

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

李忠洋^{1,2} 姚建铨^{1,2} 徐德刚^{1,2} 钟凯^{1,2} 邴丕彬^{1,2} 汪静丽^{1,2}

(¹ 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)
(² 天津大学教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘要 利用一块大体积 MgO:LiNbO₃ 晶体, 采用浅表垂直出射方式构成太赫兹 (THz) 波参量振荡器 (TPO), 实现了高功率可调谐的 THz 波输出, 调谐范围为 0.8~2.8 THz。当抽运功率密度为 197.4 MW/cm² 时, 在 1.73 THz 处每个 THz 脉冲的最大输出能量为 173.9 nJ, 对应的能量转换效率为 2.2×10^{-6} 。实验过程中观察到了一阶和二阶斯托克斯 (Stokes) 光, 一阶 Stokes 光相对于抽运光的频移等于产生的 THz 波的频率。

关键词 非线性光学; 太赫兹波; 太赫兹波参量振荡器; 电磁耦合

中图分类号 O437.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0411002

Experimental Investigation of High-Power Tunable THz-Wave Parametric Oscillator Based upon MgO:LiNbO₃ Crystal

Li Zhongyang^{1,2} Yao Jianquan^{1,2} Xu Degang^{1,2} Zhong Kai^{1,2}

Bing Pibin^{1,2} Wang Jingli^{1,2}

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

Abstract High-power nanosecond pulsed terahertz (THz)-wave radiation is achieved via a surface-emitted MgO:LiNbO₃ terahertz parametric oscillator (TPO). THz-wave radiation from 0.8 THz to 2.8 THz is obtained. The maximum THz-wave output is 173.9 nJ per pulse at 1.73 THz while the pump power density is 197.4 MW/cm². The corresponding energy conversion efficiency is 2.2×10^{-6} . During the experiments the first-order and the second-order Stokes waves are observed. The frequency shift of the first-order Stokes wave is equivalent to the frequency of generated THz-wave.

Key words nonlinear optics; terahertz wave; terahertz wave parametric oscillator; polariton

OCIS codes 190.4410; 190.4970; 190.2620

1 引 言

太赫兹 (THz) 波是指频率在 0.1~10 THz 之间的电磁辐射, 介于毫米波与远红外光之间。由于 THz 波的频谱很宽, 覆盖了各种凝聚态物质和生物大分子的转动和集体振动频率, 各种物质在 THz 波

波段的发射、反射和透射光谱中包含了丰富的物理和化学信息, 因此 THz 波在医学成像、材料检测、环境监测、天文学、分子光谱和生命科学等研究领域均有重大的科学研究价值和广阔的应用前景^[1~3]。目前限制太赫兹波技术发展的主要瓶颈是缺乏高效、

收稿日期: 2010-08-30; 收到修改稿日期: 2010-11-27

基金项目: 国家 973 计划 (2007CB310403) 资助课题。

作者简介: 李忠洋 (1983—), 男, 博士研究生, 主要从事太赫兹波辐射源方面的研究。E-mail: lzy8376@yahoo.com.cn

导师简介: 姚建铨 (1939—), 男, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要从事非线性光学和太赫兹科学技术等方面的研究。

E-mail: jqyao@tju.edu.cn

稳定、小型化、室温工作的相干太赫兹辐射源。基于晶格振动模的可调谐太赫兹波参量振荡器(TPO)是产生高效相干 THz 波的有效手段之一。与其他方法相比,它不仅产生相干窄带、高能量、可连续调谐的 THz 波辐射,还具有非线性转换效率高、调谐方式简单多样等特点^[4]。MgO:LiNbO₃晶体具有较大的非线性系数和较高的抗损伤阈值,是组成 TPO 的最佳晶体之一^[5]。

近年来,各具特色的 TPO 迅速发展。在相位匹配方面,非共线相位匹配的 TPO,由于抽运光、斯托克斯(Stokes)光和 THz 波在空间中彼此分开,严重限制了三波相互作用体积,影响了 THz 波的转换效率。利用周期极化铌酸锂(PPLN)晶体准相位匹配产生 THz 波的 TPO 中,可以实现抽运光,Stokes 光和 THz 波准共线传播,极大地增强了 THz 波输出^[6]。但是一种极化 PPLN 只对应于一个特定频率的 THz 波输出,所以 THz 波的可调谐输出受到了限制。在腔型结构方面,相对于外腔 TPO,由于抽运密度的增加,内腔 TPO 产生了更高功率的 THz 波辐射,但是在 THz 波的调谐输出方面增加了难度^[7]。在 THz 波的耦合输出方面,由于 THz 波在 MgO:LiNbO₃晶体中具有较大的折射率,所以 THz 波会在晶体的出射面上发生全反射,有两种方法可以解决此问题,1)利用一排硅棱镜耦合输出 THz 波^[4]。由于 MgO:LiNbO₃晶体对 THz 波有非常大的吸收,频率为 1.5 THz 的 THz 波在 MgO:LiNbO₃晶体中经过 0.5 mm 其能量会损失 91%。用硅棱镜耦合输出 THz 波时,THz 波会在 MgO:LiNbO₃晶体中传输一段距离,这样会严重限制 THz 波输出功率的提高。2)改进的方法就是在 MgO:LiNbO₃晶体侧面切角以保证 THz 波垂直输出,这时 THz 波的产生区域就在晶体的浅表面,THz 波在 MgO:LiNbO₃晶体中经过的距离很短,极大地降低了 MgO:LiNbO₃晶体对 THz 波的吸收^[8]。

由于抽运光不是垂直入射到 MgO:LiNbO₃晶体,所以当增益介质为两块或两块以上时,抽运光会在晶体的接触面之间发生多次反射,对晶体造成损伤。本文利用一块大体积 MgO:LiNbO₃晶体,采用浅表垂直出射方式构成 TPO,实现了高功率相干 THz 波输出。改变抽运光和 Stokes 光之间的相位匹配角,实现了 THz 波调谐输出。当抽运功率足够大时,观察到了一阶和二阶 Stokes 光。

2 实验研究

2.1 实验装置

TPO 的实验装置如图 1 所示。抽运源为 1064 nm 电光调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器,重复频率 10 Hz,脉宽 13 ns,利用一望远镜系统将抽运光直径压缩为 1.98 mm。当增益介质为两块或两块以上时,由于抽运光的非垂直入射会导致抽运光对增益介质接触面之间的损伤,所以实验中选择了一块体积较大的掺杂摩尔分数为 5% 的 MgO:LiNbO₃晶体。五边形的 MgO:LiNbO₃晶体从一块尺寸为 70 mm(x)×46 mm(y)×5 mm(z)的矩形晶体上切割下来,切割角度如图 1 所示。Stokes 光在 MgO:LiNbO₃晶体中的传播长度约为 70 mm,晶体的端面镀有 1064 nm 增透膜。抽运光,Stokes 光和 THz 波的偏振方向都沿着晶体的主轴。Stokes 光的谐振腔由平面镜 M₁,M₂ 组成,M₁ 镀有 1067~1076 nm 高反膜,M₂ 在 1067~1076 nm 的透射率为 5%,谐振腔腔长为 165 mm。M₁,M₂ 皆为半圆形状,抽运光从腔镜的边沿经过,以避免对晶体造成损伤。整个 TPO 放置在一个旋转平台上,连续地旋转平台以改变抽运光与 Stokes 光的夹角,从而得到可调谐的 THz 波输出。

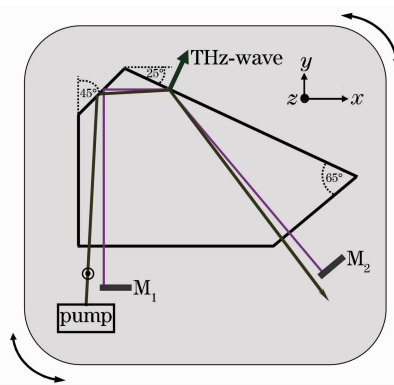


图 1 MgO:LiNbO₃-TPO 实验装置。法布里-珀罗腔和 MgO:LiNbO₃晶体固定于一个旋转平台上

Fig. 1 Experimental setup of the MgO:LiNbO₃-TPO. Fabry-Perot cavity and the MgO:LiNbO₃ crystal are mounted onto a rotating stage

2.2 实验结果与分析

旋转平台,连续改变抽运光与 Stokes 光在晶体外的夹角 θ_{ext} ,得到了 THz 波的频率调谐曲线,如图 2 所示。从实验中测出 Stokes 光的频率,根据能量守恒原理可以计算出 THz 波的频率。THz 波的调谐范围为 0.77~2.83 THz,实验结果与理论曲线符合得很好。

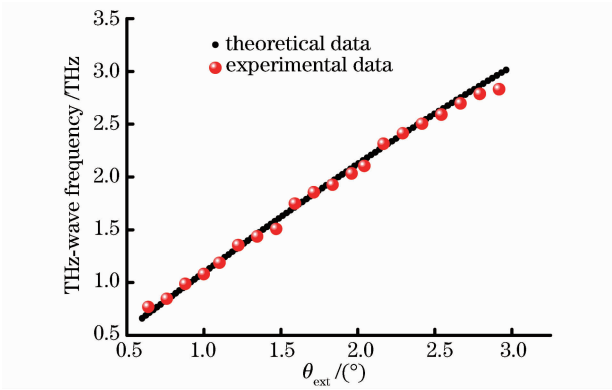


图 2 THz 波的频率调谐曲线

Fig. 2 Tuning characteristics of the THz-wave

图 3 是在抽运功率密度为 132.2 MW/cm^2 时 THz 波的能量调谐曲线。THz 波的能量由工作温度为 4 K 的辐射热计 (bolometer) 测得, 当在 bolometer 探测窗口前放一袋水时, THz 波信号完全消失, 证明测得的 THz 波没有掺杂别的电磁波。实验中在 $0.93 \sim 2.41 \text{ THz}$ 范围内测到了 THz 波的输出, 在 1.85 THz 处每个 THz 脉冲的最大输出能

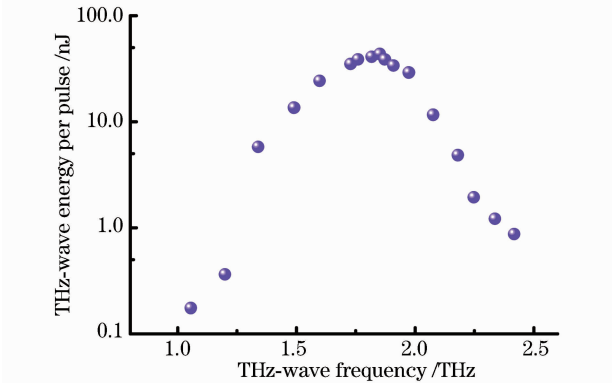


图 3 抽运功率密度为 132.2 MW/cm^2 时 THz 波的能量调谐曲线

Fig. 3 THz-wave output characteristics when pump power density is 132.2 MW/cm^2

量为 43.5 nJ 。当 THz 波的频率在 $0.93 \sim 1.85 \text{ THz}$ 时, 由于 THz 波本身的增益随着频率的减小而降低, 所以 THz 波的能量会随着 THz 波的频率减小而降低。当 THz 波的频率大于 1.85 THz 时, 相位匹配角 θ_{ext} 随着频率的增加而增大, 降低了 3 波相互作用的体积, 并且 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体对 THz 波的吸收随着频率的增加而迅速增大, 所以 THz 波的能量随着频率的增大而降低。

图 4 是频率为 1.73 THz 时 THz 波和 Stokes 光的输出能量随抽运功率密度的变化关系。TPO 的抽运功率密度阈值为 53 MW/cm^2 , 抽运功率超过阈值后 THz 波和 Stokes 光的能量迅速上升。当抽运功率密度为 197.4 MW/cm^2 时, THz 波最大单脉冲能量为 173.9 nJ , 对应 Stokes 光能量为 1.86 mJ , THz 波的能量转换效率为 2.2×10^{-6} 。实验过程中观察到了一阶和二阶 Stokes 光, 如图 5 所示。一阶 Stokes 光频移对应于产生的 THz 波的频率, 二阶 Stokes 光的频移是产生 THz 波频率的 2 倍。一阶 Stokes 光与电磁耦合子相互作用产生二阶 Stokes 光, 一阶 Stokes 光光子

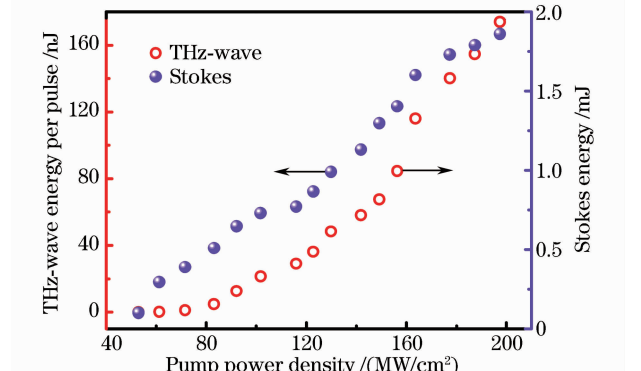


图 4 THz 波和 Stokes 光的输出能量与抽运功率密度的关系

Fig. 4 Output characteristics of the THz-wave and Stokes wave as a function of pump power density

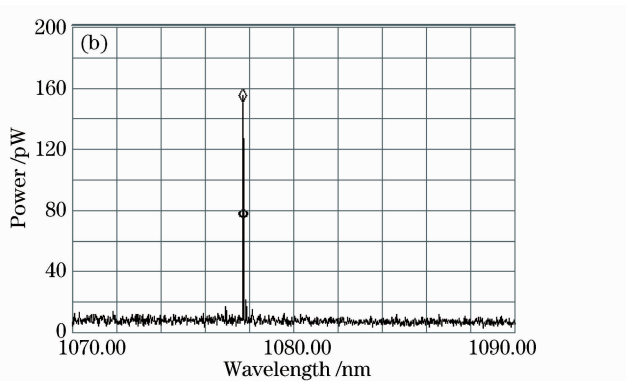
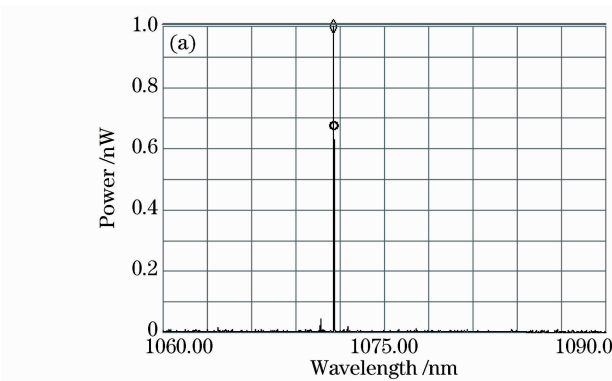


图 5 (a) 一阶 Stokes 光, (b) 二阶 Stokes 光

Fig. 5 (a) First-order Stokes wave, (b) second-order Stokes wave

的减少会影响抽运光与一阶 Stokes 光的相互作用,从而降低 THz 波的转换效率。

3 结 论

采用一块大体积的 MgO:LiNbO₃ 晶体构成 TPO,采用浅表垂直出射方式实现了高功率可调谐的 THz 波输出。改变抽运光和 Stokes 光的夹角,实现了可调谐 THz 波输出,THz 波的调谐范围为 0.8~2.8 THz。当抽运功率密度为 197.4 MW/cm² 时,在 1.73 THz 处 THz 波的最大单脉冲输出能量为 173.9 nJ,对应的能量转换效率为 2.2×10^{-6} 。实验过程中观察到了一阶和二阶 Stokes 光,其一阶 Stokes 光频移对应于产生的 THz 波的频率,二阶 Stokes 光的频移是产生 THz 波频率的 2 倍,理论计算与实验结果符合得很好。

参 考 文 献

1 S. Hayashi, H. Minamide, T. Ikari *et al.*. Output power

enhancement of a palmtop terahertz-wave parametric generator [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(1):117~123

2 K. Kawase, J. Shikata, K. Imai *et al.*. Transform-limited, narrow-linewidth, terahertz-wave parametric generator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(19):2819~2821

3 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulsed terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11):2853~2858

杨 昆,赵国忠,梁承森等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11):2853~2858

4 K. Imai, K. Kawase, J. Shikata *et al.*. Injection-seeded terahertz-wave parametric oscillator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(8):1026~1028

5 G. Xu, X. Mu, Y. J. Ding *et al.*. Efficient generation of backward terahertz pulses from multiperiod periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7):995~997

6 D. Molter, M. Theuer, R. Beigang. Nanosecond terahertz optical parametric oscillator with a novel quasi phase matching scheme in lithium niobate [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8):6623~6628

7 D. Walsh, D. J. M. Stothard, T. J. Edwards *et al.*. Injection-seeded intracavity terahertz optical parametric oscillator [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(6):1196~1202

8 T. Ikari, X. B. Zhang, H. Minamide *et al.*. THz-wave parametric oscillator with a surface-emitted configuration [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4):1604~1610