

Отчет
на тему
Разработка высокоэнергетичного дискового
лазерного усилителя

Выполнил студент группы И1М31
Разуваева И.С.

Фамилия И.О.

РУКОВОДИТЕЛЬ

Чугреев А. В.

Фамилия И.О.

Подпись

Оценка _____

«_____» _____ 2018 г.

Содержание

Введение.....	2
1. Техническая реализация	4
2. Преимущества и недостатки	5
3. Исходные данные	6
4. Расчетные формулы	8
5. Термический расчет	10
6. Оптическая схема	14
Список источников.....	15
Приложение А	16

Введение

В начале 1990-х годов Немецкий аэрокосмический центр в сотрудничестве со Штутгартским университетом начали работать над концепцией «тонкий диск». Основной идеей создания тонкого диска является использование тонкой дискообразной активной среды, которая охлаждается через одну из плоских поверхностей диска. Такая геометрия активной среды обеспечивает большое отношение поверхности к объему и, следовательно, обеспечивает очень эффективное управление температурой [1]. Сегодня концепция тонкого диска используется в различных коммерческих лазерах - от компактных и эффективных маломощных систем до киловаттных лазеров, в том числе непрерывных, а также импульсных (фемтосекундных и наносекундных) осцилляторов и усилителей. Развитие лазера на тонком диске сопровождалось и будет сопровождаться численным моделированием и оптимизацией теплового и термомеханического поведения диска, а также разработкой структуры теплоотвода. Для дальнейшего увеличения энергии и эффективности импульсных лазеров на тонком диске эффекты усиленного спонтанного излучения (ASE) являются основной проблемой. Основные усилия ориентированы на создание коротко-импульсных и ультракоротко-импульсных усилителей со средней мощностью мультки-кВт или усилителей на тонком диске джоульного класса, а также новых дизайнов конструкций для компактных непрерывных лазерных систем МОРА.

Конструктивно лазер на тонком диске представляет собой твердотельный лазер с диодной накачкой, который позволяет одновременно реализовать излучатель с высокой выходной мощностью, высокой эффективностью и хорошим качеством луча. В настоящее время доступны системы с высокой выходной мощностью (до 16 кВт) и широко используются в обработке материалов (резка и сварка), а также в широком спектре импульсных лазеров [1].

Благодаря замене ламповой накачки диодами были осуществлены более высокая эффективность и качество луча при большом значении выходной мощности. Первые шаги осуществлялись с использованием лазеров на основе Nd:YAG, но также были исследованы другие концепции и активные среды. Одним из таких интересных материалов является Yb: YAG, так как он имеет более низкий квантовый дефект, который позволил бы повысить эффективность.

После некоторых первоначальных расчетов и обсуждений в 1992 году была начата разработка новой концепции лазера. Основная идея этой новой концепции - использование тонкого «листа» Yb:YAG, охлаждаемого через одну из больших граней (обычно называемую задней стороной диска). Это обеспечивает большое отношение поверхности к объему и

гарантирует эффективное охлаждение. Кроме того, эта охлаждаемая поверхность имеет высокую отражательную способность благодаря отражающему покрытию, действующему как зеркало резонатора, поэтому охлаждение не мешает работе лазера, а основные градиенты температуры параллельны лазерному излучению. На рисунке 1 показана установка одной из первых реализаций дискового лазера с использованием 9% Yb: YAG толщиной 300 мкм и диаметром 2 мм. Мощность такой установки достигает 2 Вт.

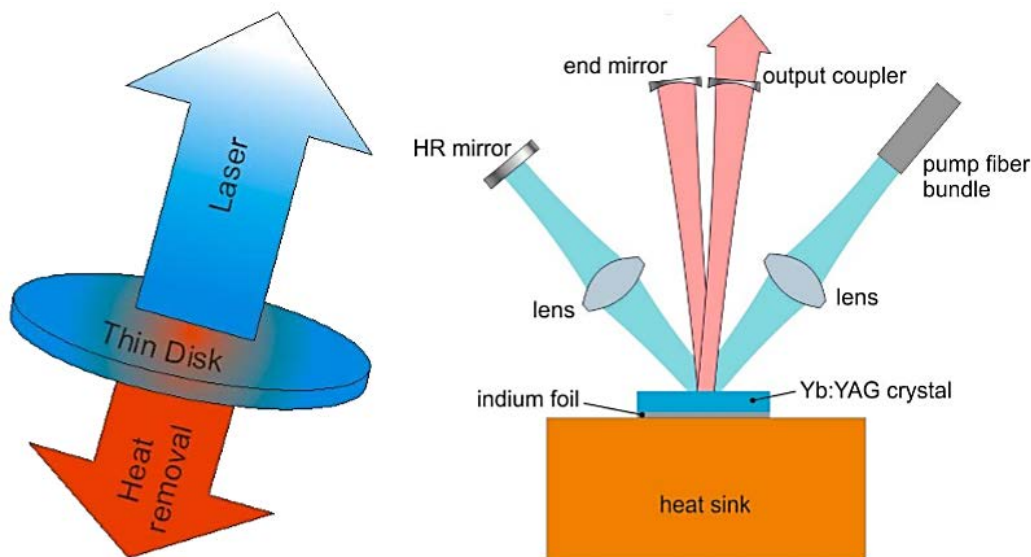


Рисунок 1. Концепция тонкого диска (слева) и первая реализация (справа): отвод тепла через большую площадь, лазер, параллельный основному направлению теплового потока [1].

В последующие годы мощность была значительно увеличена - в 1997 году уже было достигнуто около 250 Вт, а в 1998 году был продемонстрирован тонкий дисковый лазер с выходной мощностью 100 Вт и $M^2 \approx 1$. Параллельно были реализованы первые промышленные системы: в 1997 году Jenoptik выпустили первый коммерческий тонкий дисковый лазер на Nd:YVO, с мощностью 10 Вт; в 1999 году компания Trumpf представила первый тонкий дисковый лазер мощностью 1 кВт.

В дополнение к более высокой эффективности, по сравнению с материалами, легированными неодимом, Yb: YAG имеет гораздо более широкий спектр усиления, обеспечивающий длительность импульсов пикосекундного порядка. В 1997 году был реализован первый регенеративный усилитель на тонком диске, обеспечивающий частоту повторения импульсов 1 кГц, с энергией 120 мДж и длительностью импульса 2,3 пс. В 2000 году был создан первый дисковый лазер с синхронизацией мод и длительностью импульса 700 фс, достигающий около 7,9 Вт средней мощности [2].

1. Техническая реализация

В большинстве случаев тонкий диск монтируется на радиатор, то есть какое-то крепление (основание), которое охлаждается водой; также было продемонстрировано термоэлектрическое охлаждение радиатора, но оно ограничено работой с малой мощностью. Типичными материалами для радиатора (основания/крепления) были бы CVD-алмаз, медь или некоторые металлосодержащие материалы, такие как медно-вольфрамовый сплав. Существует несколько подходов к креплению диска к радиатору, например, соединение индией, пайка или склеивание. Скрепление должно обеспечивать очень хороший тепловой контакт (низкое тепловое сопротивление) и одновременно высокую механическую прочность.

Поскольку диск достаточно тонкий, то однократное поглощение излучения накачки будет низким; поэтому обычно реализуется многопроходная схема накачки. Типичная реализация такой схемы показана на рисунке 2. Параллельный лазерный пучок накачки фокусируется параболическим зеркалом на диск. Часть излучения поглощается в объеме диска, а оставшаяся часть вновь падает на параболическое зеркало и преобразуется в параллельный пучок. Далее этот пучок при помощи двух плоских зеркал направляется на следующий сегмент параболического зеркала. Фокусировка, поглощение и коллимация пучка повторяются до тех пор, пока вся поверхность параболического зеркала не будет использована. В зависимости от размера пятна накачки и его качества проход пучка можно повторить несколько раз. Ограничением являются только потери на рассеяние и пропускание в зеркалах. Установки, такие как на рисунке 2, обычно реализуют 12 отражений на диске (т.е. накачка 24 раза проходит через диск), а в другой коммерческой системе также были реализованы 22 отражения. Все оптические элементы в квантроне жестко закреплены и не требуют настройки [1].

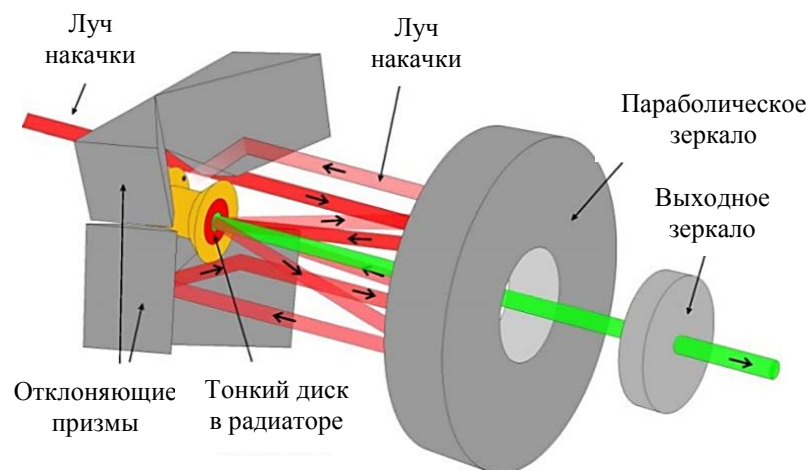


Рисунок 2. Многопроходная схема накачки [1]

2. Преимущества и недостатки

Одним из основных преимуществ концепции лазера на тонком диске (помимо хорошего теплоотвода) является масштабируемость за счет увеличения активной области. Более высокая мощность лазера может быть достигнута за счет увеличения размера пятна накачки и сохранения плотности мощности накачки на диске постоянной - это также будет поддерживать постоянную тепловую нагрузку на поверхности. Также не будет изменяться требуемая яркость излучения накачки. Численное моделирование показывает, что энергетическая яркость источника накачки, равная $80 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ (эквивалентная диодной накачке с оптоволоконным подводом излучения и мощностью 30 Вт, длиной волны 600 мкм, числовой апертурой $NA = 0,2$) достаточна для достижения плотности мощности в 5 кВт/см^2 с 24 проходами независимо от размера пятна накачки и, следовательно, полной мощности.

Многопроходная накачка приводит к некоторому уменьшению требований к поглощению накачки и усилению, что позволяет снизить концентрацию легирования и использовать более тонкие диски. Для лазерных материалов со значительной тепловой заселенностью нижнего лазерного уровня (например, материалов, легированных Yb) это приводит к более низкому лазерному порогу и более высокой эффективности [2].

Благодаря соединению с жестким радиатором механическая прочность тонкого диска намного выше, чем механическая прочность элемента усиления. Типичные критерии отказа, такие как параметр теплового удара R_T , отсутствуют. Тем не менее, механическая прочность соединения должна быть принята во внимание. Поскольку диск довольно тонкий (несколько сотен мкм), внутри резонатора находится лишь небольшое количество материала. Это приводит к низкой нелинейности, что особенно полезно для усиления коротких или ультракоротких импульсов [3].

Следующим важным преимуществом тонких дисков является очень слабое фазовое искажение при больших мощностях накачки (тепловая линза). Сферическая часть фазового изменения соответствует линзе с фокусным расстоянием в несколько метров. Действием такой линзы можно пренебречь.

Помимо всех преимуществ, конструкция тонкого диска также обладает некоторыми характерными свойствами: тонкий диск имеет низкий коэффициент усиления, из-за чего тонкие дисковые генераторы и усилители весьма чувствительны к внутренним потерям; для тонких дисковых лазеров требуются элементы с большим коэффициентом усиления и высоким качеством поверхности, элементы должны быть покрыты высококачественными пропускающим

и отражающим покрытиями [4]. В целом, несколько требований на границе раздела между элементом усиления и радиатором, такие как: высокая отражательная способность для лазера, отличная теплопередача и высокая механическая прочность, могут обеспечить правильное проектирование и необходимый дизайн [5].

3. Исходные данные

Задачей настоящей работы является разработка усилителя на основе тонкого диска Yb:YAG . Усилитель отличается от дискового лазера только использованием начального задающего генератора - лазера с заданными параметрами. Исходные данные для расчёты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные [6][7][8]

d , мм	10
E_{ϕ} , Дж	$2 \cdot 10^{-19}$
λ_n , нм	940
N_{Yb} , м^{-3}	$13,8 \cdot 10^{26}$
$P_{\text{ср}}$, Вт	100
τ , с	$1,2 \cdot 10^{-3}$
$P_{0 \text{ ср}}$, Вт	30
σ_{em} , м^2	$2,1 \cdot 10^{-24}$
σ_{abs} , м^2	$0,75 \cdot 10^{-24}$

d – диаметр пятна;

E_{ϕ} – энергия фотона;

λ_n – длина волны накачки;

N_{Yb} – концентрация атомов иттербия;

$P_{\text{ср}}$ – средняя мощность излучения дискового усилителя;

τ – время жизни верхнего лазерного уровня;

$P_{0 \text{ ср}}$ – средняя мощность задающего генератора;

σ_{em} – сечение вынужденного излучения;

σ_{abs} – сечение поглощения;

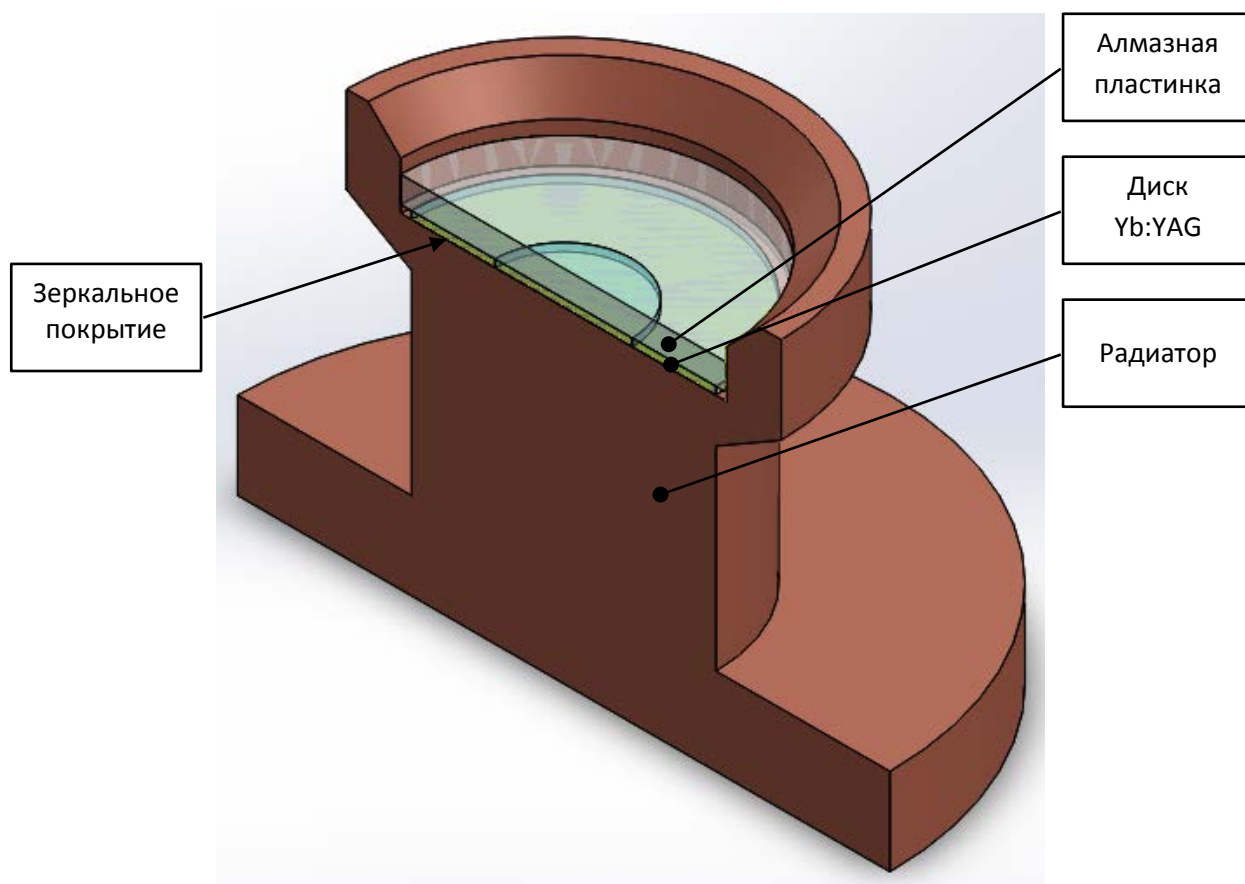


Рисунок 3. Модель медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 350 мкм и алмазной пластинки в разрезе

4. Расчетные формулы

$$N_{\phi} = N_{yb} \cdot V \quad (1)$$

$$V = S_{\pi} \cdot h = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \quad (2)$$

$$\eta = \frac{E_{изл}}{E_{н}} = \frac{\nu_{изл}}{\nu_{н}} \quad (3)$$

$$P_{н} = \frac{N_{\phi} \cdot E_{\phi}}{\eta \cdot \tau} \quad (4)$$

$$K = \exp(2 \cdot [\sigma_{em} \cdot N_{yb} - \sigma_{abs} \cdot \{N_{yb} - N_1\}] \cdot L) \quad (5)$$

$$P_{ср} = K^n \cdot P_{0\text{ ср}} \quad (6)$$

$$n \geq \log_K \frac{P_{ср}}{P_{0\text{ ср}}} \quad (7)$$

$$P_{ус} = (K^n - K^{n-1}) \cdot P_{0\text{ ср}} \quad (8)$$

$$Q_{\text{тепл}} = P_{ус} \cdot (1 - \eta) \quad (9)$$

Где:

N_{ϕ} – количество фотонов в диске;

V – объем, ограниченный лазерным лучом и поверхностью диска;

S_{π} – площадь пятна;

h - толщина диска;

η – квантовый КПД;

$E_{изл}$ – энергия излучения;

$E_{н}$ – энергия накачки;

$P_{н}$ – мощность накачки;

K – коэффициент усиления (туда-обратно)

N_1 – количество фотонов на нижнем энергетическом уровне;

L – длина оптического пути;

n – количество усилителей;

$P_{\text{ус}}$ – выходная мощность усилителя;

$Q_{\text{тепл}}$ – тепловая мощность;

$\lambda_{\text{н}}$ – длина волны накачки.

Рассчитанные параметры усилителя были сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Рассчитанные параметры усилителя

h , мкм	K	n , шт	$P_{\text{ус}}$, Вт	$P_{\text{вых}}$, Вт	$Q_{\text{тепл}}$, Вт	N_1 , $1/\text{м}^3$	t , °C	$P_{\text{н}}$, Вт	N 60Вт диодов
200	2,106863	2	33,20588	63,20588	2,988529	225615,2	15,9	36,489 98	1
			69,96024	133,1661	6,296421	272902,1	17	76,879 38	2
300	3,058119	2	61,74357	91,74357	5,556921	250335,1	16,5	67,850 07	2
			188,8192	280,5627	16,99373	432726,5	19,7	207,49 36	4
350	3,684372	1	80,53115	110,5311	7,247803	272902,1	17	88,495 77	2
400	4,438871	1	103,1661	133,1661	9,284951	302565,1	17,6	113,36 94	2
500	6,443037	1	163,2911	193,2911	14,6962	397573,4	19,2	179,44 08	3
1000	41,51272	1	1215,382	1245,382	109,3844	$9,91 \cdot 10^8$	73,9	1335,5 84	23

5. Термический расчет

По рассчитанным параметрам усилителя был произведен термический расчет с использованием программного пакета SolidWorks Simulation. Для данного расчета приняты температура нижней стенки радиатора 15°C и воздушная конвекция пластины/диска $5 \text{ Вт/м}^2\text{K}$ [9]. Результаты расчета приведены на рисунках 3 - 8 и графиках 1 - 2.

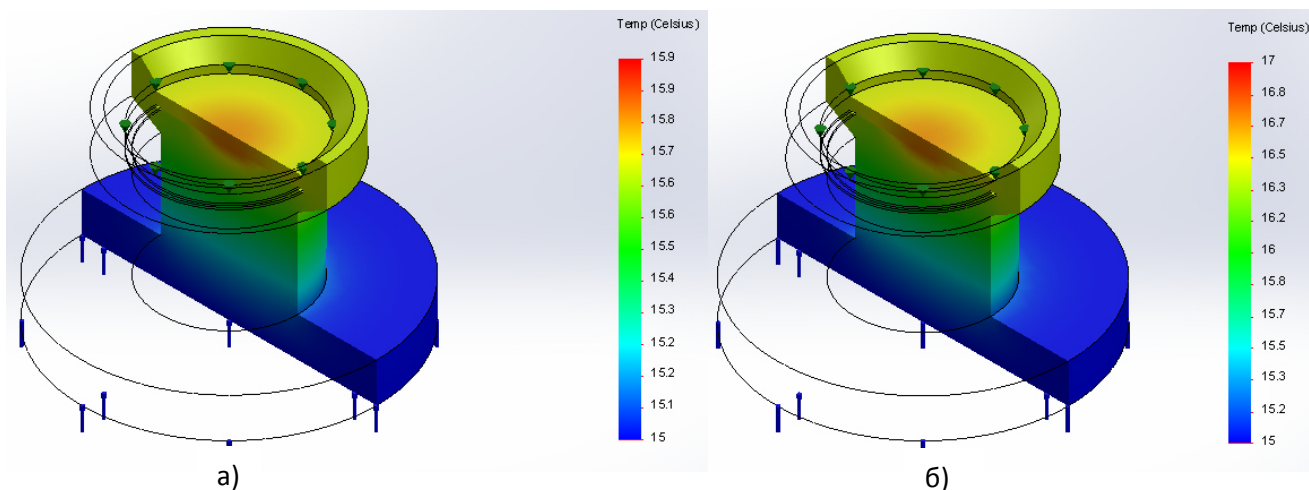


Рисунок 3. Распределение тепла в объеме медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 200 мкм и алмазной пластинки толщиной 1000 мкм: а) для первого усилителя; б) для второго усилителя.

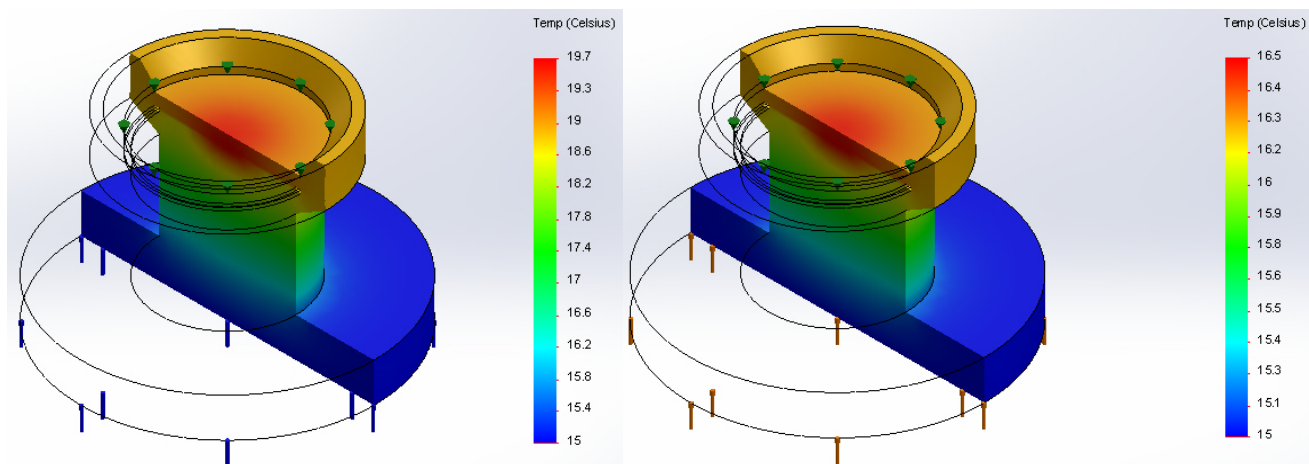


Рисунок 4. Распределение тепла в объеме медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 300 мкм и алмазной пластинки толщиной 1000 мкм: а) для первого усилителя; б) для второго усилителя.

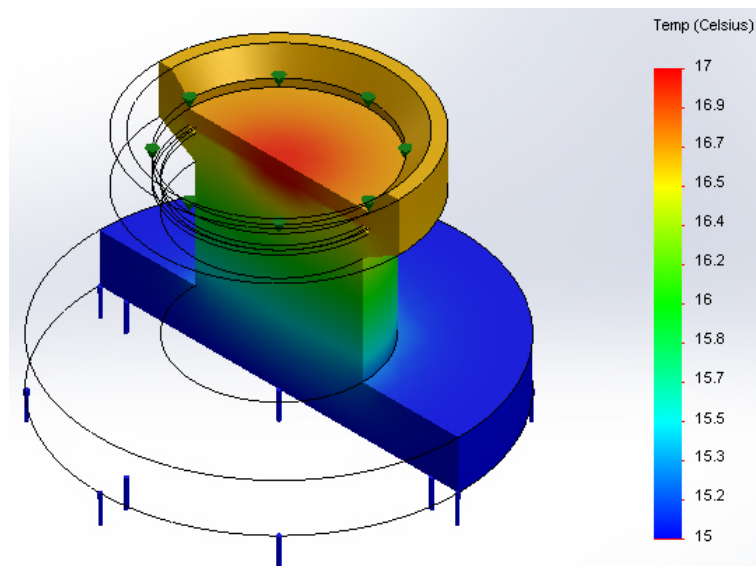


Рисунок 5. Распределение тепла в объеме медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 350 мкм и алмазной пластинки толщиной 1000 мкм

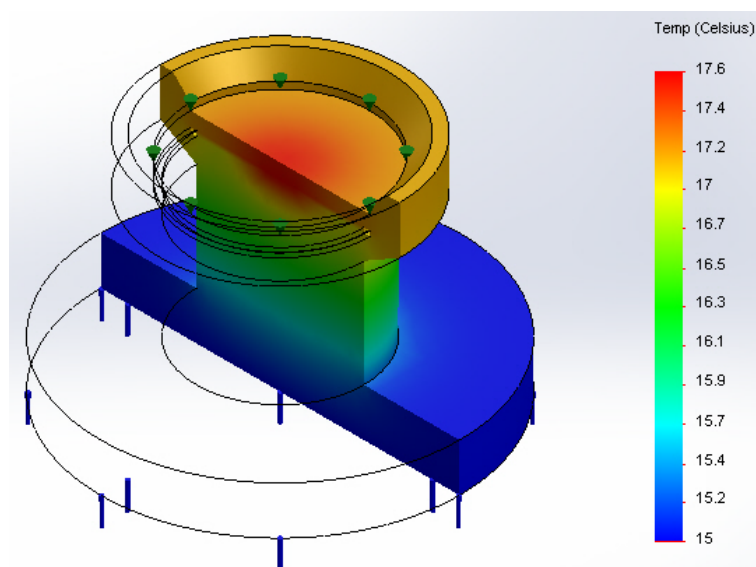


Рисунок 6. Распределение тепла в объеме медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 400 мкм и алмазной пластинки толщиной 1000 мкм

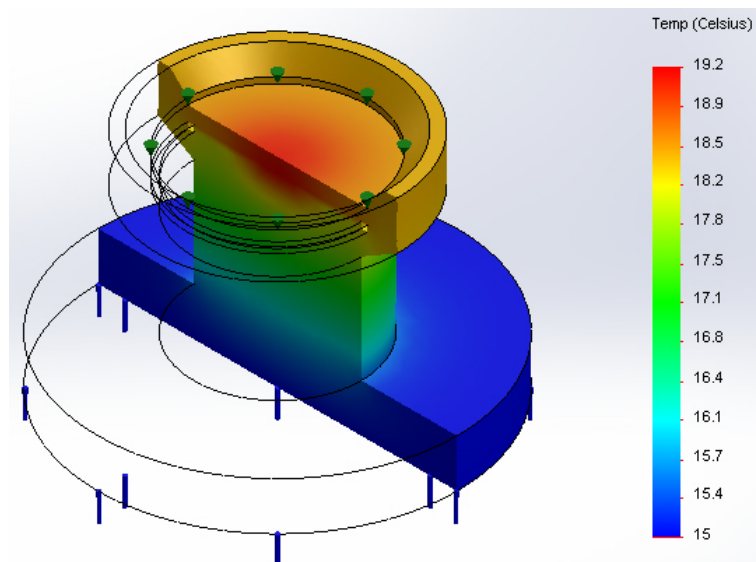


Рисунок 7. Распределение тепла в объеме медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 500 мкм и алмазной пластинки толщиной 1000 мкм

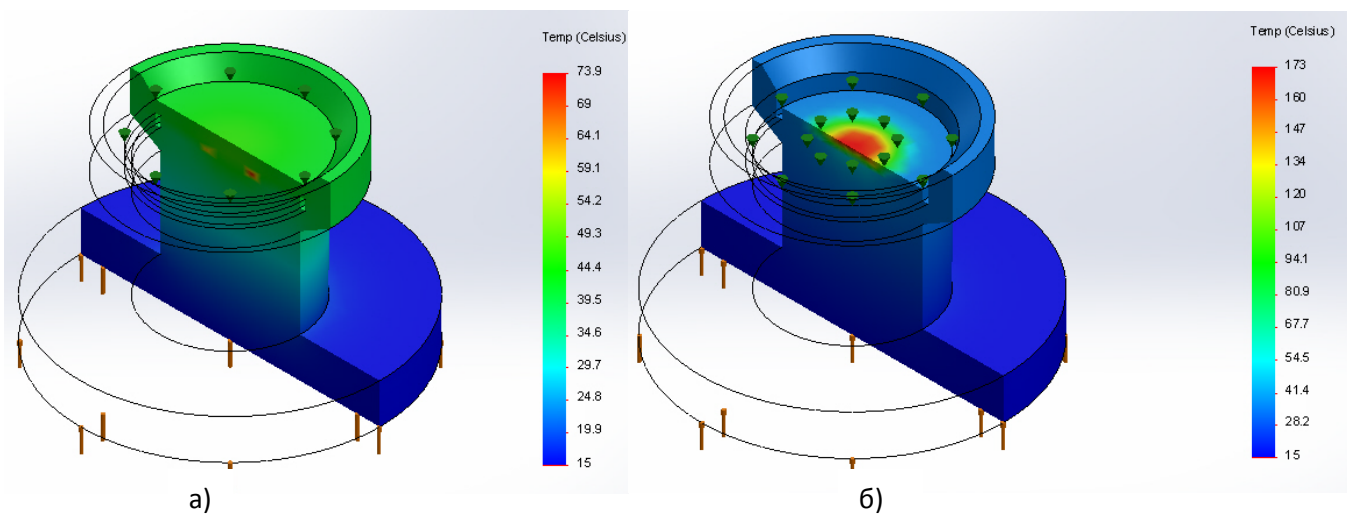


Рисунок 8. Распределение тепла в объеме медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 1000 мкм: а) с алмазной пластинкой толщиной 1000 мкм; б) без алмазной пластинки

6. Влияние толщины диска на характеристики усилителя

Ниже представлены графические зависимости коэффициента усиления и нагрева диска Yb:YAG от его толщины (граф. 1, граф. 2).

График 1. Зависимость коэффициента усиления от толщины диска Yb:YAG

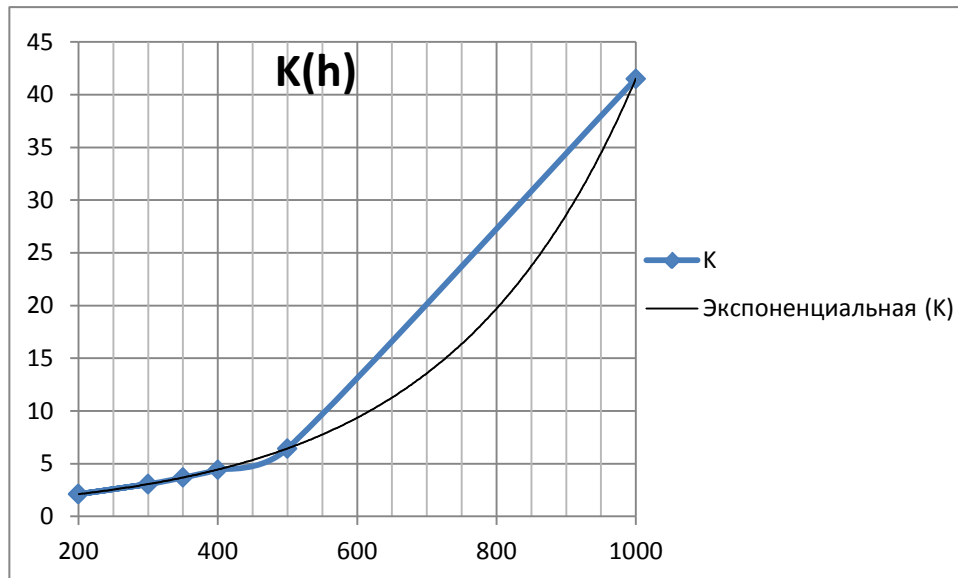
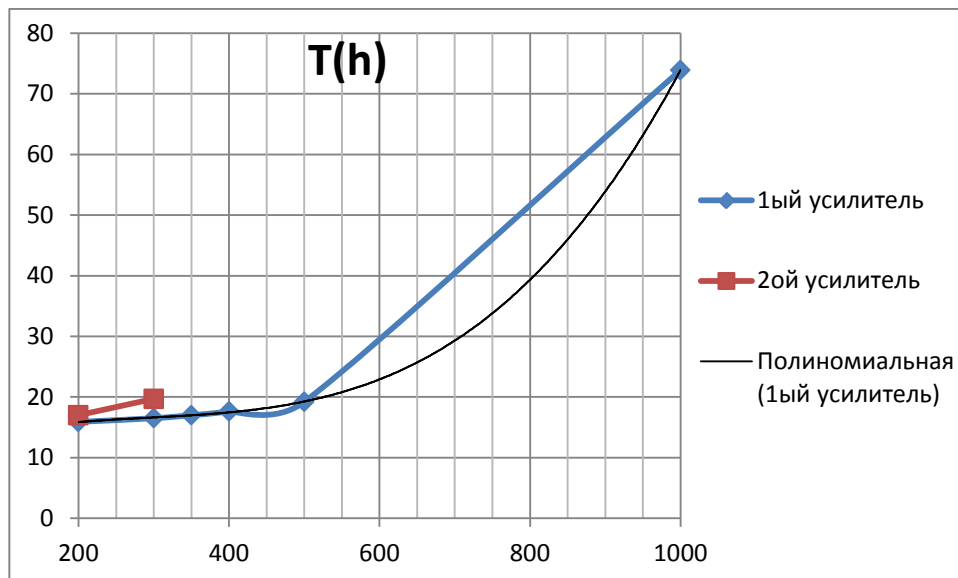


График 2. Зависимость нагрева диска Yb:YAG от его толщины



7. Оптическая схема

В рамках данной работы была разработана принципиальная оптическая схема дискового лазерного усилителя. Чертеж схемы оптической принципиальной ЮИЦН.3.00.00.000ЛЗ приведен в приложении А.

Элементы оптической схемы:

- Параболическое зеркало (уравнение параболы: $y = -x^2/128,43$) с отверстием в центре;
- Три равнобедренных трапецеидальных призмы (БР180);
- Алмазная пластинка;
- Активная среда Yb:YAG в форме диска;
- Круглое зеркало.

Излучение задающего генератора проходит сквозь отверстие в параболическом зеркале и падает на алмазную пластинку под углом 10° , далее проходит сквозь нее и диск Yb:YAG; отражается от нижней поверхности диска и зеркально повторяет свою траекторию, выходя через отверстие в параболическом зеркале под углом 20° к входящему лучу. При прохождении сквозь диск (дважды: туда и обратно) излучение усиливается в 3,684 раза.

Луч накачки входит в систему параллельно оптической оси диска и, отражаясь от параболического зеркала, проходит сквозь алмазную пластинку и диск. При отражении от нижней поверхности активной среды луч проходит по траектории, зеркальной к предыдущему оптическому пути, и, отразившись от параболического зеркала, падает на призму, отражается от двух ее граней и выходит из нее. Излучение накачки, повернувшись на 45° относительно плоскости диска выходит из призмы и отражается от параболического зеркала, и так далее. Пройдя после третьей призмы активную среду и отразившись от параболического зеркала луч отражается от плоского круглого зеркала и проходит всю траекторию в обратном направлении. Во время прохождения данной схемы излучение накачки полностью¹ поглощается объемом активной среды вызывая вынужденную генерацию и усиление излучения задающего генератора.

¹ Мощность излучения снижается до незначительных значений, которыми можно пренебречь

Список источников

1. Jochen Speiser. Thin Disk Lasers – History and Prospects. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/>, свободный.
2. Ларионов М., Даузингер Ф., Зоммер Ш., Гизен А. Лазеры на тонких дисках: Принцип работы и применение. Часть 1. [Текст] / Ларионов М., Даузингер Ф., Зоммер Ш., Гизен А // Фотоника. - 2009. - №3. - С. 2-8.
3. Кузнецов И.И. Лазеры с высокой средней мощностью на основе Yb:YAG элементов перспективных геометрий. [Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.21 / Кузнецов Иван Игоревич. - Нижний Новгород, 2016. - 102 с.
4. High Energy High Repetition-Rate Thin-Disk Amplifier for OPCPA Pumping. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://www.physnet.uni-hamburg.de/services/biblio/dissertation/dissfbPhysik/___Volltexte/Michael___Schulz/Michael___Schulz.pdf, свободный.
5. Characterization and Modeling of a High Power Thin Disk Laser. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://etd.fcla.edu/CF/CFE0003216/Rodriguez_Omar_R_201008_MS.pdf, свободный.
6. Yb:YAG. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.scitc.ru/ru/crystals/redkozemelnye-kristally/yb-yag.html>, свободный.
7. Laser Materials Yb:YAG. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.scientificmaterials.com/downloads/Yb_YAG.pdf, свободный.
8. Гаранин С.Г. ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ [Текст] / Гаранин Сергей Георгиевич // Оптический журнал. - 2011. - №6. - С. 60-70.
9. Коэффициент конвективной теплопередачи. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://help.solidworks.com/2012/Russian/solidworks/cworks/Convection_Heat_Coefficient.htm, свободный.

В данное приложение входит схема оптическая принципиальная ЮИЦН.3.00.00.000ЛЗ.

