

文章编号: 2095-4980(2015)01-0019-04

高能量、快速可调谐太赫兹参量振荡器

王与焯^{a,b}, 李忠孝^{a,b}, 李佳起^{a,b}, 闫超^{a,b}, 徐德刚^{a,b}, 姚建铨^{a,b}

(天津大学 a.精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所;
b.教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘要: 基于受激电磁耦子散射的太赫兹(THz)波参量振荡器是产生高能量、相干 THz 波的有效手段之一, 实验中采用垂直晶体表面出射结构, 在 1.63 THz 处实现了最高单脉冲能量为 634 nJ 的 THz 波输出。利用电控振镜快速改变泵浦光入射到 MgO:LN 晶体中的角度, 实现了 0.75 THz~2.81 THz 范围内的快速调谐, 该辐射源可以满足 THz 波在生物医学、太赫兹通信、环境监测等应用领域的需求。

关键词: 太赫兹波; 参量振荡; 可调谐

中图分类号: TN24

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201501.0019

High-energy, fast tunable terahertz parametric oscillator

WANG Yuyue^{a,b}, LI Zhongxiao^{a,b}, LI Jiaqi^{a,b}, YAN Chao^{a,b}, XU Degang^{a,b}, YAO Jianquan^{a,b}

(a.Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering; b.Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology(Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Terahertz-wave Parametric Oscillator(TPO) based on phonon-polariton scattering is one of the promising methods for obtaining high-energy and coherent THz-wave. A high-energy THz-wave output has been experimentally demonstrated with terahertz-wave parametric oscillator based on surface-emitted configuration. The maximum THz-wave output energy of 634 nJ/pulse is obtained at 1.63 THz. The rapid tuning is achieved by rotating the injection angle of pump beam into MgO:LN crystal using an optical beam scanner. The wide tunable range is from 0.75 THz to 2.81 THz. It is expected that such high-energy THz-wave source can meet the demands in many applications, including biomedicine, communication and environmental monitoring.

Key words: terahertz wave; parametric oscillation; tunability

太赫兹(THz, 1 THz=10¹² Hz)波是指频率在 0.1 THz~10 THz 之间, 波长介于红外与微波之间的电磁波, 由于其在光谱中所处的位置及自身所具有的独特性质, 其在光谱分析、无损检测、医学成像、通信、环境检测等领域有巨大的应用前景^[1-3]。因此, 如何获得高能量输出、稳定、可调谐的 THz 辐射源成为 THz 研究中的关键问题。

基于受激电磁耦子散射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, 其不仅可以产生相干窄带、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、室温运转等特点。20 世纪 90 年代以后, 国内外在基于 TPO 原理利用光泵浦镁铌酸锂晶体(MgO:LiNbO₃)实现 THz 波输出方面进行了大量工作。采用 LiNbO₃ 晶体侧面刻光栅^[4]、Si 棱镜耦合输出^[5]、改变晶体温度与掺杂离子浓度^[6-7]、种子注入^[8]、垂直晶体表面出射^[9]等技术, 使得该种光学 THz 辐射源在输出功率、耦合效率、线宽、调谐范围等方面得到了很大的发展。其中, 垂直晶体表面出射结构中由于 THz 波的产生区域在晶体的浅表面, 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, 并且 THz 波垂直晶体表面出射, 可以有效地改善 THz 波输出的光束质量。2010 年, Ikari T 等人^[10]利用此结构在 1.46 THz 处, 获得了最大能量为 382 nJ 的 THz 波输出, 泵浦光的入射能量为 465 mJ, 能量转换效率达

收稿日期: 2014-10-28; 修回日期: 2014-11-29

基金项目: 国家 973 计划资助项目(2015CB755403, 2014CB339802); 国家 863 计划资助项目(2011AA010205); 国家自然科学基金资助项目(61107086, 61471257); 天津市自然科学基金资助项目(14JCQNJC02200, 13ZCZDSF02300); 天津市科技支撑项目(14ZCZDZX00030); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120032110053); 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金资助项目(CAEP THZ201304)

到 0.9×10^{-6} 。2013年,作者所在课题组^[11]通过优化晶体尺寸与泵浦光斑大小,在泵浦能量为 226 mJ 时,实现了最大单脉冲能量 438 nJ 的 THz 波输出,能量转换效率为 1.94×10^{-6} , THz 波的频率调谐范围为 1 THz~3 THz。为了利用泵浦光腔内的高能量密度及降低参量振荡阈值,将 MgO:LiNbO₃ 晶体与 TPO 谐振腔置于泵浦光腔内^[12],获得了最大单脉冲能量为 283 nJ 的 THz 波输出,调谐范围为 0.75 THz~2.75 THz。但由于上述结构均采用直腔泵浦,实验过程中需要旋转整个 TPO 谐振腔以改变泵浦光入射到 MgO:LiNbO₃ 晶体中的角度,难以实现 THz 波频率的快速调谐。

本文基于 MgO:LiNbO₃ 晶体垂直表面出射 THz 参量振荡技术与电控振镜旋转,实现了高能量、快速可调谐的 THz 波输出。实验中,泵浦光经电控旋转振镜反射到 TPO 谐振腔内,通过改变电控振镜上的外加电压,即可实现频率的快速调谐。当 1 064 nm 泵浦光能量为 150 mJ,重复频率为 10 Hz 时,在 1.63 THz 处获得的 THz 波最大单脉冲能量为 634 nJ,对应的 THz 波能量转换效率为 4.23×10^{-6} ,频率快速调谐范围为 0.8 THz~2.8 THz。

1 实验装置

实验原理装置图如图 1 所示。泵浦源为 1 064 nm 电光调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器,重复频率为 10 Hz,脉宽为 15 ns,光斑直径为 8 mm。凸透镜 M₁($f=100$ mm)与凹透镜 M₂($f=50$ mm)组成望远镜系统,将泵浦光的直径压缩为 4 mm。M₃ 为镀 1 064 nm 高反膜的平面镜,用于折射泵浦光。M₄ 为电控振镜,由外部的数据采集卡写入电压控制,利用电脑改变施加在其上的电压,可以实现振镜的快速旋转,从而改变泵浦光入射到晶体中的角度。振镜的调谐速度为 100 μ s,调谐精确度为 16 μ rad。Stokes 光的谐振腔由平面镜 M₅ 与 M₆ 组成,两者均一半镀 1 067 nm~1 076 nm 高反膜与 1 064 nm 高透膜,另一半未镀膜,泵浦光从腔镜未镀膜的一侧经过,腔内只有 Stokes 光振荡。Stokes 光的谐振腔腔长为 170 mm。非线性晶体 MgO:LiNbO₃ 的掺杂浓度为 5% mol,从一块尺寸为 70 mm(x) \times 46 mm(y) \times 8 mm(z)的矩形晶体切割下来,晶体中泵浦光通过的端面与 THz 波出射面抛光,晶体的切割角度如图中所示。泵浦光、Stokes 光与 THz 波的偏振方向都沿着晶体的主轴。实验所用 THz 波探测器为俄罗斯 TYDEX 公司生产的高莱(Golay cell)探测器,型号为 GC-1T,其在 10 Hz 时的标定为 137.1 kV/W,通过测量 THz 波的输出电压即可得到其输出功率。白色聚乙烯透镜放置在高莱池前以实现 THz 波的聚焦。为了消除泵浦光和 Stokes 光对 THz 波探测的影响,在高莱探测器的接收窗口前贴一块锗片,滤除其他光的影响。图 2 为 THz 参量振荡的相位匹配图。从图中可知,通过计算机控制改变施加在电控振镜上的电压,就可以改变泵浦光与 Stokes 光的夹角,即非共线相位匹配角,从而实现 THz 波频率的快速连续调谐输出。

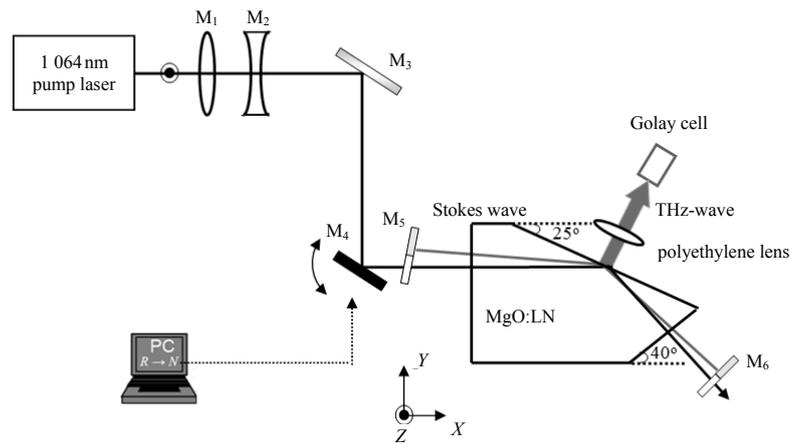


Fig.1 Schematic diagram of the fast tunable terahertz parametric oscillator
图 1 快速可调谐 THz 参量振荡实验装置图

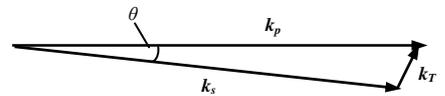


Fig.2 Relationship among the wave vectors for the nonlinear phase matching condition
图 2 非共线相位匹配矢量图

2 实验结果与分析

图 3 为 THz 波输出频率为 1.63 THz 时,TPO 输出的 THz 波单脉冲能量随泵浦能量的变化曲线。从图中可以看出,TPO 的阈值约为 73 mJ,THz 波在阈值附近功率缓慢增加。随着泵浦能量的增加,THz 波输出能量迅速增大。当泵浦光能量达到 150 mJ 时,产生的 THz 波的单脉冲能量为 634 nJ,平均功率约为 6.34 μ W,对应的 THz 波能量转换效率为 4.23×10^{-6} ,对应的光子转换效率为 7.31×10^{-4} 。为了避免泵浦光对 LiNbO₃ 晶体的损伤,实验中没有尝试更强的泵浦光。THz 波在不同泵浦能量下的转换效率如图 4 所示。由于在外腔泵浦结构中泵浦光只是一次性通过晶体,绝大部分能量会从 M₆ 镜出射而未得到利用,可以通过泵浦光的循环利用进一步提高 THz 波的有效转换效率。图 5 为此时测量的 Stokes 光谱图,其波长为 1 070.59 nm。

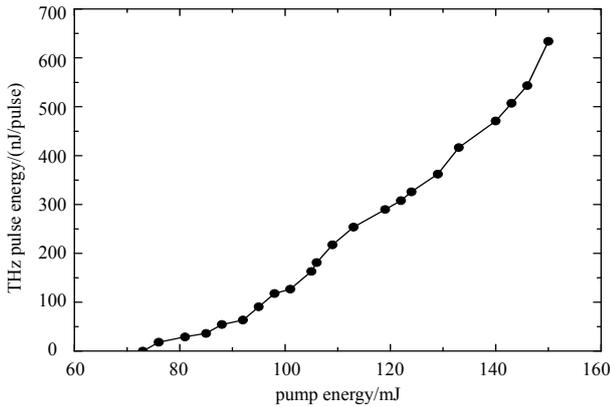


Fig.3 THz-wave output energy versus pump energy at 1 064 nm
图 3 THz 波输出单脉冲能量与泵浦能量的关系

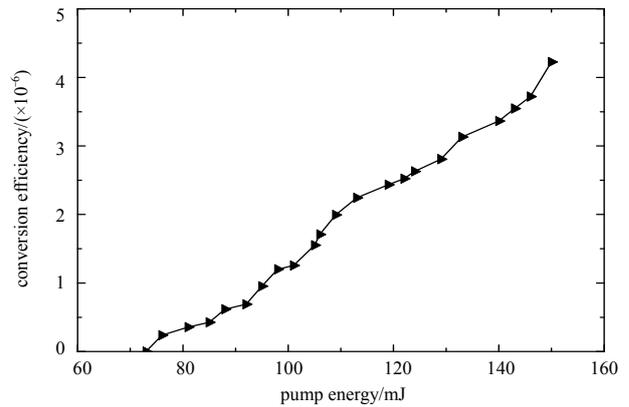


Fig.4 THz-wave conversion efficiency versus pump energy at 1 064 nm
图 4 THz 波输出能量转换效率与泵浦能量的关系

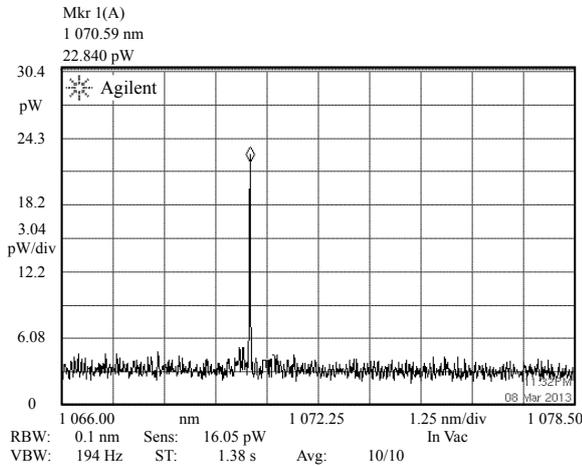


Fig.5 Spectrum of Stokes wave at 1.63 THz
图 5 THz 波输出频率为 1.63 THz 时的 Stokes 光谱线

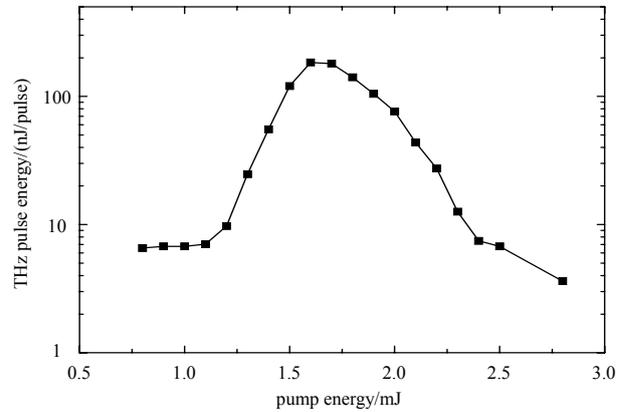


Fig.6 TPO tunable output characteristics under the pump energy of 106 mJ
图 6 泵浦能量为 106 mJ 时的 TPO 调谐输出曲线

通过电脑控制改变旋转振镜的外加电压,使振镜转过一个微小角度,从而改变泵浦光和 Stokes 光的夹角。在泵浦光能量为 106 mJ 的情况下,测得了不同 THz 波输出频率处所对应的输出功率,THz 波的调谐范围为 0.8 THz~2.8 THz,如图 6 所示。从图中可知,在 1.63 THz 处获得 THz 波的最大脉冲能量为 184 nJ。当 THz 波的频率在 0.8 THz~1.63 THz 时,由于 THz 波本身的增益随着频率的减小而降低,所以 THz 波的输出能量会随着 THz 波的频率的减小而降低。当 THz 的频率大于 1.63 THz 时,非共线相位匹配角 θ 随着频率的增加而增大,这样降低了三波相互体积,并且 MgO:LiNbO₃ 晶体对 THz 波的吸收随着频率的增加而迅速增大,所以 THz 波的输出能量随着频率的增大而降低。

实验中,由于 TPO 谐振腔采用一半镀膜、一半未镀膜镜片,为了尽可能地将泵浦光和 Stokes 光分开,同时保证三波相互作用具有足够的增益,从而得到较大的 THz 波调谐范围,实验中 TPO 的谐振腔长不能尽可能地缩短。后续实验将改进 Stokes 光谱谐振腔的镀膜质量,优化谐振腔长度与泵浦光斑尺寸,从而进一步提高 THz 波的输出功率。

3 结论

本文基于垂直表面出射太赫兹参量振荡技术与电控振镜旋转,实现了高能量、快速可调谐的 THz 波输出。实验中,通过电脑控制改变振镜的外加电压,即可改变泵浦光和 Stokes 光的夹角,实现 THz 波频率的快速调谐。当泵浦光能量为 150 mJ,在 1.63 THz 处获得的 THz 波最大单脉冲能量为 634 nJ,对应的 THz 波能量转换效率为 4.23×10^{-6} ,频率快速调谐范围为 0.8 THz~2.8 THz。这可为太赫兹光谱分析与医学成像等领域提供小型化、室温运转的快速可调谐太赫兹源。

参考文献:

- [1] ZHANG X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nat. Mater., 2002(1):26–33.
- [2] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 2002,50(3):910–928.
- [3] 刘丰,朱忠博,崔万照,等. 太赫兹技术在空间领域应用的探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(6):857–866. (LIU Feng,ZHU Zhongbo,CUI Wanzhao,et al. Application of terahertz techniques in space science[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(6):857–866.)
- [4] Kawase K,Sato M,Taniuchi T,et al. Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO₃ with monolithic grating coupler[J]. Appl. Phys. Lett., 1996,68(18):2483–2485.
- [5] Kawase K,Shikata Jun-ichi,Minamide Hiroaki,et al. Arrayed silicon prism coupler for a THz-wave parametric oscillator[J]. Appl. Opt., 2001,40(9):1423–1426.
- [6] Shikata Jun-ichi,Sato M,Taniuchi T,et al. Enhancement of terahertz-wave output from LiNbO₃ optical parametric oscillators by cryogenic cooling[J]. Opt. Lett., 1999,24(4):202–204.
- [7] Shikata Jun-ichi,Kawase K,Karino Ken-ichi,et al. Tunable terahertz-wave parametric oscillators using LiNbO₃ and MgO:LiNbO₃ crystals[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 2000,48(4):653–661.
- [8] Imai K,Kawase K,Shikata Jun-ich,et al. Injection-seeded terahertz-wave parametric oscillator[J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 78(8):1026–1028.
- [9] Ikari T,ZHANG X B,Minamide H,et al. THz-wave parametric oscillator with a surface emitted configuration[J]. Opt. Express, 2006,14(4):1604–2485.
- [10] Ikari T,GUO R,Minamide H,et al. Energy scalable terahertz-wave parametric oscillator using surface-emitted configuration[J]. J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public, 2010(5):10054.
- [11] XU D,ZHANG H,JIANG H,et al. High energy terahertz parametric oscillator based on surface-emitted configuration[J]. Chin. Phys. Lett., 2013(30):024212.
- [12] WANG Y,XU D,JIANG H,et al. High-energy,low-threshold tunable intracavity terahertz-wave parametric oscillator with surface-emitted configuration[J]. Laser Phys., 2013(23):055406.

作者简介:



王与焜(1983–),女,山西省朔州市人,博士,讲师,研究方向为全固态激光技术、太赫兹光子学及其应用技术 .email:yuyewang@tju.edu.cn.

闫超(1988–),男,天津市人,在读博士研究生,主要研究方向为太赫兹光子学及其应用技术.

徐德刚(1974–),男,山东省青岛市人,博士,教授,主要研究方向为全固态激光及非线性光学频率变换技术、太赫兹技术.

李忠孝(1989–),男,吉林省吉林市人,在读硕士研究生,研究方向为太赫兹波成像技术.

李佳起(1989–),男,吉林省吉林市人,在读硕士研究生,研究方向为太赫兹波产生技术.

姚建铨(1939–),男,上海市人,中国科学院院士,教授,博士生导师,主要研究方向为全固态激光技术、非线性光学频率变换技术与太赫兹技术.