

固体激光器热透镜效应的调控*

何广源 郭靖 焦中兴[†] 王彪

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2011年9月30日收到; 2012年2月7日收到修改稿)

利用工作腔的热透镜模型, 分析了有激光发射下固体激光器的谐振腔配置对热透镜效应和稳定区的影响, 论述了通过改变谐振腔配置调控热透镜效应的可行性. 实验上, 使用一台 Nd: YAG 激光器对理论作了验证, 实现了对热透镜光焦度及稳定区分布的调控.

关键词: 固体激光器, 热透镜, 热效应调控

PACS: 42.60.Da, 42.60.Lh

1 引言

固体激光器由于具有功率高、光束质量好、结构紧凑等优点, 在军事、医疗、工业、科研等领域有着广泛的应用. 随着激光应用的发展, 人们对固体激光器的输出功率、光束质量、稳定性等方面的要求逐渐提高. 热透镜效应作为影响固体激光器性能的关键因素之一, 在谐振腔设计中已经得到广泛关注^[1-6]. 在这些工作中, 热透镜一般作为一个仅与抽运功率有关的因素被引入到谐振腔的设计中. 这种处理方法并不准确. 事实上, 在工作状态下腔内激光会消耗部分激光棒的上能态的粒子数, 降低从上能态非辐射弛豫到基态所产生的热量, 对激光棒起到冷却的作用. 激光冷却效应的存在使得激光棒的热透镜光焦度(焦距的倒数)不仅与抽运功率有关, 而且与腔内激光功率密切相关^[7-9]. 为了更加精确设计谐振腔以实现激光器的性能提升, 非常有必要研究工作腔的热透镜效应及其对激光器性能的影响. Hodgson 等建立了工作状态下闪光灯抽运的 Nd: YAG 激光器的热透镜模型^[8], 该模型能够更真实地反映激光棒的热透镜效应. 但他们并没有给出热透镜光焦度的表达式, 也没有在激光器设计方面作进一步的探讨. 前期工作中, 我们改进了 Hodgson 的热透镜模型, 模拟得到了工作腔的稳定区分布及输出特性, 解释了特殊区域与功率回

线出现的原因, 实验上成功获得了稳定高功率的径向模和切向模光束^[10]. 在文献[10]中我们指出因激光器的腔内功率与谐振腔参数密切关联, 所以可通过改变谐振腔的配置实现对热透镜效应的调控, 从而改变谐振腔的稳定区分布. 本文利用工作腔的热透镜模型分析了输出耦合率, 散射损耗等因素对稳定区分布和激光器性能的影响. 并以一台激光二极管侧面抽运的连续 Nd: YAG 激光器为实验平台, 验证了理论模拟的正确性, 实现了对激光器输出特性的调控.

2 工作腔的热透镜效应

在文献[10]中, 我们分析了工作状态下的激光棒的热透镜模型, 得到激光棒上热沉积量和热透镜光焦度的表达式为

$$P_h = \chi \eta_{LD} P_{LD} - LP_{int}, \quad (1)$$

$$D_{r,\varphi} = \begin{cases} \chi \beta_{r,\phi} \eta_{LD} P_{LD}, & (\text{无激光振荡}), \\ \chi_{\text{eff}} \beta_{r,\phi} \eta_{LD} P_{LD} + \frac{Ah\nu}{\sigma \tau_f} L \beta_{r,\phi}, & (\text{有激光振荡}), \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\chi_{\text{eff}} = \chi - \eta_B \left[\frac{\tau_f}{\tau_{nr}} + \frac{1 - V_A}{\ln(R^{1/2} V_S V_A)} \right]$$

* 国家自然科学基金(批准号: 10732100, 11072271, 10972239, 61008025), 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20100171120024)和中央高校基本科研业务费项目(批准号: 11lgpy55)资助的课题.

[†] E-mail: jjiaozh@mail.sysu.edu.cn

$$\approx \chi - \frac{\tau_f}{\tau_{nr}} \eta_B \quad (V_A \approx 1), \quad (3)$$

$$L = -\frac{\tau_f}{\tau_{nr}} \ln \left(R^{1/2} V_S V_A \right) - 1 + V_A$$

$$\approx -\frac{\tau_f}{\tau_{nr}} \ln \left(R^{1/2} V_S \right) \quad (V_A \approx 1). \quad (4)$$

根据文献 [7], 光焦度与热量沉积成正比关系, 这里用 $\beta_{r,\varphi}$ 表示此比例系数, 下标 r 和 φ 分别对应径向模态和切向模态. χ 为热载荷参数 (thermal load parameter), 表征沉积的热量与上能级储能的比值. χ_{eff} 表示有效热载荷参数, A 为激光棒截面积, $h\nu$ 为激光的单光子能量, σ 为受激发射截面, η_B 为光束的交叠率, P_h 为激光棒的热沉积量, η_{LD} 为激光棒的储能与抽运功率的比值, P_{LD} 为抽运功率, P_{int} 为腔内功率, R 为激光器输出耦合镜的反射率, τ_f 为上能级荧光寿命, τ_{nr} 为上能级非辐射弛豫寿命, V_S 为谐振腔的单程散射损耗因子 ($1 - \text{损耗}$), V_A 为激光棒的单程吸收损耗因子 (一般情况下激光棒对振荡激光的吸收较小, $V_A \approx 1$).

由 (1) 式可以看出, 激光棒的热沉积量与抽运功率 P_{LD} 和腔内功率 P_{int} 均成线性关系, 其第二项表明腔内激光振荡的存在将降低激光棒的热沉积量. 系数 L 反映了腔内功率冷却激光棒的效率. 在相同抽运功率下, 较高的腔内功率更有利于激光棒的冷却. 此外, 根据 (2) 式的第一个方程可知, 不考虑腔内激光振荡时, 激光棒的光焦度只决定于激光棒与抽运模块的内禀性质. 然而, 根据 (2) 式的第二个方程, 即考虑腔内激光振荡后, 谐振腔的配置 (如: 输出耦合率, 散射损耗等因素) 会对热透镜的光焦度产生影响. 因此, 通过改变谐振腔的配置, 有望实现对热透镜光焦度的有效调控, 从而改变激光器的输出特性. 根据 (2) 式, 结合 Magni 等人的谐振腔分析理论 [11], 可以计算出处于工作状态下的激光器的稳定区分布, 并由此分析谐振腔配置对热效应的调控效果.

3 谐振腔配置对稳定区调控的模拟

我们以平平腔的 Nd: YAG 激光器为例, 模拟了具有相同腔结构、不同输出耦合率的工作腔的稳定区分布. 图 1 为激光器的结构示意图. 其中, M_1 为输出耦合镜, M_2 为全反镜. M_1, M_2 到邻近激光棒主平面的距离分别为 $L_1 = 433 \text{ mm}$, $L_2 = 131 \text{ mm}$. 激光棒的长度为 120 mm , 直径为 4 mm . 利用 (2) 式的第一个方程, 可以计算出不考虑腔内激光冷却时激光棒主平面处的径向模和

切向模的光束半径 ω_0 随抽运功率的变化曲线 (模半径变化曲线), 如图 2(a) 所示. 这是一般谐振腔设计时所使用的传统计算方法. 接着, 我们使用 (2) 式的第二个方程, 计算了考虑腔内激光冷却的情况下, 输出镜 (OC) 的透过率分别为 30%, 20%, 10% 的模半径变化曲线, 见图 2(b), (c), (d). 抽运功率低于阈值功率的部分未画出.

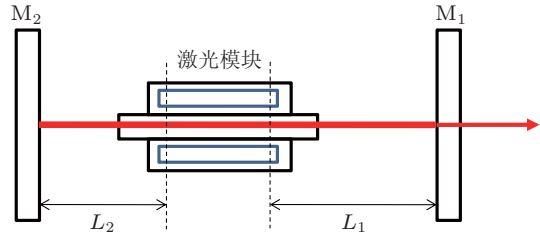


图 1 激光谐振腔结构示意图

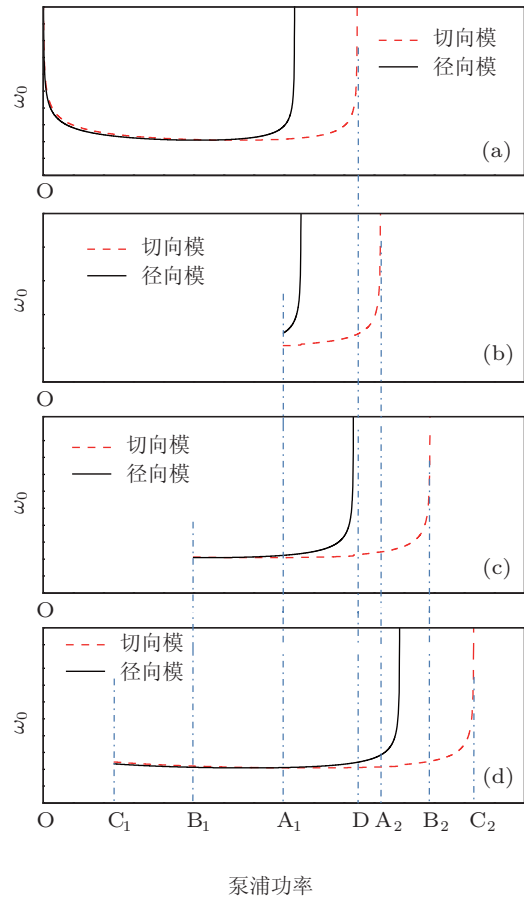


图 2 模半径随抽运功率变化曲线图 (a) 不考虑腔内激光冷却; (b) 30% OC; (c) 20% OC; (d) 10% OC

由图 2 可以看出, 考虑了腔内功率对激光棒的冷却以后, 激光器的稳定区边缘相对于传统方法计算的稳定区边缘往高抽运功率方向发生了偏移, 且谐振腔的输出耦合率越低, 偏移就越大. Ito 等人在实验中发现了这种差别 [12], 但没有给出明

确的解释. 当抽运功率相同时, 在上述输出耦合率的范围内, 低输出耦合率的谐振腔具有较高的腔内功率, 激光棒的冷却效果较好, 致使激光棒的光焦度较小. 只有当激光棒的光焦度等于稳定判据的临界值 $1/L_1$ 时, 激光器才到达稳定区的边缘^[11]. 因此, 低输出耦合率的谐振腔的稳定区边缘可以延伸至更高的抽运功率处 ($C_2 > B_2 > A_2$). 在升降抽运功率过程中, 激光器会在延伸区域产生功率回线^[10]. 低输出耦合率的谐振腔的稳定区边缘延伸量较大, 令所产生的功率回线的宽度较大, 即有 $DC_2 > DB_2 > DA_2$. 由此可知, 使用高输出耦合率的谐振腔, 可以抑制功率回线的出现. 此外, 由于低输出耦合率的谐振腔的阈值功率小 ($C_1 < B_1 < A_1$), 稳定区延伸深度广, 所以低输出耦合率的谐振腔的稳定区比高输出耦合率的要大. 如图 2 所示, 有 $C_1C_2 > B_1B_2 > A_1A_2$. 由以上分析可知, 通过改变谐振腔的输出耦合率, 可以实现对热透镜效应的调控, 从而改变激光器稳定区的分布.

4 实验结果及分析

根据第 2 节的 (2) 式及第 3 节的分析可知, 在忽略激光棒对振荡激光吸收的条件下 ($V_A \approx 1$), 通过改变谐振腔输出耦合镜的反射率 R 或者在谐振腔内加入光阑以改变散射损耗因子 V_S , 可以改变腔内功率对激光棒的冷却效率 L (见 (4) 式), 实现对热透镜效应的调控, 继而改变激光器的稳定区分布, 实现对激光器输出特性的调节. 针对以上两种调控手段, 我们使用第 3 节所述的参数为 $L_1 = 433 \text{ mm}$, $L_2 = 131 \text{ mm}$ 的平平腔进行了实验研究. 实验所使用的 Nd: YAG 激光棒直径为 4 mm , 长度为 120 mm . 激光模块的最大抽运电流为 25 A , 此时的抽运功率约为 500 W . 实验结果如图 3 所示. 其中, 实线表示升抽运电流过程, 虚线表示降抽运电流过程.

图 3(a), (b), (c) 为无光阑情况下, 输出耦合率分别为 30%, 20%, 10% 的谐振腔的输出功率特性图. 可以看到, 激光输出区域右边缘的抽运电流值随着输出耦合率的减小由 $15.6 \text{ A}@30\% \text{ OC}$ 偏移至 $16.3 \text{ A}@10\% \text{ OC}$, 同时激光输出区域对应的抽运电流宽度也由 $3.6 \text{ A}@30\% \text{ OC}$ 扩展到 $6.3 \text{ A}@10\% \text{ OC}$. 这与第 3 节的描述一致. 当谐振腔使用透射率为 10% 的输出耦合镜时, 所产生的功率回线宽度最大 (抽运电流宽度约 0.5 A). 随着输出耦合率的增大, 功率回线宽度逐渐缩小. 当输出耦合

镜透射率到达 30% 时, 由于腔内功率相对较低, 对激光棒的冷却不明显, 功率回线几乎消失. 在此腔结构下, 使用 10% OC 的谐振腔不但具有宽度较大的激光输出区域, 而且也获得了比另外两个谐振腔更大的 40 W 的输出功率. 此外, 我们在输出耦合率为 10% 的谐振腔中加入小孔光阑, 增大了谐振腔的散射损耗 (V_S 变小), L 值随之变大, 致使稳定区的延伸量较无光阑的情况要小 (见图 3(d)). 加入的光阑也限制了谐振腔的腔内功率, 消除了功率回线现象.

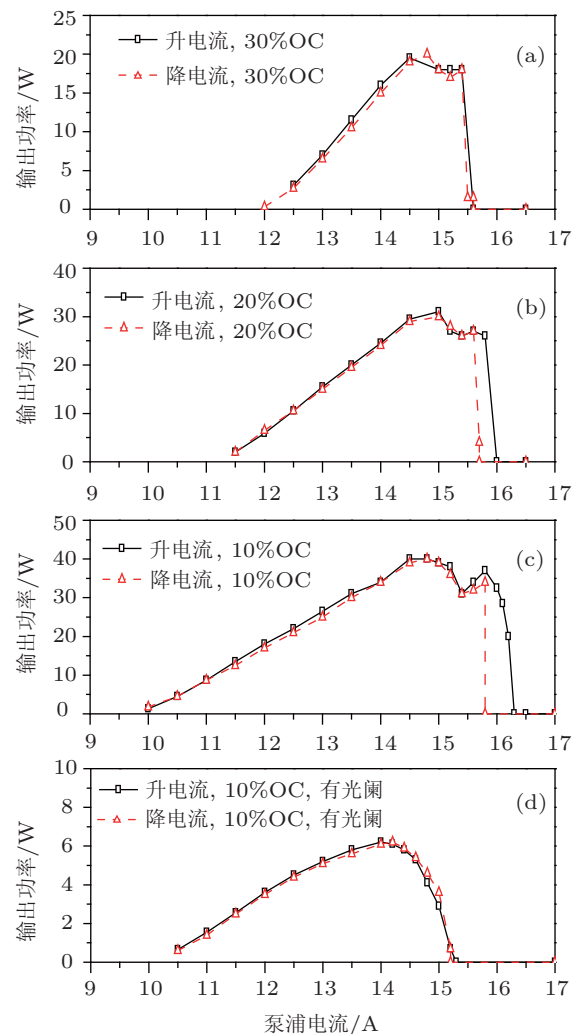


图 3 不同配置谐振腔的输出功率特性 (a) 30% OC; (b) 20% OC; (c) 10% OC; (d) 10% OC, 有光阑

5 结论

本文运用工作腔的热透镜模型, 以平平腔为例, 模拟了输出耦合率分别为 30%, 20%, 10% 的三种谐振腔的稳定区分布. 计算结果表明, 在以上输出耦合率范围内, 考虑了腔内振荡激光对激光棒的冷却

后,激光器的稳定区相对传统的算法往高抽运功率方向偏移,并且低输出耦合率谐振腔的稳定区宽度比高输出耦合率的要大.理论也说明,通过改变谐振腔的输出耦合率,能够对热透镜效应作调控,从

而改变激光器的稳定区分布.实验上,通过改变一台 Nd: YAG 激光器谐振腔的输出耦合率或散射损耗,实现了对热透镜效应的调控,改变了谐振腔的工作区域及功率回线的宽度.

- [1] Guan J, Li J P, Cheng G H, Chen G F, Hou X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1804 (in Chinese) [关俊, 李金萍, 程光华, 陈国夫, 侯洵 2004 物理学报 **53** 1804]
- [2] Zhang C B, Song F, Meng F Z, Ding X, Zhang G Y, Shang M R 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1517 (in Chinese) [张潮波, 宋峰, 孟凡臻, 丁欣, 张光寅, 商美茹 2002 物理学报 **51** 1517]
- [3] Yang Y M, Wen J G, Wang S Y, Cai D F, Guo Z 2005 *Acta Photon. Sin.* **34** 1769 (in Chinese) [杨永明, 文建国, 王石语, 蔡德芳, 过振 2005 光子学报 **34** 1769]
- [4] Dong Y T, Zhao Z G, Liu C, Chen J 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 1759 (in Chinese) [董延涛, 赵智刚, 刘崇, 陈军 2009 中国激光 **36** 1759]
- [5] Wang Y, Inoue K, Kan H, Ogawa T, Wada S 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 235108
- [6] Seidel S, Schirrmacher A, Mann G, Nursianni, Riesbeck T 1998 *Proc. SPIE* **3267** 214
- [7] Koechner W 2006 *Solid-State Laser Engineering* (New York: Springer) p425, p443
- [8] Hodgson N, Rahlff C, Weber H 1993 *Opt. Laser Technol.* **25** 179
- [9] Cheng C C, Huang T L, Chang S H, Tsai H S, Liu H P 2000 *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** 3419
- [10] He G Y, Guo J, Wang B, Jiao Z X 2011 *Opt. Express* **19** 18302
- [11] Magni V 1986 *Appl. Opt.* **25** 107
- [12] Ito A, Kozawa Y, Sato S 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 708

Control of the thermal lensing effect in solid-state laser*

He Guang-Yuan Guo Jing Jiao Zhong-Xing[†] Wang Biao

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, School of Physics and Engineering,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

(Received 30 September 2011; revised manuscript received 7 February 2012)

Abstract

The thermal lensing effect of solid-state lasers under the lasing condition is studied by a thermal model for designing a working cavity. We simulate variations of the stable zones for cavities with different configurations. Theoretical descriptions are verified by a Nd: YAG laser in the experiment. The control of the thermal lensing is achieved experimentally by changing the configuration of the cavity.

Keywords: solid-state laser, thermal lensing, control of thermal effect

PACS: 42.60.Da, 42.60.Lh

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants No.10732100, 11072271, 10972239, 61008025), the Specialized Research Foundation for the Doctoral Program of Chinese Higher Education (Grant No.20100171120024), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant No. 111gpy55).

[†] E-mail: jiaozhx@mail.sysu.edu.cn