

УДК 535.343:548.517

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОГО НАГРЕВА АКТИВНОГО ДИСКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАТОРА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА

А. Д. Ляшедько, В. Ф. Серегин, В. Б. Цветков, И. А. Щербаков

Проведены исследования генерационных характеристик неодимового лазера с дисковым активным элементом при диодной накачке активной среды. Показано, что генерация происходит при длине резонатора, значительно превышающей величину фокусного расстояния термолинзы, наведенной в активном элементе. Экспериментально определены радиусы изгиба поверхности активного диска в зависимости от величины поглощенной мощности накачки. Расчет резонатора, проведенный с учетом искривления поверхности активного диска, показал, что отрицательная линза, формируемая подобным изгибом поверхности и нанесенного на нее лазерного зеркала, эффективно компенсирует положительную термолинзу, расширяя, таким образом, область стабильности резонатора дискового лазера.

Ключевые слова: неодимовый лазер, изгиб активного элемента, область устойчивости резонатора.

В настоящее время в твердотельных лазерах высокой средней мощности используются различные формы активных элементов. Одним из основных критериев при выборе конкретной формы является максимальное снижение влияния термооптических искажений на качество излучения лазера. В качестве одной из наиболее перспективных форм было предложено использовать дисковые активные элементы [1]. Несмотря на достаточно долгую историю, продолжается активное исследование лазеров на тонких кристаллических дисках, в том числе изготовленных из кристаллов, легированных ионами неодима [2]. Их конструкция в существенной мере определяется проблемами,

Учреждение Российской академии наук Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: lyashedko@mail.ru.

связанными с нагреванием активной среды при накачке. Основная идея твердотельных дисковых лазеров состоит в использовании в качестве активного элемента (АЭ) тонкого диска, который охлаждается через одну из поверхностей. На этой поверхности располагается лазерное зеркало с высоким коэффициентом отражения как в области накачки, так и в области генерации. Такая система охлаждения минимизирует поперечные температурные градиенты и позволяет добиться практически равномерного распределения температуры в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения лазерного пучка. Температурные эффекты, такие как термолинза, уменьшаются на порядок по сравнению с цилиндрическими активными элементами. Это основное преимущество дисковых лазеров, которое позволяет добиться высокого качества пучка. Однако при накачке дискового активного элемента происходит его неоднородный нагрев, что может влиять на генерационные характеристики лазера [3].

В нашем эксперименте были использованы лазерные кристаллы Nd:YVO_4 и Nd:GdVO_4 в виде пластин с размерами $1 \times 10 \times 10$ мм³. Концентрация ионов неодима составляла 1 ат.%. Оптическая ось кристалла была параллельна плоскости пластины. В качестве накачки использовалось неполяризованное излучение диодной сборки с волоконным выходом JOLD-22-CPXF-1L фирмы Jena Laserdiode ($\lambda = 0.808 \mu\text{m}$). Активный диск накачивался перпендикулярно оптической оси кристалла. Внутри кристалла излучение распространялось под небольшим углом (8°) к оптической оси резонатора, которая совпадала с нормалью, проведенной к поверхности пластины. Диаметр пятна накачки составлял от 1.2 до 3.6 мм. На переднюю поверхность активных элементов было нанесено просветляющее покрытие с пропусканием $T \geq 99\%$ в спектральном диапазоне 800–1100 нм. На заднюю поверхность активного элемента были нанесены отражающие покрытия с коэффициентом отражения $R > 99.5\%$ в спектральном диапазоне 800–1100 нм. В отличие от традиционных методов создания теплового контакта активного диска и теплоотвода (припаивание диска) мы использовали механический прижим с регулируемым усилием, т.е. при нагреве диск мог свободно изменять свою геометрию.

Рабочая температура лазерного диода подбиралась с учетом достижения максимума величины поглощения излучения диодной накачки в активных элементах. Величина пропускания кристалла Nd:YVO_4 на двойной проход излучения составляла $T = 0.12$. Величина пропускания АЭ Nd:GdVO_4 на двойной проход составляла $T = 0.15$.

При проведении исследований длина резонатора составляла 7, 20, 40, 60, 80 и 100 см. С увеличением длины резонатора во всех случаях наблюдалось уменьшение выходной мощности генерации при прочих равных условиях. Особенно это было заметно

при большом диаметре пятна накачки в АЭ, равном $\varnothing 3.6$ мм. В этом случае максимальная длина резонатора лазера, при которой наблюдалась генерация, составляла 20 см. При диаметре пучка накачки в АЭ, равном $\varnothing 1.2$ мм, максимальная длина резонатора, при которой была получена генерация, составляла 80 см. Значения мощности лазерной генерации в зависимости от типа активного элемента, длины резонатора и диаметра пучка накачки приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Значения мощности генерации лазера P_w при различных типах активного элемента, длине резонатора и диаметре пучка накачки. Мощность излучения накачки составляла 15 Вт

Мощность генерации, мВт	Длина резонатора, см					
	7	20	40	60	80	100
Nd:GdVO ₄ \varnothing_p 3.6 мм	300	60	0			
Nd:GdVO ₄ \varnothing_p 1.2 мм	710	550	450	280	110	0
Nd:YVO ₄ \varnothing_p 3.6 мм	220	60	0			
Nd:YVO ₄ \varnothing_p 1.2 мм	600	360	240	110	40	0

Значение фокусного расстояния термолинзы было получено из измерения изменения оптической разности хода и составило около 20 см при мощности излучения накачки 15 Вт [4]. При таком значении фокусного расстояния термолинзы генерация в плоском резонаторе должна пропадать при длине резонатора, большей 20 см. Возможность работы лазера при длинах резонатора до 80 см можно объяснить выгибанием лазерного зеркала, нанесенного на охлаждаемую поверхность активного диска. За счёт поперечного пучку градиента температуры в активном диске образуется положительная термолинза, т.к. в кристаллах ванадатов $dn/dT > 0$ [5]. Однако нагрев передней и охлаждение задней стенки диска приводит к тому, что зеркало, нанесённое на заднюю стенку, становится выпуклым сферическим и компенсирует положительную термолинзу.

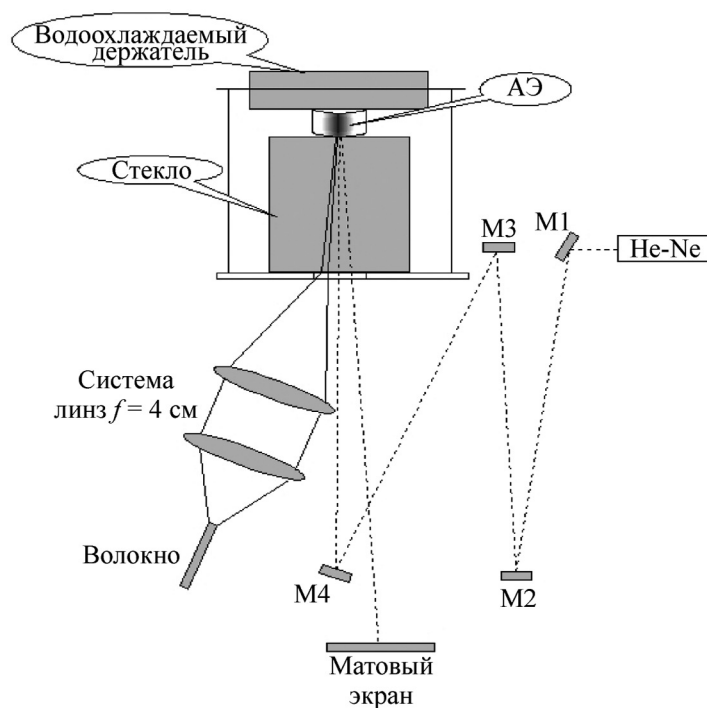


Рис. 1: Оптическая схема экспериментальной установки.

Для подтверждения этого предположения были проведены измерения радиуса кривизны поверхности диска при различных мощностях излучения накачки. Расчет кривизны производился в предположении сферичности формы нагретого активного элемента.

Измерение кривизны поверхности диска проводилось путем наблюдения колец Ньютона. В ходе проведения этой работы исследовался Nd:YVO₄ активный элемент с характеристиками, описанными выше. Для этого к поверхности диска прижималось полированное стекло ПМ-30 при помощи алюминиевой планки с отверстием.

Для осуществления водяного охлаждения лазерного диода и активного элемента использовался охладитель HAAKE TC 300 (Thermo NESLAB). На выходе из охладителя температура воды составляла 25°C. Для измерения мощности излучения лазерной диодной накачки использовался измеритель марки "SOLO PE" производства компании Gentec-EO.

Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 1. Излучение накачки после выхода из волокна и прохождения системы собирающих линз проходило через пробное стекло и падало на активный элемент. Диаметр пучка накачки на поверхности диска составлял 1.2 мм. Угол отклонения α оси пучка накачки от нормали к поверхности активного элемента составлял 14° вне стекла, 10° внутри стекла и 7.5° внутри диска.

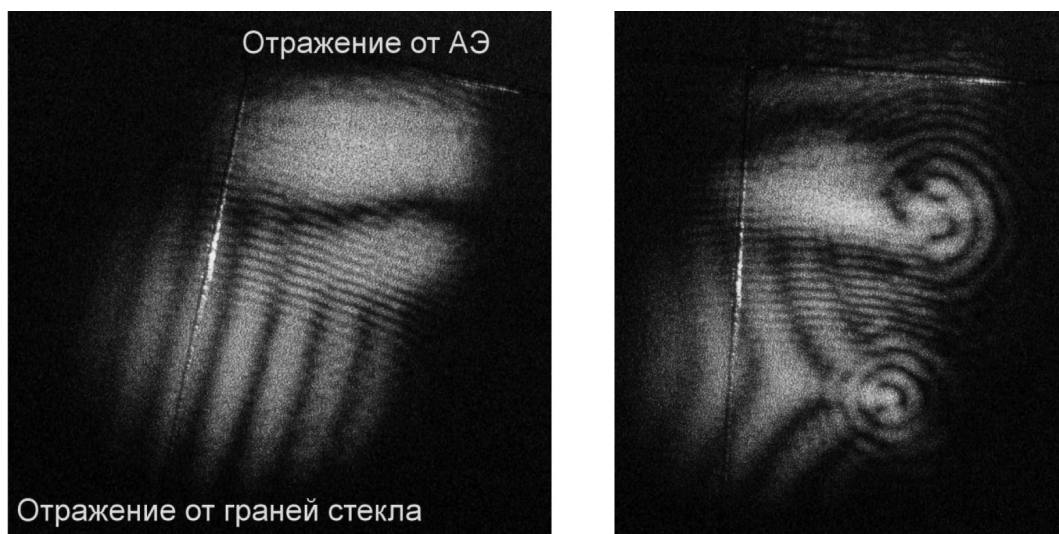


Рис. 2: Фотографии интерференционной картины при отсутствии накачки (слева) и при накачке мощностью 8.5 Вт (справа).

Мощность излучения накачки, поглощенная в кристалле Nd:YVO_4 , составляла 4, 5.8, 7.6, 9.2 Вт.

Для наблюдения интерференционной картины использовался пробный пучок He-Ne лазера с длиной волны $\lambda = 543.5$ нм и с расходимостью менее 10^{-4} рад. Для того чтобы засветить всю поверхность диска, пучок расширялся с помощью системы зеркал М1-М4. Пробный пучок проходил через систему стекло/активный элемент и после отражения проектировался на экран (матовая пластинка), который располагался на расстоянии 4 м от АЭ. Полученная интерференционная картина фотографировалась.

При отсутствии излучения накачки на экране наблюдались два отражения: от граней стекла и от поверхностей активного элемента. Данные отражения сами по себе имеют полосатую структуру вследствие интерференции. В месте наложения отражений наблюдается интерференционная картина в виде горизонтальных полос. При включении излучения накачки происходил нагрев диска и на экране возникала интерференционная картина в виде колец.

При традиционном подходе к исследованию колец Ньютона пробный пучок направляется на исследуемый объект нормально к поверхности. В нашем случае необходимо было отделить интерференционную картину, наблюдаемую в самом активном диске из-за его нагрева, от собственно колец Ньютона, наблюдаемых вследствие изменения кривизны поверхности активного диска.

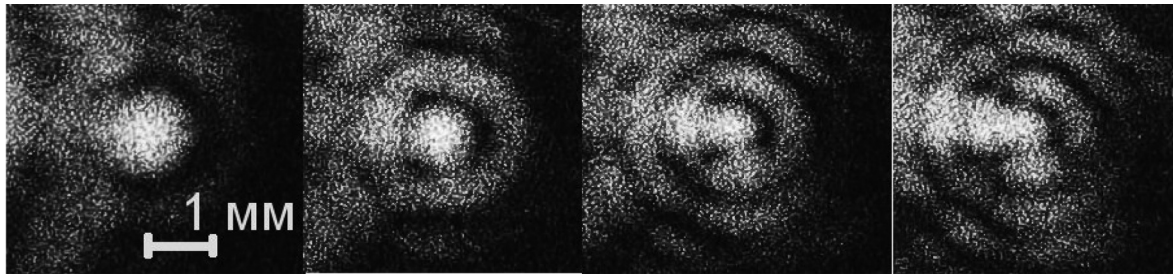


Рис. 3: Фотографии колец Ньютона при поглощенной мощности излучения накачки 4, 5.8, 7.6, 9.2 Вт (слева направо).

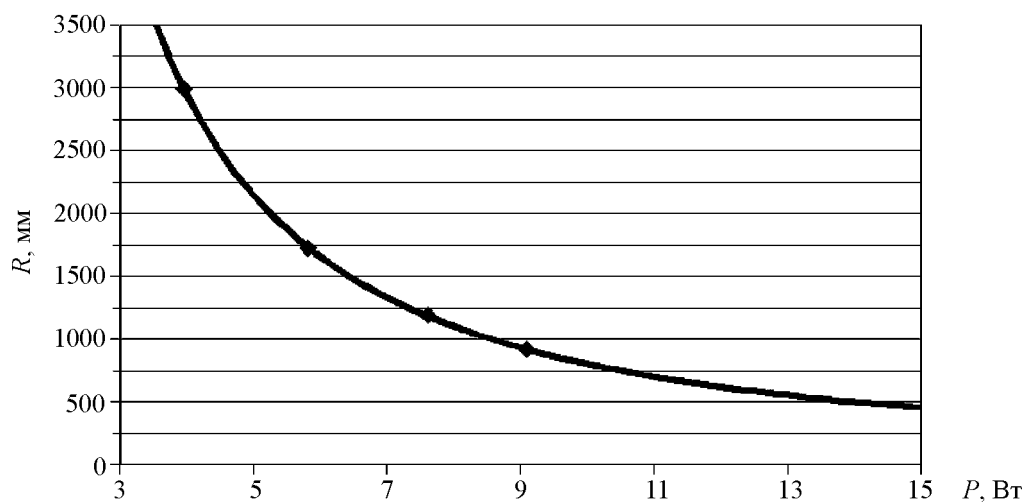


Рис. 4: Зависимость радиуса кривизны поверхности активного диска от поглощенной мощности излучения накачки. Кривая – аппроксимация по формуле $R = 20880P^{-1.413}$ мм.

Верхняя система колец возникает в месте отражения от диска и соответствует нагреву активного элемента. Нижняя система колец возникает на отражении от плоскостей стекла и представляет собой искомую картину колец Ньютона, картину интерференции между пучками, отраженными от плоскости стекла и от выгибающейся поверхности диска. В отсутствие стекла наблюдается только верхняя система колец, которая показывает нагрев активной среды (рис. 2).

В процессе измерений была также проверена возможность получения интерференционной картины из-за нагрева пробного стекла вследствие теплопередачи от нагревающего стекло активного элемента. Для этого активный элемент заменялся на тестовый нагреватель с тепловой мощностью до 100 Вт. Было выяснено, что интерференция в

пробном стекле в этом случае также может наблюдаться, и имеет такую же характерную структуру в виде колец. Однако для возникновения этой картины требуется значительно большее время (десятки секунд), в отличие от менее чем одной секунды для колец Ньютона, и тепловая мощность порядка 70-100 Вт, что значительно превышает мощность тепловыделения в активной среде.

Определение радиуса кривизны поверхности диска проводилось путем измерения радиуса колец при различной мощности излучения накачки (рис. 3). Расчет производился по формуле $R = \frac{r^2}{\lambda}$, где r – радиус первого интерференционного кольца, $\lambda = 0.543$ мкм – длина волны пробного пучка. Предполагалось, что поверхность образца при включении накачки становится сферической и радиусы кривизны передней и задней плоскости диска одинаковы и равны R .

Результаты измерений представлены на рис. 4.

Аппроксимировав экспериментальные точки степенной зависимостью, мы получили зависимость $R = 20880P^{-1.413}$. Значение радиуса кривизны для поглощенной мощности излучения накачки около 15 Вт равно $R \approx 500$ мм.

Далее методами матричной оптики были рассчитаны два типа резонаторов: плоский резонатор с термолинзой и плоскосферический резонатор с термолинзой. Значение фокуса термолинзы было взято из результатов работы [3] и составило 20 см при мощности излучения накачки 15 Вт. Радиус кривизны выпуклого сферического зеркала при этом принимался $R = 50$ см (как следует из эксперимента по изучению изгиба активного диска).

В обоих случаях при увеличении длины резонатора он выходит из области устойчивости. В случае плоских зеркал это происходит на расстоянии между зеркалами 20 см, равному фокусу термолинзы. В случае, когда одно из зеркал является выпуклым сферическим с радиусом кривизны 50 см, резонатор становится неустойчивым лишь при длине около 100 см.

Таким образом, проведенные расчеты показали, что резонатор с плоским выходным зеркалом и сферическим зеркалом на поверхности диска является устойчивым вплоть до длины резонатора 100 см. Значение фокуса термолинзы $f = 20$ см. Исследование показало, что положительную термолинзу компенсирует изгиб пластины, вызванный ее неоднородным нагревом и односторонним охлаждением активного диска. Таким образом, изгибается и лазерное зеркало, нанесенное на охлаждаемую поверхность диска, формируя дополнительную отрицательную линзу в лазерном резонаторе.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, et al., Appl. Phys. B **58**(5), 365 (1994).
- [2] N. Pavel, K. Luenstedt, K. Petermann, and G. Huber, Proc. of SPIE, Eighth Conference on Optics, Valentin I. Vlad, Editors **6785**, 678504 (2007).
- [3] Г. А. Буфетова, Д. А. Николаев, В. Б. Цветков, И. А. Щербаков, Краткие сообщения по физике, **35**(4), 25 (2008).
- [4] S. V. Garnov, V. A. Mikhailov, R. V. Serov, et al., Quantum Electron **37**(10), 910 (2007).
- [5] Encyclopedia of Laser Physics and Technology – thermal lensing, http://www.rp-photonics.com/thermal_lensing.html

Поступила в редакцию 9 марта 2010 г.