

УДК 535.015:535.3

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВВ. В. Безотосный^{1,2}, О. Н. Крохин^{1,2}, В. А. Олещенко¹, В. Ф. Певцов¹,
Ю. М. Попов^{1,2}, Е. А. Чешев^{1,2}

Экспериментально исследованы ватт-амперные и вольт-амперные характеристики партии изготовленных авторами мощных лазерных диодов спектрального диапазона 980 нм, построена зависимость их полного КПД от тока накачки, получена зависимость тепловой нагрузки от тока накачки. Эта экспериментальная зависимость использована для расчётов в трёхмерной тепловой модели для лазерного диода с шириной полоскового контакта 100 микрон. Изучены тепловые поля и построены изотермические поверхности для лазерных диодов, смонтированных на теплоотводящих элементах типа C-маунт при тепловых нагрузках, соответствующих выходной мощности 10 Вт и более, в непрерывном режиме.

Ключевые слова: лазерный диод, полосковый контакт, тепловые поля, срок службы.

Повышение выходной мощности и обеспечение долговременного срока службы по-прежнему остаются основными проблемами для физики и технологии лазерных диодов.

В ряде лабораторий ведутся работы, направленные на повышение непрерывной ресурсной выходной мощности до уровня более 10 Вт от полоскового контакта шириной 100 микрон, ставится задача повысить мощность излучения до 15–20 Вт [1–4].

Современные мощные лазерные диоды изготавливаются на основе наногетероструктур с асимметричным широким волноводом [5–7], благодаря этому повышается предельная оптическая мощность, при которой происходит катастрофическое разрушение выходных зеркал резонаторов.

Мощный лазерный диод – уникальный по энергонасыщенности объект по совокупности тепловых, электрических и оптических параметров, в особенности в непрерывном

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: victorbe@sci.lebedev.ru.

² Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

режиме генерации. При мощности излучения лазерного диода 10 Вт от полоскового контакта 100 микрон наблюдается комплекс экстремальных параметров:

- плотность тепловыделения $> 3 \text{ ГВт/см}^3$;
- непрерывные тепловые потоки с плотностью более 5 кВт/см^2 при перепаде температур 30–40 градусов;
- плотность тока накачки более 5 кА/см^2 ;
- плотность оптической мощности на зеркале более 10 МВт/см^2 ;
- градиенты температуры в зоне теплопередачи согласно расчётам и оценкам могут варьироваться от 100 град/см до 10^4 град/см и более в различных зонах распространения теплового потока от кристалла до термостабилизированной грани базового теплоотводящего элемента.

Приведенные экстремальные параметры обусловлены тем, что активная область полупроводниковой гетероструктуры имеет наноразмерную толщину, в частности, в лазерной гетероструктуре на длину волны 980 нм типичная толщина активной области составляет около 7 нм.

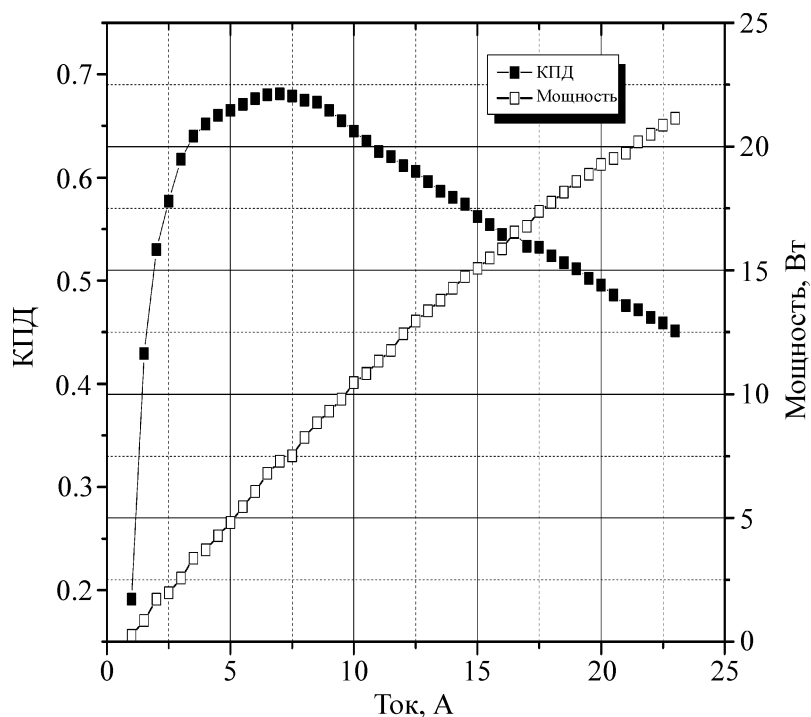


Рис. 1: Ватт-амперная характеристика и полный КПД для лазерного диода на длине волны 980 нм.

Ватт-амперные характеристики и КПД. Ватт-амперная характеристика лазерного диода с длиной резонатора $L = 4$ мм и шириной полоскового контакта $W = 100$ мкм, а также полный КПД, приведенные на рис. 1, дают следующие значения основных параметров:

- пороговый ток $I_{th} = 0.6$ А;
- крутизна ВТАХ $\eta = 1.15$ Вт/А;
- полный КПД в максимуме $\eta_{tot}^{max} = 65\%$;
- последовательное сопротивление $R_s = 40$ мОм.

Согласно расчёту по упрощённой модели [8] ток накачки, при котором достигается максимум КПД, составляет 6.6 А, что хорошо согласуется с экспериментально полученным значением 6.7 А (рис. 1).

Тепловые модели лазерного диода рассматривались во множестве работ, в частности, в [9–13]. Современные программные пакеты, имеющие продвинутую графику, позволяют на новом уровне рассмотреть тепловые проблемы. В данной работе для проведения тепловых расчётов мы использовали лицензионный пакет Comsol.

Необходимость разработки 3-мерной тепловой модели обусловлена тем, что характер тепловых потоков от активной области лазерного кристалла до основного теплоотводящего элемента конструкции весьма неоднороден по всем 3-м координатам, вследствие чего распределения температуры по всем направлениям внутри самого лазерного кристалла также неоднородны. Эти температурные профили в мощном лазерном диоде оказывают сильное влияние практически на все выходные характеристики, т.к. кривая усиления в полупроводниковом материале сильно зависит от температуры. В частности, профиль температуры в плоскости p - n перехода существенно влияет на модовый состав излучения, а профиль температуры по длине резонатора кроме того существенно влияет на пороговый ток, эффективность и выходную мощность излучения.

Параметры тепловой модели. В разработанной тепловой модели были учтены следующие основные параметры материалов всех слоёв и элементов конструкции мощного лазерного диода: теплопроводность, теплоёмкость, плотность, геометрические размеры.

Мы рассматривали общую тепловую модель мощного лазерного диода, включающую в себя лазерный полупроводниковый кристалл на основе многослойной наноразмерной гетероструктуры, слои металлизации лазерного кристалла, а также теплоотводящий элемент со слоями металлизации.

В разработанной тепловой модели заложена возможность исследования влияния промежуточного теплоотводящего элемента типа термокомпенсатора и/или элемента

с высокой теплопроводностью, которые называются сабмаунтами, а также заложены слои двусторонней металлизации сабмаунта.

Выбранная в качестве граничного условия температура обратной теплоотводящей грани базового теплоотводящего элемента, равная 20 °С, близка к комнатной температуре и при нормальной влажности находится выше точки росы.

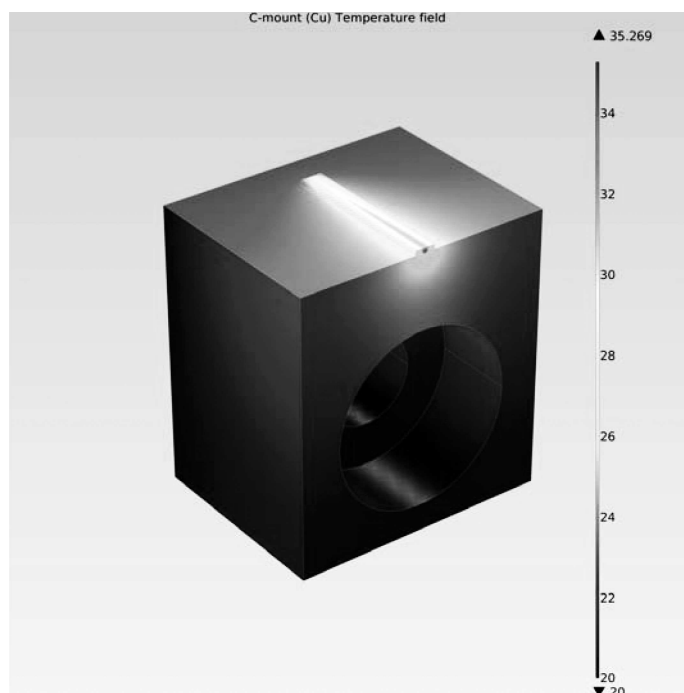


Рис. 2: Расчётные тепловые поля в мощном лазерном диоде, смонтированном непосредственно на базовом теплоотводящем элементе типа С-маунт при тепловой нагрузке 10 Вт.

Результаты моделирования. Результаты расчётов для базового теплоотводящего элемента типа С-маунт при толщине С-маунта 5 мм при тепловой нагрузке от лазерного диода, равной 10 Вт, приведены на рис. 2.

На рис. 2 наглядно видно, что максимум температуры наблюдается на выходном зеркале лазерного кристалла в центре полоскового контакта кристалла (темная точка, максимальная температура около 35 градусов). На заднем зеркале температура не превышает 27 градусов. Таким образом, при тепловой нагрузке 10 Вт максимальное расчётное превышение температуры на выходном (переднем) зеркале резонатора лазерного диода составило немногим более 15 градусов, что находится с хорошим запасом в пределах ресурсного режима работы лазерного кристалла.

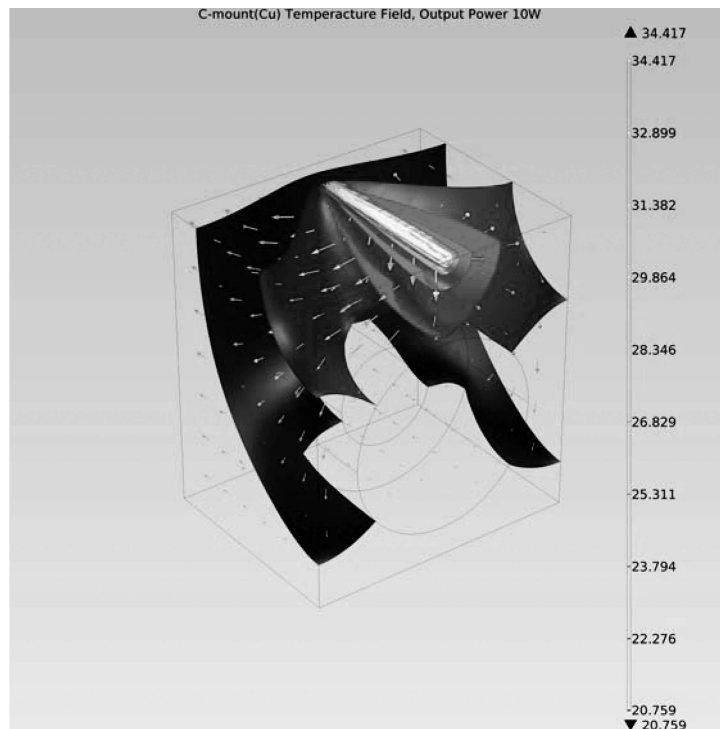


Рис. 3: Рассчитанные по 3-мерной тепловой модели изотермические поверхности конструкции С-маунт при тепловой нагрузке 10 Вт. Стрелками показаны направления тепловых потоков.

На рис. 3 приведены расчётные изотермические поверхности в том же режиме работы лазерного диода.

Анализ изотермических поверхностей, приведенных на рис. 3, показывает, что тепловые потоки в лазерном кристалле и С-маунте сильно неоднородны, что вызвано тем, что рабочая плоскость С-маунта и задняя теплоотводящая плоскость, через которую происходит сброс тепла на термохолодильник и впоследствии на радиатор, ортогональны.

Наглядно это показывают стрелки тепловых потоков (белый цвет), которые непосредственно под лазерным кристаллом направлены перпендикулярно верхней рабочей поверхности С-маунта, а затем по мере удаления от лазерного кристалла и приближения к задней грани С-маунта разворачиваются на 90 градусов. Значительный перепад температуры по длине лазерного резонатора является нежелательным следствием упомянутой выше геометрии и разноудалённости заднего глухого и переднего просветлённого зеркал резонатора от задней поверхности С-маунта.

Отверстие для крепления С-маунта, как видно из рис. 2 и 3, оказывает значительное влияние на характер тепловых потоков, повышая степень их неоднородности, это своеобразная “плата” за малые габариты, простоту и дешевизну конструкции С-маунта.

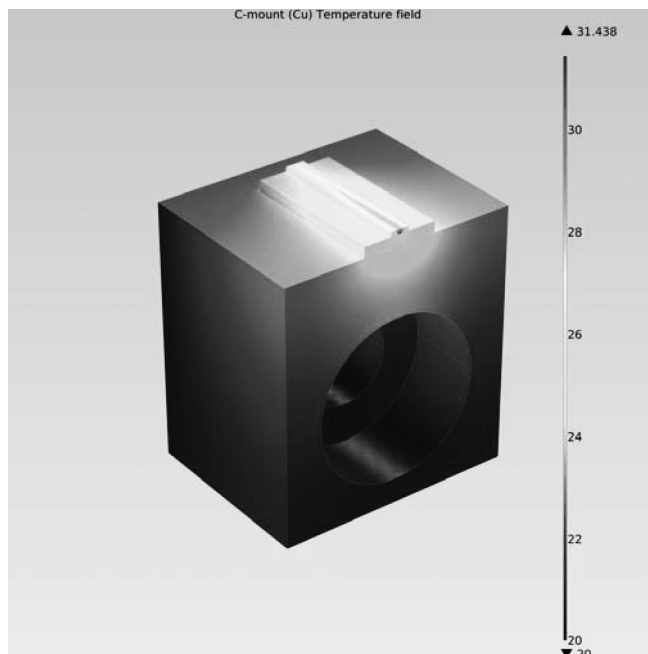


Рис. 4: Расчётные тепловые поля в мощном лазерном диоде, смонтированном на базовом теплоотводящем элементе типа С-маунт при использовании сабмаунта с высокой теплопроводностью при тепловой нагрузке 10 Вт.

На основе разработанной тепловой модели исследованы конструкции с использованием сабмаунта с высокой теплопроводностью. На рис. 4 приведены результаты расчётов при использовании сабмаунта с теплопроводностью около 1200 Вт/м·К, соответствующей поликристаллическому синтетическому алмазу или композиту на основе алмаза [14, 15].

Температура выходного зеркала согласно расчётам составила 31 °С, температура заднего зеркала около 26 градусов.

Сравнение результатов, полученных на рис. 2 и рис. 4 показывает, что применение сабмаунта с высокой теплопроводностью при тепловой нагрузке 10 Вт позволяет снизить температуру выходного зеркала на 4 градуса, кроме того, положительный эффект заключается в почти двукратном уменьшении перепада температур по длине резонатора, т.е. возможно выравнивание температуры, в данном случае перепад температур составляет менее 5 градусов (без сабмаунта 8 градусов), что ощутимо для повышения

основных выходных параметров, в том числе выходной мощности, эффективности, снижения ширины спектра излучения и повышения срока службы. Расчёты показывают, что с точки зрения теплового режима желательнее уменьшать толщину С-маунта, в то же время необходим достаточный технологический зазор между задним зеркалом лазерного резонатора и задней теплоотводящей гранью С-маунта для обеспечения безопасного монтажа на основной теплоотводящий элемент.

Выводы. Главный вывод, который можно сделать из полученных результатов моделирования, а также из экспериментальных результатов изучения ВтАХ, ВАХ и КПД мощных однополосковых лазерных диодов на длине волны 980 нм с длиной резонатора 4 мм и КПД в максимуме около 65%, заключается в том, что теплоотводящий элемент типа С-маунт, имеющий достаточно большую толщину 4.7–5 мм, может быть использован в качестве базового теплоотводящего элемента в случае непосредственного монтажа лазерных кристаллов на медь при выходной мощности до 11–12 Вт в непрерывном режиме при температуре базовой задней грани С-маунта 20 °С. При использовании сабмаунтов с высокой теплопроводностью на уровне 1200 Вт/м·К, а также при увеличении полного КПД лазерных кристаллов выше 65%, диапазон ресурсной мощности с точки зрения теплового режима может быть расширен до 15–17 Вт (при указанных уровнях выходной мощности должна быть обеспечена долговременная оптическая стойкость зеркал резонаторов). Однако практика показывает, что оптическая стойкость зеркал так же, как и другие лазерные параметры, деградирует со временем наработки. Учитывая этот фактор, реальная ресурсная мощность кристаллов с КПД 65% при монтаже на медном С-маунте составляет около 10 Вт, а при использовании сабмаунта с высокой теплопроводностью она может быть повышена до 14 Вт.

Работа выполнена в НИЯУ МИФИ при поддержке Минобрнауки РФ, соглашение № 14.575.21.0047. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0047. Авторы – сотрудники кафедры полупроводниковой квантовой электроники НИЯУ МИФИ: Крохин О. Н. – зав. кафедрой, Попов Ю. М. – профессор, Безотосный В. В. – доцент, Чешев Е. А. – доцент.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] P. Crump, G. Blume, K. Paschke, et al., Proc. SPIE **7198**, 719814-1 (2012).
- [2] Yongkun Sin, Stephen D. LaLumondiere., Nathan Presser, et al., Proc. SPIE **8241**, 824116-1 (2012).

- [3] Yanson Dan, Cohen Shalom, Levy Moshe, et al., *Multi-spectral investigation of bulk and facet failures in high-power single emitters at 980 nm*, TuP13 (Contributed Poster), 978-1-4577-0829-9/12/12/2012, IEEE.
- [4] В. В. Безотосный, О. Н. Крохин, В. А. Олещенко и др., *Квантовая электроника* **44**(2), 145 (2014).
- [5] Д. А. Винокуров, С. А. Зорина, В. А. Капитонов и др., *ФТП* **39**(3), 388 (2005).
- [6] А. Ю. Андреев, А. Ю. Лешко, А. В. Лютецкий и др., *ФТП* **40**(5), 628 (2006).
- [7] Д. А. Винокуров, А. Л. Станкевич, В. В. Шамахов и др., *ФТП* **40**(6), 764 (2006).
- [8] W. Nakwaski, *Intern. J. Optoelectronics* **5**(5), 451 (1990).
- [9] W. Nakwaski, *IEEE Proc. I* **131**(3), 94 (1984).
- [10] В. Накваски, *Квантовая электроника* **11**, 391 (1984).
- [11] В. В. Безотосный, Х. Х. Кумыков, Н. В. Маркова, *Квантовая электроника* **23**(9), 775 (1996).
- [12] В. В. Безотосный, Х. Х. Кумыков, *Квантовая электроника* **25**(3), 225 (1998).
- [13] А. Л. Тер-Мартиросян, Д. М. Демидов, М. А. Свердлов и др., *Научное приборостроение* **23**(4), 45 (2013).
- [14] Е. Е. Ашкинази, В. В. Безотосный, В. Ю. Бондарев и др., *Квантовая электроника* **42**(11), 959 (2012).
- [15] В. В. Безотосный, В. Ю. Бондарев, О. Н. Крохин и др., “Мощные инжекционные лазеры спектральных диапазонов 808 нм, 980 нм и 1064 нм”. В: Тезисы докладов симпозиума “Полупроводниковые лазеры: физика и технология”, Санкт-Петербург, 2012 г., (ФТИ им. Иоффе, С-Пб, 2012), стр. 14.

Поступила в редакцию 25 ноября 2014 г.