

文章编号: 0258-7025(2009)07-1784-05

# 五边形板条的优化设计及其热效应分析

刘 亮<sup>1</sup> 郭少锋<sup>1</sup> 陆启生<sup>1</sup> 许晓军<sup>1</sup> 刘选俊<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; <sup>2</sup> 重庆通信学院军事电力工程系, 重庆 400035)

**摘要** 对最新提出的五边形板条激光介质进行了几何光学分析, 提出了优化其几何参数以提高入射光束截面宽度, 尽可能充分提取增益的方法, 发现了五边形板条要求介质对抽运光的吸收系数不低于某一阈值。采用有限元分析对热效应造成的波前畸变进行了分析, 结果表明五边形板条在厚度及宽度方向均存在严重的热透镜效应, 且无法用补偿透镜进行消除, 因此, 难以在高功率条件下获得高光束质量激光输出。

**关键词** 固体激光器; 板条激光器; 板条放大器; 五边形板条

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1784

## Geometric Optimization and Thermal Effect of Five-Sided Slab

Liu Liang<sup>1</sup> Guo Shaofeng<sup>1</sup> Lu Qisheng<sup>1</sup> Xu Xiaojun<sup>1</sup> Liu Xuanjun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Opto-Electronic Science and Engineering College, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

<sup>2</sup> Department of Power Engineering, Chongqing Communication College, Chongqing 400035, China

**Abstract** A method for increasing the maximum cross-section of beam in a five-sided slab by optimal selection of its geometry parameters is presented. The geometric analysis results indicate that the absorption coefficient of pump laser must be greater than the threshold value. The thermal distortion is analyzed by numerical simulation and the results show that it is hard to obtain high beam quality at high output power due to strong but inconsistent intensity of thermal effects in both width and thickness direction.

**Key words** solid-state laser; slab laser; slab amplifier; five-sided slab

## 1 引 言

高能固体激光器由于输出波长短、有利于大气传输、体积小、可定标放大等优点, 在工业、通信、军事、测量上具有广泛的应用。由于受到热效应的影响, 传统的棒状激光器输出光束质量较差。为了减小热效应的影响, 人们提出了多种固体激光介质构型, 如截面为三角形<sup>[1,2]</sup>、四边形<sup>[3~8]</sup>、五边形<sup>[9~11]</sup>等。

2009 年, Chard 等<sup>[12]</sup>提出了一种新颖的五边形板条 (COFFIN: Compact face-folded internally amplifier) 构型, 通过激光在介质内部的多次掠入射来平均增益及温度的不均匀性, 以获得高光束质量

的激光输出。当抽运功率为 80 W 时, 采用平-平腔设计在调 Q 模式下获得了 30 W 的激光输出。当抽运功率为 250 W 时, 将 COFFIN 板条用作放大级采用 MOPA 方案实现了 100 W 的激光输出。

本文对 COFFIN 板条进行了几何光学分析, 得出了其优化设计的条件, 并对热效应造成的波前畸变进行了分析。

## 2 COFFIN 结构优化设计

如图 1 所示, 当截面宽度为  $a_0$  的激光以  $\theta$  角掠入射至介质表面时, 入射光束与反射光束所形成的等腰三角形重叠区域的底边长度、高以及面积分别为

收稿日期: 2009-03-31; 收到修改稿日期: 2009-05-11

作者简介: 刘 亮(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事固体激光器热管理方面的研究。E-mail: ll06b@126.com

导师简介: 陆启生(1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术、激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn

$$a_s = \frac{a_0}{\sin \theta}, \quad (1)$$

$$h = \frac{a_0}{2 \cos \theta}, \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{2} \frac{a_0^2}{\sin 2\theta}, \quad (3)$$

由以上 3 式可知,入射光束的截面宽度  $a_0$  越大,光束在抽运面上截得的宽度  $a_s$  就越长,重叠区域的面积越大,对该区域的增益提取越充分。激光入射至抽运区域的入射角  $\theta$  越小,光束在抽运面上截得的宽度  $a_s$  就越长,重叠区域的面积越大,增益提取越充分。但是如果入射角  $\theta$  太小,就会因  $h$  太小而降低抽运光的利用率,导致增益减小。因此有必要对 COFFIN 结构进行合理的设计。

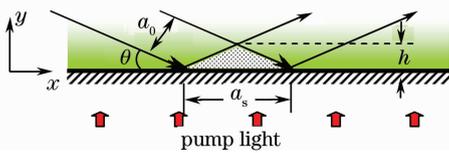


图 1 光线掠入射示意图

Fig. 1 Schematic of the grazing-incidence bounce

图 2 为文献[12]中的 COFFIN 板条的截面示意图。共有 5 条边组成,其中抽运光分别从 AB,DE 面垂直入射,激光从 AE 面垂直入射后分别经 AB,BC,CD,DE 面多次反射,然后垂直于 AE 面出射。AB,DE 面镀 808 nm 增透膜,AE 面镀 1064 nm 增透膜。微通道热沉焊接在图示截面两侧进行散热。

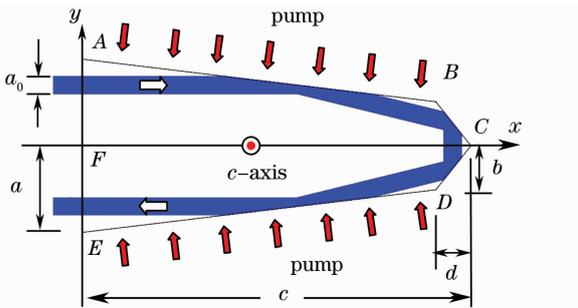


图 2 COFFIN 结构截面示意图

Fig. 2 Schematic of the COFFIN slab

建立图 2 所示的笛卡尔坐标系,坐标原点位于 AE 边的中点 F,y 轴与 AE 边重合。设板条直边 AB 与 x 轴夹角大小为  $\theta_1$ ,BC 与 x 轴夹角大小为  $\theta_2$ ,由平面解析几何知识可知板条结构参数  $a,b,c,d,\theta_1$  和  $\theta_2$  中只有 3 个独立变量。若这 3 个独立变量分别为  $a,c$  和  $\theta_1$ ,则其余参量为

$$\theta_2 = \theta_1 + \pi/4, \quad (4)$$

$$b = \cos \theta_1 (\cos \theta_1 + \sin \theta_1) (a - c \tan \theta_1), \quad (5)$$

$$d = \cos \theta_1 (\cos \theta_1 - \sin \theta_1) (a - c \tan \theta_1). \quad (6)$$

由于 COFFIN 结构沿  $y = 0$  面对称,为了分析的方便,这里仅对  $y \geq 0$  部分进行研究。当激光从 AE 边上的  $P_0$  点  $(0, y_0)$  入射时(图 3),其在 AB,BC 边上的反射点  $P_1, P_4$  坐标分别为

$$\begin{cases} x_1 = (a - y_0) \cot \theta_1 \\ y_1 = y_0 \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_4 = -a + c + y_0 - a \cos(2\theta_1) + c \sin(2\theta_1) \\ y_4 = (a - y_0 + a \cos(2\theta_1) - c \sin(2\theta_1)) \tan(\pi/4 + \theta_1) \end{cases}. \quad (8)$$

同理可以计算从  $P_9$  点  $(0, y_9)$  入射激光在 AB,BC 边上的反射点  $P_2, P_3$  的坐标。

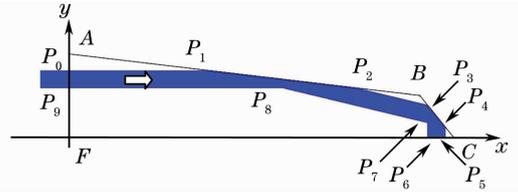


图 3 COFFIN 板条中入射激光光路图

Fig. 3 Schematic of beam propagation in the COFFIN slab

为了保证激光能够沿初始入射方向反向输出,反射点  $P_1, P_4$  坐标必须满足条件

$$\begin{cases} b \leq y_1 \leq a \\ 0 \leq y_4 \leq b \end{cases}, \quad (9)$$

将(5)~(8)式代入(9)式,经比较分析可得结论:

1) 入射激光与 AE 面交点纵坐标  $y_0$  的下限始终为  $b$ 。

2) 入射激光与 AE 面交点纵坐标  $y_0$  的上限根据板条尺寸的变化而不同:

当  $a/c \leq \tan(2\theta_1) < \arctan(a/c)$  时,交点纵坐标  $y_0$  上限为

$$y_{\max} = a + a \cos(2\theta_1) - c \sin(2\theta_1), \quad (10)$$

此时入射光线可以充满整个  $(b, y_{\max})$  的空间,入射激光的最大截面宽度  $a_{0,\max}$  为

$$a_{0,\max} = a \cos^2 \theta_1 + c \sin^2 \theta_1 - (a + c) \sin \theta_1 \cos \theta_1. \quad (11)$$

当  $0 < \tan(2\theta_1) \leq a/c$  时,交点纵坐标  $y_0$  上限为

$$y_{\max} = a, \quad (12)$$

此时入射光线可以充满整个  $(b, a)$  的空间,入射激光的最大截面宽度  $a_{0,\max}$  为

$$a_{0,\max} = (a + c) \sin^2 \theta_1 - (a - c) \sin \theta_1 \cos \theta_1. \quad (13)$$

图 4 为上述两种情况下,入射激光取最大截面宽度时 COFFIN 板条中的光路图。

由初等数学知识易知在区间  $[0, \arctan(a/c)]$

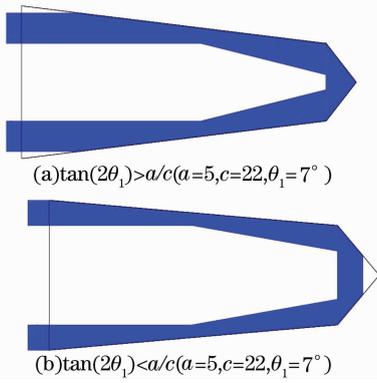


图 4 不同尺寸 COFFIN 板条最优光路图  
Fig. 4 Optimal schematic of beam propagation  
in the COFFIN slab

内,当

$$\theta_1 = 0.5 \arctan(a/c) \quad (14)$$

时,入射光束截面宽度  $a_{0,\max}$  取最大值,

$$a_{0,\max} = \frac{1}{2}(a+c-\sqrt{a^2+c^2}), \quad (15)$$

此时,抽运面上等腰三角形的高为

$$h = \frac{a_{0,\max}}{2 \cos \theta_1} = \sqrt{\frac{1}{8} \frac{\sqrt{a^2+c^2}(a+c-\sqrt{a^2+c^2})^2}{\sqrt{a^2+c^2}+c}}. \quad (16)$$

假设介质对抽运光呈指数吸收,吸收系数为  $\alpha$ ,为了使抽运光的利用率不低于 99%,则  $h$  不应小于  $h_{\min}$

$$h_{\min} = \frac{\ln 100}{\alpha}, \quad (17)$$

结合(16),(17)式可得介质对抽运光的吸收系数不应低于

$$\alpha = \frac{\ln 100}{\sqrt{\frac{1}{8} \frac{\sqrt{a^2+c^2}(a+c-\sqrt{a^2+c^2})^2}{\sqrt{a^2+c^2}+c}}}. \quad (18)$$

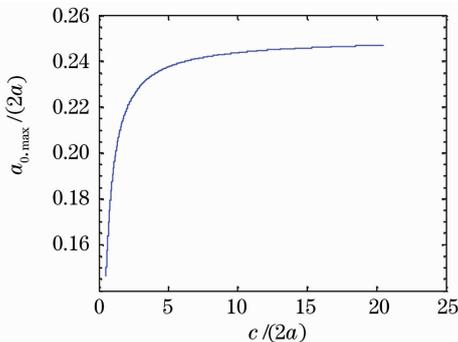


图 5 最大截面宽度  $a_{0,\max}$  随板条长宽比  
Fig. 5 Maximum cross-section of beam as  
a function of  $c/(2a)$

图 5 为入射激光最大截面宽度随板条长宽比

( $c/(2a)$ ) 的变化趋势图,从图中可以看出入射激光的最大截面宽度随着板条长宽比的增大而增大,但无法达到板条宽度的 1/4。当板条长宽比( $c/(2a)$ )达到 7:1 时,入射激光的最大截面宽度达到  $0.48a$ ,继续增大板条长宽比对于提高入射激光的截面宽度没有多大意义。

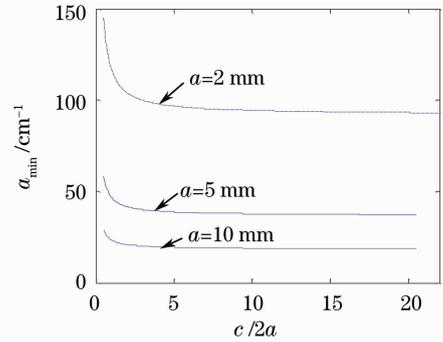


图 6 最低吸收系数随板条长宽比的变化

Fig. 6 Minimum absorption coefficient as a function  
of  $c/(2a)$  for COFFIN slab with different width

图 6 为介质对抽运光的最低吸收系数随板条长宽比( $c/(2a)$ ) 的变化趋势图,从图中看出最低吸收系数随着板条长宽比的增大而减小,直至趋于一稳定值。对于不同宽度的 COFFIN 板条而言,最低吸收系数的要求不同,板条越宽,最低吸收系数越小。以文献[12]中半宽度为  $a=5$  mm 的 COFFIN 板条为例,吸收系数至少应达到  $37 \text{ cm}^{-1}$ ;当板条长宽比( $c/(2a)$ )达到 7:1 时,最低吸收系数约为  $38 \text{ cm}^{-1}$ ,继续增大板条长宽比对于降低离子掺杂浓度没有多大意义。

### 3 热效应分析

文献[12]以长度、宽度、厚度分别为 22 mm, 10 mm, 2 mm 的 Nd:YVO<sub>4</sub> COFFIN 板条晶体为放大器,采用 MOPA 方案,在 120 W 的抽运功率下获得了 82.5 W 的激光输出,光束质量  $M^2 < 1.8$ 。继续增大抽运功率,作者观察到了严重的光束质量下降。

为了对该结构中热透镜效应进行评估,对板条两侧抽运功率均为 100 W 时板条晶体中的热效应进行了分析。设介质对抽运光呈指数吸收,吸收效率为 85%,光热转换效率为 32%,板条两个大表面散热系数为  $10 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ ,冷却液温度为  $20^\circ \text{C}$ ,计算中使用到的其他参数<sup>[13]</sup>为:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 7^\circ & a_0 &= 1.9865 \text{ mm} \\ \rho &= 4.23 \text{ g/cm}^3 & \alpha &= 37 \text{ cm}^{-1} \end{aligned}$$

$$K_{\perp c} = 5.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) \quad K_{//c} = 5.23 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

$$n_{\perp c} = 1.9915 \quad n_{//c} = 2.2148$$

$$dn/dT_{\perp c} = 8.5 \times 10^{-6} \quad dn/dT_{//c} = 3 \times 10^{-6}$$

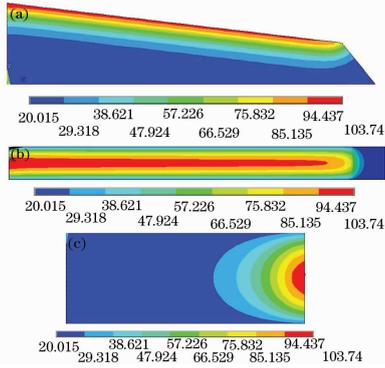


图 7 板条介质(a) $z=1 \text{ mm}$  截面,(b)  $AB, BC$  面和 (c)  $x=0$  平面上的温度场分布

Fig. 7 Temperature distribution in COFFIN slab (a) temperature contour at  $z = 1 \text{ mm}$ ; (b) temperature contour at surface  $AB, BC$  and (c) temperature contour at  $x=0 \text{ mm}$

由于板条晶体结构及抽运光分布均关于  $y = 0$  面对称,计算中仅对  $y \geq 0$  部分进行分析。图 7 为计算得到的(a) $z=1 \text{ mm}$  处截面;(b)  $AB, BC$  面;(c)激光入射面  $AE$  上的温度分布。从图中可以看出,由于晶体对抽运光存在强烈的吸收,大部分能量在抽运光入射面附近一薄层内被吸收,因此晶体中靠近抽运光入射面  $1 \text{ mm}$  范围内温度很高,最高

达  $103 \text{ }^\circ\text{C}$ ,而中心轴线( $CF$ )位置附近  $\pm 1 \text{ mm}$  范围内温度不超过  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在板条三角端( $BCD$ 段)靠近抽运光入射面区域,由于热传导作用温度较高,最高达到约  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,远离抽运光区域由于不存在抽运光吸收,温度较低。同时由于三角端的冷却作用,沿板条长度方向,抽运光入射面上的高温带向三角端逐渐减小。

为了便于分析热效应对波前畸变的影响,假设入射激光为平面波,并以不同位置入射的光线在板条中传输的光程差(OPD) $d_{\text{OPD}}$ 来表示波前畸变

$$d_{\text{OPD}}(y, z) = d_{\text{OP}}(y, z) - d_{\text{OP}}(y, z)_{\text{min}}, \quad (19)$$

其中  $d_{\text{OP}}$  为光程函数。

图 8 为计算得到的由于热光效应导致的波前畸变,从图中可以看出:在板条厚度( $z$ )方向上存在严重的抛物线形波前畸变,且板条宽度( $y$ )方向上不同位置处入射激光产生的热透镜焦距存在差异,最小约为  $0.3 \text{ m}$ ,最大约为  $0.5226 \text{ m}$ ,这主要是由于厚度方向两个大表面为散热面,而激光仅能平均  $xoy$  面内的温度梯度。沿板条的宽度( $y$ )方向,不同厚度位置处入射激光的波前畸变相差很大,且分布不对称, $z=0 \text{ mm}$  处由于靠近散热面,温度低,波前畸变小,产生的热透镜焦距约为  $11.9 \text{ m}$ , $z=1 \text{ mm}$  处由于远离散热面,温度高,波前畸变大,产生的热透镜焦距约为  $1.2 \text{ m}$ 。波前畸变分布不对称主要是由于靠近  $A$  点的入射激光将在靠近  $E$  点的位置出射,导致从  $P_0$  入射的激光与从  $P_9$  入射的激光经历的温度分布状况并不一致。

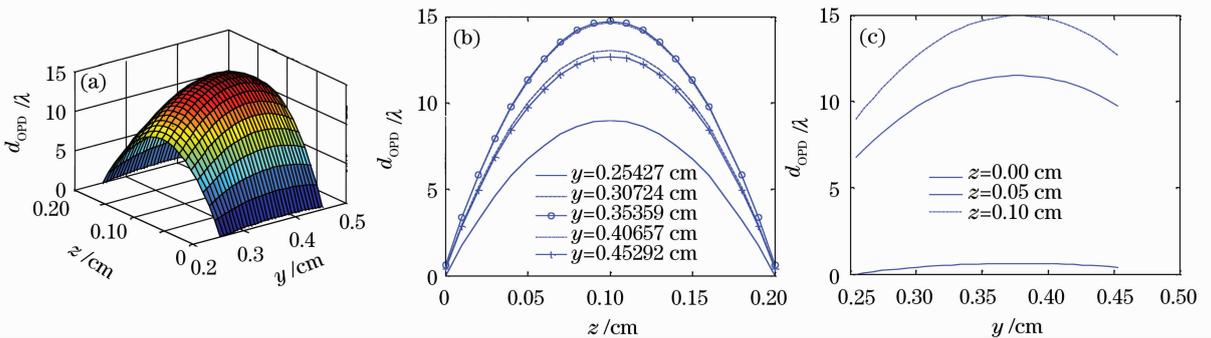


图 8 温度梯度引起的波前畸变。(a)  $d_{\text{OPD}}$  分布图;(b)  $d_{\text{OPD}}$  与板条厚度的关系;(c)  $d_{\text{OPD}}$  与板条宽度的关系

Fig. 8  $d_{\text{OPD}}$  due to thermal gradient as a function of incidence position. (a)  $d_{\text{OPD}}$  distribution; (b)  $d_{\text{OPD}}$  along thickness direction; (c)  $d_{\text{OPD}}$  along width direction

综上所述,在高功率抽运条件下,COFFIN 板条由于热效应导致的波前畸变随激光入射位置的不同而变化,热透镜效应主要发生在厚度方向;厚度方向上热透镜焦距随着宽度方向激光入射位置的变化而变化,宽度方向上热透镜焦距随着厚度方向激光入

射位置的变化而变化,且差异明显。因此,简单地采用补偿透镜无法消除热效应的影响。

### 4 结 论

对最新提出的 COFFIN 板条激光介质进行了几

何光学分析,得到了最优化条件下板条结构参数之间的关系,结果表明,COFFIN 板条入射光束的最大截面宽度无法达到板条宽度的 1/4,且此结构对晶体有最低掺杂浓度限制,晶体尺寸越小,最低掺杂浓度要求越高。采用数值模拟的方法对板条中的温度场分布进行了计算,并对温度梯度造成的波前畸变进行了分析,结果表明,由于此结构要求对晶体进行高掺杂以获得较大的增益系数,仅热光效应就会导致板条宽度及厚度方向严重的热致波前畸变,且此畸变无法采用补偿透镜来消除。因此,COFFIN 板条难以在高功率条件下获得高光束质量激光输出。

### 参 考 文 献

- 1 W. Zendzian, J. K. Jabczyński, Z. Mierczyk. Investigation on passively Q-switched Nd:YAG slab laser pumped by 2D quasi cw diode laser stack [J]. *Opt. Electron. Review*, 2001, **9**: 75~81
- 2 Jan Šulc, Helena Jelinková, Jan K. Jabczyński *et al.*. Comparison of diode-side-pumped Nd:YAG and Nd:YAP laser [C]. *SPIE*, 2005, **5707**: 325~334
- 3 Te-yuan Chung, Michael Bass. General analysis of slab lasers using geometrical optics [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(4) : 581~590
- 4 Stephen Palese, Joseph Harkenrider, William Long *et al.*. High brightness, end-pumped, conduction cooled Nd:YAG zig-zag slab laser architecture [J]. *Advanced Solid-State Lasers*, 2001, **50**: 41~46
- 5 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
- 6 Zhang Lingling, Men Junqing, Huang Yan *et al.*. Recent advances in high-power solid-state slab lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(4): 32~36  
张玲玲, 孟俊清, 黄燕等. 高功率板条激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(4): 32~36
- 7 Chen Lin, He Shaobo, Liu Jianguo *et al.*. Progress of hundred-kilowatt high-average-power slab laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(1): 37~42  
陈林, 贺少勃, 刘建国等. 新一代百千瓦高平均功率板条激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(1): 37~42
- 8 Gregory Goodno, Hiroshi Komine, Stuart McNaught *et al.*. Multi-kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser [C]. *Paper presented at the CLEO*, 2005
- 9 J. Richards, A. McInnes. Versatile, efficient, diode-pumped miniature slab laser [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**: 371~373
- 10 D. Mudge, M. Ostermeyer, P. J. Veitch *et al.*. Power scalable TEM<sub>00</sub> CW Nd:YAG laser with thermal lens compensation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(4): 643~649
- 11 Martin Ostermeyer, Damien Mudge, Peter J. Veitch *et al.*. Thermally induced birefringence in Nd:YAG slab lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(21): 5368~5376
- 12 S. P. Chard, M. J. Damze. Compact architecture for power scaling bounce geometry lasers [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2218~2223
- 13 Marvin J. Weber. *Handbook of Optical Materials* [M]. University of California, CRC Press, 2003