

高功率半导体激光器端面抽运连续 固体激光器谐振腔的设计*

刘均海 卢建仁 吕军华 邵宗书 蒋民华
(山东大学晶体材料国家重点实验室 济南 250100)

提要 提出了设计高功率半导体激光器(LD)端面抽运连续固体激光器谐振腔的基本原则。据此利用数值计算方法很容易得到理想的腔参数,使腔的热稳定范围相当宽;激光介质内基模半径不随抽运功率变化;腔内像散得到完全消除;在相当大的抽运功率范围内腔工作于稳区中心附近。实验结果证明:这种腔容易实现低阈值、高效、高功率的基模运转,光-光转换效率可达 50%。

关键词 谐振腔,端面抽运,基模半径,热焦距,稳区

1 引 言

激光晶体吸收抽运光而伴随产生的热聚焦作用,是高功率固体激光器谐振腔设计中必须考虑的中心问题,因为它对谐振腔的稳定性和腔内各处的模参数有着直接而重要的影响。对于半导体激光器(LD)端面抽运固体激光器,高抽运功率下伴随热透镜的球差引起衍射损耗^[1],激光介质内基模半径不应过大,一般小于抽运光斑半径^[2~5]。由于腔的热稳定范围与激光介质内的基模半径存在简单的反比关系^[6],相对较小的基模半径意味着腔的热稳定范围可以设计得很宽。

对于高功率 LD 端面抽运固体激光器虽已进行了很多研究,但有关适合于这类激光器的谐振腔设计方面的详细研究,在国内外尚未见报道^[7]。本文在这方面做了一些有益的探索,提出了这类腔的一般设计原则。按照这些原则,根据标准的 $ABCD$ 传输矩阵理论,利用数值计算方法,不难得到符合条件的腔参数。给出并分析了这样一个典型的谐振腔,并在实验上实现了低阈值、高功率、高效率的基模运转。

2 谐振腔的设计与分析

与直腔相比,折叠腔更利于获得热稳运转,下面只限于讨论折叠腔的设计。为简单计,将激光晶体中的热透镜视作焦距为 f_T 的理想薄透镜,其上的基模光斑半径作为激光晶体中的基模半径,热透镜位于激光晶体中心。

考虑图 1 所示的四镜折叠腔 (Z 型腔),其中激光晶体紧靠端镜 M_1 ,四个腔镜 M_1, M_2, M_3 和 M_4 的曲率半径分别为 R_1, R_2, R_3 和 R_4 ,晶体中心距 M_1 和 M_3 的距离分别为 L_1 和 L_2, M_3 和

* 国家 863 高技术发展计划重大资助项目。

收稿日期: 1998-08-17; 收到修改稿日期: 1998-10-23

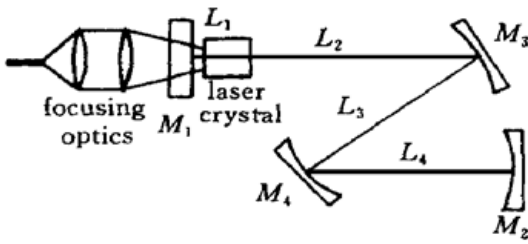


图1 四镜折叠腔(Z形腔)

Fig.1 4-mirror folded (Z-shaped) cavity

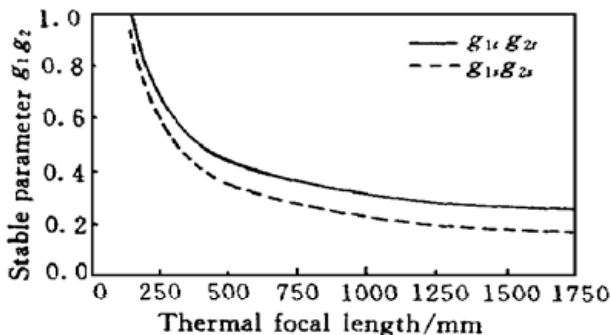
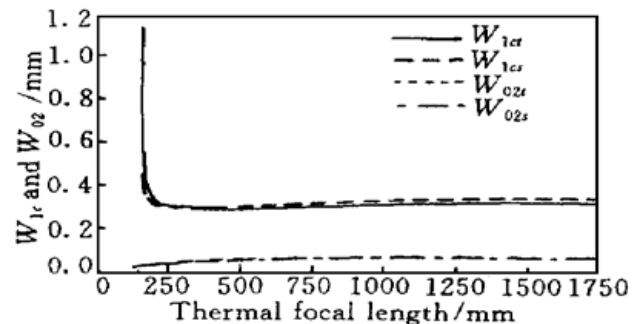
频束腰半径 W_{02} (若用于腔内倍频) 在子午面和弧矢面内相差不应过大, 输出镜上的光斑半径应能实现像散补偿; (4) 在 $f_T \rightarrow \infty$ 时, 腔位于稳定区内, 且离开其边界附近。这样才可能降低阈值, 同时有利于激光器的最初调整; (5) 总的腔长不应太长, 否则衍射损耗和失调灵敏度都会加大。

根据标准的 $ABCD$ 传输矩阵理论, 利用数值计算方法, 可以得到符合上述原则, 且在实际中易实现的腔参数。下面给出一组典型腔参数, 并分析相应的模参数随热焦距 f_T 的变化。这一腔型适合于高功率 LD 端面抽运以及腔内倍频。典型腔参数为 $R_1 = \infty, R_2 = 50 \text{ mm}, R_3 = 200 \text{ mm}, R_4 = 50 \text{ mm}, \theta_1 = \theta_2 < 10^\circ, L_1 = 10 \text{ mm}, L_2 = 245 \text{ mm}, L_3 = 145 \text{ mm}, L_4 = 75 \text{ mm}$, 这里 θ_1, θ_2 分别为折叠镜 M_3, M_4 上的折叠角之半。

此腔有如下特点: (1) f_T 的容许变化范围为 $\infty \sim 160 \text{ mm}$ 。根据我们对 Nd:YVO₄ 晶体的测量结果, $f_T = 160 \text{ mm}$ 相应于 20 W 以上的抽运功率; (2) $f_T = \infty$ 时, $g_1 g_2 \sim 0.2$ 。在 $f_T = 600 \sim 250 \text{ mm}$ 范围内, $g_1 g_2$ 的变化为 $g_{1t} g_{2t} = 0.7 \sim 0.4; g_{1s} g_{2s} = 0.61 \sim 0.31$, 均在稳区中心附近变化(下标 t, s 分别表示子午面和弧矢面)。图 2 示出了稳定性参数 $g_1 g_2$ 随 f_T 的变化关系; (3) 除稳区边界外, 在整个稳区内激光介质中的基模半径 W_{lc} 的变化低于 10%, 在子午面和弧矢面内的模半径也相差很小。在最感兴趣的范围 $f_T = 600 \sim 250 \text{ mm}, W_{1ct} = W_{1cs} \sim 0.3 \text{ mm}$, 见图 3; (4) 如用于腔内倍频, 在 $f_T = 800 \sim 250 \text{ mm}$ 范围内, $M_4 M_2$ 一臂上的束腰半径在子午面和弧矢面内几乎没有差异, $W_{02t} = W_{02s}$, 变化范围为 $0.07 \sim 0.05 \text{ mm}$; 同时, 子午面和弧矢面内束腰位置的偏离 $< 0.5 \text{ mm}$, 见图 3 和图 4; (5) 在几乎整个稳区内, 对于腔镜 M_2, M_4 上的基模光斑实现了完全的像散补偿, W_{2t} 与 W_{2s}, W_{4t} 与 W_{4s} 的差异均小于 0.01 mm , 见图 5。因此无论是自 M_2 的基频光输出, 还是自 M_4 的倍频光输出, 均可获得圆形光斑。

M_4 的距离为 L_3, M_4 和 M_2 的距离为 L_4 。

为了获得低阈值、高效率、高功率的稳定基模运转, 高功率 LD 端面抽运固体激光器谐振腔的设计应遵循以下原则: (1) 在满足模匹配所需要的一定基模半径前提下, 腔应有尽可能宽的 f_T 的变化范围; (2) 在感兴趣的 f_T 范围内, 激光介质中的基模半径 W_{lc} 随 f_T 的变化缓慢平稳; 同时, $g_1 g_2 \approx 0.5$, 以保证激光器的稳定运转; (3) 激光晶体内的基模半径 W_{lc} 和倍

图2 稳定性参数 $g_1 g_2$ 随 f_T 的变化Fig.2 Variation of the stable parameter $g_1 g_2$ with f_T 图3 基模半径 W_{lc} 及 W_{02} 随 f_T 的变化Fig.3 Mode radii W_{lc} and W_{02} as a function of f_T

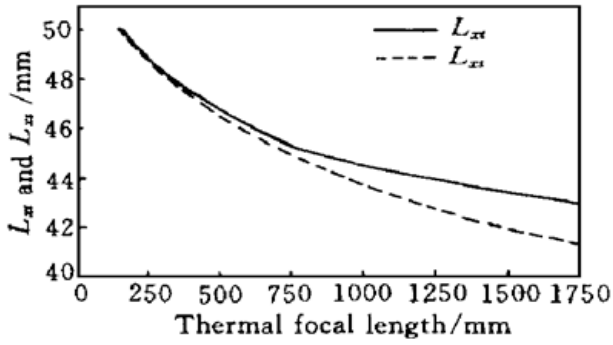


图 4 束腰位置 L_{xl}, L_{xs} 随 f_T 的变化

Fig. 4 Waist location L_{xl} and L_{xs} as a function of f_T

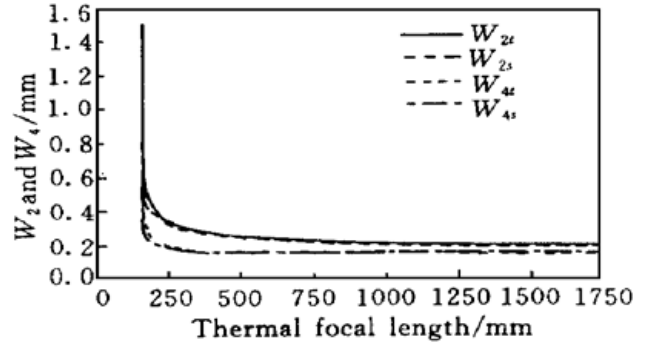


图 5 基模半径 W_2 和 W_4 随 f_T 的变化

Fig. 5 Variation of spot radii W_2 and W_4 with f_T

3 实验结果与讨论

为了检验上述腔设计思想的实际效果,我们对基于以上腔参数的高功率 LD 端面抽运激光器进行了初步实验研究。

实际的实验装置完全按设计的腔参数来安排,其主要结构如图 1 所示。 M_1 为平面镜,一面对 808 nm 增透,另一面对 1.06 μm 全反,同时对 808 nm 高透; M_2 对 1.06 μm 的透过率为 5%,用作输出耦合镜; M_3, M_4 均对 1.06 μm 全反。实验所用抽运源为光纤束耦合输出的高功率半导体激光器 OPC-D030-FCHS(Optopower Corp.), 光纤束直径为 1.55 mm, 数值孔径 $N.A. = 0.11$, 最大输出功率为 30 W。经聚焦系统后抽运光斑半径 $W_p \sim 0.4$ mm, $N.A. \sim 0.22$ 。实验所用激光晶体为 Nd:YVO₄ (3 mm \times 3 mm \times 5 mm), 晶体侧面用铝箔包裹置入紫铜块内, 利用半导体制冷器冷却并可控温。

图 6 给出了输出功率 P_{out} 随抽运功率 P_{in} 的变化关系, 阈值抽运功率 $P_{th} \approx 0.3$ W。当抽运功率 $P_{in} < 6$ W 时, 光-光转换效率 $\sim 50\%$ 。当 $P_{in} > 10$ W 时, 输出功率 P_{out} 随抽运功率 P_{in} 的增加开始变得缓慢, 当 $P_{in} \sim 14$ W 时输出功率 P_{out} 达到饱和。出现这一现象的原因是高抽运功率下激光晶体中的热透镜存在高阶球差^[2], 从而引起衍射损耗加剧, 使得转换效率下降。如果使用更高透过率的输出耦合镜 M_2 , 可以预期这一现象应得到部分消除。由于缺少合适的输出耦合镜, 这一推论没能得到直接的实验验证。但是, 我们筛选出了一组容易实现的三镜折叠腔的腔参数: $L_1 = 10$ mm, $L_2 = 270$ mm, $L_3 = 115$ mm, $R_1 = \infty, R_2 = \infty, R_3 = 200$ mm。这里 R_1 为抽运端镜 M_1 的曲率半径, R_2 为输出耦合镜 M_2 的曲率半径, R_3 为折叠镜 M_3 的曲率半径, L_1, L_2 分别为激光晶体至腔镜 M_1, M_3 的距离, L_3 为 M_3M_2 一臂的长度。这个腔的所有模参数及其随 f_T 的变化与所讨论的四镜腔十分相似, 只是腔的稳定范围较四镜腔的窄; 模参数随 f_T 的变化较显著; 子午面和弧矢面上的模半径相差较大。图 6 同时给出了这个腔的相应结果。可以看出, 输出耦合镜的透过率同为 5% 时, 其结果与上述四镜腔情形完全相类似, 只是效率略有提高。这是由于三镜腔因其腔内元件及光路转折比四镜腔少, 因而相应的腔内损耗更低一些。当输出耦合镜透过率为 15% 时, $P_{in} > 10$ W 后效率

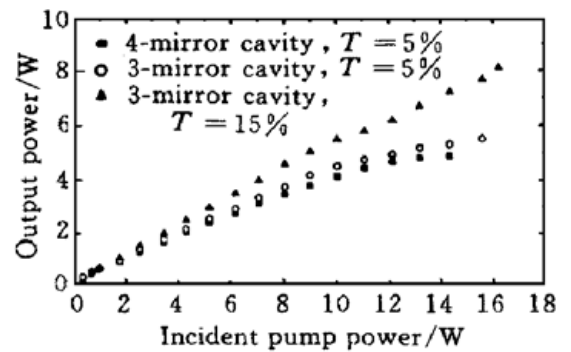


图 6 输出功率随抽运功率的变化关系

Fig. 6 Relations of output power vs pump power

当输出耦合镜透过率为 15% 时, $P_{in} > 10$ W 后效率

虽有所降低,但仍保持在 50% 以上,而且当 $P_m > 16 \text{ W}$ 时仍未出现饱和的迹象。可以预期,当使用高透过率的输出耦合镜时,四镜腔也应获得完全类似的结果。

值得指出,上述实验结果只是初步的。一些对于提高激光器输出功率和转换效率起关键作用的因素,如抽运光斑半径 W_p 与激光晶体中基模半径 W_{lc} 的匹配、激光晶体的最佳长度、输出耦合镜的最佳透过率等都未进行仔细研究。但即使如此仍能够获得令人满意的结果。这说明本文提出的这些设计腔的一般原则对于高功率 LD 端面抽运固体激光器的设计和优化具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 S. C. Tidwell, J. F. Seamans, M. S. Bowers *et al.*. Scaling CW diode-end-pumped Nd:YAG lasers to high average powers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 997~ 1009
- 2 Y. E. Chen, T. M. Huang, C. F. Kao *et al.*. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effect. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(8): 1424~ 1429
- 3 Y. Kaneda, M. Oka, H. Masuda *et al.*. 7.6 W of continuous-wave radiation in a TEM₀₀ mode from a laser-diode end-pumped Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(14): 1003~ 1005
- 4 W. A. Clarkson, D. C. Hanna. Efficient Nd:YAG laser end pumped by a 20-W diode-laser bar. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12): 869~ 871
- 5 W. L. Nighan, Jr., M. Park, M. S. Kehstead *et al.*. Diode pumped laser with strong thermal lens crystals. *US Patent*, 5410559. Apr. 25, 1995
- 6 V. Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1): 107~ 117
- 7 A. Agnesi, S. Dellacqua, G. C. Reali *et al.*. Design and characterization of a diode-pumped, single longitudinal and transverse mode, intracavity-doubled cw Nd:YAG laser. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(3): 597~ 601

Design of Resonators for High-power Laser Diode End-pumped CW Solid-state Lasers

Liu Junhai Lu Jianren Lu Junhua Shao Zongshu Jiang Minhua
(National Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract A few critical rules concerning the design of resonators used for high-power laser diode end-pumped CW solid-state lasers were presented in this paper. Following these rules and utilizing a numerical computation procedure, it is possible to find out optimal cavity configurations characteristic of a wide range of thermal stability, a fundamental mode radius within the laser medium which is independent of thermal lensing, being free from astigmatism in the whole cavity and being far away from the edge of the stability region in the range of pump power of interest. Experimental results show that the lasers based on such a resonator can readily be operated with low threshold pump power, high output power and high efficiency.

Key words resonator, end-pumped, fundamental mode radius, thermal focal length, stability region