

文章编号: 0258-7025(2010)11-2774-06

六边形“之”字光路板条激光器

刘亮 郭少锋 陆启生 许晓军

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 提出了一种六边形板条激光介质设计方法, 由于激光在介质内部沿“之”字形光路传输, 与 COFFIN 板条相比, 同等抽运功率水平下六边形板条中热致波前畸变的幅值更低, 并且更加容易补偿。此外, 当激光沿板条长度方向入射时, 激光在入射端面上的入射角即为布儒斯特角, 且激光可以完全覆盖整个入射端面, 在板条内部填充因子为 1。

关键词 激光器; 固体激光器; 热效应; 板条激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2774

A Hexagonal Zigzag Slab Laser

Liu Liang Guo Shaofeng Lu Qisheng Xu Xiaojun

(Opto-Electronic Science and Engineering College, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A method to design hexagonal slabs with zigzag optical path was presented. Compared with COFFIN slabs, the amplitude of thermal-induced wave-front distortion is lower and easier to be compensated in hexagonal slabs. Moreover, the laser beam enters the slab at Brewster angle when it is parallel to the slab length direction, and covers the entire slab and the entrance aperture, which means the fill factor is 1 inside the slab.

Key words lasers; solid-state laser; thermal effect; slab laser

1 引言

高光束质量高能固体激光器在工业、军事、医疗、科研等领域有广泛的应用前景。传统的固体激光器采用棒状激光介质, 该构型的激光器热效应严重。为了克服热效应的影响, 研究人员提出了多种激光介质构型, 如光纤^[1~4]、盘片^[5,6]和板条^[7~10]等。

2009 年 S. P. Chard 等^[11]提出了一种新的 COFFIN 板条激光器 (Compact Face-Folded Internally Amplifier), 通过信号光在激光介质内部的多次掠入射^[11,12], 平抑介质内部温度和增益的非均匀性。采用主振荡功率放大器 (MOPA) 结构, 120 W 抽运功率下获得了 82.5 W 的激光输出, 光束质量因子 $M^2 < 1.8$ 。然而进一步提高抽运功率, 光束质量迅速恶化。刘亮等^[13]对该构型的板条激光器进行了详细的分析, 发现在高功率条件下此结构

会导致严重的热效应。

在板条激光器中, 实现温度和增益均匀化的另一种途径是使激光在工作介质内部沿“之”字形光路^[14~17]传输。J. Richards 等^[12,18]提出过一种六边形“之”字光路板条激光器方案。本文详细讨论了六边形板条激光介质的设计方法, 并进行了热效应分析。研究表明, 与 COFFIN 板条相比, 由于激光工作介质掺杂浓度低, 激光在板条内部沿“之”字形光路传输, 六边形“之”字光路板条中热效应大大降低。

2 六边形板条的结构设计

图 1 为六边形板条结构截面示意图, 该板条由两部分构成: 等腰梯形段和矩形段。L 为矩形段的长度, t 为板条的厚度, a 为梯形段的上边长, b 为梯形的高, α 为梯形的腰与板条长度方向的夹角。 θ 为激

收稿日期: 2010-03-08; 收到修改稿日期: 2010-04-29

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等方面的研究。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

光入射角, θ_i 为相应的折射角, β 为激光在板条内部传输时与长度方向的夹角, N 为激光在介质内部的反射次数, ζ 为激光入射方向与板条长度方向的夹角, Λ 为“之”字形光路的周期长度。 a_0 为 CD 界面上光斑的尺寸, n_{film1} 为截面 BE, CF 上的膜层折射率,

n_{film2} 为截面 EF 上的膜层折射率。截面 AB, CD 为激光的输入、输出面, BE, EF, CF 为全反射面。介质梯形段外部为空气所包裹, 其折射率为 n_{air} , 激光介质的折射率为 n_{crystal} 。

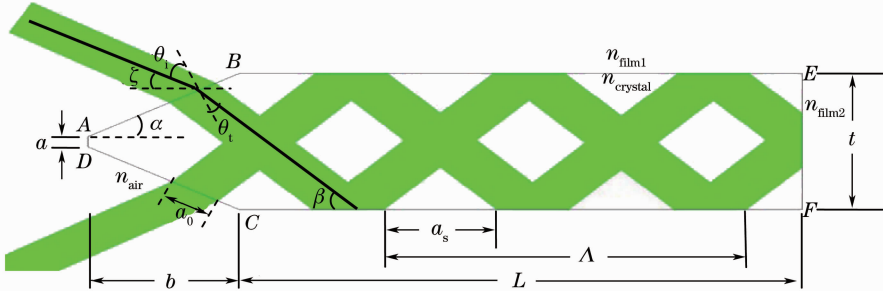


图 1 六边形板条结构参数示意图

Fig. 1 Schematic of a hexagonal zigzag slab

由几何光学知识可知

$$\Lambda = 2t \cot \beta, \quad (1)$$

$$a_s = \Lambda - 2a_0 \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta}, \quad (2)$$

$$n_{\text{air}} \sin \theta_i = n_{\text{crystal}} \sin \theta_i, \quad (3)$$

$$\tan \alpha = \frac{t - a}{2b}, \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{\pi}{2} - \alpha - \theta_i, \quad (5)$$

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta. \quad (6)$$

在实际的激光器设计中,有以下 4 个方面应予以注意:

1) 填充因子(FF),即一个“之”字形光路周期中,光束覆盖面积与该周期内的板条截面面积之比。设计中,期望填充因子为 1,这样激光就可以完全覆盖整个介质内部。显然此时要求 $a_s = 0$,即

$$a_0 = \frac{t \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad (7)$$

2) 激光入射端面占空比(Γ_{AR}),即入射端面 AB 上,光斑尺寸与 AB 面面积之比,它可以表示为

$$\Gamma_{\text{AR}} = \frac{a_0}{CD} = \frac{a_0 \cos \alpha}{b}, \quad (8)$$

设计中,同样期望 $\Gamma_{\text{AR}} = 1$,这样激光就可以完全覆盖整个入射面。

由(7),(8)式可以得到同时满足 FF 为 1, $\Gamma_{\text{AR}} = 1$ 的条件为

$$t \cos \alpha \cos \beta = b \sin(\alpha + \beta). \quad (9)$$

3) 光束入射方向与板条长度方向的夹角(ζ),设计中,常希望 $\zeta = 0$,这样可以简化激光器系统的设计,使光学元件的布局更加容易。由(5)式可得

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta_i. \quad (10)$$

4) 为了减小反射损耗,激光应以布儒斯特角入射至介质端面,有

$$\theta_i = \theta_{\text{Brewster}} = \arctan\left(\frac{n_{\text{crystal}}}{n_{\text{air}}}\right), \quad (11)$$

代入(10)式可得

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{n_{\text{crystal}}}{n_{\text{air}}}\right), \quad (12)$$

将(3),(12)式代入(6)式可得

$$\beta = \arctan\left(\frac{n_{\text{crystal}}}{n_{\text{air}}}\right) - \arctan\left(\frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{crystal}}}\right), \quad (13)$$

将(12),(13)式代入(9),(4)式可得

$$\frac{b}{t} = \frac{2n_{\text{air}}n_{\text{crystal}}}{n_{\text{air}}^2 + n_{\text{crystal}}^2}, \quad \frac{a}{t} = \frac{n_{\text{crystal}}^2 - 3n_{\text{air}}^2}{n_{\text{air}}^2 + n_{\text{crystal}}^2}. \quad (14)$$

可见,只有折射率大于 1.732 的晶体才能采用上述六边形板条设计。由(13),(14)式可知, t, a, b 和 β 满足

$$\frac{t + a}{2b} = \frac{n_{\text{crystal}}^2 - n_{\text{air}}^2}{2n_{\text{air}}n_{\text{crystal}}} = \tan \beta, \quad (15)$$

即在采用上述设计的六边形板条介质中,从 A 点入射的激光进入介质后将从 C 点反射。

为了保证激光在介质内部可以沿“之”字形光路传输,激光在 BE, EF, CF 面上必须满足全反射条件

$$\arcsin\left(\frac{n_{\text{film2}}}{n_{\text{crystal}}}\right) \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{n_{\text{film1}}}{n_{\text{crystal}}}\right), \quad (16)$$

β 及其上下限随晶体折射率的变化情况如图 2 所示。图 2(a)的交点说明若板条仅在 BE, CF 面上镀膜,则只有折射率大于 1.84 的激光晶体才可以采用侧面抽运结构。图 2(b)的交点说明若板条仅在 EF 面上镀膜,则只有折射率大于 2.2 的激光晶体才可

以采用端面抽运结构。综上所述,只有折射率大于 1.84 的激光晶体才能采用此六边形结构。表 1 列

出了可采用此设计的几种常用激光晶体对应的六边形结构参数。

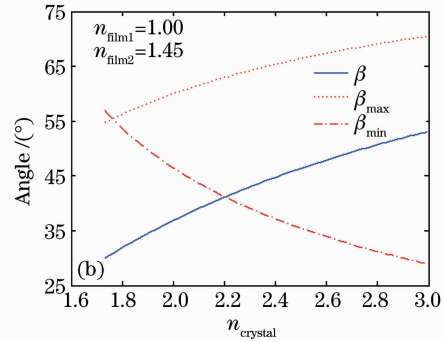
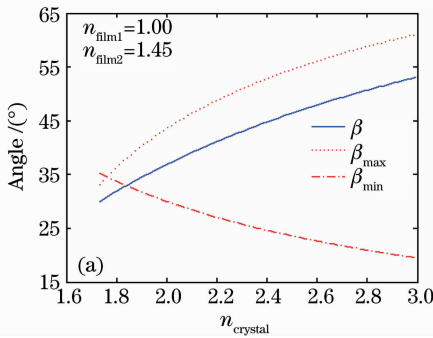


图 2 β 及其上下限随晶体折射率的变化

Fig. 2 β and its upper and lower limits as a function of crystal for a hexagonal zigzag slab

表 1 各种晶体板条的结构参数

Table 1 Structural parameters of an ideal slab for different crystals

	Nd:YVO ₄		Nd:YAP		
	$\perp c$: 1.9915	//c: 2.2148	a : 1.91	b : 1.92	c : 1.94
n_{crystal}					
$\alpha / (^\circ)$	26.66	24.2996	27.63	27.51	27.27
$\beta / (^\circ)$	36.67	41.4009	34.73	34.98	35.46
a/t	0.195	0.323	0.139	0.146	0.160
b/t	0.802	0.750	0.822	0.819	0.815

3 “之”字形光路设计

鉴于“之”字形光路在消除热效应方面的优势^[16,17],在六边形板条设计中,激光在介质内部的传输方式不再采用文献[11]中的掠入射方式,而采用“之”字形光路。为了简化分析,将板条在长度和厚度方向分别进行了延拓,如图 3 所示。由于从 A 点入射的激光进入介质后将由 C 点反射,激光在介质内部的反射次数 N 必为偶数。由几何知识可得

$$L = \frac{(t+a)/2 - b \tan \beta + Nt}{2 \tan \beta} = \frac{n_{\text{air}} n_{\text{crystal}}}{n_{\text{crystal}}^2 - n_{\text{air}}^2} Nt. \quad (17)$$

图 4 为采用图 3 光路设计获得的效果图,从图中可以看出,激光沿板条长度方向入射时,激光完全

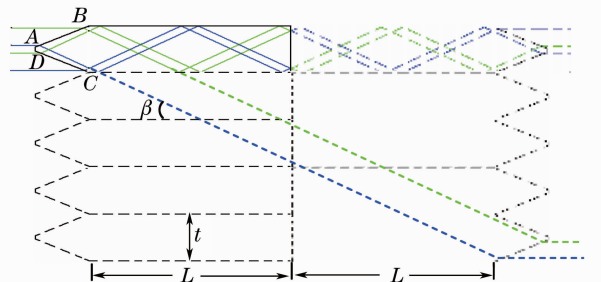


图 3 板条介质中“之”字形光路示意图

Fig. 3 Zigzag optical path in a stack of slabs for simplifying the analysis



图 4 六边形板条中的“之”字形光路

Fig. 4 Laser beam in a hexagonal zigzag slab 填充入射端面及介质内部。

4 与 COFFIN 板条热效应比较

文献[13]对图 5 所示 COFFIN 板条结构进行了仔细的几何光学分析和热效应分析。图 6 为计算得到的温度场及热致波前畸变空间分布。从图中可以看出,当总抽运功率为 200 W 时,介质内部的最高温度为 103.7 °C;制冷方向 (y) 的波前畸变

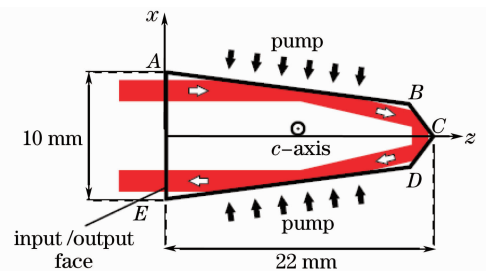


图 5 COFFIN 板条结构示意图

Fig. 5 Schematic of COFFIN amplifier design

(OPD)达到 10λ 量级,而抽运方向(x)的波前畸变也达到了 λ 量级,更严重的是,两个方向导致的热透镜焦距不一致。因此,简单地采用补偿透镜无法消

除热效应的影响。表 2 列出了文献[13]在分析中使用的材料参数。

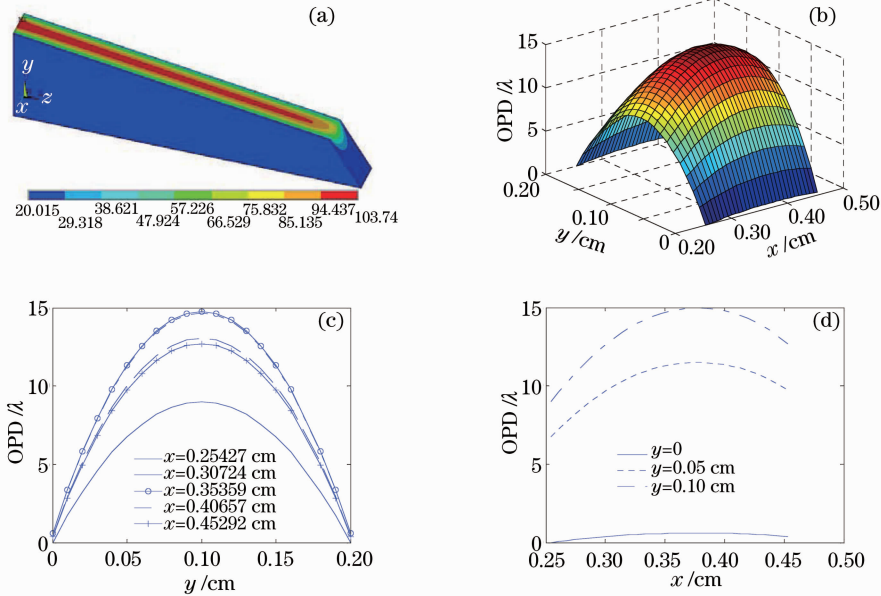


图 6 COFFIN 板条温度场及热致波前畸变空间分布(总抽运功率为 200 W)。(a)温度场分布,(b)OPD 随入射位置变化及 OPD 沿厚度(c)和宽度(d)的分布

Fig. 6 Temperature and OPD distribution in COFFIN slab when pump power is 200 W. (a) temperature distribution, (b) OPD as a function of incident location, (c) OPD along thickness direction, (d) OPD along width direction

表 2 模型的参数

Table 2 Parameters used for modeling

Parameters	Value
$K_{\perp c} / [W/(m \cdot K)]$	5.1
$K//c / [W/(m \cdot K)]$	5.23
$n_{\perp c}$	1.9915
$n//c$	2.2148
$dn/dT_{\perp c} / 10^{-6}$	8.5
$dn/dT//c / 10^{-6}$	3
$h / [W / (cm^2 \cdot K)]$	10
η	0.272
α / cm^{-1}	37

作为比较,设计了如图 7 所示的六边形复合板条,其尺寸为 $5\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 24.15\text{ mm}$,其中掺杂段长度为 16.79 mm ,两端的未掺杂段长度分别为 5.69 mm , 1.68 mm 。此时信号光在板条内部大表面共反射 6 次,且掺杂段长度恰好为“之”字形光路周期长度 Λ 的整数倍。与文献[11]中的 COFFIN 板条激光器一样,六边形板条采用侧面抽运、大面传导冷却结构,即抽运光从板条的两个侧面 BE, CF 注入, $ABEFC D$ 截面为散热面。采用表 2 所示数据,对六边形板条中的热效应进行了分析。略有不同的是,六边形板条热效应分析中抽运光的吸收系数取 6 cm^{-1} 。这是因为 COFFIN 板条激光器中,激

光在介质内部以掠入射方式传输,为了保证激光器的效率,抽运光吸收系数就不能低于一个特定的值^[13];而六边形板条激光器中,激光在介质内部沿之字形光路传输,填充因子为 1,因此,抽运光吸收长度即为板条宽度方向的尺寸 5 mm 。在 5 mm 的传输距离内, 6 cm^{-1} 的抽运光吸收系数即可保证吸收 95% 的抽运能量。

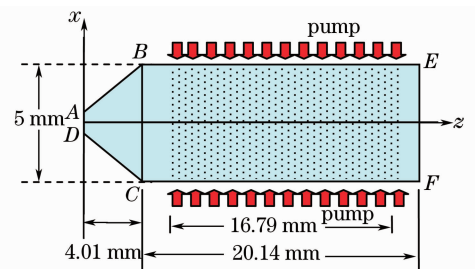


图 7 复合六边形板条结构示意图

Fig. 7 Schematic of ideal hexagonal slab design

图 8 为计算得到的温度场及热致波前畸变空间分布图。从图中可以看出,由于吸收系数大大减小,同样的抽运功率条件下,六边形板条内部的最高温度大大降低,仅为 $40.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时板条内部温度梯度也大大减小;由于信号光在板条内部 xoz 截面内沿“之”字形光路传输,对厚度方向(y)温度梯度没有补偿效应,

该方向上波前畸变达到了 λ 量级;在抽运方向(x),由于复合板条掺杂段、未掺杂段长度均为“之”字形光路周期长度 Δ 的整数倍,即使信号光在板条内部的反射

次数较少,但仍然可以很好地平抑了温度梯度的影响^[19],波前畸变只有 $\lambda/10$ 量级。因此,采用柱透镜就可以对波前畸变进行很好的补偿。

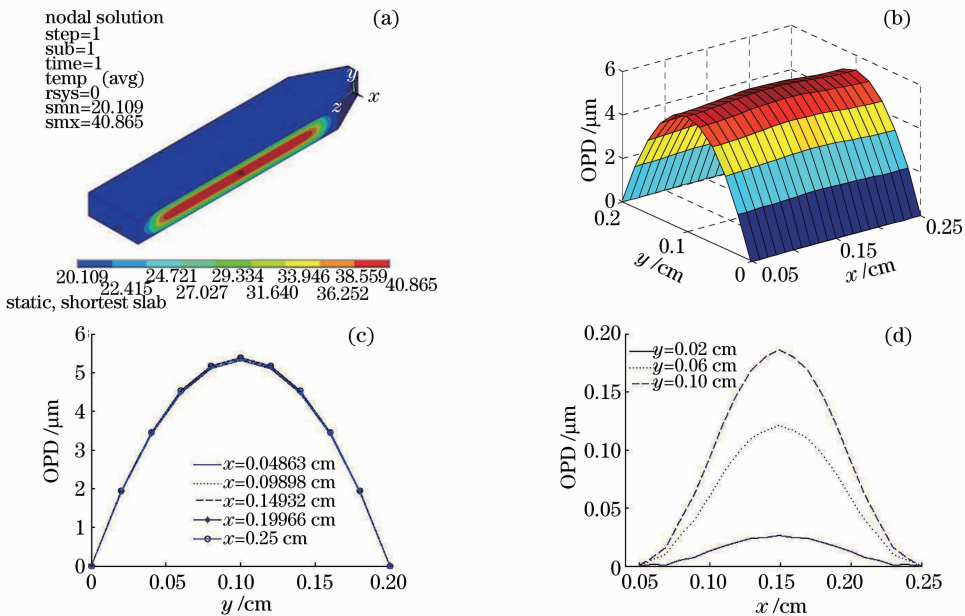


图 8 六边形“之”字光路板条中温度场及热致波前畸变空间分布(总抽运功率为 200 W)。(a)温度场分布,(b)OPD 随入射位置的变化及 OPD 沿厚度方向(c)和宽度方向(d)的分布

Fig. 8 Temperature and OPD distribution in a hexagonal zyzag slab when pump power is 200 W. (a) temperature distribution, (b) OPD as a function of incident location, (c) OPD along thickness direction, (d) OPD along width direction

图 9 显示了六边形“之”字光路板条放大器中最高温度、波前畸变幅值随抽运功率的变化曲线。从图中可以看出,板条内部最高温度和温度梯度导致的波前畸变的幅值均随着抽运功率的增加而线性递增。当抽运功率达到 800 W 时,六边形板条最高温度达到 103.46 °C,与 COFFIN 板条 200 W 抽运时

最高温度相当;当抽运功率达到 538 W 时,六边形板条中波前畸变幅值达到 $15 \mu\text{m}$,与 COFFIN 板条 200 W 抽运时产生的波前畸变相当。由图可见,同等光束质量激光输出水平条件下,六边形“之”字光路板条的输出功率是 COFFIN 板条的 2~3 倍。

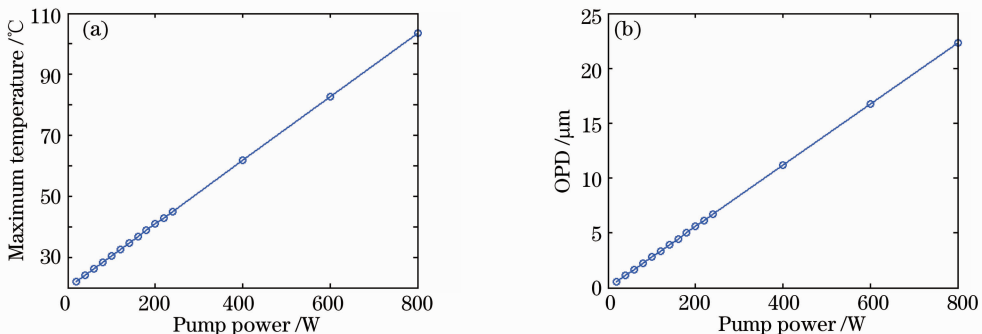


图 9 最高温度(a),波前畸变幅值(b)随抽运功率的变化

Fig. 9 Maximum temperature (a) and OPD (b) as a function of pump power

5 八边形板条结构

如前所述,只有折射率大于 1.84 的激光晶体,才可以采用六边形板条设计来实现 $\Gamma_{\text{FF}} = 1, \Gamma_{\text{AR}} = 1, \zeta = 0, \theta_i = \theta_{\text{Brewster}}$ 。事实上,对于折射率介于

1.73~1.84 之间的晶体(如 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$),可以将其设计为八边形板条结构,并辅以直角棱镜来实现 $\Gamma_{\text{FF}} = 1, \Gamma_{\text{AR}} = 1, \zeta = 0, \theta_i = \theta_{\text{Brewster}}$ 。以 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 为例,首先按照(14),(17)式计算得到六边形结构尺寸

参数 a, b, L , 然后沿 EF 将板条翻转得到八边形结构。图 10 显示了 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 八边形板条中的光路图。从图中可以看出, 该设计可实现上述设计目标。



图 10 八边形板条中的“之”字形光路

Fig. 10 Laser beam in an octagonal zigzag slab

6 结 论

详细推导了六边形板条结构及“之”字形光路的设计方法, 并对其中的热效应问题进行了分析。几何光学分析结果表明, 经特殊设计的六边形板条激光介质还具有如下特点: 当激光沿板条长度方向入射时, 其入射角为布儒斯特角, 同时激光可以完全覆盖整个入射端面 and 介质内部。热分析研究结果表明, 与 COFFIN 板条相比, 由于介质掺杂浓度低, 且激光沿“之”字形光路传输, 在同等抽运功率水平下热致波前畸变幅值大大降低, 且更容易通过透镜补偿热效应的影响; 在同等光束质量激光输出水平下, 六边形“之”字光路板条输出功率是 COFFIN 板条的 2~3 倍。此外, 虽然该构型不适合折射率介于 1.73~1.84 之间的激光晶体, 但通过巧妙的八边形结构设计, 结合直角棱镜可以获得同样理想的效果。

参 考 文 献

- 1 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fibre laser with 1 kW of continuous-wave output power [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(8): 470~472
- 2 IPG photonics offers world's first 10 kW single-mode production laser[R]. [Http://www.laserfocusworld.com/articles/364754](http://www.laserfocusworld.com/articles/364754), 2008. 11
- 3 IPG. High power fiber lasers for industrial applications [R]. [Http://www.IPGPhotonics.com/Collateral/Document/English-us/HP_Brochure.pdf](http://www.IPGPhotonics.com/Collateral/Document/English-us/HP_Brochure.pdf), 2009
- 4 [Http://investor.ipgphotonics.com/release.cfm](http://investor.ipgphotonics.com/release.cfm)
- 5 C. Stewen, K. Contag, M. Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin disc laser[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(5): 650~657

- 6 S. V. Garnov, V. A. Mikhailov, R. V. Serov *et al.*. Study of the possibility of developing a multichannel-diode-pumped multikilowatt solid-state laser based on optically dense active media[J]. *Quantum Electron.*, 2007, **37**(10): 910~915
- 7 H. Injeyan, C. S. Hofer. End pumped zig-zag slab laser gain medium: USA, 6094297 [P], 2000
- 8 S. Palese, J. Harkenrider, W. 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
- 9 G. Goodno, H. Komine, S. McNaught *et al.*. Multi-kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser[C]. *CLEO Europe*, 2005
- 10 http://www.laserfocusworld.com/display_article/292398/12/none/none/Feat/Photonic-Frontiers-laser-weapons-Pumping-up-the-power
- 11 S. P. Chard, M. J. Damzen. Compact architecture for power scaling bounce geometry lasers [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2218~2223
- 12 J. Richards, A. McInnes. Versatile, efficient, diode-pumped miniature slab laser [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(4): 371~373
- 13 Liu Liang, Guo Shaofeng, Lu Qisheng *et al.*. Geometric optimization and thermal effect of five-sided slab [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1784~1788
- 刘 亮, 郭少锋, 陆启生等. 五边形板条的优化设计及其热效应分析 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1784~1788
- 14 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**: 289~301
- 15 T. J. Kane, J. M. Eggleston, R. L. Byer. The slab geometry laser-part II: thermal effects in a finite slab [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**: 1195~1210
- 16 T. J. Kane, R. C. Eckardt, R. L. Byer. Reduced thermal focusing and birefringence in zig-zag slab geometry crystalline lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **QE-19**: 1351~1354
- 17 Liu Liang, Guo Shaofeng, Lu Qisheng *et al.*. Thermal distortion analysis for conduction cooled end-pumped slab [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(7): 987~992
- 刘 亮, 郭少锋, 陆启生等. 传导冷却端面泵浦板条放大器波前畸变数值研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(7): 987~992
- 18 J. Richards, A. McInnes. Diode pumped slab laser: United States, 5651021 [P], 1997
- 19 Liu Liang, Guo Shaofeng, Lu Qisheng *et al.*. Study of thermal distortion in composite slab amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1678~1682
- 刘 亮, 郭少锋, 陆启生等. 复合结构板条放大器热致波前畸变研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1678~1682