УДК 621.373.826

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЗОНАТОРОВ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ЛАЗЕРОВ С ТОРЦЕВОЙ НАКАЧКОЙ

В. В. Дедыш, В. Е. Надточеев, О. Е. Наний

(НИИЯФ)

Решена задача выбора оптимальных параметров резонатора и накачиваемой области в твердотельном кольцевом лазере с монохроматической торцевой накачкой с учетом неоднородности усиления, а также астигматизма зеркал и других элементов резонатора. Показано, что для получения минимальных порогов генерации целесообразно использовать резонаторы, эквивалентные концентрическому с компенсацией астигматизма зеркал. Приведена методика расчета оптимального размера накачиваемой области.

Разработанные в последнее время методы устранения конкуренции встречных волн в твердотельных кольцевых лазерах (ТКЛ) на YAG: Nd³⁺ позволяют получать в них стабильные двунаправленные режимы генерации, обладающие высокой чувствительностью к невзаимным эффектам, в частности к вращению [1, 2]. Однако использование ТКЛ для точных измерений накладывает высокие требования на стабильность их параметров, которые недостижимы в лазерах с ламповой накачкой из-за большого тепловыделения. Перспективным способом уменьшения тепловыделения в активном элементе является использование монохроматической накачки с длиной волны, совпадающей с одной из линий поглощения. В линейных лазерах с монохроматической накачкой наиболее эффективной является торцевая схема, при которой возможно наиболее полное согласование объема генерируемой моды с накачиваемой областью [3]. Для кольцевых лазеров с торцевой накачкой задача согласования и оптимизации параметров резонатора и накачки усложняется наличием астигматизма, вызванного неперпендикулярным падением лазерного пучка на зеркала.

В лазерах с поперечной накачкой и большими объемами активной среды с достаточно высокой точностью можно считать, что низкие пороги генерации соответствуют конфигурациям резонаторов с малыми дифракционными потерями, причем области малых дифракционных потерь совпадают с областями устойчивости резонаторов [4]. Проведенные нами экспериментальные исследования твердотельных лазеров с торцевой монохроматической накачкой показали, что минимальные пороги генерации достигаются при конфигурациях, эквивалентных вырожденным концентрическим резонаторам, причем генерация существует как в устойчивой, так и в неустойчивой областях, рассчитанных с учетом тепловой линзы, наводимой в активном элементе. Для нахождения параметров генерируемых световых пучков и величины дифракционных потерь в таких лазерах необходимо учитывать существенно неоднородное распределение усиления в активной среде, обусловленное сильной фокусировкой излучения накачки. Известно, что неоднородное распределение усиления или потерь может существенно менять характеристики собственных воли резонатора [5-7], а условие устойчивости в обычной трактовке в этом случае не применимо [8].

Теоретический анализ проводился на основе матричного подхода с использованием комплексных гауссовых пучков [8], являющихся обобщением широко распространенных вещественных гауссовых пучков [9]. Учет неоднородности распределения усиления в активной среде проводился введением неограниченного усиливающего слоя в сочетании с эквивалентной гауссовой диафрагмой, амплитудный коэффициент пропускания которой $\tau(x, y)$ задается выражением

$$\tau(x, y) = \exp\left\{-\frac{2\pi}{\lambda}(x^2+y^2)/2f\right\},\$$

где x, y — проекции расстояния от оси пучка вдоль осей, лежащих в плоскости резонатора и перпендикулярной плоскости соответственно, λ — длина волны излучения, f — характерный размер эквивалентной диафрагмы, связанный с диаметром d пучка накачки в активном элементе соотношением $f = d \sqrt{(1 + \alpha_0)/\alpha_0}$, где α_0 — коэффициент усиления. Матрица, описывающая гауссову диафрагму, имеет вид

 $\begin{pmatrix} 1 & 0\\ i/f & 1 \end{pmatrix}$.

Потери по мощности за один проход определяются формулой

$$\Pi = 1 - \sqrt{(1 - k_x)(1 - k_y)},$$

где k_x , k_y — коэффициенты потерь для циклического прохода волны, связанные с расходимостью соответственно в плоскостях x, y.

В соответствии с работой [8] коэффициенты k определяются формулой

$$k=1-\exp\left\{-2\operatorname{Im}\left(\operatorname{arctg} \sqrt{\left(\frac{A+D}{2}\right)^{-2}+1}\right)\right\}.$$

Здесь А и D — элементы матрицы всей оптической системы.

На рис. 1 показана теоретическая зависимость (кривая) потерь помощности от периметра резонатора, образованного одним сферическим (R=200 мм) и двумя плоскими зеркалами. Угол падения лазерного пучка на сферическое зеркало $\varphi=15^\circ$. Как следует из рис. 1, при учете поперечной неоднородности усиления область минимальных потерь лежит вблизи и за границей области устойчивости, рассчитанной для пустого резонатора.

Весьма важной является задача исследования зависимости пороговой мощности накачки от размеров накачиваемой области в плоскостях x, y, d_x , d_y . Мощность накачки обратно пропорциональна параметрам M_x , M_y , определяемым из соотношений $M_x = d_x k_x$, $M_y = d_y k_y$. На рис. 2 показаны зависимости $M_x = M(d_x)$, $M_y = M(d_y)$, теоретически рассчитанные для периметра резонатора P = 38 см. Из них видно, что оптимальные размеры накачиваемой области при заданной конфигурации резонатора различны для плоскостей x, y. Это также является следствием астигматизма.

Для оптимального согласования областей накачки можно при фокуснровке накачиваемого пучка использовать цилиндрическую линзу, астигматизм которой эквивалентен астигматизму резонатора. Однако более эффективным способом, позволяющим обеспечить полную компенсацию астигматизма, является внесение в резонатор элемента, также обладающего астигматизмом [10]. Таким элементом может служить активный элемент с торцами, срезанными под углом Брюстера. В кольцевом лазере с таким активным элементом эффективная длина



Рис. 1. Теоретическая (кривая) и экспериментальная (точки) зависимости потерь по мощности от периметра резонатора. Размер диафрагмы 200 мкм

Рис. 2. Теоретические зависимости параметров M_x (1) и M_y (2) от размеров d_x , d_y накачиваемой области соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Периметр резонатора 38 см

Рис. 3. Теоретическая зависимость длины брюстеровского кристалла, необходимой для компенсации астигматизма зеркала (R=200 мм), от угла падения лазерного пучка на зеркало

пути лазерного пучка *l* в кристалле длиной *L* будет различной для плоскостей *x* и *y*:

 $l_x = l \sqrt{n^2 + 1/n^2},$ $l_y = l \sqrt{n^2 + 1/n^4},$

где *n* — показатель преломления активного элемента. Для полной компенсации астигматизма зеркал и активного элемента длина кристалла *L* должна удовлетворять соотношению

$$L = \frac{R\sin\varphi \,\mathrm{tg}\,\varphi}{2\,(n^2-1)\,\sqrt{n^2+1}}\,n^4.$$

Отсюда для R=200 мм, $\varphi=15^{\circ}$ длина кристалла L должна быть равна 1,58 см. Зависимость L от φ для рассматриваемого нами случая приведена на рис. 3.

В эксперименте исследовалась зависимость пороговой мощности накачки W от длины резонатора ТКЛ. Резонатор состоял из двух плоских и одного сферического зеркала (R=200 мм, $\varphi=15^{\circ}$). В качестве активного элемента использовались кристаллы YAG: Nd³⁺ с просветленными торцами (остаточный коэффициент отражения r<0,1%) и кристаллы с торцами, срезанными под углом Брюстера. Кристаллы имели круглое сечение диаметром 3 мм и длину 15÷20 мм. В качестве источника накачки использовался аргоновый лазер ЛГН-402. С помощью интерференционного фильтра выделялась линия $\lambda_p=0,5145$ мкм, лежащая в полосе поглощения ионов Nd³⁺ в матрице Y₃Al₅O₁₂. Максимальная мощность пучка накачки после прохождения интерференционного фильтра составляла около 2 Вт.

На рис. 1 точками представлена экспериментальная зависимость. W(P). Минимальный порог генерации составил менее 100 мВт. Из.

56

графика видно, что малые пороги генерации достигаются и при конфигурации резонатора, соответствующей неустойчивой области.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что для получения минимальных порогов генерации в твердотельных кольцевых лазерах целесообразно использовать резонаторы, эквивалентные концентрическому с компенсацией астигматизма зеркал. Приведенная методика расчета позволяет рассчитать оптимальный размер накачиваемой области для получения минимального порога генерации.

Авторы выражают глубокую благодарность Н. В. Кравцову за помощь в работе и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Доценко А. В., Корниенко Л. С., Кравцов Н. В. и др.//Квант. электроника. 1986. 13. С. 95. [2] Клочан Е. Л., Ларионцев Е. Г., Наний О. Е., Шелаев А. Н.//Квант. электроника. 1982. 14. С. 1385. [3] Zhou B., Капе Т. Ј., Diхоп G. J., Вуег R. L.//Opt. Lett. 1985. 10. Р. 62. [4] Ярив А. Квантовая электроника. М., 1980. [5] Коваленко Е. С.//Квант. электроника. 1976. 3. С. 433. [6] Кукушкин В. Г.//Квант. электроника. 1983. 10. С. 1474. [7] Кукушкин В. Г.//Там же. 1987. 14. С. 381. [8] Ищенко Е. Ф. Открытые оптические резонаторы. М., 1980. [9] Кодеlnik Н., Li T.//Appl. Opt. 1966. 5. Р. 1550. [10] Кодеlnik Н., Ірреп Е. Р., Dienes A., Chank Ch.//IEEE. J. of Quant. Electron. 1972. QE-8. Р. 373.

Поступила в редакцию 14.07.89

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1990. Т. 31, № 3

АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 534.213

АКУСТИЧЕСКАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ ГРАНИЧНЫХ РАССЕИВАТЕЛЕЙ

В. А. Буров, А. В. Глазков, И. П. Прудникова, О. Д. Румянцева, Е. Я. Тагунов

(кафедра акустики)

Кратко изложен подход к решению томографических обратных задач рассеяния на граничных акустических неоднородностях с использованием экстраполярованного метода Ричардсона. Приводятся результаты экспериментальной проверки разработанной теории.

Акустическая дифракционная томография граничных рассеивателей предполагает восстановление формы акустически мягких (или жестких) объектов по измеренным данным о рассеянном ими акустическом поле.

В предлагаемой работе восстановление формы сводится к оценке вида характеристической функции, равной единице внутри объекта. Предполагается, что измерения проводятся в серии экспериментов на одной или нескольких частотах. Источники первичного поля располагаются последовательно таким образом, чтобы в результате объект был всесторонне облученным. Для определенности предполагается, что рассеиватель является акустически мягким и на его границе выполняется условие Дирихле.