

文章编号: 0258-7025(2010)10-2445-06

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

潘孙强¹ 刘崇^{1*} 赵智刚¹ 董延涛¹ 相方莉² 葛剑虹¹ 项震¹ 陈军¹

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)
² 浙江长征职业技术学院, 浙江 杭州 310023)

摘要 激光二极管(LD)端面抽运固体激光器的热效应是影响激光输出特性和系统综合性能的重要因素,因此准确的热透镜焦距测量是谐振腔设计的重要前提。从热传导方程入手,计算了 LD 端面抽运晶体的温度梯度分布,求出探测光束经过晶体后的相位差分布,通过傅里叶变换得到探测光的夫琅禾费衍射图样。基于上述理论模型,提出了一种利用探测光的夫琅禾费衍射图样测量热透镜焦距的新方法,可实时在线测量。由夫琅禾费衍射图样求出光程差,进而由光程差可求出激光晶体的热透镜焦距。实验测量了激光晶体的热透镜焦距,并与非稳腔法实验数据进行对比,证明了这种方法的可行性。

关键词 激光器;端面抽运固体激光器;热透镜焦距;夫琅禾费衍射

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2445

Thermal Effects and Thermal Focal Length Measurement of Laser Diode End-Pumped Solid-State Lasers

Pan Sunqiang¹ Liu Chong¹ Zhao Zhigang¹ Dong Yantao¹ Xiang Fangli²
Ge Jianhong¹ Xiang Zhen¹ Chen Jun¹

(¹ The State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)
² Zhejiang Changzheng Professional & Technical College, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract Thermal effects of laser diode (LD) end-pumped solid-state laser are important factors, which affect the laser output characteristics and the system performance. The accurate thermal focal length measurement is an important prerequisite for resonator design. The temperature gradient distribution of LD end-pumped solid-state laser is calculated with the heat conduction equation. The phase difference and the Fraunhofer diffraction pattern of the probe laser are obtained. Based on the above theoretical model, a new method by means of Fraunhofer diffraction pattern of probe laser to determine the thermal focal length is presented, which enables real-time on-line measurement. The optical path difference is calculated from the Fraunhofer diffraction pattern of probe laser, and then the thermal focal length is calculated from the optical path difference. The thermal focal length of laser crystal is measured experimentally, and the feasibility of the method is proved by comparing with the experimental values measured by unstable cavity method.

Key words lasers; end-pumped solid-state lasers; thermal focal length; Fraunhofer diffraction

1 引言

激光二极管(LD)端面抽运固体激光器的抽运功率密度非常高,热效应也十分严重。热效应中的

热透镜效应对激光器的输出功率和光束质量有很大影响^[1~8],为了消除热透镜对激光器性能的影响,首先需要对热透镜焦距进行测量。目前已有多种测量

收稿日期:2009-11-10;收到修改稿日期:2010-01-04

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(60908013)资助课题。

作者简介:潘孙强(1986—),男,博士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail:pansunqiang@gmail.com

导师简介:陈军(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事激光与非线性光学方面的研究。E-mail:chenjun1@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail:chongliu78@hotmail.com

热透镜焦距的方法:直接探测法^[9]、非稳腔法^[10]、波前测量法^[11]、相干检测法^[12,13]等。

本文提出了一种利用探测光的夫琅禾费衍射图样测量热透镜焦距的方法。首先计算了 LD 端面抽运情况下激光晶体横截面上的温度分布,进而得到理想的探测光经过晶体后的相位差分布,然后计算出探测光在远场的夫琅禾费衍射图样。通过对衍射图样的分析,得到了由衍射图样计算热透镜焦距的方法,最后用实验结果验证了该方法测量热透镜焦距的可行性。

2 理论模型

利用探测光的夫琅禾费衍射图样测量热透镜焦距的原理图如图 1 所示。图 1 中的长方体为激光晶体,边长分别为 a, b, c ;直径较小的圆柱体表示抽运光,直径较大的圆柱体表示探测光。激光晶体吸收

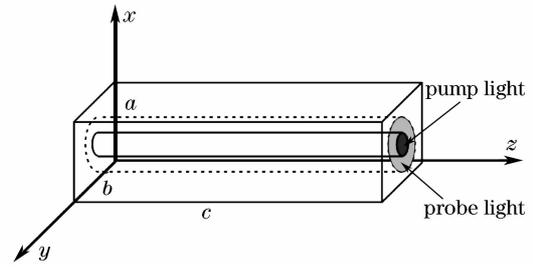


图 1 利用探测光的夫琅禾费衍射图样测量热透镜焦距的原理图

Fig. 1 Principle diagram by means of Fraunhofer diffraction pattern of probe laser to determine the thermal focal length

抽运光,导致温度梯度分布,进而引起折射率梯度分布,探测光经过激光晶体后产生相位差分布,在远场形成与热效应相关的夫琅禾费衍射图样。

现建立理论模型。LD 端面抽运激光晶体内的温度分布 $T(x, y, z)$ 满足的热传导方程为^[14]

$$K_x \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} = -S(x, y, z), \quad (1)$$

式中 K_x, K_y, K_z 为晶体 x, y, z 方向的热导率。 $S(x, y, z)$ 为晶体内的热流密度分布函数,假定 LD 抽运光束为高斯光,则有^[14]

$$S(x, y, z) = Q_0 \exp\left\{-2\left[\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2\right]/w_p^2\right\} \exp(-\gamma z), \quad (2)$$

式中

$$Q_0 = \frac{2\eta P \gamma}{\pi w_p^2 [1 - \exp(-\gamma c)] \operatorname{erf}\left(\frac{a\sqrt{2}}{2w_p}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{b\sqrt{2}}{2w_p}\right)}, \quad (3)$$

式中 η 为热产生系数, P 为晶体吸收的总功率,可近似为抽运功率, w_p 为抽运光束腰半径, γ 为吸收系数, a, b, c 为晶体尺寸。 $\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数,定义为 $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ 。

激光晶体的温度分布 $T(x, y, z)$ 满足边界条件为^[14]

$$\begin{cases} K_z \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = h_a [T(x, y, z=0) - T_0], \\ K_z \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=c} = h_a [T(x, y, z=c) - T_0], \\ T(x=0, y, z) - T_0 = T(x=a, y, z) - T_0 = 0, \\ T(x, y=0, z) - T_0 = T(x, y=b, z) - T_0 = 0, \end{cases} \quad (4)$$

式中 h_a 为晶体端面的热传导系数, T_0 为晶体侧面表面温度。

将(2)式代入(1)式,再由边界条件可解得激光晶体内部与边界上的温度差分布为^[14]

$$\Delta T(x, y, z) = T(x, y, z) - T_0 = \sum_{m,n=1}^{\infty} T_{mn}(z) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right), \quad (5)$$

式中

$$T_{mn}(z) = A_{mn}^+ \exp(\Gamma_{mn} z) + A_{mn}^- \exp(-\Gamma_{mn} z) - B_{mn} \exp(-\gamma z), \quad (6)$$

$$A_{mn}^{\pm} = B_{mn} \frac{(K_z \Gamma_{mn} \pm h_a)(K_z \gamma - h_a) \exp(-\gamma c) - (K_z \Gamma_{mn} \mp h_a)(K_z \gamma + h_a) \exp(\mp \Gamma_{mn} c)}{(K_z \Gamma_{mn} - h_a)^2 \exp(-\Gamma_{mn} c) - (K_z \Gamma_{mn} + h_a)^2 \exp(\Gamma_{mn} c)}. \quad (7)$$

$$B_{mm} = \frac{4Q_0 p_m q_n}{abK_z(\gamma^2 - \Gamma_{mm}^2)}, \quad (8)$$

$$q_n = \frac{\sqrt{2\pi}\omega_p}{2} \exp[-n^2\pi^2\omega_p^2/(8b^2)] \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \times \operatorname{Re}\left[\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}b}{2\omega_p} + i\frac{\sqrt{2}n\pi\omega_p}{4b}\right)\right], \quad (9)$$

$$\Gamma_{mm}^2 = \frac{K_x}{K_z}\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \frac{K_y}{K_z}\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2, \quad (10)$$

$$p_m = \frac{\sqrt{2\pi}\omega_p}{2} \exp[-m^2\pi^2\omega_p^2/(8a^2)] \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \times \operatorname{Re}\left[\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}a}{2\omega_p} + i\frac{\sqrt{2}m\pi\omega_p}{4a}\right)\right]. \quad (11)$$

由于热效应产生的温度梯度分布,一束理想的探测光束经过这样的激光晶体后,其波前与理想平面波波前存在着光程差(OPD) δ ,其微分形式为^[9]

$$\frac{d}{dz}\delta(x,y,z) = \frac{dn}{dT}\Delta T(x,y,z) + n_0\epsilon_{zz} + \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{ij}}\epsilon_{ij}, \quad (12)$$

式中 $\epsilon_{zz} = (1 + \mu)\alpha_T\Delta T(x,y,z)$ 为轴向应变, μ 为泊松比, α_T 为热膨胀系数。(12)式右侧第一项为折射率随温度变化产生的折射率梯度分布,第二项为轴向应变引起的晶体端面形变,第三项为热致双折射。对于自然双折射晶体,热致双折射引起的径向和切向折射率改变比晶体自身的双折射要小得多^[12],可以忽略不计,因此不用考虑第三项,只考虑前两项。对(12)式积分,可得温度梯度分布导致的光程差为

$$\Delta\delta = \int_0^c \left[\frac{dn}{dT}\Delta T(x,y,z) + n_0\epsilon_{zz} \right] dz = \int_0^c \left[\frac{dn}{dT} + n_0(1 + \mu)\alpha_T \right] \Delta T(x,y,z) dz. \quad (13)$$

光程差 $\Delta\delta$ 乘以探测光传播常数 $k = 2\pi/\lambda$,可得理想探测光束经过晶体后的相位差

$$\Delta\phi(x,y) = k\Delta\delta. \quad (14)$$

假定探测光束为高斯光,进入激光晶体前的场强分布为

$$E(x,y) = E_0 \exp[-(x^2 + y^2)/\omega_g^2], \quad (15)$$

式中 ω_g 为探测光束的束腰半径。探测光束经过激光晶体后的场强分布为

$$E'(x,y) = E_0 \exp[-(x^2 + y^2)/\omega_g^2] \times \exp[-i\Delta\phi(x,y)], \quad (16)$$

对 $E'(x,y)$ 作傅里叶变换,可以得到探测光经过晶体后的夫琅禾费衍射图样。

对以上模型作数值计算。使用的激光晶体为掺杂原子数分数0.3%,尺寸4 mm×4 mm×10 mm的Nd:GdVO₄,其吸收系数为 $\gamma = 3.9 \text{ cm}^{-1}$,折射率 $n_0 = 2.19$,热导率 $K_c = 11.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,热光系数 $dn/dT = 4.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,热膨胀系数 $\alpha_T = 4.43 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,泊松比 $\mu = 0.28$,以上参数来自文献^[15]。抽运光波长 $\lambda_p = 808 \text{ nm}$,抽运功率 $P = 40 \text{ W}$,束腰半径 $\omega_p = 400 \text{ }\mu\text{m}$ 。探测光束为 $\lambda_g = 532 \text{ nm}$ 绿光,束腰半径 $\omega_g = 1 \text{ mm}$,固体激光器输出激光波长 $\lambda_l = 1064 \text{ nm}$ 。热产生系数 $\eta = 0.4$ 。经计算,晶体中心处的最高温度与侧面边界温度之差为161 K,探测光束经过晶体后的相位差如图2所示,相位差最大值 $\Delta\phi_{\max}$ 为 32.2π ,换算成光程差约为

8.56 μm 。对经过晶体后发生相位差改变的探测光束场强分布(16)式作傅里叶变换,得到其远场夫琅禾费衍射图样,如图3所示。

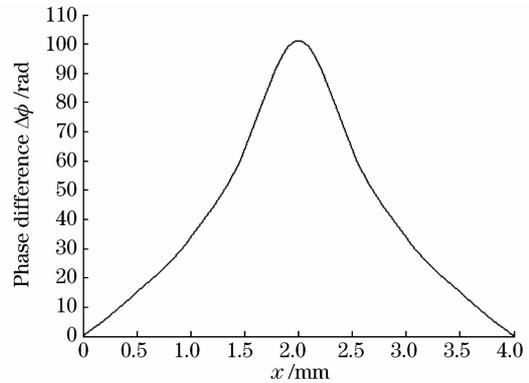


图2 探测光束经过晶体后的相位差

Fig. 2 Phase difference of probe laser



图3 探测光夫琅禾费衍射图样

Fig. 3 Fraunhofer pattern of probe laser

3 热透镜焦距的计算

现由探测光夫琅禾费衍射图样求取激光晶体的热透镜焦距。当光程差(13)式随抽运功率 P 改变时,激光晶体的热透镜焦距相应改变,探测光的夫琅禾费衍射图样也会相应改变。由探测光的夫琅禾费衍射图样求出光程差,进而由光程差求出激光晶体的热透镜焦距。

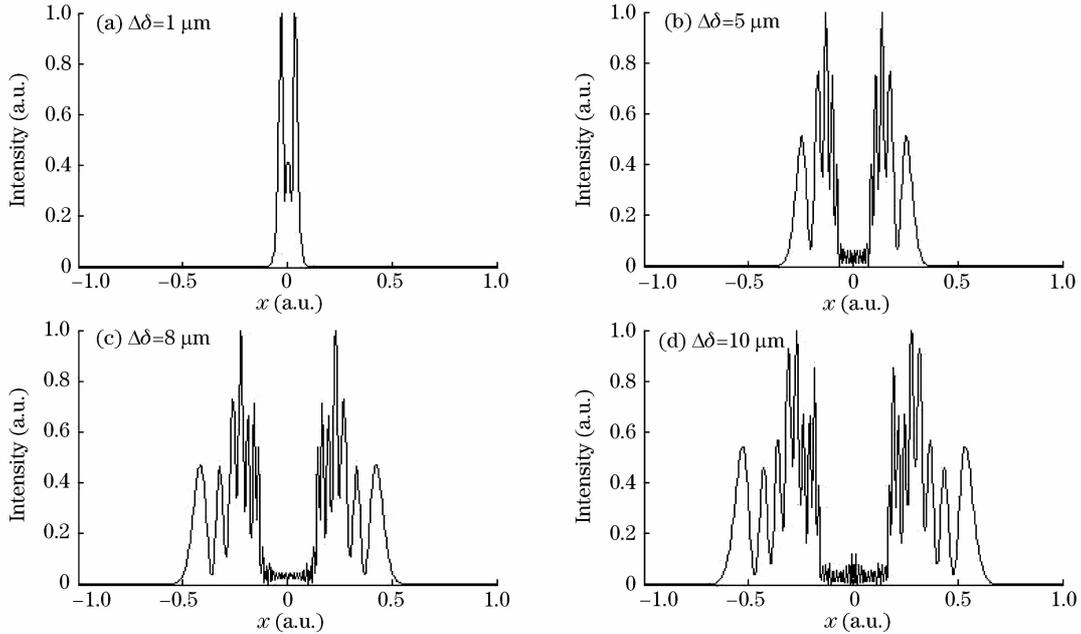


图 4 不同光程差 $\Delta\delta$ 下的夫琅禾费衍射图样

Fig. 4 Fraunhofer pattern of different optical path $\Delta\delta$

由图 4 可知,衍射图样的暗、亮环数与光程差之间存在着关系,环数越多,光程差越大。对于实验得到的衍射图样,往往无法观察到中心区域的衍射环,因此不能用环数确定光程差。现用最外层的第二个暗环(由外向内数)与第一个暗环的直径之比 S 来确定光程差。给定不同的光程差 $\Delta\delta$,再对 $E'(x,y)$ 作傅里叶变换得到夫琅禾费衍射图样,可以由衍射图样求出不同光程差 $\Delta\delta$ 的暗环直径之比 S ,如图 5 所示。对图 5 中的计算值进行拟合,得到 $\Delta\delta$ 与 S 的关系式

$$\Delta\delta = A/(S - B), \tag{17}$$

式中 $A = -0.9167 \times 10^{-6}$, $B = 0.9231$,由此确定了衍射图样与光程差的关系。

求出衍射图样与光程差 $\Delta\delta$ 的关系后,接着确定光程差 $\Delta\delta$ 与热透镜焦距的关系。在抽运光半径范围内,光程差分布直接表现为对振荡激光的热透镜效应。在抽运光半径范围外,光程差分布对振荡激光影响不大,因此只需要考虑抽运光半径范围内的热透镜效应。在抽运光半径范围内,对光程差分布作四次项拟合,可以得到比较精确的结果。利用

首先计算光程差与衍射图样的关系。改变光程差,则(16)式中探测光场强分布 $E'(x,y)$ 的相位差分布也发生改变,再对 $E'(x,y)$ 作傅里叶变换得到夫琅禾费衍射图样,图 4 为不同光程差下得到的衍射图样。由图 3 可知不同的光程差对应不同的衍射图样。

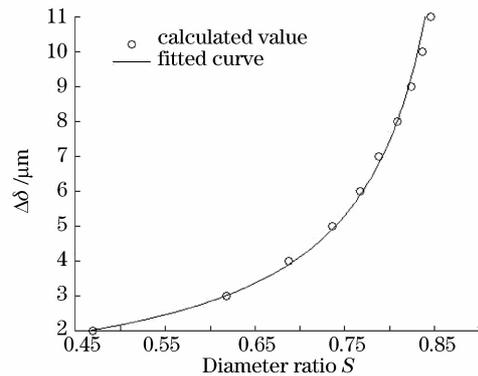


图 5 暗环直径比 S 与光程差 $\Delta\delta$ 的关系

Fig. 5 Relation between diameter ratio S of dark ring and $\Delta\delta$

四次项拟合方法以及理论模型这一节中的参数,计算出热透镜焦距与光程差的关系为

$$f = C/\Delta\delta, \tag{18}$$

式中 $C = 0.8642 \times 10^{-6}$ 。

联立(17)与(18)式,激光晶体热透镜焦距 f 与衍射图样的暗环直径之比 S 的关系为

$$f = C(S - B)/A, \quad (19)$$

式中参数 A, B, C 与激光晶体的各项参数、抽运功率以及抽运光和探测光的束腰半径有关。

4 实验装置及结果

实验装置如图 6 所示, 固体激光器的谐振腔为

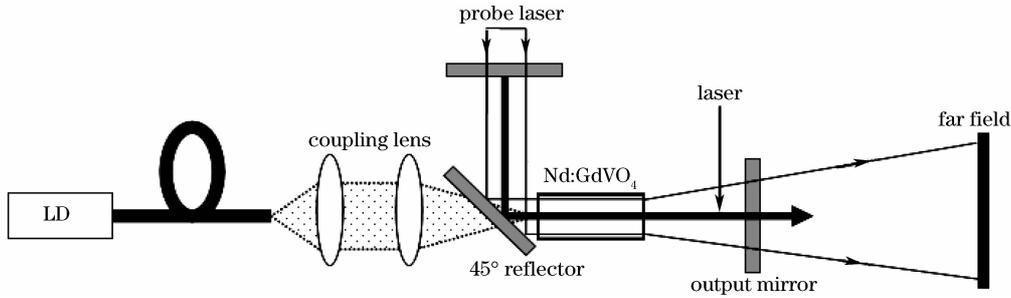


图 6 实验装置

Fig. 6 Experimental setup

“L”型, 抽运光由耦合透镜会聚到 Nd:GdVO₄ 晶体中, 晶体边界温度设为 20 °C。抽运光的束腰半径为 400 μm, 探测光束的半径为 1 mm。探测光由全反镜进入谐振腔, 从输出镜输出, 并在远场形成夫琅禾费衍射图样。

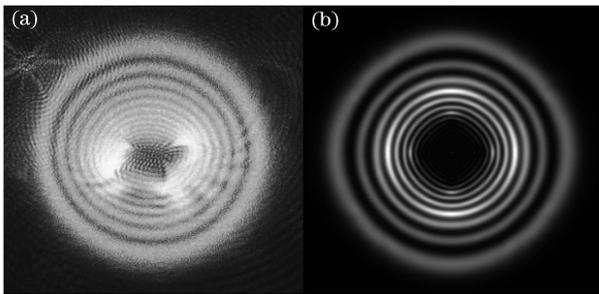


图 7 40 W 抽运功率下的夫琅禾费衍射图样

(a) 实验得到的衍射图样, (b) 理论计算得到的衍射图样

Fig. 7 Fraunhofer patterns under 40 W pump power

(a) experimental diffraction pattern,
(b) theoretical calculated diffraction pattern

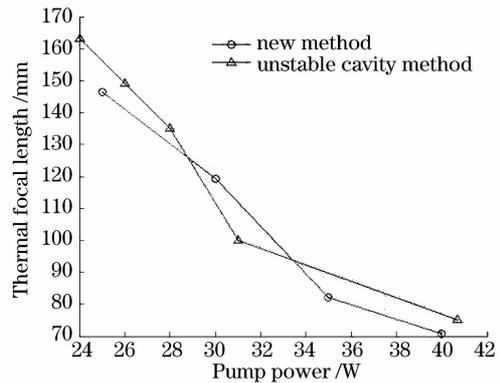


图 9 热透镜焦距与抽运功率的关系

Fig. 9 Relation between thermal focal length and pump power

当抽运功率为 40 W 时, 实验得到的夫琅禾费衍射图样如图 7(a) 所示, 理论计算得到的夫琅禾费衍射图样如图 7(b) 所示。可见理论计算与实验结果符合得比较好。

不同抽运功率下的衍射图样是不一样的, 实验中得到的远场衍射图样如图 8 所示。测量不同抽运功率下衍射图样的第二暗环与第一暗环直径之比 S , 再由 (19) 式即可计算出热透镜焦距。不同抽运功率下的热透镜焦距如图 9 所示。

图 9 中的三角形为非稳腔法测得的实验数据, 圆点为本文衍射法测得的实验数据。

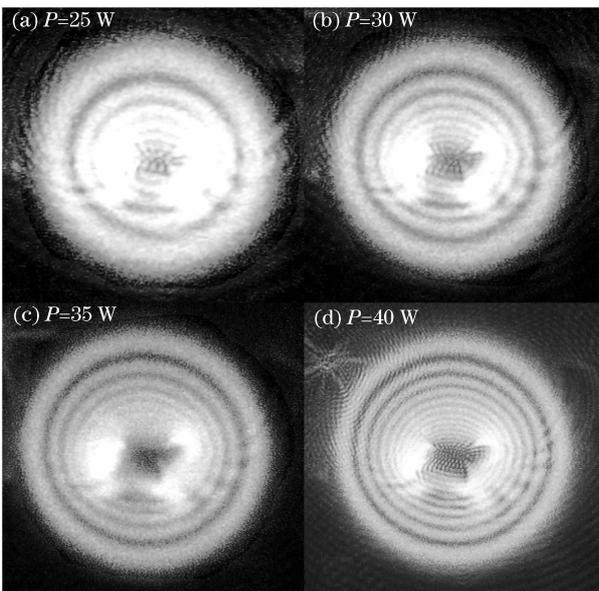


图 8 不同抽运功率下的衍射图样

Fig. 8 Diffraction patterns under different pump powers

5 结 论

提出了一种利用探测光的夫琅禾费衍射图样测量热透镜焦距的方法。通过计算激光晶体横截面上

的温度分布和探测光束经过晶体后的相位分布,计算得到了探测光在远场的夫琅禾费衍射图样。通过对衍射图样的分析,得到了由衍射图样计算热透镜焦距的方法。实验中采用 Nd:GdVO₄ 作为激光增益介质,测量了不同抽运功率下的热透镜焦距。该方法实验测量值与非稳腔法实验测量值符合得较好,验证了该方法用于测量热透镜焦距的有效性。

参 考 文 献

- Dong Yantao, Zhao Zhigang, Liu Chong *et al.*. Influence of thermal effects on polarizability and output character of TEM₀₀-mode of solid state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1759~1765
董延涛,赵智刚,刘崇等.热效应对固体激光器偏振特性和基模输出特性的影响[J].*中国激光*, 2009, **36**(7):1759~1765
- Wang Sha, Liu Chong, Chen Jun *et al.*. Influence of resonator structure of solid-state laser on thermal focal length measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1431~1435
汪莎,刘崇,陈军等.固体激光器腔型结构对热透镜焦距测量的影响[J].*中国激光*, 2007, **34**(10):1431~1435
- Liu Chong, Ge Jianhong, Xiang Zhen *et al.*. Thermal-induced birefringence-compensated laser system with two Nd:YAG rods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11):1483~1487
刘崇,葛剑虹,项震等.双棒串接补偿热致双折射效应激光谐振腔[J].*中国激光*, 2007, **34**(11):1483~1487
- Z. Xiang, J. Ge, Z. Zhao *et al.*. 1.9 W flash-lamp-pumped solid-state 266 nm ultraviolet laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(6):502~504
- Z. Zhao, Y. Dong, C. Liu *et al.*. A 15.1 W continuous wave TEM₀₀ mode laser using a YVO₄/Nd:YVO₄ composite crystal [J]. *Laser Physics*, 2009, **19**(11):2069~2072
- Liu Danping, Hu Yu. Experimental study of overcoming laser rod's thermal effect with stimulated Brillouin scattering phase conjugation mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 184~187
刘丹平,胡渝.利用受激布里渊散射相位共轭镜克服激光棒热效应的实验研究[J].*中国激光*, 2005, **32**(2):184~187
- Cheng Xiaojin, Niu Jinfu, Xu Jianqiu. Thermal effects in partially laser-diode-pumped slab lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6):854~858
程小劲,牛金富,徐剑秋.部分抽运的板条激光器的热效应分析[J].*光学学报*, 2006, **26**(6):854~858
- Wang Nuanrang, Wang Canzhao, Yuan Ligang *et al.*. 138 W narrow pulse-width solid-state green laser operation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1017~1020
王暖让,王灿召,苑利钢等.138 W窄脉宽全固态绿光激光器[J].*中国激光*, 2006, **33**(8):1017~1020
- Yao Jianquan, Xu Degang. All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology [M]. Beijing: Science Press, 2007
姚建铨,徐德刚.全固体激光及非线性光学频率变换技术[M].北京:科学出版社, 2007
- B. Neuenschwander, R. Weber, H. P. Weber. Determination of thermal lens in solid-state lasers with stable cavities [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(6):1082~1087
- S. Chenai, F. Druon, F. Balembois *et al.*. Thermal lensing measurements in diode-pumped Yb-doped GdCOB, YCOB, YSO, YAG and KGW [J]. *Optical Material*, 2003, **22**(1):129~137
- C. Pfister, R. Weber, H. P. Weber. Thermal beam distortions in end-pumped Nd:YAG, Nd:GSGG, and Nd:YLF rods [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(7): 1605~1615
- Z. Xiong, Z. G. Li, N. Moore *et al.*. Detailed investigation of thermal effects in longitudinally diode-pumped Nd:YVO₄ lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(8): 979~986
- Mohammad Sabaeian, Hamid Nadgaran, Laleh Mousave. Analytical solution of the heat equation in a longitudinally pumped cubic solid-state laser [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(13): 2317~2325
- Yungsheng Huang, Hsienliang Tsai, Fangling Chang. Thermo-optic effects affecting the high pump power end pumped solid state lasers: Modeling and analysis [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **273**(2):515~525