

# 基于 PPMgO:LN 晶体的连续波全光纤激光器 倍频特性

郝丽云<sup>1,2</sup> 苏 岑<sup>1,3</sup> 漆云凤<sup>1</sup> 刘 驰<sup>1</sup> 周 军<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所,上海市全固态激光器与应用技术重点实验室,上海 201800  
<sup>2</sup>中国科学院大学,北京 100049  
<sup>3</sup>云南大学物理科学技术学院物理系,云南 昆明 650091

**摘要** 高功率光纤激光器与周期性极化非线性晶体相结合的频率转换技术,是实现可见及紫外波段激光输出的有效技术手段。本文以线偏振输出的连续波全光纤化激光振荡器为基频光源,以 5%(摩尔分数)氧化镁掺杂的周期性极化铌酸锂(PPMgO:LN)为倍频晶体,进行了单通倍频的实验研究,测量并分析了 PPMgO:LN 的温度调谐特性。控制晶体温度为 26.9 °C,在基频光功率为 8.05 W 时,实现了 17.84%的谐波转换效率,对应的倍频绿光功率为 1.437 W。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 周期性极化掺氧化镁铌酸锂晶体; 倍频

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0602007

## Second Harmonic Generation Characteristics of Continuous Wave All-Fiber Laser Oscillator in PPMgO:LN

Hao Liyun<sup>1,2</sup> Su Cen<sup>1,3</sup> Qi Yunfeng<sup>1</sup> Liu Chi<sup>1</sup> Zhou Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques,  
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Department of Physics, School of Physics Science and Technology, Yunnan University,  
Kunming, Yunnan 650091, China

**Abstract** The combination of periodic nonlinear polarization crystal and fiber laser is an effective technological mean to achieve visible and ultraviolet band laser output. In this paper, linearly polarized all-fiber laser oscillator is used as the pumping source, and single-pass, second harmonic generation in 5% (mole fraction) MgO doped periodically poled lithium niobate (PPMgO:LN) nonlinear crystal is demonstrated. The temperature tuning characteristics are analyzed. Keeping the crystal temperature at 26.9 °C, the green light output power of 1.437 W is achieved at the pump fundamental power of 8.05 W with the best harmonic efficiency of 17.84%.

**Key words** lasers; fiber laser; periodically poled MgO-doped lithium niobate; frequency-doubling

**OCIS codes** 140.3460; 140.3510; 190.4370; 140.3515

## 1 引 言

基于 1 μm 波段固体激光器倍频的小型化绿光激光器在激光显示、医疗和科研等领域有着重要应用<sup>[1~3]</sup>。掺铽光纤激光器与常规的固体激光器相比,

具有光束质量好、转换效率高、结构紧凑和可靠性高等一系列优点<sup>[4~6]</sup>,基于准相位匹配技术的高 MgO 掺杂[大于 4.6%(摩尔分数)]的周期性极化掺氧化镁铌酸锂(PPMgO:LN)晶体不仅具有高的非线性系数

收稿日期: 2013-02-27; 收到修改稿日期: 2013-04-01

基金项目: 国家 863 计划(2011AA030201)和国家自然科学基金(60907045)资助课题。

作者简介: 郝丽云(1987—),女,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器及非线性频率变化等方面的研究。

E-mail: haoliyun0801@163.com

导师简介: 周 军(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率光纤激光技术、准分子激光技术等方面的研究。

E-mail: junzhousd@mail.siom.ac.cn

和高的光折变损伤阈值,且可实现室温下的准相位匹配<sup>[7~9]</sup>。将光纤激光器与该周期性极化晶体相结合的倍频(SH)绿光激光技术,是实现高效率小型化绿光激光器的一个重要技术途径。1998年,英国帝国学院采用连续波的光纤激光放大器为基频光源,以周期极化铌酸锂(PPLN)晶体为倍频晶体,获得了440 mW的连续波绿光激光输出<sup>[10]</sup>。2008年,澳大利亚Griffith University的Pullen等<sup>[11]</sup>以1029 nm单频光纤放大器为基频光源,利用50 mm长的PPMgO:LN晶体,产生了2.3 W的514.5 nm绿光,最大谐波转化效率为32%。2010年,西班牙地中海科技园ICFO学院的Samanta等<sup>[12]</sup>以单频保偏光纤放大器为基频光源,采用3个30 mm长的周期极化钽酸锂(PPSLT)晶体,通过串联单通倍频结构,在基频光功率为10 W时,获得了56%的最大谐波转换效率。在上述的连续波光纤激光倍频实验报道中,所用的基频光源均为光纤放大器主振荡功率放大(MOPA)结构的高功率单频激光,对于MOPA结构的系统,由于采用了单频种子光源、光隔离器和滤波器等等器件,基频光源系统结构较为复杂。

本文以连续波光纤激光振荡器为基频光源,研究了PPMgO:LN晶体的单通倍频特性。采用自行研制的基于保偏光纤光栅(PM-FBG)快慢轴交叉对准的新型线偏振、窄谱宽光纤激光器,利用尺寸为1 mm×2.8 mm×10 mm的5% (摩尔分数,下同)掺杂PPMgO:LN为倍频晶体进行单通倍频实验研究。从理论和实验上研究了PPMgO:LN晶体的温度调谐特性及温度调谐特性随基频光入射方向及基频光波长的变化关系。控制晶体温度在26.9℃,基频光功率为8.05 W时,实现了17.84%的谐波转换效率,此时对应的绿光激光输出功率为1.437 W。

## 2 实验装置

基于PPMgO:LN晶体的光纤激光单通倍频实验装置如图1所示,包括基频光源和倍频模块两部分。基频光源为自行研制的基于保偏光纤光栅快慢轴交叉对准技术的线偏振、窄谱宽单横模全光纤激光振荡器,激光振荡腔由一对保偏光纤光栅和保偏有源光纤构成<sup>[13]</sup>,该光纤激光器的输出激光波长约为1064 nm。基频光源准直输出后直接连接倍频模块,倍频模块中主要包括λ/2波片、聚焦透镜L2、倍频晶体(PPMgO:LN)、温控炉、准直透镜L3和双色片。准直基频光通过λ/2波片(HP),经聚焦透镜L2聚焦后入射到PPMgO:LN晶体中,温控炉的控制精度为0.1℃,倍频光和剩余基频光经L3准直后,再通过一个对1064 nm高反且对532 nm高透的双色片,从而获得准直的绿光输出。倍频模块中,λ/2波片用以调整基频线偏光的偏振方向以使其与倍频晶体所要求的偏振方向相匹配。在该实验装置中,基频光源主系统和准直透镜通过单模保偏传输光纤连接,从而实现了倍频模块和基频光源主系统之间的分离布局,便于进行分散式热管理,这在投影显示等具体应用中具有优势。实验中所用的PPMgO:LN晶体为北京中视中科光电技术有限公司提供的5% MgO掺杂的PPMgO:LN,晶体的尺寸为1 mm×2.8 mm×10 mm,极化周期为6.96 μm,晶体两端均镀有对532 nm和1064 nm的增透膜。与主控振荡功率放大(MOPA)结构的基频光源(激光波长取决于种子光源)不同,以光纤光栅为腔镜的光纤激光振荡器基频光源在不同的输出功率下,其中心波长略有变化。图2为基频光源的输出中心波长随输出功率的变化曲线,基频光功率每升高1 W,中心波长向长波方向漂移0.0035 nm。图3为基频光输出功率为22.8 W时测量的光谱图,基频光谱3 dB带宽为0.1 nm。

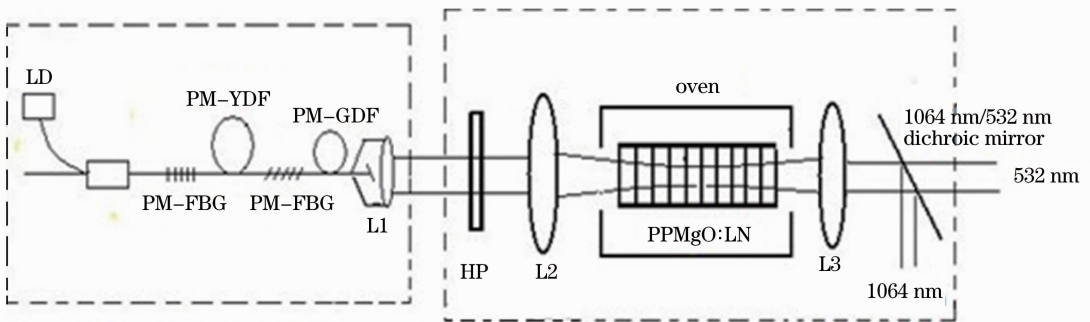


图1 光纤激光单通倍频实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for single-pass frequency-doubling of fiber laser oscillator

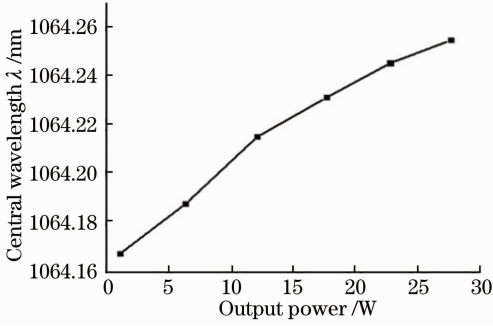


图 2 基频光源的中心波长随输出功率的变化

Fig. 2 Central wavelength power of the fundamental source versus the output power

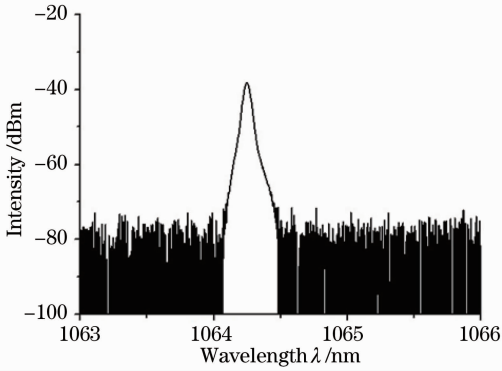


图 3 光谱特性

Fig. 3 Spectral characteristics

### 3 理论模拟及实验结果分析

#### 3.1 理论模拟

根据非线性介质中传输的耦合波理论,推导二次谐波麦克斯韦方程组,得出基横模激光束近场小信号倍频转化效率<sup>[14]</sup>为

$$\eta = \frac{8\omega^2 d^2 L^2}{n_\omega(\lambda_\omega, T)^2 n_{2\omega}(\lambda_{2\omega}, T) c^3 \epsilon_0} \times \frac{P_\omega}{\pi\omega_0^2} \times \text{sinc}^2\left[\frac{\Delta k(\lambda_\omega, T)L}{2}\right], \quad (1)$$

式中  $\omega$  为基频光波角频率,  $d$  为非线性介质的非线性系数,  $L$  为非线性介质的长度,  $\lambda_\omega$  为基频光在真空中的波长,  $\lambda_{2\omega} = \lambda_\omega/2$  为倍频光在真空中的波长,  $n_\omega(\lambda_\omega, T)$ 、 $n_{2\omega}(\lambda_{2\omega}, T)$  分别为非线性晶体中基频光波、倍频光波的折射率,  $c$  为光速,  $\epsilon_0$  为自由空间的介电常数,  $P_\omega/(\pi\omega_0^2)$  为基频光功率密度。铌酸锂晶体的最大非线性系数为  $d_{33} = 16.7 \text{ pm/V}$ , 因此试验中采用的为  $e+e=e$  准相位匹配方式, 晶体温度为  $T$  时倍频光和基频光相位适配系数  $\Delta k(\lambda_\omega, T)$  为

$$\Delta k(\lambda_\omega, T) = k_{2\omega}(\lambda_{2\omega}, T) - 2k_\omega(\lambda_\omega, T) - m \frac{2\pi}{\Lambda(\lambda_\omega, T)}, \quad m = 1, 3, 5, \dots \quad (2)$$

$$k_\omega(\lambda_\omega, T) = 2\pi n_\omega(\lambda_\omega, T)/\lambda_\omega, \quad (3)$$

$$k_{2\omega}(\lambda_{2\omega}, T) = 2\pi n_{2\omega}(\lambda_{2\omega}, T)/\lambda_{2\omega}, \quad (4)$$

式中  $\Lambda(\lambda_\omega, T)$  是晶体非线性系数  $d_{33}$  方向的极化翻转光栅周期。当  $\Delta k = 0$  时, 获得最大的二次谐波转换效率, 满足相位匹配条件的光栅周期  $\Lambda_0(\lambda_\omega, T)$  为:

$$\Lambda_0(\lambda_\omega, T) = \frac{\lambda_\omega}{2[n_{2\omega}(\lambda_{2\omega}, T) - n_\omega(\lambda_\omega, T)]}, \quad (5)$$

5% MgO 掺杂的 PPMgO:LN 晶体的折射率与晶体温度  $T$  和光波波长  $\lambda$  的关系为<sup>[15]</sup>:

$$n_e^2 = a_1 + b_1 f + \frac{a_2 + b_2 f}{\lambda^2 - (a_3 + b_3 f)^2} + \frac{a_4 + b_4 f}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2, \quad (6)$$

$$f = (T - T_R)(T + T_R + 2 \times 273.16), \quad (7)$$

式中  $T_R$  为参考温度, PPMgO:LN 晶体的光栅周期为

$$\Lambda(T) = \Lambda(T_R)[1 + \alpha(T - T_R) + \beta(T - T_R)^2]. \quad (8)$$

(8)式中各计算参数如表 1 所示。

 表 1 折射率  $n_e$  及光栅周期  $\Lambda(T)$  计算参数

Table 1 Calculated parameters of refractive index and thermal expansion

Parameters	Value	Parameters	Value
$a_1$	5.756	$b_2$	$4.7 \times 10^{-8}$
$a_2$	0.0983	$b_3$	$6.113 \times 10^{-8}$
$a_3$	0.202	$b_4$	$1.516 \times 10^{-4}$
$a_4$	189.32	$\alpha$	$1.44 \times 10^{-5}$
$a_5$	12.52	$\beta$	$7.1 \times 10^{-9}$
$a_6$	$1.32 \times 10^{-2}$	$\lambda_\omega$	$1.0642154 \times 10^{-6}$
$b_1$	$2.86 \times 10^{-6}$	$\Lambda(T_R)$	$6.96 \times 10^{-6}$

满足相位匹配条件的 PPMgO:LN 极化周期  $\Lambda_0(\lambda_\omega, T)$  和实际 PPMgO:LN 极化周期  $\Lambda(T)$  随温度的变化关系曲线如图 4 所示。随着温度的升高,  $\Lambda_0(\lambda_\omega, T)$  逐渐减小, 而  $\Lambda(T)$  膨胀变大, 当两者相

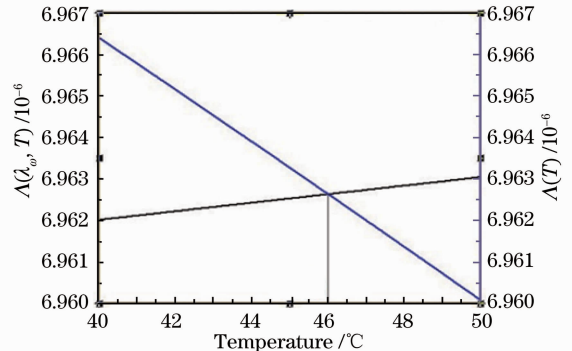


图 4 最佳匹配温度的计算

Fig. 4 Calculation of the best match temperature

等时达到最佳匹配温度。在基频光垂直入射的情况下,晶体的温度控制在 46 °C 时,得到最佳匹配温度,此时谐波转换效率最高。可以通过微调基频光的入射方向来增加基频光入射方向上的  $\Delta(T)$ ,降低 PPMgO:LN 晶体二次谐波的最佳匹配温度,但是对应的谐波转化系数也会降低。计算所得的最佳匹配温度随基频光波长变化关系如图 5 所示,随着基频光向长波方向漂移,晶体倍频所需的最佳匹配温度变高,平均为 1.66 °C/0.06 nm。

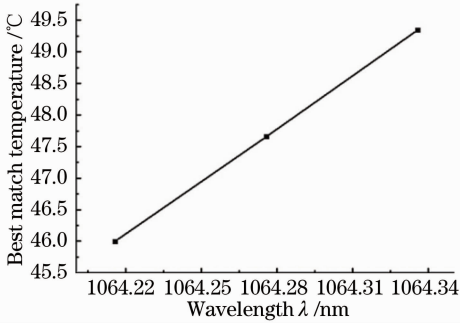


图 5 最佳匹配温度随基频光波长的变化

Fig. 5 Best match temperature as a function of fundamental wavelength

### 3.2 实验结果分析

图 6 为 PPMgO:LN 晶体重新放置前(28.8 °C)后(26.9 °C)晶体倍频的温度调谐曲线(同一基频光源垂直晶体入射)。可以看到晶体重新放置前后晶体的最佳匹配温度改变,这是由于晶体重新放置带来的基频光入射方向(相对于垂直入射到晶体)的随机偏差不同,导致基频光通过方向上的晶体的极化周期不同,从而准相位匹配倍频所需的最佳匹配温度不同。实验结果与图 4 理论计算分析结果相符,进一步分析认为晶体重新放置之后基频光的入射方向偏差变大。温度调谐的半峰全宽保持在 2.8 °C,与计

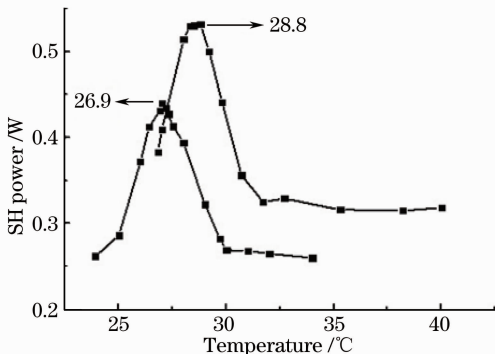


图 6 不同入射角度下的温度调谐特性

Fig. 6 Temperature tuning curves with different angles

算结果 2.73 °C 基本相符。图 7 为不同波长基频光(基频光入射方向和功率相同)入射情况下晶体的温度调谐曲线。随着基频光向长波方向漂移,晶体倍频所需最佳匹配温度升高,平均为 1 °C/0.06 nm,与计算结果 1.66 °C/0.06 nm 趋势上相符。图 8 为基频光不同功率入射情况下(基频光波长和入射方向相同)PPMgO:LN 晶体倍频的温度调谐曲线。图 8(a)和(b)分别为基频光功率为 5.71 W 和 15.5 W 时的温度调谐曲线。可见随着基频光功率的升高,由于基频光被吸收转化成热量导致晶体倍频所需最佳匹配温度降低,基频光功率为 15.5 W 时,温控炉的温度已不能长时间稳定控制(很短时间内由设定的 17.7 °C 跳为 24.4 °C),图 8(b)温度调谐曲线根据瞬时探测温度得出,实际的最佳匹配温度比 22.4 °C 要高。

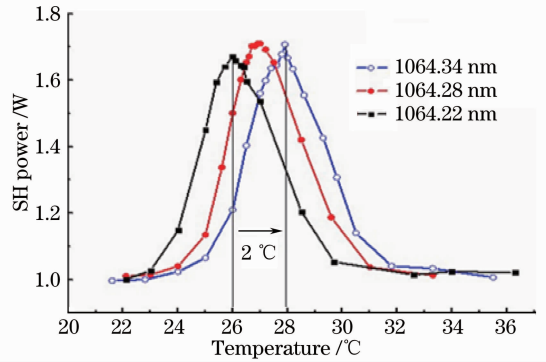


图 7 不同基频光波长下的温度调谐曲线

Fig. 7 Temperature tuning curves with different fundamental wavelengths

图 9 为聚焦透镜 L2 焦距  $f=100$  mm 时倍频光功率及效率随基频光功率变化关系图,保持 PPMgO:LN 晶体控制在最佳匹配温度为 26.9 °C (26.9 °C 为基频光功率为 8.5 W 时晶体的最佳匹配温度),在基频光功率为 8.05 W 时,获得了 1.437 W 的绿光输出,此时谐波转换效率最高为 17.84%。随着基频光功率的继续提高,由于基频光功率被吸收而产生大量的热量,以及基频光波长随着基频光功率增高而向长波方向漂移,使得晶体倍频温度不再匹配而出现谐波转换效率下降的现象。在实验中通过提高基频光功率,可以获得更高的瞬时绿光功率输出,但由于基频光功率的被吸收而产生大量的热量,使得晶体温度迅速偏离最佳倍频匹配温度,因此不能得到稳定的高功率绿光输出。下一步将通过改进晶体温控技术和采用更长的 PPMgO:LN 晶体来提高绿光输出功率及谐波转换效率。

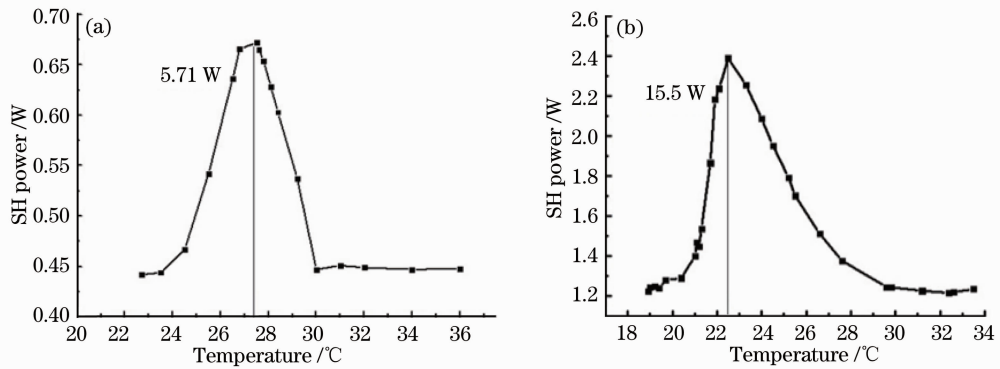


图 8 基频光功率分别为(a)5.71 W 和(b)15.5 W 时的温度调谐曲线

Fig. 8 Temperature tuning curves at different fundamental powers of (a) 5.71 W and (b) 15.5 W

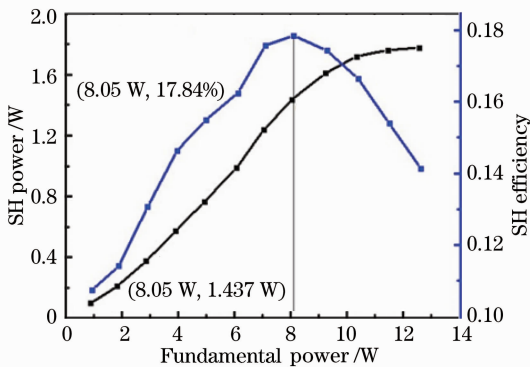


图 9 连续波倍频功率及效率随基频光功率的变化

Fig. 9 Variation of continuous-wave SH power and the corresponding conversion efficiency with fundamental power

## 4 结 论

采用实验室自制的准直输出的基于 PM-FBG 快慢轴交叉对准技术的线偏振、窄谱宽单横模全光纤激光振荡器,以北京中视中科光电技术有限公司提供的 5% (摩尔分数) 氧化镁掺杂的 PPMgO:LN 为倍频晶体,进行了单通倍频的实验研究。理论和实验研究了该种晶体的温度调谐特性以及温度调谐特性随基频光波长与入射方向的变化关系。晶体温度控制在 26.9 °C,在基频光功率为 8.05 W 时,获得最大谐波效率为 17.84%,此时有 1.437 W 的绿光输出。晶体倍频所能获得的最大谐波功率受到基频光功率被吸收而引起的晶体温度升高以及基频光波长随基频光功率漂移的影响,导致晶体倍频温度不匹配。下一步将通过改进晶体温控技术和采用更长的 PPMgO:LN 晶体来提高绿光输出功率及谐波转换效率。

## 参 考 文 献

- Changqing Xu, Yi Gan, Jian Sun. MgO: PPLN frequency doubling optical chips for green light generation: from lab research to mass production[C]. *SPIE*, 2012, **8280**: 828005
- M. Maiwald, S. Schwertfeger, R. Güther *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]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(6): 802~804
- Jiao Mengli, Lü Xinjie, Liu Chi *et al.*. Second harmonic generation characteristics of continuous wave narrow-linespectrum all fiber amplifier in PPSLT[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0302005  
焦梦丽,吕新杰,刘 驰 等. 周期极化钽酸锂倍频窄谱线全光纤连续激光放大器特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0302005
- Chi Liu, Yunfeng Qi, Yaqian Ding *et al.*. All-fibered high power single-frequency, linearly polarized ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(3): 031402
- Liu Houkang, He Bing, Zhou Jun *et al.*. Coherent beam combination of two nanosecond fiber amplifiers by an all-optical feedback loop[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(18): 3885~3887
- He Jing, Zhao Hongming, Zhou Jun *et al.*. Single-ended fiber coupled acousto-optic Q-switched all-fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0502008  
何 晶,赵宏明,周 军 等. 单端光纤耦合的声光调 Q 全光纤化光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0502008
- G. Zhong, J. Jin, Z. Wu. Measurements of optically induced refractive index damage of lithium niobate doped with different concentrations of MgO [C]. New York; In Proc. 11th International Quantum Electronics Conference, 1980, 631
- N. Pavel, I. Shoji, T. Taira *et al.*. Room-temperature, continuous-wave 1-W green power by single-pass frequency doubling in a bulk periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(8): 830~832
- F. J. Kontur, I. Dajani, Yalin Lu *et al.*. Frequency-doubling of a CW fiber laser using PPKTP, PPMgSLT, and PPMgLN[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20): 12882~12889
- S. A. Guskov, S. Popov, S. V. Chernikov *et al.*. Second harmonic generation around 0.53 μm of seeded Yb fiber system in periodically poled lithium niobate[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(14): 1419~1420
- Michael Gregory Pullen, Justin James Chapman, Dave Kielpinski. Efficient generation of >2 W of green light by single-pass frequency doubling in PPMgLN[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): 1397~1400

- 12 G. K. Samanta, S. Chaitanya Kumar, Kavita Devi *et al.*. Multicrystal, continuous-wave, single-pass second-harmonic generation with 56% efficiency[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(20): 3513~3515
- 13 Jianhua Wang, Lei Zhang, Jinneng Hu *et al.*. Efficient linearly polarized ytterbium-doped fiber laser at 1120 nm [J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(17): 3801~3083
- 14 Qian Shixiong, Wang Gongming. Nonlinear Optics-Principles and Progress[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2001. 70~73  
钱士雄,王恭明. 非线性光学-原理与进展[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2001. 70~73
- 15 O. Gayer, Z. Sacks, E. Galun *et al.*. Temperature and wavelength dependent refractive index equation for MgO-doped congruent and stoichiometric LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Appl. Phys.*, 2008, **B91**: 343~348
- 16 Y. S. Kim, R. T. Smith. Thermal expansion of lithium tantalate and lithium niobate single crystal [J]. *Appl. Phys.*, 1969, **40**(11): 4637~4641

栏目编辑: 宋梅梅