

Численное моделирование термонапряжений в твердотельных лазерах с солнечной накачкой

М. Д. Хоменко^{1,*}, Ш. Д. Пайзиев^{2,†}, Х. М. Махмудов²

¹Институт проблем лазерных и информационных технологий,
филиал ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН

²Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У. А. Арифова АН РУз
(Статья поступила 11.03.2019; Подписана в печать 11.03.2019)

Разработан программный код для численного моделирования тепловых полей и термонапряжений в кристаллах твердотельного лазерного резонатора с солнечной накачкой и с внешним сенсibilизатором для заданного объемного поглощения излучения. Проведена верификация программы на нескольких сетках. Показано, что разработанный солвер может быть использован для расчета термонапряжений в лазерах с солнечной накачкой, а его результаты для тестовых примеров хорошо соответствуют аналитическому решению.

PACS: 42.79.Ек, 42.55.Рх, 61.80.Ва УДК: 544.032.65, 621.373.826.

Ключевые слова: лазеры с солнечной накачкой, численное моделирование, термонапряжения.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время технологии накачки лазеров солнечным излучением привлекают все больше внимания [1]. Это связано с тем, что солнце является чистым возобновляемым источником энергии по сравнению с ископаемым топливом, загрязняющим окружающую среду [2]. Лазеры с солнечной накачкой имеют множество применений от космических исследований до лазерного создания топлива с замкнутым циклом. К проблемам таких лазеров можно отнести низкую эффективность сбора солнечной накачки [3] и низкую дифференциальную квантовую эффективность [2, 4, 5]. Для увеличения эффективности поглощения используют сенсibilизирующее вещество, которое поглощает дополнительную часть энергии солнца и излучает в окне поглощения активной среды [2]. Помимо проблем создания цельных кристаллов с внедренными сенсibilизаторами существует проблема дополнительной тепловой нагрузки на кристалл в таких спаренных системах. Недавно была предложена схема лазеров с солнечной накачкой и внешним сенсibilизатором [5, 6]. Применение такой схемы дает значительное увеличение дифференциальной эффективности лазера, при этом позволяет разделить кристалл активной среды и сенсibilизатора для раздельного охлаждения.

Существует возможность создания лазеров с жидкой активной средой [4]. Такая схема частично решает вопрос перегрева циркулирующей активной среды и ее эффективным охлаждением. Не смотря на это, распространенной схемой использования солнечной накачки является твердотельный лазер. Свойственные ему проблемы перегрева активной среды все еще являются актуальными. Возникающие распределения температуры и поля напряжений приводят, например, к появлению

тепловой линзы и не могут быть скомпенсированы простой одиночной линзой т.к. зависят от мощности накачки [7].

Целью данной работы является создание и тестирование программного кода для исследования тепловых полей и напряжений в кристаллах твердотельного лазерного резонатора с солнечной накачкой и с внешним сенсibilизатором.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Библиотека OpenFoam содержит модуль solidDisplacementFoam, для расчета напряжения в твердых телах с приложенной нагрузкой, позволяющий рассчитывать в том числе и термонапряжения [8]. Этот модуль был адаптирован для расчета тепловых полей в областях с тепловыделением для использования его в расчетах термонапряжений в активной среде. Неоднородное тепловое поле получается вследствие объемного поглощения тепла и поверхностного охлаждения. В солнечных лазерах используются схемы накачки, предполагающие неравномерное тепловыделение в активной среде [3, 5] поэтому используется обобщенная трехмерная формулировка. Время релаксации часто также бывает важным, поэтому используется нестационарное уравнение теплопроводности, которое можно представить в виде:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q(x, y, z), \quad (1)$$

где c_p , ρ и λ — теплоемкость, плотность и теплопроводность материала активной среды, а Q — источник тепла связанный с поглощением солнечной накачки.

Моделируется цилиндрическая активная среда Nd:YAG лазера, помещенная в кварцевую трубку, посредством которой осуществляется водяное охлаждение. Граничные условия на торцах активной среды зависят от конфигурации лазера, в данной работе мы за-

*E-mail: hmd@laser.ru

†E-mail: payziyev_sh@mail.ru

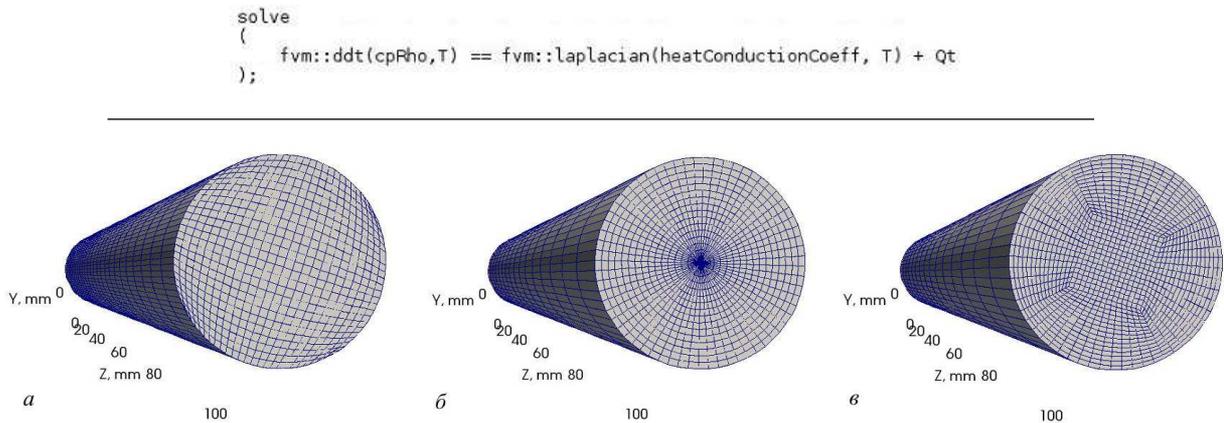


Рис. 1: Вверху — отрывок кода решения уравнения теплопроводности на языке Openfoam; внизу — использованные для тестирования сетки (а — mesh1, б — mesh2, в — mesh3)

Таблица I: Полученные значения расчетных параметров

N	Аналитика [10]	Mesh1	Mesh2	Mesh3
Максимальная температура, К	639.1	638.8	638.2	638.0
Максимальные напряжения, МПа	129.3	134.8	132.5	130.7

даем нулевой поток тепла. Граничные условия можно представить в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial i} \Big|_{i=r_0} = \frac{h}{\lambda}(T_F - T), i = x, y, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0, z=l} = 0, \quad (3)$$

где T_F — температура охлаждающей жидкости, h — коэффициент конвективного теплообмена, r_0 — радиус активной среды.

Программная реализация решения уравнения теплопроводности показана на рис. 1, вверху. Этот пример кода демонстрирует прозрачность высокоуровневого программирования в среде OpenFoam т.к. код полностью соответствует использованному уравнению (1). Граничное условие третьего типа реализовано при помощи утилиты groovyBC [9]. Тестовые сетки, показанные на рис. 1, внизу, разработаны при помощи встроенной утилиты BlockMesh. Используется не ортогональная сетка, состоящая из одного блока (mesh1), сетка с цилиндрической симметрией из четырех блоков (mesh2) и пятиблочная цилиндрическая сетка с квадратом по центру на расстоянии половины радиуса (mesh3). В тестовых расчетах перечисленные сетки состоят из сравнимого количества ячеек ($26 \times 26 \times 26$, $4 \times 16 \times 16 \times 16$ и $5 \times 15 \times 15 \times 15$ для mesh1, mesh2 и mesh3 соответственно). Самое малое время расчета на одном ядре у сетки из одного блока —

22 с (несмотря на несколько большее количество ячеек), 30 с на второй и 26 с на третьей. Сетка, состоящая из одного блока, в отличие от остальных показывает большие значения температуры в начале расчета. Это, по-видимому, связано с неточными граничными условиями в ячейках с большим соотношением сторон (о которых предупреждает утилита checkMesh для этой сетки).

Работа программы тестируется для случая равномерного выделения тепла описанного в работе [7]. Из этой же работы взяты все константы, использованные в расчетах для сравнения с аналитическими результатами ($Q = 312 \text{ Вт}/(\text{см}^3)$, $h = 3350 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, $T_F = 25^\circ\text{C}$, $r_0 = 4.5 \text{ мм}$, $\lambda = 12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$). На рисунке показано радиальное распределение температуры. Рассчитанное распределение температуры полностью совпадает с одномерным аналитическим решением [10, стр. 428]:

$$T(r) = T_F + \frac{r_0 Q}{2h} + \frac{Q}{4\lambda}(r_0^2 - r^2), \quad (4)$$

где Q — равномерное тепловыделение в активной среде.

Все использованные сетки дают схожие результаты по температуре на стационаре. Также с использованием стоковых возможностей модуля [8] были рассчитаны максимальные напряжения (табл. I). Это также хорошо соответствует аналитическому значению 129.3 МПа [10] стр. 437. Можно отметить, что для заданной тепловой генерации напряжения получаются ниже предела прочности активной среды (200 МПа). Но в работе [7] отмечено, что приложенное тепловыделе-

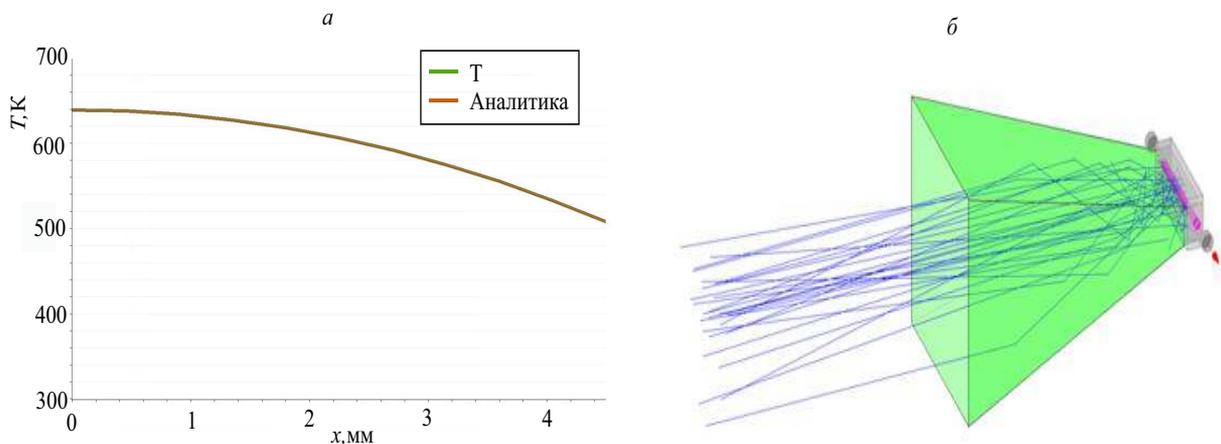


Рис. 2: *a* — Радиальное распределение температуры в активной среде; *б* — схема рассмотренной лазерной системы

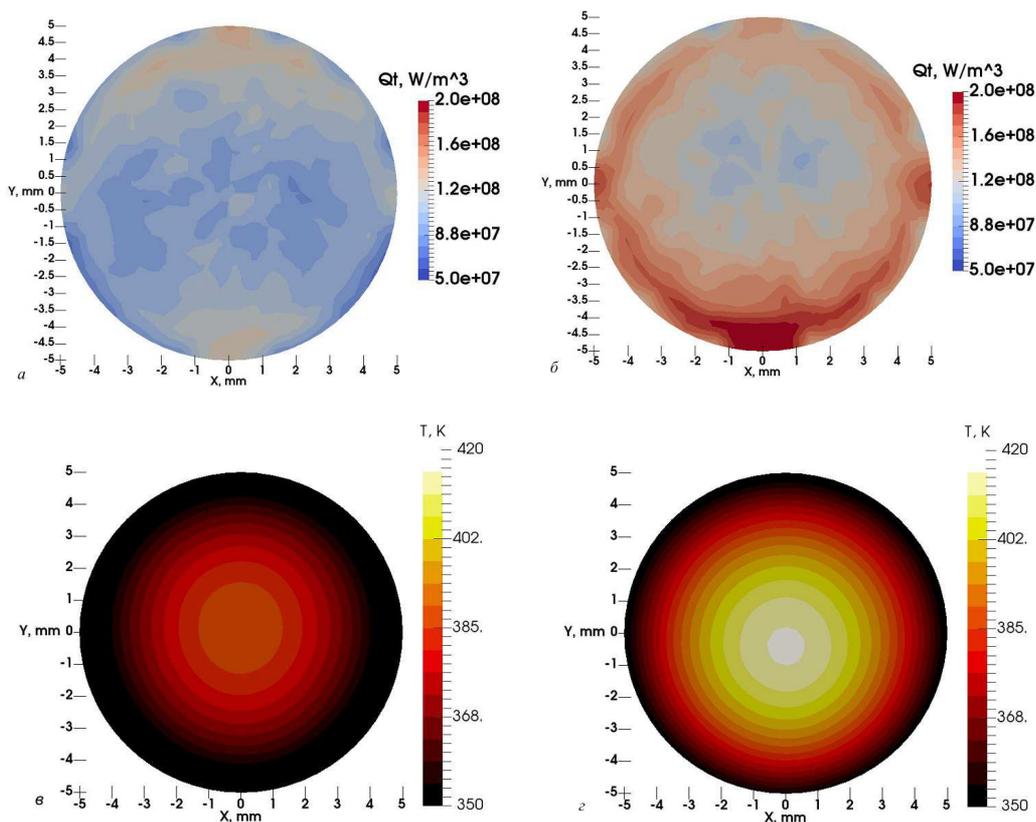


Рис. 3: Типичное распределение накачки для лазеров с солнечной накачкой и соответствующие распределения температуры $Z = 75$ мм (*a* — поглощенная мощность без использования сенсбилизатора, *б* — с использованием сенсбилизатора, *в*, *г* — соответствующие им распределения температуры)

ние приводило к разрушению активной среды в экспериментах. Это говорит о том, что возможно реальное распределение поглощенного тепла отличается от равномерного.

Далее расчеты проводились для случая с реальным распределением поглощенного тепла в активном элементе лазера с солнечной накачкой, разрабатываемого

в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз для преобразования концентрированной энергии солнечного излучения от одного из 62 гелиостатов большой солнечной печи (БСП). В конструкции лазерной системы используется вторичный концентратор (ВК) в виде усеченной пирамиды с прямоугольными основаниями и камера накачки прямоугольной фор-

мы для осуществления поперечной накачки активного элемента (рис. 2, б). В конструкции предусмотрена также возможность установки внешнего сенсibilизатора. Размеры входной апертуры ВК $30 \times 30 \text{ см}^2$, выходной апертуры — $4 \times 14 \text{ см}^2$; камеры накачки — $4 \times 14 \times 2 \text{ см}^3$; активного элемента — $10 \times 150 \text{ мм}$. В качестве активного элемента рассматривался Nd:YAG, а для сенсibilизатора — CrLiCAF. Предполагалось, что коэффициенты отражения гелиостата и параболического концентратора составляют 0.7 и соответствующая максимальная мощность концентрированного потока солнечного излучения в фокусе $\sim 20 \text{ кВт}$, коэффициенты отражения внутренних стенок ВК и камеры накачки 0.9. Для получения распределения поглощенного тепла проводились численные эксперименты на основе модели с использованием методов Монте-Карло и прослеживания лучей [6]. Полученная таким образом распределение накачки применялось для расчета тепловых эффектов. Используемая эффективность накачки составляла $7.1\% \pm 0.3\%$ и $5.2\% \pm 0.2\%$ для лазеров с сенсibilизатором и без него соответственно. Температура охлаждающей жидкости считалась равной $T_F = 25^\circ\text{C}$, коэффициент теплообмена для воды внутри кварцевой трубки $h = 7000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

На рис. 3 показаны полученные распределения поглощенной мощности и температуры для рассмотренного резонатора с солнечной накачкой. Видно, что распределение поглощенной мощности солнечного излучения не равномерно. Также видно, что максимум температуры смещается относительно центра активной среды в ту или иную сторону в зависимости от положения

максимума мощности. Рассчитанные термонапряжения составили 110 МПа и 83 МПа для лазеров с сенсibilизатором и без него соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена разработанная программа для моделирования температурных полей и термонапряжений на основе пакета вычислительной гидродинамики Openfoam. Проведена верификация работы программы на различных сетках. Показано, что разработанная программа хорошо соответствует аналитическому решению и может быть использована для расчета тепловых напряжений в резонаторах с солнечной накачкой. В дальнейшем планируется провести детальное исследование термонапряжений с использованием реального распределения накачки в активной среде лазера с внешним сенсibilизатором, а так же учесть взаимное влияние генерации на температурное распределение и возникающие напряжения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант №18-52-41017 Узб_т в части исследования тепловых полей реального лазера и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника РАН» в части верификации модели.

- [1] Сигов А. С., Матюхин В. Ф., Редько И. Я. СОК. 2016. **10**. С. 66.
- [2] Payziyev S., Makhmudov K., Abdel-Hadi Y. A. Optik 2018. **156**. P. 891.
- [3] Mehellou S., Liang D., Almeida J., Bouadjemine R., Vistas C.R., Guillot E., Rehouma F. Solar Energy. 2017. **155**. P. 1059.
- [4] Payziyev S., Bakhratov S., Shayimov F. Applied Solar Energy. 2016. **52**, 1. P. 68.
- [5] Payziyev S., Makhmudov K. Optics Communications. 2016. **380**. P. 57.

- [6] Payziyev S., Makhmudov K. J. of renewable and sustainable energy. 2016. **8**. P. 015902.
- [7] Bagheri B., Uchida S. Proc. of SPIE. 2012. **8485**. P. 84850B.
- [8] OpenFOAM Foundation. The Open Source CFD Toolbox User Guide 2014.
- [9] Vilums R. Workshop on Multiphysical Modelling in OpenFOAM. 2011. Riga. P. 39.
- [10] Koechner W. Solid-State Laser Engineering, 5th edition. New York: Springer, 2006.

Numerical modeling of thermal stress in solid-state solar pumped lasers

M. D. Khomenko^{1,a}, Sh. D. Payziyev^{2,b}, Kh. M. Makhmudov²

¹Institute on laser and information technologies, Branch of FSIC «Crystallography and photonics» RAS
Shatura, Russia, 140700

²Institute of ion-plasma and laser technologies named after U. A. Arifov, Academy of Science of Uzbekistan
Tashkent, 100125, Uzbekistan

E-mail: ^ahmd@laser.ru, ^bpayziyev_sh@mail.ru

A software has been developed and verified for numerical modeling of temperature and thermal stress in crystals of a solar pumped solid-state laser resonator with an external sensitizer for a given volume absorption of radiation. A number of meshes

were created for verification. It is shown that the developed solver can be used to calculate thermal stress in solar-pumped laser resonators, and its results for test cases are in good agreement with the analytical solution.

PACS: 42.79.Ek, 42.55.Px, 61.80.Ba.

Keywords: solar pumped lasers, numerical modelling, thermal stress.

Received 11 March 2019.

Сведения об авторах

1. Хоменко Максим Дмитриевич — науч. сотрудник; тел.:8(496) 452-22-00, доб. 407, e-mail: hmd@laser.ru.
 2. Пайзиев Шермахамат Далиевич — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: payziyev_sh@mail.ru
 3. Махмудов Хикмат Махаматович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; email: khikmat1961@mail.ru
-