

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018 г.

Содержание

Введение.....	3
1. Концепция и техническая реализация лазера на тонком диске	4
2. Оптические и физические свойства $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ кристалла	6
3. Тепловые эффекты в активном элементе	7
3.1 Тепловой расчет активного элемента.....	8
4. Моделирование и расчет параметров дискового лазерного усилителя .	13
4.1 Моделирование параметров излучения накачки.....	13
4.2 Расчет требуемой мощности накачки.....	14
4.3 Результаты расчета.....	17
4.4 Моделирование квантрона дискового лазерного усилителя	20
Заключение	23
Список источников	24

Введение

Высокомощные коротко- и сверхкороткоимпульсные твердотельные лазеры с диодной накачкой стали привлекательными и мощными инструментами для различных применений, таких как: лазерная обработка материалов, исследование лазерной плазмы, спектроскопия, дистанционное зондирование, накачка параметрических усилителей и пр.¹ Ключевыми параметрами лазера являются средняя мощность, энергия и длительность импульса, а также пиковая мощность, достижимые границы которых непрерывно расширяются. Благодаря источникам накачки с высокой яркостью возможно генерировать средние мощности, превышающие 100 кВт².

Лазеры на тонких дисках хорошо подходят для генерации импульсов, как с высокой энергией, так и с большой частотой повторения из-за возможности создания больших апертур и маленькой толщины активного слоя, что имеет решающее значение для эффективного управления температурой лазера³, то есть охлаждения. Масштабирование энергии выходного импульса лазерного усилителя на основе тонкого диска в основном ограничено усиленным спонтанным излучением (ASE) или даже паразитной генерацией (возбуждением)⁴. Однако применение нескольких тонких дисков или использование дисков с большей толщиной позволяет генерировать энергии импульсов до нескольких джоулей⁵.

Материалы активной среды, легированные иттербием, являются привлекательными для использования в твердотельных лазерах с диодной накачкой из-за их высокой энергоэффективности и сравнительно длительных

¹ T. Metzger, A. Schwarz, C. Teisset, D. Sutter, A. Killi, R. Kienberger, and F. Krausz, "High-repetition-rate picosecond pump laser based on a Yb:YAG disk amplifier for optical parametric amplification," *Opt. Lett.* 34 2123–2125 (2009).

² T. T. Luu, M. Garg, S. Y. Kruchinin, A. Moulet, M. T. Hassan, and E. Goulielmakis, Extreme ultraviolet high-harmonic spectroscopy of solids, *Nature* 521, 498–502 (2015).

³ A. Giesen, and J. Speiser, "Fifteen years of work on thin-disk lasers: Results and scaling laws," *IEEE J. Quantum Electron.* (ST) 13, 598–609 (2007).

⁴ D. Albach, J.-C. Chanteloup, and G. L. Toulou, "Influence of ASE on the gain distribution in large size, high gain Yb³⁺:YAG slabs," *Opt. Express* 17, 3792–3801 (2009).

⁵ A. Curtis, B. Reagan, K. Wernsing, F. Furch, B. Luther, and J. Rocca, "Demonstration of a compact 100Hz, 0.1J, diode-pumped picosecond laser," *Opt. Lett.* 36, 2164–2166 (2011).

времен жизни возбужденного состояния. Как спектральные (ширина линии усиления, сечение усиления и время жизни), так и тепловые свойства активной среды важны для проектирования высокомоощного лазера.

Задачей настоящей работы является разработка квантрона лазерного усилителя для создания импульсного лазерного источника с высокой средней мощностью за счет использования активного элемента формы тонкого диска из кристалла Yb:YAG со следующими исходными данными:

- 1) Длина волны задающего генератора $\lambda_{\text{и}}=1030$ нм;
- 2) Длина волны накачки $\lambda_{\text{н}}=940$ нм;
- 3) Средняя мощность излучения $P_{\text{ср}}=100$ Вт;
- 4) Длительность импульса $\tau_{\text{имп}}=10$ нс;
- 5) Частота следования импульсов $\nu_{\text{имп}}=10$ кГц.

1. Концепция и техническая реализация лазера на тонком диске

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. На рис. 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 [2]. В большинстве случаев тонкий диск монтируется на радиатор, то есть специальное крепление (основание), которое охлаждается хладагентом (в большинстве случаев проточной водой). Типичными материалами для радиатора могут быть CVD-алмаз, медь или некоторые металлосодержащие материалы, такие как медно-вольфрамовый сплав.

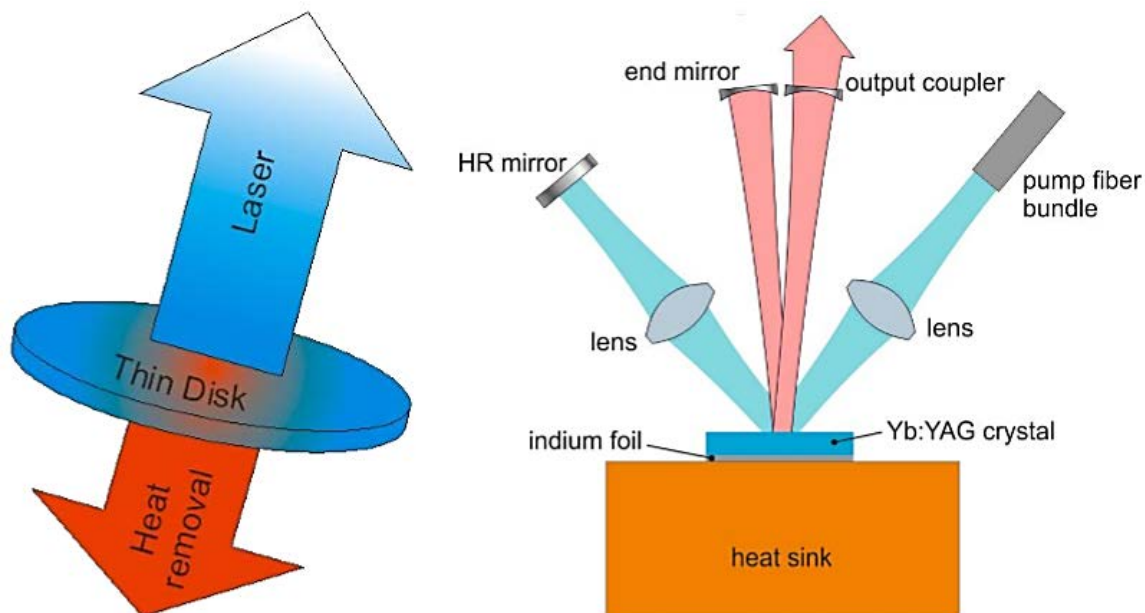


Рисунок 1 – Концепция тонкого диска (слева) и первая реализация (справа): отвод тепла осуществляется через большую площадь, градиент температуры распределяется параллельно лазерному лучу

Поскольку диск достаточно тонкий, то двукратное поглощение энергии накачки будет низким, поэтому обычно реализуется схема с многократным проходом накачки через активный элемент. Типичная реализация такой схемы представлена на рис. 2. Параллельный лазерный пучок от источника накачки фокусируется на диск с помощью параболического зеркала. Энергия излучения частично поглощается в объеме диска, а оставшая часть снова направляется на параболическое зеркало и далее распространяется параллельным пучком. Затем при помощи двух плоских зеркал этот пучок направляется на не засвеченный участок параболического зеркала. Прохождение пучка накачки, его поглощение, фокусировка и коллимация продолжают до того момента, пока вся рабочая поверхность параболического зеркала не будет задействована, а затем с помощью зеркала пучок перенаправляется по тому же оптическому пути в обратном направлении.

В зависимости от размера пятна накачки и его качества проход пучка можно повторить несколько раз. Ограничением для количества проходов являются потери на рассеяние и пропускание в оптических элементах. Установки, такие

как на рис. 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 жестко закреплены в этом квантроне и их юстировка не выполняется.

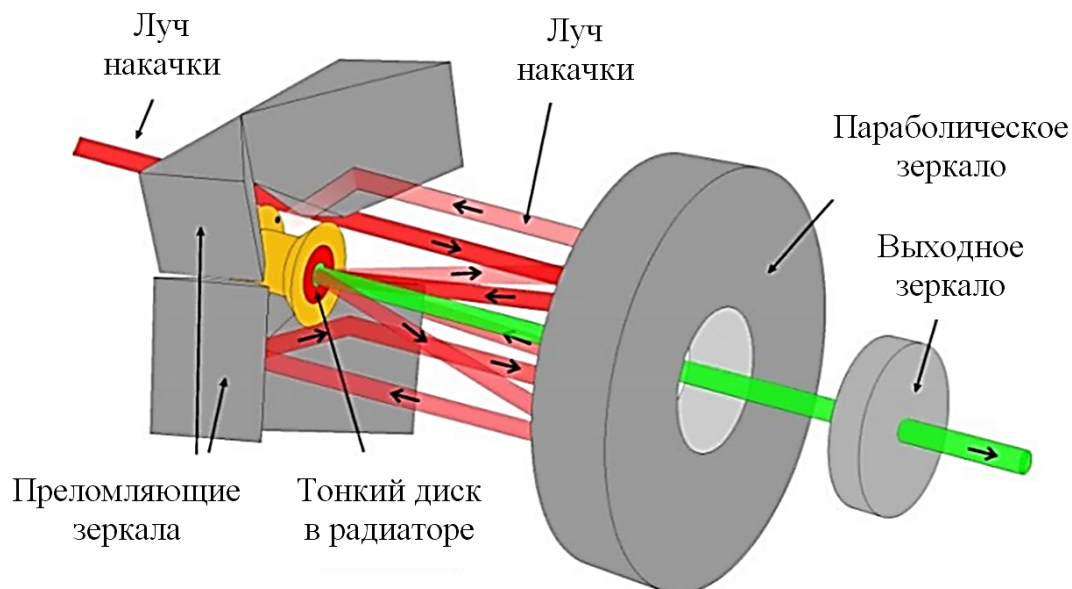


Рисунок 2 – Многопроходная схема накачки [2]

2. Оптические и физические свойства $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ кристалла

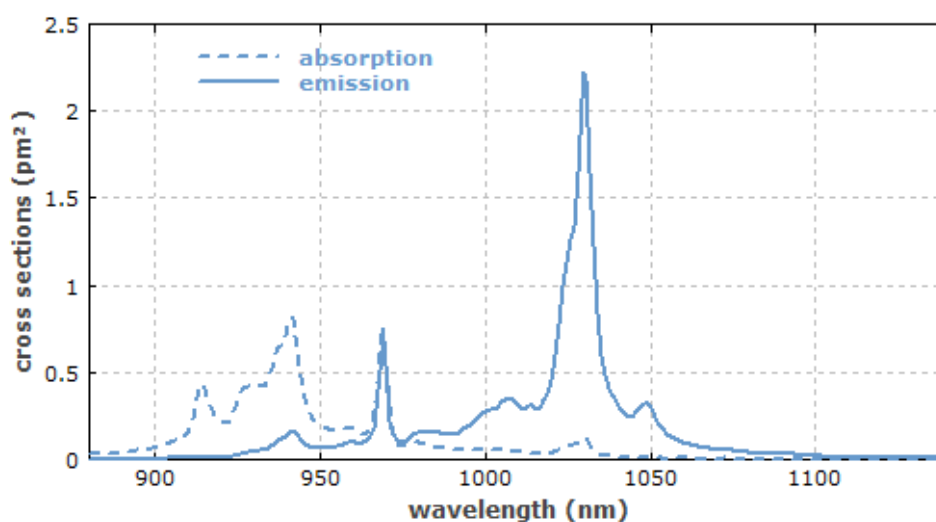
Алюмоиттриевые гранаты легированные ионами иттербия считаются более подходящими для диодной накачки, чем традиционные легированные неодимом кристаллы. По сравнению с $\text{Nd}:\text{YAG}$ кристаллами, кристаллы $\text{Yb}:\text{YAG}$ обладают более широкой полосой поглощения – 8 нм на 940 нм, а время жизни верхнего уровня составляет порядка $\tau_{\text{Yb}} = 1.2$ мкс. Сечение поглощения: $\sigma_{\text{abs}} = 7.5 \cdot 10^{-25} \text{ м}^2$ и сечение излучения $\text{Yb}:\text{YAG}$: $\sigma_{\text{em}} = 2.1 \cdot 10^{-24} \text{ м}^2$ показаны на граф. 1. Ниже приведена сравнительная таблица с характеристиками кристаллов $\text{Yb}:\text{YAG}$ и $\text{Nd}:\text{YAG}$.

Таблица 1 – Сравнение характеристик активных сред $\text{Yb}:\text{YAG}$ и $\text{Nd}:\text{YAG}$

Параметры активной среды	$\text{Yb}:\text{YAG}$	$\text{Nd}:\text{YAG}$
Длина волны накачки, мкм	0.941	0.808

Ширина полосы поглощения, нм	8	2
Сечение поглощения, 10^{-20} см^2	0.75	6.7
Длина волны излучения, мкм	1.03	1.064
Сечение излучения, 10^{-20} см^2	2.1	28
Время жизни рабочего уровня, мс	1.2	0.23
Энергия насыщения, Дж/см ²	9.2	0.67
Интенсивность насыщения (кВт/см ²)	9.7	2.9

График 1 – Сечения поглощения и излучения $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ кристалла (для температуры кристалла 20°C) [1]



3. Тепловые эффекты в активном элементе

Основной проблемой при разработке твердотельных лазеров с высокой средней мощностью остается тепловыделение в активном элементе, нагрев которого порождает нежелательные эффекты, такие как ухудшение оптических свойств, фазовые искажения излучения, эффект тепловой линзы, который приводит к возникновению фокальной перетяжки излучения. Поэтому важной задачей является разработка квантрона, включающего в себя систему эффективного охлаждения активного элемента, обеспечивающую контроль тепловыделения. Для высокоэффективного охлаждения активный элемент должен иметь достаточно малый размер по той координате, вдоль которой

будет осуществляться охлаждение, и большую площадь охлаждаемой поверхности.

3.1 Тепловой расчет активного элемента

Был произведен термический расчет активного элемента в форме тонкого диска Yb:YAG, закрепленного в медном радиаторе, при воздействии оптической мощности с использованием программного пакета SolidWorks Simulation. Моделирование термического воздействия проводилось для активного элемента с разной толщиной. Для данного расчета приняты температура нижней стенки радиатора 15°C и воздушная конвекция пластины/диска 5 Вт/м²К. Средняя мощность, воздействующая на алмазную пластинку и диск активной среды, задана равной 100 Вт.

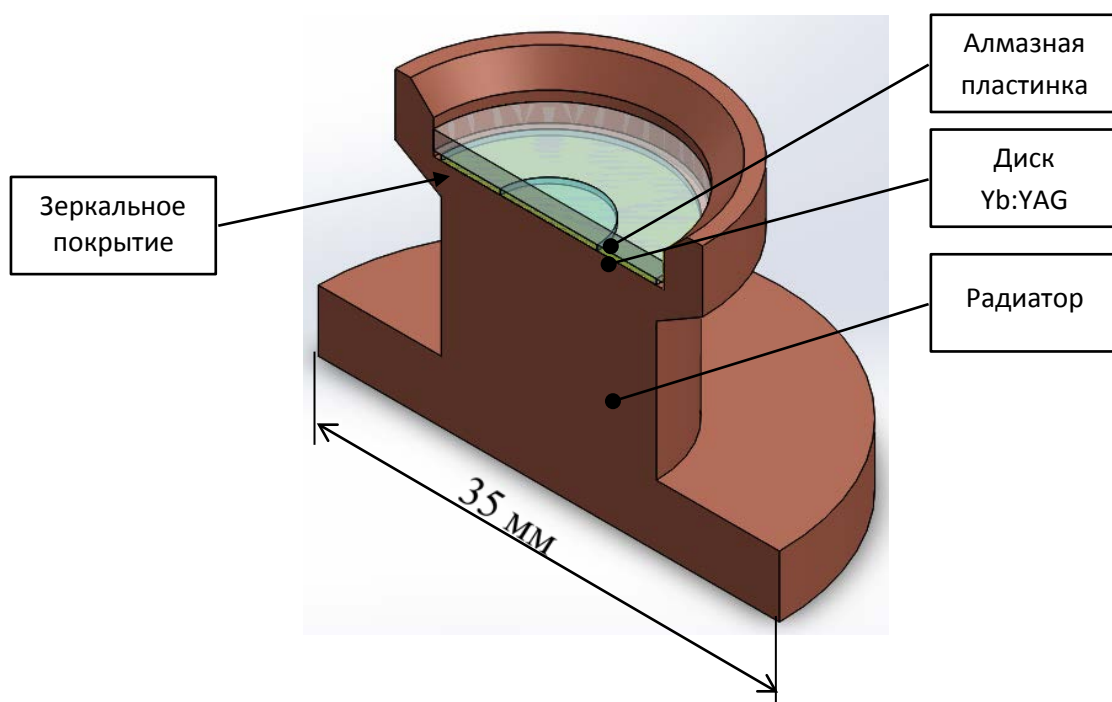


Рисунок 3 – Модель сборки радиатора, диска Yb:YAG и алмазной пластинки в разрезе

Результаты расчета приведены на рис. 4 – 9. На граф. 2 показаны минимальные и максимальные температуры нагрева дисков с разной толщиной.

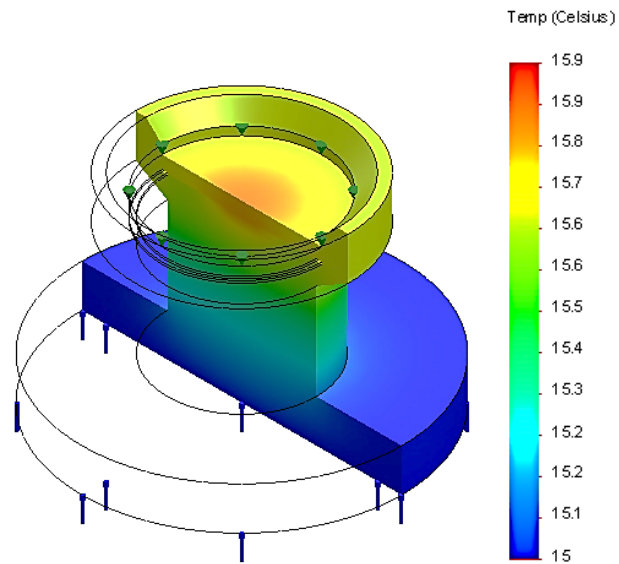


Рисунок 4 – Распределение тепла в объеме медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 200 мкм и алмазной пластинки толщиной 1000 мкм

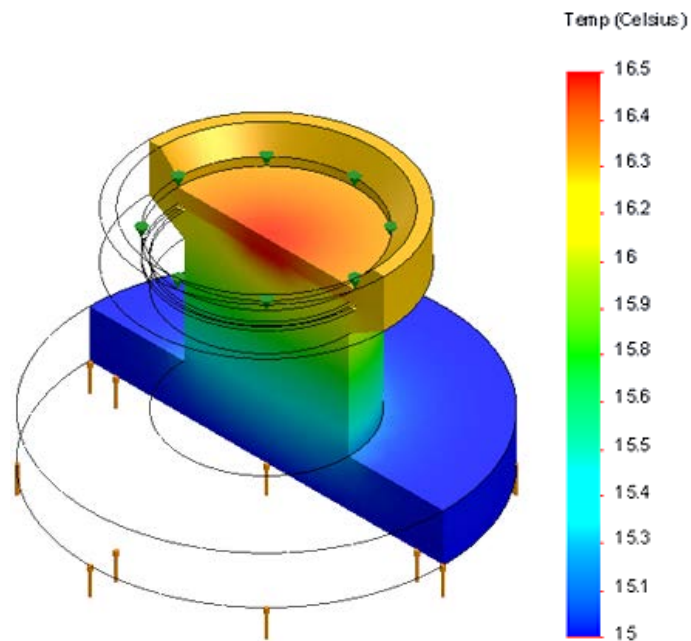


Рисунок 5 – Распределение тепла в объеме медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 300 мкм и алмазной пластинки толщиной 1000 мкм

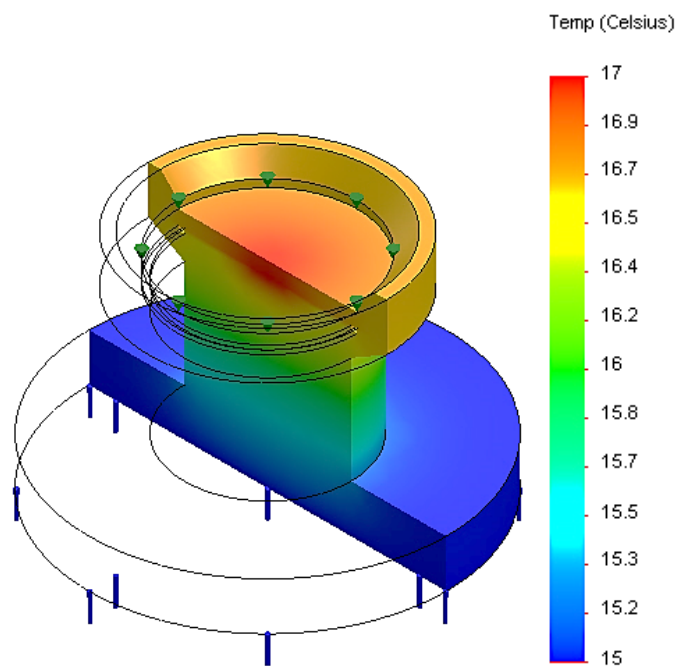


Рисунок 6 – Распределение тепла в объеме медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 350 мкм и алмазной пластинки толщиной 1000 мкм

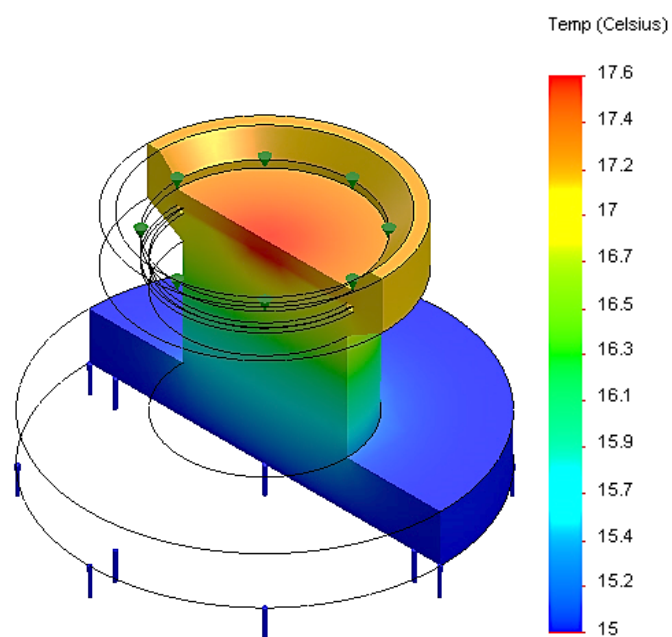


Рисунок 7 – Распределение тепла в объеме медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 400 мкм и алмазной пластинки толщиной 1000 мкм

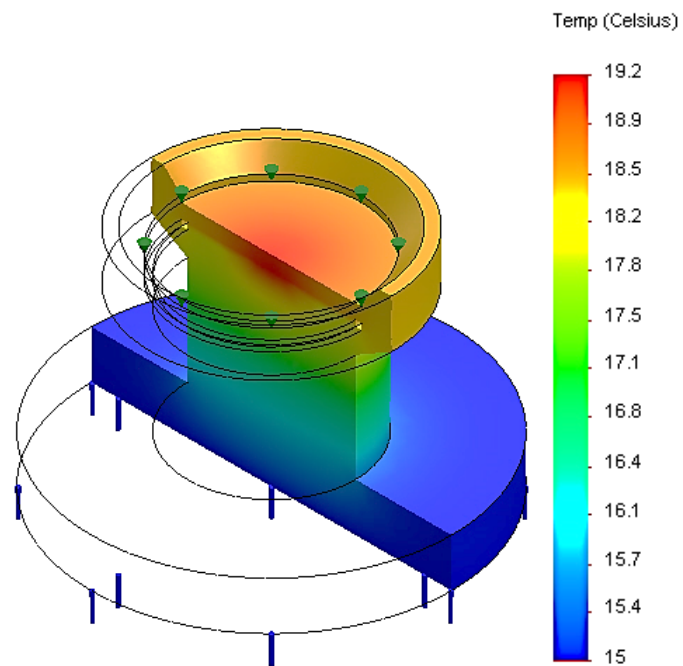


Рисунок 8 – Распределение тепла в объеме медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 500 мкм и алмазной пластинки толщиной 1000 мкм

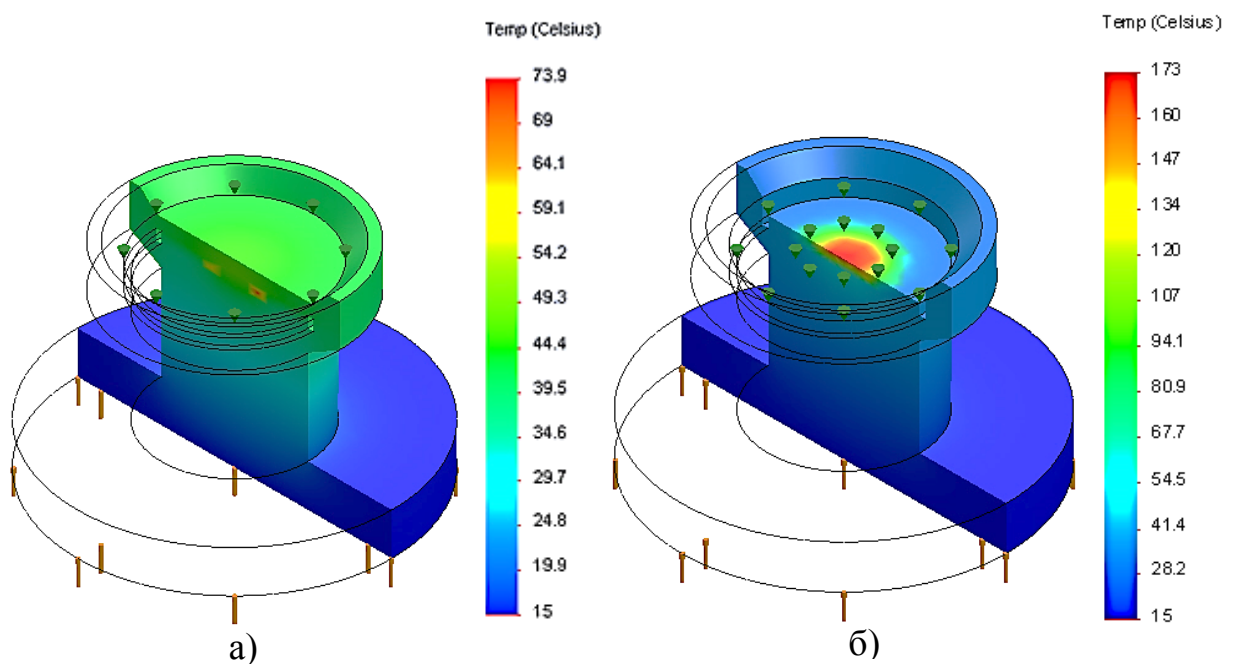


Рисунок 9 – Распределение тепла в объеме медного радиатора, диска Yb:YAG толщиной 1000 мкм: а) с алмазной пластинкой толщиной 1000 мкм; б) без алмазной пластинки.

График 2 – Зависимость нагрева диска диаметром 20 мм от его толщины

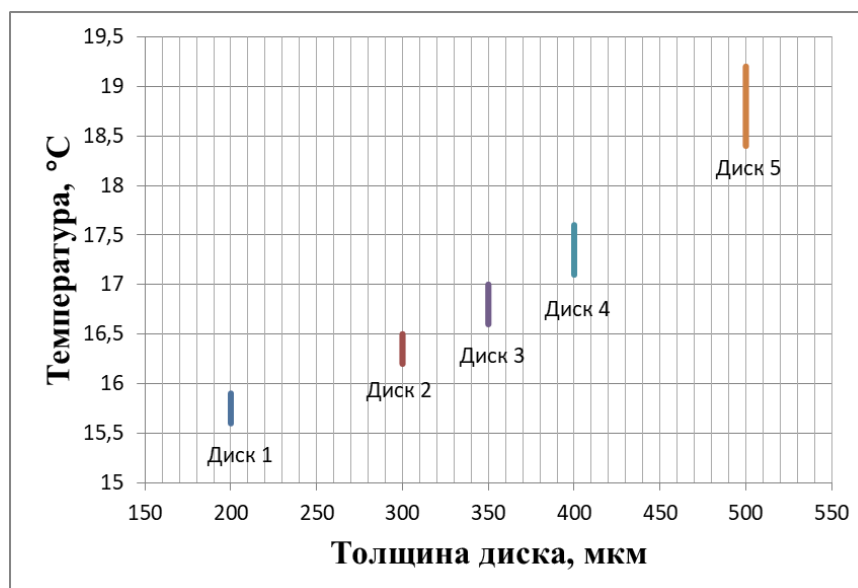
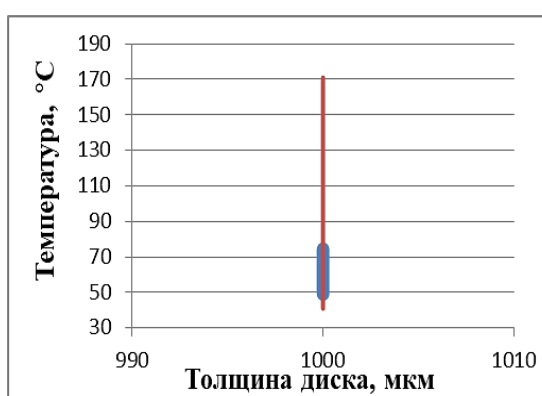


График 3 – Диапазон температур нагрева диска в сборке с алмазной пластинкой и без нее, при толщинах диска и пластинки 1000 мкм



Анализируя выше представленные расчеты и графики, можно заключить, что наиболее оптимальной является активная среда с меньшей толщиной, как и обсуждалось ранее. При этом диск с достаточно малой толщиной (200 мкм) менее энергоэффективен, т.к. поглощает меньшее количество энергии накачки, а диск большой толщины (500-1000 мкм) испытывает высокие термические нагрузки. Также стоит отметить, что в случае использования алмазной пластинки в конструкции радиатора (рис. 9, б), максимальная температура в объеме диска значительно ниже, чем при ее отсутствии.

Для дальнейшего расчета и моделирования параметров лазерного усилителя были приняты толщина диска, равная 350 мкм, диаметр диска 2 см и толщина алмазной пластинки 1000 мкм.

4. Моделирование и расчет параметров дискового лазерного усилителя

В разрабатываемом квантроне реализуется схема с 16 проходами излучения накачки через активную среду (8 отражений от задней поверхности диска), которые обеспечиваются при помощи трех отражательных призм, параболического зеркала и одного плоского зеркала с диэлектрическим покрытием. На рис. 10 приведены графики отражения зеркал с диэлектрическим покрытием для длин волн 750-1100 нм.

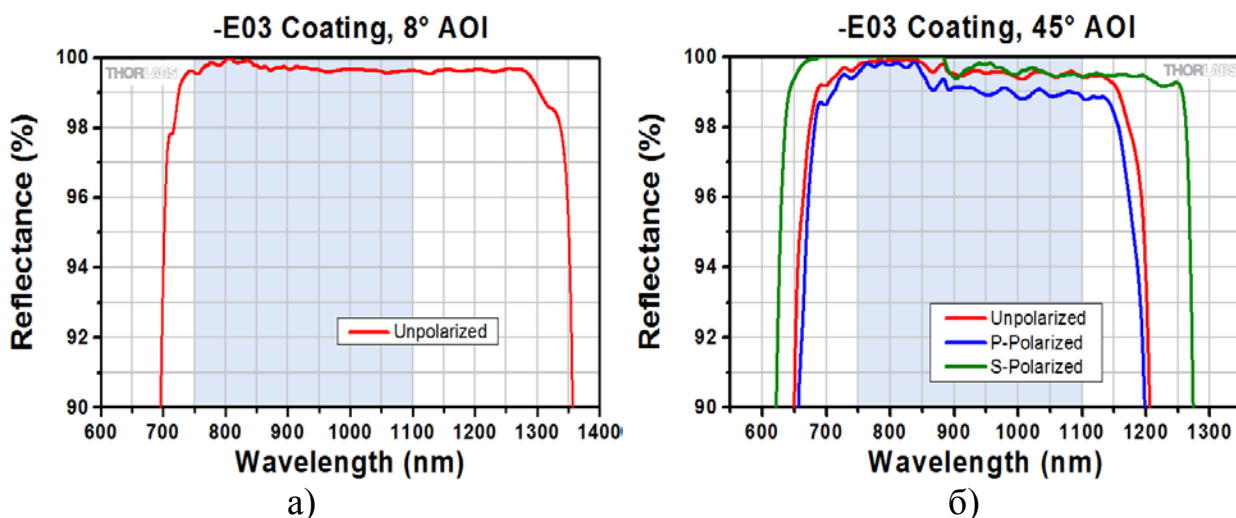


Рисунок 10 – Графики отражения диэлектрическим покрытием для длин волн 750-1100 нм: а) неполяризованное излучение с углом падения 8°; б) неполяризованное излучение, с Р-поляризацией, S-поляризацией и углом падения 45° [3]

4.1 Моделирование параметров излучения накачки

При помощи программного пакета Zemax была смоделирована оптическая система, состоящая из отрезка оптического волокна с диаметром сердцевины 400 мкм, выходящего из него луча накачки на длине волны 940 нм, двояковыпуклой линзы с фокусным расстоянием 27 мм и диаметром 18 мм,

параболического зеркала (задаваемого уравнением $y = x^2/200$ и диаметром 120 мм) и активной среды. Ниже на рис. 10 б) показан профиль пятна накачки, засвечивающий поверхность диска (активной среды), и его размеры.

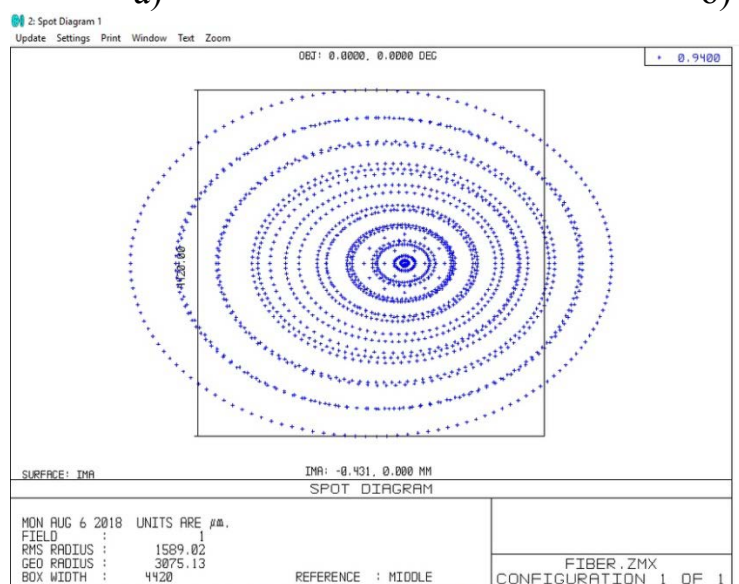
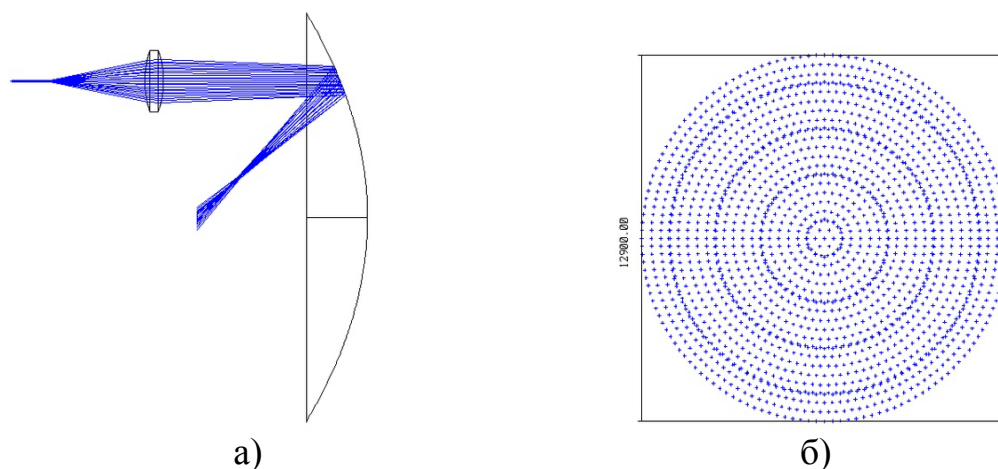


Рисунок 11 – а) Моделирование оптической системы; б) размер пятна после прохождения через линзу; в) размер пятна на диске.

4.2 Расчет требуемой мощности накачки

Исходные данные для расчета энергетических характеристик дискового усилителя приведены в табл. 2. Легирование кристалла YAG ионами Yb^{3+} принято равным 10%, т.к. при малых концентрациях иттербия кристалл Yb:YAG почти не уступает в теплопроводности Nd:YAG (граф. 4).

График 4 – Зависимость теплопроводности Yb:YAG от концентрации Yb

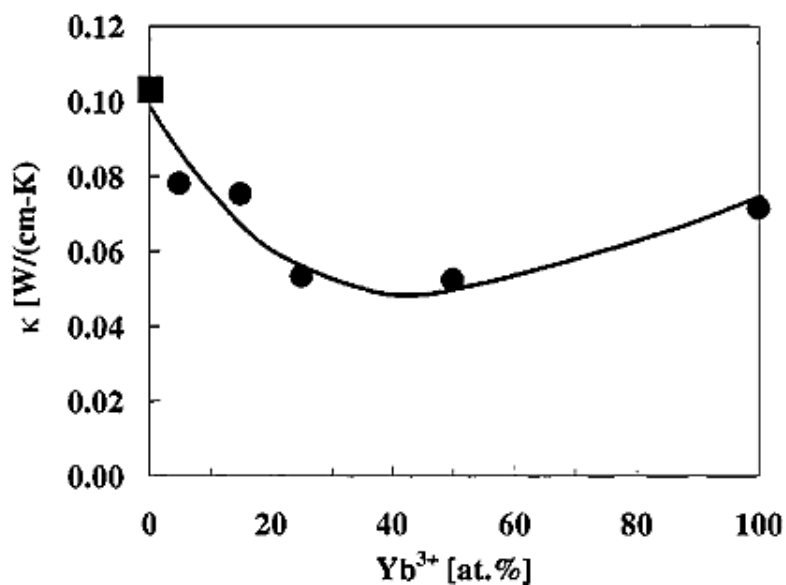


Таблица 2 - Исходные данные

Длина волны излучения, нм	$\lambda_{\text{и}} = 1030$
Длина волны накачки, нм	$\lambda_{\text{н}} = 940$
Время жизни верхнего уровня, мс	$\tau_{Yb} = 1.2$
Площадь пятна накачки, м²	$S_{\text{п}} = 2,135 \cdot 10^{-5}$
Толщина диска, мкм	$L = 350$
Концентрация ионов Yb при легировании 10%, м⁻³	$N(Yb) = 1.38 \cdot 10^{27}$
Показатель преломления [4]	(940 нм) $n = 1,8173$ (1030 нм) $n = 1,8153$
Мощность задающего генератора, Вт	$P_{\text{зг}} = 30$

Расчетные формулы

Энергия накачки:

$$E_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot \tau_{Yb}, \text{ Дж} \quad (1)$$

Энергия фотона:

$$E_{\text{фн}} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{н}}}, \text{ Дж} \quad (2)$$

Вероятность поглощения фотона:

$$W_{\text{п}} = \sigma_{\text{п}} \cdot F_{\text{п}} \quad (3)$$

Плотность потока фотонов:

$$F_{\Pi} = \frac{I_{\text{H}} \cdot \lambda_{\text{H}}}{h \cdot c} = \frac{P_{\text{H}} \cdot \lambda_{\text{H}}}{S \cdot h \cdot c} \quad (4)$$

Количество фотонов накачки:

$$n_{\text{H}} = \frac{E_{\text{H}} \cdot W_{\Pi} \cdot \tau_{Yb:YAG}}{E_{\text{фH}}} \quad (5)$$

Концентрация фотонов накачки:

$$N_{\text{H}} = \frac{n_{\text{H}}}{S \cdot l}, \text{ м}^{-3} \quad (6)$$

Коэффициент усиления:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= (N_2 - N_1) \cdot \sigma_{\text{изл}} = \\ &= (N_{\text{H}} - (N_{Yb} - N_{\text{H}})) \cdot \sigma_{\text{изл}} = (2 \cdot N_{\text{H}} - N_{Yb}) \cdot \sigma_{\text{изл}} \end{aligned} \quad (7)$$

Коэффициент усиления за m проходов:

$$K = e^{m \cdot \gamma_0 \cdot l} \quad (8)$$

Длина волны в среде:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}, \text{ м} \quad (9)$$

Сечение перехода:

$$\sigma_{\text{изл}} = \frac{\lambda^2}{8 \cdot \pi \cdot t_{sp}} \cdot g(v) \quad (10)$$

Форм-фактор:

$$g(v) = \frac{\frac{\Delta v}{2 \cdot \pi}}{(v - v_0)^2 + (\frac{\Delta v}{2})^2}, \text{ при } v \approx v_0 \quad (11)$$

Плотность мощности в волокне:

$$Q = \frac{P_{\text{H}}}{S_{\text{вол}}} \quad (12)$$

Выходная мощность:

$$P_{\text{вых}} = K \cdot P_{\text{зг}} \quad (13)$$

Где

P_{H} – мощность излучения накачки, Вт;

τ_{Yb} – время жизни верхнего уровня, с;

h – постоянная Планка, $6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

c – скорость света, $3 \cdot 10^8$ м/с;

λ_n – длина волны накачки, м;

σ_n – сечение поглощения, м^2 ;

I_n – интенсивность накачки, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

S – площадь поперечного сечения диска, м^2 ;

l – толщина диска, м;

N_{Yb} – концентрация ионов иттербия, м^{-3} ;

t_{sp} – спонтанное время жизни, с;

$\Delta\nu$ – ширина спектральной линии, Гц;

$S_{\text{вол}}$ – площадь поперечного сечения сердцевины волокна;

$P_{\text{зг}}$ – мощность излучения задающего генератора, Вт.

4.3 Результаты расчета

Исходя из известных оптических и физических свойств активного элемента, энергетических свойств накачки и задающего генератора, можно рассчитать параметры усилителя. В качестве задающего генератора выбран иттербиевый пикосекундный волоконный лазер с длиной волны 1030 нм, средней выходной мощностью 30 Вт, энергией в импульсе до 1 мДж и длительностью импульса от 0,15 до 5 нс [6]. Источником накачки принят непрерывный высокомоушный лазерный диодный модуль мощностью 350 Вт, с длиной волны 940 нм и шириной спектральной линии 8 нм [7]. Ниже приведены рассчитанные характеристики дискового усилителя при мощности накачки 2450 Вт, обеспечиваемой 5-ю диодными источниками.

Таблица 3 – Рассчитанные параметры для дискового усилителя

$E_H, \text{Дж}$	$E_{\text{фн}}, \text{Дж}$	$W_{\text{п}}, \text{с}^{-1}$	$F_{\text{п}}, \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	n_H
2,9	$2,1 \cdot 10^{-19}$	1	$5,4 \cdot 10^{26}$	$4,9 \cdot 10^{18}$
$N_H, \text{м}^{-3}$	γ_0	K	$Q, \text{Вт/м}^2$	$P_{\text{блх}}, \text{Вт}$
$1,1 \cdot 10^{27}$	2103,3	4,4	$1,9 \cdot 10^6$	130,8

График 5 – Зависимость коэффициента поглощения энергии активной среды от количества проходов

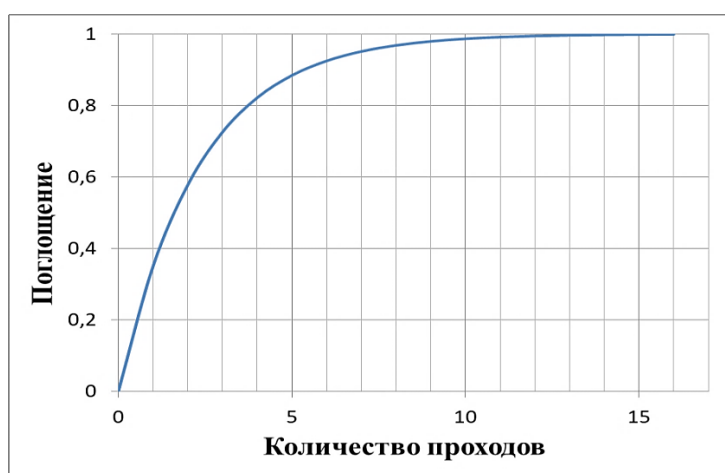


График 6 – Спектр сечения излучения кристалла Yb:YAG ($\Delta\nu$ – ширина спектральной линии)

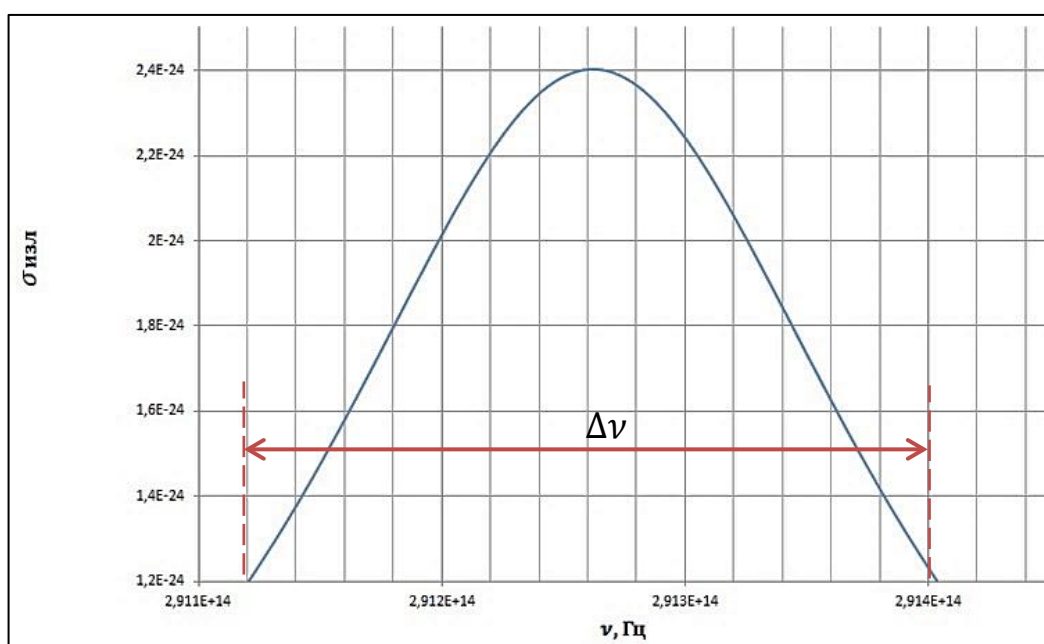


График 7 – Спектр коэффициента усиления за m проходов

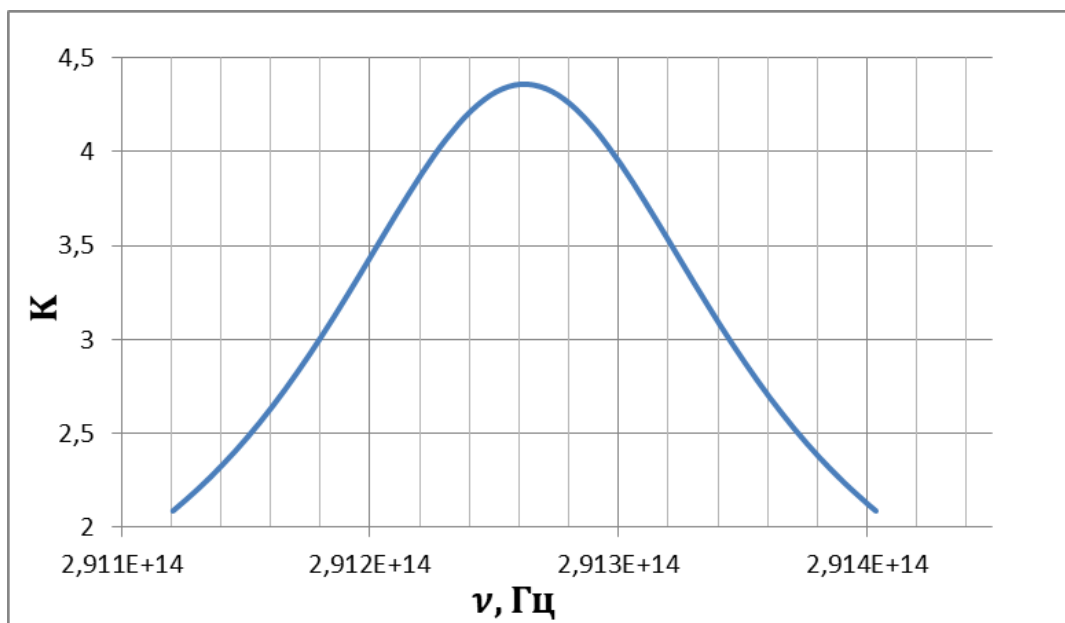
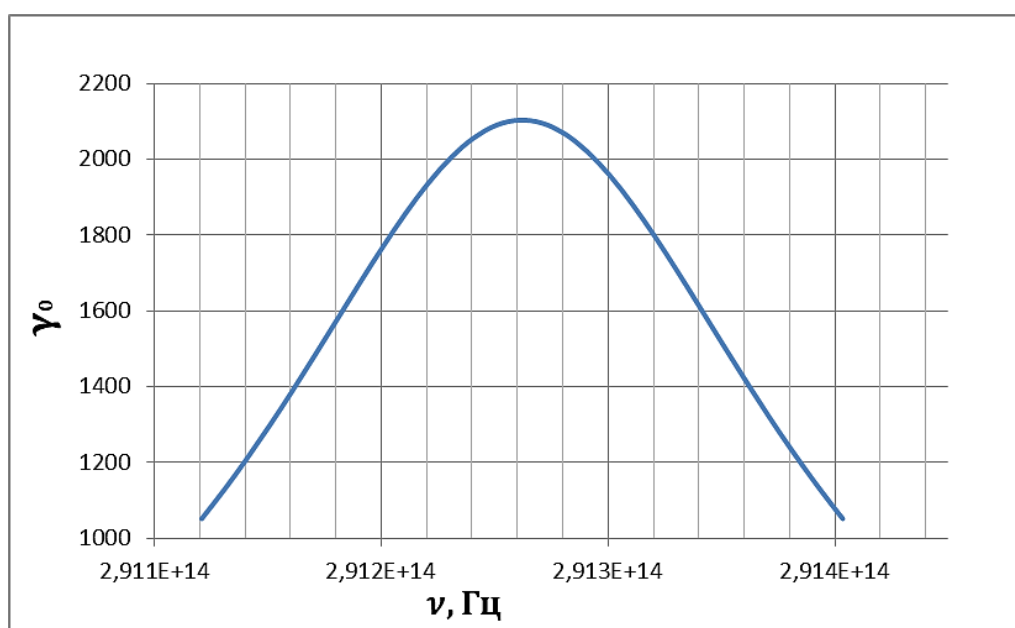


График 8 – Спектр коэффициента усиления



4.4 Моделирование квантрона дискового лазерного усилителя

Одним из основных элементов в схеме квантрона является усиливающая среда, эффективная работа которой зависит от конструкции радиатора, обеспечивающего отвод тепла с ее поверхности. Радиатор выполняет несколько функций: является элементом системы охлаждения и обеспечивает крепление диска Yb:YAG и алмазной пластинки. Внешний вид медного радиатора показан на рис. 12.

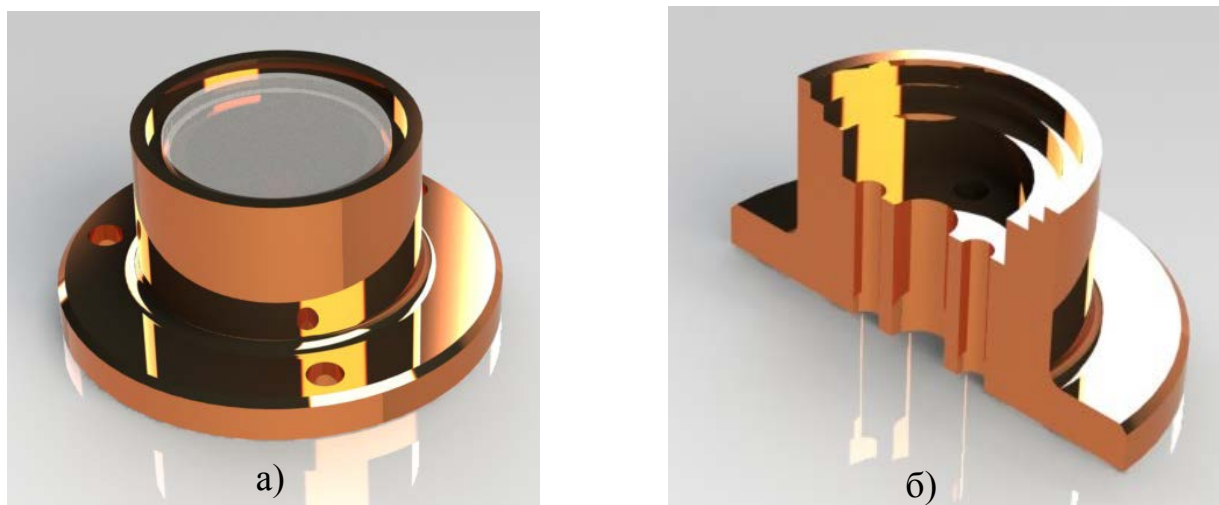


Рисунок 12 – а) Внешний вид радиатора с тонким диском и алмазной пластинкой; б) радиатор в разрезе

Отражательными элементами в данной схеме являются три призмы (рис. 13), плоское зеркало, расположенные на нижнем основании квантрона, а также параболическое зеркало (рис. 14), закрепленное в верхней части корпуса. Все элементы имеют диэлектрическое покрытие. Для юстировки отражательной призмы и плоского зеркала были разработаны крепления, позволяющие регулировать положение элемента при помощи отклонения крепления относительно двух осей. Регулировка по одной оси осуществляется двумя юстировочными винтами: сначала выставляется требуемое положение толкательным винтом, а затем закрепляется прижимающим. Надежность такой юстировки обеспечивается

использованием клея-герметика Loctite для фиксации положения винтов и предотвращения их раскручивания.

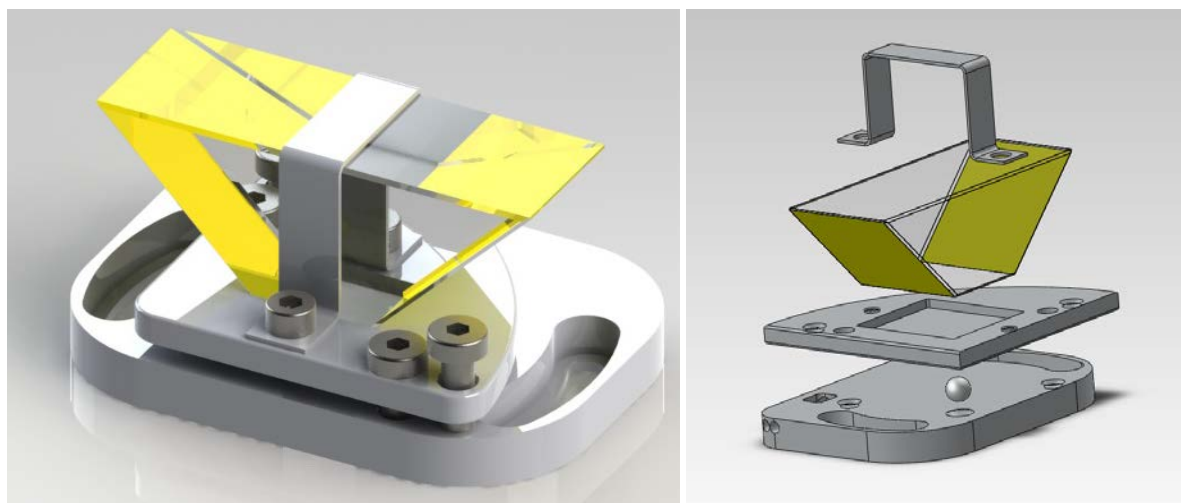


Рисунок 13 – Юстировочное крепление отражательной призмы

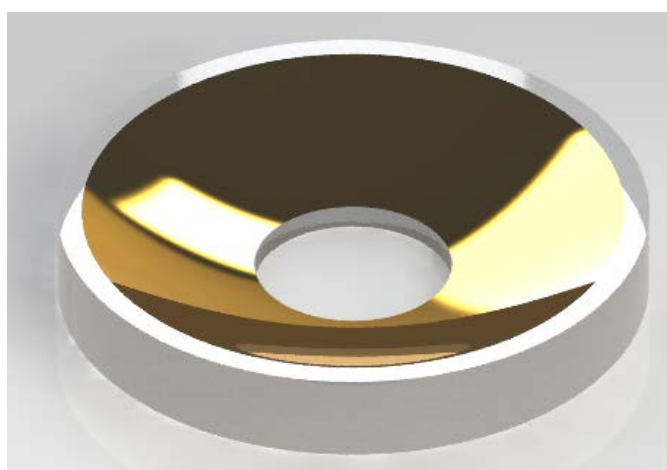


Рисунок 14 – Параболическое зеркало

На рис. 15 представлена сборка оптического модуля квантрона, обеспечивающего многопроходную схему усиления лазерного излучения (цвет излучения задающего генератора показан условно).

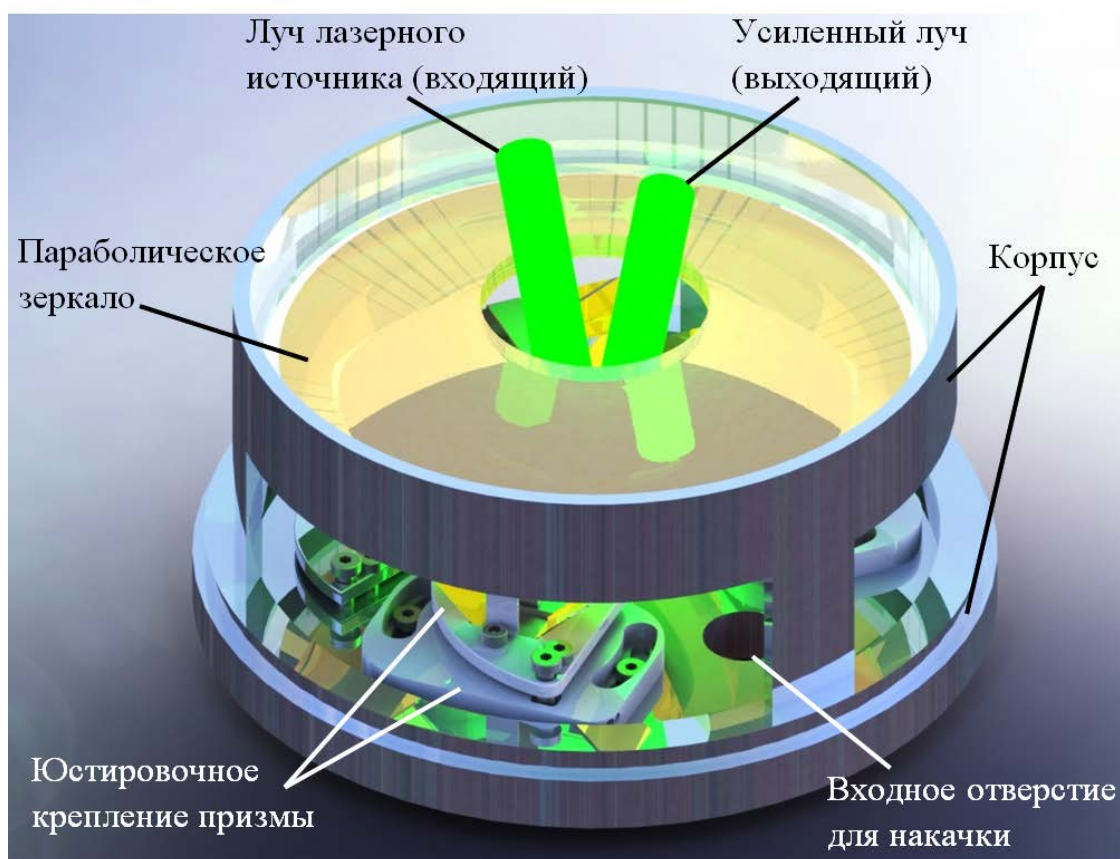


Рисунок 15 – Сборка оптического модуля квантрона без крышки

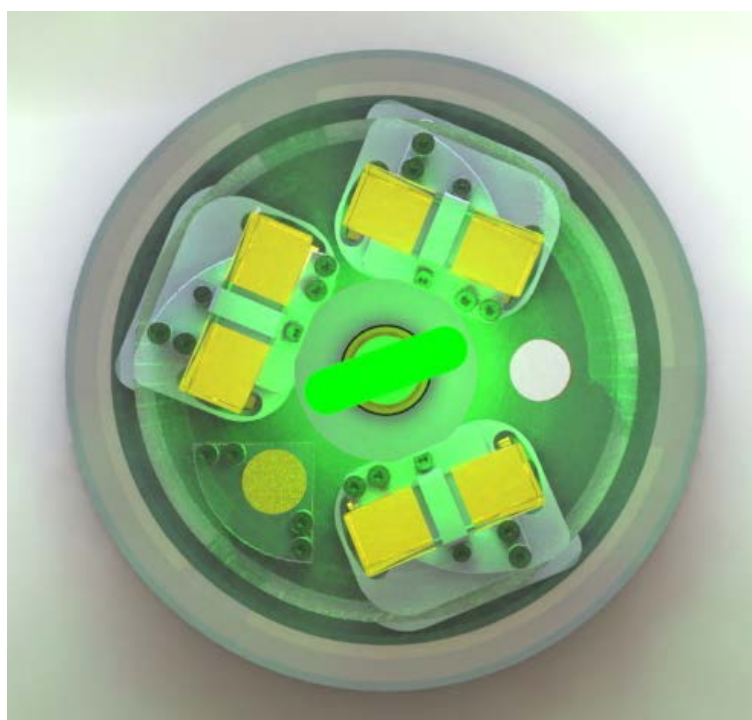


Рисунок 16 – Оптический модуль: вид сверху

Заключение

В работе были рассмотрены важные характеристики кристалла Yb:YAG, исследованы и смоделированы в программном пакете SolidWorks Simulation тепловые эффекты в кристалле при воздействии мощного излучения накачки. Разработана и смоделирована в программном пакете Zemax оптическая схема квантрона дискового усилителя. Данная схема предусматривает ввод излучения задающего генератора, ввод излучения накачки и его усиление посредством многократного прохождения луча через активную среду. Также были оценены коэффициент усиления дискового лазера, выходная мощность и спектральные характеристики генерируемого излучения.

Для обеспечения юстировки оптических элементов системы были спроектированы крепления, позволяющие регулировать и фиксировать их положение по двум углам.

Список источников

1. Jochen Speiser. Thin Disk Lasers – History and Prospects. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://doi.org/10.1117/12.2231529>, свободный.
2. J. Koerner, Measurement of temperature-dependent absorption and emission spectra of Yb:YAG, Yb:LuAG, and Yb:CaF₂ between 20 °C and 200 °C and predictions on their influence on laser performance. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.29.002493>, свободный.
3. Zerodur® Broadband Dielectric Mirrors/ reflectance plots. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9640#, свободный.
4. Optical constants of Y₃Al₅O₁₂ (Yttrium aluminium garnet, YAG) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Y3Al5O12&page=Zelmo>, свободный.
5. IPG PHOTONICS/ Nanosecond Fiber Lasers. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.ipgphotonics.com/en/84/FileAttachment/YLPP-1-150x5000-30+Datasheet.pdf>, свободный.
6. Азимут фотоникс - оптоэлектронные компоненты [Электронный ресурс]: Мощные лазерные диоды в диапазоне 900-2000 нм, 2017-2018 - Режим доступа: <http://azimp.ru/catalogue/Powerful-laser-modules-with-optical-output1/60/>, свободный.
7. Karsten Schuhmann, Theodor Haensch, Andreas Knecht, Randolph Pohl. Thin-disk laser pump schemes for large number of passes and moderate pump source quality/Applied Optics, 2015. - Режим доступа: <https://doi.org/10.1364/AO.54.009400>, свободный.
8. Jonathan Fischer. Ultrafast Yb:YAG thin-disk amplifier with multi-millijoule pulse energy for high-power frequency conversion, 2016, doi: 10.1117/12.2003494.
9. И.И. Кузнецов. Лазеры с высокой средней мощностью на основе Yb:YAG элементов перспективных геометрий. [Электронный ресурс], 2016 - Режим доступа: <http://www.iapras.ru/training/img/2016/Kuznetsov.pdf>, свободный.

10. T. Metzger, A. Schwarz, C. Teisset, D. Sutter, A. High-repetition-rate picosecond pump laser based on a Yb:YAG disk amplifier for optical parametric amplification. [Электронный ресурс], 2016 - Режим доступа: <https://doi.org/10.1364/OL.34.002123>, свободный.
11. A. Giesen, J. Speiser. Fifteen years of work on thin-disk lasers: Results and scaling laws/ IEEE J. Quantum Electron. (ST) 13, 598–609 2007, DOI: 10.1109/JSTQE.2007.897180
12. D. Albach, J.-C. Chanteloup, G. L. Touz'e. Influence of ASE on the gain distribution in large size, high gain Yb³⁺:YAG slabs/ Opt. Express 17, 3792–3801, 2009, DOI: 10.1364/OE.17.003792
13. A. Curtis, B. Reagan, K. Wernsing, F. Furch. Demonstration of a compact 100Hz, 0.1J, diode-pumped picosecond laser/ Opt. Lett. 36, 2164–2166, 2011, DOI: 10.1364/OL.36.002164.