

# 全固态飞秒激光同步抽运的光学参量振荡器

田文龙<sup>1,2</sup>, 朱江峰<sup>1\*</sup>, 王兆华<sup>2</sup>, 魏志义<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

<sup>2</sup>中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190

**摘要** 飞秒光学参量振荡器(OPO)能产生从紫外到中远红外波段的可调谐飞秒激光脉冲,在频率计测、生物医学、大气探测、宽带通信及国防等领域有着广泛的应用。对飞秒钛宝石激光器同步抽运 OPO 进行了研究,相继实现了波长稳定在 1053 nm 的高功率飞秒 OPO 运转。在此基础上,进一步研究了高功率掺镱全固态飞秒激光器同步抽运 OPO。结合国内外飞秒 OPO 的研究进展,对未来全固态飞秒激光器同步抽运 OPO 的发展进行了展望。

**关键词** 非线性光学;非线性频率变换;全固态飞秒激光;光参量振荡器;同步抽运

中图分类号 O437.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0508015

## Optical Parametric Oscillators Synchronously Pumped by All-Solid-State Femtosecond Lasers

Tian Wenlong<sup>1,2</sup>, Zhu Jiangfeng<sup>1\*</sup>, Wang Zhaohua<sup>2</sup>, Wei Zhiyi<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

<sup>2</sup>Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** Femtosecond optical parametric oscillators (OPOs) are capable of generating tunable femtosecond laser pulses in the ultraviolet, mid- and far-infrared spectral range. These oscillators are widely used in the fields of frequency metrology, biomedicine, gas detection, broadband communications, and defense. This study conducts the research on the OPO synchronously pumped by a femtosecond Ti:sapphire laser, and realizes the operation of high-power femtosecond OPOs with a stabilized wavelength of 1053 nm. Based on these, the OPOs synchronously pumped with high-power femtosecond Ytterbium-doped all-solid-state lasers are further investigated. With the relevant research progress on femtosecond OPOs worldwide, the future development of OPOs synchronously pumped by all-solid-state femtosecond lasers is prospected.

**Key words** nonlinear optics; nonlinear frequency conversion; all-solid-state femtosecond laser; optical parametric oscillator; synchronous pumping

**OCIS codes** 140.3580; 140.7090; 190.4410; 320.7110

## 1 引 言

2018 年诺贝尔物理学奖授予了美国科学家 Arthur Ashkin、法国科学家 Gerard Mourou 和加拿大科学家 Donna Strickland,以表彰他们在激光物理领域的突破性发明。其中 Mourou 教授和 Strickland 师徒二人提出的啁啾脉冲放大技术<sup>[1]</sup>,

打破了超短脉冲激光的能量瓶颈,使超短超强脉冲激光成为现实,为开展前沿科学研究、精密激光加工、激光医疗和军事对抗等应用提供了前所未有的强大工具。而于激光器问世的第二年即诞生的非线性光学,也大大促进了超快激光技术的发展。

1961 年, Franken 等<sup>[2]</sup>将红宝石激光器产生的 694.3 nm 激光聚集到一片石英晶体中,首次获得二

收稿日期: 2018-12-14; 修回日期: 2019-01-15; 录用日期: 2019-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(61705174, 11774277)、科技部重点研发计划(2017YFB0405202)、陕西省自然科学基金(2018JQ6061)、脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金(SKL2017KF04)

\* E-mail: jfzhu@xidian.edu.cn; \*\* E-mail: zywei@iphy.ac.cn

次谐波(SHG)信号——347.1 nm 紫外激光,这被视为非线性光学的开端。对基于受激辐射放大产生的激光而言,受限于激光增益介质的能级结构,往往只能发射有限光谱范围的激光,难以实现波长的连续调谐。目前常见的激光增益介质的发射光谱主要集中在可见-近红外波段,如掺钛蓝宝石晶体(简称钛宝石)的发射光谱覆盖范围为 600~1000 nm,掺镱或钕离子增益介质的发射光谱主要位于 1  $\mu\text{m}$  或 1.3  $\mu\text{m}$  波长附近,掺铬硫化锌晶体的发射光谱范围为 2~3  $\mu\text{m}$ 。而紫外或中远红外波段的许多波长仍无法直接得到。然而,利用非线性光学参量变换的方法,在满足相位匹配条件下可以产生波长可连续调谐的激光,通过改变非线性晶体的参数,辅以和频、差频等技术可实现更大范围的波长调谐,极大地拓展了激光技术在众多领域中的应用。

高频率的光子  $\omega_3$  单次通过非线性晶体后产生两个较低频率光子  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的过程称为光参量产生(OPG)过程。通常称产生的较高频率的光为信号光、较低频率的光为闲频光,称  $\omega_3$  为抽运光。将 OPG 与光学谐振腔相结合,可使原本微弱的参量光(信号光或闲频光)在谐振腔内反复振荡形成足够强的激光并输出,这就是光学参量振荡技术,相应的光学谐振腔器件被称为光学参量振荡器(OPO)。通常,OPO 具有高信噪比、高光束质量和相干性等特性。此外,对于飞秒 OPO 而言,由于飞秒脉冲存在色散,可以仅通过改变腔长来实现参量光的波长调谐,这是有别于长脉冲 OPO 波长调谐的飞秒 OPO 的独特性质。尽管早在 1965 年美国贝尔实验室的 Giordmaine 等<sup>[3]</sup>就实现了第一台 OPO 振荡,但受抽运光源功率、非线性晶体以及对同步抽运要求的限制,直到 1989 年美国康奈尔大学的 Tang 研究组才报道了首个飞秒 OPO 的研究工作<sup>[4]</sup>。

1991 年面世的克尔透镜锁模钛宝石振荡器<sup>[5]</sup>是目前最为成熟的飞秒激光器,理论上,其输出波长可覆盖 600~1000 nm 的范围,技术上常用的是覆盖 700~900 nm 的波长范围。利用飞秒钛宝石振荡器抽运飞秒 OPO,结合各种不同的非线性晶体,已实现 250~8800 nm 波长范围的飞秒激光的输出<sup>[6-13]</sup>,大大扩展了飞秒激光的波长范围。2007 年,Zhu 等<sup>[11]</sup>利用自建的锁模掺钛蓝宝石激光作为抽运源,也实现了飞秒 OPO 运行。但在输出功率方面,由于飞秒钛宝石振荡器的平均功率一般小于 3 W,其同步抽运 OPO 产生的信号光功率往往不到 1 W<sup>[12-13]</sup>。而且,飞秒钛宝石振荡器需要昂贵的倍

频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器作为抽运源,系统复杂且价格高昂。近年来,飞秒光纤激光器以及全固态激光器得到了迅速发展,成为同步抽运飞秒 OPO 的理想光源<sup>[14-17]</sup>。2011 年,Zhang 等<sup>[14]</sup>利用高功率飞秒 Yb:KYW 激光器同步抽运 25 mm 长的周期极化铌酸锂(PPLN)晶体,获得了功率为 144 mW、波长为 3.5  $\mu\text{m}$  的闲频光,光谱半峰全宽为 200 nm,最大量子转换效率达到 59%。2013 年,Gu 等<sup>[15]</sup>利用飞秒掺镱光纤激光器抽运 PPLN 晶体,结合腔内倍频及和频过程,获得波长覆盖 610~4000 nm 激光的调谐输出。2016 年,Metzger 等<sup>[16]</sup>利用飞秒掺铒光纤激光器抽运 AGSe 晶体,获得了波长为 4.8~6.0  $\mu\text{m}$  的闲频光输出,光子转换效率为 18%。2018 年,Smolski 等<sup>[17]</sup>利用平均功率为 6 W 的飞秒掺铬硫化锌固体激光器抽运周期结构的 GaAs 晶体,获得波长直接覆盖 3~8  $\mu\text{m}$  的信号光输出,平均功率达 0.5 W。与飞秒全固态激光器相比,飞秒光纤激光器在结构紧凑性、操作便捷性上具有一定的优势,但由于其本身具有高增益、高非线性特点,输出的飞秒激光带有大量的噪声,而且飞秒光纤激光器在高重复频率方面存在劣势。

近年来,本课题组基于掺镱激活离子的飞秒全固态激光器进行了系统的研究,获得了一系列输出参数优异的结果<sup>[18-28]</sup>。在此基础上,进一步利用高功率飞秒全固态激光器作为抽运源,开展了一系列飞秒光学参量振荡的研究并取得了重要进展<sup>[29-35]</sup>。本文将对这方面的工作进行综述,并对飞秒全固态激光器未来的发展和前沿应用进行展望。

## 2 飞秒全固态激光同步抽运的光学参量振荡

使用飞秒激光抽运 OPO 时,由于飞秒脉冲的持续时间远小于参量光脉冲在腔内往返一次所需的时间,参量光脉冲只有在腔内往返一次后并与下一个抽运光脉冲在晶体中重合时才会得到增益,这就要求 OPO 的腔长必须与抽运源的重复频率精确匹配。因此,飞秒 OPO 又被称为同步抽运的 OPO(SPOPO)。

受益于成熟的高功率飞秒钛宝石振荡器和新型的非线性晶体,在可见光-近红外波段的飞秒 OPO 发展非常迅速,目前已广泛应用于超快光通信、太赫兹(THz)波产生、时间分辨光谱学和飞秒光频梳等领域。近年来,高功率掺镱飞秒激光器得到了迅速发展,成为价格更加低廉、输出功率更高的新一代

OPO 抽运源,为飞秒 OPO 的蓬勃发展注入了新的能量。

### 2.1 高功率掺镱飞秒全固态激光器同步抽运 OPO 实验研究

相位匹配是实现光参量变换的必备条件。相位匹配一般分为两种:双折射相位匹配和准相位匹配。双折射相位匹配是指利用晶体的双折射特性来补偿晶体的色散效应,常用的双折射相位匹配晶体有三硼酸锂(LBO)、偏硼酸钡(BBO)、磷酸钛氧钾

(KTP)、磷酸钛氧钾(KTA)、铌酸锂(LN)和钽酸锂(LT)等。准相位匹配是指利用非线性晶体周期性的非线性系数反转来补偿相位失配,常见的准相位匹配晶体包括周期极化的LN晶体(PPLN)、周期极化的KTP晶体(PPKTP)和周期极化的LT晶体(PPLT)等。其中PPLN的有效非线性系数为17 pm/V,不仅远大于双折射相位匹配晶体,而且接近两倍于其他几种常见的准相位匹配晶体,成为目前飞秒OPO中最常用的非线性晶体。

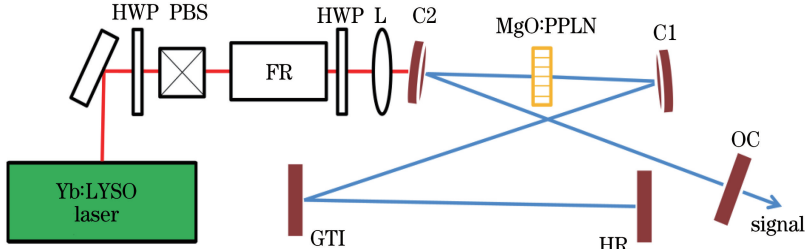


图1 Yb:LYSO 激光器同步抽运 OPO 的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of OPO synchronously pumped by Yb:LYSO laser

为了开展 OPO 的研究,自建了一台高功率 Yb:LYSO 飞秒全固态振荡器,其输出平均功率可达 3 W,中心波长为 1035 nm,脉宽为 350 fs,重复频率为 86.4 MHz<sup>[28]</sup>。利用此高功率飞秒振荡器进行同步抽运 OPO 的实验研究<sup>[29-30]</sup>,实验装置如图 1 所示,其中 HWP 为半波片,PBS 为偏振分束片,FR 为法拉第旋光器,L 为透镜,C1 和 C2 为凹面镜,OC 为输出镜,GTI 为 Gires-Tournois 干涉镜,HR 为高反镜。为了避免非线性晶体的损坏,将 Yb:LYSO 飞秒全固态振荡器的输出功率设置为 2 W。抽运光经隔离器和透镜后,入射到 PPLN 晶体的抽运功率为 1.8 W,这时晶体中心的峰值功率约为

1.2 GW/cm<sup>2</sup>,接近晶体的损伤阈值(1.36 GW/cm<sup>2</sup><sup>[36]</sup>)。实验使用的 3 mm 长的 PPLN 晶体有 7 个极化周期,周期范围为 28.5~31.5 μm。首先优化谐振腔使输出功率达到最大值,获得波长为 1628 nm、功率为 355 mW 的信号光输出。随后,结合腔长调谐与极化周期调谐方法,得到 1427~1763 nm 连续可调谐的信号光输出,调谐范围为 336 nm,如图 2(a)所示。大部分(大于 70% 光谱范围)信号光的功率都大于 200 mW[图 2(b)]。信号光的调谐范围受镜片镀膜的限制,1427 nm 和 1763 nm 波长则已经超出了腔镜的镀膜范围,因此在这两个波长处的信号光功率最低,只有 100 mW 左右。

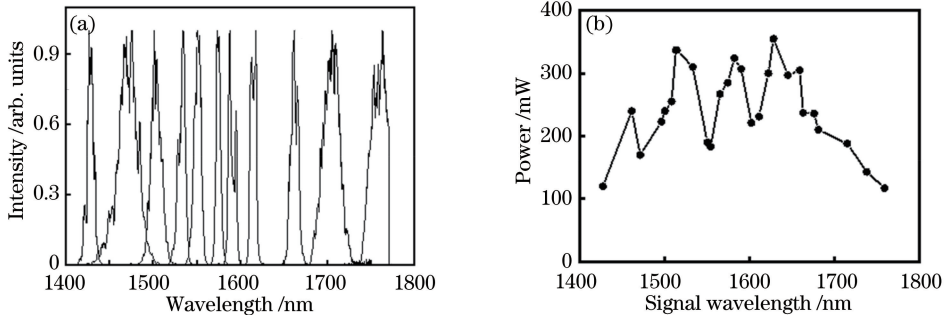


图2 Yb:LYSO 激光器同步抽运 OPO 的信号光调谐特性。(a) 光谱;(b) 输出功率

Fig. 2 Signal tuning characteristics of OPO synchronously pumped by Yb:LYSO laser. (a) Spectrum; (b) output power

结合腔内倍频技术,可以进一步扩展信号光覆盖的光谱范围。利用另一块 PPLN 作为倍频晶体,在 OPO 腔内对信号光进行倍频,晶体的极化周期

在 19.5~21.3 μm 之间,满足 1550~1750 nm 信号光倍频的相位匹配条件。得到的二次谐波脉冲调谐范围为 767~874 nm,相应的基频光范围为 1534~

1748 nm,如图 3(a)所示。腔内倍频 OPO 的最大输出功率为 180 mW,对应的倍频光波长为 798 nm。此时,OPO 输出非常好的激光光斑形状,在  $x$  方向

和  $y$  方向上的光束质量因子  $M_x^2$  和  $M_y^2$  分别为 1.05 和 1.01,如图 3(b)所示。

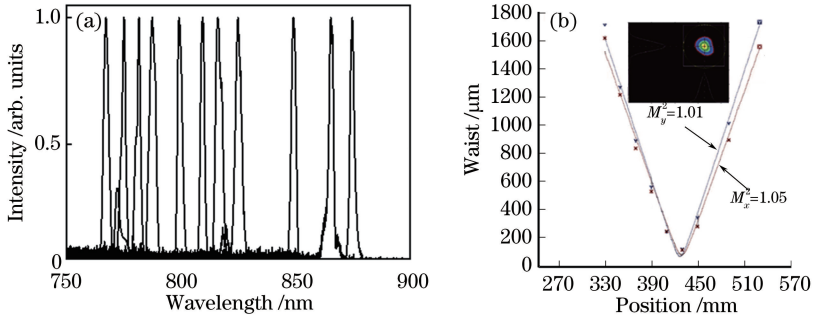


图 3 腔内倍频 OPO 的输出性能。(a) SHG 调谐特性;(b)最大输出功率时的光束质量

Fig. 3 Output performances of OPO with intra-cavity frequency-doubling. (a) Tuning characteristic of SHG; (b) beam quality at maximum output power

尽管 PPLN 晶体具有非常大的有效非线性系数,但其损伤阈值不高,不适于高功率飞秒 OPO。而双折射相位匹配晶体 KTP 和 KTA 具有更高的损伤阈值,而且在  $2.0\sim 5.0\ \mu\text{m}$  之间有较高的透过率,是用于高功率中红外飞秒 OPO 的优良非线性晶体。1998 年,Ruffing 等<sup>[37]</sup>利用平均功率为 29 W 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 皮秒激光器同步抽运 KTA 晶

体,获得功率高达 14.6 W 的信号光以及功率为 6.4 W 的闲频光输出。近年来,本课题组利用商用的功率为 7 W、脉宽为 100 fs 的 Yb:KGW 飞秒全固态激光器(Flint, Light Conversion 公司,立陶苑)开展了同步抽运飞秒 KTA-OPO 的实验研究,获得了瓦级的中红外飞秒闲频光输出<sup>[31]</sup>。实验装置如图 4 所示。

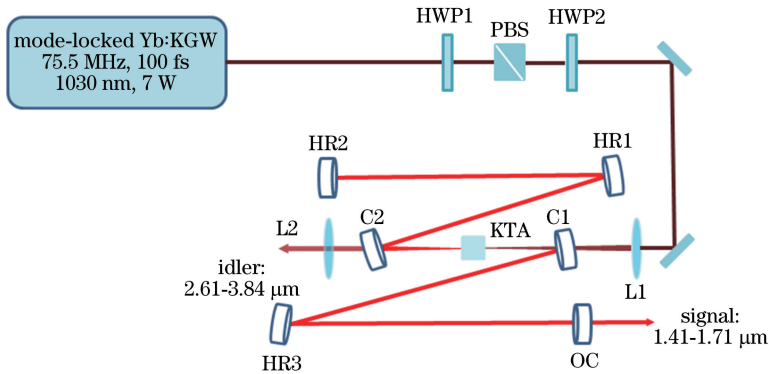


图 4 飞秒 KTA-OPO 实验装置

Fig. 4 Experimental setup of femtosecond KTA-OPO

当抽运光功率为 7 W 时,可以得到最高功率为 2.32 W 的信号光输出,中心波长为  $1.55\ \mu\text{m}$ ,同时得到的闲频光输出功率为 1.31 W,中心波长为  $3.05\ \mu\text{m}$ ,总的光转换效率为 51.8%。无主动稳定措施下,信号光输出功率在 1 h 内的抖动小于 1.6%,如图 5(a)所示。通过改变 KTA 晶体的角度,同时优化腔长,获得了  $1.41\sim 1.71\ \mu\text{m}$  波长范围内连续可调谐的信号光输出,相应的中红外闲频光波长调谐范围为  $2.61\sim 3.84\ \mu\text{m}$ ,如图 5 所示。整个调谐范围内信号光的输出功率大于 450 mW,而  $2.8\sim 3.5\ \mu\text{m}$  波长范围内闲频光的输出功率大于

400 mW 如图 5(b)。

利用相同的 OPO 腔型结构,将 KTA 晶体换成合适的 KTP 晶体,可以获得类似的实验结果。当抽运光功率为 7 W 时,得到最大功率为 2.05 W 的信号光输出,中心波长为  $1.53\ \mu\text{m}$ ,同时得到的闲频光输出功率为 1.01 W,中心波长为  $3.17\ \mu\text{m}$ ,总的光转换效率为 43.7%。采用角度调谐方法,同样获得了  $1.41\sim 1.71\ \mu\text{m}$  波长范围内可调谐的信号光和  $2.61\sim 3.84\ \mu\text{m}$  波长范围内可调谐的闲频光输出。整个调谐范围内信号光的输出功率大于 180 mW,闲频光的输出功率大于 75 mW。

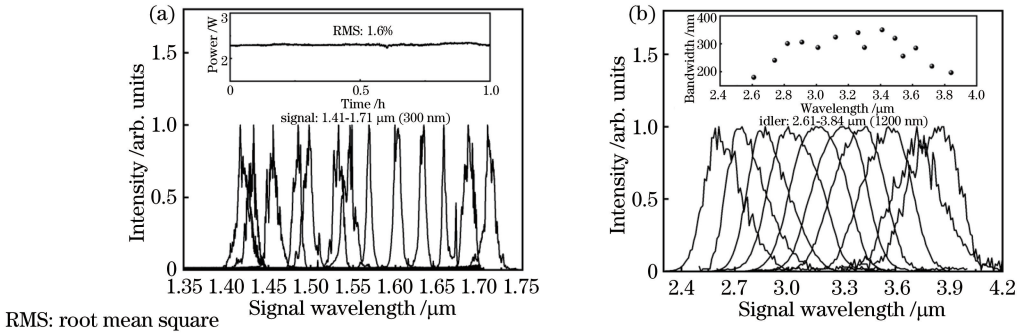


图 5 KTA-OPO。(a)信号光调谐光谱;(b)闲频光光谱

Fig. 5 KTA-OPO. (a) Spectra of tunable signals; (b) spectra of idlers

### 2.2 全固态飞秒绿光同步抽运 BIBO-OPO 实验研究

超快绿光同步抽运的飞秒 OPO 能够提供 700~1000 nm 范围内波长连续可调谐的超短脉冲,这在生物光子学、相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)显微成像和脑科学等应用领域具有重要意义<sup>[38-43]</sup>。通过对高功率掺镱飞秒激光器输出激光进行倍频,可获得瓦级飞秒绿光,使飞秒绿光同步抽运的 OPO 成为可能。2011 年, Cleff 等<sup>[44]</sup> 利用 525 nm 的飞秒绿光抽运 LBO-OPO,得到了 780~940 nm 波长范围内连续可调谐的近红外飞秒脉冲,信号光最大平均功率为 250 mW;2012 年, Lang 等<sup>[45]</sup> 利用 Yb:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 薄片激光器倍频产生的 15 W 飞秒绿光抽运非共线的 BBO-OPO,得到功率高达 3 W 的信号光,信号光调谐波长范围覆盖 680~850 nm;2014 年, Gu 等<sup>[46]</sup> 报道了基于 LBO 晶体非临界相位匹配的双波长飞秒 OPO,其抽运源为高功率光纤激光器倍频产生的 520 nm 飞秒绿光,得到了 658~846 nm 可调谐双波长输出。除 BBO 和 LBO 晶体之外,近几年兴起了一种新型非线性晶体硼酸铋(BIBO),其透光范围为 286~

2700 nm,具有比 BBO 更大的允许角、更宽的角度调谐范围以及更小的空间走离角,同时其晶体损伤阈值和可接受光谱带宽又都小于 BBO 和 LBO 晶体。此外,BIBO 晶体最大的优势在于其具有很大的有效非线性系数(3.2 pm/V,分别是 BBO 晶体的 1.6 倍和 LBO 晶体的 4 倍),使其广泛应用于可见光-近红外波段的频率变换中<sup>[47-49]</sup>。本课题组将 BIBO 晶体应用于飞秒绿光同步抽运的 OPO,获得了优异的参量光输出参数<sup>[33]</sup>。

首先利用 LBO 晶体对高功率 Yb:KGW 飞秒激光器进行腔外倍频,得到了功率为 4.04 W、波长为 515 nm 的高光束质量飞秒绿光,其倍频转换效率为 57.7%。利用该飞秒绿光同步抽运 BIBO-OPO 的实验装置如图 6(a)所示,其中 DM 为双色镜,NC 为非线性晶体。在 3.6 W 抽运功率下,得到了最大功率为 1.09 W 的信号光输出,光转换效率为 30%。通过改变非线性晶体的角度,得到了 688~1057 nm 波长范围内连续可调谐的信号光输出[图 6(b)],且在 整个 波长 调谐 范围 内 信号 光 功率 都 大 于 450 mW,如图 7(a)所示。由于腔内没有色散补偿器件,不同波长的信号

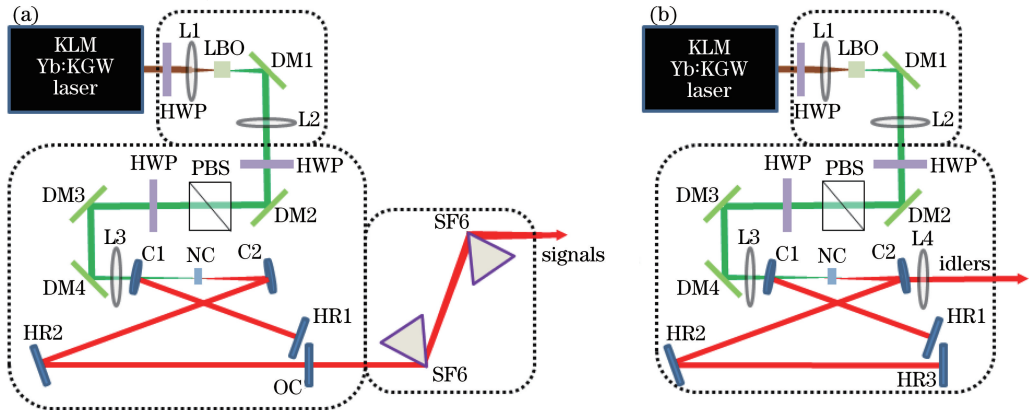


图 6 飞秒绿光同步抽运飞秒 BIBO-OPO 的实验装置。(a)信号光输出;(b)闲频光输出

Fig. 6 Experimental setup of femtosecond BIBO-OPO synchronously pumped by femtosecond green light.

(a) Signal output; (b) idler output

光脉宽在 149~271 fs 范围,为抽运光脉宽的 1~2 倍。利用一对 SF6 棱镜对输出的信号光进行了腔外

压缩,压缩后的信号光的脉宽范围为 71~122 fs,约是压缩前的一半,如图 7(b)所示。

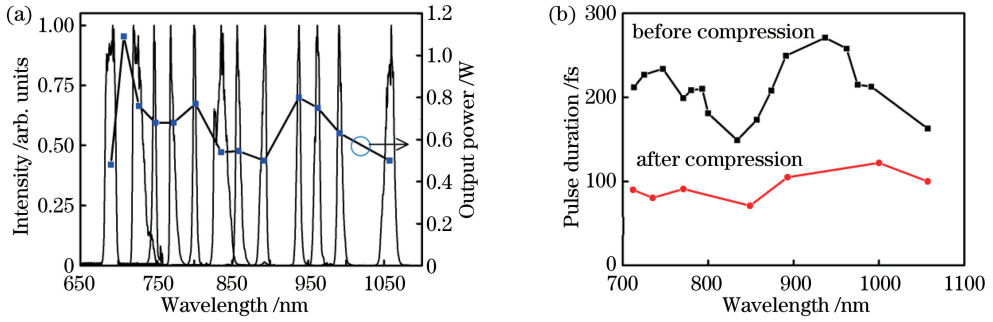


图 7 BIBO-OPO 信号光调谐范围内的输出性能。(a)光谱和功率;(b)相应的压缩前后脉宽

Fig. 7 Output performances of tunable signals of BIBO-OPO. (a) Spectra and power; (b) corresponding pulse durations before and after compression

如图 6(b)所示,将谐振腔的输出镜替换为平面高反镜,对 BIBO-OPO 的闲频光输出特性进行了研究,得到了 1150~1900 nm 范围内可调谐的闲频光输出。在 3.6 W 抽运功率下,闲频光最大输出功率

为 414 mW,对应波长为 1349 nm。与信号光相比,闲频光的光谱更为光滑[图 8(a)],其对应的脉宽在 94~223 fs 之间,如图 8(b)所示。

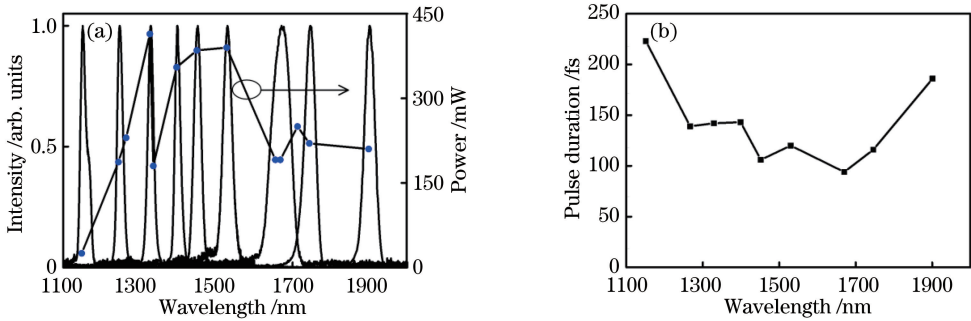


图 8 BIBO-OPO 闲频光调谐范围内的输出性能。(a)光谱和功率;(b)相应的脉宽

Fig. 8 Output performances of tunable idlers of BIBO-OPO. (a) Spectra and power; (b) corresponding pulse durations

### 2.3 飞秒全固态激光器同步抽运高重复频率 OPO 实验研究

作为超精密的测量工具,飞秒光学频率梳在高精度时频测量、原子分子物理、天文观测、阿秒科学等众多研究领域起着至关重要的作用。在某些实际的频率测量应用中,要求光学频率梳的光源重复频率越高越好。具体有两个原因:1)当激光脉冲具有相同的平均功率时,重复频率越高意味着每个纵模频率成分的功率越大,从而在频率测量中能够得到更高的信噪比;2)重复频率高的激光脉冲作为频率标准时,更容易利用商用的波长计分辨出所测光频梳落在哪个梳齿范围,降低了对波长计分辨率的要求。因此作为飞秒光学频率梳的重要光源,高重复频率飞秒 OPO 具有非常重要的研究价值。接下来介绍利用飞秒全固态激光器作为抽运源开展的高重复频率飞秒 OPO 的研究工作。

首先,利用环形腔结构实现了飞秒绿光抽运的高重复频率 BIBO-OPO 运转<sup>[35]</sup>。实验装置如图 9 所示,整个环形腔腔长只有 397.5 mm,相当于 755 MHz 的重复频率,等于抽运源重复频率的 10 倍。当 OPO 实现振荡时,在输出镜的两个方向上都有信号光输出,其中 signal 2 输出是晶体表面的反射光。在 3.75 W 抽运功率下,获得的两路信号光

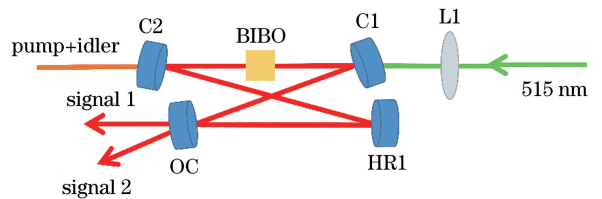


图 9 重复频率为 755 MHz 的 BIBO-OPO 实验装置

Fig. 9 Experimental setup of BIBO-OPO with repetition rate of 755 MHz

的最高输出功率分别为 680 mW 和 660 mW,光转换效率为 35.7%。如图 10(a)所示,通过改变晶体的相位匹配角度,获得了 693~1000 nm范围内连续可调谐的信号光输出,整个光谱调谐波长范围内的输出功率都在 150 mW 以上。图 10(b)描述了信号光的相位噪声,其中 PSD 为功率谱密度。可以看

出:在 10 kHz~1 MHz 范围内,信号光相位噪声比较稳定,平均值为 -135 dB。1 Hz 到 1 MHz 内的积分相位噪声仅为 260 mrad,这主要归因于低噪声的全固态抽运源以及瞬时的参量过程。这种高功率、高重复频率、低噪声的飞秒 OPO 在光学频率梳领域具有潜在的应用价值。

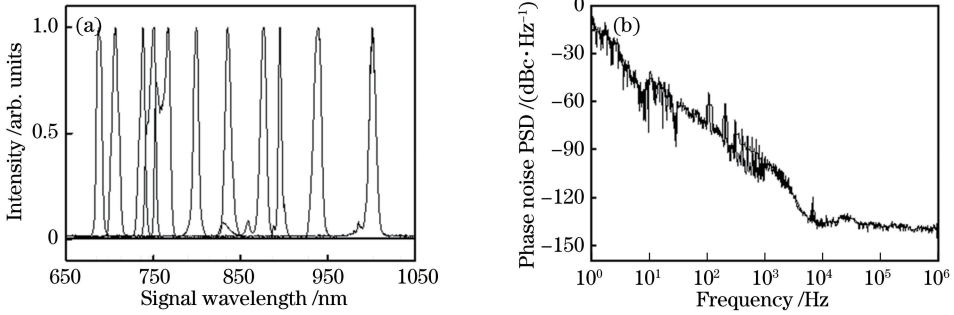


图 10 重复频率为 755 MHz 的 BIBO-OPO 的输出性能。(a)信号光调谐曲线;(b)相位噪声

Fig. 10 Output performances of BIBO-OPO with repetition rate of 755 MHz. (a) Tuning curves of signals; (b) phase noise

利用这种方法进一步获得更高的重复频率 (>10 GHz)比较困难,因为受镜架尺寸和镜片参数的限制,很难继续对腔长进行大幅缩短。而采用 Vernier 谐频抽运技术,只需要增大或减小 OPO 腔长  $\Delta L$  ( $\Delta L = L_p/N$ , 其中  $L_p$  为抽运激光的腔长),就可以将 OPO 的重复频率提高  $N$  倍<sup>[50-51]</sup>。但  $N$  越大,腔内损耗也越大,因此抽运源的功率及腔内信号光增益是制约其重复频率上限的最大因素。因此,为了提高腔内增益,选择 3 mm 长的 MgO:PPLN 作为参量晶体,其有效非线性系数为 17 pm/V。实验装置如图 11 所示,高功率 Yb:KGW 飞秒振荡器作为抽运源,利用一个 HWP 和 PBS 控制入射到晶体上的抽运功率最大不超过 2 W。

到  $N$  倍的重复频率,对于不同的  $\Delta L$ ,实现了 7.7~37.3 GHz 范围内不同重复频率  $\Delta\nu$  的 OPO 振荡 [图 12(a)],分别对应于基频 75.7 MHz 的 102~495 次谐频运转<sup>[34]</sup>。随着重复频率的提高,OPO 输出功率越来越小,当重复频率为 37.3 GHz 时,OPO 的输出功率降至 90 mW,如图 12(b)所示。继续改变  $\Delta L$ ,当重复频率为 38 GHz 时,由于腔内损耗过高,OPO 已经无法实现振荡。由于所使用的商用光谱仪(YOKOGAWA, AQ6370C, 日本)的分辨率为 20 GHz,因此可以很清楚地分辨出重复频率大于 20 GHz 的信号光光谱的单个梳齿,如图 12(c)所示。

### 3 研究趋势

高平均功率、单脉冲高能量飞秒激光一直是超快激光技术领域的研究目标。而由于某些波段的飞秒脉冲只有通过非线性频率变换才能获得,因此实现高平均功率、大单脉冲能量已成为目前飞秒 OPO 的一个重要发展趋势。与飞秒钛宝石振荡器相比,掺镱飞秒全固态激光器作为 OPO 抽运源的一个重要优点是其可以利用技术成熟的高功率 LD 直接抽运,不仅能够极大地降低成本,而且可以实现更高功率输出。近年来,掺镱薄片飞秒激光器技术发展极其迅速,目前最大输出功率高达 270 W<sup>[52]</sup>。2004 年,Südmeyer 等<sup>[53]</sup>利用平均功率为 58 W 的 Yb:YAG 薄片飞秒激光器作为抽运源,以 PPSLT 作为参量晶体,获得了重复频率为 56 MHz、输出功率为 19 W、脉宽为 840 fs、波长为 1.45  $\mu\text{m}$  的信号光和功

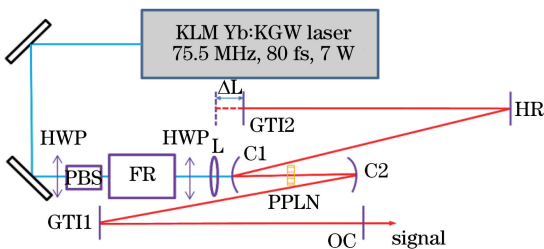


图 11 Vernier 谐频抽运实现 GHz 飞秒 OPO 的实验装置图  
Fig. 11 Experimental setup of gigahertz femtosecond OPO based on Vernier harmonically pumping

由于 PPLN 有很大的有效非线性系数,因此 OPO 的振荡阈值功率很低,仅为 56 mW。当 OPO 实现振荡后将输出功率优化到最大,可以获得功率为 450 mW、中心波长为 1515 nm 的信号光输出。然后通过微调平移台的位置,使 OPO 腔长增加,得

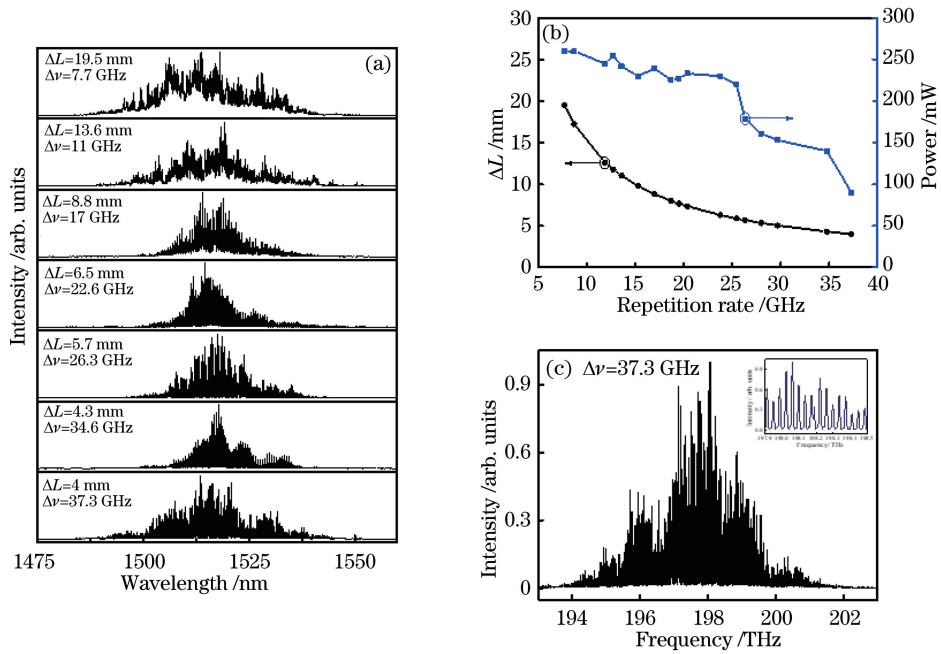


图 12 OPO 输出。(a)不同重复频率下飞秒 OPO 的信号光光谱;(b)不同重复频率下的  $\Delta L$  及平均输出功率;(c) OPO 在重复频率为 37.3 GHz 下运转的光谱

Fig. 12 OPO output. (a) Spectra of signals of femtosecond OPOs at different repetition rates; (b)  $\Delta L$  and average output power versus repetition rate; (c) spectrum when OPO operates at repetition rate of 37.3 GHz

率为 7.8 W、波长为  $3.57 \mu\text{m}$  的闲频光,OPO 的信号光单脉冲能量高达 339 nJ。随着各种非线性晶体质量的提升以及尺寸的增大,掺镱固体飞秒激光器抽运的飞秒 OPO 在输出平均功率以及单脉冲能量上会进一步得到提高。值得一提的是,利用腔倒空技术降低飞秒 OPO 的重复频率,也可以有效地提高单脉冲能量。2011 年,Lamour 等<sup>[54]</sup>利用功率为 6.6 W 的掺镱飞秒光纤激光器作为抽运源,采用腔倒空技术,实现了最大单脉冲能量为 392 nJ 的 PPLN-OPO 运转。2018 年,He 等<sup>[55]</sup>提出一种全新的大单脉冲能量超快 OPO 的实施方案,通过在 Nd:YAG 皮秒再生放大器腔内抽运 KTA-OPO,获得了最大单脉冲能量为 35  $\mu\text{J}$ 、脉宽为 7 ps、重复频率为 10 kHz、波长为  $1.5 \mu\text{m}$  的信号光输出。此方案有望用于实现大单脉冲能量的飞秒 OPO 振荡。高平均功率、大单脉冲能量的飞秒 OPO 将在半导体制造、激光波导刻写以及时间分辨非线性光谱学等领域扮演重要角色。

飞秒全固态激光器同步抽运 OPO 的另一个发展趋势是向紫外和中远红外两个方向进一步拓展波长调谐范围。与红外飞秒激光相比,紫外飞秒激光具有更高的空间分辨率,在材料分析、生物医学和精密加工等领域具有明显的优势。2006 年,Ghotbi 等<sup>[56]</sup>利用倍频的飞秒钛宝石振荡器抽运 BIBO 晶

体,获得了从蓝绿光(480 nm)到红光(710 nm)波长范围内连续可调谐的信号光输出,进一步结合腔内倍频技术,将输出信号光扩展至 250~355 nm 的紫外波段,且平均功率高达 225 mW,展示了飞秒 OPO 在产生紫外-可见光波段超快激光的巨大潜力。得益于掺镱飞秒全固体激光器的高平均输出功率,三倍频的紫外飞秒激光可以达到瓦级以上,同步抽运 OPO 可望通过腔内倍频获得 200~250 nm 范围的飞秒脉冲。2016 年,Fan 等<sup>[57]</sup>利用经掺镱飞秒光纤激光器倍频后的绿光抽运 LBO 晶体,并结合 BBO 晶体进行腔内倍频,获得了 330~442 nm 范围内可调谐的飞秒紫外激光脉冲。另一方面, $5 \mu\text{m}$  以上的中远红外波段覆盖了水分子吸收、特征分子指纹谱、大气窗口和热红外探测器等波长,在基础科学、国防、环境、医疗及通信方面有着广泛和突出的应用。尤其是综合了宽光谱、窄脉宽及高峰值功率等特性的中远红外飞秒激光,在光谱学研究、癌症诊断、外科手术、材料表征以及阿秒科学等方面均有着重要的应用价值。以往大部分用于实现中红外飞秒 OPO 的非线性晶体[如  $\text{AgGaSe}_2$  (AGSe)、 $\text{ZnGeP}_2$  (ZGP)以及周期性结构的 GaAs(OP-GaAs)等]在 800 nm 波长附近存在严重的双光子吸收效应,因而不能直接利用飞秒钛宝石激光器作为抽运源,这限制了中红外飞秒 OPO 的发展。然而,目前该限制



已经被突破,这主要归因于两个方面:1)发射波长大于  $1.5 \mu\text{m}$  的飞秒激光器(如掺铒、掺铥以及 Cr:ZnSe/ZnS 固体激光器)得到了迅速发展,可用于直接抽运这些中远红外非线性晶体;2)近年来出现的 CSP、LiSe 以及周期性结构的 GaP(OP-GaP)等一批新型中红外非线性材料,不仅具有有效非线性系数大、带隙宽、损伤阈值高等优点,而且在  $1050 \text{ nm}$  波长处不存在双光子吸收效应,非常适合利用掺镱飞秒激光直接进行抽运。2016 年, Maidment 等<sup>[58]</sup>利用掺镱飞秒光纤激光器直接抽运 OP-GaP 材料,获得  $5 \sim 12 \mu\text{m}$  波长范围内可调谐的中远红外飞秒激光输出,平均输出功率在毫瓦量级。因此,中远红外飞秒 OPO 仍具有很大的发展潜力,并获得了广泛的关注。

## 4 结 论

飞秒激光自问世以来因其极短的脉宽、超高的峰值功率和超宽的光谱带宽得到了研究者的广泛关注,各种新型飞秒激光技术如雨后春笋般涌出。其中,同步抽运的飞秒光学参量振荡技术具有不可替代的特性,在诸多研究领域发挥着重要的作用。掺镱飞秒全固态激光器因具有高输出功率、短脉宽以及实用高效的结构,已成为同步抽运飞秒光学参量振荡器的理想抽运源。随着新型非线性晶体质量的进一步提升,掺镱飞秒全固态激光器同步抽运的光参量振荡器将在平均输出功率、单脉冲能量以及波长调谐范围等方面实现突破。然而,需要指出的是,目前国内在高功率飞秒全固态抽运源和优质中红外非线性晶体等方面与国际最高水平仍存在不小的差距。目前国内利用掺镱薄片激光器输出的飞秒激光最高功率只有  $15 \text{ W}$ <sup>[59]</sup>,且无法生长周期结构的中红外非线性半导体材料。相信随着国家加大投入以及相关科研工作者的辛勤努力,国内飞秒 OPO 技术将迎来更快、更好的发展。

## 参 考 文 献

- [1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [2] Franken P A, Hill A E, Peters C W, *et al.* Generation of optical harmonics[J]. *Physical Review Letters*, 1961, 7(4): 118.
- [3] Giordmaine J A, Miller R C. Tunable coherent parametric oscillation in  $\text{LiNbO}_3$  at optical frequencies[J]. *Physical Review Letters*, 1965, 14(24): 973.
- [4] Edelstein D C, Wachman E S, Tang C L. Broadly tunable high repetition rate femtosecond optical parametric oscillator[J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 54(18): 1728-1730.
- [5] Spence D E, Kean P N, Sibbett W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(1): 42-44.
- [6] Gale G M, Cavallari M, Driscoll T J, *et al.* Sub-20-fs tunable pulses in the visible from an 82-MHz optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(14): 1562-1564.
- [7] Loza-Alvarez P, Brown C T A, Reid D T, *et al.* High-repetition-rate ultrashort-pulse optical parametric oscillator continuously tunable from 28 to  $68 \mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(21): 1523-1525.
- [8] Ghotbi M, Esteban-Martin A, Ebrahim-Zadeh M. Tunable, high-repetition-rate, femtosecond pulse generation in the ultraviolet[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 345-347.
- [9] Ramaiah-Badarla V, Esteban-Martin A, Kumar S C, *et al.* Mid-Infrared femtosecond optical parametric oscillator synchronously-pumped directly by a Ti:sapphire laser[C]. CLEO, 2015: SW4O.3.
- [10] O'Donnell C F, Kumar S C, Zawilski K T, *et al.* Critically phase-matched Ti:sapphire-laser-pumped deep-infrared femtosecond optical parametric oscillator based on  $\text{CdSiP}_2$ [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1507-1510.
- [11] Zhu J F, Zhong X, Teng H, *et al.* Synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator based on MgO-doped periodically poled  $\text{LiNbO}_3$ [J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(9): 2603-2605.
- [12] Zhong X, Zhu J F, Zhou B B, *et al.* Synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator at  $1053 \text{ nm}$ [J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2009, 52(8): 1187-1190.
- [13] Xu L, Zhong X, Zhu J F, *et al.* Efficient femtosecond optical parametric oscillator with dual-wavelength operation[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1436-1438.
- [14] Zhang Z W, Sun J H, Gardiner T, *et al.* Broadband conversion in an Yb:KYW-pumped ultrafast optical parametric oscillator with a long nonlinear crystal[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17127-17132.
- [15] Gu C L, Hu M L, Zhang L M, *et al.* High average power, widely tunable femtosecond laser source from red to mid-infrared based on an Yb-fiber-laser-pumped optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1820-1822.

- [16] Metzger B, Pollard B, Rimke I, *et al.* Single-step sub-200 fs mid-infrared generation from an optical parametric oscillator synchronously pumped by an erbium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4383-4386.
- [17] Smolski V, Vasilyev S, Moskalev I, *et al.* Half-Watt average power femtosecond source spanning 3-8  $\mu\text{m}$  based on subharmonic generation in GaAs [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(6): 101.
- [18] Gao Z Y, Zhu J F, Wang K, *et al.* Diode-pumped Kerr-lens mode-locked femtosecond Yb:YAG ceramic laser[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(2): 024205.
- [19] Yu Z J, Han H N, Xie Y, *et al.* CEO stabilized frequency comb from a 1- $\mu\text{m}$  Kerr-lens mode-locked bulk Yb:CYA laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 3103-3111.
- [20] Tian W L, Wang Z H, Wei Z Y, *et al.* Diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb : GSO laser generating 72 fs pulses[C]//2015 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 24-28 Aug. 2015, Busan, South Korea, 2015: 1-2.
- [21] Zhu J F, Gao Z Y, Tian W L, *et al.* Kerr-lens mode-locked femtosecond Yb : GdYSiO<sub>5</sub> laser directly pumped by a laser diode[J]. *Applied Sciences*, 2015, 5(4): 817-824.
- [22] Tian W L, Wang Z H, Zhu J F, *et al.* Generation of 54 fs laser pulses from a diode pumped Kerr-lens mode-locked Yb : LSO laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(2): 024206.
- [23] Gao Z Y, Zhu J F, Zhang L J, *et al.* Generation of 85 fs laser pulses from a diode-pumped Kerr-lens mode-locking Yb: (Y<sub>0.9</sub>La<sub>0.1</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(11): 115302.
- [24] Gao Z Y, Zhu J F, Tian W L, *et al.* Generation of 73 fs pulses from a diode pumped Kerr-lens mode-locked Yb:YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> laser[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5870-5872.
- [25] Zhang J W, Han H N, Tian W L, *et al.* Diode-pumped 88-fs Kerr-lens mode-locked Yb : Y<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> crystal laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29867-29873.
- [26] Zhou B B, Wei Z Y, Zou Y W, *et al.* High-efficiency diode-pumped femtosecond Yb : YAG ceramic laser [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(3): 288-290.
- [27] Tian W L, Peng Y N, Zhang Z Y, *et al.* Diode-pumped power scalable Kerr-lens mode-locked Yb : CYA laser [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(2): 127-131.
- [28] Tian W L, Wang Z H, Zhu J F, *et al.* Highly efficient and high-power diode-pumped femtosecond Yb:LYSO laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(4): 045802.
- [29] Tian W L, Wang Z H, Zhu J F, *et al.* Tunable femtosecond near-infrared source based on a Yb : LYSO-laser-pumped optical parametric oscillator[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(1): 014207.
- [30] Tian W L, Zhu J F, Wang Z H, *et al.* Efficient femtosecond optical parametric oscillator pumped by all solid-state mode-locking Yb : YCOB laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(1): 011901.
- [31] Meng X H, Wang Z H, Tian W L, *et al.* Watt-level widely tunable femtosecond mid-infrared KTiOAsO<sub>4</sub> optical parametric oscillator pumped by a 103  $\mu\text{m}$  Yb:KGW laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 943-946.
- [32] Meng X H, Wang Z H, Tian W L, *et al.* Tunable, high-repetition-rate, dual-signal-wavelength femtosecond optical parametric oscillator based on BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124: 9.
- [33] Tian W, Wang Z, Meng X, *et al.* High-power, widely tunable, green-pumped femtosecond BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 4851-4854.
- [34] Tian W L, Wang Z H, Zhu J F, *et al.* Harmonically pumped femtosecond optical parametric oscillator with multi-gigahertz repetition rate [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29814-29821.
- [35] Tian W, Meng X, Wang Z, *et al.* Sub-gigahertz femtosecond BIBO-OPO harmonically pumped by green laser [C]. *International Symposium on Ultrafast Phenomena and Terahertz Waves*, 2016: IT4C. 5.
- [36] Ashihara S, Shimura T, Kuroda K, *et al.* Group-velocity-matched cascaded quadratic nonlinearities of femtosecond pulses in periodically poled MgO : LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(16): 1442-1444.
- [37] Ruffing B, Nebel A, Wallenstein R. All-solid-state cw mode-locked picosecond KTiOAsO<sub>4</sub> (KTA) optical parametric oscillator[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1998, 67(5): 537-544.
- [38] Kienle F, Lin D J, Alam S U, *et al.* Green-pumped, picosecond MgO:PPLN optical parametric oscillator [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(1): 144-152.
- [39] Jurna M, Korterik J P, Offerhaus H L, *et al.* Noncritical phase-matched lithium triborate optical parametric oscillator for high resolution coherent anti-Stokes Raman scattering spectroscopy and microscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(25): 251116.
- [40] Kienle F, Teh P S, Lin D J, *et al.* High-power,

- high repetition-rate, green-pumped, picosecond LBO optical parametric oscillator [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7008-7014.
- [41] Ganikhanov F, Carrasco S, Xie X S, *et al.* Broadly tunable dual-wavelength light source for coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(9): 1292-1294.
- [42] Kieu K, Saar B G, Holtom G R, *et al.* High-power picosecond fiber source for coherent Raman microscopy[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(13): 2051-2053.
- [43] Kumar S C, Ebrahim-Zadeh M. Fiber-laser-based green-pumped picosecond MgO : sPPLT optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5349-5352.
- [44] Cleff C, Epping J, Gross P, *et al.* Femtosecond OPO based on LBO pumped by a frequency-doubled Yb-fiber laser-amplifier system for CARS spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(4): 795-800.
- [45] Lang T, Binhammer T, Rausch S, *et al.* High power ultra-widely tuneable femtosecond pulses from a non-collinear optical parametric oscillator (NOPO) [J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 912-917.
- [46] Gu C L, Hu M L, Fan J T, *et al.* High-power, dual-wavelength femtosecond LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> optical parametric oscillator pumped by fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3896-3899.
- [47] Petrov V, Ghotbi M, Kokabee O, *et al.* Femtosecond nonlinear frequency conversion based on BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(1): 53-98.
- [48] Ebrahim-Zadeh M, Chaitanya Kumar S. Yb-fiber-laser-pumped ultrafast frequency conversion sources from the mid-infrared to the ultraviolet [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 624-642.
- [49] Ebrahim-Zadeh M, Kumar S C, Devi K. Yb-fiber-laser-pumped continuous-wave frequency conversion sources from the mid-infrared to the ultraviolet [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 350-372.
- [50] Kokabee O, Esteban-Martin A, Ebrahim-Zadeh M. Extended-cavity, tunable, GHz-repetition-rate femtosecond optical parametric oscillator pumped at 76 MHz [J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 15635-15640.
- [51] Jiang J, Hasama T. Synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator based on an improved pumping concept [J]. *Optics Communications*, 2003, 220(1/2/3): 193-202.
- [52] Brons J, Pervak V, Fedulova E, *et al.* Energy scaling of Kerr-lens mode-locked thin-disk oscillators [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6442-6445.
- [53] Südmeyer T, Innerhofer E, Brunner F, *et al.* High-power femtosecond fiber-feedback optical parametric oscillator based on periodically poled stoichiometric LiTaO<sub>3</sub> [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1111-1113.
- [54] Lamour T P, Reid D T. 650-nJ pulses from a cavity-dumped Yb<sup>+</sup> fiber-pumped ultrafast optical parametric oscillator [J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17557-17562.
- [55] He L J, Liu K, Bo Y, *et al.* 305- $\mu$ J, 10-kHz, picosecond optical parametric oscillator pumped synchronously and intracavity by a regenerative amplifier [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(3): 539-542.
- [56] Ghotbi M, Esteban-Martin A, Ebrahim-Zadeh M. BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> femtosecond optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(21): 3128-3130.
- [57] Fan J T, Gu C L, Wang C, *et al.* Extended femtosecond laser wavelength range to 330 nm in a high power LBO based optical parametric oscillator [J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13250-13257.
- [58] Maidment L, Schunemann P G, Reid D T. Molecular fingerprint-region spectroscopy from 5 to 12  $\mu$ m using an orientation-patterned gallium phosphide optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4261-4264.
- [59] Peng Y N, Zhang J W, Wang Z H, *et al.* Generation of 15 W femtosecond laser pulse from a Kerr-lens mode-locked Yb : YAG thin-disk oscillator [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(9): 094207.