

文章编号: 0258-7025(2007)12-1643-05

# 低阈值宽调谐的内腔调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>/PPLN 光学参量产生

纪峰<sup>1,2</sup>, 姚建铨<sup>1,2</sup>, 张百钢<sup>1,2</sup>, 张铁犁<sup>1</sup>, 赵璞<sup>1</sup>, 王鹏<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072)  
<sup>2</sup>教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 将多周期极化铌酸锂(PPLN)晶体置于激光二极管(LD)端面抽运的声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>激光器谐振腔内, 实现了准相位匹配内腔光学参量直接产生(QPM-IOPG)。PPLN 晶体长20 mm, 利用外加电场极化法制作, 极化沿晶体的 z 向进行。设定声光 Q 开关重复频率为 19 kHz, 通过温度调谐和周期调谐, 获得了信号光在 1384 ~ 1541 nm 范围内的连续输出, 脉冲宽度约为 80 ns。在 PPLN 晶体温度为 140 °C, 极化周期为 29 μm 时, 内腔光参量产生的阈值仅为 0.93 W, 在 3 W 激光二极管抽运功率下, 获得了 140 mW 的信号光输出; 在极化周期为 26.5 μm 时, 内腔光参量产生的阈值增大到 1.36 W, 在 3 W 激光二极管抽运功率下, 获得了 105 mW 的信号光输出。分析了不同极化周期下阈值和转换效率存在差异的原因, 对内腔光学参量产生的阈值进行了理论分析和计算。

**关键词** 非线性光学; 内腔光学参量产生; 准相位匹配; 调谐输出

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Low-Threshold Widely-Tunable Intracavity Q-Switched Nd:YVO<sub>4</sub>/PPLN Optical Parametric Generator

Ji Feng<sup>1,2</sup>, Yao Jian-quan<sup>1,2</sup>, Zhang Bai-gang<sup>1,2</sup>,

Zhang Tie-li<sup>1</sup>, Zhao Pu<sup>1</sup>, Wang Peng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Institute of Laser and Optoelectronics,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China  
<sup>2</sup>Key Laboratory of Optoelectric Information Science and Technology, Ministry of Education,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A quasi-phase-matched intracavity optical parametric generator (QPM-IOPG) is demonstrated based on multi-grating periodically poled lithium niobate (PPLN) internal to an acousto-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser. The PPLN crystal is 20 mm long and periodically poled along the z-axis by using external electric poling technique. While the Q-switch repetition rate is set at 19 kHz, the signal wavelength can be continuously tuned from 1384 nm to 1541 nm by combining temperature tuning and grating tuning. The measured signal pulse width is approximately 80 ns. While the PPLN crystal temperature is 140 °C, the QPM-IOPG threshold is just 0.93 W with the 29 μm grating period and 3 W of laser diode (LD) pump power produces 140 mW signal output. With the 26.5 μm grating period, the QPM-IOPG threshold is increased to 1.36 W and at an incident LD pump of 3 W, 105 mW signal is obtained. The reason of the different thresholds and conversion efficiencies for various grating periods is analyzed and the theoretical calculation of the QPM-IOPG threshold is also presented.

**Key words** nonlinear optics; intracavity optical parametric generator; quasi-phase-matching; tunable output

收稿日期: 2007-05-16; 收到修改稿日期: 2007-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(10474071, 60671036)和博士点基金(20040056010)资助项目。

作者简介: 纪峰(1981—), 男, 安徽人, 博士研究生, 目前从事全固态激光器以及准相位匹配频率变换方面的研究工作。

E-mail: jifengtju@163.com

导师简介: 姚建铨(1939—), 男, 上海人, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为全固态激光器及非线性光学频率变换技术。E-mail: jqyao@tju.edu.cn

## 1 引 言

输出波长可调谐的红外相干光源可应用于许多研究领域,比如光谱学、大气环境监测、遥感测量、光纤通信等<sup>[1~5]</sup>。利用光学参量产生(OPG)来获得可调谐相干辐射是一种非常有效的方法<sup>[6,7]</sup>,其优点是结构简单,波长覆盖范围广,调谐方便,且适于小型化和固体化。目前关于光学参量产生的报道中,大多集中在外腔光学参量产生。在外腔光学参量产生中,参量晶体置于抽运激光谐振腔外,激光振荡和光参量是两个分离的过程,抽运光一次通过后就将晶体内的噪声光子直接放大为一定的输出功率,因此阈值较高。为降低阈值和提高光学参量产生的转换效率,通常采用的晶体长度都在50 mm左右<sup>[6,7]</sup>。将参量晶体置于抽运光谐振腔内,采用内腔光学参量产生(IOPG)的结构,可以通过利用内腔极高的抽运光功率密度来降低光参量过程的阈值和提高整个系统的转换效率,并有利于实现结构的紧凑化。

与另一种低阈值、高转换效率的光参量技术内腔光学参量振荡器(IOPO)相比,内腔光学参量产生具有以下优点:首先,内腔光学参量产生谐振腔只需要满足抽运光的振荡条件,没有信号光振荡的问题,因此谐振腔结构简单,易于光学调整;第二,内腔光学参量产生不需要考虑抽运光束与信号光束在参量晶体内的光斑模式匹配问题,这就大大降低了谐振腔的设计难度;第三,内腔光学参量产生对腔镜镀膜要求低,易于实现信号光在大范围内的调谐输出;另外,内腔光学参量产生输出的信号光是噪声在腔内一次放大产生的,不会像内腔光学参量振荡器一样形成多脉冲结构<sup>[8,9]</sup>。

我们曾报道过基于18.7 mm长的单周期极化铌酸锂(PPLN)晶体的内腔光学参量产生的实验结果,在Q开关重复频率为19 kHz时,阈值为1.3 W<sup>[10]</sup>。本文将给出采用20 mm长的多周期PPLN晶体的实验结果,同时给出了内腔光学参量产生的理论分析。

## 2 理论分析

### 2.1 光学参量产生阈值公式

可以把光学参量产生近似认为是从一个信号光噪声光子放大产生的,因此阈值公式可以表示为<sup>[11]</sup>

$$KI_{p,t} = \left[ \frac{1}{2l} \ln \left( \frac{4\lambda_s E_{s,t}}{hc} \right) \right]^2, \quad (1)$$

式中  $K = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2}{\epsilon_0 c \lambda_s \lambda_i n_s n_i n_p}$ ,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中的光速,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $d_{\text{eff}}$  为有效非线性系数,  $l$  为非线性晶体的长度,  $\lambda_s, \lambda_i$  分别为信号光和闲频光波长,  $n_p, n_s, n_i$  分别为抽运光、信号光、闲频光的折射率,  $E_{s,t}$  为达到阈值时的信号光单脉冲能量, 一般定义平均输出功率为1 mW时即达到光学参量产生的阈值,  $I_{p,t}$  为阈值时的抽运光功率密度。

### 2.2 调Q的速率方程

在内腔光学参量产生中,由于在阈值附近光学参量产生引起的1064 nm激光的非线性损耗很小,在计算时近似忽略不计,因此内腔调Q的速率方程可表示为<sup>[12]</sup>

$$\frac{dN}{dt} = R - \phi \sigma c N - \frac{N}{\tau}, \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \phi \sigma c N \frac{l_{\text{cr}}}{l_{\text{ca}}} - a(t)\phi, \quad (3)$$

$R$  为抽运速率,  $N$  为增益介质上能级集居数密度,  $\phi$  为腔内1064 nm光波的光子密度,  $\sigma$  为增益介质的受激发射界面,  $\tau$  为上能级寿命,  $l_{\text{cr}}$  为激光晶体长度,  $l_{\text{ca}}$  为谐振腔光学长度,  $a(t) = \alpha_0 + \alpha_Q$  为谐振腔的损耗参数,其中,  $\alpha_0 = -\frac{c}{2l_{\text{ca}}} \ln(1 - \delta)$ ,  $\delta$  为谐振腔往返损耗。假设声光Q开关是阶跃性变化,  $a(t)$  可表示为

$$a(t) = \begin{cases} \alpha_1, & 0 < t < t_c \\ 0, & t \geq t_c \end{cases}$$

$t_c$  为Q开关关闭的时刻。Q开关的衍射损耗为85%,则  $\alpha_1$  可表示为

$$\alpha_1 = -\frac{c}{l_{\text{ca}}} \ln(1 - 85\%).$$

### 2.3 准相位匹配调谐理论

在准相位匹配(QPM)技术中,一般选择晶体的极化方向和相互作用的三波偏振方向都沿晶体的  $z$  向,这样可以利用晶体最大的有效非线性系数  $d_{33}$ ,并避免三波在非线性晶体中的走离。为了实现光学参量过程的高效输出,必须满足动量守恒和能量守恒条件<sup>[1]</sup>

$$\begin{cases} \frac{n(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{n(\lambda_s, T)}{\lambda_s} - \frac{n(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{1}{\Lambda(T)} = 0 \\ \frac{1}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda_s} - \frac{1}{\lambda_i} = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中晶体温度  $T$  和极化周期  $\Lambda$  是两个可变参量。因此在抽运光波长一定的情况下,通过改变晶体温度和极化周期,就可以获得信号光波长的调谐输出。

### 3 实验装置

实验装置如图 1 所示。抽运源为 808 nm 光纤耦合输出的激光二极管(LD), 纤芯直径 400  $\mu\text{m}$ , 数值孔径 0.22。输出光束经过光学耦合系统(耦合效率 90%)准直聚焦后会聚成半径 150  $\mu\text{m}$  的抽运光斑注入到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体采用  $a$  轴切割, 尺寸为 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  8 mm, Nd<sup>3+</sup> 离子掺杂质量分数为 0.4%, 晶体左端镀 808 nm 高透及 1064 nm 高反的双色膜作为输入腔镜。实验采用三镜折叠腔结构,  $M_1, M_2$  为另外两个谐振腔镜。 $M_1$  是曲率半径为 200 mm 的凹镜, 仅镀有 1064 nm 波段全反膜, 镀膜时并没有考虑膜系在信号光波段的透射率情况, 实际测得的镜片在信号光波段的透射率曲线比较平坦, 透射率大约为 80%。腔镜  $M_2$  的曲率半径为 100 mm, 与  $M_1$  镀有相同的膜系。PPLN 晶体放在折叠腔的第二个腔臂束腰处, 1064 nm 抽运光在 PPLN 中心处的光斑半径约为 90  $\mu\text{m}$  (计算值)。腔镜材料为普通的 K9 玻璃, 对 3~4  $\mu\text{m}$  波段的闲频光高吸收。这样的腔镜镀膜条件对信号光和闲频光的损耗均  $>99\%$ , 满足光学参量产生的运转条件, 所产生的信号光从两个方向输出。谐振腔在 1064 nm 激光波长的往返损耗约为 2%。

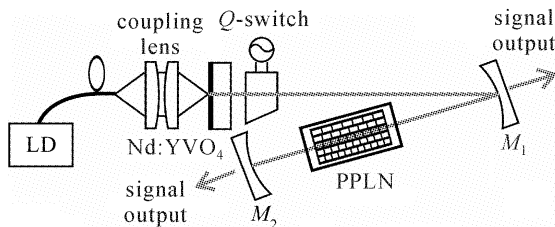


图 1 准相位匹配内腔光学参量产生的实验装置图

Fig. 1 QPM-IOPG experimental setup

PPLN 利用外加电场极化法制作, 片子上平行排列 26~29  $\mu\text{m}$  7 个周期(间隔 0.5  $\mu\text{m}$ ), 以下用  $\Lambda_i (i = 0 \sim 6)$  表示。由于 26  $\mu\text{m}$  位于晶体的边缘, 存在一定损坏, 因此实验中并没有用到这个周期。PPLN 尺寸为 20 mm  $\times$  5 mm  $\times$  1 mm, 晶体两端只进行了光学抛光, 并没有镀膜。晶体及温控系统置于一个可以横向移动的高精度调整架上。温控器的工作范围从室温到 250  $^{\circ}\text{C}$ , 温控精度为  $\pm 0.1$   $^{\circ}\text{C}$ 。实验中采用一阶准相位匹配, 1064 nm 抽运光、信号光和闲频光均沿晶体  $z$  向。声光 Q 开关的重复频率在 1~50 kHz 之间可调, 为了避免内腔功率密度过高对腔内元件的破坏, 实验中 Q 开关的重复频率设置大于 10 kHz。

### 4 实验结果与讨论

#### 4.1 阈值和输出功率

实验中声光 Q 开关重复频率设置为 19 kHz (占空比 50:3), PPLN 晶体温度固定在 140  $^{\circ}\text{C}$ 。极化周期为 29  $\mu\text{m}$  时, 内腔光参量产生的阈值仅为 0.93 W; 在 3 W 激光二极管抽运功率下, 获得了 140 mW 的信号光输出。极化周期为 26.5  $\mu\text{m}$  时, 内腔光参量产生的阈值升高到 1.36 W; 在 3 W 激光二极管抽运功率下, 获得了 105 mW 的信号光输出。不同极化周期下获得的信号光输出功率随激光二极管抽运功率的变化曲线如图 2 所示。从图中可以看出, 采用较短的极化周期会导致内腔光学参量产生阈值的升高和转换效率的下降。经分析, 这主要由以下几种原因造成: 1) (1) 式中阈值与  $\lambda_s \lambda_i$  的乘积成正比, 由于较短的极化周期对应输出的  $\lambda_s \lambda_i$  乘积值会变大, 这将导致阈值的升高; 2) 较短极化周期输出的闲频光波长较长, 在 PPLN 晶体内的吸收较大; 3) 实验中, 腔镜在短信号光波段的透射率略低, 影响了信号光功率的有效耦合输出。

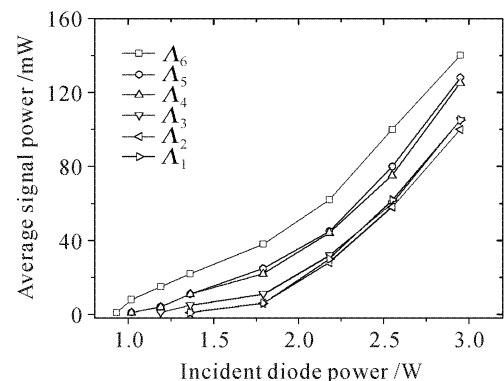


图 2 不同周期下输出的信号光平均功率随激光二极管抽运功率的变化曲线 ( $f = 19$  kHz)

Fig. 2 Average signal output power versus LD pump power for different grating periods ( $f = 19$  kHz)

以 29  $\mu\text{m}$  周期, 晶体温度 140  $^{\circ}\text{C}$  时为例, 计算了调 Q 的内腔峰值功率密度以及光学参量产生的阈值。信号光输出波长为 1501 nm,  $d_{\text{eff}} = 17$  pm/V, 根据 (1) 式计算可得阈值时的峰值功率密度为  $I_{\text{p,t}} = 288$  MW/cm<sup>2</sup>。根据 (2) 和 (3) 式, 在 0.93 W 输入功率下内腔的最大光子数密度为  $1.5 \times 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>, 由  $I = \phi h c^2 / \lambda_s$  可得腔内峰值功率密度为 84 MW/cm<sup>2</sup>。考虑到激光晶体与 PPLN 晶体处光斑半径的不同, 在 PPLN 晶体处的峰值功率密度应为 233 MW/cm<sup>2</sup>, 小于理论计算得到的光学参

量产生的阈值。这主要是由于腔镜  $M_2$  对信号光存在部分反射,使得反射的信号光波获得了二次放大,降低了光学参量产生的阈值。

#### 4.2 温度调谐特性

通过改变 PPLN 晶体的温度,并同时横向移动 PPLN 晶体使得不同的极化周期参与参量过程,可以获得信号光大范围的连续调谐输出。由于 PPLN 晶体在低温下具有非常明显的光折变效应,因此实验中晶体温度控制在  $100\text{ }^\circ\text{C}$  以上。图 3 是不同周期下输出的信号光波长随温度变化的曲线。实线是根据 PPLN 晶体温度依赖的折射率方程<sup>[13]</sup>利用(4)式计算得到的理论值,离散符号是用光纤光谱仪测得的实验值,实验中信号光波长的调谐范围为  $1384\sim 1541\text{ nm}$ 。可以看出,实验结果与理论计算非常一致。同时测量了在周期为  $29\text{ }\mu\text{m}$  时不同温度下内腔光学参量产生的输出功率,即输出功率随信号光波长的变化情况。当晶体温度高于  $140\text{ }^\circ\text{C}$  时,输出功率随晶体温度的变化起伏很小,在低于  $140\text{ }^\circ\text{C}$  时,输出功率下降较快,在晶体  $100\text{ }^\circ\text{C}$  时的输出功率几乎只有  $140\text{ }^\circ\text{C}$  时的三分之一。在其他周期下输出功率随温度变化的曲线大致相同。

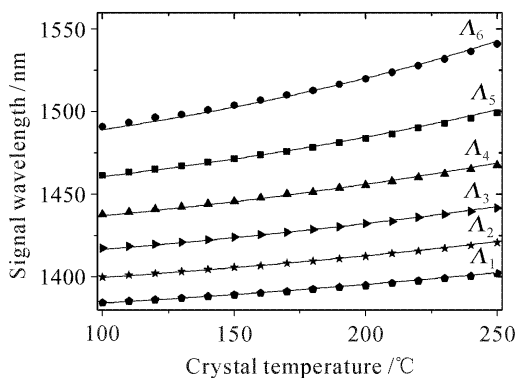


图 3 多周期 PPLN 准相位匹配内腔光学参量产生的温度调谐曲线

Fig. 3 QPM-IOPG signal output wavelengths as a function of the crystal temperature based on multi-grating PPLN

#### 4.3 不同重复频率下的输出功率

图 4 是激光二极管抽运功率  $3\text{ W}$  时,  $29\text{ }\mu\text{m}$  周期输出的信号光功率随  $Q$  开关重复频率的变化曲线。在  $10\sim 30\text{ kHz}$  范围内,输出的信号光强变化幅度较小;当重复频率大于  $30\text{ kHz}$  时,腔内  $1064\text{ nm}$  抽运光的峰值功率下降较快,导致光学参量产生的转换效率也随之大大降低。在其他周期下输出的信号光功率随  $Q$  开关重复频率的变化趋势大致相同。

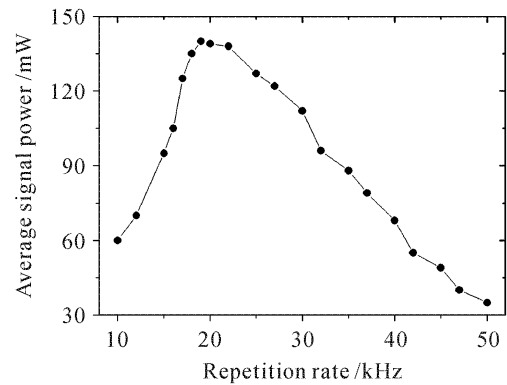


图 4 不同重复频率下的信号光输出功率  
Fig. 4 Signal output power versus the Q-switch repetition rate  
( $\Lambda = 29\text{ }\mu\text{m}$ ,  $P_{LD} = 3\text{ W}$ ,  $T = 140\text{ }^\circ\text{C}$ )

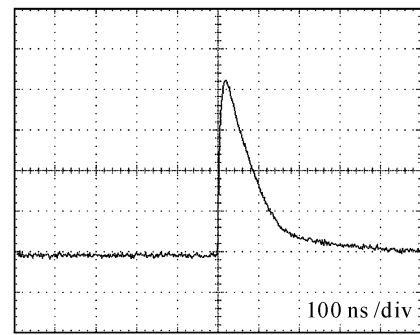


图 5  $1501\text{ nm}$  信号光波形图

Fig. 5 Signal pulse shape at  $1501\text{ nm}$

#### 4.4 信号光波形

图 5 是利用快速响应的 InGaAs 光电二极管和数字存储示波器记录的  $1501\text{ nm}$  信号光波形图,脉冲宽度约为  $80\text{ ns}$ 。虽然内腔光学参量产生的阈值较低,但在实验中并未观测到多脉冲产生的现象。

### 5 结 论

利用多周期 PPLN 晶体,实现了准相位匹配内腔光学参量产生在  $1384\sim 1541\text{ nm}$  范围内的调谐输出。在  $Q$  开关重复频率  $19\text{ kHz}$ ,极化周期  $29\text{ }\mu\text{m}$  时,准相位匹配内腔光学参量产生的阈值仅为  $0.93\text{ W}$ ,在  $3\text{ W}$  激光二极管抽运功率下,获得了  $140\text{ mW}$  信号光输出。实验中所用晶体长度仅为  $20\text{ mm}$ ,远小于一般外腔光学参量产生中所用的  $50\text{ mm}$  晶体长度。信号光脉冲宽度为  $80\text{ ns}$ ,实验中并未观测到信号光多脉冲情况的出现。

#### 参 考 文 献

- 1 Zhang Baigang, Yao Jianquan, Ding Xin *et al.*. Continuously tunable optical parametric oscillator based on multi-grating

- periodically poled lithium niobate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):897~902  
张百钢,姚建铨,丁欣等. 连续调谐输出的多周期极化铌酸锂晶体光学参量振荡器[J]. 中国激光, 2004, **31**(8):897~902
- 2 Zhang Kuanshou, Li Yongmin, Chen Yanli *et al.*. Low threshold quasi-phase-matched triply resonant optical parametric oscillator pumped by 1.06  $\mu\text{m}$  laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2):123~126  
张宽收,李永民,陈艳丽等. 1.06  $\mu\text{m}$  抽运的低阈值三共振准相位匹配光学参量振荡器[J]. 中国激光, 2002, **A29**(2):123~126
- 3 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
- 4 Liang Xiaoyan, Hou Wei, Lü Junhua *et al.*. Low threshold and wide tunable PPLN optical parametrical oscillator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):1~3  
梁晓燕,侯玮,吕军华等. 低阈值宽调谐 PPLN 光参量振荡[J]. 中国激光, 2002, **A29**(1):1~3
- 5 Tiel Zhang, Baigang Zhang, Haifeng Li *et al.*. A tunable optical parametric generator by using a quasi-phase-matched crystal with different wedge angles [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4):234~236
- 6 Baigang Zhang, Jianquan Yao, Xin Ding *et al.*. Low-threshold, high-efficiency, high-repetition-rate optical parametric generator based on periodically poled LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Chinese Physics*, 2004, **13**(3):364~368
- 7 Pu Zhao, Baigang Zhang, Enbang Li *et al.*. Experimental study on a high conversion efficiency, low threshold, high-repetition-rate periodically poled lithium niobate optical parametric generator [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(16):7224~7229
- 8 O. B. Jensen, T. Skettrup, O. B. Petersen *et al.*. Diode-pumped intracavity optical parametric oscillator in pulsed and continuous-wave operation [J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2002, **4**(2):190~193
- 9 Y. F. Chen, S. W. Chen, S. W. Tsai *et al.*. Output optimization of a high-repetition-rate diode-pumped Q-switched intracavity optical parametric oscillator at 1.57  $\mu\text{m}$  [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **77**(5):505~508
- 10 Ji Feng, Zhang Baigang, Li Enbang *et al.*. A low-pump-threshold high-repetition-rate intracavity optical parametric generator based on periodically poled lithium niobate [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(8):2113~2116
- 11 John J. Zayhowski. Periodically poled lithium niobate optical parametric amplifiers pumped by high-power passively Q-switched microchip lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(3):169~171
- 12 Yao Jianquan. Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tuning Technology [M]. Beijing: Science Press, 1995. 109~114  
姚建铨著. 非线性光学频率变换和激光调谐技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 109~114
- 13 D. H. Jundt. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction,  $n_e$ , in congruent lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20):1553~1555