

3 μm 低阈值 MgO:PPLN-OPO 布拉格体光栅腔谱宽压窄研究

邢廷伦^{1,2}, 王礼¹, 胡舒武¹, 程庭清¹, 吴先友¹, 江海河^{1,2}

¹中国科学院合肥物质科学研究院医学物理与技术中心, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 设计了一种双程抽运可调谐光参量振荡器(OPO)。利用 1.065 μm 单频脉冲光纤激光器抽运周期性畴极化掺镁铌酸锂晶体(MgO:PPLN), 采用反射式布拉格体光栅压窄振荡信号光, 将闲频光的谱宽从自由振荡时的 38 nm 压窄到 0.42 nm, 并将振荡阈值降低至 6.7 W, 从而获得了高转换效率的中红外激光输出。通过调节体光栅的角度和温度, 实现了闲频光 230 GHz 的调谐输出; 当闲频光输出功率为 2.5 W 时, 其水平方向和垂直方向的光束质量因子分别为 1.8 和 1.9。

关键词 激光技术; 中红外; 光参量振荡器; 窄线宽; 高效率

中图分类号 O437.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0101006

Cavity-Linewidth Narrowing of 3 μm Low Threshold MgO:PPLN-OPO by Volume Bragg Grating

Xing Tinglun^{1,2}, Wang Li¹, Hu Shuwu¹, Cheng Tingqing¹,
Wu Xianyou¹, Jiang Haihe^{1,2}

¹Center of Medical Physics and Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract One dual-pumped tunable optical parametric oscillator (OPO) is designed. With a 1.065 μm single-frequency pulsed fiber laser pumping the periodically poled domain MgO-doped lithium niobate (MgO:PPLN) and a reflective volume Bragg grating narrowing the oscillation signal linewidth, the idler signal linewidth is reduced from 38 nm at free oscillation to 0.42 nm, the oscillation threshold is reduced to 6.7 W, and the mid-infrared laser output with a high conversion efficiency is realized. By adjusting the temperature and angle of the volume grating, a 230 GHz tunable output of idler light is realized and the beam quality factors in the horizontal and vertical directions are 1.8 and 1.9 respectively when the output power of idler light is 2.5 W.

Key words laser technique; mid-infrared; optical parametric oscillator; narrow linewidth; high efficiency

OCIS codes 140.3460; 190.4970; 190.4410

1 引言

利用光参量振荡器(OPO)可实现 3~5 μm 中红外可调谐激光输出, 其在大气环境监测、目标特征探测以及高分辨率光谱学等诸多领域有着重要的应用价值^[1-3]。采用准相位匹配技术的周期性畴极化掺氧化镁

收稿日期: 2016-09-18; 收到修改稿日期: 2016-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(61275118)、中国工程物理研究院联合基金(U1230131)

作者简介: 邢廷伦(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事固体激光及非线性光学技术方面的研究。

E-mail: tlxing126@126.com

导师简介: 江海河(1961—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光技术方面的研究。

E-mail: hjiang@aiofm.ac.cn(通信联系人)

铌酸锂(MgO:PPLN)晶体具有高增益、无走离、抽运源成熟等优点^[4-5], 1 μm 光纤激光器具有高紧凑性和高便捷性,因此两者结合的光纤激光器抽运 MgO:PPLN-OPO 可调谐中红外激光技术得到了较快发展^[6-8]。其中,脉冲光纤激光器抽运 MgO:PPLN-OPO 具有高峰值功率和低阈值,受到了科研工作者的青睐^[9-10]。但是,受到抽运光谱宽和 MgO:PPLN 晶体增益谱宽等因素的影响,OPO 自由振荡输出的参量光谱宽通常都很宽,一般高达十几纳米甚至几十纳米^[11],难以达到高分辨率光谱的应用要求。为此,近几年来科研人员尝试采用标准具或闪耀光栅等方法压窄 OPO 输出谱宽^[12-16]。Hempler 等^[17]在 L 形腔内放置标准具,获得了 2.94 μm 中红外激光输出,输出功率为 0.95 W,闲频光谱宽理论计算值约为 1.3 nm,其最大光-光转换效率为 9.5%。虽然内置标准具的方法可以有效控制 OPO 的谱宽,但是该方法增大了腔内参量损耗和 OPO 的振荡阈值,并降低了中红外激光的光-光转换效率。Peng 等^[18]采用反射式体布拉格光栅(RBG)压窄振荡信号光谱宽,利用谱宽为 0.04 nm 的 1.064 μm 固体激光器抽运 MgO:PPLN 晶体,实现了谱宽为 0.7 nm 的 2.9 μm 中红外激光输出,最大功率为 51.7 W,对应闲频光的光-光转换效率为 16.6%。由于该实验采用单程的抽运模式,OPO 的振荡阈值较高,约为 42 W。当抽运功率为 50 W 时,闲频光的功率只有 2.6 W,其光-光转换效率较低。为了降低反射式体布拉格光栅 OPO 的振荡阈值、提高低抽运功率下的光-光转换效率,需要设计合理的窄谱宽 OPO 振荡系统。

本文从理论上分别分析了自由振荡和压窄两种情况下的闲频光谱宽,设计了一种双程抽运 MgO:PPLN-OPO 振荡系统,采用单频脉冲光纤激光器抽运,使用 RBG 压窄振荡信号光谱宽实现了对闲频光的压窄,并降低了 OPO 振荡阈值,提高了光-光转换效率,获得了高效率窄谱宽的 3 μm 中红外激光输出,将闲频光谱宽压窄到 0.5 nm 以下。通过调节 RBG 的角度和温度,实现了闲频光中红外宽调谐输出。

2 理论分析

在单谐振 OPO 系统中,影响闲频光谱宽的因素有抽运光谱宽、抽运光发散角、振荡光高增益等^[19]。各种展宽因素引起的信号光频率色散的增益为

$$g(\omega_{s_0} + \Delta\omega_s)L_0 = \sqrt{\Gamma^2(\omega_{s_0})L_0^2 - \frac{(\Delta k L_0)^2}{4}}, \quad (1)$$

式中 $g(\omega_{s_0} + \Delta\omega_s)$ 为信号光增益系数, ω_s 为信号光频率, ω_{s_0} 为振荡信号光中心频率, Γ 为单位长度的增益系数, L_0 为晶体长度, Δk 为波矢失配量。

其参量的总损耗为

$$\delta_{\text{all}} = \Gamma_{\text{th}}(\omega_{s_0})L_0, \quad (2)$$

式中 Γ_{th} 为阈值单位长度的增益系数。

为实现信号光振荡,须满足

$$g(\omega_{s_0} + \Delta\omega_s)L_0 \geq \delta_{\text{all}}. \quad (3)$$

波矢失配量 Δk 为^[20]

$$\Delta k = \Delta\omega_p \frac{\partial k_p(\omega_p)}{\partial \omega_p} - \Delta\omega_s \frac{\partial k_s(\omega_s)}{\partial \omega_s} - \Delta\omega_i \frac{\partial k_i(\omega_i)}{\partial \omega_i}, \quad (4)$$

式中 ω_i 为闲频光频率, ω_p 为抽运光频率。由(1)~(4)式可得信号光谱宽为

$$\Delta\omega_s \left[\frac{\partial k_i(\omega_i)}{\partial \omega_i} - \frac{\partial k_s(\omega_s)}{\partial \omega_s} \right] = 2\Gamma_{\text{th}} \sqrt{N-1}, \quad (5)$$

式中 k_s 和 k_i 分别为信号光和闲频光波矢大小; N 为超阈值倍数; 阈值单位长度的增益系数 $\Gamma_{\text{th}} = \chi_e \sqrt{2\omega_s \omega_i I_{\text{th}} / \epsilon_0 c n_p n_s n_i} / c$ ^[21], 其中 χ_e 为晶体最大有效非线性系数, c 为真空光速, I_{th} 为阈值抽运光光强, ϵ_0 为真空介电常数, n_p 、 n_s 、 n_i 分别为抽运光、信号光、闲频光的折射率。

由能量守恒可得^[20]

$$\Delta\omega_p = \Delta\omega_s + \Delta\omega_i. \quad (6)$$

以上分析表明,闲频光的谱宽主要受抽运光谱宽和振荡信号光谱宽的影响。

2.1 单频激光抽运单谐振 OPO 闲频光的自由振荡谱宽

对于单频激光器抽运单谐振 OPO 的自由振荡,可忽略抽运光的线宽,闲频光谱宽主要受振荡信号光谱宽影响,因此闲频光谱宽表示为

$$\Delta\lambda_i = \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_s}\right)^2 \Delta\lambda_s, \quad (7)$$

式中 λ_i 和 λ_s 分别为闲频光和信号光的波长, $\Delta\lambda_s$ 为自由振荡的信号光谱宽。

对于 MgO:PPLN 晶体,极化周期 $\Lambda = 31.2 \mu\text{m}$ 。当晶体温度为 $80.41 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,信号光和闲频光的中心波长分别为 $1.647 \mu\text{m}$ 和 $3.017 \mu\text{m}$ 。当抽运功率约为阈值的 3.3 倍时(阈值为 4.2 W),由(5)式可得信号光的谱宽约为 12 nm ,由(7)式可得闲频光的谱宽约为 40 nm 。

2.2 单频激光抽运单谐振 OPO 闲频光谱宽 RBG 压窄

基于光致热折变玻璃的 RBG 具有优良的物理特性、较高的激光损伤阈值和较好的透射性,其透射范围长达 $400 \sim 2700 \text{ nm}$,且具有优良的光谱选择性和角谱选择性^[22-23]。

在采取 RBG 为信号光振荡腔腔镜的单频抽运单谐振 OPO 系统中,振荡信号光的谱宽被 RBG 压窄,一般信号光谱宽为 RBG 的反射带宽的半高全宽,因此闲频光谱宽表示为

$$\Delta\lambda'_i = \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_s}\right)^2 \Delta\lambda'_s, \quad (8)$$

式中 $\Delta\lambda'_s$ 为经 RBG 压窄后的信号光谱宽。

由(8)式可知,若要实现闲频光的谱宽不超过 0.5 nm ,信号光的谱宽必须小于 0.15 nm ,即 RBG 的反射带宽半高全宽约为 0.15 nm 。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示。抽运源为美国 Advalue Photonics 公司生产的型号为 AP-P-SF 的 $1.065 \mu\text{m}$ 单频脉冲光纤激光器,重复频率为 75 kHz ,脉宽为 315 ns ,激光输出为单频线偏振光,线宽约为 0.00014 nm ,光束质量因子小于 1.3。实验中采用可旋转的半波片和光隔离器组成光开关以控制抽运光功率的大小。采用焦距为 300 mm 的双凸透镜将抽运光耦合聚焦到晶体中心处,光斑直径约为 $100 \mu\text{m}$ 。双程抽运间接压窄闲频光单谐振 OPO 由平凹腔镜 M1、MgO:PPLN 晶体(MgO 物质的量分数为 5%)、凹凸的弯月镜 M3 和 RBG 组成。其中,由 M1 和 RBG 组成的信号光振荡腔可实现窄谱宽信号光振荡,且 M1 凹面曲率半径为 500 mm ,镀膜对 $1.065 \mu\text{m}$ 的抽运光高透,对信号光波段($1.5 \sim 1.75 \mu\text{m}$)和闲频光波段($2.85 \sim 3.15 \mu\text{m}$)高反;RBG 尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 23 \text{ mm}$,其两端面镀膜对 $1.6 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 光波段高透,光谱半高全宽约为 0.16 nm ,最大衍射效率为 99%,透射率曲线如图 2 所示。M2 镀膜对 45° 入射的抽运光和信号光波段高透,对闲频光波段高反,可实现 OPO 的单谐振运转;M3 为弯月镜,曲率半径为 80 mm ,其镀膜对信号光波段高透,对抽运光波段高反,且将透射抽运光再返回,可实现双程抽运 MgO:PPLN 晶体;MgO:PPLN 晶体尺寸为 $45 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,其两端对抽运光、信号光和闲频光波段高透;当温度为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,闲频光中心波长理论计算值为 $3.0 \mu\text{m}$ ^[24]。为了恒定晶体的工作温度,MgO:PPLN 晶体放置在自制的温控炉中,该温控炉的温控精度为 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$,显示分辨率为 $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$,温度调节范围为 $25 \sim 225 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

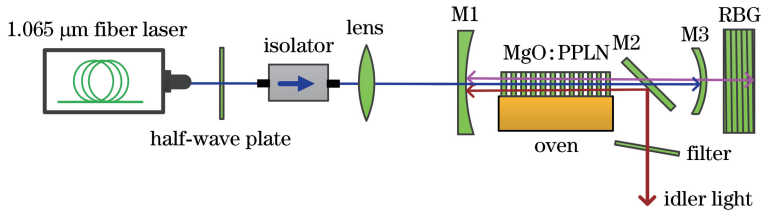


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

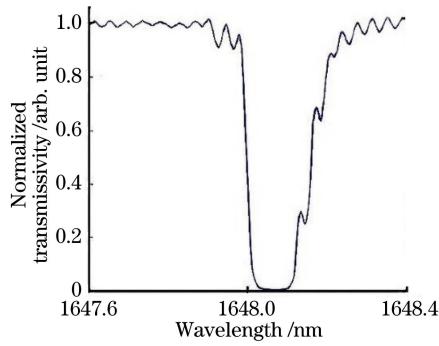


图 2 RBG 透射率曲线

Fig. 2 Transmissivity curve of RBG

4 实验结果及分析

利用单频脉冲光纤激光器抽运单谐振 MgO:PPLN-OPO, 分别对自由振荡和信号光压窄两种情况下闲频光的功率和谱宽进行实验分析。

作为对比, 采用信号光波段高反的平平腔替换 RBG, 此时 OPO 为自由振荡。温控炉温度设定为 80.41 °C, 利用 Ophir 功率计测量经过滤光片的闲频光, 闲频光输出功率和转换效率随抽运光功率的变化如图 3 所示。从图中可以看出, 当 OPO 自由振荡时, OPO 的振荡阈值为 4.2 W; 当抽运光抽运功率为 14 W 时, 3 μm 的闲频光输出功率为 2.6 W, 对应光-光转换效率为 18.5%。当 RBG 作为谐振腔的腔镜时, OPO 的振荡阈值增大至 6.7 W; 当最大抽运光功率为 13.8 W 时, 3.017 μm 的闲频光输出功率为 2.5 W, 对应光-光转换效率为 18.1%。由此可见, RBG 作为谐振腔腔镜并没有增大腔内损耗, 闲频光的光-光转换效率基本没变; 振荡阈值明显增大, 并且当输入功率小于 10 W 时, 两种情况的光-光转换效率相差较大, 原因是当 RBG 作为腔镜时, 在低功率下窄谱宽的振荡信号光和抽运光的模式失配较为严重; 随着输入功率的增大, 腔内热致抽运光和振荡信号光模式匹配, 转换效率升高。

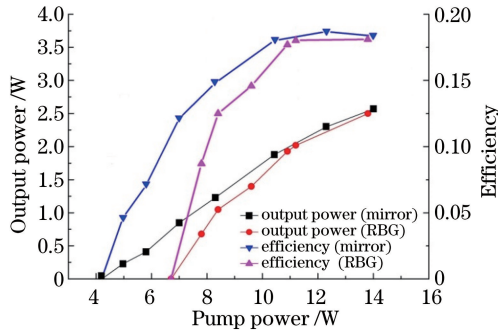


图 3 闲频光输出功率和转换效率随抽运功率的变化

Fig. 3 Variations of output power and conversion efficiency of idler light with pump power

当 OPO 自由振荡、抽运光抽运功率大小为 14 W 时, 采用分光仪测量闲频光的光谱, 测量结果如图 4 所示。闲频光谱宽约为 38 nm, 与理论值(约 40 nm)基本吻合。当 RBG 作为谐振腔腔镜时, 信号光被压窄; 当抽运光抽运功率为 13.8 W 时, 采用 Bristol-721 A 频谱分析仪测量的信号光谱宽约为 0.12 nm, 同时测量闲频光的光谱, 结果如图 5 所示。从图中可以看出, 当 RBG 作为输出镜时, 闲频光的谱宽被间接地压缩至 0.42 nm, 理论计算的闲频光的谱宽为 0.41 nm, 实验值与理论值基本吻合。

中红外激光输出为多横模, 当 RBG 作为谐振腔腔镜、抽运光抽运功率为 13.8 W 时, 调节 RBG 的角度和温度, 同时匹配 MgO:PPLN 晶体的温度, 可实现闲频光 230 GHz 的波长调谐。利用光斑分析仪测量不同位置处闲频光的光斑直径, 计算可得水平方向和垂直方向的光束质量因子分别为 1.8 和 1.9; 在此状态下连续测 30 min, 闲频光功率不稳定性不超过 ±5.1%。

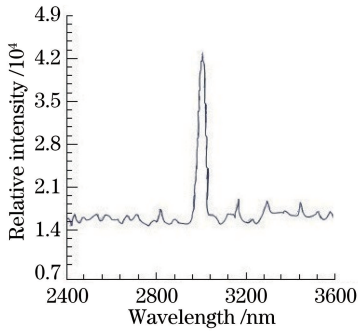


图 4 自由振荡时闲频光的光谱

Fig. 4 Spectrum of idler light at free oscillation

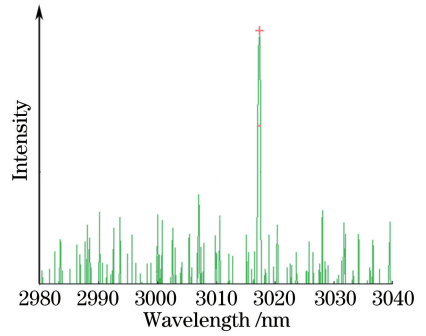


图 5 RBG 作为输出镜时闲频光的光谱

Fig. 5 Spectrum of idler light when RBG as the output mirror

5 结 论

采用单频脉冲光纤激光器抽运 MgO:PPLN-OPO,从理论上分别分析了自由振荡和压窄两种情况下闲频光的谱宽,采用反射性布拉格体光栅对振荡信号光谱宽进行压窄,间接地将闲频光谱宽从自由振荡情况下的 38 nm 压窄到 0.42 nm,与理论分析基本吻合。采用双程抽运模式,降低了 OPO 振荡阈值,提高了中红外激光的光-光转换效率。当抽运功率为 13.8 W 时,获得了平均功率为 2.5 W、谱宽为 0.42 nm、中心波长为 3.017 μm 的脉冲中红外激光输出,对应光-光转换效率为 18.1%;相对于自由振荡的情况,闲频光的转换效率没有明显减小。通过调节 RBG 的角度和温度,实现了闲频光的宽调谐输出,水平方向和垂直方向的光束质量因子分别为 1.8 和 1.9。

参 考 文 献

- [1] Vainio M, Siltanen M, Peltola J, *et al.* Grating-cavity continuous-wave optical parametric oscillators for high-resolution mid-infrared spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(4): A1-A10.
- [2] Saikawa J, Miyazaki M, Fujii M, *et al.* High-energy, broadly tunable, narrow-bandwidth mid-infrared optical parametric system pumped by quasi-phase-matched devices[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(15): 1699-1701.
- [3] Ricciardi I, De Tommasi E, Maddaloni P, *et al.* A narrow-linewidth, frequency-stabilized OPO for sub-Doppler molecular spectroscopy around 3 μm [C]. *SPIE*, 2012, 8434: 84341Z.
- [4] Chen T, Wei K H, Jiang P P, *et al.* High-power multichannel PPMgLN-based optical parametric oscillator pumped by a master oscillation power amplification-structured Q-switched fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(28): 6881-6885.
- [5] Lin D J, Alam S, Shen Y H, *et al.* Large aperture PPMgLN based high-power optical parametric oscillator at 3.8 μm pumped by a nanosecond linearly polarized fiber MOPA[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15008-15014.
- [6] Chen D W, Rose T S. Low noise 10-W CW OPO generation near 3 μm with MgO doped PPLN[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2005: 8733759.
- [7] Liu L, Li X, Xiao H, *et al.* 12 W mid-infrared output, singly resonant, continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a Yb³⁺-doped fiber amplifier[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(1): 115-119.
- [8] Wu B, Kong J, Shen Y H. High-efficiency semi-external-cavity-structured periodically poled MgLN-based optical parametric oscillator with output power exceeding 9.2 W at 3.82 μm [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1118-1120.
- [9] Tao C, Jiang P P, Yang D Z, *et al.* High-power PPMgLN-based optical parametric oscillator pumped by a linearly polarized, semi-fiber-coupled acousto-optic Q-switched fiber master oscillator power amplifier[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(25): 6316-6321.
- [10] Yu Y J, Chen X Y, Zhao J, *et al.* High-repetition-rate tunable mid-infrared optical parametric oscillator based on MgO: periodically poled lithium niobate[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6): 061604.
- [11] Xu H B, Wu B, Cai S, *et al.* Analysis on spectral gain characteristics of PPMgLN based quasi-phase-matching optical parametric amplification[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2009, 10(4): 601-606.
- [12] Das R, Kumar S C, Samanta G K, *et al.* Broadband, high-power, continuous-wave, mid-infrared source using extended phase-matching bandwidth in MgO:PPLN[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(24): 3836-3838.

- [13] Schlup P, Butterworth S D, McKinnie I T. Efficient single-frequency pulsed periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator[J]. Optics Communications, 1998, 154(4): 191-195.
- [14] Ganikhanov F, Caughey T, Vodopyanov K L. Narrow-linewidth middle-infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2001, 18(6): 818-822.
- [15] Das S. Pump tuned wide tunable noncritically phase-matched ZnGeP₂ narrow line width optical parametric oscillator[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 69: 13-18.
- [16] Schlup P, McKinnie I T, Butterworth S D. Single-mode, singly resonant, pulsed periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator[J]. Applied Optics, 1999, 38(36): 7398-7401.
- [17] Hempler N, Robertson G, Hamilton C, *et al.* Advances in narrow-linewidth continuous wave semiconductor disk laser pumped optical parametric oscillators[C]. SPIE, 2012, 4242: 82420J.
- [18] Peng Y F, Wei X B, Luo X W, *et al.* High-power and widely tunable mid-infrared optical parametric amplification based on PPMgLN[J]. Optics Letters, 2016, 41(1): 49-51.
- [19] Wei Xingbin. Study on mid-infrared optical parametric oscillator technique based on PPLN crystal [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2011: 104-107.
魏星斌. 中红外 PPLN 光参量振荡技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2011: 104-107.
- [20] Li Gang. Transformation and expansion of laser frequency[M]. Beijing: Science Press, 2005: 80-81.
李 港. 激光频率的变换与扩展[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 80-81.
- [21] Zhang Baogang. Study on narrow linewidth OPOs with MgO:PPLN crystals[D]. Nanjing: Dongnan University, 2015: 22-23.
张保刚. 基于 MgO:PPLN 的窄线宽光参量振荡器特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2015: 22-23.
- [22] Xiong Baoxing. Characteristics on the photo-thermal-refractive glass and volume Bragg gratings [D]. Suzhou: Suzhou University, 2012: 44-45.
熊宝星. 光热敏折变玻璃的制备及其 Bragg 体光栅特性研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012: 44-45.
- [23] Divliansky I, Jain A, Drachenberg D, *et al.* Volume Bragg lasers[C]. SPIE, 2010, 7751: 77510Z.
- [24] Gayer O, Sacks Z, Galun E, *et al.* Temperature and wavelength dependent refractive index equations for MgO-doped congruent and stoichiometric LiNbO₃ [J]. Applied Physics B, 2008, 91(2): 343-348.