

# 周期极化钽酸锂倍频窄谱线全光纤连续激光放大器特性

焦梦丽<sup>1,2</sup> 吕新杰<sup>3</sup> 刘 驰<sup>1</sup> 袁 焯<sup>3</sup> 漆云凤<sup>1</sup> 丁亚茜<sup>1,2</sup> 赵 刚<sup>3</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>中国科学院研究生院, 北京 100049

<sup>3</sup>南京大学物理学院, 江苏 南京 210093

**摘要** 通过准相位匹配技术,采用 1  $\mu\text{m}$  波段高功率窄谱线连续光纤激光放大器抽运高二次谐波转换效率周期性极化晶体,是实现高光束质量、小型化、高功率连续绿光激光器的一个非常有前途的方向。实验自主研发了高效率主振荡功率放大(MOPA)全光纤保偏放大模块,获得中心波长为 1064.25 nm,线宽为 0.035 nm 的 30 W 连续线偏振激光,并以此作为基频光抽运国产周期极化钽酸锂(PPSLT)晶体进行了外腔单通倍频实验。保持 PPSLT 晶体的控制温度为 145.6  $^{\circ}\text{C}$ ,在抽运光功率为 21.5 W 时得到了 2.1 W 的绿光输出。实验分析了温度、基频光功率密度和 Boyd-Kleinman 聚焦因子对倍频光转换效率的影响。实验过程中没有出现饱和现象,进一步提高抽运功率有望获得更高功率的绿光。

**关键词** 激光器;主振荡功率放大;双包层光纤激光;倍频;周期极化钽酸锂晶体

中图分类号 O437.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0302005

## Second Harmonic Generation Characteristics of Continuous Wave Narrow-Linespectrum All Fiber Amplifier in PPSLT

Jiao Mengli<sup>1,2</sup> Lü Xinjie<sup>3</sup> Liu Chi<sup>1</sup> Yuan Ye<sup>3</sup> Qi Yunfeng<sup>1</sup>

Ding Yaqian<sup>1,2</sup> Zhao Gang<sup>3</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>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup>Physics School of Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

**Abstract** The combination of 1  $\mu\text{m}$  continuous wave (CW), high power, narrow-linespectrum fiber amplifier and the periodically poled materials with high second harmonic generation efficiency provides a compact and high efficiency approach for wavelength conversion with high beam quality. A polarization maintaining all fiber amplifier with the master-oscillator power amplifier (MOPA) is built. 30 W CW fiber laser is obtained with 0.035 nm linewidth at 1064.25 nm center wavelength. Single-pass, second-harmonic generation of the fiber laser in periodically poled stoichiometric lithium tantalate (PPSLT) made in China is demonstrated. Stabilizing the temperature at 145.6  $^{\circ}\text{C}$ , 2.1 W green light is achieved at the pump fundamental power of 21.5 W. The effects on the second harmonic generation efficiency produced by temperature, input power density, and Boyd-Kleinman focusing parameter are analysed. Higher power green light can be expected by increasing the fundamental power because the saturation

收稿日期: 2011-11-08; 收到修改稿日期: 2011-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(60907045)、国家 863 计划(2011AA030201)和上海市科技启明星计划(09QB1401700)资助课题。

作者简介: 焦梦丽(1986—),女,硕士研究生,主要从事光纤激光的非线性频率变换方面的研究。

E-mail: jiaomengli2006@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器、光纤放大器等方面的研究。

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

effect is not observed.

**Key words** lasers; master-oscillator power amplifier; double-cladding fiber laser; frequency doubling; periodically poled stoichiometric lithium tantalate crystal

**OCIS codes** 140.3515; 060.2320; 190.2620; 190.4370

## 1 引 言

高功率连续绿光激光在医疗卫生、军事工业、大屏幕彩色显示,以及作为掺钛蓝宝石激光器和光参量振荡抽运源等方面有着广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。由于绿光波段缺乏合适的激光增益介质,因此波长在  $1\ \mu\text{m}$  附近的近红外激光器的二次谐波产生(SHG)已经发展成了获得绿光的一项可行技术。随着光纤激光技术的发展,窄谱线光纤激光器和放大器逐渐进入激光倍频领域,成为新的高效激光倍频光源<sup>[3~5]</sup>。结合窄谱线全光纤激光放大器和周期极化晶体,采用准相位匹配方法(OPM)获得连续绿光激光输出,是实现高光束质量、小型化、高功率连续绿光激光器的一个非常有前途的方向。早在1998年英国帝国学院就采用连续光纤激光放大器与周期极化铌酸锂(PPLN)晶体结合获得440 mW的连续绿光激光<sup>[6]</sup>。2007年日本国立材料科学研究所(NIMS)采用PPMg:SLT晶体倍频0.07 nm线宽的光纤激光得到7 W绿光输出<sup>[7]</sup>。2009年西班牙巴塞罗那光子科学研究所的研究人员采用高功率单频光纤激光器与30 mm长的MgO:sPPLT晶体获得9.64 W的绿光激光<sup>[4]</sup>。到目前为止,国内还没有利用周期极化晶体对窄谱线连续光纤激光倍频获得绿光的报道。

为了分析窄谱线连续光纤激光二次谐波产生的具体影响因素,本文自制30 W级掺镱双包层保偏连续光纤激光放大器,采用南京大学提供的周期极化钽酸锂(PPSLT)晶体进行倍频实验。分析了温度、基频光功率密度及Boyd-Kleinman聚焦因子对

倍频效率的影响。保持PPSLT晶体的控制温度为 $145.6\ \text{C}$ ,在基频光为21.5 W时得到2.1 W的绿光输出,谐波转换效率为9.6%。

## 2 实验装置

采用主振荡功率放大(MOPA)技术的光纤放大器不但能够分别优化种子源和光纤功率放大器,还能够很好地保持种子光的光束质量和激光特性,得到高功率的激光输出<sup>[8]</sup>。图1第三个隔离器(ISO3)之前为窄线宽连续保偏全光纤激光放大器的MOPA结构,包括激光二极管(LD)种子源、两级预放大器和功率放大器。种子源中心波长1064 nm,光谱线宽0.03 nm。种子光经两级预放大器,功率放大到3 W左右。每级放大器间的隔离器可以抑制放大器系统中的寄生振荡以保护预放大器和种子源。在功率放大器中, $(6+1)\times 1$ 保偏光纤耦合器用于耦合6个波长稳定的976 nm LD组成的抽运光源和预放大器的放大信号光。功率放大器中的增益光纤为长8 m的Nufern的保偏掺Yb双包层光纤(PM-YDF)。在增益光纤之后熔接2 m长的传能光纤,熔点之后做抽运滤波。为抑制光纤放大中的放大自发辐射(ASE)及自激振荡,传能光纤 $8^\circ$ 斜面输出。图2为所产生激光随抽运光功率变化的关系,所得光源光-光最大转换效率为76%。由德国PRIMES公司生产的激光光束质量分析仪(LQM-HP)测得光束质量 $M^2=1.35$ 。图3为放大输出的激光光谱。

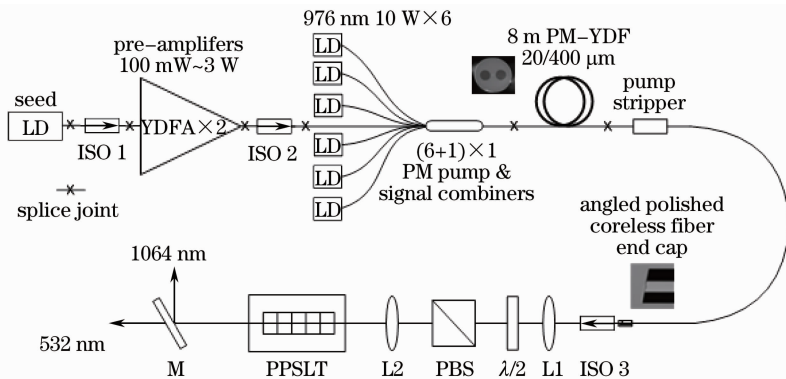


图1 连续保偏光纤激光放大器倍频装置示意图

Fig. 1 Experimental design for SHG of CW PM fiber amplifier

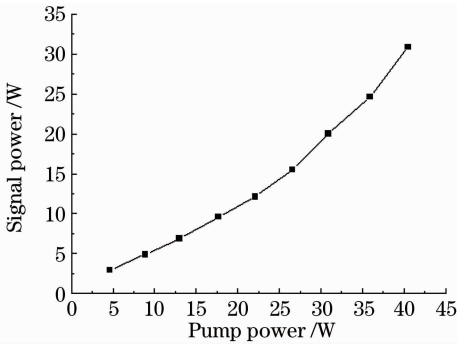


图2 激光随抽运光功率变化的关系

Fig. 2 Output power as a function of total launched pump power

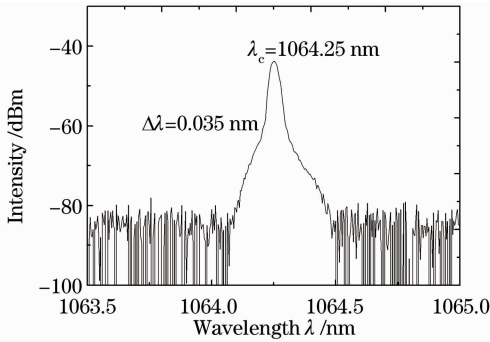


图3 光谱特性

Fig. 3 Spectrum characteristics

基频光经第三个隔离器后由透镜 L1 准直输出,之后依次经过  $\lambda/2$  波片、偏振分光镜(PBS),成为水平偏振。得到的水平偏振激光通过透镜 L2 聚焦后,入射到放置于控制精度为  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$  的温控炉里的 PPSLT 晶体中。倍频光和剩余抽运光再通过  $1064\text{ nm}/532\text{ nm}$  双色片分开,得到绿光输出。实验所用 PPSLT 晶体长度为  $20\text{ mm}$ ,宽度为  $10\text{ mm}$ ,厚度为  $1\text{ mm}$ ,极化周期为  $7.77\text{ }\mu\text{m}$ ,两端面均镀有  $532\sim 1064\text{ nm}$  高透膜。

### 3 倍频理论及实验结果分析

#### 3.1 理论分析

二次谐波产生是一种扩大高功率激光器应用的有效技术,它利用光学介质在强衍射场下的非线性光学效应产生新的频率。设基波频率为  $\omega_1$ ,通过非线性材料频率变为  $\omega_2 (2\omega_1)$ 。由于材料色散, $\omega_1$  和  $\omega_2$  的光有不同的相速度,二者之间的相位失配可以用波数差  $\Delta k = \frac{4\pi}{\lambda_1}(n_1 - n_2)$  表示。

求解非线性介质中传输的耦合基波和二次谐波的麦克斯韦方程,可以求得二次谐波功率  $P_{2\omega}$  和入射基波功率  $P_\omega$  之比

$$\frac{P_{2\omega}}{P_\omega} = \tanh^2 \left[ lk^{1/2} \left( \frac{P_\omega}{A} \right)^{1/2} \frac{\sin(\Delta kl/2)}{\Delta kl/2} \right], \quad (1)$$

式中  $l$  为非线性晶体的长度; $A$  为基波光束的面积; $k = 2\eta^3 \omega_1^2 d_{\text{eff}}^2$ ;  $\eta = \sqrt{\mu_0/(\epsilon_0 \epsilon)}/n_0$  为平面波阻抗; $d_{\text{eff}}$  为介质非线性系数; $\epsilon_0$  为自由空间的介电常数。当转换效率不高时

$$\frac{P_{2\omega}}{P_\omega} \approx 2l^2 k \frac{P_\omega}{A} \frac{\sin^2(\Delta kl/2)}{(\Delta kl/2)^2}. \quad (2)$$

由(2)式可知,转换效率主要取决于晶体相位失配、非线性系数、基波功率密度和晶体长度。二次谐波功率发生在很大程度上取决于  $\sin^2$  函数表示的相位失配。当  $\Delta k$  值一定时,二次谐波功率在晶体中的传播以相干长度  $l_c$  为函数作周期性变化。 $l_c = \lambda_1/4(n_2 - n_1)$  相应于  $\Delta k = \pi/l_c$ 。当光束传播  $l_c$  距离后,累积相位差达到  $\pi$ ,获得最大的二次谐波功率,当经过该长度后,晶体发生的变化使输出光波振幅又以  $\pi$  相位差开始矢量相加,到 2 个相干长度时,输出光振幅又变为零。若要使输出光振幅继续增加,就要突然改变第 2 个相干长度介质的极性,这就是周期极化的 QPM。利用 QPM,通过改变介质的极化周期来改变波的频率,扩展了信号波及闲频波的调谐范围<sup>[9]</sup>。

由于采用 QPM 不需要寻找满足相位匹配的晶体和特殊方位,可以利用有最大  $d_{\text{eff}}$  的材料。目前铌酸锂( $\text{LiNbO}_3$ )和钽酸锂( $\text{LiTaO}_3$ )是激光频率变换领域应用最为广泛的两种非线性材料<sup>[10,11]</sup>,作为周期极化实现准相位匹配材料,钽酸锂更具有其综合优势:在红外波段透射率更高;热稳定性较高;机械性能更优;抗光损伤阈值高。相比较同成分钽酸锂材料,化学计量比 PPSLT 具有更低的矫顽场、更高的抗光损伤能力和更大的非线性系数,在非线性光学频率转换中是最具吸引力的材料之一<sup>[12,13]</sup>。

#### 3.2 实验结果分析

当改变基频光注入功率时,晶体对基频光的吸收会导致晶体内部热分布与设定的温度不相同,因此,温度的设定必须随着抽运功率的改变而改变<sup>[14]</sup>。实验研究了晶体温度调谐曲线半峰全宽(如图 4 所示)和倍频功率及效率随基频功率的变化关系(如图 5 所示)。

图 4 为在输入基频光约为  $2\text{ W}$ ,晶体中心聚焦光斑半径为  $34\text{ }\mu\text{m}$  时二次谐波功率随温度的变化曲线。通过计算理论上得到 PPSLT 最佳倍频温度  $150\text{ }^\circ\text{C}$ ,温度调谐半峰全宽为  $1.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。实验测量晶体最佳匹配温度为  $145.6\text{ }^\circ\text{C}$ ,温度调谐半峰全宽为

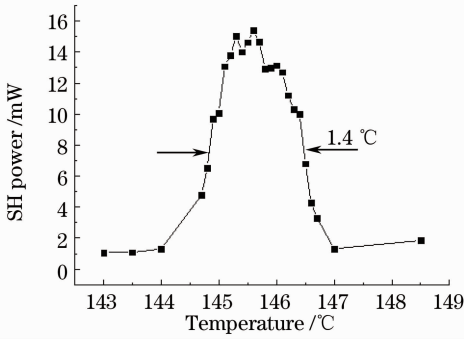


图 4 温度调谐曲线

Fig. 4 Temperature tuning curve

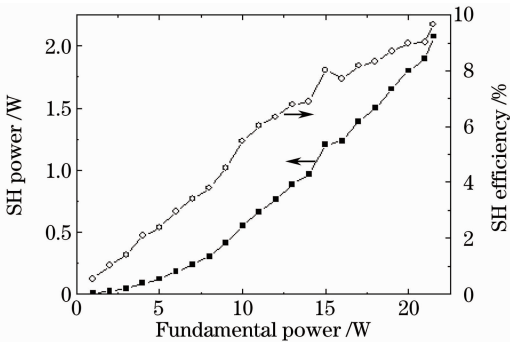


图 5 倍频功率及效率随基频光功率的变化

Fig. 5 Dependence of the CW SH power and the corresponding conversion efficiency on the fundamental power

1.4 °C。实验得到最佳倍频温度偏小于理论计算所得数据,主要是因为晶体吸收少量基频光和倍频光后产生部分热量造成的,此外聚焦、晶体的掺杂浓度和极化周期也可能对实际最佳倍频温度造成影响。

图 5 为聚焦光斑半径为 34 μm 条件下倍频功率及效率随基频光功率变化的关系。保持 PPSLT 晶体的控制温度为 145.6 °C,在基频光为 21.5 W 时得到 2.1 W 的绿光输出,谐波转换效率 9.6%。随着基频光功率逐渐升高而倍频效率没有出现下降的趋势,说明晶体对基频光的吸收较少,没有产生大量热量。但是其他同类研究有报道在相同的基频光功率下出现热弛豫效应,晶体对基频光吸收较多,功率达到一个量值后倍频效率会呈现下降趋势<sup>[15]</sup>。由此可知如果选用导热性及热稳定性较高的 PPSLT,而且很好地控制晶体生长减少晶体热吸收缺陷,有可能避免热弛豫效应。实验中没有出现饱和现象,晶体内最大功率密度 0.6 MW/cm<sup>2</sup>,远远小于晶体损伤阈值 100 MW/cm<sup>2</sup>。基频光功率密度对倍频效率有很大影响,因此可以通过进一步增加基频光功率或减小光斑束腰直径来增加晶体内部功率密度从而提高谐波转换效率。

实验研究了 Boyd-Kleinman 聚焦因子对倍频效率的影响。在聚焦透镜 L2 焦距为 300 mm 和 200 mm 条件下分别测量了倍频效率随基频光功率的变化关系,如图 6 所示。激光束腰位于晶体中心,聚焦光斑半径分别为 34.0 μm 和 48.5 μm。Boyd-Kleinman 聚焦因子  $\xi = L/b$ ,  $L$  为晶体长度,  $b = k\omega_0^2$  为共焦参数,  $k = 2\pi n_1/\lambda_1$ 。实验验证当  $\xi < 2.84$  时,倍频效率随着  $\xi$  的增加而升高,Boyd 和 Kleinman 计算得到当  $\xi = 2.84$  时倍频效率最高<sup>[16]</sup>。实验所采用的两种情况下聚焦因子分别为  $\xi = 0.68$  和  $\xi = 1.37$ 。因此可以通过进一步增加聚焦因子来提高倍频效率。聚焦因子与晶体长度成正比,因此适当增加晶体长度可增加聚焦因子。考虑到在现有晶体基础上需再减小小聚焦半径至 23.6 μm,才能达到最佳聚焦因子,但是发散角会太大,所以下一步将采用 30 mm 长晶体,聚焦半径为 35.4 μm 光斑进行实验。

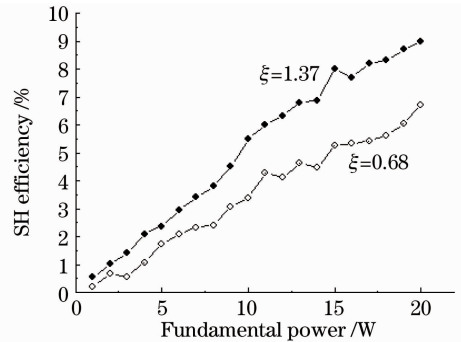


图 6 倍频效率随基频功率的变化

Fig. 6 SH power as a function of fundamental power

## 4 结 论

采用 MOPA 方式自制 30 W 级掺镱双包层连续保偏光纤放大器,利用 PPSLT 晶体通过 QPM 对该光源进行了倍频。观察了倍频效率随温度及基频光功率密度的变化趋势,研究了 Boyd-Kleinman 聚焦因子对倍频效率的影响。在基频光 21.5 W 时得到 2.1 W 的绿光输出。实验中没有出现倍频效率下降的现象,说明选用导热性良好的 PPSLT,并且很好地控制晶体生长,就有可能避免热弛豫效应。根据 Boyd 和 Kleinman 的结论,聚焦因子达到 2.84 时倍频效率可达到最大,因此可通过增加晶体长度,同时增加基频光的功率密度来进一步提高倍频效率。

## 参 考 文 献

1 G. K. Samanta, G. R. Fayaz. 1.59 W, single-frequency, continuous-wave optical parametric oscillator based on MgO:

- sPPLT[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2623~2625
- 2 Sun Yan, Lu Huadong. All solid Ti:sapphire lasers [J]. *Quantum Acta Photonica Sinica*, 2008, **14**(3): 344~347  
孙燕, 卢华东. 全固态单频钛宝石激光器[J]. *量子光学学报*, 2008, **14**(3): 344~347
- 3 Thomas Suidmeyer, Yutaka Imai, Hisashi Masuda *et al.*. Efficient 2nd and 4th harmonic generation of a single-frequency, continuous-wave fiber amplifier[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 1546~1551
- 4 G. K. Samanta, S. C. Kumar, M. Ebrahim-Zadeh, Stable, 9.6 W, continuous-wave, single-frequency, fiber-based green source at 532 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1561~1563
- 5 R. Cieslak, J. K. Sahu, W. A. Clarkson. Efficient intracavity frequency doubling of an Yb-doped fiber laser using an internal resonant enhancement cavity[C]. in Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CMW4
- 6 S. A. Guskov, S. Popov, S. V. Chernikov *et al.*. Second harmonic generation around 0.53  $\mu\text{m}$  of seeded Yb fibre system in periodically poled lithium niobate[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(14): 1419~1420
- 7 Sergey V. Tovstonog, Sunao Kurimura, Kenji Kitamura. High power continuous-wave green light generation by quasiphase matching in Mg stoichiometric lithium tantalate[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(5): 051115
- 8 Su Rongtao, Zhou Pu, Xiao Hu *et al.*. MOPA structured single-frequency nanosecond pulsed laser in all fiber format[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102013  
粟荣涛, 周朴, 肖虎等. MOPA结构的单频纳秒脉冲全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1102013
- 9 Lou Qihong. High-Power Fiber Laser and its Applications[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010. 130~132
- 楼祺洪. 高功率光纤激光器及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010. 130~132
- 10 Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin *et al.*. High-power MgO:PPLN optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1447~1450  
魏星斌, 彭跃峰, 王卫民等. 高功率 MgO:PPLN 光参变振荡器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1447~1450
- 11 Tan Huiming, Lin Hongyi, Zhang Bolin. Mid-infrared tunable all-solid-state optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2303~2308  
檀慧明, 林洪沂, 张搏麟. 基于 PPMgLN 的中红外全固态可调谐光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2303~2308
- 12 Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin *et al.*. Research on optical parametric oscillator based on periodically poled LiTaO<sub>3</sub> crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0614001  
魏星斌, 彭跃峰, 王卫民等. 基于周期极化钽酸锂晶体的光参变振荡器技术研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0614001
- 13 Jia Baoshen, Zhao Yequan. Growth of near-stoichiometric lithium tantalate and its periodical polarization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3249~3252  
贾宝申, 赵业权. 近化学计量比钽酸锂晶体生长及其周期极化[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3249~3252
- 14 Lin Song, Zhao Jiangshan, Zhou Yi. Intra-cavity second harmonic generation based on periodically poled stoichiometric LiTaO<sub>3</sub>[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2808~2811  
林嵩, 赵江山, 周翊. 周期极化钽酸锂晶体腔内倍频实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2808~2811
- 15 F. J. Kontur, I. Dajani. Frequency-doubling of a CW fiber laser using PPKTP, PPMgSLT, and PPMgLN [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20): 12882~12889
- 16 G. D. Boyd. Parametric interaction of focused Gaussian light beams[J]. *J. A. P.*, 1968, **39**(8): 3597~3639