

太赫兹波参量振荡器研究进展

刘磊 李霄 刘通 许晓军 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 基于参量振荡技术的太赫兹波源是得到可调谐太赫兹波的重要器件,它在安全检查、生物传感、医学诊断、半导体器件检测和质量控制等领域具有重要的应用。从非线性晶体材料特性、谐振腔结构、太赫兹波耦合输出方式、频率调谐方式和线宽控制方法等方面总结了国内外太赫兹参量振荡技术的实验与理论研究情况。对级联太赫兹波参量振荡过程在连续、脉冲和超短脉冲运转方式的研究现状进行了回顾。基于太赫兹参量振荡技术研究现状提出其未来的一些研究方向。随着光纤激光器等技术的发展和周期性极化晶体等材料性能的进一步提高,太赫兹参量振荡器将朝着更加高效化、小型化、实用化、易于操作携带的方向发展,并在其应用领域发挥越来越重要的作用。

关键词 非线性光学;光参量振荡;太赫兹;频率变换;MgO:PPLN 晶体

中图分类号 O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.090001

Progress of Terahertz Wave Parametric Oscillator

Liu Lei Li Xiao Liu Tong Xu Xiaojun Jiang Zongfu

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Terahertz source based on parametric oscillator is an important tunable terahertz device. It has important applications in the security check, biosensors, medical diagnostics, testing and quality control of semiconductor devices. This article summarizes the experimental and theoretical research of domestic and foreign terahertz parametric oscillator in terms of the material properties of the nonlinear crystal, resonator structure, terahertz output coupler, frequency tuning mode and linewidth control. We review the cascaded terahertz parametric process in continuous, pulse, ultrashort pulse operating styles and propose some of its future research directions. With the development of fiber laser technology and periodically poled crystals to further improve the performance, the terahertz parametric oscillator will move to the direction of more efficient, small, practical, portable and easy to operate, and play an increasingly important role in its application fields.

Key words nonlinear optics; optical parametric oscillation; terahertz wave; frequency conversion; MgO:PPLN crystal

OCIS codes 190.4970; 140.4780; 140.3580

1 引言

近来太赫兹(THz)波产生技术因其在安全检查^[1,2]、生物传感^[3,4]、医学诊断^[5]、半导体器件检测^[6]和质量控制^[7]等应用领域的广阔前景而得到越来越多的关注。过去几十年间相继发展出各种电子学和光学的THz波产生方法,其中光学参量转换是最有效的方案之一。基于差频(DFG)技术的THz波产生已经在纳秒^[8,9]和飞秒^[10]系统中得到了验证,然而基于参量振荡技术比采用差频方法的THz波辐射源的转换效率高几个数量级,能实现可调谐相干THz波输出,且能在室温下运转,结构紧凑,有利于系统的小型化,逐渐被人们所关注。自20世纪90年代中后期以来,随着高功率、高光束质量、高单色性的抽运源的发展和具有较大

收稿日期: 2012-04-23; 收到修改稿日期: 2012-05-16; 网络出版日期: 2012-06-26

作者简介: 刘磊(1981—),男,博士研究生,主要从事非线性频率变换方面的研究。E-mail: llwm0319@163.com

导师简介: 姜宗福(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光器技术、气动光学等方面的研究。

E-mail: jiangzongfu28@163.com

透光范围周期性极化晶体(如 PPLN、MgO:PPLN、MgO:PPLT)的出现,极大地推动了 THz 波参量振荡器(TPO)的发展。目前,采用基于非共线相位匹配或准相位匹配的 TPO,已经得到了超快脉冲^[11]、脉冲^[12]和连续^[13]可调谐相干 THz 波。

针对 TPO 在可调谐 THz 波源中不可取代的地位,本文全面回顾了 TPO 的研究历程,从对其结构研究、输出特性分析及所用晶体材料等方面,总结了 TPO 的实验和理论研究进展,并对未来的发展方向进行了展望。

2 晶体材料及特性研究

选用合适的非线性晶体是 TPO 产生 THz 波的关键。目前被用于产生 THz 波的非线性光学晶体主要有 ZnGeP₂, GaSe, GaAs, GaP, DAST, LiNbO₃, LiTaO₃ 等中远红外波段具有较好非线性特性的晶体。GaSe, GaAs, GaP, DAST 这四种晶体目前主要用于差频产生 THz 波的实验^[14~18]。1996 年, LiNbO₃ 晶体被用于最早的 TPO^[12], 之后人们对由其构成的 THz 波振荡器特性进行了大量的研究。虽然近来人们开始对 LiTaO₃ 和 ZnGeP₂ 晶体构成的 TPO 进行研究,但 LiNbO₃ 及掺杂摩尔分数为 5% 的 MgO:LiNbO₃ 和相应的周期性极化晶体仍然是目前 TPO 最常用的非线性晶体。

1999 年,日本的 Jun-ichi 等^[19]根据 LiNbO₃ 晶体在低温冷却的环境下吸收系数会降低的特性,将该晶体置于 78 K 的低温环境下,使 THz 波的输出较常温情况增大了 125 倍, 阈值降为原来的 32%。

同年, Ken-ichi 等^[20,21]首次采用 MgO:LiNbO₃ 晶体实现了 TPO。由实验结果分析表明使用掺杂摩尔分数为 5% 的 MgO:LiNbO₃ 代替 LiNbO₃, 晶体的非线性系数增大, 抗光折变损伤阈值也有了一定的提高。掺杂后的 THz 波输出功率比未掺杂时增大了 5 倍。2009 年, Molter 等^[22]首次利用周期极化 LiNbO₃ 晶体, 实现了 8 mW 的 THz 波输出。

2010 年, Sowade 等^[23]结合连续单谐振级联光参量振荡器详细分析了 LiNbO₃ 晶体在 THz 波范围的有效非线性系数和温度调谐特性。

在国内, 华中科技大学孙博等^[24]对由 LiTaO₃ 晶体组成的 TPO 的输出调谐特性、增益和吸收损耗特性以及基于硅棱镜阵列耦合装置的 THz 波输出特性等方面进行了详细的理论分析和研究。研究表明, 基于 LiTaO₃ 晶体的 TPO, 通过短波长光抽运、提高抽运光能量以及缩短谐振腔等方法, 能够实现其高性能运转。2011 年, Wang 等^[25]实验验证了俄罗斯的 Shakirl 等^[26]提出的由 ZnGeP₂ 和环形腔结构组成的 TPO, 通过 CO₂ 激光器抽运得到了 THz 波输出。

在我国台湾地区, Chiang 等^[27]主要对 LiNbO₃ 晶体光波导器件组成的 TPO 进行了研究, 发现光波导器件对其空间中的混频波有较强的限制作用, 可以形成与 THz 辐射相对应的波导作用, 提高了 THz 波的转换效率。不同厚度的 LiNbO₃ 波导, 对转换效率、输出能量以及脉冲宽度的影响也不同。2008 年, Wang 等^[28]同样采用 LiNbO₃ 晶体光波导器件和内腔结构, 首次实现了具有低阈值和窄线宽输出的 TPO, 阈值能量和功率密度分别为 2.2 mJ 和 70 MW/cm², THz 波的输出线宽约为 12 GHz。

3 TPO 结构研究

3.1 谐振腔结构

由于双谐振腔或三谐振腔稳定性不高, 并且限制了 THz 波的频率调谐范围, TPO 多采用单谐振结构, 归结起来主要包括传统的外腔单谐振结构(如图 1 所示)、内腔单谐振结构、抽运增强单谐振结构。目前最为简单、应用最广的外腔单谐振结构, 已在脉冲和其他运转方式下的 TPO 中成功实现。

改进外腔单谐振结构的 TPO 腔参数以提高 TPO 的输出性能一直是人们关注的重点。西安理工大学张显斌等^[29]以 MgO:LiNbO₃ 为非线性光学介质, 通过采用高性能腔反射镜实现了 85 mm 腔长的 TPO。这种短腔长 TPO 比传统的 160 mm 腔长的 TPO 振荡阈值降低了 22.3%, 峰值能量提高了 170%, 频率调谐范围从 0.5~2.4 THz 提高到 0.8~3.1 THz。

相对于外腔抽运 TPO, 由于抽运密度的增加, 内腔单谐振结构 TPO 的抽运阈值更低, 能产生更高功率的 THz 波辐射, 但是在 THz 波的调谐输出方面增加了难度。

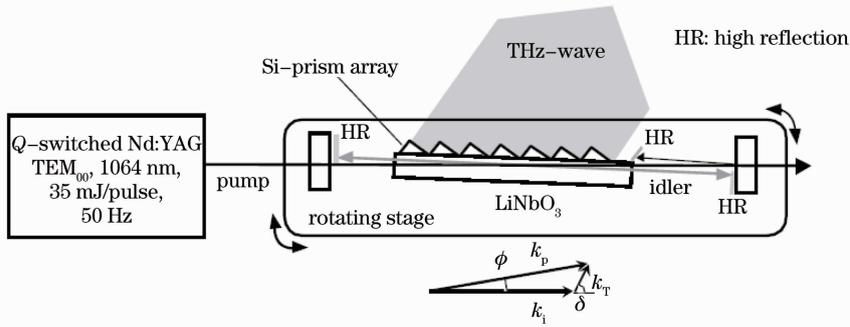


图 1 Kawase 等^[12]实现的外腔单谐振结构 TPO

Fig. 1 Experimental setup of the extracavity single resonant TPO of Kawase *et al.*^[12]

在内腔结构的 TPO 研究方面,英国圣安德鲁斯大学 J. F. Allen 物理研究实验室的科研人员做了大量的研究工作。2006 年,Edwards 等^[30]首次采用内腔结构实现了 TPO,如图 2 所示。通过抽运光和信号光的谐振腔交叉放置,降低了 TPO 的阈值(抽运光阈值能量小于 1 mJ),在 2 倍阈值处,THz 波的量子转换效率接近 50%,调谐范围为 1.20~3.05 THz,峰值功率为 1 W,THz 波输出的带宽小于 100 GHz。

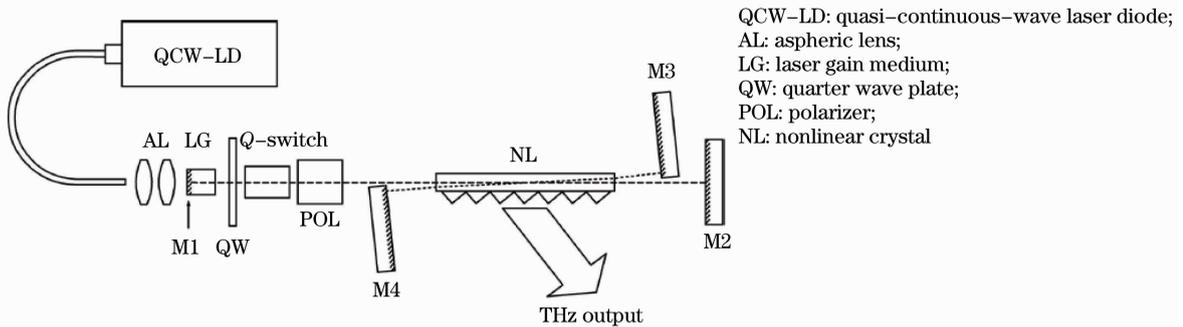


图 2 Edwards 等^[30]实现的内腔 TPO 结构图

Fig. 2 Experimental setup of the intra-cavity TPO of Edwards *et al.*^[30]

2009 年,该研究室的 Walsh 等^[31]采用内腔结构的 TPO,同时使用种子注入技术,在 1~3 THz 范围内,任意的 20 GHz 宽度得到连续可调谐的 THz 波输出。当入射的种子激光能量为 1 mW 时,所得到的 THz 波脉冲的能量大于 5 nJ,其量子转换效率达到 68%。2010 年,他们又报道了通过不同的准相位匹配技术,采用周期极化 MgO:LiNbO₃ 晶体实现纳秒脉冲输出的内腔结构 TPO^[32]。

在国内,天津大学姚建铨课题组对内腔结构的 TPO 开展了大量研究。2009 年,他们报道了通过侧抽运结构的调 Q Nd:YAG 激光器腔内加入 MgO:LiNbO₃ 晶体,采用与文献^[16]相同结构的谐振腔实现的内腔 THz 波振荡器。在 1.4~2.5 THz 范围内,得到了高能量的 THz 波输出^[33]。

对于抽运增强结构的 TPO,腔内增加了对于抽运光的反射,使得信号光与抽运光都在腔内振荡,这样大大减小了 TPO 的抽运阈值。2009 年,Molter 等^[22]首次采用抽运增强结构实现了脉冲输出的 TPO。2011 年,Kiessling 等^[34]通过采用抽运增强结构,结合周期极化 MgO:LiNbO₃ 晶体,实现了抽运光到 THz 波直接转化的可调谐连续 TPO,在抽运功率为 0.3~3.9 μ W 时调谐范围是 1.2~2.9 THz。对于 2.5 cm 长的晶体输出波为 1.4 THz,它的腔内抽运阈值为 350 W。同年,日本的 Yuma 等^[35]基于平均功率小于 1 W 的锁模皮秒激光器和 MgO:LiNbO₃ 晶体采用抽运增强结构实现了 0.9 THz 的输出。

3.2 耦合输出方式

由于 LiNbO₃ 晶体在 THz 范围具有较大的吸收系数,这不仅使得其抽运阈值比较高,也大大影响了 THz 波的转换效率,所以人们对于如何减少晶体对 THz 波的吸收做了大量的研究,提出了一系列关于 THz 波的耦合输出方案,其核心思想就是减少 THz 波在非线性晶体中的传播距离,以达到减少其损耗的目的。

由于 THz 波在 LiNbO₃ 晶体与空气界面的全反射角较小,导致大部分光被反射回晶体内部,经多次全反射,最终被晶体吸收。为了减少全反射效应导致的晶体对 THz 波的吸收,Piestrup 等^[36]采用切角耦合

法,即在晶体的输出端切下一个角,使产生的 THz 波能够以基本垂直于晶体切面的方向输出,提高输出耦合效率。为了进一步提高 THz 波输出耦合效率,1996 年后,日本的 Kawase 等^[12,37,38]在总结前人研究成果的基础上,设计并实现了多种新的 THz 波耦合输出方法,包括在光栅耦合输出^[12]、单 Si 棱镜耦合输出^[37]和 Si 棱镜阵列耦合输出法^[38]。上述各种耦合输出方法如图 3 所示。

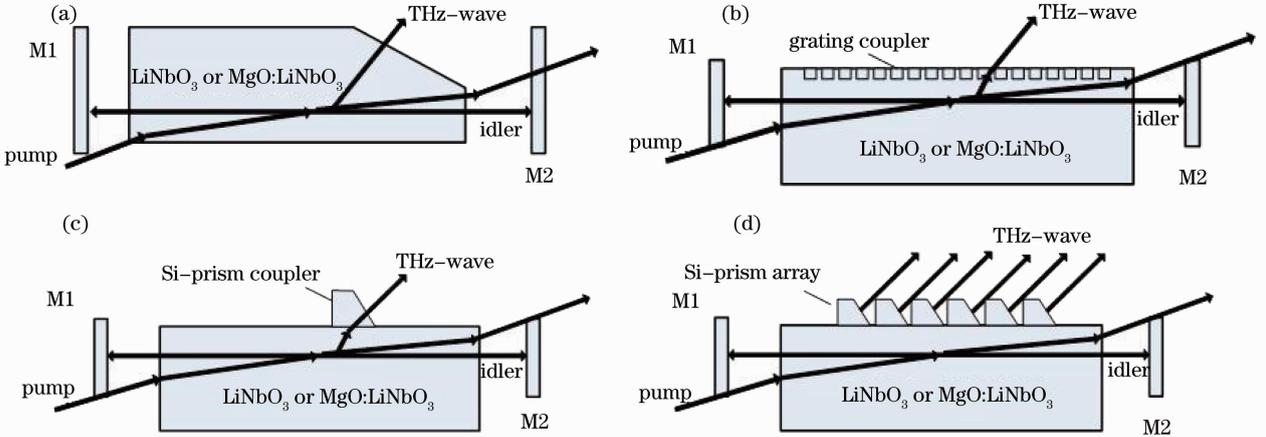


图 3 几种改善 THz 波输出的耦合输出方法。(a)切角耦合输出 TPO; (b)光栅耦合输出 TPO; (c)单 Si 棱镜耦合输出 TPO; (d) Si 棱镜阵列耦合输出 TPO

Fig. 3 Coupling schemes to improve the THz output. (a) TPO with angled surface coupler; (b) TPO with grating coupler; (c) TPO with an Si-prism coupler; (d) TPO with Si-prism array

由于光栅耦合器的色散特性以及非共线相位匹配自身的特点,光栅耦合方法输出的 THz 波方向性较差,使用多个 Si 棱镜时耦合输出的面积得到相应倍数的增大,发射孔径的增大使得远场发散角缩小。用 Si 棱镜阵列(通常选 6 个或 7 个)进行耦合输出时,耦合效率较使用单个 Si 棱镜提高了 6 倍,但是棱镜个数不是越多越好,多个小棱镜将使得衍射效应增强,光束质量变差^[38]。

为了解决 Si 棱镜阵列耦合输出结构的 TPO 输出波前不一致和光束质量不佳的问题,2006 年,Ikari 等^[39]又提出了浅表面出射结构来实现 TPO 的方案,如图 4 所示。基于该结构的 TPO 不需要任何输出耦合器,从而有效克服了 Si 棱镜阵列耦合输出 THz 波所存在的问题。

2010~2011 年,天津大学的李忠洋等^[40~44]利用多个形状的大体积 MgO:LiNbO₃ 晶体,进一步对浅表出射结构的 TPO 进行了研究,实现了高功率可调谐的 THz 波输出。他们的 TPO 结构如图 5 所示。

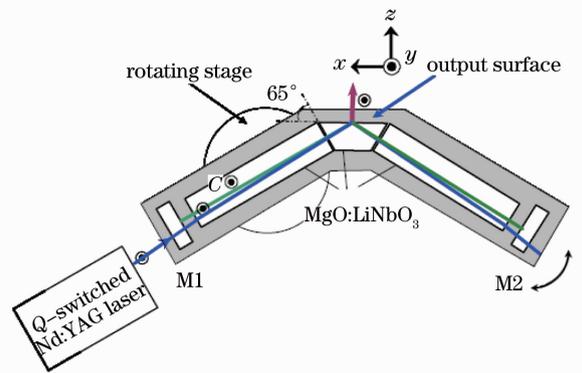


图 4 Ikari 等^[39]报道的浅表面出射方式 TPO

Fig. 4 Schematic diagram of the surface-emitted TPO of Ikari et al. ^[39]

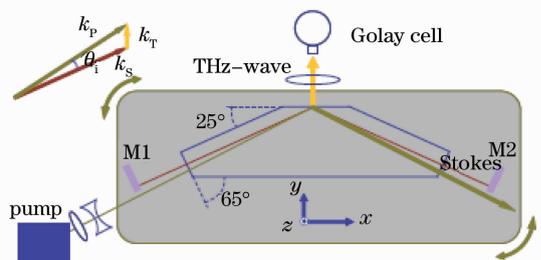
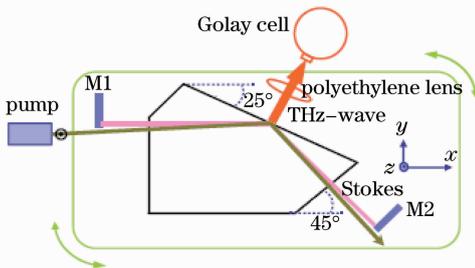


图 5 李忠洋等^[40~44]报道的浅表面出射方式 TPO

Fig. 5 Schematic diagram of surface-emitted TPO of Li et al. ^[40~44]

4 TPO 输出特性分析

4.1 频率调谐

TPO 输出波的频率调谐主要包括角度调谐、抽运波长调谐、温度调谐和周期调谐。周期极化晶体由于具有大的非线性系数、高的非线性转换效率、无走离效应等优点,目前已经被用于 TPO 中^[45]。基于这类晶体的调谐方式主要是通过周期和温度调谐实现的。

角度调谐法主要是指通过改变晶体中抽运光和信号光的夹角来实现对输出 THz 波的频率调谐,包括转动谐振腔和改变抽运光的入射角度两种方法。Kawase 等^[12]在最早实现的 TPO 中采用的是转动谐振腔的方法来实现 THz 波的频率调谐。2001 年,该研究组通过调整抽运光的入射角度实现了 THz 波的快速调谐^[46]。

角度调谐方法调整整个腔的角度,在可靠性和快速调谐上存在不足。近来,人们不断对现有的角度调谐结构进行改进并努力寻找其他更可靠的调谐方法。2008 年,Sun 等^[47]通过改变抽运光波长的方法实现了 TPO 的调谐,该方法有效克服了角度调谐方法的不足,

扩展了 TPO 的调谐范围,尤其是 THz 波在低频的调谐范围。日本仙台大学的研究人员在 2009 年又设计出了一种新型的圆形腔结构 TPO^[48],整个腔体由 3 片反射镜组成,通过调整底部腔镜角度,可以在 0.93~2.70 THz 范围内快速调整输出光频率。2011 年,Sun 等^[49]通过含角立方锥(CCP)和平面镜结构的谐振腔实现 TPO,如图 6 所示,有效提高了 TPO 的稳定性和频率调谐特性。他们使用的抽运源为调 Q Nd:YAG 激光器,输出波长 1064 nm,脉宽约 24 ns,重复频率 10 Hz。

4.2 线宽控制

THz 辐射线宽是衡量 TPO 性能的一个重要标志。较窄的谱线宽度可以提高信噪比和光谱系统的分辨率。普通的 TPO 输出线宽约为 50 GHz。Imai 等^[50,51]研究表明使用低能量、窄线宽种子光注入技术,将会减小 TPO 输出的线宽,接近或达到傅里叶变换的极限水平。2003 年,Imai 等^[52]通过种子光注入的方法实现了 THz 波线宽的压窄,种子注入光由 1.07 μm 连续光纤激光器发出,可实现谱宽优于 200 MHz 的 THz 波输出。2005 年,Kawase 等^[53]采用纳秒调 Q Nd:YAG 激光器为抽运源结合 MgO:LiNbO₃ 晶体,通过种子注入的方法实现了 TPO 的窄线宽 THz 波输出。2008 年,Allen 实验室的 Stothard 等^[54]又通过在参量振荡器谐振腔内放置一标准具的方法,实现了窄线宽(小于 1 GHz),1~3 THz 范围内连续可调谐的 THz 波输出。

5 级联 TPO

由于周期极化 LiNbO₃ 晶体对于 THz 波有较大的吸收系数(1 THz 时 $\alpha \approx 30 \text{ cm}^{-1}$, 3 THz 时 $\alpha \approx 250 \text{ cm}^{-1}$)^[55],所以基于该类晶体的连续波 TPO 的抽运阈值较高(百瓦量级)。通过光参量振荡器(OPO)中产生的级联参量过程得到连续 THz 波输出是在不高的抽运光功率下得到 THz 波输出的一种比较好的解决方案。这一方案中,共振信号光作为下一级前向或后向 THz 参量过程的抽运光,因此级联参量过程中抽运光和信号光同时共振,有效降低了抽运阈值。

Okishev 等^[56,57]最早在连续波 OPO 中观察到了信号光的级联参量过程,但都被他们归因于拉曼效应。同样,Molter 等^[58]和 Walsh 等^[32]分别在基于抽运增强结构和内腔结构的脉冲 TPO 实验中发现了级联参量过程,但并没有进行详细的分析。

Kiessling 等^[13]结合其在基于周期性极化(LiNbO₃)晶体、四镜环形腔结构的连续单谐振 OPO 得到的信号光光谱对级联光学参量过程进行了分析,该课题组的 Sowade 等^[45]又对该结构 OPO 输出的连续 THz 波进行了输出和测量。通过晶体温度和周期的调节可实现 1.3~1.7 THz 范围的连续 THz 波输出,功率水平

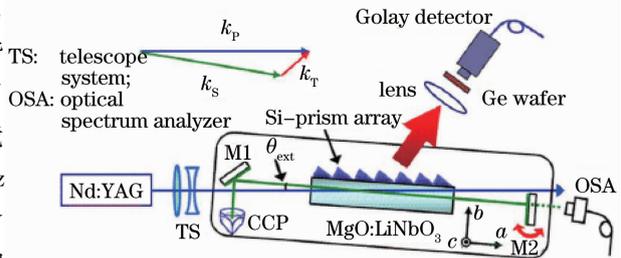


图 6 Sun 等^[49]报道的含角立方锥的 TPO
Fig. 6 Schematic diagram of TPO with CCP
of Sun *et al.* ^[49]

超过 $1 \mu\text{W}$ 。

2012年,国防科学技术大学的 Liu 等^[59]继续以连续单频光纤激光器作为抽运源,通过由周期性极化 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体和两镜线性腔构成的单谐振参量振荡器实现了信号光的级联参量过程。通过信号光的频移情况可以分析得出该振荡器产生了频率在 1.4 THz 和 3.1 THz 的输出。他们的结果如图 7 所示。

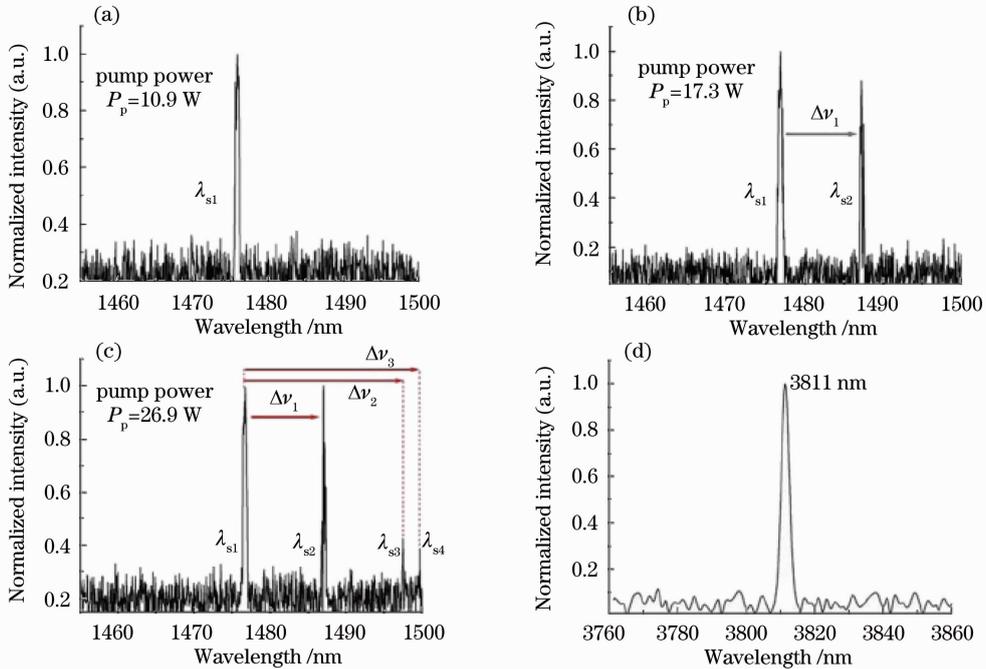


图 7 Liu 等^[59]实现的级联连续 TPO 信号光和闲频光光谱

Fig. 7 Measured signal and idler spectra of the TPO of Liu *et al.*^[59]

同年,该课题组,通过光纤激光器同步抽运的高重复频率皮秒 OPO 实现了振荡信号光的级联参量过程,经过分析该振荡器也得到了频率在 1.5 THz 和 3.2 THz 的输出^[60]。其结果如图 8 所示。

6 相关理论研究进展

1968年, Henry 等^[61]研究了与晶格振动过程相关的受激拉曼增益和参量增益放大过程,从理论上提出了基于受激电磁耦合子散射可以产生 THz 波。之后, Johnson 等^[62]从理论和实验上分析了不同功率下 THz 波源的输出特性。日本的研究人员对于 TPO 做了大量的研究工作, Ding 等^[63]于 1998 年提出了周期性极化 LiNbO_3 产生后向传播 THz 波的方案,并研究了其波矢情况及振荡阈值特性。2002 年,他们又从理论方面研究了相干与可调谐 TPO、THz 波发生器与放大器等^[64]。Shikata 等^[65]分析了抽运光的波长与功率密度对 THz 波产生的影响,分析结果表明短波长的抽运光将会提高转换效率,降低振荡阈值。

在国内,天津大学的研究人员同样在 TPO 的理论和特性分析上做了深入细致的工作。2010 年, Li 等^[66]从理论上分析了 TPO 的参量增益,推导了 TPO 的抽运阈值功率密度大小,并计算了抽运光和信号光的相干长度大小,重点分析了抽运光和信号光的耦合输出效率。2012 年,他们又分析了非共线相位匹配和准相位匹配的特点^[67]。推导了在非共线相位匹配结构中的参量增益长度,研究了在准相位匹配结构下周期极化 LiNbO_3 晶体和输出 THz 波的关系。Sun 等^[68]分析表明短波长的抽运光能够提高 TPO 的频率调谐范

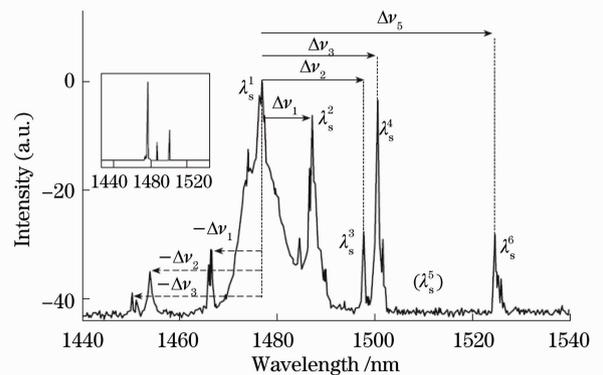


图 8 Liu 等^[60]实现的级联皮秒 TPO 信号光光谱

Fig. 8 Measured signal spectra of the picosecond TPO of Liu *et al.*^[60]

围、THz 波增益和它的输出方向稳定性。较长波长的抽运光将会加大相位匹配角,从而缩短 TPO 的腔长。

7 结束语

目前,TPO 以其体积小、频率连续可调谐、窄线宽(高单色性)、时间和空间相干性好且在室温下工作等优点,从而能够广泛应用于安全检查、生物传感、医学诊断、半导体器件检测等领域。它的发展趋势可总结为以下几点:

1) 随着人们对新型非线性材料的研究不断的深入,将来可以得到具有更大非线性系数、低 THz 波吸收系数的非线性晶体,以进一步提高 TPO 的各项性能指标;

2) 利用标准具、光栅以及种子光注入等技术来压缩 THz 波的线宽,有望期获得更窄线宽的 THz 波输出;

3) 利用光纤激光器和新型波导材料技术,发展全固化宽调谐高功率 TPO,具有高效率、长寿命、结构紧凑、体积小、质量轻等特点,是 TPO 未来发展的重要方向。

可以预见,随着新型非线性材料、光纤激光等技术的快速发展,TPO 将会朝着更加高效化、小型化、实用化、易于操作携带的方向发展,并在其应用领域中发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- 1 Lu Shuhua. Detection of explosives by terahertz spectroscopic techniques [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 040006
卢树华. 基于太赫兹光谱技术的爆炸物类危险品检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(4): 040006
- 2 Wang Gao, Zhou Hanchang, Yao Baodai *et al.*. Progress of terahertz spectroscopy detection technique of explosives [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 013001
王 高, 周汉昌, 姚宝岱 等. 爆炸物太赫兹光谱探测技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(1): 013001
- 3 M. Brueherseifer, M. Nagel, P. H. Bolivar *et al.*. Label-free probing of the binning state of DNA by time-domain terahertz sensing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(24): 4049~4051
- 4 Zhang Cunlin, Mu Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 023001
张存林, 牧凯军. 太赫兹波谱与成像 [J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(2): 023001
- 5 P. Knobloch, C. Schildknecht, T. Kleine-Ostmann *et al.*. Medical THz imaging: an investigation of histo-pathological samples [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2002, **47**(21): 3875~3884
- 6 T. Kiwa, M. Tonouchi, M. Yamashita *et al.*. Laser terahertz-emission microscope for inspecting electrical faults in integrated circuits [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(21): 2058~2060
- 7 N. Karpowicz, H. Zhong, C. L. Zhang *et al.*. Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(5): 054105
- 8 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
- 9 Wang Bingbing, Huang Jingguo, Lu Jinxing *et al.*. Terahertz wave sources based on difference frequency generation and optical parametric processes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(5): 051901
王兵兵, 黄敬国, 陆金星 等. 基于非线性光学差频及参量效应的太赫兹源 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(5): 051901
- 10 N. E. Yu, C. Kang, H. K. Yoo *et al.*. Simultaneous forward and backward terahertz generations in periodically poled stoichiometric LiTaO₃ crystal using femtosecond pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(4): 041104
- 11 Yuma Takida, Tatsuya Ohira, Yuzuru Tadokoro *et al.*. Coherent electro-optical detection of THz-wave generated from synchronously pumped picosecond THz parametric oscillator [C]. *SPIE*, 2012, **8240**: 82400A
- 12 K. Kawase, M. Sato, T. Taniuchi *et al.*. Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO₃ with monolithic grating coupler [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(18): 2483~2485
- 13 J. Kiessling, R. Sowade, I. Breunig *et al.*. Cascaded optical parametric oscillations generating tunable terahertz waves in periodically poled lithium niobate crystals [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(1): 87~91
- 14 W. Shi, Y. J. Ding. A monochromatic and high-power terahertz source tunable in the ranges of 2.7~38.4 and 58.2~3540 μm for

- variety of potential applications [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(10): 1635~1637
- 15 Y. J. Ding, W. Shi. Widely tunable monochromatic THz sources based on phase-matched difference-frequency generation in nonlinear-optical crystals: a novel approach [J]. *Laser Physics*, 2006, **16**(4): 562~570
- 16 T. Tanabe, K. Suto, J. Nishizawa *et al.*. Frequency-tunable high-power terahertz wave generation from GaP [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(8): 4610~4615
- 17 S. Y. Tochitsky, J. E. Ralph, C. Sung *et al.*. Generation of megawatt-power terahertz pulses by noncollinear difference-frequency mixing in GaAs [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(2): 026101
- 18 K. Kawase, M. Mizuno, S. Sohma *et al.*. Difference-frequency terahertz-wave generation from 4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium-tosylate by use of an electronically tuned Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(15): 1065~1067
- 19 S. Jun-ichi, M. Sato, T. Taniuchi *et al.*. Enhancement of terahertz-wave output from LiNbO₃ optical parametric oscillators by cryogenic cooling [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(4): 202~204
- 20 K. Ken-ichi, S. Jun-ichi, K. Kodo *et al.*. Terahertz-wave parametric generation characteristics of MgO:LiNbO₃ [J]. *Electron. Comm. Jpn. Pt. II*, 1999, **85**(4): 22~29
- 21 J. Shikata, K. Kawase, K. Karino *et al.*. Tunable terahertz-wave parametric oscillators using LiNbO₃ and MgO:LiNbO₃ crystals [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2000, **48**(4): 653~661
- 22 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
- 23 R. Sowade, I. Breunig, C. Tulea *et al.*. Nonlinear coefficient and temperature dependence of the refractive index of lithium niobate crystals in the terahertz regime [J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **99**(1-2): 63~66
- 24 Sun Bo, Liu Jinsong, Ling Furi *et al.*. Investigation of the operation characteristics of terahertz wave parametric oscillator based on LiTaO₃ [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1745~1751
- 孙博, 刘劲松, 凌福日等. 基于钽酸锂晶体的太赫兹波参量振荡器运转特性的研究 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 1745~1751
- 25 Bingxia Wang, Wei Hao. The research of THz optical parametric oscillator based on ZnGeP₂ crystal [C]. *SPIE*, 2011, **8195**: 81950W
- 26 Yu. A. Shakirl, V. R. Sorochenko, A. I. Gribenyukov. Parametric oscillation of high-power 3-THz pulse by synchronously pumped ZnGeP₂ crystal: computer simulation [J]. *Physics of Wave Phenomena*, 2010, **18**(4): 240~244
- 27 A. C. Chiang, T. D. Wang, Y. Y. Lin *et al.*. Enhanced terahertz-wave parametric generation and oscillation in lithium niobate waveguides at terahertz frequencies [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24): 3392~3394
- 28 T. D. Wang, Y. Y. Lin, S. Y. Chen *et al.*. Low-threshold, narrow-line THz-wave parametric oscillator with an intracavity grazing-incidence grating [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12571~12576
- 29 Zhang Xianbin, Shi Wei. Optimize the output performance by shortening the cavity length of the THz electromagnetic wave parametric oscillator [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5237~5241
- 张显斌, 施卫. 用短谐振腔结构优化 THz 电磁波参量振荡器的输出特性 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(10): 5237~5241
- 30 T. J. Edwards, D. Walsh, M. B. Spurr *et al.*. Compact source of continuously and widely-tunable terahertz radiation [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4): 1582~1589
- 31 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
- 32 D. Walsh, P. G. Browne, M. H. Dunn *et al.*. Intracavity parametric generation of nanosecond terahertz radiation using quasi-phase-matching [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(13): 13951~13963
- 33 J. Q. Yao, Y. Y. Wang, D. G. Xu *et al.*. High-energy, continuously tunable intracavity terahertz-wave parametric oscillator [J]. *Terahertz Science and Technology*, 2009, **2**(2): 49~56
- 34 J. Kiessling, F. Fuchs, K. Buse *et al.*. Pump-enhanced optical parametric oscillator generating continuous wave tunable terahertz radiation [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(22): 4374~4376
- 35 Takida Yuma, Maeda Shingo, Ohira Tatsuya *et al.*. Noncascading THz-wave parametric oscillator synchronously pumped by mode-locked picosecond Ti:sapphire laser in doubly-resonant external cavity [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(19): 4663~4666
- 36 M. A. Piestrup, R. N. Fleming, R. H. Pantell. Continuously tunable submillimeter wave source [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**(8): 418~421
- 37 K. Kawase, Manabu Sato, Koichiro Nakamura *et al.*. Unidirectional radiation of widely tunable THz wave using a prism coupler under noncollinear phase matching condition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(6): 753~755

- 38 K. Kawase, Jun-ichi Shikata, Hiroaki Minamide *et al.*. Arrayed silicon prism coupler for a terahertz-wave parametric oscillator [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(9): 1423~1426
- 39 Tomofumi Ikari, Xianbin Zhang, Hiroaki Minamide. THz-wave parametric oscillator with a surface-emitted configuration [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4): 1604~1610
- 40 Zhongyang Li, Jianquan Yao, Degang Xu *et al.*. Study on the generation of high-power terahertz wave from surface-emitted THz-wave parametric oscillator with MgO:LiNbO₃ crystal [C]. *SPIE*, 2010, **7854**: 78543H
- 41 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*, 2011, **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*, 2011, **38**(4): 0411002
- 42 Li Zhongyang, Yao Jianquan, Xu Degang *et al.*. High-power terahertz radiation from surface-emitted THz-wave parametric oscillator [J]. *Chin. Phys. B*, 2011, **20**(5): 054207
- 43 Li Zhongyang, Yao Jianquan, Xu Degang *et al.*. Output enhancement of a THz wave based on a surface-emitted THz-wave parametric oscillator [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(11): 114201
- 44 Li Zhongyang, Yao Jianquan, Lü Da *et al.*. High-power terahertz radiation based on a compact eudipleural THz-wave parametric oscillator [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(6): 064209
- 45 R. Sowade, I. Breunig, Iván Cámara Mayorga *et al.*. Continuous-wave optical parametric terahertz source [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(25): 22303~22310
- 46 K. Imai, K. Kawase, H. Ito. A frequency-agile terahertz-wave parametric oscillator [J]. *Opt. Express*, 2001, **8**(13): 699~704
- 47 Bo Sun, Jinsong Liu, Enbang Li. Investigation of a novel frequency-tuning method for terahertz-wave parametric oscillators [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 20817~20825
- 48 Hiroaki Minamide, Tomofumi Ikari, Hiromasa Itom. Frequency-agile terahertz-wave parametric oscillator in a ring-cavity configuration [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2009, **80**(12): 123104
- 49 Bo Sun, Sanxing Li, Jinsong Liu *et al.*. Terahertz-wave parametric oscillator with a misalignment-resistant tuning cavity [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(10): 1845~1847
- 50 K. Imai, K. Kawase, Jun-ichi Shikata *et al.*. Injection-seeded terahertz-wave parametric oscillator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(8): 1026~1028
- 51 K. Kawase, Jun-ichi Shikata, K. Imai *et al.*. Transform-limited, narrow-linewidth, terahertz-wave parametric generator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(19): 2819~2821
- 52 K. Imai, S. Sugawara, J. Shikata. The effect of injection seeding on terahertz parametric oscillation [J]. *Electron. Comm. Jpn. Pt. II*, 2003, **86**(4): 26~35
- 53 K. Kawase, Yuichi Ogawa, Hiroaki Minamide *et al.*. Terahertz parametric sources and imaging applications [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, **20**(7): S258
- 54 D. J. M. Stothard, T. J. Edwards, D. Walsh *et al.*. Line-narrowed, compact, and coherent source of widely tunable terahertz radiation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(14): 141105
- 55 L. Palfalvi, J. Hebling, J. Kuhl *et al.*. Temperature dependence of the absorption and refraction of MgO-doped congruent and stoichiometric LiNbO₃ in the THz range [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(12): 123505
- 56 A. V. Okishev, J. D. Zuegel. Intracavity-pumped Raman laser action in a mid-IR, continuous-wave (CW) MgO:PPLN optical parametric oscillator [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25): 12169~12173
- 57 A. Henderson, R. Stafford. Spectral broadening and stimulated Raman conversion in a continuous-wave optical parametric oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(10): 1281~1283
- 58 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
- 59 L. Liu, X. Li, T. Liu *et al.*. Cascaded continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator pumped by a single-frequency fiber laser [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2012, **44**(5): 1214~1218
- 60 T. Liu, L. Liu, X. B. Wang *et al.*. Cascaded synchronous terahertz optical parametric oscillations in a single MgO:PPLN crystal [J]. *Laser Physics*, 2012, **22**(4): 678~683
- 61 C. H. Henry, C. G. B. Garrett. Theory of parametric gain near a lattice resonance [J]. *Phys. Rev.*, 1968, **171**(3): 1058~1064
- 62 B. C. Johnson, H. E. Puthoff, J. Soohoo *et al.*. Power and linewidth of tunable stimulated far-infrared emission in

- LiNbO₃[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**(5): 181~183
- 63 Yujie J. Ding, Jacob B. Khuurgin. A new scheme for efficient generation of coherent and incoherent submillimeter to THz waves in periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **148**(1-3): 105~109
- 64 Yujie J. Ding, Ioulia B. Zotova. Coherent and tunable terahertz oscillators, generators, and amplifiers [J]. *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.*, 2002, **11**(1): 75~97
- 65 J. Shikata, K. Kawase, M. Sato *et al.*. Characteristics of coherent terahertz wave generation from LiNbO₃ optical parametric oscillator [J]. *Electron. Comm. Jpn. Pt. II*, 1999, **82**(5): 46~53
- 66 Li Zhongyang, Yao Jianquan, Zhu Nengnian *et al.*. Threshold analysis of a THz-wave parametric oscillator [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(6): 064202
- 67 Zhongyang Li, Pibin Bing, Degang Xu *et al.*. Investigation on phase matching in a THz-wave parametric oscillator [J]. *Optoelectronics Letters*, 2012, **8**(1): 29~32
- 68 Sun Bo, Liu Jinsong, Li Enbang. Investigation of pump-wavelength dependence of terahertz-wave parametric oscillator based on LiNbO₃[J]. *Chin. Phys. B*, 2009, **18**(7): 2846~2852