

УДК 621.373.826.038.825.5

© А. Л. Тер-Мартirosян, Д. М. Демидов, М. А. Свердлов, А. В. Кулик, С. Ю. Карпов

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОТВОДОВ ДЛЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ. II. ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ОТВОДА ТЕПЛА

Во второй части работы "Анализ и оптимизация конструкции теплоотводов для мощных лазерных диодов" проведен анализ лазерных диодов с модифицированной конструкцией теплоотвода, разработанной для уменьшения теплового сопротивления приборов. Оптимизация геометрических параметров теплоотвода оказалась малоэффективной из-за сильной локализации области тепловыделения вблизи лазерного чипа. С помощью моделирования рассмотрены альтернативные пути понижения теплового сопротивления лазерных диодов. Оценена предельная выходная мощность лазерных диодов, ограничиваемая тепловыми эффектами.

Кл. сл.: мощные лазерные диоды, отвод тепла, тепловое сопротивление, численное моделирование

ВВЕДЕНИЕ

В первой части работы [1] был исследован перенос тепла в лазерных диодах (ЛД) традиционной конструкции, и показано, что доминирующий вклад в тепловое сопротивление прибора R_{th} дает теплоотвод, затем — корпус лазера и в наименьшей степени — лазерная гетероструктура и металлические электроды и прослойки. Естественным выводом из этого является необходимость оптимизации теплоотвода с целью понижения R_{th} . Поскольку медь, из которой обычно изготавливается теплоотвод и корпус ЛД, обладает одним из наиболее высоких коэффициентов теплопроводности среди подходящих конструктивных материалов [2], оптимизация теплоотвода за счет выбора иного материала для изготовления теплоотвода оказывается неэффективной. В этом случае оптимизироваться могут геометрические размеры теплоотвода так, чтобы обеспечить минимальный путь распространения тепла от чипа ЛД к теплоотводной площадке термобатареи. Еще одной проблемой выявленной на первой стадии исследований, является перегрев выходного зеркала ЛД относительно остальной части активной области [1]. Это обстоятельство может негативно влиять на порог катастрофического разрушения зеркала (КРЗ) лазерного диода [3].

Во второй части нашей работы, представленной в данной статье, рассмотрены результаты геометрической оптимизации теплоотвода, полученные с помощью численного моделирования, а также рассмотрены альтернативные пути улучшения отвода тепла от ЛД. Используемая для этого методика моделирования описана подробно в [1].

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОТВОДА

Нами была рассмотрена модифицированная конструкция ЛД, максимально ориентированная на понижение его теплового сопротивления R_{th} . В этой конструкции теплоотвод с толщиной h , шириной u и длиной l крепится непосредственно на основании лазерной головки (рис. 1). Выходное зеркало ЛД при этом располагается у стенки, наклоненной под углом 45° к плоскости основания. Такой наклон, не мешающий распространению излучения лазера, введен для понижения температуры его выходного зеркала. Базовая толщина теплоотвода $h = 4$ мм выбрана минимальной, исходя из конструктивных возможностей его изготовления и необходимости использования в ЛД таких оптических элементов, как поворотная призма и / или цилиндрическая микролинза.

Трехмерное моделирование растекания тепла показало, что, начиная с ширины $u = 10$ и длины $l = 6$ мм, тепловое сопротивление конструкции перестает зависеть от этих геометрических параметров. Поэтому дальнейшее расширение поверхности теплоотвода нецелесообразно. На рис. 1 показано распределение температуры в ЛД, полученное для теплоотвода с размерами $h = 4$, $u = 12$ и $l = 6$ мм и ЛД с полосковым контактом 0.2×3.0 мм. Оценка теплового сопротивления конструкции дала значение $R_{th} = 1.33$ К/Вт, что всего лишь на $\sim 20\%$ меньше величины R_{th} , характерной для базовой конструкции теплоотвода [1].

Уменьшение толщины теплоотвода до 2 мм, что возможно лишь за счет усложнения общей

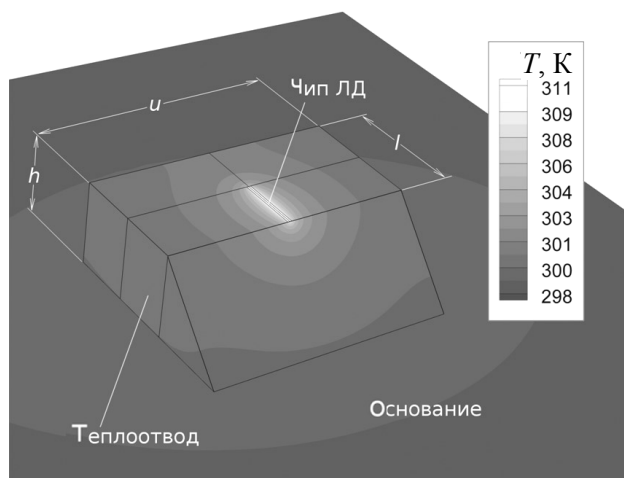


Рис. 1. Распределение температуры в лазерном диоде модифицированной конструкции при полной мощности тепловыделения в чипе, равной 10 Вт

конструкции ЛД, позволило при тех же остальных его размерах незначительно понизить R_{th} до 1.28 К/Вт. Сравнение этих результатов показывает, что геометрическая оптимизация теплоотвода относительно его базовой конструкции оказывается малоэффективной. Причиной этому является сильная локализация области тепловыделения, происходящая на расстояниях десятков и сотен микрометров, и двумерный характер теплопереноса вблизи этой области, дающий доминирующий вклад в тепловое сопротивление ЛД.

В то же самое время модифицированная конструкция теплоотвода обеспечивает заметное понижение температуры выходного зеркала ЛД за счет 45°-го наклона стенки теплоотвода. На рис. 2 показаны распределения температуры вдоль полоскового контакта для базовой и модифицированной конструкций ЛД, полученные для полной мощности тепловыделения, равной 10 Вт. Видно, что перегрев активной области вблизи выходного зеркала (продольная координата $z = 3$ мм) уменьшается более чем в 1.5 раза в модифицированной конструкции по сравнению с базовой.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛМАЗНОГО САБМАУНТА

Альтернативным способом решения проблемы локализации тепла вблизи лазерного чипа является использование в качестве теплоотвода или по крайней мере в качестве сабмаунта материала с теплопроводностью, заметно превышающей теплопроводность меди. Как показано в [2], существ-

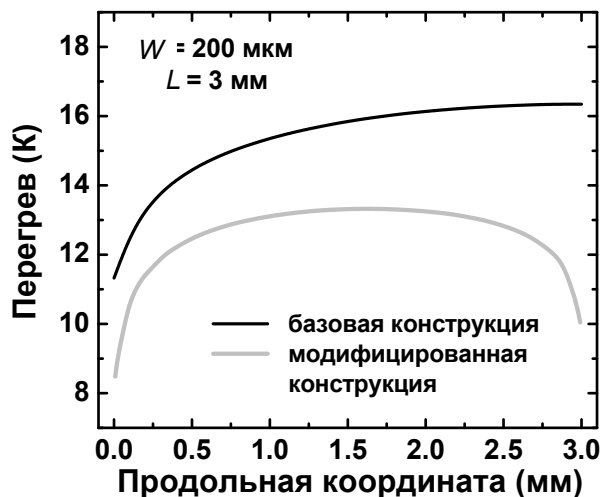


Рис. 2. Распределения температуры в лазерном чипе вдоль полоскового контакта при полной мощности тепловыделения 10 Вт, рассчитанные для базовой и модифицированной конструкций теплоотвода

ует весьма ограниченный набор такого рода материалов. В данной работе мы выбрали алмаз как материал, имеющий максимально возможную теплопроводность, с одной стороны, и являющийся предметом практических исследований, с другой [4, 5]. Использование алмазного сабмаунта изучалось в сочетании с модифицированной конструкцией теплоотвода, где позитивное влияние высокой теплопроводности алмаза могло бы проявиться в наибольшей степени.

Первоначально был рассмотрен алмазный сабмаунт толщиной 100 мкм, с шириной и длиной, на 0.2 мм превышающими ширину и длину лазерного чипа. В качестве коэффициента теплопроводности алмаза было принято значение $\kappa = 23$ Вт/(см · К). Расчеты показали, что R_{th} с таким сабмаунтом может быть понижено до величины 1.13 К/Вт, что не намного меньше значений R_{th} , получаемых без алмазного сабмаунта. В то же время увеличение ширины и длины сабмаунта до размеров самого теплоотвода ($u = 12$, $l = 6$ мм) дало заметно больший выигрыш в тепловом сопротивлении, составляющем в этом случае 0.78 К/Вт. Причиной столь сильного влияния размеров сабмаунта на R_{th} является усиленное боковое растекание тепла в нем. Будучи распределенным по большой площади в латеральном направлении, тепло затем эффективно отводится через теплоотвод модифицированной конструкции. Тем самым, алмазный сабмаунт работает, как слой, обеспечивающий сильное боковое растекание тепла, изменяя тем самым характер отвода тепла в целом (рис. 3). Очевидно,

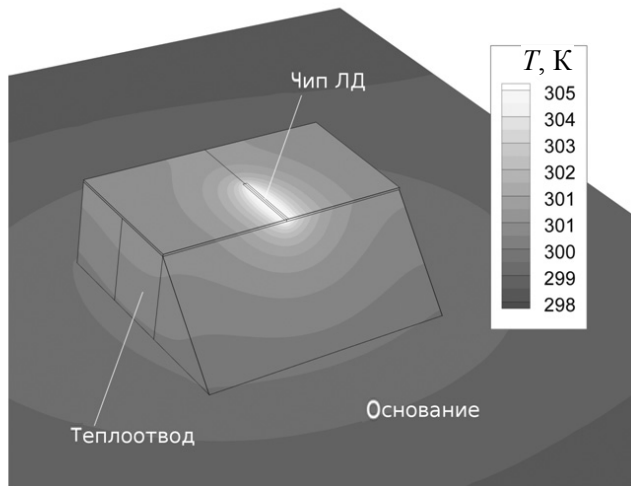


Рис. 3. Распределение температуры в лазерном диоде модифицированной конструкции с алмазным сабмаунтом толщиной 100 мкм, покрывающим всю верхнюю поверхность теплоотвода, при полной мощности тепловыделения в чипе, равной 10 Вт

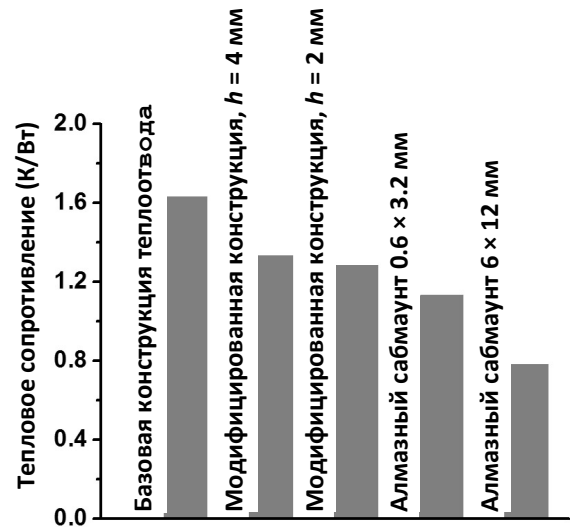


Рис. 4. Сравнение тепловых сопротивлений теплоотводов различных конструкций, рассмотренных в данной работе

что в этом случае эффект оказывается тем большим, чем большая площадь теплоотвода покрыта таким сабмаунтом. Сравнение характеристик теплоотводов базовой, модифицированной конструкции и с разными алмазными сабмаунтами показано на рис. 4. С другой стороны, кроме проблемы формирования низкоомного электрического контакта к ЛД и согласования температурных коэффициентов расширения, использование алмазных сабмаунтов большой площади на практике сдерживается в первую очередь экономическими соображениями.

На сегодняшний день, альтернативу алмазу успешно составляют различные углеродсодержащие материалы, начиная с алмаза, цементированного кремнием (ScD) с $\kappa \sim 6$ Вт/(см·К), и заканчивая композитами на основе отожженного пиролитического графита, имеющего изотропный коэффициент теплопроводности ~ 17 Вт/(см·К), т. е. не намного меньший, чем у алмаза [6]. Показано также, что углеродные нанотрубки могут обеспечить рекордно высокий коэффициент теплопроводности — от ~ 20 до ~ 60 Вт/(см·К) [7], однако разработка композитных материалов на их основе, пригодных для изготовления теплоотводов, находится лишь на начальной стадии.

ПРЕДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

Чтобы понять, как тепловое сопротивление ЛД

влияет на выходную мощность его излучения, мы использовали простую эмпирическую модель, описанную в [3] и учитывающую самосогласованно температурные зависимости порогового тока и рабочего напряжения, а также зависимость перегрева активной области лазера от мощности тепловыделения. Параметры модели: дифференциальная квантовая эффективность $\eta_D = 0.7$, напряжение "включения" ЛД $V_{io} = \hbar\omega/q = 1.53$ В, его последовательное сопротивление $R_S = 0.2$ Ом, пороговый ток при комнатной температуре $I_{th}(300\text{ К}) = 0.4$ А, а также параметр $T_0 = 120$ К, также были заимствованы из [3]. Пример расчета ватт-амперных характеристик ЛД при разных значениях теплового сопротивления, выполненных по данной модели, приведен на рис. 5, а.

На рис. 5, б, сплошной линией показана зависимость рассчитанной таким образом максимальной удельной выходной мощности излучения ЛД (мощности, приходящейся на единичную ширину полоскового контакта) от величины R_{th} . Видно, что уменьшение R_{th} приводит к существенному росту удельной мощности излучения лазера. Серой полосой на рис. 5, б, показан порог КРЗ, экспериментально измеренный (с учетом разброса данных) для ЛД с длиной волны генерации 808 нм. Видно, что при тепловых сопротивлениях, превышающих ~ 7 К/Вт, предельная выходная мощность лимитируется температурной зависимостью лазерных характеристик, в то время как при R_{th} ,

меньших чем ~ 4 К/Вт лимитирующим фактором становится уже КРЗ. Согласно результатам, показанным в первой части нашей работы [1, рис. 4], величины $R_{th} < 4$ К/Вт трудно получить при длинах полоскового контакта менее 1.5 мм. И наконец, вся расчетная кривая, показанная на рис. 5, б, лежит заметно ниже величины $\sim 0.8\text{--}1.2$ Вт/мкм, характерной для порога КРЗ в условиях импульсной накачки, при которой влияние тепловых эффектов становится несущественным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ переноса тепла в ЛД базовой и модифицированной конструкций показал,

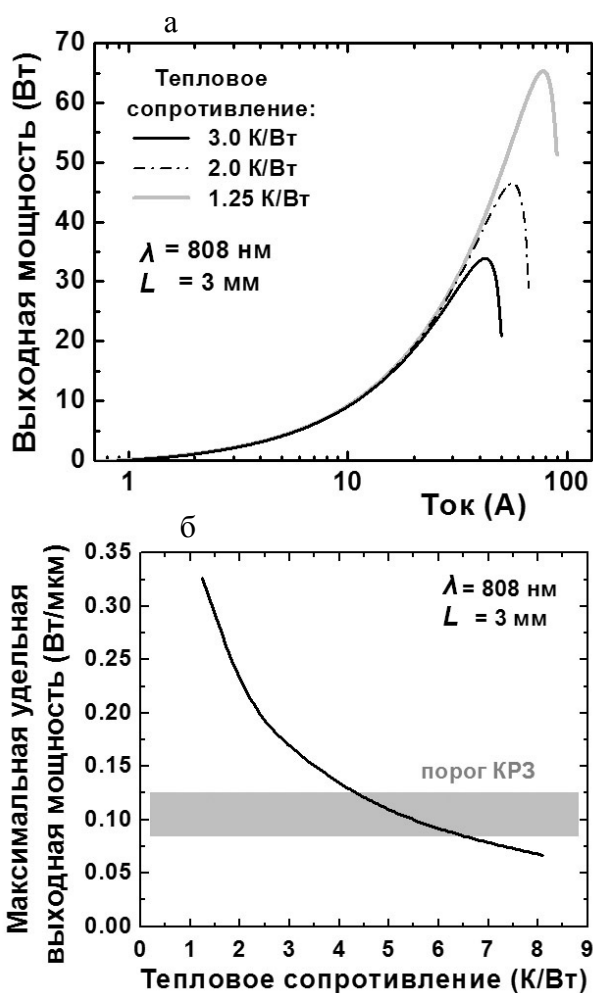


Рис. 5. Теоретические ватт-амперные характеристики ЛД с различными тепловыми сопротивлениями (а) и максимальная удельная мощность лазеров с полосковым контактом длиной 3 мм, рассчитанная в зависимости от его теплового сопротивления (б). Серая область показывает экспериментальный порог КРЗ (с учетом разброса данных), соответствующий ЛД с длиной волны излучения 808 нм [2]

что именно теплоотвод является наиболее критичным элементом конструкции, определяющим тепловое сопротивление мощных лазеров. Геометрическая оптимизация теплоотвода оказалась малоэффективной из-за сильной локализации источника тепловыделения вблизи чипа ЛД.

Результаты моделирования для всех рассмотренных конфигураций теплоотвода демонстрируют сильную зависимость теплового сопротивления от длины лазерного резонатора и в меньшей степени от его ширины. Поэтому с точки зрения эффективного отвода тепла использование длинных резонаторов является предпочтительным.

Использование наклонной стенки теплоотвода вблизи выходного зеркала ЛД позволяет существенно снизить перегрев последнего, что важно для повышения порога катастрофической деградации зеркала.

Использование алмазного сабмаунта, усиливающего латеральное растекание тепла, оказывается эффективным только в том случае, когда ширина сабмаунта заметно превышает ширину полоскового контакта лазера. При этих условиях основным фактором, сдерживающим применение таких сабмаунтов на практике, является их стоимость. Альтернативу алмазу в будущем могут составить различные композитные углерод-содержащие материалы.

В целом проведенное исследование показало, что возможности оптимизации конструкций пассивных теплоотводов без существенного увеличения их стоимости во многом исчерпаны. При реалистичных характеристиках имеющихся ЛД пассивные теплоотводы позволяют потенциально получать удельные выходные мощности излучения до $\sim 0.15\text{--}0.20$ Вт/мкм. Нижняя граница этой оценки примерно соответствует максимальным плотностям мощности, достигнутым на практике и ограничиваемым катастрофическим разрушением выходных зеркал ЛД [2]. При условии решения проблемы КРЗ дальнейшее повышение плотности мощности излучения может быть достигнуто за счет использования активных теплоотводов, использующих принудительное охлаждение прибора [8, 9].

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства (договор №02.G25.31.0064).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов Д.М., Тер-Мартirosян А.Л., Свердлов М.А. и др. Анализ и оптимизация конструкции теплоотводов для мощных лазерных диодов. I. Теплоотвод традиционной конструкции // Научное приборостроение. 2013. Т. 23, № 4. С. 40–44.

2. Демидов Д.М., Тер-Мартirosян А.Л., Булашевич К.А. и др. Мощные лазерные диоды с длиной волны излучения 808 нм. 3. Пути повышения мощности излучения // Научное приборостроение. 2013. Т. 23, № 2. С. 129–138.
 3. Демидов Д.М., Тер-Мартirosян А.Л., Булашевич К.А. и др. Мощные лазерные диоды с длиной волны излучения 808 нм. I. Термические механизмы ограничения выходной мощности // Научное приборостроение. 2012. Т. 22, № 3. С. 78–86.
 4. Sumpf B., Zorn M., Staske R. et al. 650-nm InGaP broad area lasers with 5000-h reliable operation at 600 mW // IEEE Photonics Technol. Lett. 2007. V. 19, N 2. P. 118–120.
 5. Аишкинази Е.Е., Безотосный В.В., Бондарев В.Ю. и др. Пути повышения выходной мощности одиночных непрерывных лазерных диодов на 808 нм и 980 нм и контроль спектров излучения // Сборник статей 8-го Белорусско-Российского семинара "Полупроводниковые лазеры и системы на их основе", Минск, 2011. С. 29–32.
 6. URL: (<http://www.thermacore.com/thermal-basics/advanced-solid-conduction.aspx>).
 7. Han Z., Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review // Prog. Polym. Sci. 2011. V. 36. P. 914–944.
 8. Ma X., Zhong L. Advances in high power semiconductor diode lasers // Proc. SPIE. 2007. V. 6824. 682402 (16 pages).
 9. Feller R., Junghans J., Kemner G., Stephens E. Next-generation microchannel coolers // Proc. SPIE. 2008. V. 6876. 687608 (8 pages).
- ЗАО "Полупроводниковые приборы",
г. Санкт-Петербург** (Тер-Мартirosян А.Л.,
Демидов Д.М., Свердлов М.А.)
- ООО "Софт-Импакт", г. Санкт-Петербург**
(Кулик А.В., Карпов С.Ю.)
- Контакты: Тер-Мартirosян Александр Леонович,
ter@atcsd.ru
- Материал поступил в редакцию 23.05.2013

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF HEAT SINK DESIGN FOR HIGH-POWER LASER DIODES. II. WAYS FOR HEAT SINK IMPROVEMENT

**A. L. Ter-Martirosyan¹, D. M. Demidov¹, M. A. Sverdlov¹,
A. V. Kulik², S. Yu. Karpov²**

¹*ATC Semiconductor Devices, Saint-Petersburg*
²*STR Group Soft-Impact, Ltd., Saint-Petersburg*

The second part of the paper considers laser diodes with modified heat sink design aimed at reducing the device thermal resistance. Optimization of geometrical parameters of the heat sink has turned out ineffective because of a strong localization of the heat release region near the laser chip. Alternative ways for the thermal resistance reduction are discussed in terms of simulations. The maximum output power of the laser diodes limited by thermal effects is estimated.

Keywords: high-power laser diodes, heat transfer, thermal resistance, numerical simulation