

文章编号: 0253-2239(2006)04-0616-5

# 高性能 85 mm 短腔光学参变振荡器的 THz 电磁波输出特性分析\*

张显斌<sup>1</sup> 碓智文<sup>2</sup> 陈颖丽<sup>1</sup> 施 卫<sup>1</sup> 依藤弘昌<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西安理工大学应用物理系, 西安 710048  
<sup>2</sup> 日本理化学研究所光动力学研究中心, 仙台 日本)

**摘要:** 报道了以 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 为非线性光学介质, 采用 85 mm 长的法布里-珀罗单谐振腔结构形式的光学参变振荡器, 产生 THz 电磁波实验结果。使用波长为 1064 nm 的 Nd:YAG Q 开关脉冲激光器作为抽运光源, 通过改变入射角度使参变振荡器的相位匹配条件发生变化。采用 Si 真空量热器, 并利用 THz 波干涉测量仪; 或通过测量闲频光的频率对产生的 THz 波频率进行了测量。实验表明该参变振荡器输出频率调谐范围为 0.9~3.0 THz。在抽运光能量为 20 mJ/pulse, 脉冲宽度 16 ns, 重复频率 50 Hz 条件下得到输出峰值位于 1.2 THz, 能量为 102.5 pJ/pulse 的 THz 波输出。通过引入 Si 棱镜阵列减小了 THz 波在晶体中的全反射, 从而提高 THz 波的能量输出。使用金属缝隙探测器, 对辐射的 THz 波的波束水平方向空间分布进行了测量, 分析了 Si 棱镜阵列的衍射效应对 THz 波束空间分布的影响。

**关键词:** 非线性光学; THz 电磁波; 光参变振荡器; LiNbO<sub>3</sub>

中图分类号: O433.1 文献标识码: A

## Analysis of THz Electromagnetic Wave Output Character Based on High Performance 85mm Short Cavity Optical Parametric Oscillator

Zhang Xianbin<sup>1</sup> T. Ikari<sup>2</sup> Chen Yingli<sup>1</sup> Shi Wei<sup>1</sup> H. Ito<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Applied Physics, Xian University of Technology, Xian 710048)  
(<sup>2</sup> Photodynamics Research Center, RIKEN, Sendai, Japan)

**Abstracts:** The THz wave output with the 85 mm F-P single cavity optical parametric oscillator based on the MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal was reported. The Nd:YAG Q-switched laser with 1064 nm was used as the pump source, and the THz wave was tuned by changing the incident angle as well as the phase matching condition. THz wave frequency can be detected with the THz interferometer and the Si bolometer, or by detecting the idle light frequency. Experimental results indicate the THz wave is 0.9~3.0 THz tunable. The peak energy output is 102.5 pJ/pulse at 1.2 THz with the pump energy of 20 mJ/pulse, pulse width of 16 ns, repetition rate of 50 Hz. THz energy output was increased when a Si-prism array was introduced to decrease THz wave's total reflection at the interface of crystal. The THz wave beam pattern along the horizontal was measured with a metal-slit-detector. The influence of diffraction effect of the Si prism array on the THz wave beam spatial profile was discussed.

**Key words:** nonlinear optics; THz electromagnetic wave; optical parametric oscillator; LiNbO<sub>3</sub>

### 1 引 言

THz 波指频率从 0.1 THz 到 10 THz, 其波段位于微波频段和光频段之间的亚毫米电磁波。目前, 宽带 THz 电磁波产生技术研究开展的比较广

泛<sup>[1~5]</sup>, 方法是利用飞秒脉冲激光照射非线性光学晶体, 或者利用飞秒脉冲激光触发超快光电导开关<sup>[6~9]</sup>。这两种方法都可以产生脉冲宽度在亚皮秒量级的超短电磁脉冲, 其频谱可以从数十兆赫兹延

\* 国家自然科学基金(10390160, 10376025, 50477011)和陕西省教育厅专项基金(03JK068)资助课题。

作者简介: 张显斌(1969~), 男, 西安市人, 副教授, 主要从事超快光电子器件、激光与物质相互作用的教学及科研工作。

E-mail: wuli2@xaut.edu.cn

收稿日期: 2005-04-04; 收到修改稿日期: 2005-10-14

伸到数十太赫兹。这种宽带 THz 源可应用于 THz 时阈光谱和 THz 成像当中。然而,要观察高精细的 THz 频谱,以及在 THz 多谱成像等众多实验当中,同样需要窄线宽、频率连续可调、高功率辐射的 THz 发生源。使红外辐射的频率连续可调谐,通常的物理机理有:1)对荧光线条宽较大的材料实现在跃迁的线宽范围内调谐;2)借助外电场、温度或材料化学成份的改变等外来作用,使红外激光能级位置发生变化实现辐射频率调谐。然而这两种机理频率调谐范围有限,也很难将频率延伸到 THz 波段<sup>[10~12]</sup>。已经实现的可调谐的 THz 波源主要有两种:1)远红外自由电子激光(FIR-FEL)可以产生千瓦量级,0.89~4.76 THz 之间可调谐的 THz 波;2)P-Ge激光器都可以产生 1 W 左右,0.9~4.0 THz 之间可调谐 THz 波。但是前者体积庞大,造价昂贵,而后者则需要在液氮冷却的低温下工作。因此这两种可调谐 THz 源只是在世界少数几个专业实验室里应用于纯科学研究。利用非线性光学原理产生高强度高相干性远红外辐射,是拓宽远红外波谱范围的重要手段。Shen 等<sup>[13]</sup> 早先分别提出用非线性光学晶体产生亚毫米电磁波的理论;而日本理化学研究所的 Ito 实验室,1997 年实现了基于非线性 LiNbO<sub>3</sub> 光学参变振荡器结构的 THz 电磁波参变振荡器<sup>[14]</sup>。这种 THz 波源具有频率连续可调谐,窄线宽(高单色性)、高空间和时间相干性且能在室温下工作的特点。但其体积、能量转换效率、振荡阈值等技术指标还需要进一步优化。本文介绍了基于 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 材料的光学参变振荡器产生 THz 电磁波的过程;在实验中采用一种镀有高性能短波长滤光薄膜(SWPF)的腔反射镜,将 THz 电磁波参变振荡器的腔长,从原来 160 mm 缩短到 85 mm;报道了这种 85 mm 短腔长 THz 参变振荡器的实验结果。

## 2 原 理

非线性晶体当中的参变振荡过程,是产生强相干可调谐红外辐射的重要方法,也是本文实验中产生 THz 亚毫米电磁波的基本物理机理。如图 1 所示,当抽运激光束入射进入非线性光学晶体时,非线性晶体受到频率为  $\omega_p$  的激光抽运后,即可对频率  $\omega_s$  的信号场和频率为  $\omega_T$  的闲频场提供增益。如果将非线性光学介质放在谐振腔内,则形成典型的参变振荡器结构形式。光学参变振荡器的谐振腔可以同时信号场和闲频场共振,形成双腔振荡器

(DRO);也可以对其中一个频率的辐射场共振形成单振荡器(SRO)。在参量放大的增益超过损耗时,器件将达到振荡阈值实现对信号场或闲频场的振荡,而且此时输出的信号场和闲频场具有相干特性。一旦抽运激光超过阈值,参变振荡器便有效地把抽运激光辐射场转变为连续可调谐的信号光和闲频光辐射。从物理学角度讲,参变振荡器可实现由一个抽运光子带来两个光子的过程。按照习惯约定,一般把能量较高的光波称为信号光,另一束称为闲频光。然而由于在谐振腔当中建立起来的两个不同频率的光辐射,任何一个光波都可以称为信号光或者闲频光,因此在本文产生 THz 电磁波实验中,将参变振荡器辐射的 THz 波作为信号光,而把出射的能量较高的光波,且波长与抽运光波长接近的 1065~1080 nm 范围的光称为闲频光。

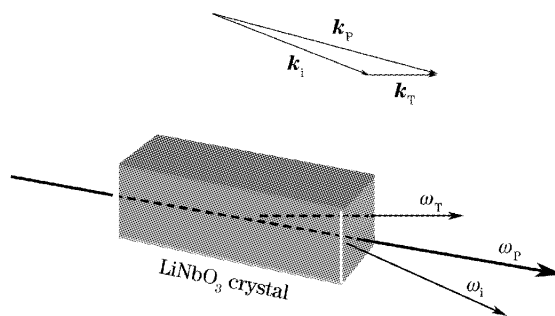


图 1 利用 LiNbO<sub>3</sub> 晶体产生 THz 波示意图

Fig. 1 Schematic of the THz wave generation by using LiNbO<sub>3</sub> crystal

由参变振荡器基本原理,对于长度为  $L$  的非线性介质,信号波的单程增益因子  $G_s$  表达式为

$$G_s = (\Gamma_0 L)^2 \text{sinc}^2 \left( \frac{\Delta k L}{2} \right) - \delta L, \quad (1)$$

式中函数  $\text{sinc} = \sin x/x$ ,  $\Delta k$  为相位失配大小,  $\Gamma_0$  为相位匹配( $\Delta k = 0$ )时增益系数,  $\delta$  为非线性晶体对信号波的损耗系数。

(1) 式表明在相位匹配条件下,即  $\Delta k = k_p - k_i - k_T = 0$  时,可以获得最大的参量增益和最小的谐振腔振荡阈值。利用双折射、磁光效应、介质波导和周期结构晶体(如 PPLN)可以实现共线相位匹配;而对于 LiNbO<sub>3</sub> 晶体也可以采用角度匹配的非共线相位匹配方式,即抽运光和产生的新光束以一定的角度在晶体中传播实现相位匹配。在角度相位匹配条件下应满足

$$\omega_p = \omega_i + \omega_T, \quad (2)$$

以及,

$$k_p = k_i + k_T, \quad (3)$$

其中  $\omega_T$  和  $k_T$  代表信号场,也即所产生的 THz 信号的频率和波矢。 $\omega_i$  和  $k_i$  代表闲频光频率和波矢。而(2)式和(3)式也表明在参量转换当中必须满足能量守恒和动量守恒(相位匹配)。由图 1 当中的  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_T$  三个波矢构成的矢量三角形可以看到,改变抽运激光与闲频光束之间的夹角,相位匹配条件相应发生变化,而 THz 电磁波的频率同时改变,从而实现 THz 电磁波的频率调谐。光学参变振荡器理论表明,选用双谐振腔或者三谐振腔结构可以获得较低的振荡阈值,因此可以使用低功率的抽运激光器。然而双谐振腔或三谐振腔的缺点之一是限制了 THz 波的频率调谐范围,因为在谐振腔调谐过程中有超过一个以上的频率要与谐振腔的腔长频率保持一致,使得调谐范围受到限制;其次多腔结构也使得 THz 波产生器件的结构变得复杂。本文实验中采用的是由两平面高反射镜组成的法布里-珀罗单腔谐振腔结构,且仅对闲频光进行谐振。虽然单腔结构与双腔结构相比有较大的振荡阈值,但是却保留了较宽的 THz 波频率调谐范围和结构简单的重要特性。这种建立在光学参变振荡器结构基础上的 THz 波产生器件,可以实现产生高功率、窄线宽、可调谐的相干 THz 亚毫米电磁波。

### 3 实验和分析

图 2 为实验结构示意图。非线性光学介质使用 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体(长 65 mm),其中 MgO 掺杂的摩尔分数为 5.0%,以减小由于光折变效应带来的输出功率降低;抽运激光器为 LOTIS TII LS-2136 型 Nd:YAG Q-switch 脉冲激光器,输出波长为 1064 nm,其典型输出能量为 140 mJ,脉冲宽度 16 ns,重复频率 50 Hz。 $M_1$  和  $M_2$  为相互平行的高反射镜,形成法布里-珀罗谐振腔。抽运激光束经半波片 H、极化分束片 PBS 后成为能量输出可调的偏

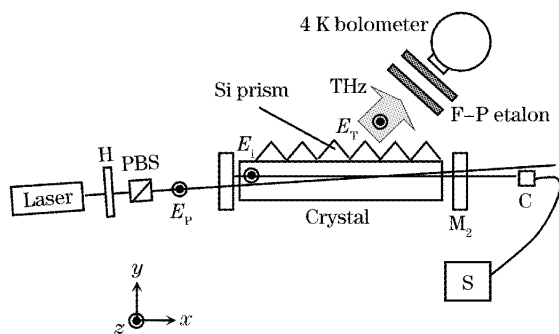


图 2 THz 波参变振荡器实验结构  
Fig. 2 Setup of THz parametric oscillator

振光,然后进入谐振腔中。精确调整谐振腔反射镜确保闲频光光束形成谐振。输出的 THz 波方向如图 2 中所示。抽运激光、闲频光以及 THz 波的极化方向  $E_p$ 、 $E_i$ 、 $E_T$  沿 Z 轴方向。

为了探测 THz 波的频率和波长,将输出的 THz 波束经过由聚氯乙烯树脂一次成型的 THz 透镜后,输入由两片平面金属丝网形成的法布里-珀罗干涉测量准具当中。标准具后方放置一由液氮冷却到 4K 的真空量热器(Infrared Laboratories, HDD-5),将 THz 信号能量转变为电信号最终送入示波器。当通过图形化编程平台(Labview)程序精确改变两金属丝网距离时,由标准具输出的 THz 波强度将发生周期性变化。通过分析自动记录并描绘标准具输出的 THz 波强度随距离变化的关系曲线,可以得到 THz 波的波长和频率信息。实验中由于抽运光频率不变且已知,因此也可以通过测量闲频光的波长,利用(2)式间接测量 THz 波的波长和频率。

实验当中应确保闲频光在谐振腔中建立谐振,而抽运激光从  $M_2$  透射穿过谐振腔。测试发现如果形成抽运激光在腔内的多次来回反射甚至谐振,非线性晶体极容易在瞬间形成端面或者晶体内部的损伤,甚至碎裂。解决的方法是在  $M_1$  和  $M_2$  反射镜形成谐振腔的反射面上镀一种特殊的短波长滤光薄膜(SWPF)以确保当抽运激光束和闲频光束同时入射反射镜时,只有闲频光束可以在  $M_1$  和  $M_2$  产生高反射(99.0%),而抽运激光大部分透射出谐振腔。从  $M_2$  透射的部分闲频光经过光纤接头耦合进入光纤后输入光频谱仪 S(ADVANTEST Q8381A)。

MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体在 THz 频段的折射率很高( $n_T > 5.0$ ),因此在晶体内部产生的 THz 波很容易在晶体和空气的界面上形成多次全反射,最终被 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体大部分吸收。Si 对 THz 波折射率为 3.4,因此在实验当中采用了一组 Si 棱镜阵列紧靠于 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体发射面(如图 2),棱镜的角度设计成(90°,40°,50°)以确保 THz 波几乎垂直地从 Si 棱镜发射面出射,由于消除了 THz 波在晶体界面处的全反射,测试表明输出功率比没有采用 Si 耦合输出之前提高 6 倍以上。

光学参变振荡器的显著特点之一是其输出频率可以在一定范围内连续地改变。实验当中将 THz 参变振荡器整体安置固定于一精密可转动平台上,由微机控制系统实现平台的转动以精确改变激光入射角度,实现对 THz 频率的调谐。用光频谱仪测量并记录闲频光波长随入射角度的改变。图 3 表明当

抽运激光的入射角度在  $0.5^\circ$  到  $3.0^\circ$  之间变化时, 闲频光变化范围为  $1066.5 \sim 1075.5$  nm 之间变化。图 4 为抽运激光能量为 20 mJ 下的 THz 波的输出特性, 可以看出其频率调谐范围为  $0.9 \sim 3.0$  THz, 在 1.2 THz 测得峰值能量为 102.5 pJ/pulse, 而 pJ 量级的 THz 电磁波强度已经可以在 THz 频谱以及 THz 多谱成像等众多研究中得到应用。

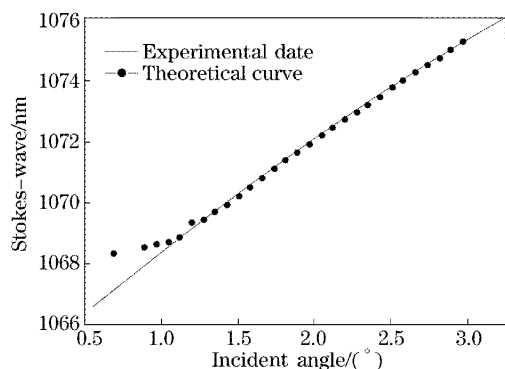


图 3 闲频光波长随抽运激光入射角度变化曲线  
Fig. 3 Measured idle light wavelength as a function of pump beam incidence angle

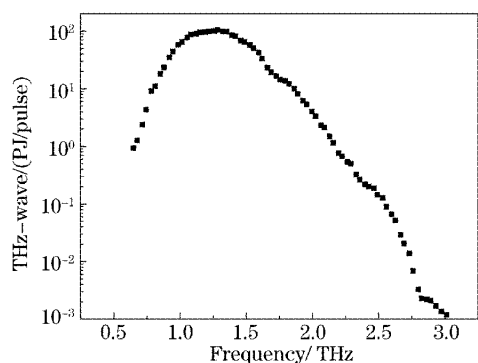


图 4 THz 波的频率调谐范围从  $0.7 \sim 3.0$  THz, 在 1.2 THz 处的峰值能量超过 100 pJ/pulse

Fig. 4 The THz-wave was  $0.7 \sim 3.0$  THz tunable, with the peak energy output great than 100 pJ/pulse at 1.2 THz

表 1 为原先 160mm 腔长的单腔振荡器输出特性和采用短波长滤光薄膜(SWPF)后实现的 85 mm 短腔振荡器输出特性的比较, 可以看到后者的输出

表 1

Table 1 Output character of 160 mm cavity and 85 mm cavity

Single cavity length /mm	160	85
Oscillation threshold /(mJ/pulse)	23.8	18.5
Tuning range /THz	$0.5 \sim 2.4$	$0.9 \sim 3.0$
Peak output /(pJ/pulse)	51.0	102.5
Line width /GHz	100	109

特性有了极大的改善。

在 THz 透射成像应用中, THz 波的波束空间分布特性将影响成像系统的分辨力。因此实验中利用开有一缝隙宽度为 0.5 mm 的金属缝隙探测器对辐射出的 THz 波的波束空间分布进行了测量。将该金属缝隙置于 Si 棱镜阵列后方, 精确调整真空量热器的探测角度, 以保证从缝隙穿过的 THz 波完全被接收到。在图形化编程平台上利用程序控制金属缝隙在水平方向(横向)移动, 对 THz 波束的横向空间分布进行扫描, 并自动记录相对强度。图 5 为在距离 Si 棱镜阵列 20 mm 处, THz 波在水平方向的空间分布情况, 可以看到波形的横行宽度在 45 mm 以上, 并且呈现明显的衍射条纹状不均匀分布特性。利用激光光束分析仪(Laser-eye)系统同时观测抽运激光束和闲频光光束的空间分布, 都为典型的 TEM<sub>00</sub> 模高斯光束, 这说明衍射状不均匀分布性不是来自于抽运光的原因。为了分析 Si 棱镜阵列对 THz 波束空间分布的影响, 在没有加装 Si 棱镜阵列的情况下, 测量由 LiNbO<sub>3</sub> 晶体 y 表面直接辐射的 THz 电磁波, 在相同的条件下没有出现衍射状非高斯分布特点, 观测到 THz 波的空间分布成类高斯分布。但是 THz 波总体强度与加 Si 棱镜阵列情况下相比减弱到亚皮焦量级。这表明虽然增加 Si 棱镜阵列可以明显地增加 THz 波输出能量, 但是棱镜阵列也不可避免的带来衍射效应, 从而破坏了 THz 波的高斯空间分布。在利用 THz 波研究大分子物质的 THz 频段光谱试验当中, 对 THz 波束的空间分布并没有严格的要求, 但是在进行 THz 成像试验时, 这种衍射状非高斯分布波束将降低 THz 成像的分辨力。因此今后将进一步通过改变目前的 THz 参变振荡器结构实现高斯分布的 THz 波输出。

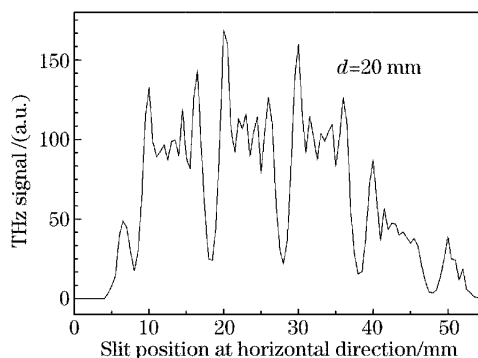


图 5 THz 波束沿水平方向空间分布曲线

Fig. 5 Detected THz wave beam pattern along the horizontal

## 4 结 论

以非线性光学晶体  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  为介质,采用光学参变振荡器结构,通过引入高性能腔反射镜技术实现了一种可以在室温下工作的 85mm 短腔 THz 波参变振荡器。通过改变相位匹配条件实现对 THz 波频率的连续调谐。利用 Nd:YAG Q 开关脉冲激光器作为抽运光源,在波长为 1064 nm,能量为 20 mJ,脉冲宽度 16 ns,重复频率 50 Hz 条件下得到频率连续调谐范围在 0.9~3.0 THz,而峰值能量为 102.5 PJ/pulse,峰值输出位置在 1.2 THz 附近的结果。实验还表明,通过增加 Si 棱镜阵列,可以明显地降低 THz 波在晶体表面的全反射,从而提高能量输出特性,但是也不可避免地由于 Si 棱镜带来的衍射效应,造成 THz 波束在横向的衍射状非高斯空间分布性。

**致谢** 作者感谢日本东北大学电气通信研究所 C. Takyu, T. Shoji 先生在晶体加工中给予的技术支持;第一作者感谢西安理工大学余宁梅教授对研究工作提供的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Kai Liu, Jingzhou Xu, X. C. Zhang. GaSe crystals for broadband terahertz wave detection[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(6): 863~865
- 2 S. Wang, X. C. Zhang. Pulsed terahertz tomography[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2004, **37**: R1~R36
- 3 K. Suto, J. Nishizawa. Widely frequency-tunable terahertz wave generation and spectroscopic application[C]. 2004 *Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics*, 2004. PLTU. 2: 63~64
- 4 D. S. Citrin. Terahertz nonlinearities in semiconductor quantum wells[C]. 2004 *Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics*, 2004. PLF. 1: 73~74
- 5 Liying Lang, Qirong Xing, Shuxin Li *et al.*. Experimental study on terahertz radiation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(11): 677~679
- 6 Shi Wei, Zhang Xianbin, Jia Wanli *et al.*. Investigation on terahertz generation with GaAs photoconductor triggered by femto-second laser pulse[J]. *Chin. J. Semiconductors*, 2004, **25**(12): 1672~1675 (in Chinese)
- 7 施 卫,张显斌,贾婉丽等. 用飞秒激光触发 GaAs 光电导体产生 THz 电磁波的研究[J]. *半导体学报*, 2004, **25**(12): 1672~1675
- 8 Sun Jinhai, Zhao Guozhong, Zhang Liangliang *et al.*. Effect of applied electrical and magnetic field on THz radiation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 192~195 (in Chinese)
- 9 孙金海,赵国忠,张亮亮等. 外加电场和磁场对太赫兹辐射产生的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 192~195
- 10 P. Y. Han, X. G. Huang, X. C. Zhang. Direct characterization of terahertz radiation from the dynamics of the semiconductor surface field[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(18): 2864~2866
- 11 J. N. Heyman, P. Neocleous, D. Hebert. Terahertz emission from GaAs and InAs in a magnetic field[J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **64**(8): 085202-1~085202-7
- 12 Xia Haiping, Wang Jinhao, Zhang Jianli *et al.*. Effect of ZnO on the character and optical properties of Eu:LiNbO<sub>3</sub> crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1087~1090 (in Chinese)
- 13 夏海平,王金浩,章践立等. ZnO 对 Eu:LiNbO<sub>3</sub> 晶体的性能及光谱性质影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1087~1090
- 14 Lü Wei, Yu Yizhong, Ding Xin *et al.*. Wide range temperature tunable MgO:LiNbO<sub>3</sub> optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 440~443 (in Chinese)
- 15 吕 卫,于意仲,丁 欣等. 宽波段温度调谐 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 光学参变振荡器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(4): 440~443
- 16 Zhao Chaoying, Tan Weihai. Quantum fluctuation of the nonlinear degenerate optical parametric amplification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1136~1142 (in Chinese)
- 17 赵超樱,谭维翰. 非线性简并光学参变放大系统的量子起伏[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1136~1142
- 18 Y. R. Shen. *Nonlinear Infrared Generation* [M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1977. 2~272
- 19 Kodo Kawase, Manabu Sato, Tetsuo Taniuchi *et al.*. Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO<sub>3</sub> with monolithic grating coupler[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(18): 2483~2485