

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0310-03

非线性光学晶体的热透镜效应

张 晶^{1,2,3}, 樊仲维^{3,4}, 毕 勇⁴, 石朝辉^{1,2,3}, 张 瑛³, 崔建峰^{1,2,3}, 裴 博^{3,4}, 赵剑波³

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
²中国科学院研究生院, 北京 100039
³北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085
⁴中国科学院光电研究院, 北京 100080

摘要 对三种具有商业价值的非线性光学晶体——LBO, KTP, BBO 热透镜效应进行了分析研究, 通过具体理论计算, 给出了三种非线性光学晶体的热透镜焦距在保持输出功率没有变化的情况下随入射到晶体表面的光斑大小的变化曲线, 并且理论计算出在平均功率为 20 W 的绿光激光器中 KTP 晶体在入射基频光斑 $w=368 \mu\text{m}$ 的热焦距为 852 mm, 实验中测得的 M^2 值与理论计算吻合较好。

关键词 材料; 非线性光学晶体; 热透镜效应; 热焦距; M^2 因子

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

Thermal-Lens Effect of Nonlinear Optical Crystals

ZHANG Jing^{1,2,3}, FAN Zhong-wei^{3,4}, BI Yong⁴, SHI Zhao-hui^{1,2,3}, ZHANG Ying³,
CUI Jian-feng^{1,2,3}, PEI Bo^{3,4}, ZHAO Jian-bo³

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jiling 130033, China
² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ Beijing GK Laser Technology Co. Ltd, Beijing 100085, China
⁴ The Chinese Academy of Sciences Opto-Electronic Group, Beijing 100080, China

Abstract A discuss on the thermal-lens effect of three nonlinear optical crystals of great commercial value——LBO, KTP and BBO was given in the paper. The curve that the focal length of three crystals mentioned above varying with the spot size of fundamental frequency delivered on the face of the nonlinear optical crystals was also given. At the same time, KTP thermal focal length was calculated 852 mm on the condition that the incident spot size $w=368 \mu\text{m}$ according to 20 W output green laser which used KTP crystal as its double frequency crystal, which agrees well with the experimental data.

Key words materials, nonlinear optical crystal, thermal-lens effect, thermal focal length, M^2 factor

1 引 言

半导体激光抽运的全固态绿光激光器在激光医学、信息存储、水下通信、光谱技术、彩色投影、导航、激光武器等许多领域有着重要的应用^[1]。特别是近几年, 随着千瓦级激光二极管阵列的出现, 以半导体激光抽运的全固态绿光激光器的输出功率也得到了大幅度的提高。

由于非线性光学晶体在谐波产生过程中会吸收基波能量, 使得非线性晶体受到高功率激光辐射产

生变频的同时, 也必然会引起晶体通光方向上的局域升温^[2]。温升使得这一区域内的晶体折射率发生改变, 降低了输出光束的光束质量。理论分析了 KTP, LBO, BBO 三种倍频晶体的热致双折射导致晶体产生的热透镜效应, 并从实验进行了验证。

2 热透镜效应分析

2.1 非线性晶体热透镜理论

假设晶体是在稳态热环境下工作, 根据激光晶

基金项目: 国家 863 计划(2002AA311020)和北京市科技计划(H020420060110)资助课题。

作者简介: 张 晶(1981—), 女, 内蒙古人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 主要从事固体激光技术及可调谐激光技术的研究。E-mail: zhangjing_927@tom.com

体的热透镜理论^[3],通过温度分布方程

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{A}{\kappa} = 0, \quad (1)$$

式中 κ 为热导率; A 为单位体积均匀发热的速率, 可以表示为

$$A = \eta P_{in} / (\pi r_0^2 L), \quad (2)$$

P_{in} 为抽运光功率; η 为耗散在晶体的热功率占基波光功率的百分比; L 为晶体的长度; r_0 为基波入射到非线性光学晶体上的光斑半径。总的折射率分布可写为^[4]

$$n(r) = n_0 \left[1 - \frac{Q}{2K} \left(\frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_{r,\theta} \right) r^2 \right], \quad (3)$$

总的热透镜焦距为

$$f = \frac{K}{QL} \left[\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_{r,\theta} + \frac{\alpha r_0 (n_0 - 1)}{L} \right]^{-1}, \quad (4)$$

其中第一项代表由温度梯度引起的热透镜焦距, 第二项代表由热致应力产生的热透镜焦距, 第三项代表由热致应力导致的端面形变产生热焦距^[5]。但是由于非线性光学晶体产生热效应的范围仅是几百微米, 比晶体直径小得多, 所以, 可以忽略由热致应力和端面变形产生的折射率的变化, 因此, 对于非线性光学晶体, 总的热焦距为

$$f = \frac{K}{QL} \left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} \right)^{-1}. \quad (5)$$

2.2 三种非线性光学晶体的热透镜分析

分析之前, 首先建立非线性晶体的热分析模型:

1) 晶体的两端面满足绝热假设。由于非线性晶体的热导率与空气交换系数相比较很大, 因而可忽略晶体端面流出的热量。

2) 由于晶体内的基波光强度远大于倍频光强度, 同时, 非线性光学晶体对基波的吸收率远大于对倍频光的吸收率, 因此可以忽略晶体对倍频光吸收产生的热量。

3) 基波光强具有不变性。

4) 三种晶体尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 冷却

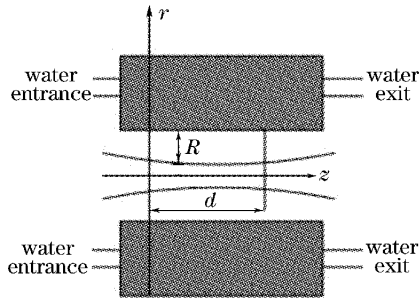


图 1 晶体水冷结构示意图

Fig. 1 Sketch map of cooling structure of crystal

水温为 $21 \text{ }^\circ\text{C}$, 二倍频晶体的水冷结构如图 1 所示。激光输出绿光功率为 16 W , 倍频效率为 80% , 转化为腔内条件下功率为 180 W 。

图 1 为二倍频晶体的水冷结构图, z 方向为光轴方向, R 为晶体半径, 采用水循环冷却, 水冷结构由进水口、出水口及装夹晶体部分组成。

计算中三种非线性光学晶体的参量如表 1^[5]。

表 1 三种倍频晶体的参量表

Table 1 Parameter chart of three crystals

| | LBO | BBO | KTP |
|---|---------|-------|-------|
| Density $/(g/cm^3)$ | 2.47 | 3.85 | 3.01 |
| Conductivity $/(W/cm \cdot K)$ | 0.10035 | 0.016 | 0.13 |
| Thermal-optical coefficient $(dn/dT) / (\times 10^{-6} K^{-1})$ | -1.8 | -16.6 | 34 |
| Absorption coefficient $1064 \text{ nm}/cm^{-1}$ | 0.00035 | 0.001 | 0.005 |

根据非线性光学热焦距的理论, 对于非线性光学晶体, 总的热焦距由(5)式给出, 再根据表 1 中给出的非线性晶体的相应热学参量, 可以计算出 BBO, KTP, LBO 三种非线性光学晶体的热焦距, 由于抽运到非线性晶体表面的光斑大小影响到非线性光学晶体吸收的热量, 所以实际计算出的非线性晶体的热焦距是随着入射到晶体表面的光斑大小变化的, 计算结果如图 2 所示。 r_i 为二次谐波过程中在非线性晶体表面的光斑半径大小, 单位是 μm , 纵坐标分别为 BBO, KTP, LBO 晶体的热焦距, 单位 mm。考虑到 LBO, KTP 为双轴晶体, BBO 为单轴晶体, 图 2 给出了 LBO, KTP 晶体的 z 方向和 BBO 晶体的 o 方向的热焦距比较。

从图 2 可以看到, 在相同的入射基波半径下, LBO 晶体的热焦距最长, 其次为 KTP 晶体, 热焦距最小的是 BBO 晶体。

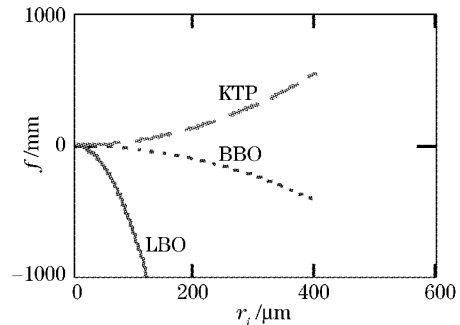


图 2 三种晶体热焦距随入射基波半径的变化曲线
Fig. 2 Curve of thermal focal length of three crystals varying with radius of fundamental frequency

3 实验装置

实验装置如图 3,抽运源包括一个激光头 Md,由三列互呈 120° 放置的连续激光二极管线阵侧面抽运 Nd:YAG 晶体棒组成,晶体棒尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 63 \text{ mm}$,Nd 离子质量分数为 0.6%,振荡腔内使用声光调制器产生调 Q 输出, $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的 KTP 晶体 ($\theta=90^\circ, \psi=23.6^\circ$)。 M_1 为谐振腔后腔镜,镀 1064 nm 高反膜, M_2 为小角度短波通输出镜 $T>98\%$, M_3 为谐振腔后腔镜,镀 1064 nm 与 532 nm 双高反膜系。Nd:YAG 棒上模体积大小在考虑非线性晶体热透镜前后的变化如图 4 所示,纵坐标为考虑非线性晶体热透镜效应前后,在激光晶体端面的光斑半径,横坐标为激光晶体的热焦距 f_i 。在不考虑 KTP 晶体热透镜效应的情况下,在最大注入功率下, Nd:YAG 棒上的光斑半径 $w=0.471 \text{ mm}$,根据 $M^2 = (w_0/w)^2$ ^[6],理想 M^2 因子应为 $(1.5/0.471)^2 =$

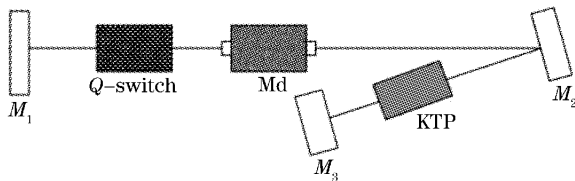


图 3 实验装置图

Fig. 3 Sketch map of experimental setup

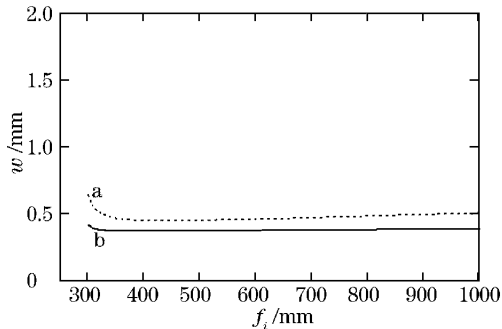


图 4 考虑 KTP 晶体热透镜效应前(曲线 a)和后(曲线 b)Nd:YAG 棒上光斑半径的比较

Fig. 4 Spot radius on Nd:YAG varies with injection power before (curve a) and after (curve b) considering the thermal effect of optical components in the resonant cavity

10.142,而实际上测得 $M^2=16.5$,理论与实验结果相差甚远;在考虑了 KTP 晶体热透镜效应后,在最大注入功率下 Nd:YAG 棒上的光斑半径 $w=0.368 \text{ mm}$,由理论计算得 KTP 晶体热焦距为 852 mm,理论计算 M^2 因子为 $(1.5/0.368)^2=16.614$,理论计算与实验结果吻合较好。

4 结 论

通过对 LBO, KTP 和 BBO 非线性光学晶体的热透镜特性分析,理论计算出三种非线性光学晶体的热透镜焦距,在入射基频光斑 $w=240 \mu\text{m}$ 时, LBO 晶体热焦距为 -4006.6 mm , BBO 晶体热焦距为 -152.06 mm , KTP 晶体热焦距为 198.18 mm 。在实验过程中,利用理论计算出 KTP 晶体在入射基频光斑 $w=0.368 \text{ mm}$, KTP 晶体热焦距为 852 mm,同时理论分析得出的 M^2 因子与实验中的数值吻合较好。

参 考 文 献

- 1 Zhao Hong, Jiang Dongsheng, Wang Jianjun *et al.*. Study on the LD side-pumped gain distribution of working medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 57~62
赵 鸿,姜东升,王建军等. 二极管侧面抽运条件下工作物质增益分布特性研究 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 57~62
- 2 Li Long, Ling Yawen, Shi Peng. Nonlinear optical crystal KTP temperature field in water-cooling laser system [J]. *Laser and Infrared*, 2005, **35**(1): 51~54
李 隆,凌亚文,史 彭. 水冷式激光系统中非线性晶体 KTP 的温场研究 [J]. *激光与红外*, 2005, **35**(1): 51~54
- 3 Zhang Guangyin, Guo Shuguang. Graphic Analysis and Design Method of Optical Resonator [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. 24~27
张光寅,郭曙光. 光学谐振腔的图解分析与设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 24~27
- 4 Zhu Guangzhi, Chen Peifeng, Zou Xuefen *et al.*. Finite element analysis of laser medium's thermal-lens [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(2): 208~217
朱广志,陈培峰,邹雪芬等. 侧面抽运激光器热透镜效应的有限元分析 [J]. *激光技术*, 2004, **28**(2): 208~217
- 5 V. G. Dmitriev, G. G. Gurzadyan, D. N. Nikogosyan. Handbook of Nonlinear Optical Crystals [M]. Berlin: Springer, 1999. 68~107
- 6 Feng Yan, Bi Yong. 20 W diode damped external frequency-doubled Nd:YAG green laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 469~471
冯 衍,毕 勇. 20 W 二极管抽运腔外倍频 Nd:YAG 绿光激光器 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 469~471