

# 基于 447 nm 蓝光激光器基模热稳腔的设计与实验

阳其国<sup>1</sup> 朱思祁<sup>1</sup> 陈振强<sup>1,2</sup> 潘俊<sup>1</sup> 胡志朋<sup>1</sup> 王苏娥<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>暨南大学光电工程研究所, 广东 广州 510632  
<sup>2</sup>暨南大学光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632)

**摘要** 在基模热稳腔实现条件的基础上,借助于计算机软件辅助,设计出一种用于实现 447 nm 蓝光激光器基模热稳定输出的谐振腔。并采用大功率激光二极管侧面抽运方式,利用 Nd:YAP 晶体作为增益介质,选用 I 类角度匹配 LBO 和 II 类角度匹配 KTP 分别进行腔内倍频与和频,实现了 447 nm 蓝光的基模热稳定输出,获得了 83.5 mW 的连续稳定输出,输出功率稳定度为 1.5%。

**关键词** 激光器;蓝光激光器;基模;热稳定;谐振腔

**中图分类号** TN248.1; TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1102003

## Design and Experiment of a Fundamental Mode and Thermal Stable Cavity Based on 447 nm Blue Light Laser

Yang Qiguo<sup>1</sup> Zhu Siqi<sup>1</sup> Chen Zhenqiang<sup>1,2</sup> Pan Jun<sup>1</sup> Hu Zhipeng<sup>1</sup> Wang Su'e<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>*Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China*  
<sup>2</sup>*Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies, Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China*)

**Abstract** Based on the condition of realizing a fundamental mode and thermal stable cavity, with the help of the computer software, a resonator to realize the fundamental mode and thermal stable output of 447 nm blue lasers is devised. By using the way of high power laser-diode side-pumped, Nd:YAP crystal as gain medium and choosing class I angle matching LBO and class II angle KTP separately used for second harmonic generation and sum frequency mixing, the fundamental mode and thermal stable output of 447 nm blue lasers is basically realized the acquired continuous stable output is 83.5 mW and the output stability is 1.5%.

**Key words** lasers; blue laser; fundamental mode; thermal stable; cavity

**OCIS codes** 140.3480; 140.4780; 230.7405

## 1 引 言

激光二极管(LD)抽运的全固态蓝光激光器在光学存储、彩色显示、水下通信、生物医学、拉曼光谱等领域有着非常广泛的应用<sup>[1]</sup>。全固态蓝光激光器主要通过倍频(SHG)和三倍频(THG)两种方式来实现早期,关于蓝光激光器的报道主要集中于 SHG 方式,到目前为止通过这种途径已经实现了 473, 457, 456, 440, 488 和 491 nm 等波长的蓝光输

出<sup>[2~8]</sup>,而且这方面的技术相对较为成熟,尤其是 473 nm 蓝光激光器。而近年来,国内外也有不少关于通过 THG 方式实现蓝光的报道<sup>[9~11]</sup>,主要集中于 447 nm 蓝光激光器上。

近年来关于 447 nm 蓝光激光器的研究主要集中在如何提高 447 nm 蓝光激光器的输出功率,而一台实用化的激光器不仅在输出功率上要达到一定的水平,而且要求有良好的光束质量和输出稳定性。

**收稿日期**: 2011-06-28; **收到修改稿日期**: 2011-08-03

**基金项目**: 广东省省部产学研项目(2009B091300072, 2010B090500022, 2009B090600040)、广东省自然科学基金(9178922035-X000002)和中央高校基本科研业务费专项资金(21611515)资助课题。

**作者简介**: 阳其国(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: yangqiguo@126.com

**导师简介**: 陈振强(1965—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光技术与激光器件等方面的研究。

E-mail: tzqchen@jnu.edu.com(通信联系人)

所以本文以此为出发点,在基模热稳腔实现条件的基础上,利用计算机软件辅助,设计出一种用于实现 447 nm 蓝光激光器基模热稳定输出的谐振腔。并采用大功率激光二极管侧面抽运方式,利用 Nd:YAP 晶体作为增益介质,选用 I 类角度匹配 LBO 和 II 类角度匹配 KTP 分别进行腔内倍频与和频,基本上实现了 447 nm 蓝光的基模热稳定输出,并证明了所设计谐振腔的可靠性。

## 2 基模热稳腔的设计方法

### 2.1 基模热稳腔的实现条件

早在 1972 年,Steffen 等<sup>[12]</sup>便提出了基模热稳腔的概念,并由 Magni 等<sup>[13,14]</sup>提出了动态稳定凹凸腔的设计方法。基模热稳腔的基本思想是当激光器的参数满足一定条件时,能使基模参数在一定抽运功率范围内保持不变或变化缓慢<sup>[15]</sup>。根据基模热稳腔的基本理论,要实现激光的基模热稳定输出,必须满足以下三个条件:

1) 要实现高效率低损耗的激光输出,谐振腔的设计必须满足谐振腔的稳定性条件:  $-1 \leq \frac{1}{2}(A + D) \leq 1$ 。

2) 要实现基模输出,可以通过谐振腔的自孔径选模技术调整谐振腔的参数实现,需要满足  $\frac{1}{2}\phi \leq \sqrt{\pi}w_{rod} \leq \frac{2}{3}\phi$ ( $w_{rod}$  为基模高斯光束在激光棒处的束宽, $\phi$  为激光棒的直径)。

3) 要实现动态热稳定的激光输出,则要满足  $\frac{dw_{out}}{df} \approx 0$ ( $w_{out}$  为耦合输出镜处束腰的大小, $f$  为激光棒所产生的热透镜的焦距)。

在实际情况下。由于各种因素的限制,并非上述所有条件均能同时实现,或实现的效果不能同时达到最佳。因此需要考虑上述条件实现的优先级,以满足实际应用中的设计需求。首先,作为激光谐振腔设计的普遍设计标准,谐振腔的稳定性条件应该优先满足;其次,为确保较高功率和效率的激光输出,实现基频光的基模输出也是一个重要条件;最后,便是满足激光动态热稳定输出的条件。

### 2.2 基模热稳腔程序设计的流程

分析判别条件的优先级之后,再确定与判别条件有关的常量和变量,之后便可进行程序设计。其详细流程如图 1 所示。

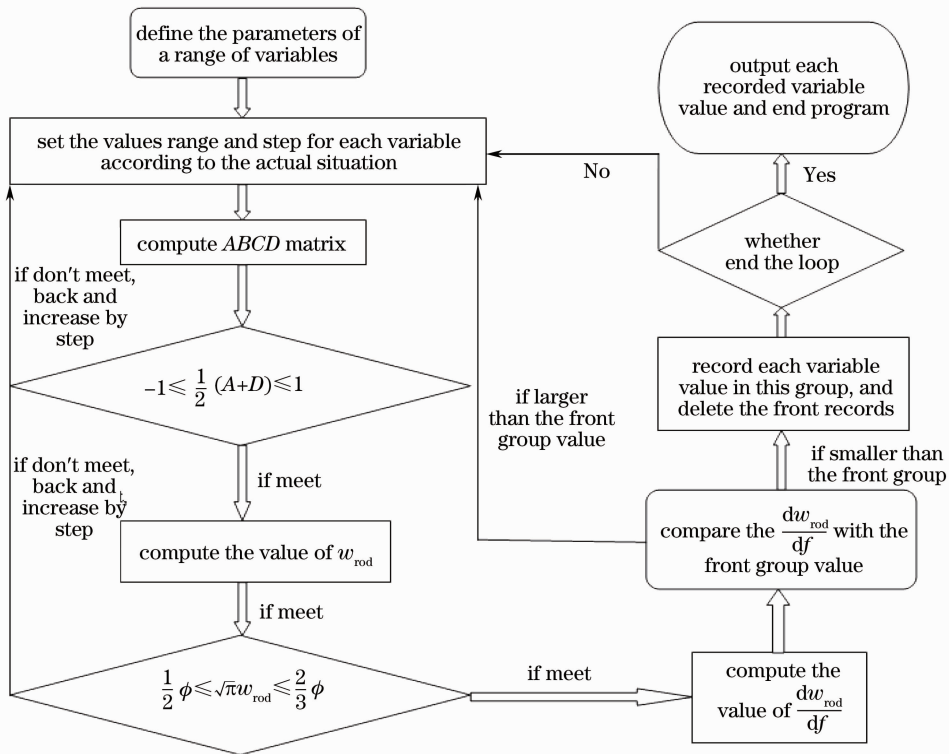


图 1 程序设计流程图

Fig.1 Flow chart of program design

利用 Matlab 数学软件,按照图 1 的编写程序即可求得符合基模热稳定输出最好的一组谐振腔参数。

### 3 447 nm 蓝光激光器基模热稳腔的设计

#### 3.1 谐振腔相关参数的设定

由于测得实验所使用的激光晶体在最大抽运功率下的热透镜焦距只有 93 mm,如果采用直腔结构很难实现基模热稳定输出,所以采用 V 型结构的谐振腔。在考虑晶体热透镜效应的情况下,结构如图 2 所示。

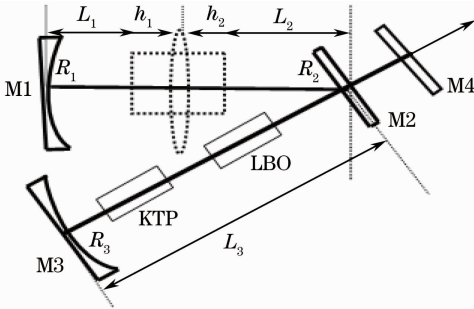


图 2 结构简化图

Fig. 2 Simplified structure picture

根据 ABCD 矩阵理论,以 M1 为参考面开始,计算往返矩阵  $M$  :

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = M_{L_1} \times M_{h_1} \times M_f \times M_{h_2} \times M_{L_2} \times M_{M_2} \times M_{L_3} \times M_{M_2} \times M_{L_2} \times M_{h_2} \times M_f \times M_{h_1} \times M_{L_1} \times M_{M_1}$$

式中:

$$M_{L_1} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_{L_2} = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_{L_3} = \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_{M_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_{M_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/(R_2 \cos \theta) & 1 \end{bmatrix}, M_{M_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_3 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}, M_{h_1} = \begin{bmatrix} 1 & h_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_{h_2} = \begin{bmatrix} 1 & h_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$R_i$  为镜子的曲率半径,  $\theta$  为 V 腔折叠角的半角,  $h_1$ ,  $h_2$  均为  $\frac{1}{2}nL_0$ ,  $L_0$  为晶体长度,  $n$  为晶体折射率。

根据实际情况对谐振腔相关参数进行设定。作为给定值的热焦距  $f$ 、激光晶体棒直径  $\phi$ 、激光晶体棒长度  $L_0$  等均可通过测量获得,其中  $f = 93$  mm,  $\phi = 3$  mm,  $L_0 = 65$  mm。

作为变量的  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  则需要确定其取值范围,以方便代入程序中运算。为了使谐振腔结构尽量地紧凑,同时为了简化程序,降低运算量,根据实际情况,设定  $L_1 = 45$  mm,  $L_2$  的取值范围是 80 ~ 300 mm,  $L_3$  的取值范围是 80 ~ 300 mm。 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  则根据本实验使用的镜片情况,确定为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  均可取无限大、100、150、300 mm 中任一数值。

最后,根据实际情况,为了避免角度太大而存在较大像散,同时为了避免角度太小而导致经过偏折的光会被横截面积较大的激光侧面抽运系统所阻挡,折叠角半角  $\theta$  取  $20^\circ$ 。

#### 3.2 谐振腔参数的确定及分析

经程序运算得到,当  $R_1$  无限大(即为平面镜),  $R_2 = 100$  mm,  $R_3$  无限大,  $L_1 = 45$  mm,  $L_2 = 145$  mm,  $L_3 = 283$  mm 时,能够实现蓝光的基模热稳定输出。

经计算,此时基频光在晶体棒中心位置的基模光斑大小为 0.8860,  $\frac{d\tau_w}{df}$  的值为  $1.7648 \times 10^{-4}$ ,当热焦距波动时,晶体棒中心位置的基模光斑的变化如图 3 所示。

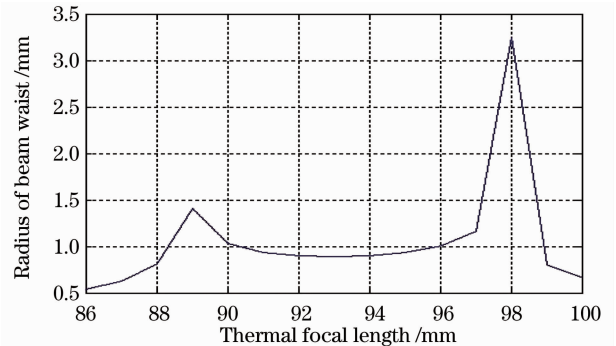


图 3 热焦距-基模光斑关系图

Fig. 3 Thermal focal length-base model flare relationship chart

由此可见,当热焦距为 93 mm 时,其变化率最低,当热焦距左右波动时,基模光斑的变化不大,即对热焦距不灵敏,能实现动态热稳定输出。

### 4 实验及结果分析

根据前面的分析结果,采用大功率激光二极管侧面抽运方式,利用 Nd:YAP 晶体作为增益介质,选用 I 类角度匹配 LBO 和 II 类角度匹配 KTP 分别进行腔内倍频与和频,进行了激光实验。实验装置如图 4 所示。

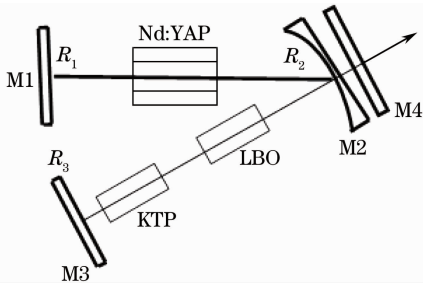


图 4 447nm 蓝光激光器实验装置图

Fig. 4 Experimental device figure of 447 nm blue laser

实验中由于腔内较强的二倍频红光与较弱的三倍频蓝光混合在一起,因此观察到的激光颜色呈现紫色。在 LD 抽运功率达到最大值 196.5 W 时,获得了 83.5 mW 的蓝光输出,并且输出功率稳定度为 1.5%。其输入-输出功率曲线、蓝光的光学谱线和输出功率稳定性分别如图 5~7 所示。

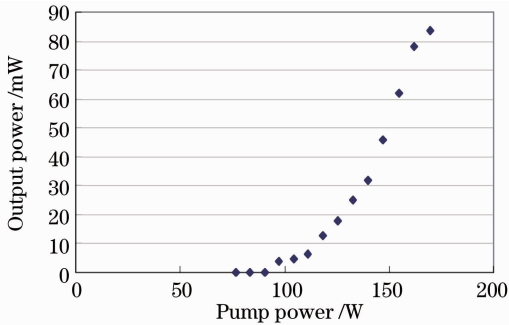


图 5 输入与输出功率的关系

Fig. 5 Input/output power ratio

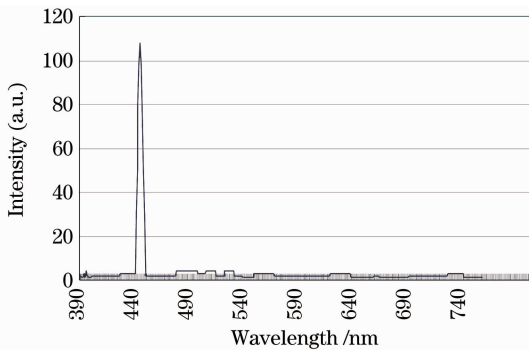


图 6 447 nm 蓝光谱线

Fig. 6 Spectrum line of 447 nm blue-ray

通过实验结果可以得到:

1) 由图 5 可知,随着抽运功率的提高,蓝光的输出功率也不断增加,但输出功率和总体的效率不高,第一这是因为 447 nm 蓝光通过三倍频方式来实现的,本身系统的效率就比较低,第二是因为设计的谐振腔是针对基模热稳定输出而设计的,这会降低蓝光的输出功率和转换效率。第三是因为实验中使用的 Nd:YAP 激光晶体的尺寸较小,其直径只有 4 mm。

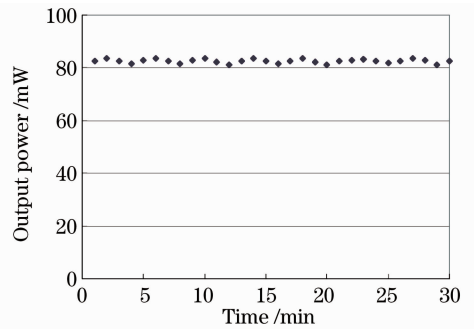


图 7 输出激光稳定性图

Fig. 7 Stability of the blue power

2) 由于实验室中没有激光光斑质量分析仪,所以只能通过观察蓝光输出的远场光斑来判断蓝光是否为基模输出。图 8 为实验中蓝光输出的远场光斑,将其与文献[11]中的蓝光光斑(图 9)相比,可以发现其光束质量好很多,远场光斑依然保持圆形,并且激光束光斑只存在一个亮点,没有其他的亮点存在。从而说明此激光系统实现了激光基模输出。

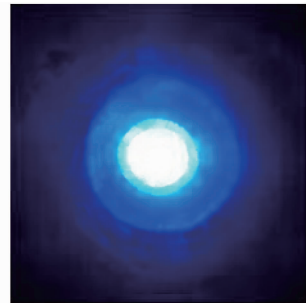


图 8 实验中的蓝光光斑

Fig. 8 Blue-ray flare of the experiments

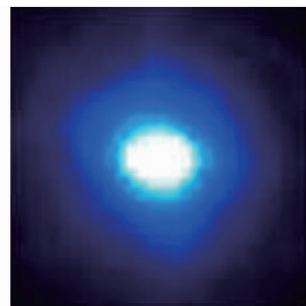


图 9 文献[11]中的蓝光光斑

Fig. 9 Blue-ray flare in the Ref. [11]

3) 测量了激光输出的稳定性,激光输出的稳定性如图 7 所示,在 30 min 内,每分钟对输出功率进行一次记录。并根据中华人民共和国国家标准(GB/T13864-92)计算得到激光辐射的稳定度为 1.5%,实现了激光的稳定输出。第一这是因为良好的温控系统能有效地控制非线性晶体温度,第二是因为动态热稳腔的设计使谐振腔对热透镜效应不

灵敏,从而证明此激光系统能实现激光的稳定输出。

4) 由于此激光系统中的谐振腔为三镜折叠腔,并且腔长较长,处于多纵模连续运转,所以存在纵模间和频和交叉饱和效应,从而影响激光输出功率的稳定性<sup>[16]</sup>。所以为了进一步提高输出功率的稳定性,可以采用环形腔结构,在谐振腔内插入法布里-珀罗标准具,以减少纵模数量,从而提高激光输出功率的稳定性和光斑质量<sup>[11]</sup>。

5) 虽然此谐振腔设计方法已经实现 447 nm 蓝光的基模热稳定输出,但是也存在一些不足之处,首先,该设计方法不能保证蓝光激光的高效率输出。其次,上述谐振腔结构尽管在 93 mm 的热焦距下能实现基模热稳定输出,但是整个腔的失调灵敏度相对较高。且当热焦距较大幅度波动时,将会影响谐振腔的稳定性。因此需要继续改进设计方法,使其在满足基模热稳定输出的条件下,同时也能获得更高效率的输出和更大的动态范围。

## 5 结 论

根据基模热稳腔的基本原理阐述了基模热稳腔的实现条件,并利用 Matlab 数学软件进行编程,设计出一种用于实现 447 nm 蓝光激光器基模热稳定输出的谐振腔。并采用大功率激光二极管侧面抽运方式,利用 Nd:YAP 晶体作为增益介质,选用 I 类角度匹配 LBO 和 II 类角度匹配 KTP 分别进行腔内倍频和和频,在最大抽运功率下获得 83.5 mW 的蓝光输出,并且光斑质量很好,激光输出稳定,稳定度为 1.5%,实现了 447 nm 蓝光的基模热稳定输出,证明了所设计谐振腔方法的可靠性。

**致谢** 感谢中国科学院福建物质结构研究所张戈研究员课题组和广州瑞通激光科技有限公司在实验方面给予的帮助。

## 参 考 文 献

- Gao Jing, Yu Xin, Zhang Wenping *et al.*. Research progress in LD pumped all-solid-state blue lasers[J]. *Optical Technique*, 2007, **32**(3): 430~434
- 高 静, 于 欣, 张文平等. LD 抽运全固态蓝光激光器的研究

- 进展[J]. *光学技术*, 2007, **32**(3): 430~434
- C. Czeranowsky, E. Heumann, G. Huber. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG-BIBO laser with 2.8-W output power at 473 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6): 432~434
- Y. Chen, H. Peng, W. Hou *et al.*. 3.8 W of cw blue light generated by intracavity frequency doubling of a 946-nm Nd:YAG laser with LBO[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**(2): 241~243
- Q. H. Xue, Q. Zheng, Y. K. Bu *et al.*. High-power efficient diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 457 nm blue laser with 4.6 W of output power[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(8): 1070~1072
- F. Jia, Q. Xue, Q. Zheng *et al.*. 5.3 W deep-blue light generation by intra-cavity frequency doubling of Nd:GdVO<sub>4</sub>[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**(2): 245~247
- Yanfei Lü, Xihe Zhang, Zhihai Yao *et al.*. 6.2-W deep blue light generation by intracavity frequency-doubled Nd:GdVO<sub>4</sub> using BiBO[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 407~408
- Wang Jinguang, Li Yongliang, Tian Yinghua *et al.*. All solid state continuous-wave all-intracavity sum-frequency mixing blue laser at 488 nm[J]. *Chineses J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1669~1672
- 王君光, 李永亮, 田迎华等. 全固态腔内和频 488 nm 连续蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1669~1672
- Meng Yuqing, Tan Huiming, Fu Xihong *et al.*. LD pumped Nd:GdVO<sub>4</sub>/LBO intracavity sum-frequency 491 nm blue laser[J]. *Chineses J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1735~1739
- 孟玉清, 檀慧明, 付喜红等. LD 抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub>/LBO 腔内和频 491 nm 蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1735~1739
- Zhu Haiyong, Zhang Ge, Huang Chenghui *et al.*. Multi-watt power blue light generation by intracavity sum-frequency-mixing in KTiOPO<sub>4</sub> crystal [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(5): 2989~2994
- Y. F. Chen, Y. S. Chen, T. H. Ou *et al.*. Compact efficient diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> Q-switched blue laser with intracavity frequency tripling[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(4): 517~520
- Li Jingzhao. The Reaearch of All-Soild-State 447nm CW Laser [D]. Guangzhou: Jinan University, 2009. 40~43
- 李景照. 全固态 447nm 连续激光器的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2009. 40~43
- Jürg Steffen, J. P. Lovtscher, G. Herziger. Fundamental mode radiation with solid-state laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1972, **QE-8**(2): 239~245
- Vittorio Magni. Resonators for solid-state laser with large-volume fundamental modes and high alignment stability[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1): 107~117
- G. Cerullo, S. De. Silvestri, V. Magni *et al.*. Output power limitations in CW single transverse mode Nd:YAG laser with a rod of large cross-section[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1993, **25**(8): 489~500
- Lü Baida. *Laser Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 356~361
- 吕百达. *激光光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 356~361
- Volker Gaebler, Baining Liu, Hans Joachim Eichler *et al.*. Efficient blue cw Nd:YAG microchip laser with two intracavity frequency doublers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18): 1343~1345