

一种改善 LD 角抽运复合晶体激光器热焦距不对称的方法和初步实验

高松 巩马理 刘欢

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子技术研究中心, 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 针对激光二极管(LD)角抽运复合晶体激光器, 提出采用绝热槽热沉改善其热焦距不对称的问题, 并进行了理论数值计算分析和相关验证实验。分析结果表明, 当绝热槽尺寸为 $0.325\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ 时, 复合晶体在宽度和厚度的热焦距基本相等。实验证明在采用绝热槽热沉的情况下, 两方向热焦距比由原来的 3.86 倍缩小到 2.19 倍, 一定程度上补偿了两方向热焦距非对称性, 同时提出, 考虑端面效应和提高绝热槽加工精度可以进一步使两方向热焦距大致对称。

关键词 固体激光器; 角抽运; 复合晶体; 热焦距; 非对称

中图分类号 TN248.1

OCIS 140.3480 140.3530

文献标识码 A

A Method Improving Asymmetry of Thermal Focal Length of LD Corner-Pumped Composite Slab Lasers and Primary Experiment

Gao Song Gong Mali Liu Huan

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Heat sink with the adiabatic groove is used to improve the asymmetry of the thermal focal length of laser-diode (LD) corner-pumped composite slab lasers. The numerical analysis indicates that the thermal focal length of two directions can be equal when the size of groove is $0.325\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 14\text{ mm}$. The experimental results show that the difference of the thermal focal length of two directions decreases from 3.86 times to 2.19 times when the heat sink with the adiabatic groove is employed. Finally the calculation considering end effect and improving process precision of groove is put forward to further improve the asymmetry of thermal focal length.

Key words solid-state lasers; corner-pumped; composite slab; thermal focal length; asymmetry

1 引言

角抽运是端面抽运、侧面抽运之外, 半导体抽运固体激光器的一种新型抽运方式, 具有很好的功率扩展性, 容易实现大功率输出。目前已经有通过角抽运方式实现数百瓦到千瓦级 Yb:YAG 激光器的报道^[1~3]。同时, 角抽运方式也可以运用于中小功率高光束质量激光输出的应用范畴^[4]。但是, 通过对角抽运复合晶体的热效应分析^[5], 发现在相同抽运功率条件下, 厚度方向的热焦距要比宽度方向的小很多; 随着抽运功率的增大, 宽度方向和厚度方向的热焦距逐渐变小, 热聚焦效应逐渐明显; 而且厚度方向的热聚焦效应始终比宽度方向严重。这主要由于宽度方向的热物理参数基本相同, 温度梯度变化比较小, 而厚度方向热物理参数变化比较大; 同时厚度方向采用热沉进行冷却, 晶体产生的热量大都通过热沉进行传导。这两个因素共同导致了厚度方向较大的温度梯度变化, 进而产生较为严重的热聚焦效应, 相应的热焦距就比较小。这种热焦距在两个方向的非对称性造成了输出激光的不对称, 同时由于两个方向的动态工作点必须同时在稳区内, 使得激

收稿日期: 2010-03-28; 收到修改稿日期: 2010-04-29

作者简介: 高松(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事角抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: gaosong06@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 巩马理(1959—), 男, 教授, 主要从事光电子与激光技术方面的研究。E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn

光器运行的稳区范围减小,影响了角抽运复合晶体激光器在一些方面的实际应用。

为了改善热焦距的非对称性,需要减小厚度方向的温度梯度,为此提出了绝热槽热沉方案:在增益介质与热沉接触部分沿长度方向局部挖空,挖空部分即槽的宽度小于增益介质本身的宽度。此时热量集中从增益介质与紫铜连接的角落部分导走,使得中心部分温度梯度对称分布。针对绝热槽方案,进行了数值计算并对结果进行了分析。

2 数值计算分析

绝热槽热沉具体结构如图 1 所示。不同于端面抽运或侧面抽运的结构^[6~8],角抽运由于抽运光在板条内多次全内反射,抽运光的吸收情况比较复杂,很难得到精确实用的解析解。

因此,我们采用三维数值计算方法^[5],从稳态热传导方程出发,在未出激光的条件下,对晶体温度分布进行求解,给出晶体内部的温度分布模型,其中 Nd:YAG 的热转换系数按文献[9]设为 $\eta_{\text{non-lasing}} = 0.49$;同时,参考侧面抽运的 Nd:YAG 激光器,忽略端面效应(低于总热焦距变化的 6%),主要考虑温度梯度变化和热致双折射效应^[10],对热焦距进行分析求解,给出热焦距随抽运功率的变化情况。

图 2 为有效抽运功率为 $P_e = 25 \text{ W}$ 时,槽的不同尺寸条件下的热焦距。其中槽的厚度尺寸固定在 2 mm。由图 2 可以看出,当槽的尺寸为 $0.325 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ (分别对应于宽度、厚度、长度方向)时,复合晶体在宽度和厚度的热焦距基本相等。在不同抽运功率,同一槽尺寸条件下的热焦距,如图 3 所示。

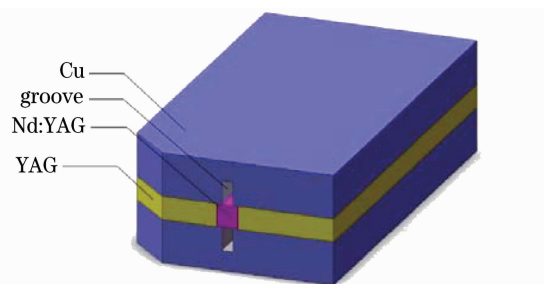


图 1 绝热槽热沉示意图

Fig. 1 Schematic of the heat sink with adiabatic groove

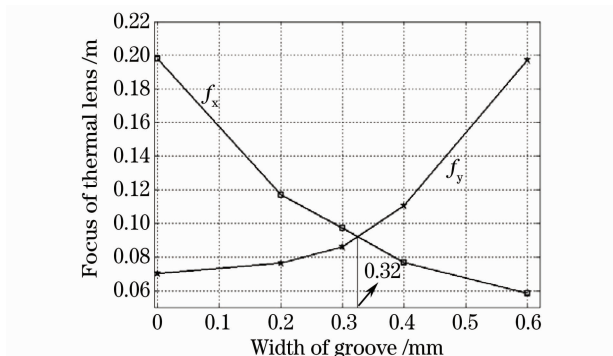


图 2 有效抽运功率 25W,不同槽宽度尺寸时的热焦距

Fig. 2 Thermal focal length versus width of groove under pump power of 25 W

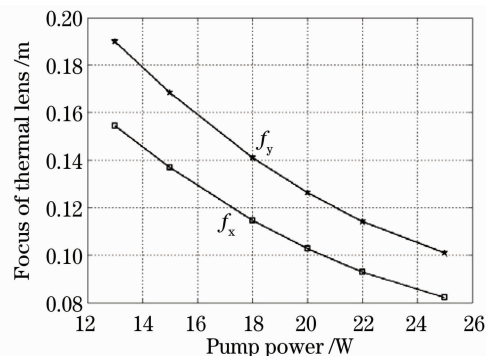


图 3 不同抽运功率,槽宽度 0.325 mm 条件下的热焦距

Fig. 3 Thermal focal length versus pump power under width of groove of 0.325 mm

从图 3 可以看出宽度和厚度方向的热焦距虽然不是十分相等,但相对于原始模型有了很大的改善。计算结果不是十分准确,主要原因在于取点太少,也跟计算温度分布时网格划分的细致程度有关,总体来讲网格划分越细,计算结果就更准确一些。

为了更直观地反应这种改进方案的特点,计算了普通热沉时晶体横截面上的温度分布和绝热槽热沉的槽尺寸满足 $0.325 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 时晶体横截面上的温度分布,结果如图 4 所示,此时有效抽运功率 $P_e = 25 \text{ W}$ 。从图 4 可以看出,改进后增益介质中心部分的温度分布近似对称,即温度梯度近似相等,导致热焦距基本对称;改进后由于增益介质厚度方向的冷却效果不如改进前的,所以导致晶体中心的温度比原来的略高一些;但是改进后的模型使得增益介质在宽度和厚度方向的热焦距比较对称,同时也保证了晶体的原始尺寸,所以该改进方案具有很大的可行性。

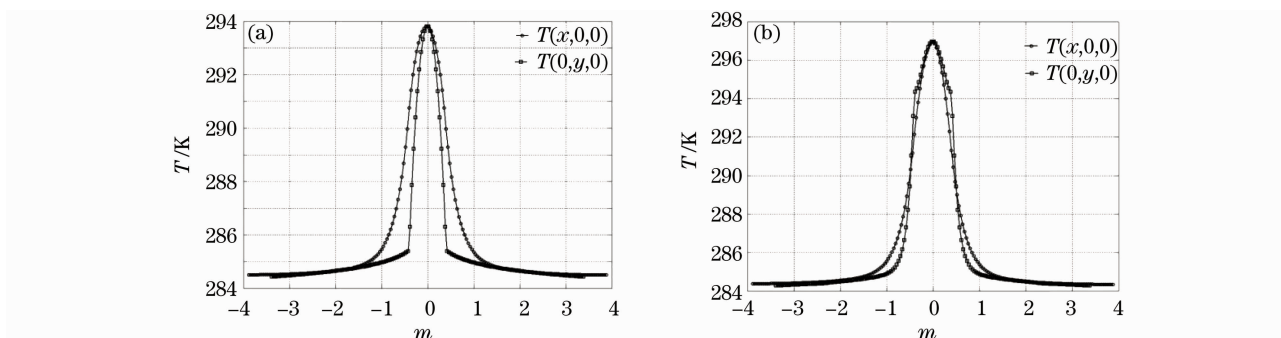


图4 普通热沉模型(a)与绝热槽热沉模型(b)数值计算结果对比

Fig. 4 Comparison of the numerical calculation of the ordinary heat sink (a) and the heat sink with the adiabatic groove (b)

3 实验

为了验证绝热槽热沉能够改善热焦距非对称性,进行了角抽运 Nd:YAG 复合晶体激光器的实验。实验装置如图 5 所示,腔型为平平腔,全反镜与晶体距离 50 mm,输出镜与晶体距离 80 mm,输出镜透过率 30%,为了实现基模输出,腔中放置一个狭缝来抑制高阶模的振荡,狭缝宽度 0.6 mm。

在激光二极管(LD)额定抽运功率 41.9 W 时,输出功率为 10.24 W,光光转换效率 24.4%, $M_x^2 = 1.20$, $M_y^2 = 1.18$,光光转换效率略低于普通热沉时的结果,而光束质量有所提高^[4],这说明使用绝热槽热沉散热所导致的晶体温度升高并没有对激光器的性能造成劣化影响,这与数值计算所得出的改进方案晶体温度只是比原来略高的结果相符。

为了验证热焦距非对称性确实有所改善,我们直接测量激光器工作时的动态热焦距。其原理是用光束质量分析仪测量出输出激光的 M^2 和束腰大小以及位置,根据高斯光束传输的 ABCD 定律^[11]计算出相应基模的束腰大小,进而可以求得晶体的热焦距。在实验中采用的是平平腔,因此相应的束腰就在输出镜上,图 6 分别给出了 LD 额定功率下普通热沉和绝热槽热沉 x 和 y 两方向工作点在稳区内的位置。从图中可见,普通热沉情况下,两方向的热焦距分别为 $f_x = 142.4$ mm, $f_y = 36.9$ mm,两者相差 3.86 倍;绝热槽热沉情况下,两方向的热焦距分别为 $f_x = 116.4$ mm, $f_y = 53.2$ mm,两者差距缩小为 2.19 倍,但是并没有完全相等。分析认为,这是由于在理论计算中,忽略了端面效应引起的热焦距部分,因此实际光焦距应比计算的偏大;同时热沉绝热槽实际测量宽度 0.29 mm,小于理论计算结果 0.325 mm,从图 2 中可以看到,这时 $f_y < f_x$ 。下一步我们拟考虑入端面效应进行更细致的理论计算,并提高热沉绝热槽的加工精度,以实现两方向热焦距的对称。

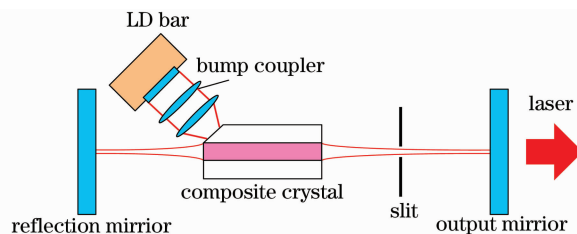
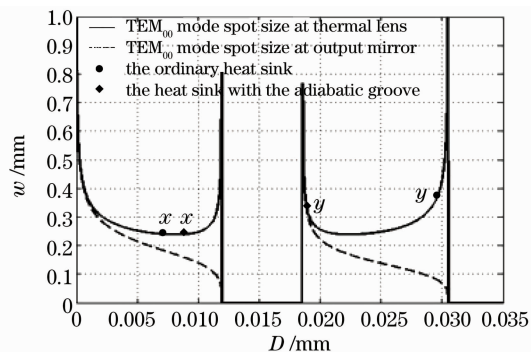


图5 角抽运 Nd:YAG 复合晶体激光器实验装置示意图

Fig. 5 Experimental setup of corner-pumped Nd:YAG composite slab laser system

图6 LD 额定功率下普通热沉和绝热槽热沉 x 和 y 两方向工作点位置示意图Fig. 6 Diagram of operation spots of both x and y directions of lasers employing the ordinary heat sink and the heat sink with the adiabatic groove under the maximum pump power

4 结 论

提出采用绝热槽热沉改善 LD 角抽运复合晶体激光器热焦距不对称的问题,并进行了理论数值计算和分析。结果表明,当绝热槽尺寸满足 $0.325\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ 时,复合晶体在宽度和厚度的热焦距大致相等。相关验证实验证明在采用绝热槽热沉的情况下,两方向热焦距比由原来的 3.86 倍缩小到 2.19 倍,一定程度上补偿了两方向热焦距非对称性。指出了热焦距非对称性未完全补偿的原因以及下一步的改进办法。

参 考 文 献

- 1 Mali Gong, Chen Li, Qiang Liu *et al.*. 200 W corner-pumped Yb:YAG slab laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**: 265~267
- 2 Qiang Liu, Mali Gong, Fuyuan Lu *et al.*. 520 W continuous-wave diode corner-pumped composite Yb:YAG slab laser[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 726~728
- 3 Qiang Liu, Mali Gong, Fuyuan Lu *et al.*. Corner-pumped Yb:yttrium aluminum garnet slab laser emitted up to 1 kW[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(10): 101113
- 4 Song Gao, Huan Liu, Dongsheng Wang *et al.*. LD bar corner-pumped TEM₀₀ CW composite Nd:YAG laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(24): 21837~21842
- 5 Gong Mali, Wang Shengli, Liu Qiang *et al.*. Analysis of thermal focal length in LD corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab lasers[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(4): 337~339
巩马理, 王生利, 柳 强 等. LD 角抽运 Nd:YAG/YAG 复合板条激光器热焦距分析[J]. *激光技术*, 2009, **33**(4): 337~339
- 6 Sun Xiao, Li Tao, Yu Guolei *et al.*. Characteristics of laser diode end-pumped laser crystal on thermal effect and second harmonic generation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 359~363
孙 晓, 李 涛, 于果蕾 等. 激光二极管端面抽运 Nd:GdYVO₄ 晶体热效应分析及倍频研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 359~363
- 7 Zhang Shuaiyi, Huang Chunxia, Yu Guolei *et al.*. Thermal effect of laser crystal by laser diode end-pumped[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 333~337
张帅一, 黄春霞, 于果蕾 等. 激光二极管端面抽运激光晶体的热效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 333~337
- 8 Shi Peng, Li Jinping, Li Long *et al.*. Influence of pump light distribution on thermal effects within Nd:YAG microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 643~646
史 鹏, 李金平, 李 隆 等. 抽运光分布对 Nd:YAG 微片激光器热效应的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 643~646
- 9 Peng Xiaoyuan, Xu Lei, Anand Asundi. Power scaling of diode-pumped Nd:YVO₄ lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9): 1291~1299
- 10 W. Koecher. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen Transl., Beijing: Science Press, 2002, 357~364
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文译, 北京: 科学出版社, 2002, 357~364
- 11 C. Sebastien, B. Francois, D. Frederic *et al.*. Thermal lensing in diode-pumped ytterbium laser-part I: Theoretical analysis and wavefront measurements[J]. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(9): 1217~1234