

干涉条纹法测量 LD 端面泵浦 Nd:YAG 热透镜焦距*

杨永明^{1,2} 过 振¹ 王石语¹ 蔡德芳¹ 文建国¹ 王利波¹

(1 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2 西安建筑科技大学理学院, 西安 710055)

摘 要 研究了端面泵浦 Nd:YAG 晶体热透镜效应, 提出了一种新的测量热透镜的方法—干涉条纹法, 并通过理论估算与用此方法所测的热透镜焦距相比较, 表明此方法所测热透镜焦距随着泵浦光功率的增大二者越来越吻合, 验证了该方法的可靠性. 该方法解决了端泵 Nd:YAG 时, 由温度梯度, 热应力双折射和端面形变所引起的总的热透镜焦距难以测量的问题.

关键词 二极管泵浦固体激光器(DPL); 端面泵浦; 热透镜

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

0 引言

激光二极管泵浦固体激光器(DPL)由于其高效、稳定和结构紧凑等特点, 获得广泛应用. 随着泵浦功率的增加, 激光晶体的热效应对 DPL 性能的影响逐渐表现出来, 特别在大功率的情况下, 热效应严重地影响着 DPL 激光输出特性. 消除或利用热效应, 研究热透镜效应已成为国内外研究 DPL 的一个热点^[1-4].

二极管泵浦方式有端面泵浦和侧面泵浦. 在侧面泵浦中, 热透镜的测量通常采用 He-Ne 参考光通过介质, 测量参考光的变化, 计算热透镜焦距^[5]. 而在端面泵浦中, 不能直接测量其焦距, 前人采用的一种办法是测量谐振腔激光输出, 根据谐振腔参数推导计算热透镜焦距^[6,7], 这种间接测量热透镜的方法适合小功率输出, 大功率时要在探测设备前加衰减片, 测量结果误差大. 本文提出一种测量端面泵浦 Nd:YAG 热效应的方法——干涉条纹法测量热透镜焦距.

1 实验研究

1.1 实验装置

实验装置见图 1, 采用长春光机学院 30 W 带微透镜的激光二极管, 在水平方向其远场发散角为 6° , 竖直方向其远场发散角为 0.3° , 加柱面透镜使光束在

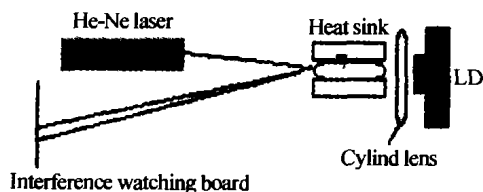


图 1 干涉条纹法测量热透镜实验装置

Fig. 1 The setup of measuring the heat lens using interference method

水平方向得到会聚, 以期在 Nd:YAG 中得到较高的功率密度. 采用美国进口的冷水循环泵冷却, 水温可任意设定, 误差控制在 -0.5°C — $+0.5^\circ\text{C}$.

在激光二极管端泵 Nd:YAG 时, 所用激光晶体规格为掺杂浓度为 1.1%, 大小 $\phi 3 \times 10$. 可用 He-Ne 光从另一端入射, 观察从晶体前后表面反射出的两束光, 它们在重合的区域中发生了明显的干涉现象, 出现明暗相间的条纹. 随着泵浦电流的增大, 其干涉条纹发生了明显的移动. 采用此形象直观的办法可测量由于温度梯度, 应力双折射和端面形变热效应引起的总的等效热透镜焦距.

1.2 实验过程和实验现象

干涉条纹法就是通过观测参考光的干涉条纹间接测量端面泵浦 Nd:YAG 热透镜焦距. 本实验中, 以 He-Ne 光作为参考光, 以小角度倾斜入射晶体前端面, LD 泵浦晶体后表面, 参考光在前后表面反射的两束光发生干涉, 见图 2; LD 泵浦电流未超过阈值电流时, 干涉条纹为直条纹, 没有条纹的移动和消失; LD 泵浦功率超过阈值电流时, 干涉条纹开始移动, 随着泵浦功率的增大, 干涉条纹向左侧移动并逐条消失, 左侧条纹消失的同时右侧有条纹涌出, 也就是说, 条纹的总数目保持不变; 每有一个条纹消失, 说明发生干涉的这两束光的光程差改变了一个波长, 光程差的改变对应于晶体折射率的改变, 而晶体折射率的改变是由 LD 端面泵浦晶体热效应引起, 所以可以通过观测干涉条纹来间接测量晶体热透镜效应.

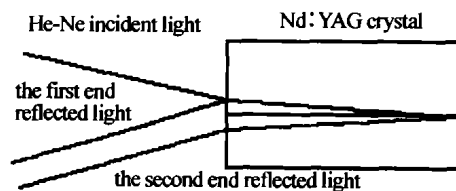


图 2 He-Ne 光在晶体中的光路图

Fig. 2 Optic road in Nd:YAG

另外, 随着泵浦功率的增大, 干涉条纹发生了移动并出现弯曲, 且泵浦功率越大, 条纹弯曲程度越厉害, 热效应越严重, 见图 3(泵浦电流为 22A).

*国防科技固体激光技术重点实验室基金项目资助(NO: 51456050104DZ0101)

Tel: 029-88202574 Email: yang19368@sina.com

收稿日期: 2004-07-02

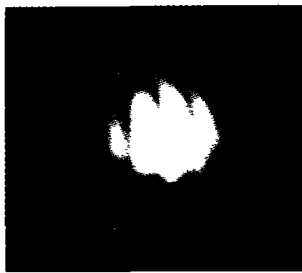


图3 参考光干涉条纹的弯曲 ($I = 22A$)
Fig.3 Interference strip curve($I = 22A$)

2 实验数据的处理

首先观察到消失条纹数目和泵浦电流有图 4 的关系. 而泵浦电流和泵浦功率关系如图 5, 可见 LD 的阈值电流为 13A.

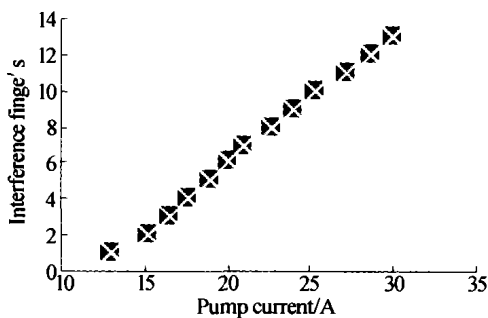


图4 Nd:YAG 晶体干涉条纹移动与泵浦电流关系
Fig.4 The movement number of trip VS current

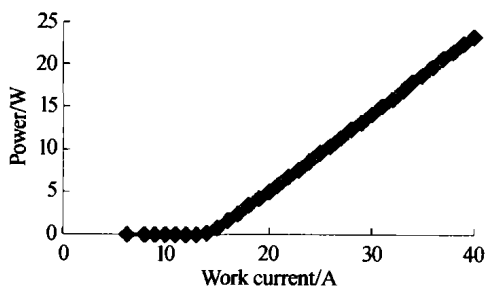


图5 泵浦电流和输出功率的关系
Fig.5 Work Current VS output power

2.1 干涉条纹法计算热透镜焦距

将 Nd:YAG 晶体等效为一薄透镜, 见图 6, 计算

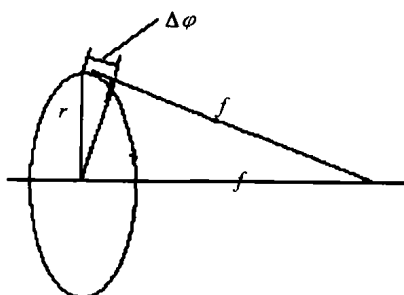


图6 等效薄透镜
Fig.6 Equivalent lens

通过晶体中心和边缘的光程差

$$\Delta\varphi = \sqrt{r^2 + f^2} - f \approx (f + \frac{r^2}{2f}) - f = \frac{r^2}{2f}$$

$$f = \frac{(R^2/2)}{\Delta\varphi} \quad (1)$$

由式(1)所得热透镜焦距为总的热透镜焦距.

由于从晶体泵浦面反射出去的光经过了晶体两次, 若将晶体的热效应等效为一个薄透镜 F , 则此反射光经过了两个这样紧靠在一起的薄透镜, 通过简单的计算可得, $F = 2f$, 式中, $\Delta\varphi$ 为发生干涉的两发射光的光程差, $\Delta\varphi = m\lambda$, R 为等效热透镜的半径, 由于热透镜等效于整个晶体内部的热效应, 故 $R = r$, 由此式可以计算不同泵浦功率下的等效热透镜焦距

$$F_m = R^2/m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

$$F = 3555.624 - 273.508 \text{ mm}$$

2.2 理论计算热透镜焦距

利用薄透镜组合透镜焦距公式将温度梯度、热应力双折射和端面形变所求的热焦距组合^[8], 参考文献[9]中式(7.29), 得到端面泵浦 DPL 的综合热透镜焦距计算公式

$$f = [1/(1/f_1 + 1/f_2 + 1/f_3)] = (\pi K_c w_p^2) / P_{ph} \cdot \{1/[(1 - \exp(-\alpha l)) dn/dT + (1 - \exp(-\alpha l)) \cdot 2n_0^3 \alpha_0 C_{r,\varphi} + (1 - \exp(-\alpha r_0)) \alpha_0 r_0 2(r_0 - 1)]\} \quad (3)$$

f_1 为温度梯度产生的热透镜; f_2 为热应力双折射产生的热透镜; f_3 为端面形变产生的热透镜. P_{ph} 为泵浦光功率的致热功率, r_0 为介质半径, α 为介质的吸收系数, w_p 为泵浦光光束宽度, l 为晶体棒长. Nd:YAG 的热导率 $K_c = 0.014 \text{ W}/(\text{mm} \cdot \text{k})$; 吸收系数 $d = 0.71/\text{mm}$; 折射率温度系数 $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; 热膨胀系数 $\alpha = 7.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 折射率 $n_0 = 1.823$; 代入式(3) 得到

$$f = \frac{1}{1/f_1 + 1/f_2 + 1/f_3} = \frac{\pi K_c w_p^2}{P_{ph}} \cdot \frac{1}{(85.01\% + 14.38\% + 0.6\%) \times 8.58 \times 10^{-6}} \quad (4)$$

理论计算值和实验计算值对比图如 7.

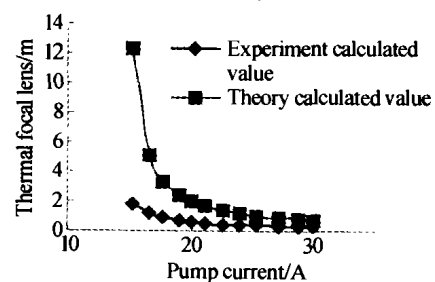


图7 总热透镜焦距的实验与理论值比较
Fig.7 Experiment and Theory calculated value of the thermal focal lens

可见, 在泵浦功率较小时, 热透镜效应表现不明显, 理论计算公式与实验测量有偏差, 理论公式应作一定的修正, 而随着泵浦功率的增加, 热透镜效应越来越显著, 而且与实验结果越来越吻合.

2.3 对干涉条纹弯曲的讨论

晶体前后端面反射的两束光发生干涉, LD 泵浦功率在小于 5 W 时, 干涉条纹是直条纹, 根据干涉原理, 每一条干涉亮条纹实质都是光程相同的点形成的; 大于 5 W 时, 晶体内部由于热效应折射率发

生了显著变化,折射率的变化导致晶体后端面反射的那一束光(以下简称光束 2)的光程发生了变化,因而原来与前端面反射的那一束光(以下简称光束 1)光程相同形成亮条纹的点现在变为不同了,使得条纹要发生变化. 晶体内部热效应为类透镜效应,由于透镜中心光程最大,沿透镜中心径向递减,并且由此产生的光程差与透镜半径成抛物线关系,所以对光束 2 而言,光程从左至右呈递增,原来与光束 1 上光程相同的点,现在光程变大了,与光束 1 上光程相同的点都在其左边,因此干涉亮条纹都向左弯曲,且呈抛物线型. 另外,晶体表面的形变也导致了条纹的弯曲.

3 结论

实验测量晶体中总的热透镜焦距的方法—干涉条纹法是通过让一束参考光从晶体端面泵浦的另一端入射,经前后端面反射后,相互干涉,观察其明或暗条纹的移动得知光程差的变化,从光程差的变化得到等效热透镜焦距的一种新方法. 通过与理论估算值比较,说明随着泵浦功率的增大,热效应的影响越来越大,而理论值与实验值越来越吻合. 此方法简单,直观,可行.

参考文献

- 1 郑加安,赵圣之,王青圃,等. 晶体热效应对 LD 端面泵浦固体激光器优化设计的影响. 光子学报,2001,30(6):724~726
Zheng J A, Zhao S Z, Wang Q P, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(6):724~729
- 2 张玲,杨少辰,李文博. LD 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器的热

- 效应研究. 激光与红外,2003,33(1):37~39
Zhang L, Yang S C, Li W B. *Laser & Infrared*, 2003, 33(1):37~39
- 3 朱广志,陈培锋,邹雪芬,等. 激光棒热透镜效应的有限元分析. 激光与红外,2003,33(6):437~439
Zhu G Z, Cheng P F, Zou X F, et al. *Laser & Infrared*, 2003, 33(6):437~440
- 4 Xiong Z, Li Z G, Nicholas M, et al. Detailed investigation of thermal effects in longitudinally diode-pumped Nd:YVO₄ lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(8):979~986
- 5 陈德东,杨爱粉,文建国等. 三向侧面泵浦固体激光器中热透镜的研究. 激光杂志,2002,23(5):26~27
Chen D D, Yang A F, Wen J G, et al. *Laser Journal*, 2002, 23(5):26~27
- 6 张潮波,宋峰,孟凡臻,等. 利用输出功率测量激光二极管端面抽运的固体激光器热透镜焦距. 物理学报,2002,51(7):1517~1520
Zhang C B, Song F, Meng F Z, et al. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(7):1517~1520
- 7 李强,王志敏,王智勇. 测量 Nd:YAG 激光器热透镜焦距的新方法. 光电子·激光,2004,15(3):263~266
Li Q, Wang Z M, Wang Z Y. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2004, 15(3):263~266
- 8 石顺祥,张海兴,刘劲松. 物理光学与应用光学. 第一版. 西安:西安电子科技大学出版社,2000. 345~346
Shi S X, Zhang H X, Liu J S. *Physical Optic and Applied Optic*. Xi'an: Xidian University Press, 2000. 345~346
- 9 W·克希耐尔,孙文江译文,程国祥译[美]《固体激光工程》. 北京:科学出版社,2002. 364
Koechner, W. *Solid-State Laser Engineering*. Translated by Song W J and Chen G X. Beijing: Science Press, 2002. 364

A New Method Called Interference Stripe Method For Measuring the Whole Thermal Focal Lens In LD End Pumped Nd:YAG Crystal

Yang Yongming^{1,2}, Guo Zhen¹, Wang Shiyu¹, Cai Defang¹, Wen Jianguo¹, Wang Libo¹

¹ School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071

² School of Science, Xi'an Univ. of Arch & Tech., Xi'an 710055

Received date:2004-07-12

Abstract The thermal lens effect in the end-pumped DPL has been discussed in this experiment. A new method to measure the whole thermal focal lens is found in this paper which is called interference stripe method. The result based this experiment method is agree with the theory result and with the develop of the pump power, they meet well deeply.

Keywords Diode pumped solid-state lasers; End-pumped; Thermal focal lens



Yang Yongming associate professor, was born on September 13, 1968 in Shaanxi Province, China. He received the B. A. degree in Physics from Shaanxi Normal University in 1989 and the M. S. degree in physics from Shaanxi Normal University in 1994. Now he has been working towards on the Ph. D. degree in optic engineering at School of Technical Physics, Xidian University. His research interests focus on the fields of thermal effects in diode pumped solid-state lasers.