

一种利用像散腔测量热透镜焦距的方法

郑耀辉 王雅君 彭堃焯

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 给出一种测量激光器稳定运转时增益介质中热透镜焦距的方法。像散腔在确定的腔型参数下, 存在一个辅助透镜(等效为热透镜)使子午面和弧矢面内的光束参数相同, 利用 $ABCD$ 矩阵理论建立起此时的像散稳定腔腔长与辅助透镜的关系。按此腔型搭建谐振腔后, 通过直接观察激光器输出光斑的形状就可获得腔长与抽运功率的关系; 通过腔长建立起腔长、热透镜焦距与抽运功率的关系后, 即可得到不同抽运功率下增益介质的热透镜焦距大小。

关键词 激光技术; 像散腔; 热透镜; 光斑形状

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0908006

Thermal Lens Determination in Solid-State Laser by Using Astigmatic Cavity

Zheng Yaohui Wang Yajun Peng Kunchi

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract A simple method using an astigmatic cavity to determine the thermal lens of laser crystals is reported. At certain resonator parameters there is a certain thermal focal length, which meets the requirement of making the beam size equal at the tangential and sagittal planes. Based on the $ABCD$ matrix, the relation between the cavity length and the focal length is obtained. The relation between the cavity length and the pump power can be established by observing the spot pattern. Thus, the thermal lens length can be obtained by a middle parameter, that is, the cavity length.

Key words laser technique; astigmatic cavity; thermal lens; spot pattern

OCIS codes 140.3410; 140.3560; 140.3580; 140.6810

1 引 言

激光器运转时, 由于荧光过程的量子效率小于 1, 部分光子能量散失到基质晶格中转换为热, 而散热又要求对其表面进行持续冷却, 这两者使激光材料内部形成一定的温度梯度, 产生热透镜效应^[1]。热透镜的存在影响激光器性能, 如谐振腔的稳定性、腔模尺寸、输出光束质量等。因此, 在设计具有高效率、高稳定性和优良光束质量的激光器时, 测量激光晶体的热透镜焦距对于激光器的设计是非常关键的^[2~6]。

目前已有多种测量激光晶体热透镜焦距的方法, 可分为直接测量法和间接测量法。直接测量法包括探针光束法^[7]和介稳腔法^[8,9], 它们操作简便, 但测量精度较低。间接测量法包括光束干涉法^[10]、

全息剪切干涉法^[11]、夫琅禾费衍射法^[12]等, 测量过程相对复杂, 且激光器工作在非激活的状态下, 测量结果不能真实地反映激光器工作时的热透镜焦距大小; 而发散角反推法^[13]、狭缝扫描法^[14]、CCD 照相法^[15]、刀口法^[16]等间接测量法通过测量线性谐振腔输出光束的参数, 反推得到激光晶体的热透镜焦距, 测量精度取决于输出光束参数的测量精度, 且测量过程也较为复杂。

本文利用像散稳定腔的特点, 提出了一种测量激光晶体热透镜焦距的方法。与直接测量法相比, 该方法测量时, 增益介质的状态与激光器实际工作时的情形一致, 因而测量精度较高。与间接测量法相比, 该方法比较直观, 只需直接观察输出光束的光斑形状

收稿日期: 2011-04-22; **收到修改稿日期**: 2011-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61008001)、国家 863 计划(2011AA030203)、国家 973 计划(2010CB923101)和山西省自然科学基金(2011021003-2)资助课题。

作者简介: 郑耀辉(1979—), 男, 副教授, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: yzheng@sxu.edu.cn

(圆形或者椭圆形),即可通过对应关系得到这一抽运功率下的热透镜焦距大小。测量步骤包括:选择一个包含辅助透镜(等效为热透镜)的像散稳定腔,利用像散稳定腔的特点建立起腔长与辅助透镜焦距的关系;记录输出光束为圆形时抽运功率与腔长的对应关系;最后利用像散稳定腔的腔长作为中间变量,建立起抽运功率与热透镜焦距的关系,即测量得到不同抽运功率下激光晶体的热透镜焦距。

2 测量原理及步骤

2.1 测量原理

在抽运光照射下,由于热和应力呈二次分布,激光晶体等效为一个薄透镜,假设其热透镜焦距为 f 。以图 1 所示的四镜像散腔为例进行分析,腔内包含一个辅助透镜,等效为激光器工作时激光晶体的热透镜。假定辅助透镜的焦距可调,用来等效不同抽运功率下的热透镜焦距大小。四镜腔由两个凸面镜和两个凹面镜组成,腔内光束在 4 个腔镜上均以一定角度入射。由于离轴放置的球面镜存在像散,于是经腔内球面镜反射的光束在子午面和弧矢面内的焦距不相等,分别为^[17]

$$f_t = (\rho/2)\cos \varphi, \quad (1)$$

$$f_s = (\rho/2)\sec \varphi, \quad (2)$$

式中 f_t 为子午面内球面镜的焦距, f_s 为弧矢面内球面镜的焦距, ρ 为球面镜的曲率半径, φ 为光束在

球面镜处的入射角。一般情况下,像散会导致谐振腔子午面和弧矢面内的模参数不同。但是对于确定腔长的像散稳定腔,总能找到一个确定的辅助透镜,使谐振腔分臂 a 上子午面和弧矢面内的模参数相同。当上述条件满足时,激光器经腔镜 M_1 的输出光束为无像散圆形高斯光束,且在光传播的方向上光斑形状处处为圆形,而在其他辅助透镜作用下则输出光束为像散椭圆高斯光束。

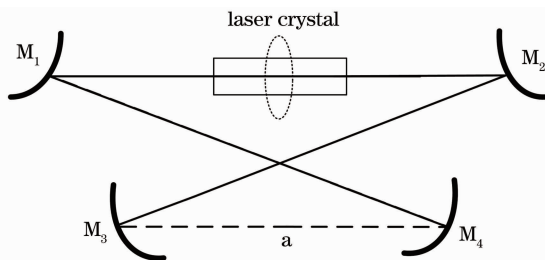


图 1 像散振荡腔结构

Fig. 1 Configuration of astigmatic resonator

对于任意腔型的激光器,都可以通过求解腔的传输矩阵计算腔内振荡光束的参数。在图 1 所示的环形腔中, M_1, M_2 是曲率半径 $\rho_1 = 1500$ mm 的凸面镜, M_3, M_4 是曲率半径 $\rho = 100$ mm 的凹面镜,两凹面镜之间的距离(分臂 a 的长度,即所指腔长) $l = 93$ mm,两凸面镜之间的距离 $l_{12} = 130$ mm,腔镜 M_4 与 M_1 之间的距离 $l_{41} = l_{23} = 125$ mm,光束在球面镜上的入射角 $\varphi = 11.5^\circ$,激光腔为对称腔。激光腔子午面内的传输矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_t = & \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho} \sec \varphi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{23} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_1} \sec \varphi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{12}/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \times \\ & \begin{bmatrix} 1 & l_{12}/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_1} \sec \varphi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{41} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho} \sec \varphi & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

激光腔弧矢面内的传输矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_s = & \begin{bmatrix} 1 & l_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho} \cos \varphi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{23} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_1} \cos \varphi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{12}/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \times \\ & \begin{bmatrix} 1 & l_{12}/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_1} \cos \varphi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{41} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho} \cos \varphi & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

激光腔的分臂 a 上的光斑尺寸为

$$w = \sqrt{\frac{\lambda \sqrt{4 - (A + D)^2}}{2\pi C}}. \quad (5)$$

按照前面选定的激光谐振腔参数,由(3)~(5)

式计算得到激光腔模参数随辅助透镜焦距的变化关系曲线,结果如图 2 所示。从图中可以看出,两条曲线有且只有一个交点 E 。对于确定的像散稳定腔,它对应于一个确定的辅助透镜焦距使分臂 a 上子午

面和弧矢面内腰斑的大小相等。而当辅助透镜的焦距取其他值时,分臂 a 上子午面和弧矢面内腰斑的大小均不相等。在对应的激光谐振腔中,通过改变抽运功率,激光晶体内的热透镜焦距相应地发生变化,这就等效于以上计算中不同的辅助透镜的焦距值。在不同抽运功率下,观察输出光束的形状,记录输出光束为圆形时的抽运功率,此时热透镜焦距的值即为图 2 中交点 E 对应的辅助透镜的焦距,即得到了输出光斑为圆形时对应抽运功率下热透镜焦距的值。改变激光腔分臂 a 的长度,重复以上操作,即可得出其他抽运功率下的热透镜焦距值。

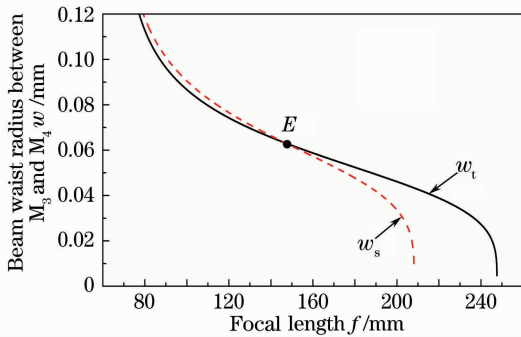


图 2 测量原理

Fig. 2 Measuring principle

2.2 测量步骤

2.2.1 计算辅助透镜的焦距与腔长的关系

根据 2.1 节描述的测量原理,测量的第一步是构建一个像散稳定腔。用 $ABCD$ 矩阵计算在确定参数的测量腔中交点 E 对应的辅助透镜焦距值。分臂 a 长度的变化对测量腔模式参数的影响最为明显,因此选取不同的分臂 a 长度,并计算对应分臂 a 长度下交点 E 对应的辅助透镜焦距值。图 3 是选取 2.1 节列出的测量腔参数时,得到的辅助透镜焦距 f 与分臂 a 长度的关系。如果被测激光晶体的热透镜焦距不在此范围内,可调整谐振腔的参数以实

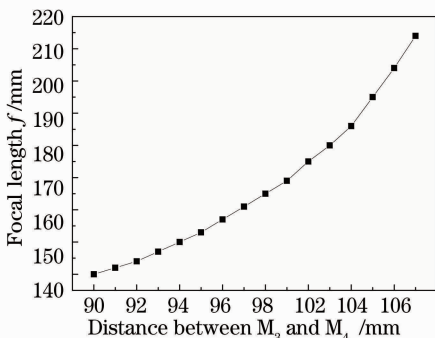


图 3 辅助透镜焦距与分臂 a 长度的关系

Fig. 3 Focus of accessory lens versus cavity length

现其他范围热透镜焦距的测量。

2.2.2 测量抽运功率与腔长的关系

在 2.2.1 节描述的像散腔中插入激光晶体,准直闭合后,调节抽运功率,在垂直于输出光束传播方向上放置一块屏幕,观察输出光束的光斑形状。前后移动屏幕,当光传播方向上任意两点的光斑形状均为圆形时,表明此时的热透镜焦距使子午面与弧矢面内的腰斑相等,即图 2 中的交点 E 对应的工作状态。此时测量腔内增益介质的热透镜焦距与 2.2.1 节描述的辅助透镜焦距相等。记录对应的抽运功率和分臂 a 长度。按照 2.2.1 节列出的分臂 a 长度改变腔长,测量不同腔长下满足条件的抽运功率。

2.2.3 建立抽运功率与辅助透镜焦距的关系

建立了辅助透镜焦距与像散腔分臂 a 的长度的关系以及抽运功率与分臂 a 的长度的关系后,以像散腔分臂 a 的长度作为中间变量,就可建立起辅助透镜(等效为热透镜)的焦距与抽运功率的关系,测量得到不同抽运功率下增益介质的热透镜焦距。辅助透镜是为了分析问题的方便而引入的中间量,它与激光器工作时增益介质的热透镜对应。

上述测量方法的局限性在于,对于确定的像散腔参数,只能测量一定范围内的热透镜焦距。根据不同的像散腔参数对应着不同的谐振腔稳区的性质,如果要测量这一范围之外的热透镜焦距,可通过改变像散腔的参数来实现。一般来说,反射镜的曲率半径越大,光束在球面镜上的入射角越小,测量范围越大;反射镜的曲率半径越小,光束在球面镜上的入射角越大,测量范围越小。

3 测量方案及结果

为了减小测量误差,采用如图 4 所示的像散腔作为测量装置,该腔型与实际激光器所用的腔型一致^[18]。测量腔为对称腔型,由两个凸面镜(M_1 和 M_2)和两个凹面镜(M_3 和 M_4)组成。振荡光束在 4 个球面镜处的入射角均为 11.5° ,以产生明显像散。凹凸镜 M_1 是输入镜,曲率半径为 1500 mm,镀膜为凹面对 803 nm 减反,凸面对 803 nm 高透,对 1080 nm 高反。 M_2 是平凸镜,曲率半径为 1500 mm,镀有 1080 nm 高反膜。 M_3 是曲率半径为 100 mm 的平凹镜,凹面对 1080 nm 高反。 M_4 是曲率半径为 100 mm 的凹凸镜,其中凹面镀有 1080 nm 高反、540 nm 高透膜,凸面对 540 nm 减反,这种设计消除了输出镜 M_4 对输出光束参数可能造成的改变。抽运源采用光纤耦合的半导体激光器(Limo Inc., HLU32-F400-DL803-

EX826), 中心波长为 803 nm, 最大输出功率为 32 W, 光纤芯径 400 μm , 数值孔径 0.22. 光纤输出的光经望远镜(由焦距分别为 30 和 85 mm 的两个透镜组成)系统后聚焦到激光晶体内, 激光晶体处的抽运光光斑半径为 565 μm . 激光晶体是掺杂原子数分数为 0.4% 的 Nd:YAP 晶体, 它的尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 晶体的四周散热均匀. 两个凹面镜之间插入非临界相位匹配的 LBO 晶体, 将波长为 1080 nm 的基频光倍频为 540 nm 绿光, 便于实验中直接观察输出光斑的形状. 非临界相位匹配 LBO 晶体在倍频过程中不改变基频光的形状, 直接观察倍频光的光斑就能判断像散腔的工作状态是否对应交点 E. TGG 晶体和半波片(HWP)的作用是使测量腔内振荡光实现单向运转. 观察光斑的屏幕由一块平整度较好的平板充当.

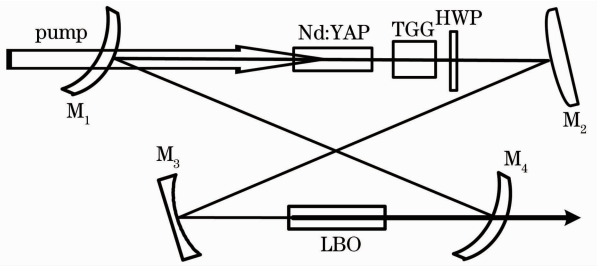


图 4 实验装置图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

测量腔的腔长参数如下: M_1 与 M_2 之间的距离为 130 mm, M_2 与 M_3 之间的距离为 125 mm, M_1 与 M_4 之间的距离为 125 mm, Nd:YAP 晶体放置于 M_1 与 M_2 中间, LBO 晶体放置于 M_3 和 M_4 中间. 改变腔镜 M_3 和 M_4 的距离(分臂 a 的长度), 其他分臂长度保持不变, 用 ABCD 矩阵法分析像散腔的模式特性. 表 1 列出不同分臂 a 长度下满足条件的辅助透镜焦距值, 对应图 2 中的交点 E.

表 1 分臂 a 长度与辅助透镜焦距和抽运功率的关系

Table 1 Cavity length versus the focal length of the accessorial lens and the incident pump power

Thermal focal length /mm	Distance between M_3 and M_4 /mm	Pump power /W
186	101.9	18.9
170	99	22.05
164	97.8	23.1
158	96.6	24.15
153	95	26.25
151	94.2	28.35
149	93.6	30.45

用上述腔长参数, 搭建图 4 所示谐振腔, 随着抽运功率的增加, 输出光束在屏幕上依次呈现图 5(a)~

(c)所示的形状. 在表 1 列出的某一确定分臂 a 长度下, 当输出激光光斑为圆形时, 前后移动屏幕, 保证在光传播方向上相距 1 m 的两个点上屏幕上光斑的形状均为圆形[即图 5(b)所示形状]. 在这一确定的分臂 a 长度下, 输出激光光斑为圆形时对应的热透镜焦距被认为与表 1 列出的辅助透镜焦距相等, 记录此时的抽运功率到表 1 中. 依照表 1 列出的数值改变分臂 a 长度, 重复同样的测量过程, 得到表 1 中各个抽运功率的值.

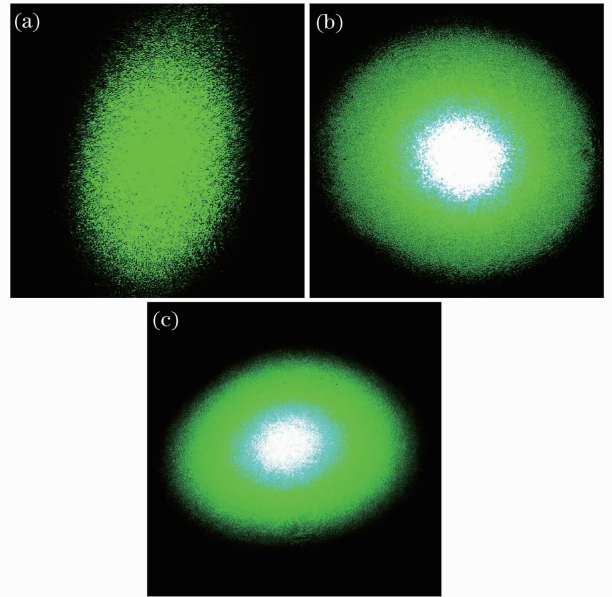


图 5 实验中观察到的实际光斑样式

Fig. 5 Light spot patterns of output beam

由于分臂 a 长度与辅助透镜焦距和抽运功率都具有——对应的关系, 借助分臂 a 长度作为中间变量, 建立起热透镜焦距与抽运功率的关系, 即测量得到不同抽运功率下的 Nd:YAP 晶体的热透镜焦距大小. 图 6 是最后的实验结果, 分离点为测量结果, 实线为用理论公式拟合得到的结果. 从图中可以看

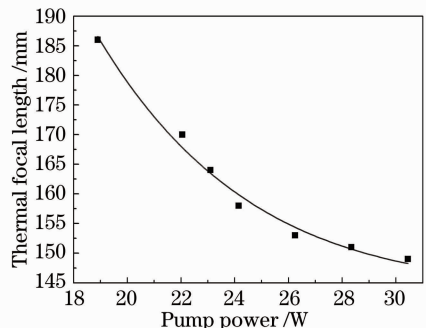


图 6 热透镜焦距随抽运功率的变化

Fig. 6 Thermal focal length versus pump power

出,测量结果与理论拟合基本一致。

如果表 1 列出的抽运功率范围不包括激光器工作时的抽运功率,可以通过改变分臂 a 的长度,重复上述测量过程。当实际抽运功率大于表 1 中的所有抽运功率值时,缩短分臂 a 的长度,重新测量;当实际抽运功率小于表 1 中的所有抽运功率值时,伸长分臂 a 的长度,重新测量即可。

热透镜焦距的测量精度由测量的误差即系统误差决定。在发散角反推法、狭缝扫描法、CCD 照相法和刀口法等测量方法中,系统误差主要由输出光束参数的测量误差决定。而在本系统中,系统误差主要由光斑形状的判断误差决定。需要测量的量从光束参数的绝对值简化为测量输出光束的相对形状,有助于提高测量精度。为了验证像散腔测量方法的精度,采用 5 种参数不同的像散腔,通过直接观察光斑形状,分别测量了 30.45 W 抽运功率下的热透镜焦距。测量结果如图 7 所示,用 5 种腔型下测量的均方根误差计算得到测量误差约为 3.8%。另外,也可以借助 M^2 仪或 CCD 等辅助设备来判断光斑形状是否为绝对圆光斑,来提高热透镜焦距测量的精度。

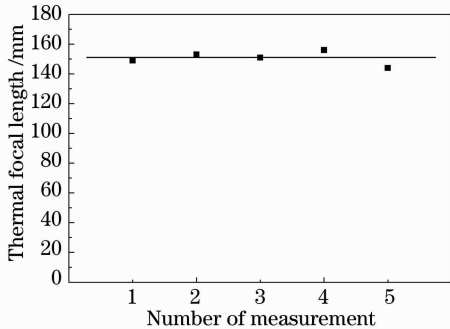


图 7 抽运功率为 30.45 W 时,5 种像散腔下测量得到的热透镜焦距

Fig. 7 Thermal focal length obtained in 5 measurements at the pump power of 30.45 W

4 结 论

提出了一种利用像散腔测量增益介质热透镜焦距的方法。利用像散腔的腔长作为中间变量,分别建立起热透镜焦距与腔长的关系以及抽运功率与腔长的关系,得到热透镜焦距与抽运功率的关系,即可测量得到增益介质的热透镜焦距。将该测量结果用于内腔倍频单频 Nd:YAP 激光器的设计,同时获得最高 4.5 W 的单频 540 nm 激光输出和 1.5 W 的 1080 nm 激光输出^[18]。通过激光器优化过程中实验

结果和理论分析对比,容易判断该测量结果能准确反映激光器实际工作中的热透镜焦距值。在用该方法测量时,激光器的工作状态与激光器运转时的工作状态相似,是一种较理想的热透镜焦距测量方案,尤其适用于全固态环形腔单频激光器中激光晶体热透镜焦距的测量。但需要说明的是,该方法是以增益介质各个方位上热透镜焦距相等为前提的,即测量过程中只考虑了谐振腔的像散,并没有考虑增益介质自身的热透镜像散。因而它只适用于热效应轴对称时热透镜焦距的测量。

参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Transl., Beijing: Science Press, 2002. 363~364
克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译, 北京: 科学出版社, 2002. 363~364
- 2 P. J. Hardman, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. High-power diode-bar-pumped intracavity-frequency-doubled Nd:YLF ring laser [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **156**: (1-3): 49~52
- 3 W. A. Clarkson. Thermal effects and their mitigation in end-pumped solid-state lasers [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, **34** (16): 2381~2395
- 4 B. Ozyfus, Q. C. Zhang. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers using primary degeneration modes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71** (18): 2590~2592
- 5 B. Ozyfus, J. Erhard. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers with transverse beat frequencies [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67** (10): 1361~1363
- 6 Ai Qingkang, Chang Liang, Chen Meng *et al.*. Thermal analysis of Nd:YVO₄ pumped by 808 nm and 888 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38** (4): 0402001
艾庆康, 常亮, 陈檬等. 808 nm 与 888 nm 抽运 Nd:YVO₄ 热效应分析 [J]. *中国激光*, 2011, **38** (4): 0402001
- 7 W. Koechner. Thermal lensing in a Nd:YAG laser rod [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9** (11): 2548~2553
- 8 Geng Aichong, Zhao Ci, Bo Yong *et al.*. A method for measuring thermal focal length of LD-side-pumped laser crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57** (11): 6987~6991
耿爱丛, 赵慈, 薄勇等. 一种测量二极管侧面抽运固体激光器热焦距的方法 [J]. *物理学报*, 2008, **57** (11): 6987~6991
- 9 F. Song, C. B. Zhang, X. Ding *et al.*. Determination of thermal focal length and pumping radius in gain medium in laser-diode-pumped Nd:YVO₄ lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81** (12): 2145~2147
- 10 Xiang Zhen, Fu Xin, Ge Jianhong. A method for measuring thermal lens focal length of end-pumped Nd:GdVO₄ crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36** (11): 3031~3034
项震, 付鑫, 葛剑虹. 一种测量端面抽运 Nd:GdVO₄ 晶体热透镜焦距的方法 [J]. *中国激光*, 2009, **36** (11): 3031~3034
- 11 J. L. Blows, J. M. Dawes. Thermal lensing measurements in line-focus end-pumped neodymium yttrium aluminium garnet using holographic lateral shearing interferometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **83** (6): 2901~2906
- 12 Pan Sunqiang, Liu Chong, Zhao Zhigang *et al.*. Thermal effects and thermal focal length measurement of laser diode end-pumped solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37** (10): 2445~2450

- 潘孙强,刘 崇,赵智刚 等. 激光二极管端面抽运固体激光器的热效应和热透镜焦距测量[J]. 中国激光,2010, **37**(10): 2445~2450
- 13 Guo Ruixiang, Li Fengqin, Xie Changde *et al.*. Method for indirect measuring thermal focal length of laser crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8): 721~724
郭蕊香,李凤琴,谢常德 等. 一种间接测量激光器热焦距的方法 [J]. 中国激光,2001, **A28**(8): 721~724
- 14 Zheng Jia'an, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Thermal lens measurement of LD-end-pumped solid state laser with stable resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8): 717~720
郑加安,赵圣之,王青圃 等. 稳腔固体激光器运转时热透镜焦距的测量[J]. 中国激光,2001, **A28**(8): 717~720
- 15 B. Neuenschwander, R. Weber, H. P. Weber. Determination of the thermal lens in solid-state lasers with stable cavities[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(6): 1082~1087
- 16 Yang Yongming, Wen Jianguo, Wang Shiyu *et al.*. The thermal lens focus of the end-pumped Nd:YAG laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1769~1772
杨永明,文建国,王石语 等. LD端面抽运 Nd:YAG 激光器中的热透镜焦距[J]. 光子学报,2005, **34**(12): 1769~1772
- 17 Lü Baida. *Laser Optics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 386~390
吕百达. 激光光学[J]. 北京: 高等教育出版社,2003. 386~390
- 18 Y. J. Wang, Y. H. Zheng, C. D. Xie *et al.*. High-power low-noise Nd:YAP/LBO laser with dual wavelength outputs [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2011, **47**(7): 1006~1013