

# 一种基于铌酸锂晶体的高效紧凑腔内倍频绿光激光器

桂诗信<sup>1</sup> 常建华<sup>1,2,3</sup> 严娜<sup>1</sup> 郭跃<sup>1</sup> 伍煜<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044

<sup>2</sup>南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044

<sup>3</sup>南京信息工程大学滨江学院电子工程系, 江苏 南京 210044

**摘要** 基于周期极化铌酸锂(PPLN)晶体提出并设计了一种高效紧凑腔内倍频绿光激光器。该激光系统采用808 nm激光二极管(LD)端面直接抽运Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,进而利用极化周期为7 μm的PPLN晶体倍频产生532 nm绿光。通过在Nd:YVO<sub>4</sub>和PPLN晶体端面镀膜构成激光腔镜,无需采用任何光学透镜、反射镜等分立光学元件,大大降低了系统体积和成本。实验结果显示,当激光器谐振腔腔长为12 mm,抽运功率为4.1 W时,绿光输出功率可达1.343 W,相应的光-光转换效率达32.8%。当LD抽运功率稳定在3.33 W时,2 h内的绿光输出功率波动小于5%。

**关键词** 激光器;非线性光学;绿光激光器;倍频;铌酸锂晶体

中图分类号 O437.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1102002

## A Compact and Highly Efficient Intracavity Frequency-Doubled Green Laser Based on Periodically Poled Lithium Niobate

Gui Shixin<sup>1</sup> Chang Jianhua<sup>1,2,3</sup> Yan Na<sup>1</sup> Guo Yue<sup>1</sup> Wu Yu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

<sup>3</sup>Department of Electronic Engineering, Binjiang College, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

**Abstract** A compact and highly efficient intracavity frequency-doubled green laser has been researched and designed based on periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal. The laser system adopts a 808 nm laser diode (LD) end directly pumped Nd:YVO<sub>4</sub> crystal, then uses a poling period of 7 μm of PPLN crystal to generate 532 nm green light by frequency-doubling. The coating Nd:YVO<sub>4</sub> and PPLN crystals compose a laser cavity, without using any discrete optical components such as optical lens, reflector, thus reducing the volume and cost of the system. The experimental results show that with the resonator cavity length being set at 12 mm, pump power at 4.1 W, the green light output power of 1.343 W and the corresponding optical-optical conversion efficiency of 32.8% are achieved. Controlling the incident pump power at about 3.33 W, the fluctuation of green light output power within 2 h is less than 2%.

**Key words** lasers; nonlinear optics; green laser; frequency-doubled; lithium niobate crystal

**OCIS codes** 190.4360;140.3515;130.3730

收稿日期: 2015-04-24; 收到修改稿日期: 2015-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(11374161), 江苏省信息与通信工程优势学科, 中国博士后科学基金(2015M571781), 江苏省博士后基金(1401022B)

作者简介: 桂诗信(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事非线性光频转换方面的研究。E-mail: guishixin0001@163.com

导师简介: 常建华(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光子学与光器件、光电传感技术等方面的研究。

E-mail: jianhuachang@nuist.edu.cn

## 1 引言

全固态绿光激光器因具有输出功率高、光束质量好等特点,在激光显示、工业生产和医疗等方面有着广泛的应用。特别地,激光显示技术因具有色域广、寿命长、亮度高等优势,被认为是下一代显示技术的主流,拥有广阔的发展前景<sup>[1-2]</sup>。迄今,用于构成激光显示器的三基色光源中红、蓝光半导体激光器已经成熟并投入商用。相比而言,半导体的绿光激光器虽然已经面世多年,但受限于半导体材料和制备器件工艺,该类激光器仍然存在成品率低、价格高、难以大规模量产等问题<sup>[3-5]</sup>。如何获得低成本、结构紧凑、高效稳定输出的绿光激光器依然是当前该领域的研究热点。随着非线性光学技术的发展,基于成熟的近红外波段激光器,利用非线性晶体(如LiNbO<sub>3</sub>、KTP、LBO等)的光学倍频技术也可获得高效绿光激光输出。鉴于此,近年来基于各类抽运光源、非线性晶体和激光谐振结构的绿光激光器设计方案被相继提出并获得了实验验证。2007年,天津大学付伟佳等<sup>[6]</sup>利用波长为1064 nm的Nd:YVO<sub>4</sub>全固态激光器和自制的PPKTP晶体,采用外腔倍频方式获得了13.5 mW的532 nm绿光激光输出,相应光-光转换效率为1.35%。2013年,中国科学院上海光学精密机械研究所郝丽云等<sup>[7]</sup>基于保偏光纤光栅(PM-FBG)快慢轴交叉对准技术的线偏振连续输出的1064 nm全光纤化激光器在PPMgOLN晶体中实现腔外倍频,获得了最大功率为1.437 W的连续绿光激光输出,相应的光-光转换效率为17.84%。尽管外腔式绿光激光器具有结构简单、偏振特性好、输出稳定性高等优点,但由于抽运光源和非线性晶体相互独立使得整个激光器系统结构复杂、成本高,并且为保证一定的激光倍频效率,非线性晶体的通光长度一般较长。为兼顾绿光倍频系统的紧凑性和转换效率,人们更多地选用腔内倍频方案,以降低系统整体尺寸,同时充分利用腔内较高的抽运激光光强,提高激光器的效率。2011年,Singh等<sup>[8]</sup>采用Z形腔结构,利用808 nm激光二极管(LD)侧面抽运Nd:YAG和腔内KTP晶体倍频的技术方案获得了最大输出功率为82.5 W的连续绿光激光输出,相应的光-光转换效率为11%;中国科学院光电研究院颜博震等<sup>[9]</sup>采用线性腔结构利用通光长度仅1 mm的PPMgOLN晶体,腔内倍频获得了3.8 W的绿光激光输出,光-光转换效率高达56%。然而,尽管腔内倍频方案降低了系统成本、提高了激光器的紧凑性,但目前大多数绿光激光器依然或多或少地采用了反射镜、双色镜等分立光学元器件,增加了光路设计的复杂性和系统尺寸,仍难以满足激光显示、投影等实际应用需求。

本文提出了一种结构更为紧凑的腔内倍频绿光激光器设计新方案,采用808 nm LD激光二极管端面直接抽运方式,通过在Nd:YVO<sub>4</sub>和PPLN晶体端面镀膜构成激光谐振腔,无需任何分立光学透镜或反射镜,获得高效绿光激光输出。实验结果显示,当LD抽运功率为4.1 W时,绿光激光器输出功率为1.343 W,相应光-光转换效率达32.8%。

## 2 实验装置及理论分析

图1给出了腔内倍频绿光激光器实验装置示意图。该装置采用线性腔结构,抽运源为C-MOUNT封装的激光二极管,最大输出功率为5 W,最佳工作温度为25±0.5℃,输出中心波长为808 nm。Nd:YVO<sub>4</sub>晶体紧靠LD放置,采用沿a轴切割,Nd<sup>3+</sup>掺杂原子数分数为1%,晶体尺寸为3 mm×3 mm×2 mm,S<sub>1</sub>端面镀对808 nm增透(AR)、1064 nm高反(HR)的双色膜,S<sub>2</sub>端面镀对1064 nm的增透膜。为了减轻Nd:YVO<sub>4</sub>晶体在高抽运功率下的热效应以及防止晶体可能的热损坏,Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的侧面用钢箔包裹(以达到良好的热接触)置入紫铜块内,外面用TEC<sub>1</sub>温度控制器控温,温度控制在25℃,控制精度为±0.1℃。LD和Nd:YVO<sub>4</sub>晶体之间无聚焦透镜,这是因为周期极化铌酸锂(PPLN)晶体具有非线性系数大和准相位匹配技术无走离的优点,对激光的功率密度要求低,这样激光直接入射就可以实现高效转换。实验中采用一块1.3 mm(通光方向)长,0.5 mm厚,2.2 mm宽的PPLN晶体作为腔内倍频晶体。该晶体利用外加电场极化法制作,晶体在Z轴方向极化,极化周期为7 μm(在室温下),晶体左端面S<sub>3</sub>镀对1064 nm的增透膜和532 nm的激光高反膜,右端面S<sub>4</sub>镀对1064 nm的激光高反膜和532 nm的增透膜与Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的前端面S<sub>1</sub>构成1064 nm的激光谐振腔,并且利用TEC<sub>2</sub>温度控制器单独控温,控温范围为-20℃~60℃,控制精度为±0.1℃。

由谐振腔理论,利用ABCD矩阵对谐振腔进行分析,谐振腔内的激光束应满足自洽条件,即激光束在腔内传输一个来回后应复原。考虑Nd:YVO<sub>4</sub>晶体热效应引起的相位差,将激光晶体等效为一个焦距随抽运功

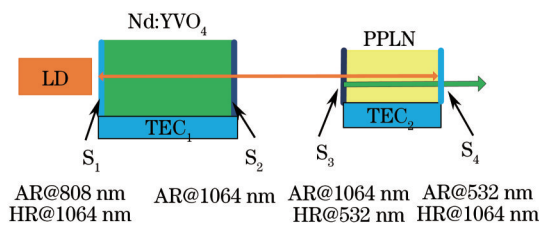


图 1 腔内倍频绿光激光器实验装置图

Fig.1 Experimental configuration of intracavity frequency-doubled green light source

率变化的热透镜。以 PPLN 晶体  $S_4$  端面为参考面,由图 1 知激光传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_{\text{PPLN}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L - L_{\text{PPLN}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L - L_{\text{PPLN}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_{\text{PPLN}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $L$  是谐振腔腔长,  $L_{\text{PPLN}}$  为 PPLN 晶体的长度,  $F$  表示晶体的热透镜焦距,其大小为<sup>[12]</sup>

$$F = \frac{\pi k_c \omega_p^2}{(d_n/d_T) \eta \xi P_{\text{in}}}, \quad (2)$$

式中  $k_c$  为晶体的热导率;  $d_n/d_T$  为折射率随温度的变化率,  $P_{\text{in}}$  为 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体端面处的抽运功率;  $\omega_p$  为 808 nm LD 抽运光在激光晶体内的平均半径,吸收系数  $\eta = 1 - \exp(-\alpha d)$ ,  $\alpha$  的晶体吸收率,  $d$  为晶体长度;  $\xi$  为热负荷比,即晶体中吸收的抽运能量转化为热能的比例。由(2)式可得到腔内热透镜焦距与抽运功率的关系,如图 2 所示。

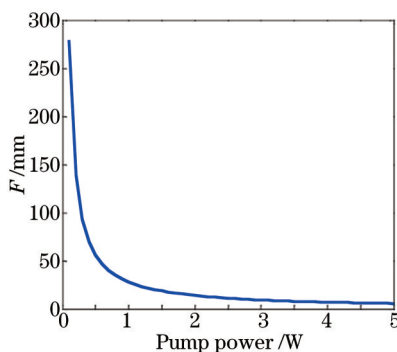


图 2 不同抽运功率下晶体的热透镜焦距

Fig.2 Thermal crystal focal lengths at different pump power

由图可见, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的热透镜焦距随着 LD 抽运功率的变化发生显著的变化。当抽运功率小于 3 W 时,热透镜焦距随抽运功率的增大而快速减小;当抽运功率大于 3 W 时,热透镜焦距的变化开始趋于平稳。由仿真结果可知,晶体的热透镜效应随着抽运光功率的增大而增强,与激光谐振腔的稳定性紧密相关。

由高斯光束自身再现条件可得到谐振腔的稳定性约束条件:

$$-1 < \left| \frac{A+D}{2} \right| < 1, \quad (3)$$

将(1)式中的  $A$ 、 $D$  值代入(3)式可推出激光谐振腔长应满足  $0 < L < 2F$ 。由图 3 可知,当抽运功率处于 3~5 W 的区间时, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体在热效应影响下的热透镜焦距稳定在 7.5 mm 左右。因此激光腔长应满足  $0 < L < 15$  mm, 以保证激光谐振腔处于稳定状态,从而获得稳定的激光输出。

考虑 Nd:YVO<sub>4</sub> 热效应,那么 PPLN 晶体输出参考面  $S_4$  处 1064 nm 基频光的光斑半径为<sup>[13]</sup>

$$\omega_1 = \frac{\lambda^{\frac{1}{2}}}{\pi} \cdot |B|^{\frac{1}{2}} \left/ \left[ 1 - \left( \frac{A+D}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}} \right., \quad (4)$$

相应得到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体入射端面  $S_1$  处基频光基模光斑半径为

$$\omega_2 = \omega_1 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

将(1)式中的  $A$ 、 $B$ 、 $D$  值代入(4)和(5)式,可求出在热效应影响下,不同腔长条件下基频光基模光斑半径  $\omega_2$  随 LD 抽运功率的变化。图 3 给出了激光腔长分别为 11、12 和 13 mm 时,基频光基模光斑半径与 LD 抽运功率间的关系。由图可见,在不同的腔长条件下,基频光的基模光斑半径随着 LD 抽运功率的增加而减小,且腔长愈短其对应的基频光基模半径愈小。当抽运光功率较小时, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的热效应不明显,此时, LD 抽运光与基频光的模场重叠因子几乎不变,基频光输出功率随着 LD 抽运功率而增大;当 LD 抽运功率较高时, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的热效应导致基频光光斑半径 ( $\omega_2$ ) 显著减小,相应的 LD 抽运光与基频光的模场重叠因子也随之减小,此时,基频光输出功率的增幅会随抽运功率的增大而减缓,甚至可能会出现输出功率降低的现象。

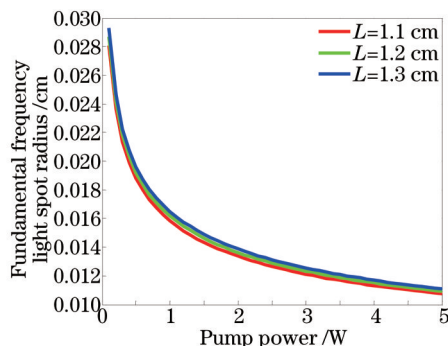


图 3 基频光基模光斑半径与抽运功率之间的关系

Fig.3 Fundamental frequency light spot radius versus pump power

### 3 结果与讨论

实验中 808 nm 的 LD 由直流电源驱动,平稳增加 LD 的抽运电流,测量了 LD 抽运电流与输出功率之间的关系,测试结果如图 4 所示。从图中可以看出 LD 的抽运阈值电流约为 0.9 A,抽运电流与输出功率近似成线性关系。当驱动电流为 4 A 时, LD 输出功率达 4.095 W。

由于在准相位匹配的非线性倍频过程中, PPLN 晶体的温度与相位失配量紧密相关,改变晶体温度可显著影响绿光输出功率。为此,从实验上研究了本激光系统的温度调谐特性。图 5 给出了当激光二极管、Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体温度控制在 25 °C, LD 输出功率稳定在 4 W 时,绿光激光器输出功率与 PPLN 晶体温度间的关系。从图中可以看到,当调节非线性晶体 PPLN 温度在 10 °C~50 °C 之间变化时, PPLN 晶体的最佳匹配温度在 26 °C 附近,此时可获得最大绿光功率为 1.108 W。采用美国 COHERENT 公司的光束质量分析仪(Beam View Analyser Version 2.1)对输出激光的光斑质量进行了分析,如图 5 中插图所示,从  $X$ 、 $Y$  方向的拟合结果可以清楚的看出,光斑能量在两个方向都近似呈高斯分布,激光器输出光斑质量较好。实验中,发现当 TEC<sub>1</sub> 设置温度提高至 26 °C 时,绿光输出功率基本保持不变,因此,本系统中 TEC<sub>1</sub> 和 TEC<sub>2</sub> 可以共用一片玻尔帖控温,进一步提高系统的紧凑性。由图 5 还可发现,随着晶体温度的变化绿光输出功率在某些位置会出现突变,如图中 28 °C、31 °C 附近,出现这一现象的主要原因是由于激光器增益谱宽(0.8 nm)远大于一阶准相位匹配倍频的波长允许带宽(0.21 nm),导致在不同温度下对应增益谱线中不同的纵模起振,并伴随着各纵模之间的和频效

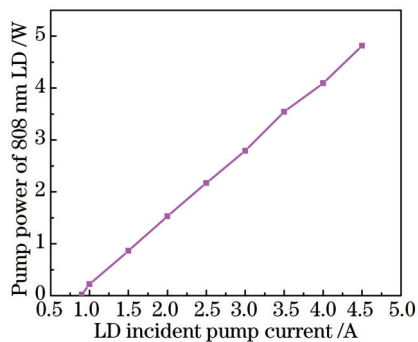


图 4 LD 抽运电流与输出功率之间的关系

Fig.4 Output power versus LD incident pump current

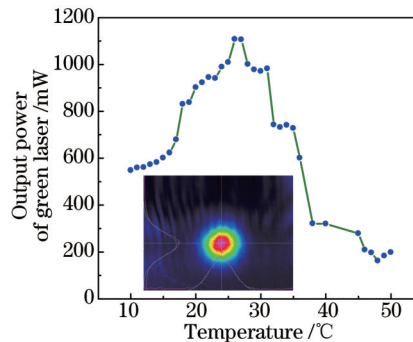


图 5 温度调谐曲线图

Fig.5 Temperature tuning curve of crystal of PPLN

应,因此使得输出绿光功率随着温度的连续变化出现了跳变<sup>[14]</sup>。

当Nd:YVO<sub>4</sub>和PPLN晶体温度分别控制在25℃和26℃时,图6(a)给出了不同腔长条件下绿光输出功率与LD抽运功率的关系。由图可见,当抽运功率较小时,三种不同腔长对应的绿光输出功率均随着抽运功率的增加而增大。当抽运功率增长到一定值时,腔长为13 mm的绿光激光器输出功率呈现明显的下降趋势,由前面的理论分析可知其原因在于,当LD抽运功率较高时,Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的热效应导致LD抽运光与1064 nm基频光的模场重叠因子减小,基频光功率的降低最终导致了绿光输出功率的降低。与之不同的是,激光器腔长为11 mm和12 mm时的绿光输出功率在这一抽运功率区间则呈现振荡缓慢上升趋势,引起该现象的原因可能有以下几种:首先是各纵模之间的和频效应,即所谓的“绿光问题”<sup>[15]</sup>;再次,当抽运功率超过一定值时,非线性晶体的吸收严重,导致晶体内部温度分布不均,折射率发生改变,晶体出现热效应现象,以至于输出不稳定。实验测试结果显示,当腔长为12 mm,抽运功率为4.1 W时,激光器可获得最大输出功率1.343 W。图6(b)给出了该腔长条件下的LD抽运功率与绿光倍频效率之间的关系,由图可清楚的看到,其最大转换效率约为35.6%,对应的抽运功率为3.33 W,此时绿光输出功率约为1.2 W。由此可见,在大功率抽运下合理选择腔长对于提高激光器的倍频转换效率至关重要。

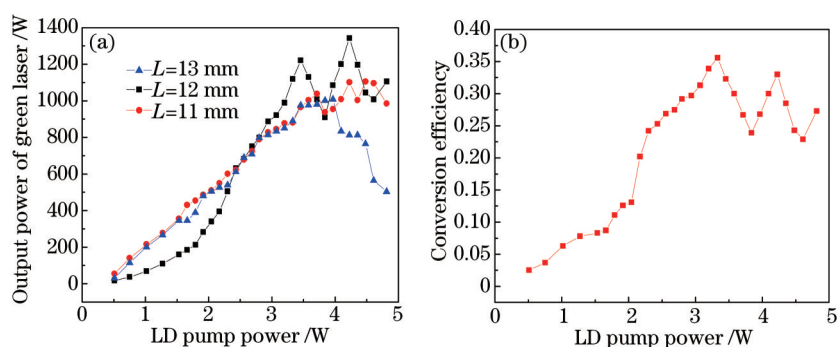


图6 绿光(a)输出功率和(b)转化效率与LD抽运功率之间的关系。

Fig.6 (a) Output power of green laser and (b) its conversion efficiency versus LD pump power.

为研究绿光激光器输出功率的稳定性,将LD抽运功率设定为3.33 W,实验记录了2 h内的激光器的输出功率变化,测量结果如图7所示。由图可见,在该条件下绿光激光器输出功率总体稳定在1.2 W左右,功率波动小于5%。与同类系统相比,本系统输出功率波动略大,其主要原因是在玻尔帖的冷端采用的风扇功率偏大,其细微的振动使系统输出呈现一定的波动。下一步,将进一步优化风扇尺寸和功率以降低其对系统的影响,提高激光输出稳定性。

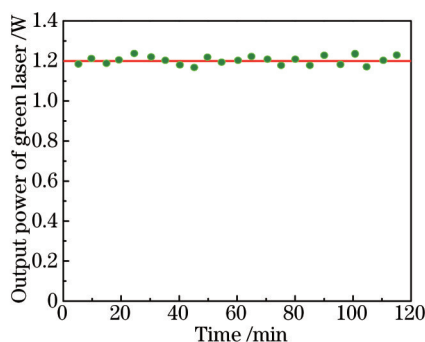


图7 绿光输出功率随时间的变化

Fig.7 Green output power as a function of time

## 4 结 论

设计并研究了一种基于周期极化铌酸锂晶体的紧凑高效型的腔内倍频绿光激光器。通过在Nd:YVO<sub>4</sub>和PPLN晶体端面镀膜构成激光腔镜,无需采用任何光学透镜、反射镜等分立光学元件,降低了系统体积和成本。实验结果显示,当激光器谐振腔腔长为12 mm,PPLN晶体最佳匹配温度为26℃,抽运功率为4.1 W时,

获得了最大功率为 1.343 W 的连续绿光输出,相应的光-光转换效率为 32.8%。当 LD 抽运功率稳定在 3.33 W,绿光输出功率约 1.2 W,此时可获得最大光-光转换效率约为 35.6%,且 2 h 内的绿光输出功率波动小于 5%。该激光器具有结构紧凑、性能稳定、成本低廉等优势,在激光显示、工业过程控制等领域具有一定的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Gan Yi, Lu Yang, Xu Changqing, *et al.*. 38.5% optical-to-optical efficiency neodymium-doped yttrium vanadate/magnesium-oxide-doped periodically poled lithium niobate integrated green module with watt-level output power for laser display applications [J]. *Optical review*, 2012, 19(6): 409-411.
- 2 Maiwald M, Schwertfeger S, Güther R, *et al.*. 600 mW optical output power at 488 nm by use of a high-power hybrid laser diode system and a periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> bulk crystal[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(6): 802-804.
- 3 Nakamura S. GaN-based blue/green semiconductor laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, 3(2): 435-442.
- 4 Khan A. Semiconductor photonics: Laser diodes go green[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(8): 432-434.
- 5 Wang Fengjuan, Liu Zhe, Xu Bin, *et al.*. Blue laser diode pumped Pr<sup>3+</sup>:YLF visible lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1202002.  
王凤娟,刘哲,徐斌,等.蓝光激光二极管抽运 Pr<sup>3+</sup>:YLF 红绿可见光激光器[J].*中国激光*, 2013, 40(12): 1202002.
- 6 Fu Weijia, Yu Jian, Kang Yuzhuo, *et al.*. 13 mW-continuous-wave green light output by quasi-phase-matched frequency doubling in periodically poled KTP[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(6): 1063-1066.  
付伟佳,于建,康玉琢,等.准相位匹配 PPKTP 晶体连续倍频 13 mW 绿光输出[J].*光学学报*, 2007, 27(6): 1063-1066.
- 7 Hao Liyun, Su Cen, Qi Yunfeng, *et al.*. Second harmonic generation characteristics of continuous wave all-fiber laser oscillator in PPMgO:LN[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602007.  
郝丽云,苏岑,漆云凤,等.基于 PPMgO:LN 晶体的连续波全光纤激光器倍频特性[J].*中国激光*, 2013, 40(6): 0602007.
- 8 Singh A, Mukhopadhyay P K, Sharma S K, *et al.*. 82 W continuous-wave green beam generation by intracavity frequency doubling of diode-side-pumped Nd:YAG Laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(3): 398-405.
- 9 Yan Boxia, Bi Yong, Wang Dongdong, *et al.*. Compact and highly efficient 3.8 W intracavity frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub>/PPMgOLN green laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0602007.  
颜博霞,毕勇,王栋栋,等.紧凑高效的 Nd:YVO<sub>4</sub>/PPMgOLN 腔内倍频 3.8 W 连续绿光激光器[J].*中国激光*, 2011, 38(3): 0602007.
- 10 Fejer M M, Magel G A, Jundt D H, *et al.*. Quasi-phase-matched second harmonic generation: tuning and tolerances[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(11): 2631-2654.
- 11 Jundt D H. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction,  $n_e$ , in congruent lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(20): 1553-1555.
- 12 Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L, *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, (56): 1831-1833.
- 13 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al.*. Principles of Lasers[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.  
周炳琨,高以智,陈侗嵘,等.激光原理[M].北京:北京国防工业出版社,2000.
- 14 Ji Feng, Yao Jianquan, Zhang Baigang, *et al.*. 2.1 W continuous wave green light output by first order quasi phase matched intracavity second harmonic generation[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(10): 1314-1318.  
纪峰,姚建铨,张百钢,等.2.1 W 连续绿光输出的一阶准相位匹配内腔倍频[J].*中国激光*, 2006, 33(10): 1314-1318.
- 15 Greenstein S, Rosenbluh M. Dynamics of cw intra-cavity second harmonic generation by PPKTP[J]. *Optics Communications*, 2004, 238(4): 319-327.

栏目编辑:宋梅梅