 нм и шириной полоскового контакта 100 мкм, смонтированного на медном теплоотводящем элементе типа С-маунт без применения сабмаунтов. Исключительно высокие излучательные параметры таких ЛД получены благодаря применению асимметричных гетероструктур с расширенным волноводом [5–7]. Экспериментальная ватт-амперная характеристика (ВтАХ) ЛД, полученная при кратковременных измерениях в непрерывном режиме, приведена на рис. 1.

Максимальная мощность составляла около 22 Вт, наклон ВтАХ был равен 1.1 Вт/А, полный КПД в максимуме доходил до 68%. Видно, что максимум КПД достигается при токах накачки около 7 А, при более высоком уровне возбуждения он существенно уменьшается из-за достаточно высокого последовательного сопротивления лазерного диода. С этой точки зрения снижение последовательного сопротивления является весьма актуальной задачей, поскольку при этом повышается полный КПД и

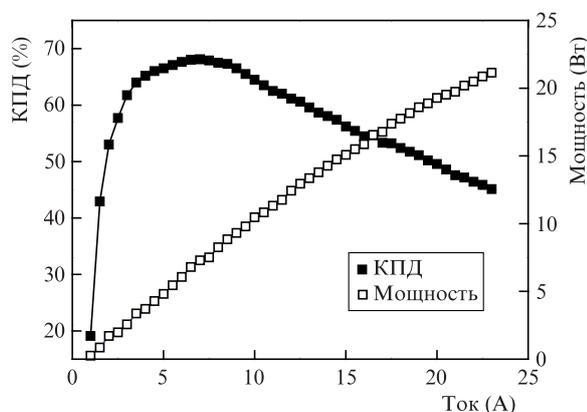


Рис.1. Экспериментально полученные ватт-амперная характеристика и полный КПД в зависимости от тока накачки одиночного лазерного диода с шириной полоскового контакта 100 мкм, излучающего на длине волны 980 нм.

увеличивается ресурсная выходная мощность. Решение данной задачи требует оптимизации конструкции лазерной гетероструктуры, в частности высот гетеробарьеров и толщин волноводных слоёв и широкозонных эмиттеров, а также их оптимального легирования.

Приведенные экспериментальные данные были использованы как базовые для моделирования параметров таких лазерных кристаллов при монтаже на более эффективный по сравнению с С-маунтом медный теплоотводящий элемент типа F-маунт с применением сабмаунтов разного типа. При моделировании ставилась задача вычисления средней по длине резонатора температуры лазерного кристалла в активном слое при вариации основных параметров сабмаунта – толщины, ширины и теплопроводности – в условиях различной тепловой нагрузки.

На рис.2 приведены расчётные распределения температуры для указанной выше гибридной конструкции при тепловой нагрузке 30 Вт и применении алмазного сабмаунта с теплопроводностью 1200 Вт/мК, соответствующей типичной для синтетических поликристаллических алмазов, выращенных методом plasma-CVD и использованных в экспериментальных работах [8–10]. Моделирование тепловых режимов лазерных диодов проводилось в большом числе работ, в частности в [11–16], однако подробное трёхмерное моделирование теплового режима мощных лазерных диодов в зависимости от параметров сабмаунтов различных типов, по нашим сведениям, представлено в настоящей работе впервые.

При расчёте использованы минимально допустимые с технологической точки зрения и минимальные по стоимости размеры алмазного сабмаунта – толщина 0.3 мм и ширина 3 мм. Видно, что при температуре нижней базовой грани F-маунта 20 °С температура на выходном зеркале существенно возрастает, достигая 49 °С. Данное значение температуры находится на границе предельно допустимого для ресурсного режима работы (по нашим экспериментальным данным максимальное превышение температуры в ресурсном режиме должно быть не более 30 °С относительно базового уровня в 20 °С [4]).

На рис.3 приведены значения средней температуры активного слоя при тепловых нагрузках 10, 20 и 30 Вт.

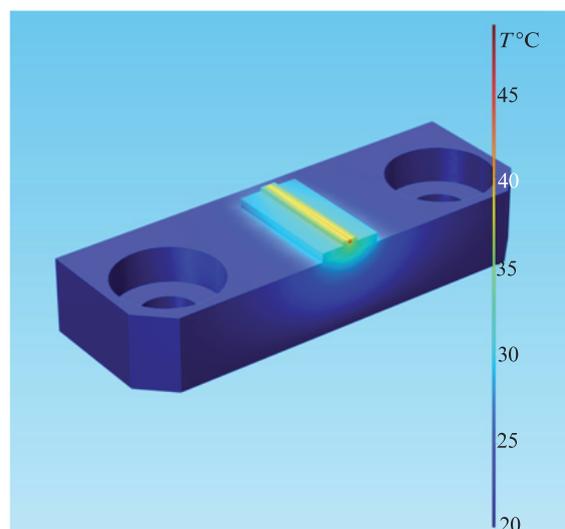


Рис.2. Распределение температуры в гибридной конструкции лазерного диода при использовании алмазного сабмаунта с теплопроводностью 1200 Вт/мК и базового теплоотводящего элемента типа F-маунт при тепловой нагрузке 30 Вт.

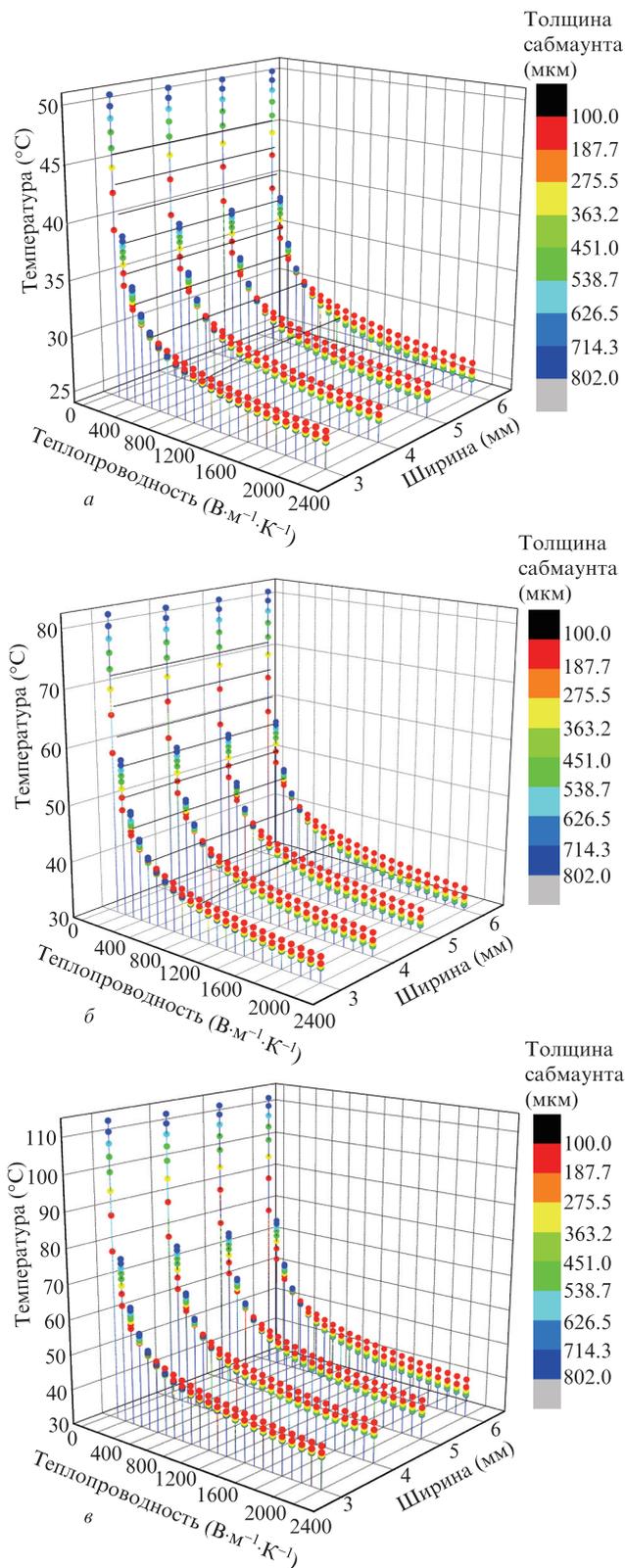


Рис.3. Средняя температура активного слоя лазерного диода при тепловой нагрузке 10 (а), 20 (б) и 30 Вт (в) в зависимости от толщины, ширины и теплопроводности сабмаунта, смонтированного на базовый теплоотводящий элемент типа F-маунт. Толщина сабмаунта показана на шкале справа. Цветные изображения рис.3 приведены на сайте «Квантовой электроники».

Исследуемая гибридная конструкция включает в себя лазерный кристалл, сабмаунт и базовый теплоотводящий элемент типа F-маунт, обеспечивающий по сравнению с

S-маунтом значительно более однородный по рабочей поверхности и более эффективный отвод тепла. Используемая в расчётах толщина F-маунта соответствует стандартной конструкции и составляет 2.5 мм, материал F-маунта – медь с теплопроводностью 400 Вт/мК, граничное условие при моделировании – температура нижней базовой грани медного F-маунта – принималась постоянной и равной 20°C, что соответствовало эксперименту, поскольку на этой поверхности был расположен термодатчик системы термостабилизации .

Вариация ширины сабмаунта составляла 3–6 мм, толщины – от 0.1 до 0.8 мм и теплопроводности – от 100 до 2400 Вт/мК. Указанные диапазоны вариации параметров отвечают интересным с технологической и практической точек зрения материалам, используемым для сабмаунтов, – от композитов с теплопроводностью 150–250 Вт/мК до высококачественных монокристаллов алмаза с теплопроводностью до 2400 Вт/мК .

Сравнение результатов на рис.3,а–в, в позволяет сделать следующие выводы.

1. Максимальная температура возрастает от 50°C при тепловой нагрузке 10 Вт до 113°C при тепловой нагрузке 30 Вт (толщина и ширина сабмаунта 0.1 и 3 мм).
2. В диапазоне теплопроводности сабмаунтов 100 – 400 Вт/мК, как и следовало ожидать, наблюдается наиболее сильная зависимость температуры активного слоя от толщины сабмаунта: при толщине 0.1 мм и тепловой нагрузке 30 Вт температура возрастает от 76 до 113°C .
3. По мере увеличения теплопроводности сабмаунта его толщина оказывает менее заметное влияние на температуру активного слоя . При увеличении теплопроводности и переходе её через точку 400 Вт/мК, соответствующую теплопроводности базового F-маунта из меди, наблюдается «схлопывание» результатов для разных толщин сабмаунта, причём точка, в которой результаты сравниваются, соответствует немногим большей теплопроводности, что очевидно связано с дополнительным увеличением теплового сопротивления всей конструкции из-за увеличения суммарной толщины теплоотводящих элементов.
4. Увеличение толщины сабмаунта при более высокой, чем у базового F-маунта, теплопроводности, как и следовало ожидать, снижает температуру активного слоя. Этот эффект проявляется сильнее с увеличением теплопроводности и ширины сабмаунтов. В частности, при тепловой нагрузке 30 Вт и теплопроводности 1600 Вт/мК различие температур активного слоя в диапазоне толщин 0.1–0.8 мм возрастает от 3°C при ширине 3 мм до 6°C при ширине 6 мм.
5. Для меньших тепловых нагрузок девиация указанных зависимостей существенно уменьшается, в частности при нагрузке 10 Вт и теплопроводности 1600 Вт/мК соответствующие изменения температуры составляют 1.5–3°C.

Достаточно интересными являются зависимости температуры активного слоя от теплопроводности сабмаунта. Полученные результаты показывают, что с практической точки зрения при теплопроводности более 1600 Вт/мК температура снижается незначительно, поэтому повышать теплопроводность нецелесообразно. Этот результат важен для современной технологии выращивания синтетических алмазов, т. к. уровень теплопроводности в 1200 Вт/мК является пограничным для поликристаллического и монокристаллического синтетических алмазных материалов. Сложность и соответственно стоимость выращивания мо-

нокристаллов алмаза в настоящее время намного выше, чем для поликристаллов, поэтому сейчас поликристаллические пластины, в частности выращенные методом plasma-CVD, имеют существенно большие размеры и значительно меньшую стоимость.

В этом же отношении интересны зависимости температуры активного слоя от толщины и ширины сабмаунтов. Геометрические размеры сабмаунта должны обеспечивать прежде всего достаточно эффективное охлаждение лазерного кристалла, но в то же время они должны минимизироваться для снижения стоимости сабмаунта, что особенно актуально для дорогостоящего алмазного материала.

В целом результаты, представленные на рис.3, содержат достаточно материала для оптимизации как термокомпенсаторов с более низкой, чем у меди, теплопроводностью, так и сабмаунтов с высокой теплопроводностью. Эти результаты могут быть использованы для повышения эффективности отвода тепла не только от мощных лазерных диодов, но и от других типов высокоэнергетичных электронных и оптоэлектронных компонентов с высокой локализацией тепловыделения, т.е. они имеют достаточно обширную область применения и важное методическое значение.

3. Выводы

На примере мощного одиночного лазерного диода с шириной полоскового контакта 100 мкм и длиной волны 980 нм получены трёхмерные графики зависимости температуры активного слоя от основных параметров сабмаунта – ширины, толщины и теплопроводности – при тепловых нагрузках, соответствующих выходной мощности 10, 15 и 20 Вт с учётом достижения максимального полного КПД, типа базового медного теплоотводящего элемента и граничных условий. Полученные результаты позволяют определить оптимальные с точки зрения эффективного отвода тепла и стоимости параметры практически всех типов используемых и разрабатываемых сабмаунтов в зависимости от выходной мощности лазера и тепловой нагрузки. На основе полученных модельных данных можно для каждого типа базового теплоотводящего элемента определить предельные значения ресурсной выходной мощности при использовании термокомпенсаторов с меньшей, чем у меди, теплопроводностью, а также оптимизировать конструкции мощных диодных лазеров для перехода к ресурсным уровням выходной

мощности 10–20 Вт при использовании сабмаунтов различной геометрии с высокой теплопроводностью на основе синтетических алмазов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-02-31718 мол_а) и Программы 7ОФН.

- 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).
- Sin Yongkun, LaLumondiere Stephen D., Presser Nathan, Foran Brendan J., Ives Neil A., Lotshaw William T., Moss Steven C. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8241**, 824116-1 (2012).
- Yanson Dan, Cohen Shalom, Levy Moshe, Shamay Moshe, Geva ara, Berk Yuri, Tesler Renana, Klumel Genadi, Rappaport Noam, Karni Yoram. TuP13 (Contributed Poster), 978-1-4577-0829-9/12/2012, IEEE.
- Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. *Квантовая электроника*, **44** (2), 145 (2014).
- Винокуров Д.А., Зорина С.А., Капитонов В.А., Мурашова А.В., Николаев Д.Н., Станкевич А.Л., Хомылёв М.А., Шамахов В.В., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Налёт Т.А., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Фетисова Н.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **39** (3), 388 (2005).
- Андреев А.Ю., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Налет Т.А., Падалица А.А., Пихтин Н.А., Сабитов Д.Р., Симаков В.А., Слипченко С.О., Хомылев М.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **40** (5), 628 (2006).
- Винокуров Д.А., Станкевич А.Л., Шамахов В.В., Капитонов В.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Рудова Н.А., Соколова З.Н., Слипченко С.О., Хомылев М.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **40** (6), 764 (2006).
- 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. *Труды конф. «Полупроводниковые лазеры и системы»* (Минск, 2011, с. 29).
- 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).
- Безотосный В.В., Бондарев В.Ю., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. *Тезисы докл. в симп. «Полупроводниковые лазеры: физика и технология»* (Санкт-Петербург, 2012, с. 14).
- Nakwaski W. *Intern. J. Optoelectron.*, **5** (5), 451 (1990).
- Nakwaski W. *IEE Proc. I*, **131** (3), 94 (1984).
- Накваски В. *Квантовая электроника*, **11** (2), 391 (1984).
- Безотосный В.В., Кумыков Х.Х., Маркова Н.В. *Квантовая электроника*, **23** (9), 775 (1996).
- Безотосный В.В., Кумыков Х.Х. *Квантовая электроника*, **25** (3), 225 (1998).
- Тер-Мартirosян А.Л., Демидов Д.М., Свердлов М.А., Кулик А.В., Карпов С.Ю. *Научное приборостроение*, **23** (4), 45 (2013).