

文章编号: 0258-7025(2009)01-0037-06

LD 侧边抽运板条激光器的热效应

朱广志 朱 晓 朱长虹 齐丽君 胡 涛 何 里

(华中科技大学光电子科学与工程研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要 对 LD 侧边抽运的板条激光介质热效应进行理论分析与数值模拟, 根据 $2.5 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ Nd:YAG 板条实物建立了相应的三维(3D)热模型, 采用有限元方法分析并模拟了板条激光介质内部温度场和热应力的分布, 给出在 120 W 抽运功率下板条激光介质的热畸变特性, 估算了在不同抽运功率下热焦距的大小。在此基础上设计并封装了 LD 侧边抽运的板条激光模块, 对该模块的热焦距进行实验研究, 得到热焦距随抽运功率变化的测量曲线, 实验结果与理论分析一致。

关键词 激光器; 固体激光器; 板条激光介质; 热效应; 热焦距

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0037

Thermal Effect Study of LD Edge-Pumped Slab Lasers

Zhu Guangzhi Zhu Xiao Zhu Changhong Qi Lijun Hu Tao He Li

(Institution of Optoelectronics Science and Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The theoretical and experimental studies on thermal effect of LD edge-pumped slab lasers were carried out. Based on a real edge-pumped slab crystal ($2.5 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$), the three-dimensional (3D) thermal model was built up. Then the temperature distribution and stress pattern of the slab were calculated by finite element analysis. The thermal distortion of slab crystal under 120 W pumping power was obtained, and the thermal focal length for different pumping powers was estimated. The LD edge-pumped slab laser was designed and packaged. The thermal focal length was studied experimentally, and its relationship with pumping power was discussed. Experimental results agree with theoretical analysis.

Key words lasers; solid-state laser; slab crystal; thermal effect; thermal focal length

1 引言

早在 20 世纪 70 年代美国 GE 公司的 W. B. Martin 等^[1]就提出了板条激光器设计的概念, 使得板条晶体内部温度场的分布趋于均匀, 极大降低了晶体本身的热效应。这一优于棒状结构的冷却方案, 使得近几年来对板条激光器的研究受到了国内外的关注。传统的板条激光器采用大面抽运、大面冷却的方式, 激光在晶体中沿 zig-zag 形光路传输消除了一阶热聚焦、应力双折射和退偏效应。但该方案具有结构设计复杂、吸收长度短和抽运效率低等

缺点, 限制了传统板条激光器的发展。

随着半导体激光器以及晶体加工工艺水平的发展, 各种新型板条的设计方案不断地涌现, 并获得了良好的效果^[2~5]。其中 LD 侧边抽运的设计方案受到密切的关注^[6]。该方法使抽运与冷却面分离, 抽运光从板条的侧边方向抽运进去, 而在两个大面上实现冷却, 使整体的结构设计变得简单, 另一方面板条晶体可加工得更薄, 冷却效果更好, 从而提高了板条的破坏极限, 抽运功率密度和吸收长度也得到进一步的提高。

收稿日期: 2008-05-26; 收到修改稿日期: 2008-07-04

基金项目: 华中科技大学研究生科技创新基金(HF-05-02-2007-230)资助项目。

作者简介: 朱广志(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事固体激光器及其非线性频率变换技术的研究。

E-mail: zgzxb@sohu.com

导师简介: 朱 晓(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事固体激光技术及其应用方面的研究。

E-mail: zx@hust.edu.cn

本文从理论上对 LD 侧边抽运板条的热效应进行分析,采用了有限元方式对实际板条模型的温度、热应力、畸变等进行数值模拟,并估算了该板条的热透镜效应;对板条的热效应进行了实验研究。

2 理论分析与数值模拟

侧边抽运的 Nd:YAG 的结构如图 1 所示,掺杂原子数分数为 1%,其坐标选取如图 2 所示, x, y, z 分别沿板条的宽度(w)、厚度(t)和长度(L)方向,板条的长、宽、厚为 40 mm × 14 mm × 2.5 mm。两侧边分别采用输出功率为 60 W 的半导体阵列进行抽运,每侧半导体激光快轴方向的光斑通过准直透镜进行准直以实现光束的压缩,准直后的光斑尺寸为 400 μm。

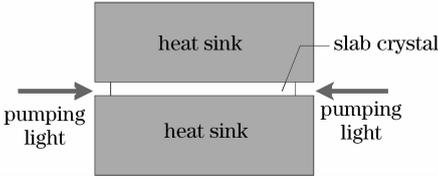


图 1 LD 侧边抽运的板条结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of LD edge-pumped slab laser

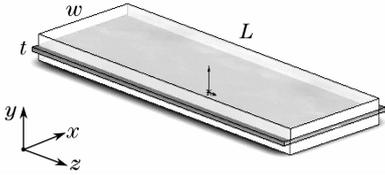


图 2 板条晶体结构及坐标图

Fig. 2 Slab geometry and coordinate

忽略抽运光在 z 向的差异,即认为每一个通光截面(xy 面)抽运光分布相同,并假设抽运光为一平面波,则二维的热稳态方程为^[7,8]

$$\nabla^2 T(x, y) = -\frac{Q(x)}{k}, \quad (1)$$

式中 $Q(x)$ 为单位体积生热量, k 为板条热导率。

边界条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial x} = 0, & x = \pm w/2 & (2a) \\ k \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda_{\text{head}} T = 0, & y = t/2 & (2b) \\ -k \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda_{\text{head}} T = 0, & y = -t/2 & (2c) \end{cases}$$

式中 λ_{head} 为板条和冷却剂之间的换热系数。(2a)和(2c)式分别在板条两侧绝热和两个大面进行冷却的条件下获得。

用傅里叶级数进行展开

$$T(x, y) = \frac{a_0(y)}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n(y) \cos(\beta_n x), \quad (\beta_n = 2n\pi/w) \quad (3)$$

$$Q(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\beta_n x), \quad \left(A_n = \frac{2}{w} \int_{-w/2}^{w/2} Q(x) \cos(\beta_n x) dx \right) \quad (4)$$

并代入边界条件,进行求解

$$T(x, y) = T'(x, y) + T_a, \quad (5)$$

式中 $T'(x, y)$ 为温度的位置依赖项, T_a 为平均温度,表达式分别为

$$T_a = T_c + \frac{Q_0 t}{2\lambda_{\text{head}}} + \frac{Q_0 t^2}{12k}, \quad (6)$$

$$T'(x, y) = \frac{2\eta_h \eta_{\text{abs}} P_P / l}{a_r k} \left\{ \frac{1}{16} \left[\frac{1}{3} - \left(\frac{2y}{t} \right)^2 \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n a_r^2}{4n^2 \pi^2} \frac{(\alpha w)^2}{(\alpha w)^2 + 4n^2 \pi^2} \times \left[1 - \frac{\frac{\lambda_{\text{head}} \cosh\left(\frac{2n\pi}{a_r} \frac{y}{t}\right)}{\lambda_{\text{slab}}}}{\frac{n\pi \sinh\left(\frac{n\pi}{a_r}\right) + \frac{\lambda_{\text{head}} \cosh\left(\frac{n\pi}{a_r}\right)}{\lambda_{\text{slab}}}} \right] \times \cos\left(2n\pi \frac{x}{w}\right) \right\}, \quad (7)$$

式中 $a_r = w/t$, $\lambda_{\text{slab}} = 6k/t$ 为板条的有效换热系数, η_h 为生热效率, η_{abs} 为抽运效率, P_P 为抽运功率。

在平面应变假设下,板条的抽运和冷却与长度方向无关, Rutherford 等^[9]给出了该抽运条件下板条 x, y 方向应力的解析解

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{\eta_h \eta_{\text{abs}} P_P / L}{M_S} \frac{\alpha w}{2a_r \sinh(\alpha w/2)} \cosh(\alpha x) \times \left[\frac{1}{2} \left(\frac{y}{t} \right)^2 - \frac{1}{24} \right], \\ \sigma_{yy} &= \frac{\eta_h \eta_{\text{abs}} P_P / L}{M_S} \frac{(\alpha w)^3}{2a_r^3 \sinh(\alpha w/2)} \cosh(\alpha x) \times \left[\frac{1}{24} \left(\frac{y}{t} \right)^4 - \frac{1}{48} \left(\frac{y}{t} \right)^2 + \frac{1}{384} \right], \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $M_S = (1-\nu)k/\alpha_t E$, ν 为泊松比, α_t 为热膨胀系数, E 为弹性模量。

通过理论分析,考虑双侧抽运在平面近似的条件下, x 向为正常的指数吸收,热源函数可以写为

$$Q(x, y) = \frac{P \cdot \eta \cdot \alpha_{\text{abs}}}{A} \times \{ \exp(-\alpha \cdot x) + \exp[-\alpha(b-x)] \}, \quad (9)$$

式中 P 为抽运光功率, η 为光热转换效率, α_{abs} 为吸收系数, A 为抽运面面积。因此可得到抽运光在板条晶体中吸收的空间特性如图 3 所示。可见双侧抽

运条件下,其抽运光在两端的吸收较多,在中间相对较少,在一定程度上造成抽运分布的不均匀,影响温度场的空间分布。

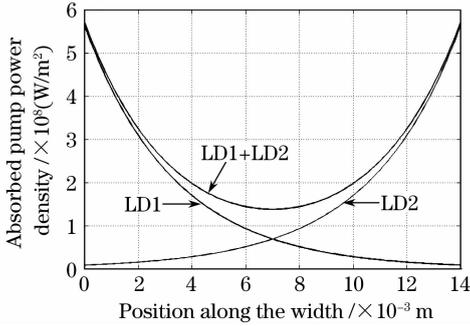


图3 抽运光在板条晶体中的吸收分布

Fig. 3 Gain distribution of edge-pumped slab

采用有限元软件对理论模型进行热分析,选取的 Nd:YAG 板条尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$,抽运面为 $2.5 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 面,冷却面为 $14 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 面,LD 阵列的功率设定为 120 W ,光热转换效率为 50% ,抽运光半径为 0.2 mm ,强制冷却温度为 25° ,外界空气温度为 25°C ,自由对流换热系数为 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。Nd:YAG 材料的基本参数如表1所示^[10]。

表1 Nd:YAG 材料的参数

Table 1 Fundamental parameters of Nd:YAG

Thermal conductivity $k / (\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	14
Thermal coefficient of expansion α_t / K^{-1}	5×10^{-6}
Young's modulus E / GPa	194.2
Poisson's ratio ν	0.3
Stress optic coefficient B_{\perp} ^[7]	7.7×10^{-14}
Stress optic coefficient B_{\parallel} ^[7]	-1.77×10^{-13}
$dn/dT / \text{C}^{-1}$	7.3×10^{-6}

2.1 板条 3D 温度场分布

通过分析得到板条晶体的 3D 温度场分布图,如图4所示。可以看出,由于抽运的不均匀性导致了板条内部温度场分布的变化,整体看温度最高点出现在抽运面的中心部分 ($T_{\max} = 30.20^\circ \text{C}$),冷却面温度最低 ($T_{\min} = 25^\circ \text{C}$)。xy 面内中心温度低而边缘温度高,板条中部的温度变化相对比较平缓而抽运端附近温度梯度变化比较严重。这主要是因为抽运光在晶体中分布特性决定的,在一定程度上引起了板条晶体的热应力空间分布的变化。

2.2 板条 3D 应力场的分布

由于板条内部温度场分布的不均匀性,导致了热应力的产生,从图5中可以看出 y 方向的主应力 σ_{yy} 相对较小,其最大值出现在板条的边缘和棱角部

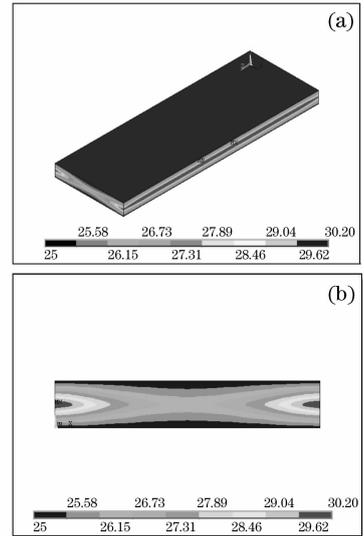


图4 板条晶体内部温度场分布图。(a) 3D

温度场分布;(b) xy 平面的温度场分布图

Fig. 4 Temperature distribution in the edge-pumped slab crystal. (a) 3D temperature distribution; (b) xy plan temperature distribution

分;从 x 方向和 z 方向的主应力 σ_{xx} , σ_{zz} 分布图中可以看出在板条表面为拉应力,在板条的内部为压应力,并且在板条的内部应力变化相对平缓,在板条表面的应力较大。因此在板条模块的设计中必须充分考虑板条本身热应力的分布情况。

2.3 板条 3D 热变形

由于温度场与热应力的存在,板条晶体在运行中必然产生热畸变,从图6中可以看出在板条 xy 面和 yz 面热变形比较明显,主要是向外膨胀。在板条的四个角处的热变形最为突出,因此在整体设计时,必须考虑其热膨胀的影响,使抽运的半导体阵列与板条的 yz 面之间留有一定的距离,同时考虑为四个角的膨胀留够充足的空间,防止由于热膨胀产生的应力而造成的晶体破裂。

2.4 热透镜效应

板条状激光介质在抽运光的作用下产生了不均匀的温度分布,使得原来均匀的介质内部折射率发生变化,光束沿 z 方向传播时会发生一定的偏转,呈现柱透镜的聚焦效应。文献[7]给出了板条折射率热变化的数学表达式

$$n_x = n_x^0 \left(1 - \frac{\alpha_x}{2} y^2\right), \quad n_y = n_y^0 \left(1 - \frac{\alpha_x}{2} y^2\right), \quad (10)$$

$$\text{式中 } n_x^0 = n + \frac{dn}{dT} \frac{Qt^2}{24k} - \frac{Q^2}{24M_s} (B_{\perp} + B_{\parallel}),$$

$$n_y^0 = n + \frac{dn}{dT} \frac{Qt^2}{24k} - \frac{Q^2}{12M_s} B_{\perp}, \quad (11)$$

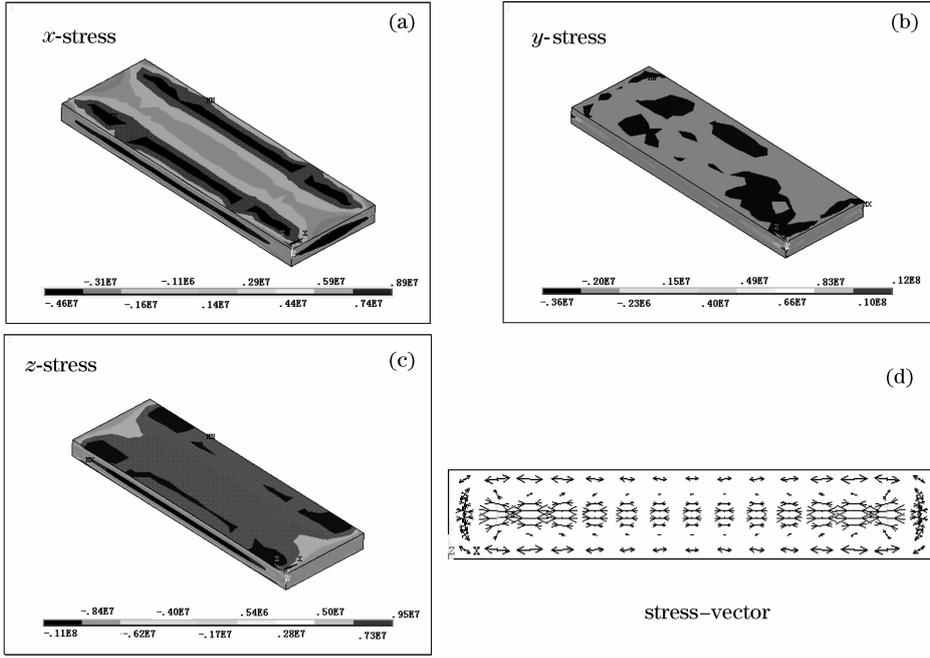


图 5 板条晶体的热应力分布图。(a) σ_{xx} 板条 x 向应力三维分布;(b) σ_{yy} 板条 y 向应力三维分布;

(c) σ_{zz} 板条 z 向应力三维分布;(d) xy 平面的应力矢量图

Fig. 5 Stress distribution of edge-pumped slab crystal, (a) σ_{xx} along x direction; (b) σ_{yy} along y direction; (c) σ_{zz} along z direction; (d) stress vector in xy plan

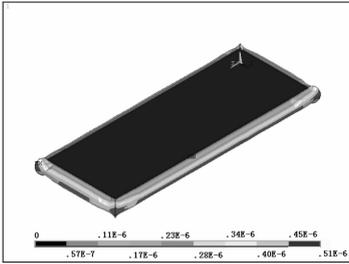


图 6 板条晶体的变形示意图

Fig. 6 Distortion of the edge-pumped slab crystal

$$\alpha_x = \frac{2}{n_x^0} \left[\frac{dn}{dT} \left(\frac{Q}{2k} \right) - \frac{Q}{2M_s} (B_{\perp} + B_{\parallel}) \right]$$

$$\alpha_y = \frac{2}{n_y^0} \left[\frac{dn}{dT} \left(\frac{Q}{2k} \right) - \frac{Q}{M_s} B_{\perp} \right], \quad (12)$$

其中 n_x, n_y 分别为 x, y 方向偏振光在 y 方向的折射率的分布, B_{\perp}, B_{\parallel} 为应力光学参数。

当光沿着板条 z 轴传输且满足 $\alpha_x L \ll 1; \alpha_y L \ll 1$ 时,热焦距可近似描述为

$$f_x = \frac{1}{n_x^0 L \alpha_x}, \quad f_y = \frac{1}{n_y^0 L \alpha_y}, \quad (13)$$

将(12)式代入(13)式得到

$$f_x = \frac{1}{2 \left[\frac{dn}{dT} \left(\frac{Q}{2k} \right) - \frac{Q}{2M_s} (B_{\perp} + B_{\parallel}) \right] \times L},$$

$$f_y = \frac{1}{2 \left[\frac{dn}{dT} \left(\frac{Q}{2k} \right) - \frac{Q}{M_s} B_{\perp} \right] \times L}, \quad (14)$$

从(14)式可以看出,上述热透镜效应由两部分组成,其中 $\frac{dn}{dT} \left(\frac{Q}{2k} \right)$ 为板条内温度场分布不均匀所带来的热聚焦效应,而 $\frac{Q}{2M_s} (B_{\perp} + B_{\parallel})$ 与 $\frac{Q}{M_s} B_{\perp}$ 为不同方向热应力所带来的热聚焦效应。

相比于温度场的影响,热应力引起的热透镜效应要小得多,因此对于自然光沿着板条 z 方向传播时,可采用(12)式括号内第一部分来近似估算热焦距的大小,具体计算结果如表 2 所示,热焦距的大小与板条晶体发热量成反比,并随着发热量的增加而减小。

表 2 板条的 y 方向热焦距

Table 2 Slab thermal focal length along y direction

Pumping current / A	Pumping power / W	Thermal focal length along y direction / m
10	40	1.12
14	72	0.62
16	80	0.54

另一方面,从数值模拟结果可以看出,沿着板条宽度方向温度分布也不均匀,沿着 z 轴方向传播的

光束将发生像散,数值计算较为复杂,通常采用试验测量的方式获得。

3 实验结果与分析

在理论分析与数值模拟的基础上设计了双侧边抽运的板条 Nd:YAG 激光模块,对其热焦距进行测量与分析。

实验装置如图 7 所示,He-Ne 激光(非偏振)经扩束后分别对板条厚度方向和宽度方向的热焦距进行测量,并记录下光斑的形状变化。实验结果如图 8 所示^[11,12]。

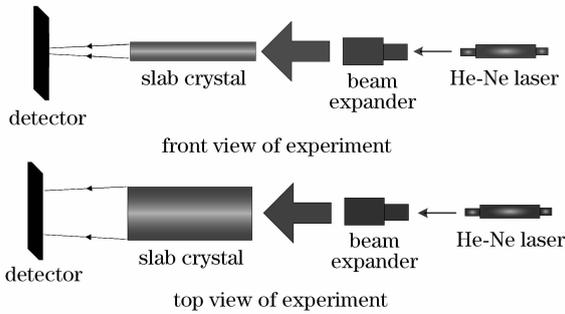


图 7 板条热焦距测量的原理图

Fig. 7 Experiment schematic of thermal focal length measurement

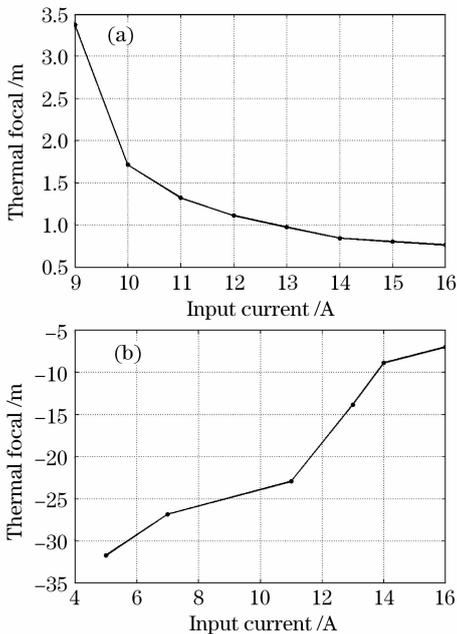


图 8 热焦距的测量曲线。(a) 厚度方向的热焦距;
(b) 宽度方向的热焦距

Fig. 8 Thermal focal curve along thickness and width direction. (a) thickness; (b) width

板条的热透镜效应由两部分组成,一部分是温度不均匀性引起的折射率非均匀分布所导致的热效

应;另一部分是由于应力引起的折射率变化导致的热效应,其中由于热分布导致的热透镜占主导。宏观上看其光斑形状与理论分析得到的 xy 平面温度场分布的彩云图类似,在厚度方向(y 方向)由于中心温度高边缘温度低,板条对激光产生聚焦作用,因此随着抽运电流的增加,热焦距逐渐减小。当电流 I 大于 14 A(半导体激光器的抽运功率约为 72 W)时,热焦距趋于稳定,约为 0.8 m。而理论估算值为 0.65 m。从变化趋势上看,理论计算与实验测量相同,但两者数值上存在一定的误差,这主要是由于实际的温度场分布比理论分析所得的结果复杂,加之测量也存在一定的误差。而宽度方向(x 方向)温度场分布为抽运边缘的温度高,中心的温度低,从而形成了一个“负透镜”,板条对激光产生发散作用,因此随着抽运电流的增加,热焦距逐渐减小。

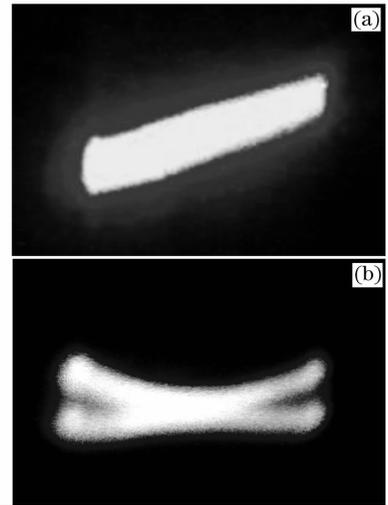


图 9 光斑畸变情况的对比图。(a) 入射光斑的形状;
(b) 输出光斑的形状

Fig. 9 Beam spot shape contrast before and after the edge-pumped slab crystal. (a) shape of input beam spot; (b) shape of output beam spot

图 9 为在电流为 16 A(半导体激光器抽运功率约为 80 W)的情况下,入射光斑和出射光斑形状的对比图,其中出射光斑是在距离板条后端面 0.2 m 的位置进行测量的。由于热透镜效应的存在,可以看出光斑在厚度和宽度方向都发生了形变,因此在谐振腔的设计中必须分开考虑厚度和宽度方向热透镜效应的影响,以便获得良好的光束输出。

4 结 论

对 LD 侧边抽运的板条激光器的热效应进行了理论研究和数值模拟,并通过实验对设计的板条模

块进行了热效应研究,结果表明,板条内部温度场分布的不均匀是导致热应力、热畸变的本质原因;由于温度场不均匀所导致的热畸变使得板条四周有向外膨胀的趋势,因此在模块设计时必须充分考虑这方面的因素;板条晶体厚度方向对激光有会聚作用,而宽度方向对激光有发散作用,在谐振腔的设计方面必须对这两个方向分别设计以保证高质量的激光输出。

参 考 文 献

- 1 W. B. Martin, J. Chernoch. Multiple internal reflection face-pumped laser [P]. US, Patent 3633126, 1972
- 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 Keming Du, Yan Liao, Peter Loosen. Nd:YAG slab laser end-pumped by laser-diode stacks and its beam shaping [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **140**(1-3):53~56
- 4 Keming Du, Nianle Wu, Jiandong Xu *et al.*. Partially end-pumped Nd:YAG slab laser with a hybrid resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(5):370~372
- 5 Sho Amano, Takayasu Mochizuki. High average and high peak brightness slab laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(2):296~303
- 6 T. S. Rutherford, W. M. Tulloch, S. Sinha *et al.*. Yb:YAG and Nd:YAG edge-pumped slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(13):986~988
- 7 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser — part I: theory [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(3):289~301
- 8 Todd S. Rutherford, William M. Tulloch, Eric K. Gustafson *et al.*. Edge-pumped quasi-three-level slab lasers: Design and power scaling [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(2):205~218
- 9 Todd S. Rutherford. An edge-pumped Yb:YAG slab laser and phased array resonator[D]. USA, Stanford University, 2001, 8~33
- 10 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
- 11 Liao Yan, He Huijuan, Li Yongchun *et al.*. Investigation on thermal stability of solid-state slab laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, **12**(8):693~696
廖 严,何慧娟,李永春 等. 板条固体激光器热稳定特性的研究 [J]. *光学学报*, 1992, **12**(8):693~696
- 12 Liu Jia, Fu Wenqiang, Hu Qiquan. Dynamic thermal aberration measurement of side-pumped slab laser medium [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):511~514
刘 佳,付文强,胡企铨. 侧面抽运板条激光介质动态热畸变测量方法 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(4):511~514