

双波长光参量振荡器的研究进展及应用

田金荣*, 刘京徽, 宋晏蓉, 张新平
(北京工业大学 应用数理学院, 北京 100124)

摘要: 双波长光参量振荡器是一类非常新颖的激光器件。本文阐述了双波长光参量振荡器的工作原理,并总结了双波长光参量振荡器的研究进展,探讨了双波长光参量振荡器发展中存在的技术问题,介绍了双波长光参量振荡器的应用。

关键词: 光参量振荡器; 双波长

中图分类号: TN753.91 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20140705.0723

Advances and applications of dual-wavelength optical parametric oscillators

TIAN Jin-rong*, LIU Jing-hui, SONG Yan-rong, ZHANG Xin-ping
(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

* Corresponding author, E-mail: jrtian@bjut.edu.cn

Abstract: Dual-wavelength optical parametric oscillator is a new-type of nonlinear laser devices. In this paper, the principle of dual-wavelength optical parametric oscillators is introduced. The research advances in dual-wavelength optical parametric oscillators are reviewed. Scientific and technological problems that dual wavelength optical parametric oscillators encountered are discussed. Several applications of dual-wavelength optical parametric oscillators are presented.

Key words: optical parametric oscillator; dual wavelength

1 引言

超短脉冲激光在物理、材料、化学、生物信息等应用领域具有重要的应用价值。由于其极短的时间特性,成为人们在极短时间范围“时间”范畴上取得新发现的重要手段。但是对于很多领域来说,单波长超短脉冲激光的作用具有局限性,如某些超快泵浦-探测实验^[1]就需要双波长超短脉冲来完成,一束激光用来激发研究对象,另一束波长不同的激光用来探测研究对象被激发后的行为。双波长超短脉冲拥有超短脉冲所有的优势,并且有两个不同波长,使其成为众多研究领域的重要工具。例如利用双波长超短脉冲的差频,可以产生中红外^[2]乃至 THz 波段的电磁辐射^[3];利用双波长超短脉冲的相干合成有望合成周期直至阿秒量级的超短脉冲^[4];利用两束超短脉冲激光的共同作用,可以实现对原子、分子的相干控制^[5];在量子密码通讯中需要的纠缠态也可以由双波长的超短脉冲激光获得^[6]。由此可见,对双波长超短脉冲激光进行研究,不仅是激光技术领域的研究热点,并能够持续不断地推动多个领域的发展。

双波长超短脉冲激光已经在多个固体激光系统中实现,如钛蓝宝石^[7-8],钛蓝宝石/镁橄榄石系统^[9]等。但受到固体激光材料增益区间的限制,所产生的激光波段有限,因此大范围可调谐的光参量振荡器(OPO)^[10-11]引人注目。OPO天然具有两个波长的输出,即信号光和闲频光,可称为广义上的双波长输出。但信号光和闲频光的波长和功率往往相差很大,不利于应用。一些研究者在进行可调谐光参量振荡器实验中,观察到 OPO 出现了两个信号光振荡的现象(与之对应也会有两个闲频光振荡),即双信号光输出的 OPO,可称为狭义的双波长 OPO。

OPO 输出的双波长激光与固体激光器所产生双波长激光是不同的。固体激光所产生的双波长激光尽管同步精度很高,但其相位并未锁定。在光频标、相干合成等领域应用时,尚需利用复杂的光路对其相位进行锁定。OPO 所产生的双波长激光由于来自同一束泵浦光,相位是同步的。又由于两束光都满足相位匹配关系,因此相位是

一致的。由此可见双波长的 OPO 具有天然的优势,已成为非线性光学中一类非常新颖的激光器件。本文将介绍双波长 OPO 的工作原理、研究进展和相关应用。

2 双波长光参量振荡器的工作原理及研究进展

实现 OPO 的双波长输出需要两个条件:(1)两个信号光都要满足相位匹配关系;(2)两个信号光在 OPO 内的参量增益要大于损耗。而根据相位匹配理论,采用双折射相位匹配的非线性晶体难以同时满足这两个条件。因此,人们通常采用两块晶体来实现。如 2003 年, Gunnar Rustad 等人在 ZGP-OPO 实验中观察到了双波长现象,并进行了 8~11 μm 范围的调谐操作^[12]。2004 年,日本东北大学 T. Taniuchi 等人通过在 OPO 腔内泵浦两个 KTP 晶体获得了可调谐双波长输出。该 OPO 输出波长依赖于调节 KTP 角度,但由于高反射损失和非线性系数小,从而预期阈值高,使 OPO 运行限制在低重复频率^[13]。2006 年,日本东北大学 K. Suizu 等人组建了腔内具有两块 KTP 晶体的光参量振荡器^[14],实现了双波长输出。2010 年,中国山东大学 J. F. Yang 等人^[15]首次实现了在腔内泵浦一块 KTA 晶体,输出双波长的实验,其输出信号光波长分别为 1.7 μm 和 1.9 μm 。2012 年,日本 Takashi Notake 等人腔内放置两块切割角不同的 BBO 晶体组成 OPO(图 1)^[3],使两个信号光分别满足 BBO1 和 BBO2 的相位匹配,实现了双波长输出。



图 1 双波长 BBO-OPO 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dual-wavelength BBO-OPO

周期极化晶体的出现改变了双波长 OPO 采用两个晶体的状况。人们可以在一块晶体上制作

不同的周期,或者使相位在一定长度反转,使两个信号光满足不同的相位匹配关系。2010 年,天津大学姚建铨院士研究组采用相位反转 PPMgLN 晶体实现了双波长 OPO 输出^[16],如图 2 所示。两信号光满足的相位匹配关系为:

$$\begin{cases} \frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_{s1}}{\lambda_{s1}} - \frac{n_{i1}}{\lambda_{i1}} - \frac{1}{\Lambda_0} - \frac{1}{\Lambda_{ph}} = 0 \\ \frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_{s2}}{\lambda_{s2}} - \frac{n_{i2}}{\lambda_{i2}} - \frac{1}{\Lambda_0} + \frac{1}{\Lambda_{ph}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

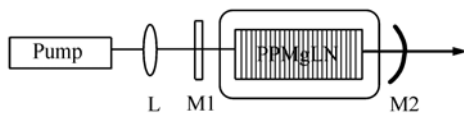
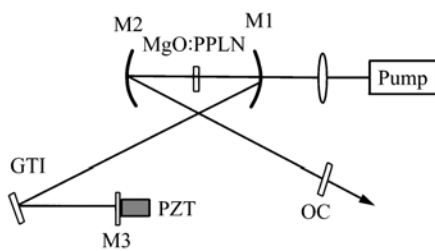


图 2 双波长 PPMgLN-OPO 示意图

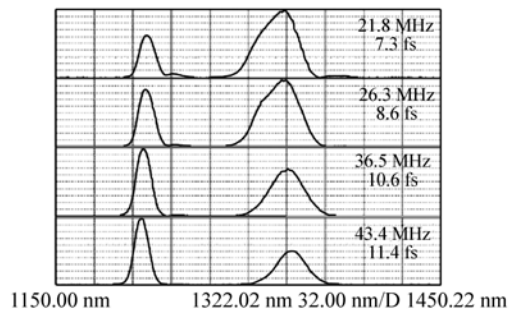
Fig. 2 Schematic diagram of dual-wavelength PPMgLN-OPO

对锁模的光参量振荡器来说,由于其泵浦光为锁模激光,因此参量光需要与泵浦光实现同步,称之为同步泵浦光参量振荡器(SPOPO)。在同

步泵浦光参量振荡器中,同步与相位匹配的共同作用会产生双波长输出。2006 年,英国赫瑞瓦特大学孙敬华等人在同步泵浦 MgO:PPLN-OPO 中观察到了双波长的现象^[17]。图 3(a)为其激光装置,其中 GTI 为提供负色散的啾啾镜,图 3(b)为光谱。输出光谱的波长集中在 1.22 和 1.33 μm 左右,波长调谐范围不到 10 nm。他们认为在色散的作用下,1.22 和 1.33 μm 的信号光在腔内延时相等,因此出现双波长现象。2007 年,意大利帕维亚大学 Luca Tartara 在皮秒激光泵浦的环形腔同步泵浦 PPLN-OPO 中也观察到了双波长现象^[18],两个波长间距大约 40 nm,通过 PPLN 温度调谐范围从 1500 ~ 1700 nm。同年,天津大学姚建铨研究组采用同一个 OPO 腔内泵浦多光栅 PPLN 晶体和单光栅 MgO:PPLN 晶体,首次实现了在准相位匹配条件下的高重复频率 50 kHz 双波长输出,产生 1.5 μm 输出波段的双信号波长。通过调整温度和晶体的光栅周期,波长的间隔可从 2.5 nm 调节到 69.1 nm^[19],如图 4 所示。



(a) 实验装置
(a) Experiment setup



(b) 光谱
(b) Spectra

图 3 同步泵浦 MgO:PPLN-OPO 中观察到的双波长现象^[17]

Fig. 3 Dual-wavelength phenomena in synchronously pumped MgO:PPLN-OPO^[17]

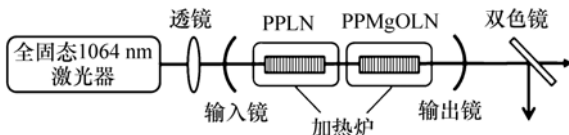


图 4 基于 PPLN 和 MgO:PPLN 晶体的双波长输出光参量振荡器^[19]

Fig. 4 Dual-wavelength OPO based on PPLN and MgO:PPLN crystal^[19]

2011 年,西班牙光子科学研究所 G. K. Samanta 等人通过在一个四镜环形腔泵浦两个 30 mm 长的 MgO:PPLT 晶体,得到双波长输出^[20]。图 5(a)为其激光装置;图 5(b)为不同温度下的双波长输出功率归一化曲线。

该装置优势在于降低阈值,提高信号光输出功率,同时减少源于泵浦源吸收的热效应。通过调节晶体温度,可得到在 850 ~ 1 430 nm 范围内的双波长输出。

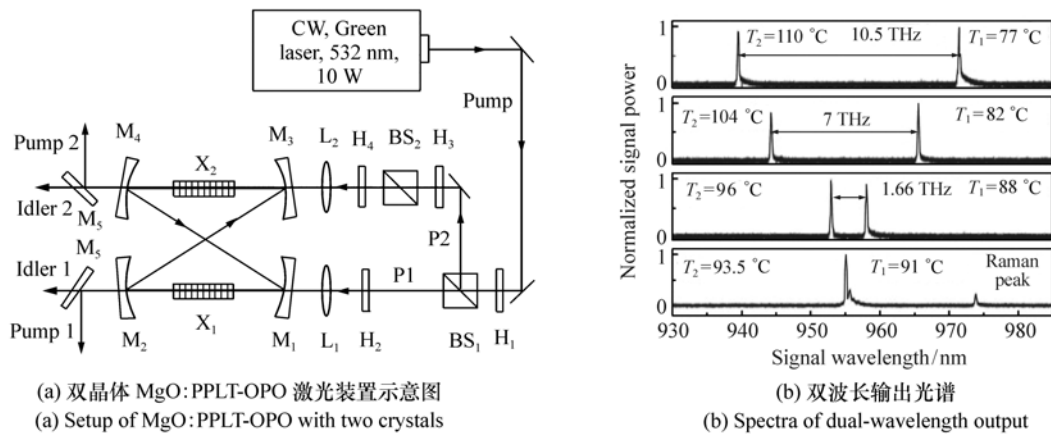


图5 双晶体 MgO:PPLT-OPO^[20] 激光装置示意图及双波长输出光谱^[20]

Fig. 5 Setup of MgO:PPLT-OPO with two crystals^[20] and spectra of dual-wavelength output^[20]

2011年,德国斯图加特大学 Robin Hegenbarth 等人通过设计啁啾镜,对腔内的色散进行控制,可以使两个波长的延时相等,从而获得双波长输出^[21]。图6显示了其实验结果。两个波长的中心位于 1 566 和 1 809 nm 附近,可调谐范围很小。

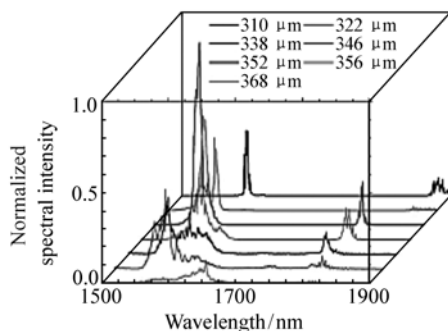


图6 色散控制产生的双波长光谱^[21]

Fig. 6 Generated dual-wavelength spectra by dispersion management^[21]

2012年,中国科学院物理研究所魏志义研究组在未特别进行色散控制的同步泵浦 PPLN-OPO 内观察到了双波长现象^[22],波长调谐范围约为 50 nm,两个波长的平均值在 1 100 nm 左右(如图7所示)。他们认为双波长振荡不完全决定于净零色散,两个信号光之间相位匹配与群速失配的平衡更为重要。

从双波长的 OPO 发展来看,虽然在多个同步泵浦 OPO 中观察到了双波长振荡现象并在某种程度上实现了调谐,但调谐范围都较为有限。Lu-

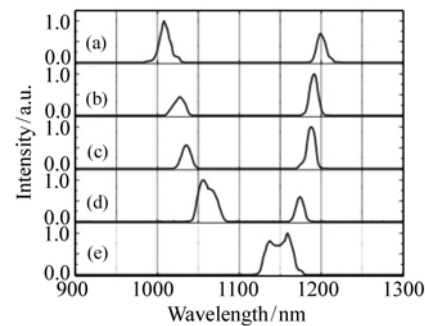


图7 输出双波长随腔长的变化^[22]

Fig. 7 Relationship between dual-wavelength and cavity length^[22]

ca Tartara 等人的调谐范围虽然大,但是两个波长之间的间距是固定的,如果进行差频所获得的波段有限。Robin Hegenbarth 等人对色散设计实现双波长输出是一个有效的控制方案,但啁啾镜的设计与加工是一个比较复杂的技术问题,并且理想的色散曲线在实际啁啾镜制作中不一定能完全实现,所以对实验效果有一定的影响。另外还有一个重要的物理问题尚未解决,即在双波长输出过程中到底是零色散还是相位匹配的群速失配平衡起了主要作用,尚不明确。因此还有一些物理及技术问题有待在双波长 OPO 的发展过程中解决。

3 双波长光参量振荡器的应用

目前,双波长光参量振荡器已经获得了长足

发展,并在一些重要领域开始展现其应用价值。双波长光参量振荡器在红外区域输出的可调谐双波长激光,可用于物质或组分的差分吸收激光雷达测量。1997年,英国国家物理实验室 M. J. T. Milton 等人利用铌酸锂晶体实现双波长光参量振荡输出,两个波长的间距为 90 nm。他们利用此光源对空气中的甲烷进行了远程差分吸收激光雷达测量^[23],成功获取了甲烷的浓度。1998年, A. R. Geiger 等人以 MgO:LiNbO₃ 与 KTA 晶体组成 OPO,在 2~5 μm 实现了多波长输出,该系统可用于空气中甲烷的检测^[24]。2000年, E. V. Degtiarev 等人利用两块倾斜放置的 KTA 晶体组成体积小巧的 OPO,在 3.30~3.47 μm 实现了双波长输出,并利用该激光器对汽油和甲醇溶剂进行了近程差分吸收激光雷达测量^[25]。可以认为,由于双波长光参量振荡器的波段及波长间距可调,对更多的物质或组分进行差分吸收激光雷达测量是很有可能的。

双波长光参量振荡器最主要的应用在于差频。目前中远红外及太赫兹波段是激光波段很难覆盖的,差频方法恰好弥补了这个不足。双波长参量振荡光的波段和波长间距灵活可调,因此在多种非线性晶体内实现差频可获得大范围可调谐的中远红外及太赫兹^[26]输出。2000年,日本光动力学研究中心 Kodo Kawase 等人以双周期 PPLN(29.3 μm 及 29.5 μm) 为非线性晶体组建光参量振荡器,获得了波长分别为 1.529 和 1.546 μm 的双波长输出。将两束激光聚焦至 DAST 晶体进行差频,获得了波长为 139 μm 的太赫兹波输出。通过温度调谐可以使光参量振荡器的信号光波长间隔在 15~20 nm 之间变化,通过 DAST 晶体差频可以获得调谐范围在 120~160 μm 的太赫兹辐射^[27]。如再对晶体的周期进行改进,则可望将太赫兹辐射的调谐范围扩展至 100~700 μm。2004年, T. Taniuchi 等人通过泵浦两块 KTP 晶体的双波长光参量振荡器作为产生 THz 波的光源^[13],实现了可调谐 THz 波的输出。由于 KTP 晶体的损伤阈值高,并且波长调谐范围大、转换效率高,因此腔内放置两块 KTP 晶体的双波长光参量振荡器,已经成为产生太赫兹辐射的重要光源。2006年,天津大学姚建铨研究组在

利用两块不同周期的 PPLN 晶体组成 OPO,在 1.5 μm 左右获得双波长输出,波长间距在 2.5~69.1 nm,可产生 0.3~8.9 THz 的太赫兹输出^[28];并在理论上研究了采用 PPKTP 晶体获得双波长 OPO 输出,并差频获得 THz 输出的可行性^[29];2010年,该组利用两个 KTP 晶体组成 OPO,在 2.128 μm 实现了双波长输出,在 GaSe 晶体中通过差频产生在 0.186~3.7 THz 波段获得了高功率输出^[30];2013年,该组利用类似的双波长 OPO 光源在准相位匹配 GaAs 晶体中差频获得了范围在 0.06~3.34 THz 的可调谐相干太赫兹辐射^[31]。2007年,美国斯坦福大学 Fejer 课题组以 PPLN 为非线性晶体组建同步泵浦光参量振荡器,采用双谐振方式获得 2 107 nm 及 2 150 nm 的脉冲激光,并采用准相位匹配 GaAs 晶体在腔内差频获得 2.8 THz 的脉冲输出^[32]。2012年, Takashi Notake 等人利用 BBO 晶体取代 KTP 晶体组建了双波长光参量振荡器。以调 Q 激光器为泵浦,获得了波长调谐分别为 0.8~1.3 μm 和 1.2~1.6 μm 的双波长输出。并利用这两个波长在有机非线性晶体 DAST 及 BNA 内进行差频获得了 1~30 THz 的脉冲输出^[3]。采用 OPO 输出的激光进行差频也可以获得宽波段调谐的中红外激光^[33]。1998年, K. S. Abedin 等人采用基于 LiNbO₃ 晶体的光参量振荡器输出的信号光和闲频光在 AgGaSe₂ 晶体内进行差频,获得了调谐范围在 5~18 μm 的中红外激光输出^[34]。1999年, Sajjad Haidar 等人利用基于 LiNbO₃ 的光参量振荡器输出的信号光和闲频光在 AgGaSe₂ 晶体内进行差频,获得了调谐范围为 5~12 μm 的中红外激光输出^[35]。2012年, Robin Hegenbarth 以 MgO:PPLN 为非线性晶体组建同步泵浦光参量振荡器,分别在 1 563~1 621 nm, 1 795~1 859 nm 波段获得了双波长输出,并利用此光源在 GaSe 内进行差频获得了 10.5~16.5 μm 的中红外飞秒激光输出^[36]。

锁模的双波长光参量振荡器在光频标及光学合成方面也有一定的应用。由于锁模的光参量振荡器输出的两个波长来自于同一个泵浦光,因此是同步的。同时由于获得光参量振荡需要与同一个泵浦光满足相位匹配关系,因此两个波长相位一致,省略了相位控制的调节。文献[17]已在实

验上证实了双波长光参量振荡器的这种优势。通过这两个波长之间的差频可以获得相位稳定的频率梳。同时这两个波长可以实现光学合成,从而为合成更短的脉冲创造条件。文献[4]已在实验上对光参量放大器产生的双波长激光进行光学合成,最终合成0.8个振荡周期的超短脉冲。光参量振荡器在相位关系上与光参量放大器是一致的,因此最终进行光学合成也是可能的。

4 结束语

本文介绍了双波长光参量振荡器的工作原理及光参量振荡器在技术上实现双波长输出的手段,包括采用双非线性晶体,或者利用色散控制,温度控制实现双波长输出,同时分析了各种方法的优势与不足。对双波长光参量振荡器发展中存在的技术问题进行了讨论。并介绍了双波长光参

量振荡器在差分吸收测量、中红外激光及太赫兹辐射的产生、光频标及光学合成方面的应用。说明双波长光参量振荡器是一种具有重要研究价值的新型非线性光学器件。

纵观近十几年的发展,双波长光参量振荡器无论是在波长调谐、脉冲宽度及其应用方面都有显著的进步。这不仅得益于优良的非线性晶体的出现,也得益于啁啾镜等光学元件性能的提高。但是在发展过程中,光参量振荡器的调谐范围、调节方式及其应用方面都还有很大的发展空间,双波长输出的物理机制也有待深入的研究。我们相信随着非线性晶体和光学元器件性能的提高,双波长光参量振荡器也会在波长调谐范围、光谱宽度、脉冲宽度、平均功率、峰值功率等方面得到提高,并在光学差频、光频标、光学合成等方面得到更为广泛的应用。

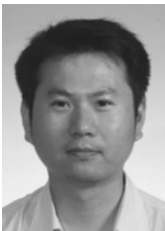
参考文献:

- [1] GALE G M, GALLOT G, HACHE F, *et al.*. Femtosecond dynamics of hydrogen bonds in liquid water: a real time study [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82(5):1068-1071.
 - [2] BARROS M R, MIRANDA R S, JEDJU T M, *et al.*. High-repetition-rate femtosecond mid-infrared pulse generation [J]. *Opt. Lett.*, 1995, 20(5):480-482.
 - [3] NOTAKE T, NAWATA K, KAWAMATA H, *et al.*. Development of an ultra-widely tunable DFG THz source with switching between organic nonlinear crystals pumped with a dualwavelength BBO optical parametric oscillator [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(23):25850-25857.
 - [4] HUANG S W, CIRMI G, MOSES J, *et al.*. High-energy pulse synthesis with sub-cycle waveform control for strong-field physics [J]. *Nat. Photonics*, 2011, 5:475-479.
 - [5] ASSION A, BAUMERT T, BERGT M, *et al.*. Control of chemical reactions by feedback-optimized phase-shaped femtosecond laser pulses [J]. *Science*, 1998, 282(5390):919-922.
 - [6] YANG T, ZHANG Q, CHEN T Y, *et al.*. Experimental synchronization of independent entangled photon sources [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96:110501.
 - [7] ZHANG Z G, YAGI T. Dual-wavelength synchronous operation of a mode-locked Ti:sapphire laser based on self-spectrum splitting [J]. *Opt. Lett.*, 1993, 18(24):2126-2128.
 - [8] TIAN J R, WEI Z Y, WANG P, *et al.*. Independently tunable 1.3 W femtosecond Ti:sapphire lasers passively synchronized with attosecond timing jitter and ultrahigh robustness [J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(16):2161-2163.
 - [9] WEI Z, KABOYASHI Y, TORIZUKA K. Passive synchronization between femtosecond Ti:sapphire and Cr:forsterite lasers [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, 74(Suppl.):S171-S176.
 - [10] DUNN M H, EBRAHIMZADEH M. Parametric generation of tunable light from continuous-wave to femtosecond pulses [J]. *Science*, 1999, 286:1513-1517.
 - [11] 苏辉,李志平,段延敏,等.基于掺镁周期极化铌酸锂晶体的内腔单共振连续可调谐光参量振荡器[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6):1404-1409.
- SU H, LI ZH P, DUAN Y M, *et al.*. Intra-cavity singly resonant optical parametric oscillator based on magnesium-doped periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1404-1409. (in Chinese)

- [12] RUSTAD G, NICOLAS S, LIPPERT E, *et al.*. Tuning and dual wavelength operation of a ZGP OPO in the 8 ~ 11 micron range[J]. *OSA Trends in Optics and Photonics*, 2003:333-338.
- [13] TANIUCHI T, OKADA S, NAKANISHI H. Widely tunable terahertz-wave generation in an organic crystal and its spectroscopic application[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 95(11):5984-5988.
- [14] SUIZU K, NAWAHARA A, YAMASHITA T, *et al.*. Random frequency accessible broad tunable THz-wave source using phase-matched DAST crystal DFG[J]. *SPIE*, 2006, 61030:61030A.
- [15] YANG J F, LIU S D, HE J L, *et al.*. Tunable simultaneous dual-wavelength laser at 1.9 and 1.7 μm based on KTiOAsO_4 optical parametric oscillator[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2011, 8(1):28-31.
- [16] JI F, LU R S, LI B S, *et al.*. High-average-power, high-repetition-rate dual signal optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, 8(5):505-507.
- [17] SUN J H, GALE B J, REID D T. Dual-color operation of a femtosecond optical parametric oscillator exhibiting stable relative carrier-envelope phase-slip frequencies[J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(13):2021-2023.
- [18] TARTARA L. Simple and versatile dual-signal wave optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(9):1105-1107.
- [19] ZHANG T L, YAO J Q, ZHU X Y, *et al.*. Widely tunable, high-repetition-rate, dual signal-wave optical parametric oscillator by using two periodically poled crystals[J]. *Opt. Commun.*, 2007, 272(1):111-115.
- [20] SAMANTA G K, EBRAHIM-ZADEH M. Dual-wavelength, two-crystal, continuous-wave optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(16):3033-3035.
- [21] HEGENBARTH R, STEINMANN A, TOTH G, *et al.*. Two-color femtosecond optical parametric oscillator with 1.7 W output pumped by a 7.4 W Yb:KGW laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, 28(5):1344-1352.
- [22] XU L, ZHONG X, ZHU J F, *et al.*. Efficient femtosecond optical parametric oscillator with dual-wavelength operation[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(9):1436-1438.
- [23] MILTON M J T, GARDINER T D, MOLERO F, *et al.*. Injection-seeded optical parametric oscillator for range-resolved DIAL measurements of atmospheric methane[J]. *Opt. Commun.*, 1997, 142:153-160.
- [24] GEIGER A R, DEGTIAREV E V, FARR W H, *et al.*. Mid-infrared multiwavelength source for lidar applications[J]. *SPIE*, 1998, 3380:63-69.
- [25] DEGTIAREV E V, GEIGER A R, RICHMOND R D. Compact dual wavelength 3.30-3.47- μm DIAL lidar[J]. *SPIE*, 2000, 4036:229-235.
- [26] 叶全意, 杨春. 光子学太赫兹源研究进展[J]. *中国光学*, 2013, 5(1):1-11.
YE Q Y, YANG CH. Recent progress in THz sources based on photonics methods[J]. *Chinese Optics*, 2013, 5(1):1-11. (in Chinese)
- [27] KAWASE K, HATANAKA T, TAKAHASHI H, *et al.*. Tunable terahertz-wave generation from DAST crystal by dual signal-wave parametric oscillation of periodically poled lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(23):1714-1716.
- [28] ZHANG T L, ZHU X Y, ZHAO P, *et al.*. Widely tunable, dual-signal-wave optical parametric oscillator for terahertz generation by using two periodically poled crystals[C]. *Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics*, Shanghai, China, 18-22 Sept. 2006.
- [29] WANG Z, SUN B, WANG Y Y, *et al.*. Theoretical study of dual-wavelength PPKTP-OPO as a source of DFG THz-wave[C]. *Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics*, Shanghai, China, 18-22 Sept. 2006.
- [30] ZHONG K, YAO J Q, XU D G, *et al.*. Enhancement of terahertz wave difference frequency generation based on a compact walk-off compensated KTP OPO[J]. *Opt. Commun.*, 2010, 283(18):3520-3524.
- [31] XU D G, SHI W, ZHONG K, *et al.*. The widely tunable THz generation in QPM-GaAs crystal pumped by a near-degenerate dual-wavelength KTP OPO at around 2.127 μm [J]. *SPIE*, 2013, 8604:86040E.
- [32] SCHAAR J E, VODOPYANOV K L, FEJER M M. Intracavity terahertz-wave generation in a synchronously pumped optical parametric oscillator using quasi-phase-matched GaAs[J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(10):1284-1286.

- [33] 谭改娟,谢冀江,张来明,等. 中红外激光技术最新进展[J]. 中国光学,2013,6(4):501-512.
TAN G J, XIE J J, ZHANG L M, *et al.*. Recent progress in mid-infrared laser technology[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4):501-512. (in Chinese)
- [34] ABEDIN K S, HAIDAR S, KONNO Y, *et al.*. Difference frequency generation of 5 ~ 18 μm in a AgGaSe₂ crystal[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(9):1642-1646.
- [35] HAIDAR S, NAKAMURA K, NIWA E, *et al.*. Mid-infrared 5 ~ 12 μm and limited 5.5 ~ 8.5 μm single-knob tuning generated by difference-frequency mixing in single-crystal AgGaS₂[J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(9):1798-1801.
- [36] HEGENBARTH R, STEINMANN A, SARKISOV S, *et al.*. Milliwatt-level mid-infrared(10.5 ~ 16.5 μm) difference frequency generation with a femtosecond dual-signal-wavelength optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(17):3513-3515.

作者简介:



田金荣(1975—),男,山东德州人,博士,副教授,硕士生导师。2005年于中国科学院物理研究所获博士学位,主要从事飞秒激光技术方面的研究。E-mail:jrtian@bjut.edu.cn



宋晏蓉(1964—),女,山西太原人,博士,教授,博士生导师,2000年于山西大学获得博士学位,主要从事新型光泵半导体激光器、超短脉冲激光器及CPA激光放大器、超快过程及光谱展宽方面的研究。E-mail:yrsong@bjut.edu.cn



刘京徽(1991—),女,北京人,硕士研究生,2013年于北京工业大学获学士学位,主要从事固体锁模激光器方面的研究。E-mail:liujinghui@emails.bjut.edu.cn



张新平(1968—),男,河北唐山人,博士,教授,博士生导师,2002年于德国马尔堡大学获得博士学位,主要从事纳米光学与技术、超快激光技术与时间分辨光谱学方面的研究。E-mail:zhangxinping@bjut.edu.cn