

基于环形腔结构的种子注入式太赫兹参量振荡器

李 圆¹, 张行愚¹, 丛振华¹, 秦增光¹, 陈晓寒¹, 刘兆军¹, 卢建仁¹, 高飞龙¹, 臧 婕¹,
吴 东¹, 贾晨阳¹, 焦 月¹, 张少军²

¹ 山东大学信息科学与工程学院山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 济南 250100;

² 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100

摘要 报道了一种基于环形腔结构的种子注入式太赫兹参量振荡器的运转特性, 非线性晶体为 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$, 太赫兹波采用垂直表面耦合的输出方式, 斯托克斯环形腔由 3 个腔镜和 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体的全反射面构成。抽运源为调 Q 脉冲激光器, 其输出波长为 1064.2 nm, 脉冲宽度为 7.5 ns。当抽运脉冲能量为 105.5 mJ、斯托克斯光输出镜的透过率为 20.1% 时, 获得的太赫兹波脉冲能量使得示波器的输出电压为 3.3 V, 对应的斯托克斯光脉冲能量为 16.1 mJ, 抽运脉冲能量阈值约为 10 mJ。在相同的抽运条件下, 将基于环形腔结构的种子注入式太赫兹参量振荡器、种子注入式太赫兹参量产生器与环形腔结构的无种子注入式太赫兹参量振荡器的输出能量和抽运脉冲能量阈值进行比较。结果表明, 基于环形腔结构的种子注入式太赫兹参量振荡器具有较高的输出能量及较低的抽运脉冲能量阈值, 当抽运脉冲能量较小时, 其在输出能量方面的优势更明显。

关键词 非线性光学; 参量过程; 固体激光器; 太赫兹

中图分类号 O437.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1014001

Injection-Seeded Terahertz Parametric Oscillator Based on Ring-Cavity Configuration

Li Yuan¹, Zhang Xingyu¹, Cong Zhenhua¹, Qin Zengguang¹, Chen Xiaohan¹,
Liu Zhaojun¹, Lu Jianren¹, Gao Feilong¹, Zang Jie¹, Wu Dong¹, Jia Chenyang¹,
Jiao Yue¹, Zhang Shaojun²

¹ Key Laboratory for Laser Technologies and Applications, School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China;

² State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract Operation characteristics of an injection-seeded terahertz parametric oscillator based on ring-cavity configuration are reported. The nonlinear crystal used in the experiment is $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$. The terahertz wave is emitted perpendicularly to the output surface. The Stokes ring-cavity is constituted by three mirrors and total reflection surface of $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ crystal. The pumping source is a Q-switched laser, whose output wavelength is 1064.2 nm and pulse width is 7.5 ns. When the pumping pulse energy is 105.5 mJ and the transmittance of the Stokes wave output coupler is 20.1%, the maximum terahertz pulse energy output leads to the output voltage of 3.3 V, and the corresponding Stokes pulse energy is 16.1 mJ and the pumping energy threshold is about 10 mJ. Under the same pumping conditions, the output energy and pumping pulse energy threshold of the injection-seeded terahertz parametric oscillator based on ring-cavity configuration and injection-seeded terahertz parametric generator

收稿日期: 2017-04-21; **收到修改稿日期:** 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(61475086, 61475087)、山东省自然科学基金(ZR2014FM024)、山东大学自主创新项目(2015JC041)

作者简介: 李 圆(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与非线性光学方面的研究。E-mail: 17862977651@163.com

导师简介: 张行愚(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光与非线性光学方面的研究。

E-mail: xyz@sdu.edu.cn(通信联系人)

are compared with that of a ring-cavity terahertz parametric oscillator without seed injection. The results show that the injection-seeded ring-cavity terahertz parametric oscillator based on ring-cavity configuration has higher output energy and lower pumping energy threshold, and the oscillator has more obvious advantage in energy output when the pumping energy is smaller.

Key words nonlinear optics; parametric process; solid-state laser; terahertz

OCIS codes 190.4410; 130.3730; 040.2235; 140.3580

1 引 言

太赫兹波是处于微波与红外光波之间的电磁辐射波,在无损检测、成像、环境监测、通信和国防安全等领域具有广阔的应用前景^[1-2]。太赫兹波技术的应用与发展离不开太赫兹辐射源,太赫兹参量源是重要的太赫兹辐射源之一,具有诸多优点,如高峰值功率、可连续调谐、时间和空间相干性好、结构简单、易于操作等。

太赫兹参量源的物理基础是非线性晶体的受激电磁耦子散射^[3-5],在受激电磁耦子散射过程中,一个抽运光子转化为一个斯托克斯光子和一个太赫兹光子,斯托克斯光子和太赫兹光子满足能量守恒($h\omega_p = h\omega_s + h\omega_T$)和动量守恒($k_p = k_s + k_T$),其中的 h 为普朗克常量, ω_p 、 ω_s 、 ω_T 分别为抽运光、斯托克斯光和太赫兹波的角频率, k_p 、 k_s 、 k_T 分别为抽运光、斯托克斯光和太赫兹波的波矢。由于晶体对太赫兹波的折射率很高,因此只能实现非共线相位匹配。

太赫兹参量源包括太赫兹参量产生器(TPG)与太赫兹参量振荡器(TPO)。太赫兹参量产生器将激光器作为抽运源直接单向抽运非线性晶体,由于有多个频率不同的斯托克斯光子和太赫兹光子满足能量守恒和动量守恒条件,因此太赫兹参量产生器的太赫兹波频带宽度较大^[6-8]。种子注入的太赫兹参量产生器根据太赫兹参量过程中抽运光、斯托克斯光和太赫兹波三者之间的非共线相位匹配关系,以对应的相位匹配角度注入一定功率的斯托克斯光,从而对该频率的斯托克斯光进行放大,同时产生太赫兹波。相比无种子注入的太赫兹参量产生器,种子注入的太赫兹参量产生器是产生高能量太赫兹参量源的有效方案^[9-10]。

太赫兹参量振荡器使某个满足能量守恒和动量守恒条件的斯托克斯光在谐振腔内振荡并迅速增大,同时产生相应的太赫兹波。斯托克斯光的谐振腔可以是两镜谐振腔,也可以是由 3 个或者 3 个以上腔镜构成的环形腔^[11-16]。太赫兹参量振荡器也可以实现斯托克斯种子光注入,Imai 等^[17]利用两镜谐振腔成功实现了种子注入式的太赫兹参量振荡器。Walsh 等^[18]通过准连续的激光二极管(LD)激光器抽运与单频的连续激光器注入,实现了腔内的种子注入式太赫兹参量振荡器,该振荡器具有阈值低、效率高和能量高的优点。

基于环形腔结构的种子注入式太赫兹参量振荡器具有诸多优点,如:斯托克斯光在环形腔内的单向传输使得注入的斯托克斯光与输出的斯托克斯光不在一个方向上,避免放大的斯托克斯光进入种子光激光器,破坏种子光激光器。由于抽运激光是单向通过非线性晶体,斯托克斯光在环形腔内单向传输时不影响三波之间的非线性相互作用,但减小了腔内抽运光和斯托克斯光的总强度,因而避免了对非线性晶体的损伤。但到目前为止,未见基于环形腔结构的种子注入式太赫兹参量振荡器的报道。

本文报道一种基于环形腔结构的种子注入式太赫兹参量振荡器的运转特性,非线性晶体为 MgO:LiNbO₃,太赫兹波的输出方式为垂直表面耦合输出^[19-20],斯托克斯环形腔由 3 个腔镜及 MgO:LiNbO₃ 晶体的全反射面构成,相当于四腔镜环形腔。抽运源为 1064.2 nm 的调 Q 激光器。晶体的最大抽运输入能量为 105.5 mJ,在此能量下晶体不会受到任何损伤。同批次的 MgO:LiNbO₃ 晶体在传统太赫兹参量振荡器中的最大抽运输入能量为 85.3 mJ。实验结果表明,当抽运脉冲能量为 105.5 mJ、斯托克斯光输出镜透过率为 20.1% 时,获得的太赫兹波脉冲使得高莱探测器在示波器上的输出电压为 3.3 V,对应的斯托克斯光脉冲输出能量为 16.1 mJ,太赫兹参量源的抽运脉冲能量阈值约为 10 mJ。当相同结构的太赫兹参量振荡器未采用种子注入时,输出的太赫兹脉冲对应的电压为 2.8 V,相应的斯托克斯光脉冲输出能量为 9.9 mJ,抽运脉冲能量阈值约为 20 mJ。在同样的抽运脉冲能量下,种子注入式太赫兹参量产生器输出的太赫兹脉冲对应的电压为 1.8 V,相应的斯托克斯光脉冲能量为 19.9 mJ,抽运脉冲能量阈值约为 20 mJ。

2 实验装置

实验装置图如图 1 所示,抽运源为多纵模调 Q 的 Nd:YAG 激光器,输出波长为 1064.2 nm,脉冲宽度为

7.5 ns, 重复频率为 1 Hz, 经过光阑后的光束直径为 3.5 mm。利用 2 个半波片($\lambda/2$)和 1 个布儒斯特片(BW)的组合可以控制抽运光的输出能量与偏振态, 保证抽运光的偏振态平行于非线性晶体的 z 轴。种子光为 1070.6 nm 的单纵模连续激光器, 输出功率为 10~3000 mW。本实验中注入的种子光功率为 260.0 mW(透过 M3 后的功率)。望远镜系统对光束的扩束比为 1:2.5, 通过使用望远镜系统来增大种子光的光斑直径, 使种子光的光斑直径略大于抽运光的直径, 以增加抽运光与斯托克斯光非线性作用的体积。M1、M2、M4 与 M5 镀有在 1060~1100 nm 波段范围内的高反膜, M3 选取了斯托克斯光波长为 1070.6 nm、透过率分别为 20.1%、35.2%、49.7% 的镜片。M3、M4、M5 与非线性晶体的全反射面组成了斯托克斯光环形腔, 斯托克斯光谐振腔的腔长为 450 mm。非线性晶体、环形腔及 M2 固定在电动旋转台上, 通过电动旋转台来实现抽运光与斯托克斯光之间角度的调节。由于抽运光与斯托克斯光的夹角很小, 抽运光光斑尺寸较大, 为了更好地将两者分开, 抽运光在 M4 上进行了反射。从图 1 可以看出, 通过 M3 注入的斯托克斯光与在腔内放大后经过 M3 输出的斯托克斯光不在一个方向上, 二者之间的夹角约为 45° , 这样可以避免放大的斯托克斯光进入种子光激光器, 避免对种子光激光器造成破坏。

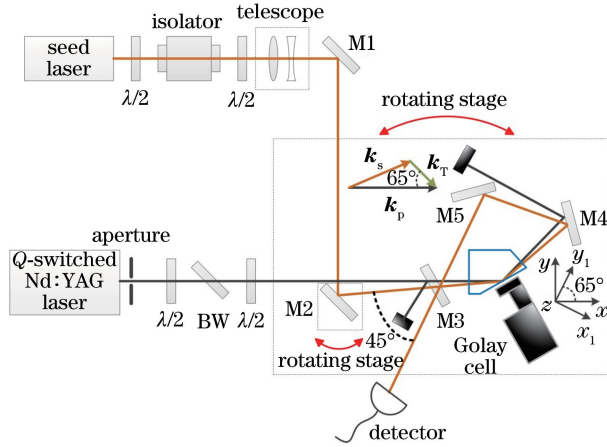


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

实验中, 选用 MgO 掺杂质量分数为 5% 的 LiNbO_3 晶体作为非线性晶体。根据非共线相位匹配条件, 晶体尺寸如图 2 所示, 晶体为五边形, 斜边与入射面以及斜边与出射面的夹角都为 65° , 这样的设计既保证了抽运光与斯托克斯光在斜边全反射, 又保证了太赫兹波垂直于晶体表面输出。晶体的入射面宽度为 45 mm, 底边宽为 44 mm, 沿 z 轴的厚度为 10 mm。抽运光垂直于晶体入射面 (y - z 面) 入射, 在发生全反射以前沿着 x 轴传播, 斯托克斯光与抽运光在晶体外的夹角约为 1.5° (实验过程中自 1.5° 调节至最佳角度)。晶体的入射面与出射面均镀有波长在 1060~1100 nm 范围内的高透膜。

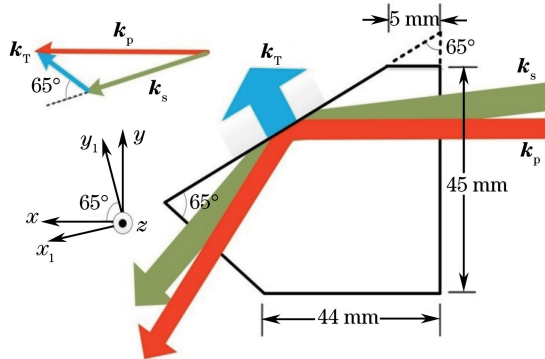


图 2 非线性晶体形状示意图

Fig. 2 Schematic of nonlinear crystal shape

3 实验结果与讨论

为了观察不同透过率输出镜对输出太赫兹脉冲能量的影响,选取 3 种斯托克斯光波长为 1070.6 nm、透过率(T)分别为 20.1%、35.2%、49.7%的镜片进行实验。图 3 和图 4 分别给出不同透过率下太赫兹脉冲能量与斯托克斯光脉冲能量随抽运脉冲能量的变化曲线。太赫兹脉冲能量用高莱探测器-示波器系统的电压表示,由于已报道高莱探测器的脉冲灵敏度(脉冲能量与电压之比)存在一些差异^[21-22],用相应的电压表示太赫兹脉冲能量不会影响不同结构、不同运转条件下输出能量的比较。在传统的双镜太赫兹参量振荡器中,斯托克斯光在腔内来回往返,由于抽运光是单向传播的,所以抽运光只与一个方向的斯托克斯光发生相互作用。在本实验中,斯托克斯光在环形腔内单向传播,与同方向传播的抽运光发生相互作用,其相互作用面积不比传统双镜太赫兹参量振荡器中的少,但腔内抽运光和斯托克斯光的总强度比传统双镜太赫兹参量振荡器中的小一些,可以避免对非线性晶体的损伤。本实验中最大抽运脉冲能量为 105.5 mJ,在此能量下,晶体没有任何损伤。同批次 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体在传统双镜太赫兹参量振荡器中的最大抽运输入能量为 85.3 mJ。由图 3 和图 4 可知,在斯托克斯输出镜透过率分别为 49.7%、35.2%、20.1%时,出现太赫兹波的阈值抽运脉冲能量分别约为 20, 15, 10 mJ。当抽运脉冲能量为 105.5 mJ 时,输出太赫兹脉冲能量对应的电压分别为 2.8, 3.1, 3.3 V, 输出斯托克斯光脉冲能量分别为 32.6, 24.9, 16.1 mJ。随着抽运脉冲能量增大,输出的太赫兹脉冲能量与斯托克斯光脉冲能量不断增大,没有出现饱和现象。

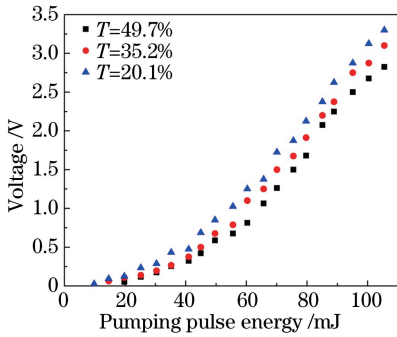


图 3 输出太赫兹脉冲能量对应的电压随抽运脉冲能量的变化
Fig. 3 Variation in voltage corresponding to terahertz pulse energy output with pumping pulse energy

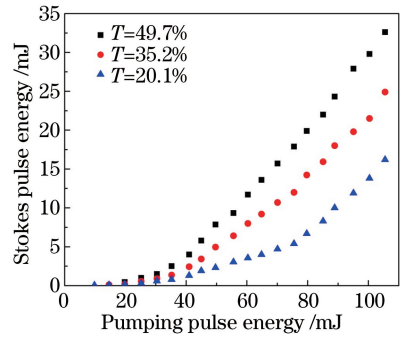


图 4 输出斯托克斯光脉冲能量随抽运脉冲能量的变化
Fig. 4 Variation in Stokes pulse energy output with pumping pulse energy

在相同的抽运条件下,对比了基于环形腔结构的种子注入式太赫兹参量振荡器(种子注入式 TPO)、种子注入式太赫兹参量产生器(种子注入式 TPG)及环形腔结构的无种子注入式太赫兹参量振荡器(TPO)的输出脉冲指标。图 5 和图 6 分别给出 3 种太赫兹参量源的太赫兹脉冲能量与斯托克斯光脉冲能量随抽运脉冲能量的变化曲线。种子注入式 TPO 与种子注入式 TPG 都注入了相同功率的种子光,均为 260 mW (通过 M3 后的功率),斯托克斯光输出镜透过率为 20.1%。从图 5 和图 6 可以看出:种子注入式 TPG 与 TPO 的抽运脉冲能量阈值均约为 20 mJ;当抽运脉冲能量为 105.5 mJ 时,种子注入式 TPG 与 TPO 输出的太赫兹脉冲能量对应的电压分别为 1.8, 2.8 V(能量之比约为 1:1.6),对应的斯托克斯光脉冲能量分别为 20.1, 9.9 mJ;当抽运脉冲能量为 75.5 mJ 时,种子注入式 TPG 与 TPO 输出的太赫兹脉冲能量对应的电压分别为 0.7, 1.5 V(能量之比约为 1:2.1);当抽运脉冲能量为 35.2 mJ 时,种子注入式 TPG 与 TPO 输出的太赫兹脉冲能量对应的电压分别为 0.1, 0.2 V(能量之比约为 1:2)。由于种子注入式 TPG 没有谐振腔,产生的斯托克斯光完全出射,因此它输出的斯托克斯脉冲能量较大。

TPO 与种子注入式 TPO 的抽运脉冲能量阈值分别约为 20, 10 mJ。当抽运脉冲能量为 105.5 mJ 时, TPO 与种子注入式 TPO 输出太赫兹脉冲能量对应的电压分别为 2.8, 3.3 V(能量之比为 1.6:1.8),对应的斯托克斯光脉冲能量分别为 9.9, 16.1 mJ;当抽运脉冲能量为 75.5 mJ 时, TPO 与种子注入式 TPO 输出的太赫兹脉冲能量对应的电压分别为 1.5, 1.9 V(能量之比为 2.1:2.7);当抽运脉冲能量为 35.2 mJ 时, TPO 与种子注入式 TPO 输出的太赫兹脉冲能量对应的电压分别为 0.2, 0.4 V(能量之比为 2:4)。

通过 3 种结构的两两比较可知,种子注入式 TPO 具有输出能量高及抽运脉冲能量阈值低的优势,而且

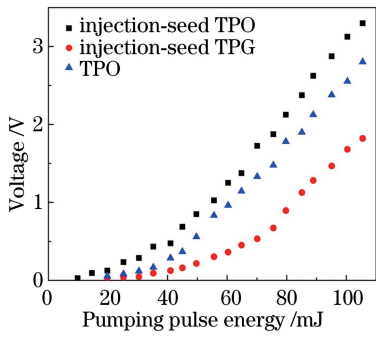


图 5 种子注入式 TPO、TPO 和种子注入式 TPG 输出太赫兹脉冲能量对应的电压随抽运脉冲能量的变化

Fig. 5 Variations in voltage corresponding to terahertz pulse energy output with pumping pulse energy for injection-seeded TPO, TPO and injection-seeded TPG

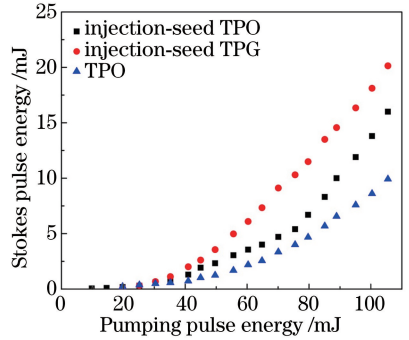


图 6 种子注入式 TPO、TPO、种子注入式 TPG 输出斯托克斯脉冲能量随抽运脉冲能量的变化

Fig. 6 Variations in Stokes pulse energy with pumping pulse energy for injection-seeded TPO, TPO and injection-seeded TPG

在抽运脉冲能量较低的情况下,比另外 2 种太赫兹参量源具有更高的输出能量。

在谐振腔输出镜透过率为 20.1%,抽运脉冲能量为 105.5 mJ,输出太赫兹脉冲能量对应的电压为 3.3 V 的情况下,测得的原始抽运光、剩余抽运光和斯托克斯光的脉冲波形如图 7 所示。由图 7 可知,与原始抽运光相比,剩余抽运光的消耗和斯托克斯光的产生在原始抽运光的后半部分尤为明显。主要原因是产生的斯托克斯光经过环形腔的振荡后逐渐变大,从而对抽运光的消耗也更加明显。

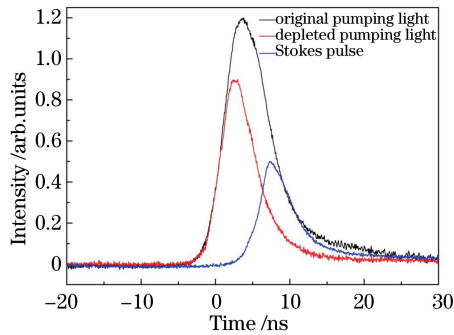


图 7 原始抽运光、剩余抽运光和斯托克斯光的脉冲波形

Fig. 7 Waveforms for original pumping light, depleted pumping light and Stokes pulse

4 结 论

研究了基于环形腔结构的种子注入式表面垂直发射太赫兹参量振荡器的运转特性,当抽运脉冲能量为 105.5 mJ、斯托克斯光输出镜的透过率约为 20.1%时,获得的太赫兹脉冲能使得高莱探测器在示波器上的输出电压为 3.3 V,对应的斯托克斯光脉冲能量为 16.1 mJ,太赫兹参量源的抽运脉冲能量阈值约为 10 mJ。在相同的抽运条件下,对种子注式 TPO、TPO 及种子注入式 TPG 的输出能量及抽运脉冲能量阈值进行比较,结果表明,种子注入式 TPO 具有输出能量高及抽运脉冲能量阈值低的优势,当抽运脉冲能量较低时,其在输出能量方面的优势更明显。

参 考 文 献

- [1] Qiao Yulong, Zhao Yuanmeng, Zhang Cunlin, *et al.* Terahertz/visible dual-band image registration based on hybrid Powell algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211005.
乔玉龙, 赵源萌, 张存林, 等. 基于混合 Powell 法的太赫兹/可见光双波段图像配准[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0211005.
- [2] Li Wenjun, Wang Tianyi, Zhou Yu, *et al.* Terahertz non-destructive inspection of air defect within adhesive layers of multi-layer bonded structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0111002.

- 李文军, 王天一, 周宇, 等. 多层胶接结构胶层空气缺陷的太赫兹无损检测[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0111002.
- [3] Sun Bo, Yao Jianquan. Generation of terahertz wave based on optical methods[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(10): 1349-1359.
孙博, 姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1349-1359.
- [4] Lee A, He Y, Pask H. Frequency-tunable THz source based on stimulated polariton scattering in Mg:LiNbO₃ [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2013, 49(3): 357-364.
- [5] Johnson B C, Puthoff H E, Hoo J S, *et al.* Power and linewidth of tunable stimulates far-infrared emission in LiNbO₃ [J]. Applied Physics Letters, 1971, 18(5): 181-183.
- [6] Karino K, Shikata J, Kawase K, *et al.* Terahertz-wave parametric generation characteristics of MgO:LiNbO₃ [J]. Electronics and Communications in Japan, 2002, 85(4): 22-29.
- [7] Kawase K, Shikata J, Imai K, *et al.* Transform-limited, narrow-linewidth, terahertz-wave parametric generator[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(19): 2819-2821.
- [8] Kawase K, Sato M, Taniuchi T, *et al.* Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO₃ with monolithic grating coupler[J]. Applied Physics Letters, 1996, 68(18): 2483-2485.
- [9] Kawase K, Minamide H, Imai H K, *et al.* Injection-seeded terahertz-wave parametric generator with wide tunability [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(2): 195-197.
- [10] Imai K, Kawase K, Minamide H, *et al.* Achromatically injection-seeded terahertz-wave parametric generator [J]. Optics Letters, 2002, 27(24): 2173-2175.
- [11] Shikata J, Kawase K, Karino K, *et al.* Tunable terahertz-wave parametric oscillators using LiNbO₃ and MgO:LiNbO₃ crystals[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(4): 653-661.
- [12] Wu D H, Ikari T. Enhancement of the output power of a terahertz parametric oscillator with recycled pump beam[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(14): 141105.
- [13] Li Zhongyang, Yao Jianquan, Xu Degang, *et al.* Experimental investigation of high-power tunable THz-wave parametric oscillator based upon MgO:LiNbO₃ crystal[J]. Chinese J Lasers, 2001, 38(4): 0411002.
李忠洋, 姚建铨, 徐德刚, 等. 铌酸锂晶体中参量振荡产生高功率可调谐太赫兹波的实验研究[J]. 中国激光, 2001, 38(4): 0411002.
- [14] Sun B, Li S X, Liu J S, *et al.* Terahertz-wave parametric oscillator with a misalignment resistant tuning cavity[J]. Optics Letters, 2001, 36(10): 1845-1847.
- [15] Minamide H, Ikari T, Ito H. Frequency-agile terahertz-wave parametric oscillator in a ring-cavity configuration [J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(12): 123104.
- [16] Yang Z, Wang Y Y, Xu D G, *et al.* High-energy terahertz wave parametric oscillator with a surface-emitted ring-cavity configuration[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2262-2265.
- [17] Imai K, Kawase K, Shikata J, *et al.* Injection-seeded terahertz-wave parametric oscillator[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(8): 1026-1028.
- [18] Walsh D, Stothard D, Edwards T, *et al.* Injection-seeded intracavity terahertz optical parametric oscillator[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(6): 1196-1202.
- [19] Ikari T, Zhang X B, Minamide H, *et al.* THz-wave parametric oscillator with a surface-emitted configuration [J]. Optics Express, 2006, 14(4): 1604-1610.
- [20] Li Z Y, Yao J Q, Xu D G, *et al.* High-power terahertz radiation from surface-emitted THz-wave parametric oscillator [J]. Chinese Physics B, 2011, 20(5): 280-284.
- [21] Wang W, Cong Z H, Chen X H, *et al.* Terahertz parametric oscillator based on KTiOPO₄ crystal[J]. Optics Letters, 2014, 39(13): 3706-3709.
- [22] Wang Y, Zhao Z, Chen Z, *et al.* Calibration of a thermal detector for pulse energy measurement of terahertz radiation [J]. Optics Letters, 2012, 37(21): 4395-4397.