

Мультидиск: концепция и реализация коллинеарно-накачиваемой активной среды из нескольких тонких дисков

А.Алекнавичюс, Р.Смилингис, М.Гришин, А.Михайловас,
К.Михайловас, Ю.Пилипавичюс, В.Гирдаускас, М.Габалис

Анализируется концепция коллинеарно-накачиваемой активной среды, состоящей из нескольких тонких дисков (мультидисконная конфигурация). Мультидисконная конфигурация активного элемента привлекательна для создания высокоэффективных лазерных систем со средними и высокими выходными мощностями, имеющих хорошее пространственное качество пучка. Рассмотрены два подхода к реализации системы с использованием мультидисконного активного элемента. Представлены предварительные результаты экспериментов по генерации, а также численных расчетов распределения температуры внутри активной среды.

Ключевые слова: твердотельные лазеры, лазеры с диодной накачкой, композитный активный элемент.

1. Введение

Основным фактором, ограничивающими среднюю выходную мощность твердотельных лазеров, являются тепловые эффекты в активной среде. Оптимизация теплоотвода может помочь в решении этой проблемы. Одним из возможных решений, значительно улучшающих теплоотвод, служит криогенное охлаждение, к сожалению слишком сложное для большинства применений. Для комнатных температур более приемлемы решения, основанные на конфигурации активного элемента в виде тонкого диска, имеющего большую площадь теплоотвода и малую толщину, и на пластинчатых конфигурациях с зигзагообразным ходом лазерных пучков, в которых хорошо компенсируются термонаведенные искажения.

Конфигурация тонкого диска широко применяется в мощных генераторах и усилителях. Основным ее преимуществом по сравнению с известными геометриями с продольной и поперечной накачкой лазерными диодами является хорошее масштабирование благодаря улучшенному теплоотводу. Кроме достоинств, конфигурация тонкого диска имеет и недостатки, один из которых – сложная многопроходная (до нескольких десятков проходов) система накачки, обеспечивающая эффективное поглощение [1]. Такая система состоит из громоздкого параболического зеркала и нескольких призм, требующих точной сборки и настройки. Другой вариант накачки тонкого диска – через край – приводит к снижению эффективности и ухудшению однородности накачки [2].

Упомянутая выше масштабированность по мощности

имеет определенные ограничения. Во-первых, увеличение диаметра основной ТЕМ₀₀-моды внутри резонатора проблематично с точки зрения стабильности резонатора лазера. Эффективная генерация ТЕМ₀₀-моды возможна, когда общее искажение волнового фронта не превышает $\lambda/4$. Такое требование крайне сложно выполнить для основной моды большого диаметра. Во-вторых, конфигурации тонкого диска присущи очень большое различие в продольном и поперечном усилении. При определенных обстоятельствах поперечное усиление может быть столь большим, что усиленная спонтанная люминесценция в поперечном направлении будет серьезно влиять на КПД лазера [3].

Пластинчатая геометрия активного элемента – другая известная концепция, используемая для улучшения контроля тепловых эффектов и масштабируемости по мощности. Для пластинчатых лазеров предложены различные конфигурации [4–6]. Распределение температуры по двум длинным размерам пластины может быть довольно однородным, в то время как по толщине температурный градиент весьма велик ввиду того, что теплоотвод происходит с верхней и нижней поверхностей. Использование зигзагообразного хода пучка помогает усреднить по его сечению эти сильные температурные градиенты, но из-за остаточных эффектов оптические искажения, особенно вследствие краевых эффектов, существуют во всех направлениях. Градиенты температуры вызывают соответствующие механические напряжения, которые наиболее значительны, как правило, на краях активного элемента и могут вызвать его разрушение [7].

2. Описание концепции мультидисконной конфигурации активного элемента

В настоящей работе нами предложена мультидисконная конфигурация, которая предоставляет дополнительные возможности для масштабирования твердотельных лазеров по мощности и имеет упрощенную по сравнению с тонким диском схему формирования пучка накачки. По сути, для упрощения схемы накачки и снижения тепловой нагрузки на тонкий диск используются несколько колли-

A. Aleknavičius, R. Smilingis, M. Grishin, A. Michailovas. Institute of Physics, Center for Physical Sciences and Technology, Savanoriu ave. 231, LT-02300, Vilnius, Lithuania; Ekspla, Savanoriu ave. 231, LT-02300, Vilnius, Lithuania; e-mail: a.aleknavičius@ekspla.com

K. Michailovas. Institute of Physics, Center for Physical Sciences and Technology, Savanoriu ave. 231, LT-02300, Vilnius, Lithuania

J. Pilipavičius. Faculty of Chemistry, Vilnius University, Naugarduko g. 24, LT-03225, Vilnius, Lithuania

V. Girdauskas, M. Gabalis. Faculty of Natural Sciences, Vytautas Magnus University, Vileikos g. 8-212, LT-44404, Kaunas, Lithuania

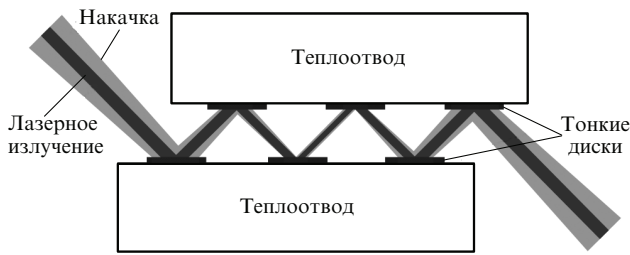


Рис.1. Геометрия коллинеарно-накачиваемых тонких дисков.

неарно-накачиваемых тонких дисков. Мультидисконная конфигурация представлена на рис.1. Толщина каждого диска значительно меньше поперечного размера активной зоны, поэтому способ охлаждения весьма похож на способ охлаждения тонкого диска. Пучок же накачки коллинеарен пучку генерации и совмещен с ним в пространстве. В противоположность случаю боковой накачки, пучок накачки формирует усилительные апертуры (активные зоны), благодаря чему отпадает необходимость в жесткой апертуре для формирования основной моды резонатора. Таким образом, излучение накачки используется так же эффективно, как и в случае обычной продольной накачки. Рассматриваемая схема налагает определенные требования на пространственное качество излучения накачки. Диаметр пучка накачки не обязательно должен быть одинаковым во всех дисках. Если задается требование, чтобы на полной длине мультидисконной структуры радиус пучка накачки превышал минимальный радиус в K раз, то соотношение между параметром пучка накачки M^2 , радиусом перетяжки w_0 и длиной оптического пути L накачки выглядит следующим образом:

$$\frac{M^2}{w_0^2} = \frac{2\pi n}{L\lambda_p} \sqrt{K^2 - 1},$$

где n – средний показатель преломления среды; λ_p – длина волны накачки.

Есть несколько соображений, касающихся выбора числа дисков. Большее число дисков приводит к увеличению толщины активной среды и, следовательно, к большему поглощению накачки и к большей инверсии населенности. Однако, с другой стороны, требования к качеству пучка накачки становятся более жесткими. Кроме того, поглощенные дисками мощности будут различны, и это различие увеличивается с ростом числа дисков.

В случае накачки только с одной стороны диска можно легко оценить, насколько различаются поглощенные мощности в первом и последнем дисках. Например, для структуры из шести дисков и при полном заданном поглощении накачки 90 % поглощение в одном (первом) диске должно составлять 32 %, а на последний диск приходится всего 5 % (рис.2,а). Ситуацию можно улучшить, если не поглощенное структурой излучение возратить обратно (организовать второй проход накачки). В данном случае необходимо, чтобы один диск поглощал 18 %. В результате первый диск поглотит 20 % мощности накачки, а последний – 12 % (рис.2,б).

Для получения еще более однородной прокачки каждого диска следует отдать предпочтение накачке с двух сторон. В этом случае зависимость поглощенной мощности от координаты становится симметричной, а диски, поглотившие минимальную мощность, оказываются в середине структуры (третий и четвертый диски в структуре из шести дисков). Чтобы структура поглотила 90 % мощности накачки, поглощение одного диска опять должно составлять 32 %, но поглощенная мощность в край-

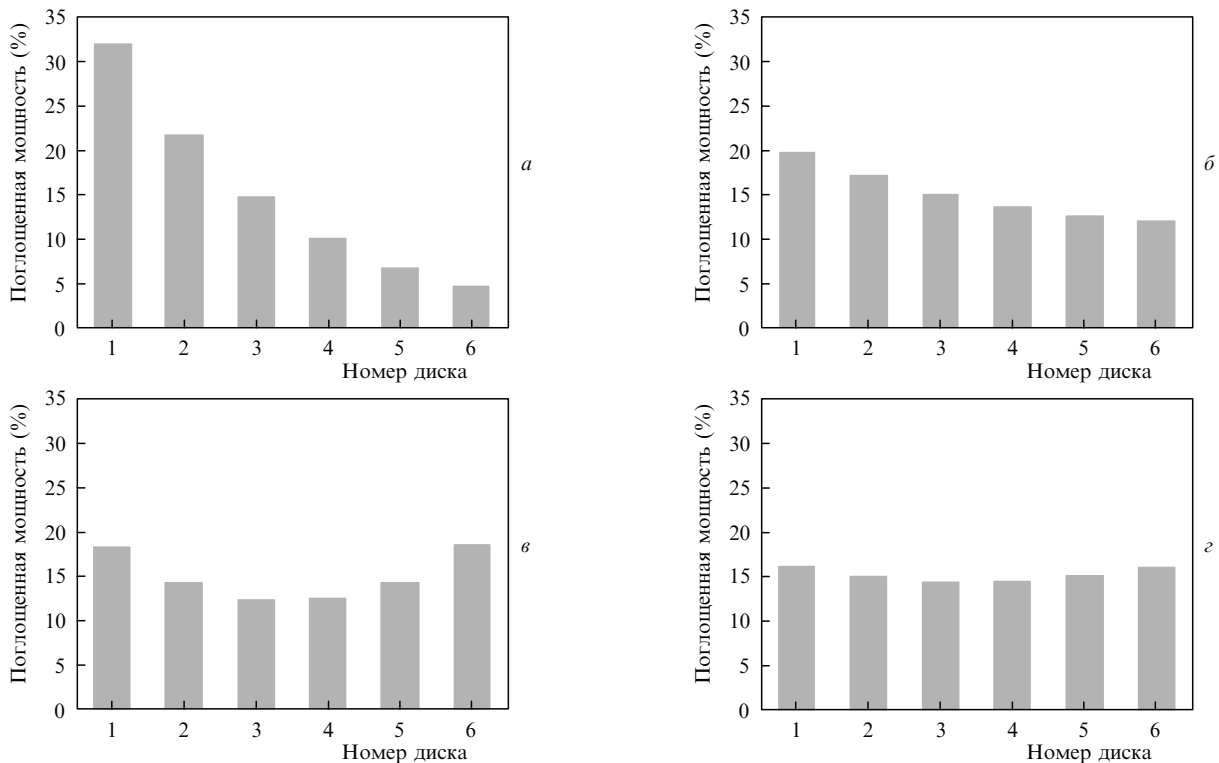


Рис.2. Изменения поглощенной диском мощности при односторонней накачке (а), односторонней накачке с обратным отражением непоглощенной мощности (б), двусторонней накачке (в) и двусторонней накачке с обратным отражением непоглощенной мощности (г). Общее поглощение мощности накачки во всех случаях составляет 90 %.

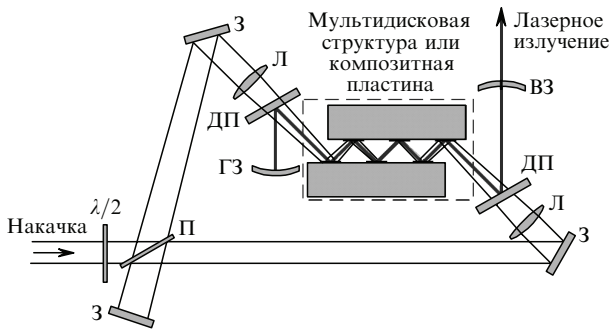


Рис.3. Схема двусторонней накачки с обратным отражением непоглощенной мощности:

З – зеркала; ДП – делительные пластинки; Л – линзы; П – поляризатор; ГЗ – глухое зеркало резонатора; ВЗ – выходное зеркало резонатора; $\lambda/2$ – полуволновая пластинка.

них и центральных дисках будет равна 18 % и 12 % соответственно (рис.2,б). При организации второго прохода ситуация возвращается к исходной: первый диск поглощает 18% накачки, крайний – 16 %, центральный – 14 % (рис.2,з). Такая схема накачки представлена на рис.3.

Если рассмотреть зависимость поглощенной мощности в дисках, получающих наименьшую мощность накачки, от мощности, поглощенной в одном уединенном диске, то видно, что она имеет максимум (рис.4). Для различных схем накачки этот максимум находится в разных местах, что нужно учитывать, проектируя схему. Для схемы с возвратом непоглощенной накачки оптимальное поглощение в одном диске составляет 15 % (рис.4,а), но при этом более 14 % мощности накачки не поглощается. В случае, когда активный элемент накачивается с двух сторон, поглощение в одном диске должно быть равно 29 %, а непоглощенная мощность составляет почти 13 % (рис.4,б). Ситуация значительно улучшается, когда при двусторонней накачке организуется ее двойной проход. В данном случае оптимальное поглощение в одном диске равно 22 %, а непоглощенная мощность составляет только 5 % (рис.4,в).

Есть два пути реализации мультидисковой структуры. Один из них заключается в использовании отдельных тонких дисков в качестве внутренних зеркал резонатора (мультидисковый дизайн), а другой – в изготовлении монолитного композитного пластичатого активного элемента (дизайн в виде композитной пластины). С точки зрения оптики обе реализации очень похожи, но весьма сильно различаются по конструкции. В настоящей работе мы исследовали обе конструкции.

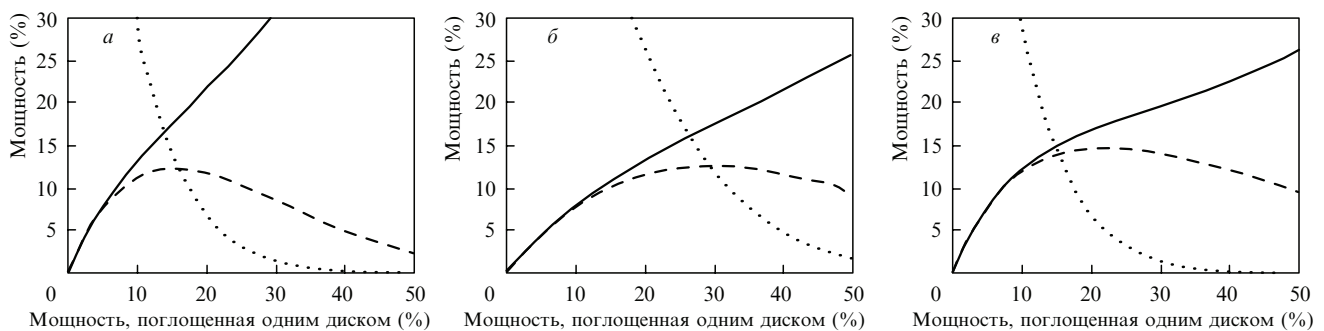


Рис.4. Зависимости от мощности, поглощенной в одном уединенном диске, относительной поглощенной мощности накачки в первом диске (сплошные кривые) и в диске, который поглощает наименьшую мощность (штриховые кривые), при односторонней накачке с обратным отражением непоглощенной мощности (а), двусторонней накачке (б) и двусторонней накачке с обратным отражением непоглощенной мощности (в). Пунктирные кривые – непоглощенная в структуре мощность.

3. Мультидисковая структура

В мультидисковой конструкции (рис.1) тонкие кристаллы активного материала просветлены с одной стороны и имеют высокоотражающее покрытие на другой стороне на длинах волн излучений диодного лазера накачки и генерации. Тонкий диск через связующий слой с хорошей теплопроводностью соединен с теплоотводом.

Для экспериментальной реализации данной конфигурации были выбраны легированные Nd^{3+} кристаллы, имеющие большое по сравнению с иттербийсодержащими кристаллами сечение генерационного перехода. Другим основанием для нашего выбора стала потребность в усилителях, работающих на длине волны 1064 нм. Активные элементы толщиной 0.5 мм из кристалла YAG крепились на керамическую пластинку из нитрида алюминия (AlN), которая в свою очередь крепилась на теплоотвод. Для крепления кристалла YAG на полированную керамическую пластинку использовалась золь-гель-технология. Несмотря на низкую теплопроводность золь-геля, его тепловое сопротивление достаточно мало вследствие малой толщины слоя (~ 1 мкм) (рис.5). На приклеиваемую поверхность напылялись высокоотражающие диэлектрические зеркала на длины волн 808 и 1064 нм. Другая поверхность кристалла оставалась без покрытий. Концентрация ионов неодима Nd^{3+} в активном элементе составляла 0.6 ат. %.

Для эксперимента был собран короткий резонатор (рис.6). Коэффициент отражения выходного зеркала равнялся 95 %. Для накачки применялся лазерный диод с длиной волны генерации 808 нм и волоконным выводом излучения. Максимальная выходная мощность излуче-

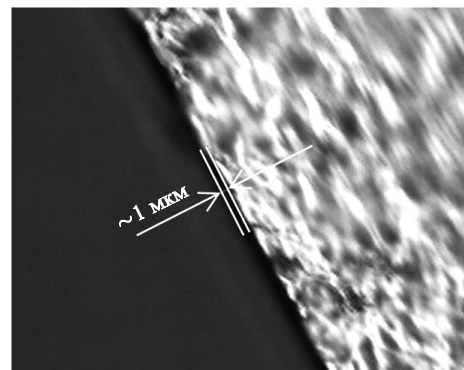


Рис.5. Фотография связующего слоя золь-геля между кристаллом YAG и AlN-керамикой.

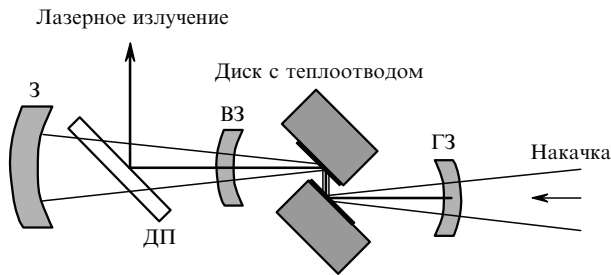


Рис.6. Оптическая схема генерационных экспериментов с дисковыми элементами:

ГЗ – глухое зеркало резонатора; ВЗ – выходное зеркало резонатора; ДП – делительная пластинка; З – зеркало, отражающее накачку.

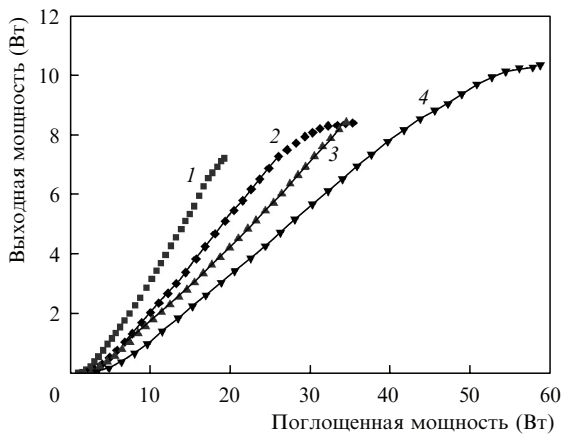


Рис.7. Зависимости выходной мощности от поглощенной мощности для одного диска (1, 2) и двух дисков (3, 4) при односторонней накачке (1, 3) и односторонней накачке с обратным отражением поглощенной мощности (2, 4).

ния диодного лазера, сфокусированного в пятно диаметром 1.2 мм, составляла 110 Вт.

Были проведены предварительные эксперименты по генерации с использованием одного и двух дисков и зарегистрирована линейная зависимость выходной мощности от мощности накачки при ее однократном проходе через активный элемент (рис.7). При двойном проходе пучка накачки через активный элемент наблюдалось насыщение выходной мощности при высоких мощностях накачки. Важно отметить, что поглощенная мощность измерялась непосредственно для случая однократного прохода накачки. В случае же двойного прохода она оценивалась по поглощению в первом проходе. Мы считаем, что насыщение выходной мощности связано в основном со спектральным сдвигом линии генерации лазерного диода накачки вследствие попадания непоглощенной части накачки обратно в волокно. Такой сдвиг центра линии генерации приводил к изменению эффективного коэффициента поглощения накачки по сравнению с однократной схемой. Более точные результаты для двухпроходной схемы накачки могут быть получены при использовании лазерного диода с брэгговской решеткой для стабилизации длины волны излучения либо за счет изоляции отраженного пучка.

4. Композитная пластина

Конструкция в виде монолитной композитной пластины (рис.8) аналогична мультидискковой, однако воз-

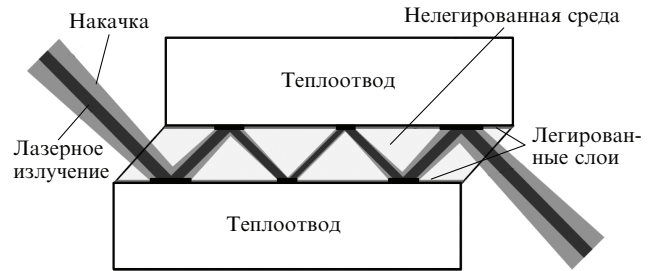


Рис.8. Конструкция композитного пластинчатого элемента.

душный промежуток между активными слоями заполнен нелегированным лазерным материалом. Такой активный элемент позволяет более гибко выбирать материал для теплового интерфейса, т. к. монолитную структуру можно зажать между двумя теплоотводами. Кроме того, использование полного внутреннего отражения позволяет отказаться от отражающих покрытий. Для сохранения полного внутреннего отражения необходимо напылить буферный слой с малым показателем преломления. Условие полного внутреннего отражения в данном случае выглядит так: $\sin \beta > n_p/n_s$, где β – внутренний угол падения; n_p – показатель преломления защитного слоя; n_s – показатель преломления материала пластины ($n_p < n_s$). Например, для границы раздела между кристаллом YAG и слоем SiO₂ угол полного внутреннего отражения составляет 57°, причем выбирать его необходимо с определенным запасом с учетом угловой расходимости пучков. Композитная пластина с механической точки зрения является стабильной структурой, кроме того, благодаря заполнению промежутка между активированными слоями средой с большим показателем преломления снижаются требования к качеству пучка накачки и уменьшается усиленная спонтанная люминесценция в активных зонах [3]. Основным недостатком такой конструкции – достаточно сложный процесс ее изготовления.

Эксперименты проводились на композитной пластине, изготовленной из YAG-керамики. В активированных слоях толщиной 200 мкм концентрация ионов Nd составляла 2 ат. %. Активный элемент зажимался между двумя охлаждаемыми водой пластинами. В качестве материала для теплового интерфейса использовалась индиевая фольга. Было реализовано шесть отражений (активных зон), накачка осуществлялась с двух сторон (см. рис.3). Для накачки применялся лазерный диод с длиной волны генерации 808 нм и волоконным выводом излучения. С учетом потерь на светоделительной оптике до 90 Вт мощности накачки фокусировалось в активный элемент (размер пучка в продольном направлении составлял 1.8 – 1.2 мм). Резонатор лазера был образован глухим зеркалом и выходным зеркалом с коэффициентом отражения 95%.

Эксперименты в непрерывном многомодовом режиме продемонстрировали линейную зависимость выходной мощности от мощности накачки при дифференциальной эффективности 42% (рис.9). При температурной отстройке длины волны генерации лазерного диода от длины волны 808 нм, соответствующей максимуму поглощения, выходная мощность увеличивается. Также замечено, что выходная мощность возрастает при увеличении усилия, с которым элемент зажат между пластинами холодильника, что является иллюстрацией важности хорошего теплоотвода. С другой стороны, при чрезмерном

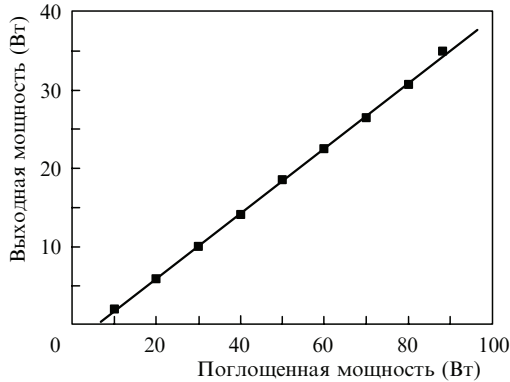


Рис. 9. Зависимость выходной мощности от мощности накачки для композитной пластины.

усилии мощность снижается из-за потерь, связанных с механическими напряжениями в керамике.

5. Численное моделирование

Распределение температуры внутри композитной пластины рассчитывалось путем решения методом конечных элементов с помощью программного пакета Comsol Multiphysics трехмерного стационарного дифференциального уравнения теплопроводности

$$\nabla^2 T(x, y, z) + \frac{Q(x, y, z)}{k} = 0, \quad (1)$$

где T – температура; Q – тепловой источник; k – коэффициент теплопроводности, который в данном случае считается постоянным. Поперечное распределение мощности в пучке накачки принято супергауссовым. Выражение для теплового источника, образованного падающим и отраженным пучками накачки, имеет вид

$$Q(x, y, z) = \alpha \eta \frac{P}{\pi w_0^2} \left\{ \exp(-\alpha z_i) \exp \left[- \left(\frac{x_i^2 + y^2}{w_0^2} \right)^p \right] + \exp(-\alpha z_r) \exp \left[- \left(\frac{x_r^2 + y^2}{w_0^2} \right)^p \right] \exp \left(- \alpha \frac{d_{\text{Nd:YAG}}}{\cos \theta} \right) \right\}, \quad (2)$$

где α – коэффициент поглощения активной среды; η – коэффициент передачи мощности (доля поглощенной мощности накачки, превращающейся в тепло); P – мощность накачки; p – порядок супергауссовости пучка накачки; $d_{\text{Nd:YAG}}$ – толщина активного слоя пластины; величины z_i , x_i и z_r , x_r – преобразованные координаты падающего и отраженного пучков соответственно; θ – угол отражения пучка накачки. Считается, что границы раздела между композитной пластиной и холодными пластинами находятся в идеальном тепловом контакте (непрерывный тепловой поток), а внешние поверхности холодных пластин имеют постоянную температуру T_0 . Бокковые внешние граничные поверхности полагаются теплоизолированными. Излучение накачки поглощается только в слоях, легированных Nd, где и происходит тепловыделение.

Расчеты распределения температуры проводились в случае оптимизированного поглощения в легированном слое (рис. 10, а) и для параметров использованной в экспериментах композитной пластины (рис. 10, б). В обоих случаях температура холодильника составляла 16°C , мощность накачки – 100 Вт, толщина индиевой фольги – 0.1 мм. Коэффициент поглощения выбирался соответ-

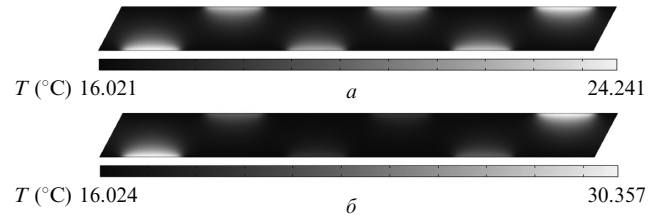


Рис. 10. Распределение температуры в композитной пластине при оптимальном (а) и в два раза большем оптимального (б) поглощении. Температура холодильника и мощность накачки в обоих случаях одинакова.

ствующим оптимальному поглощению (29 % после одного отражения) и в два раза большему поглощению (49 % после одного отражения) для моделирования использованного в экспериментах элемента. Как и предполагалось, последний случай характеризуется более высокой максимальной температурой (30°C по сравнению с 24°C) и большим различием температур в разных зонах возбуждения (9°C по сравнению с 2°C). Этим можно объяснить улучшение эффективности генерации лазера при отстройке длины волны накачки от максимума в спектре поглощения (со снижением, таким образом, эффективного поглощения). Распределение температуры вокруг активных зон должно проявляться в виде термлинзы, что и наблюдалось экспериментально.

6. Выводы

Представлена и проанализирована концепция коллинеарно-накачиваемого мультидискового активного элемента. Рассмотрены два подхода к реализации такого элемента. Предварительные эксперименты по генерации в мультидисковых элементах продемонстрировали насыщение выходной мощности при использовании схем накачки с двойным проходом. Данный факт связан с отстройкой длины волны излучения диодного лазера накачки от длины волны, соответствующей максимальному поглощению ионами примеси, вследствие образования обратной связи по непоглощенному в активном элементе излучению. Эксперименты, проведенные с композитной пластиной, показали важность эффективного охлаждения и оптимизации поглощения в активированном слое. Представлены результаты численного моделирования распределения температуры в композитной пластине. Первые эксперименты с мультидисковыми системами показали перспективность данной технологии при создании твердотельных лазеров с хорошими пространственными характеристиками пучка и высокой средней мощностью излучения.

Настоящая работа выполнена при поддержке Научного совета Литовской республики (проект AUT-07/2010).

- Giesen X.A., Speise J. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13**, 598 (2007).
- Rafiei J., Sabbaghzadeh J., Mashayekhe Asl I., Kazemi S.Sh. *Opt. Commun.*, **283**, 3469 (2010).
- Kouznetsov D., Bisson J.F., Ueda K. *Opt. Mater.*, **31**, 754 (2009).
- Tei K., Kato M., Niwa Y., Harayama S., Maruyama Y., Matoba T., Arisawa T. *Opt. Lett.*, **23**, 514 (1998).
- Sridharan A.K., Saraf S., Sinha S., Byer R.L. *Appl. Opt.*, **45**, 3340 (2006).
- Goodno G.D., Palese S., Harkenrider J., Injeyan H. *Opt. Lett.*, **26**, 1672 (2001).
- Paschotta R. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology* (Weinheim: Wiley-VCH, 2008, pp 688–690).