

文章编号: 0258-7025(2009)07-1843-05

# 激光二极管侧面抽运 $Tm, Ho : LuLiF$ 激光器的热效应

乔 亮 侯 霞 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 报道了激光二极管(LD)三向侧面抽运  $Tm, Ho : LuLiF$  激光器热效应的实验研究。理论上计算了激光介质内抽运光强的分布,分析了不同抽运光束腰下,对抽运光强和均匀性的影响。利用有限元分析,模拟了抽运时介质内部温度分布轮廓图。将激光晶体热透镜效应作类透镜近似,进行实验测量。利用通过小孔的高斯光束光强变化,拟合出 He-Ne 光通过晶体前后的高斯光束形状;近似成高斯光束经薄透镜的变换,计算得出在抽运单脉冲能量 3.3 J,脉冲重复频率 10 Hz 下, $Tm, Ho : LuLiF$  晶体的热透镜焦距约为  $-2.3$  m,实验结果与理论预测基本相符。

**关键词** 激光器;热效应;侧面抽运; $Tm, Ho : LuLiF$  晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1843

## Thermal Effect of $Tm, Ho : LuLiF$ Laser Side-Pumped by Laser Diode

Qiao Liang Hou Xia Chen Weibiao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Experimental results of thermal effect in laser diode (LD) three-direction side-pumped  $Tm, Ho : LuLiF$  laser are reported. It is calculated of the distribution of pump intensity in the laser medium. The effects on the pump intensity and uniformity under different pump waists are analyzed. Temperature distribution in the laser media is simulated by finite element analysis. Considering the laser medium as lenslike, the experiment measuring is developed. Using the intensity changing of Gaussian beam through small aperture, the Gaussian beam shapes of He-Ne laser through the laser medium is fitted. Calculating from the approximate transformation of Gaussian beam by thin lens, the thermal focal length of  $Tm, Ho : LuLiF$  crystal is about  $-2.3$  m with pump pulse power of 3.3 J and pulse repetition frequency of 10 Hz. The experimental result is in agreement with the theoretical prediction.

**Key words** lasers; thermal effect; side-pumped;  $Tm, Ho : LuLiF$  crystal

### 1 引 言

$2 \mu m$  波长的激光处于人眼安全波段的范围内,同时又具有良好的大气穿透性,在遥感和光通信方面有着重要的应用前景,是激光测距机、相干多普勒测风雷达、差分吸收激光雷达系统等的理想光源<sup>[1~4]</sup>。近年来, $2 \mu m$  波段激光增益材料研究的进步和激光二极管(LD)的发展,使得全固态  $2 \mu m$  激光器在相干多普勒测风雷达上的应用成为现

实<sup>[5~7]</sup>。为了保证更远程的测量距离和更精确的测量精度,对光源激光的能量要求越来越高。在激光二极管抽运固体激光器(DPSSL)中,侧面抽运方式相对容易获得高能量激光的输出。而随着抽运功率的增加,激光晶体的热效应对 DPSSL 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输出激光的特性。研究晶体热效应早已成为国内外研究 DPSSL 的一个热点<sup>[8~12]</sup>。根据 Vikas Sudesh 等<sup>[13]</sup>的研究,铥钬共掺的氟化镱锂,

收稿日期: 2008-10-15; 收到修改稿日期: 2008-12-08

作者简介: 乔 亮(1980—),女,博士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: qiaoliang@siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光遥感技术方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shnc.ac.cn

晶体作为  $2\ \mu\text{m}$  波段的增益介质, 具有较好的激光性能, 但同时也具有与其他基质相比导热能力差的弊端。因此分析其热效应是设计、研制高质量、高功率  $2\ \mu\text{m}$  激光器的前提。

本文研究 3 组激光二极管阵列 (LDA) 以  $120^\circ$  等角间距围绕  $\text{Tm, Ho} : \text{LuLiF}$  晶体棒的三向侧面抽运  $2\ \mu\text{m}$  固体激光器热效应, 模拟计算了介质内抽运光强分布和温度梯度分布, 对晶体的热透镜焦距进行了实验测量。

## 2 介质内抽运光强分布和温度分布模拟

侧面抽运时, 通常 LD 的结平面方向平行于激光晶体的通光轴向, 并且紧密排列成 bar。由于排列紧密, 且 LD 的慢轴方向发散角较小, 故不考虑这部分的发散, 可以认为抽运光沿晶体轴线方向呈线性排列, 在与晶体轴线方向垂直的横截面内抽运相同。

以单向侧面抽运为例, 将晶体中心作为原点建立坐标系  $\sigma xyz$ , 光轴为  $z$  方向, 令 LDA 轴系坐标与晶体轴系  $xoy$  重合, 这意味着抽运光线会聚在晶体棒的中心, 抽运光束腰半径  $w_{p0}$  近似等于棒中心处光束半径, 这样 LDA 的光强分布可看成沿  $x$  方向的高斯光束, 在晶体内任一点  $(x, y, z)$  处的抽运光强分布为<sup>[14]</sup>

$$I(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w_p} \exp\left(-\frac{2x^2}{w_p^2}\right), \quad (1)$$

式中  $I_0$  为 LDA 沿晶轴单位长度的功率,  $w_p$  为由高斯光束的传输矩阵计算出的晶体内  $y$  处抽运光的光束半径, 表示为

$$w_p^2 = w_{p0}^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda y}{\pi w_{p0}^2} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式, 并考虑到抽运光在晶体内的吸收, 抽运光强分布可表示为

$$I(x, y) = \sqrt{2\pi} I_0 w_{p0} \frac{\exp\left(\frac{-2\pi^2 w_{p0}^2 x^2}{\pi^2 w_{p0}^4 + \lambda^2 y^2} - \alpha d\right)}{(\pi^2 w_{p0}^4 + \lambda^2 y^2)^{1/2}}, \quad (3)$$

其中  $\alpha$  为介质的吸收系数,  $d$  为抽运光在晶体内走过的长度, 当抽运光束比晶体棒小的时候, 可以近似这个长度为

$$d = \sqrt{r_0^2 - x^2} + y. \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式, 就得到了单向侧面抽运结构下

的抽运光在晶体内某点处的光强分布。

为了获得较高的增益和尽量均匀的抽运, 通常采用多组 LDA 对晶体棒进行侧面环绕对称抽运, 对于多侧面环绕抽运的情况, 可通过坐标轴变换得到每个 LDA 在同一点的光强分布, 再进行叠加。在  $N$  向侧面抽运时

$$I(x, y, z) = \sum_{j=1}^N I_j, \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} x_j &= x \cos(j\theta) + y \sin(j\theta), \\ y_j &= y \cos(j\theta) - x \sin(j\theta), \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $\theta$  为相邻 LDA 之间的夹角, 此处  $\theta = 360^\circ/N$ <sup>[15]</sup>。例如, 当  $N=3$  时, 那么点  $(x, y, z)$  处归一化抽运光强分布为

$$I(x, y, z) = [I_1(x, y, z) + I_2(x_2, y_2, z) + I_3(x_3, y_3, z)]/3. \quad (7)$$

在实验中采用了三向侧面抽运结构, 如图 1 所示; 3 组 LDA 以  $120^\circ$  的等间距角围绕在晶体棒的周围, 通过柱透镜组的整形, 实现光耦合进晶体。晶体棒放置在玻璃套管内, 其中的空间以供冷却水直接接触棒进行循环冷却。激光介质为  $\text{Tm, Ho} : \text{LuLiF}$  晶体,  $\text{Tm, Ho}$  掺杂原子数分数分别为  $5\%, 0.5\%$ , 尺寸为  $\phi 4\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$ ,  $I_0$  设为  $2, \alpha = 2.44\ \text{cm}^{-1}, \lambda = 792\ \text{nm}$ , 分别取  $w_{p0} = 0.4\ \text{mm}, 0.8\ \text{mm}, 1\ \text{mm}, 1.5\ \text{mm}$ , 对抽运光强分布进行模拟, 如图 2 所示。从图 2 中可以看出,  $w_{p0}$  的大小对介质内抽运光分布影响较大, 抽运光束腰越小, 介质内中心处光强越强, 但是强度分布明显不均匀。在实验中, 最后取  $w_{p0} = 1\ \text{mm}$ 。

利用有限元分析, 经过归一化模拟计算, 得出晶体内部温度分布轮廓, 如图 3 所示。从图中可见介质中心温度最高, 为  $28.339\ ^\circ\text{C}$ 。根据折射率随温度

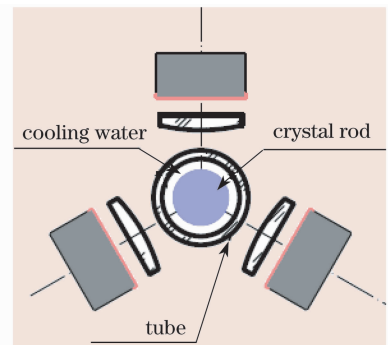


图 1 抽运头结构示意图

Fig. 1 Diagram of pump head configuration

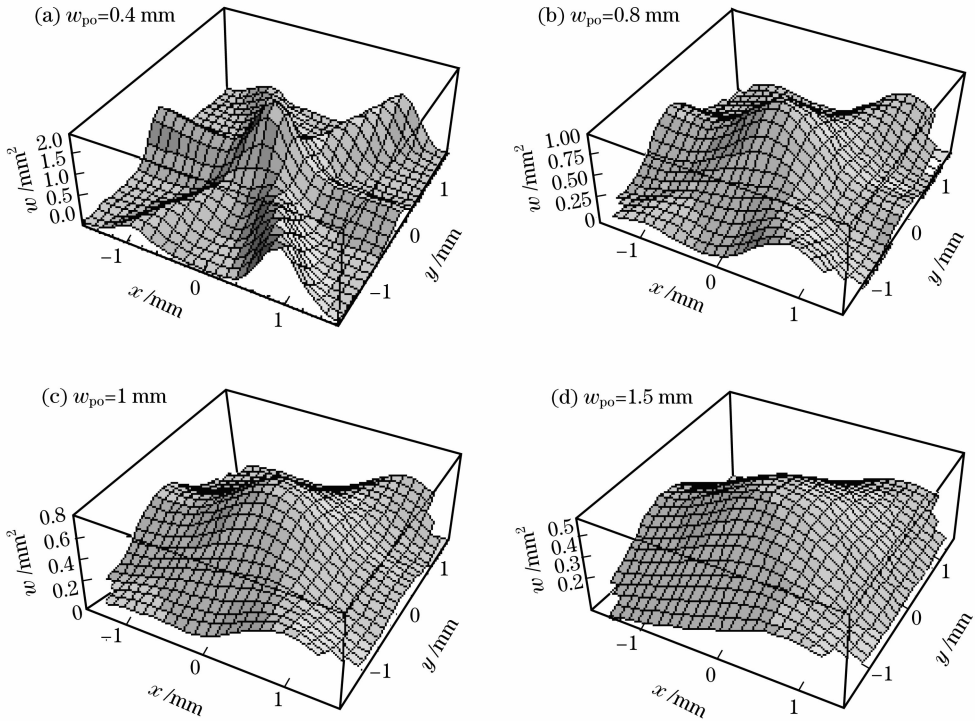


图 2 4 种抽运束腰下介质内抽运光强的分布

Fig. 2 Pumping intensity distribution in laser rod with four  $w_{p0}$

的变化特性, Tm, Ho : LuLiF 晶体在室温下  $dn/dt = -3.6^{[16]}$ , 这样介质中心处折射率随温度的升高也变得最低, 外围折射率逐渐高过中心处, 这说明晶体的热透镜效应将呈负透镜的规律。

W. Koechner<sup>[17]</sup>对 YAG 晶体的热透镜效应计算为

$$f = \frac{KA}{P_a} \left[ \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\varphi} n_0^3 + \frac{\alpha r_0 (n_0 - 1)}{L} \right]^{-1}, \tag{8}$$

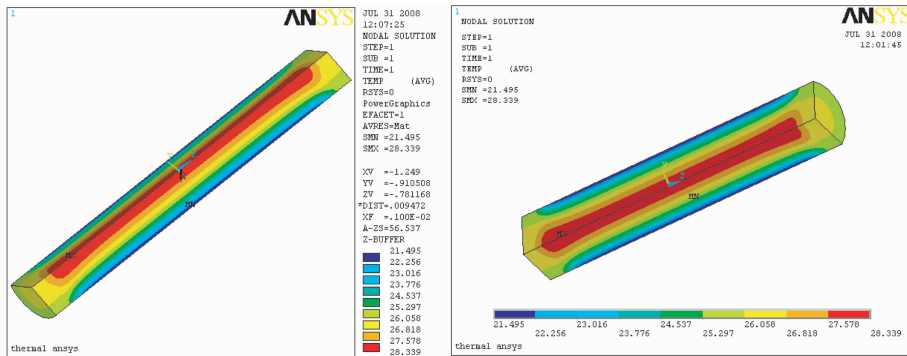


图 3 介质温度分布示意图

Fig. 3 Temperature distribution of laser media

其中与温度有关的折射率变化是形成热透镜效应的主要因素, 与应力有关的折射率变化改变了 20% 的焦距, 棒的伸长产生的表面曲率效应小于 6%。利用(8)式对 Tm, Ho : LuLiF 晶体的热透镜焦距进行估算<sup>[18]</sup>。Tm, Ho : LuLiF 晶体热导率  $K = 0.05 \text{ W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$ , 热膨胀系数  $\alpha = 17.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , 折射率  $n_0$  取 1.48, 而光弹系数  $C_{r,\varphi}$  未知, 忽略这一项的作用, 估算热透镜焦距的结果为

—2128 mm。若 LuLiF 晶体的光弹系数为正值, 就会与(8)式中的第一项产生数值上的某种抵消,  $f$  绝对值必然会比忽略光弹系数项的计算结果大些。

### 3 热效应实验测量

利用通过小孔的高斯光束光强的变化, 拟合出 He-Ne 指示光通过晶体前后的高斯光束半径, 将其近似成高斯光束经薄透镜的变换, 可计算出晶体的

热透镜焦距。

### 3.1 实验原理

高斯光束光强的横向分布为

$$I(\rho) = E \cdot E^* = C^2 \frac{\omega_0^2}{\omega^2} e^{-2\rho^2/\omega^2}, \quad (9)$$

经归一化后得到

$$\int_{r=0}^{\infty} 2\pi\rho(\rho) d\rho = P_0, \quad (10)$$

从而得出  $C^2 = (2/\pi\omega_0^2) P_0$ , 其中  $P_0$  为高斯光束的总功率。若在光束前加一半径为  $R$  的小孔光阑, 则从小孔中透过的光强数值为

$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{A^2}{\omega^2(z)} e^{-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}} r dr d\theta = \frac{\pi A^2}{2} (1 - e^{-\frac{2R^2}{\omega^2}}) = P_0 (1 - e^{-\frac{2R^2}{\omega^2}}), \quad (11)$$

由此得到高斯光束的半径

$$\omega = \sqrt{\frac{2}{-\ln\left(1 - \frac{P}{P_0}\right)}} R = \sqrt{\frac{2}{-\ln\left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)}} R. \quad (12)$$

### 3.2 实验与结果

实验中所用到的器件有 He-Ne 激光器、光电二极管、可调小孔光阑、示波器。He-Ne 光未通过晶体前, 发散角为  $0.420 \text{ mrad}$ , 束腰半径  $\omega_0$  为  $0.477 \text{ mm}$ , 距离介质左端面的距离  $l_0$  约为  $1130 \text{ mm}$ 。对介质进行抽运注入, 抽运能量约为  $3.25 \text{ J}$ , 脉冲重复频率  $10 \text{ Hz}$ 。图 4 为测量拟合 He-Ne 光通过晶体后高斯光束形状的装置图。在晶体后选取两处位置  $L_1, L_2$ , 与介质右端面的距离分别为  $l_1, l_2$ 。先后在  $L_1, L_2$  处加入可调小孔光阑, 令 He-Ne 光从中通过。调节小孔大小, 利用 PIN 管接收通过小孔的 He-Ne 光, 从示波器上观察幅值, 测得(12)式中的  $P_0$  和  $\Delta P$ 。再代入此时的小孔光阑半径  $R$ , 便可求得此处的高斯光束半径  $\omega$ 。选取了两个位置, 测量计算得到  $L_1, L_2$  处的光束半径  $\omega_1, \omega_2$ , 如表 1 所示。

表 1 实验数据

Table 1 Experiment data			
$l / \text{mm}$	$R = \Phi / 2 / \text{mm}$	$\Delta P / P_0$	$\omega / \text{mm}$
$l_1 = 1210$	0.625	0.404	0.929
$l_2 = 2180$	1.0	0.379	1.436

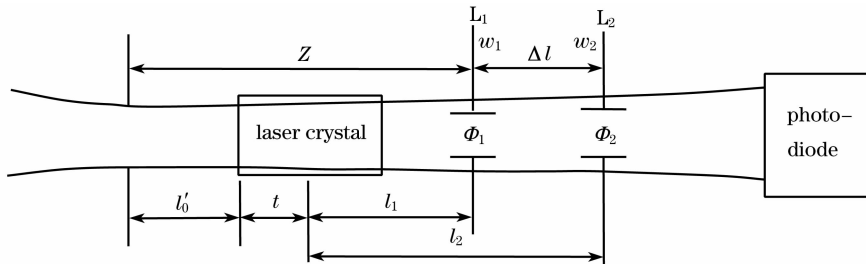


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experiment device

得到  $L_1, L_2$  两处高斯光束半径, 利用基模高斯光束的特征参数

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (13)$$

计算高斯光束的束腰  $\omega'_0$  和位置  $z_0$ 。  $\omega_1, \omega_2$  分别为  $z, z + \Delta l$  处高斯光束半径, 得到关系式

$$\begin{cases} z^2 = \frac{\pi^2 \omega_0'^2}{\lambda^2} (\omega_1^2 - \omega_0'^2) \\ (z + \Delta l)^2 = \frac{\pi^2 \omega_0'^2}{\lambda^2} (\omega_2^2 - \omega_0'^2) \end{cases}, \quad (14)$$

解方程组得  $\omega'_0 = 0.365 \text{ mm}$ ,  $z = 1551.9 \text{ mm}$ 。已知  $l_1$  为  $1210 \text{ mm}$ , 而  $z$  为  $1551.9 \text{ mm}$ , 可见此时的高斯光束束腰在介质的前面, 也就是图 4 所示介质的左侧, 这样经过介质后的 He-Ne 束腰距离与介质左端面的距离  $l'_0 = z - l_1 - t$ , 为  $321.9 \text{ mm}$ 。将介质棒

等效成薄透镜, 利用高斯光束经过薄透镜的变换<sup>[19]</sup>, 可得

$$\frac{f - \left( l'_0 + \frac{t}{2} n \right)}{f - \left( l_0 + \frac{t}{2} n \right)} = \frac{\omega_0'}{\omega_0}, \quad (15)$$

其中  $t$  为晶体长度, 由于晶体近似等效成薄透镜, 因此把晶体长度算进光程里,  $f$  为薄透镜焦距, 即为晶体热透镜焦距; 将  $\omega_0, l_0, \omega_0', l'_0$  代入(15)式, 求得  $f = -2294.41 \text{ mm}$ 。这一测量计算结果与(8)式估算的结果基本符合。

## 4 结 论

对三向侧面抽运 Tm, Ho : LuLiF 激光器的热效应进行了研究。通过模拟激光介质内抽运光强的

分布, 得知了抽运光束腰半径对抽运均匀性的影响。利用有限元分析, 经过归一化计算模拟出晶体内温度分布图。利用高斯光束经过薄透镜的变换原理, 在抽运能量 3.3 J, 脉冲重复频率 10 Hz 时, 测量 Tm, Ho : LuLiF 晶体热透镜焦距约为 -2.3 m。测得的晶体热焦距将为腔型设计, 以及分析激光器运行时腔内光束的分布等提供依据。在实验及数值计算中, 留下了几个问题: 仅将介质等效成一个薄透镜来描述激光二极管抽运固体激光器热效应是有不足的地方的, 要更准确地描述热效应, 需要求取更多的参数; 在测量热透镜过程中, 单纯的对激光介质进行抽运, 没有形成谐振腔, DPSSL 的热效应在有振荡光与没有振荡光的时候是有差别的, 这些都需要做进一步的研究。

致谢 感谢与中国科学院上海光学精密机械研究所张艳丽博士、王建磊博士的讨论。

## 参 考 文 献

- Zhao Yuanyuan, Hou Xia, Chen Weibiao. Research and progress of 2  $\mu\text{m}$  all-solid-state lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(6):20~24  
赵媛媛, 侯 霞, 陈卫标. 2  $\mu\text{m}$  全固态激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(6):20~24
- Feng Yutong, Meng Junqing, Chen Weibiao. Research development of eye-safe all-solid-state lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(10):33~38  
冯宇彤, 孟俊清, 陈卫标. 人眼安全全固态激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(10):33~38
- Wu Chunting, Ju Youlun, Wang Zhenguo *et al.*. Laser diode-pumped Tm, Ho : YLF single-frequency laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 815~818  
吴春婷, 鞠有伦, 王振国 等. 激光二极管抽运的 Tm, Ho : YLF 单模激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6):815~818
- Lin Zhifeng, Gao Mingwei, Gao Chunqing. Experimental investigation of laser diode end pump Tm : YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):181~185  
林志峰, 高明伟, 高春清. 激光二极管端面抽运 Tm : YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):181~185
- R. M. Huffaker. Solid-state coherent laser radar for atmospheric sensing[C]. WC5/CLEO/ Pacific Rim199, Seoul, South Korea, 1999, **2**:147~148
- G. D. Emmitt, C. O' Handley, S. A. Wood *et al.*. 2  $\mu\text{m}$  doppler lidar returns from water surfaces and the overlying aerosols[C]. *SPIE*, 2002, **4814**:273~281
- G. D. Emmitt, S. A. Wood, G. Koch. Comparison of GWOLF and VALIDAR doppler lidar measurements[C]. 2<sup>nd</sup> Symposium on Lidar Atmospheric Applications, California, 2005
- Ma Xiuhua, Bi Jinzi, Hou Xia *et al.*. Numerical comparison of thermal effect among zigzag slab pump geometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12):2209~2214  
马秀华, 毕进子, 侯 霞 等. 锯齿形板条抽运结构的热效应数值比较[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12):2209~2214
- Chen Dedong, Yang Aifen, Wen Jianguo *et al.*. Thermal lensing in three side-pumped solid-state laser[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(5):26~27  
陈德东, 杨爱粉, 文建国 等. 三向侧面抽运固体激光器中热透镜的研究[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(5):26~27
- Sun Yao, Li Tao, Yu Guolei *et al.*. Characteristics of laser diode end-pumped laser crystal on thermal effect and second harmonic generation[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(3):359~363  
孙 尧, 李 涛, 于果蕾 等. 激光二极管端面抽运 Nd : GdYVO<sub>4</sub> 晶体热效应分析及倍频研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):359~363
- 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
- Shi Peng, Li Jinping, Li Long *et al.*. Influence of pump light didistribution on thermal effects within Nd : YAG microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):643~646  
史 彭, 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
- Vikas Sudesh, Kazuhiro Asai. Spectroscopic and diode-pumped-laser properties of Tm, Ho : YLF; Tm, Ho : LuLF; and Tm, Ho : LuAG crystals; a comparative study[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(9):1829~1837
- Wenjie Xie, Siuchung Tam, Yeeloy Lam *et al.*. Influence of the thermal effect on the TEM<sub>00</sub> mode output power of a laser-diode side-pumped solid-state laser[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(30):5482~5487
- Wang Chunyu, Zhu Xiaolei, Lu Yutian. Pumping intensity distribution in LDA side pumped solid lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6):961~965  
王春雨, 朱小磊, 陆雨田. LD 侧面泵浦固体激光器泵浦光分布模拟[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6):961~965
- R. L. Aggarwal, D. J. Ripin, J. R. Ochoa *et al.*. Measurement of thermo-optic properties of Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, YAlO<sub>3</sub>, LiYF<sub>4</sub>, LiLuF<sub>4</sub>, BaY<sub>2</sub>F<sub>8</sub>, KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, and KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser crystals in the 80-300 K temperature range[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**:103514
- Walter Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen, Jiang Wenzhe, Cheng Guoxiang Transl., Beijing: Science Press, 2002. 364  
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江译文, 程国译译. 北京: 科学出版社, 2002. 364
- Norman P. Barnes, Donald J. Gettemy. Temperature variation of the refractive indices of yttrium lithium fluorid[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, **70**(10):1244~1247
- Wu Changzheng, Wang Zhaoyong, Chen Lingbing *et al.*. Laser Physics [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1989. 110, 115~116  
伍长征, 王兆永, 陈凌冰 等. 激光物理学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1989. 100, 115~116