

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМООПТИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В ПЛАСТИНЧАТОМ АКТИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ С ЗИГЗАГООБРАЗНЫМ ХОДОМ ПУЧКА

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

Проведены исследования фазовых искажений, вносимых в лазерный пучок, распространяющийся в пластинчатом активном элементе при диодной накачке активного элемента (АЭ) и при искусственно созданных температурных градиентах в АЭ. Измерено распределение температуры вдоль оптической оси активного элемента при его торцевой диодной накачке. Изучены фазовые искажения тестового пучка, распространяющегося через неоднородно нагретый активный элемент. Получены интерференционные картины и измерены оптические искажения тестового пучка при различных температурных градиентах в кристалле.

Ключевые слова: неодимовый лазер, диодная накачка, термооптические искажения.

Средняя мощность генерации твердотельного лазера ограничена, главным образом, тепловыми эффектами. В ходе работы лазера происходит нагрев активной среды. Неоднородный нагрев активной среды приводит к оптическим искажениям лазерного пучка из-за того, что оптический путь для разных лучей в пучке является разным (термолинза) или вследствие изменения состояния поляризации излучения из-за термонаведенного двулучепреломления. Для достижения высокой средней мощности генерации и сохранения при этом высокого качества излучения было предложено использовать планарные активные элементы (АЭ), в частности, пластинчатые активные элементы с зигзагообразным ходом пучка [1]. Прямоугольная геометрия пластины позволяет снизить двулучепреломление, вызванное механическими напряжениями, а зигзагообразный ход пучка в пластине снижает действие тепловой линзы на лазерный пучок [2, 3]. К

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

преимуществам пластинчатых активных элементов относится также большая площадь теплоотвода, что позволяет эффективно охлаждать АЭ. Охлаждение в пластинчатом элементе производится через боковые поверхности – плоскости полного внутреннего отражения (ПВО). При равномерном тепловыделении в пластине возникает одномерный температурный градиент между данными плоскостями. Лазерный пучок распространяется зигзагообразно, отражаясь от плоскостей ПВО, и проходит через АЭ под углом к градиенту температуры. Вследствие того, что все лучи в пучке распространяются в одинаковых условиях, термооптические эффекты не оказывают на него существенного влияния.

Разработка мощных полупроводниковых лазеров открыла новый этап в развитии твердотельных лазерных систем [4]. Использование диодных лазеров в качестве источников накачки АЭ позволяет достичь более высокие плотности мощности накачки. Распределение температуры в активной среде при использовании диодной накачки может быть существенно неоднородным в различных направлениях и требуется дополнительное исследование влияния термооптических эффектов на лазерный пучок. В работе произведено измерение температуры вдоль оптической оси АЭ при диодной накачке кристалла. В модельных экспериментах изучены фазовые искажения тестового пучка в неоднородно нагретом пластинчатом элементе.

В ходе работы исследовался композитный пластинчатый активный элемент, изготовленный из трех частей методом термодиффузационной сварки: центральная часть – кристалл Nd:YAG с концентрацией ионов неодима около 0.6 ат.% и нелегированный YAG на концах (АЭ изготовлен на предприятии ООО “Элементы лазерных систем”). Геометрические размеры активного элемента составляли $62 \times 6 \times 2$ мм³, размеры легированной части $40 \times 6 \times 2$ мм³. Торцы активного элемента были скончены под 45° , для использования торцевой накачки. На торцевые поверхности нанесено просветляющее покрытие на длину волны 1.064 мкм. На плоскости ПВО был нанесен полимер СИ-ЭЛ ($n = 1.46$), для того чтобы уменьшить потери при полном внутреннем отражении лазерного пучка, возникающие при контакте с охладителями. На рис. 1 представлено схематическое изображение АЭ.

Для изучения градиента температуры, возникающего вдоль оптической оси при диодной накачке АЭ, было произведено измерение распределения температуры интерференционным методом. Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 2. Пробный пучок Не-Не-лазера с длиной волны 543 нм, предварительно расширенный телескопом, направлялся на боковую поверхность активного элемента. Пробный пучок был пря-

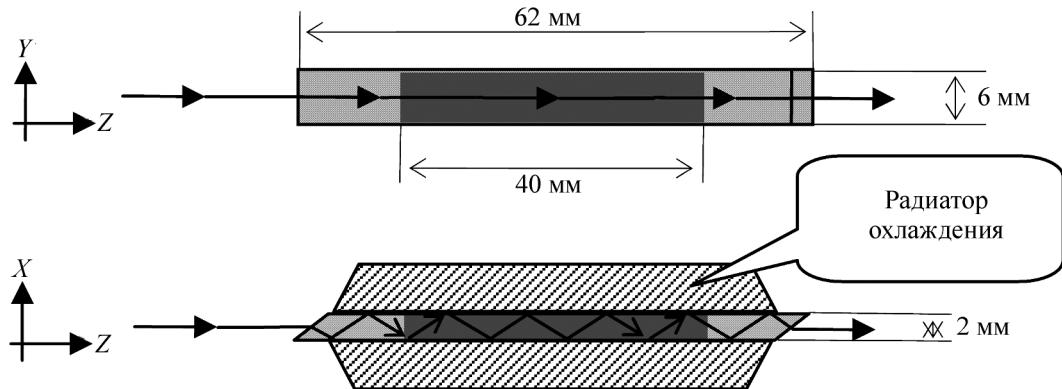


Рис. 1: Схематичное изображение активного элемента.

угольным в поперечном сечении, с расходимостью около 5 градусов и геометрическими размерами 5×100 мм на поверхности активного элемента. Для получения такой геометрии использовались две цилиндрические линзы с фокусными расстояниями 25 мм и 100 мм. Пробный пучок падал на боковую грань активного элемента под малым углом. Пучки, отраженные от верхней и нижней граней АЭ, складывались на верхней грани элемента и интерферировали между собой. С помощью линзы с фокусным расстоянием 80 см на экране было получено изображение верхней грани активного элемента. Картина на экране представляла собой изображение боковой поверхности АЭ. В ненагретом состоянии наблюдалась практически равномерная интерференционная картина (одна темная полоса вдоль АЭ).

В качестве накачки использовались лазерные диодные модули Jena JOLD-400 с волоконным выходом ($\varnothing 600$ мкм, $NA = 0.22$) с выходной мощностью 110 Вт. Длина волны излучения диодной накачки составляла 806 нм, что при данной концентрации активатора соответствует коэффициенту поглощения порядка 2 см^{-1} . Накачка осуществлялась с двух сторон симметричным образом, фокусировка осуществлялась линзой с фокусным расстоянием 17 мм. Для охлаждения АЭ использовался радиатор, охлаждаемый проточной водой. Для улучшения теплового контакта между радиатором и кристаллом использовалась термопроводящая паста КПТ-8.

При включении излучения накачки интерференционные полосы начинали двигаться от мест сварки нелегированных концов АЭ с легированной средней частью к центру активного элемента. Для измерения величины нагрева активного элемента подсчитывалось количество темных или светлых полос, прошедших через центр активного эле-

мента при охлаждении кристалла. При прохождении одной интерференционной полосы изменение оптического пути пробного пучка соответствует длине волны. Изменение температуры ΔT , соответствующее прохождению одной интерференционной полосы:

$$\Delta T = \frac{\lambda}{2L \frac{dn}{dT} + n\alpha_T 2L} \approx 2.1^\circ C.$$

Установившаяся интерференционная картина позволила получить температурное распределение вдоль активного элемента в стационарном состоянии. На рис. 3 приведены фотографии интерференционной картины на экране при суммарной мощности излучения накачки 200 Вт и в отсутствие излучения накачки.

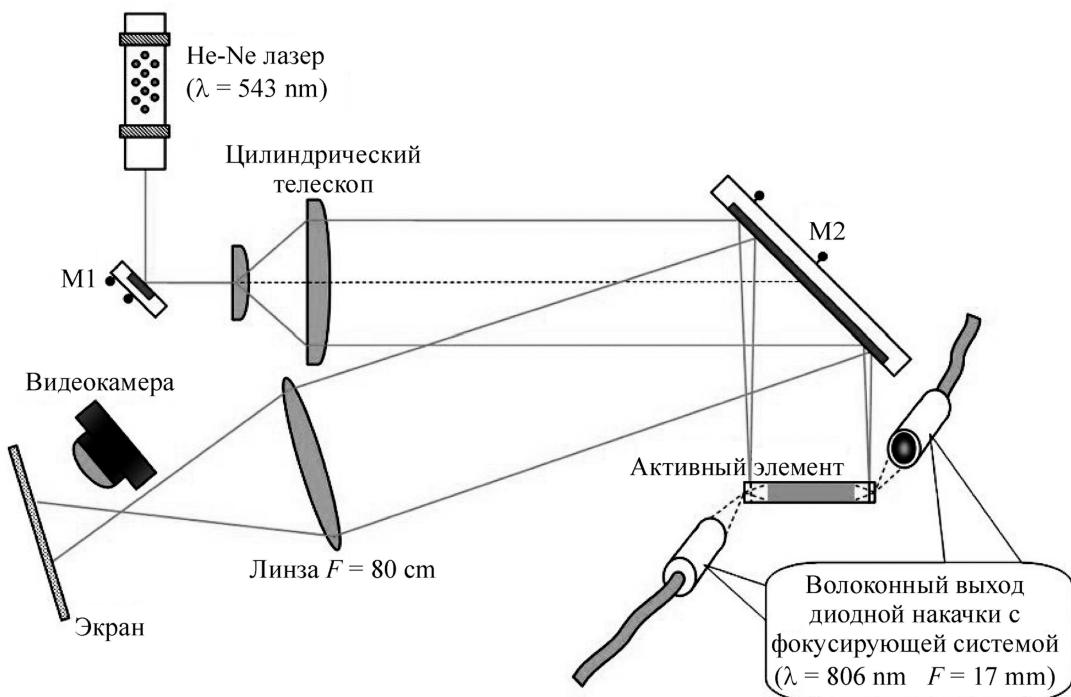


Рис. 2: Оптическая схема эксперимента по измерению распределения температуры вдоль оптической оси АЭ.

За время охлаждения активного элемента, при плавном уменьшении мощности накачки от 200 Вт до 0 Вт, пробежало три полосы, что соответствует изменению температуры на $6^\circ C$. На концах нелегированной части АЭ в центре картины количество пробежавших полос составило пять. Это соответствует нагреву середины активного элемента примерно на $10.5^\circ C$. По картине полос при 200 Вт накачки определялось распределение температуры по длине легированной части АЭ. Таким образом, при мощ-

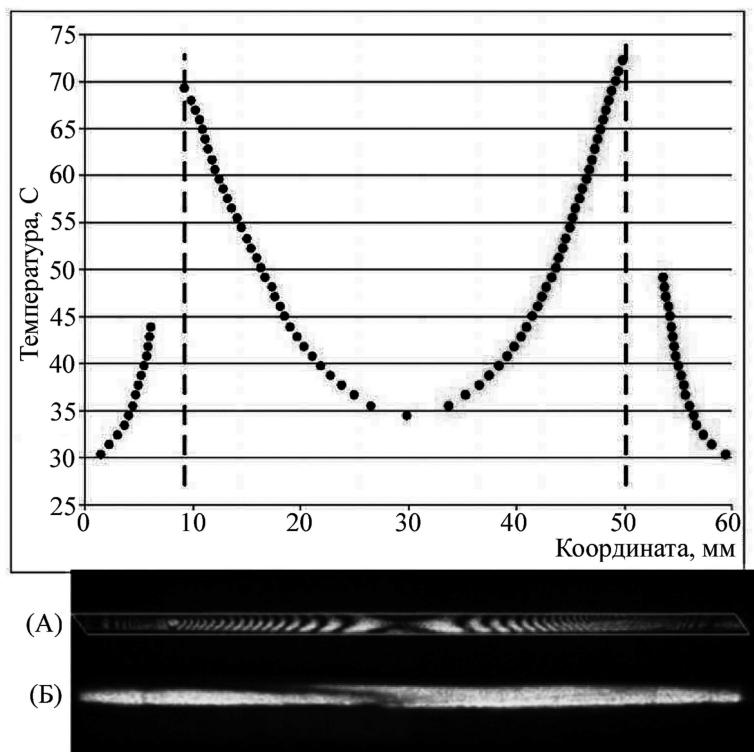


Рис. 3: График распределения температуры вдоль оптической оси АЭ (вверху при накачке 200 Вт). Фотографии интерференционных картин (внизу) при суммарной мощности накачки 200 Вт (А) и 0 Вт (Б).

ности накачки 200 Вт (тепловыделении около 70 Вт) максимальная температура АЭ составила около 70 °С на концах легированной части. Тепловыделение и распределение температуры вдоль активного элемента при использованной данной концентрации активатора (~ 0.6 ат.%) и длине волны накачки (806 нм) существенно неравномерно. Большой градиент температуры вблизи мест сварки легированной и нелегированной частей кристалла может привести к искривлению плоскостей ПВО, что в свою очередь приводит к искажениям лазерного пучка.

Был произведен расчет тепловыделения и профилей температуры в композитном активном элементе с характеристиками, описанными выше. В расчетах использовались экспериментальные данные о форме профиля мощности в пучке накачки, а также спектрального профиля излучения лазерных диодов накачки. В расчетах принято, что пятно накачки имеет диаметр 1.2 мм при входе в неактивированную область, с числовой апертурой 0.11. Использовалась накачка с различными длинами волн в диапазоне 802–807 нм, с величиной эффективного коэффициента поглощения в активной среде в

диапазоне $\alpha = 0.8 - 2 \text{ см}^{-1}$. В расчетах предполагалось, что на охлаждаемых границах выполняются условия 3 рода. Зазоры между поверхностями пластины и холодильником заполнялись термопроводящей пастой. Коэффициент теплопроводности Nd:YAG равен $0.12 \text{ Вт}/\text{см}\cdot\text{град}$ и коэффициент теплопередачи на границе с охлаждающим блоком был принят равным $0.5 \text{ Вт}/\text{см}^2\cdot\text{град}$ (в соответствии со скоростью протекания воды и диаметром каналов в охлаждающем блоке). Для расчета распределения температуры мы численно решали трехмерное уравнение теплопроводности. Используемая нами расчетная программа основана на методе конечных элементов с аддитивным построением сетки и контролем ошибок при работе с алгоритмом обобщенной минимальной невязки.

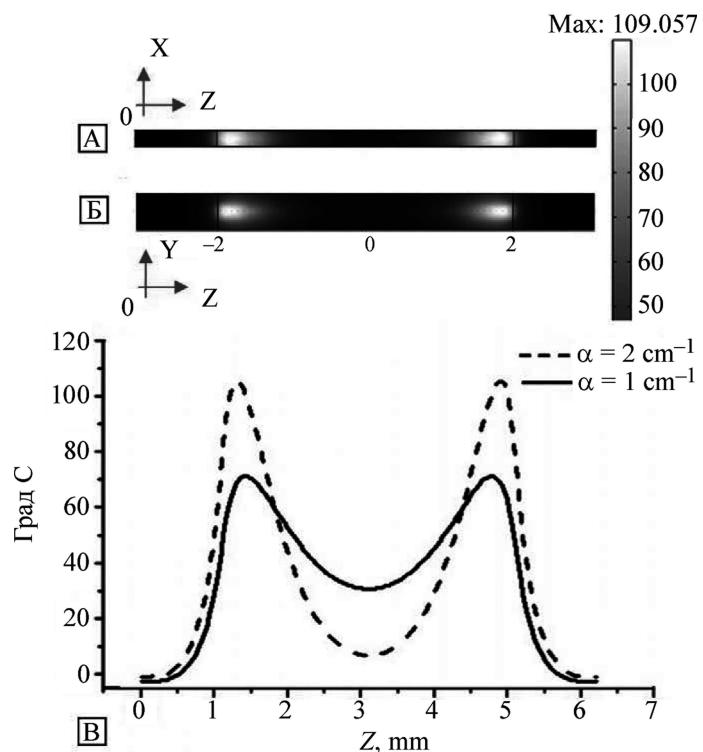


Рис. 4: Распределение температуры в плоскости XOZ (A) и на боковой поверхности пластины в плоскости YOZ (Б), $\alpha = 2 \text{ см}^{-1}$. Графики распределения температуры вдоль оптической оси OZ для двух эффективных коэффициентов поглощения $\alpha = 2 \text{ см}^{-1}$, $\alpha = 1 \text{ см}^{-1}$ (Б).

На рис. 4 показано распределение температуры вдоль оптической оси пластины в плоскости ПВО (А), и в перпендикулярной плоскости (Б), для случая коэффициента поглощения $\alpha = 2 \text{ см}^{-1}$, а также приведены графики для распределения температуры вдоль оптической оси пластины для двух значений коэффициента поглощения α

(В). Максимальное значение температуры показано наиболее светлым тоном. Шкала оттенков серого (справа от графика) калибрована в градусах Цельсия. В сечении, параллельном плоскостям ПВО, мы видим, что профиль температуры неоднороден вдоль оси Y , в центре температура выше чем на краях. Это является следствием неоднородного распределения мощности в сечении пучка накачки. Данный градиент температуры приводит к фокусировке излучения в Y -направлении (параллельном плоскостям полного внутреннего отражения – ПВО). Для исключения действия этой линзы необходимо обеспечивать “столообразный” профиль интенсивности в сечении пучка накачки. Вдоль оптической оси неоднородное распределение температуры связано с большим эффективным коэффициентом поглощения. Это приводит к тому, что большая часть излучения поглощается вблизи границы легированной области, а центр АЭ остается непрекачанным. Градиент температур приводит к неоднородному расширению плоскостей ПВО, что может привести к их искривлению и соответственно к искажению пучка, который многократно отражается от данных плоскостей. Уменьшение эффективного коэффициента поглощения в активной среде с 2 до 1 см^{-1} позволит более чем в два раза уменьшить продольный градиент температуры (см. рис. 4).

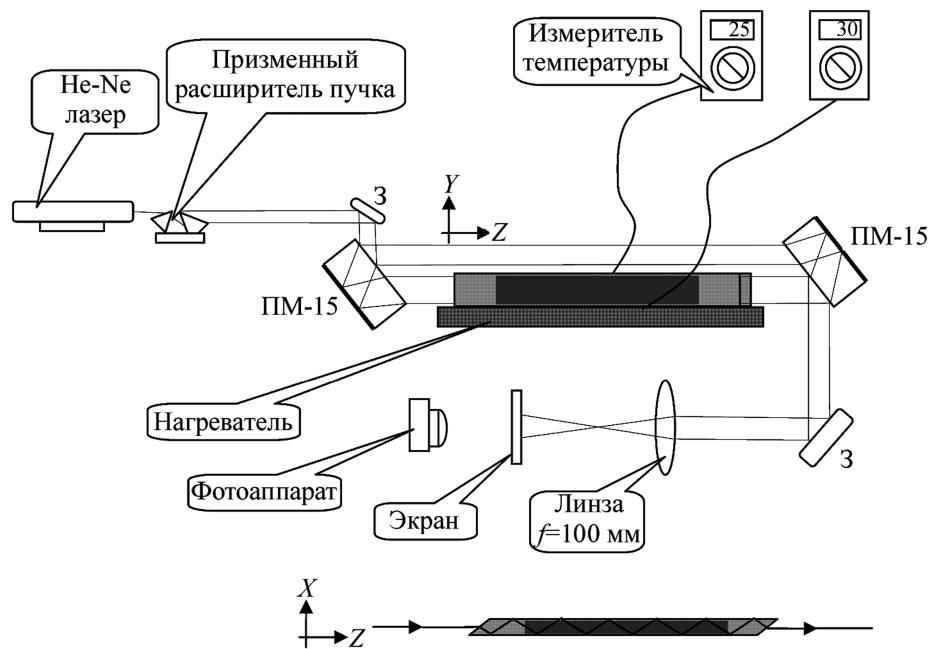


Рис. 5: Оптическая схема эксперимента по измерению фазовых искажений лазерного пучка.

Для изучения того, насколько сильно влияют температурные градиенты в сечении пластины на волновой фронт проходящего через него пучка, был произведен ряд модельных экспериментов. Активный элемент располагался на нагревателе, одна из граней нагревалась, и создавался одномерный градиент температур в активном элементе вдоль плоскостей ПВО или перпендикулярно плоскостям ПВО. Для измерения фазовых искажений использовался тестовый пучок Не-Не-лазера с длиной волны 632.8 нм. Фазовые искажения пучка измерялись интерференционным методом, оптическая схема эксперимента представлена на рис. 5. Тестовый пучок Не-Не-лазера предварительно расширенный призменным телескопом до размеров 2×6 мм, направлялся на делильную пластину. Пучки разделялись на толстой эталонной пластинке ПМ-15 и затем сводились на аналогичной пластине. Интерференционная картина возникала на поверхности эталонной пластины и проектировалась на экран с помощью линзы с фокусным расстоянием 100 мм. Интерференционные картины на экране фиксировались видеокамерой.

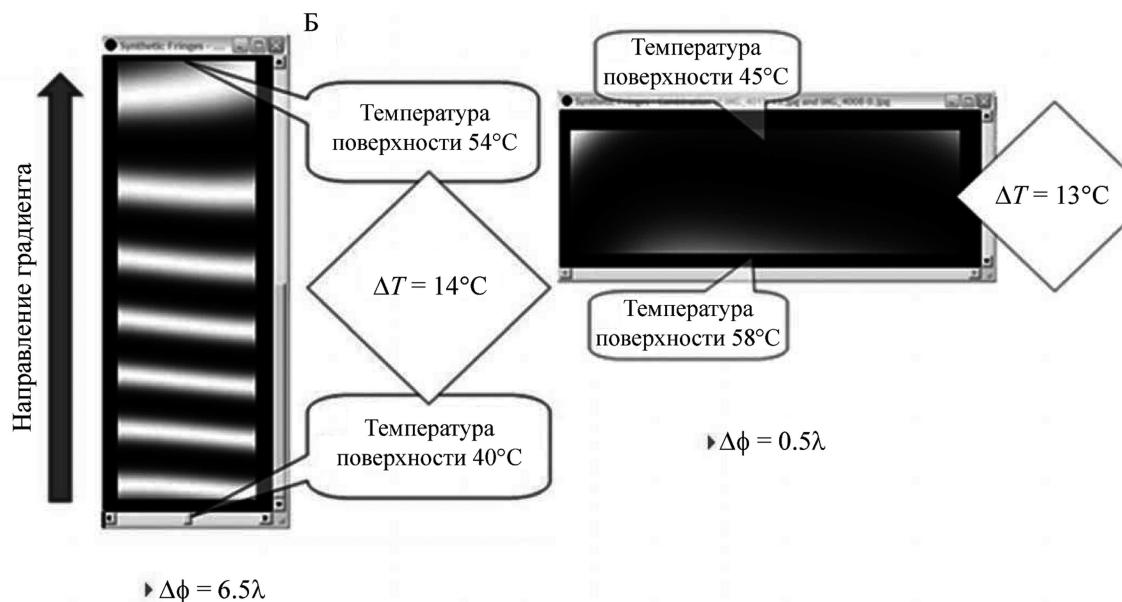


Рис. 6: Обработанные интерференционные картины фазовых искажений тестового пучка при наличии градиента температуры в активном элементе между боковыми плоскостями АЭ (слева) и плоскостями ПВО (справа).

В ходе эксперимента были получены картины фазовых искажений тестового пучка при градиенте температур в сечении АЭ: между плоскостями ПВО и между боковыми плоскостями. Полученные интерференционные картины были обработаны в программе

Quick Fringe. На рис. 6 представлены обработанные интерференционные картины. При наличии температурного градиента между плоскостями ПВО максимальная оптическая разность хода между лучами в пучке составила 0.5 длины волны ($\lambda = 632.8$ нм) при разнице температур 13 °С. Фазовые искажения пучка составили не более π . Действие неоднородного распределения температуры между плоскостями ПВО эффективно компенсируется зигзагообразным ходом пучка. При наличии градиента температур вдоль плоскостей ПВО максимальная оптическая разность хода между крайними лучами в пучке составила 6.5 длин волн ($\lambda = 632.8$ нм) при разнице температур между гранями 14 °С. Фазовые искажения пучка составили порядка 13π . Таким образом, неоднородное распределение температуры вдоль плоскостей ПВО будет оказывать существенное влияние на качество пучка, приводя к фокусировке в Y-направлении (параллельном плоскостям полного внутреннего отражения).

Таким образом, пластинчатые активные элементы с зигзагообразным ходом пучка позволяют эффективно компенсировать действие термооптических эффектов на лазерный пучок при условии равномерного тепловыделения в пластине. Однако, если тепловыделение существенно неоднородно, то уже при мощности накачки 200 Вт возникает тепловая линза с фокусным расстоянием порядка 10 см, которая исключает получение эффективной генерации в данной схеме. Проведены измерение и расчет распределения температуры в пластине. При мощности накачки 200 Вт (тепловыделении около 70 Вт) максимальная температура АЭ составила около 70 °С. Тепловыделение и распределение температуры вдоль активного элемента при использованной данной концентрации активатора (~ 0.6 ат.%) и длине волны накачки (806 нм) существенно неравномерны. Проведенные исследования оптических искажений пучка в неоднородно нагретом АЭ показали, что действие температурных градиентов эффективно компенсируется в направлении зигзагообразного хода пучка. Градиент температуры вдоль плоскостей ПВО оказывает существенное влияние на фазовый фронт пучка и приводит к фокусировке излучения, что не может быть компенсировано зигзагообразным ходом пучка.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] W. S. Martin and J. P. Chernoch, Multiple internal reflection face pumped laser, Patent USA 3533126, Publ. 1972.
- [2] А. Л. Микаэлян, В. В. Дьяченко, Письма в ЖЭТФ **16**, 25 (1972).
- [3] J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn, et. al., IEEE J. Quantum Electron. **QE-20**, 289 (1984).

- [4] A. Giesen, H. Hugel, A. Voss, et al., “Diode pumped high-power solid-state laser: concept and first results with Yb:YAG”, OSA Proceedings on Advanced Solid-State Lasers **20**, 91 (1994).

Поступила в редакцию 4 февраля 2011 г.