

## 高重复频率光参量啁啾脉冲放大器研究进展

商景诚<sup>1,2,3</sup>, 刘一州<sup>1,2</sup>, 赵圣之<sup>1,2</sup>, 冯天利<sup>1,2,3\*</sup>, 杨克建<sup>1,3,4</sup>, 乔文超<sup>1,2,3</sup>, 赵元涛<sup>1,2,3</sup>,  
李涛<sup>1,2,3\*\*</sup>

<sup>1</sup> 山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237;

<sup>2</sup> 山东大学山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 青岛 266237;

<sup>3</sup> 山东大学激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237;

<sup>4</sup> 山东大学晶体材料研究所, 山东 济南 250100

**摘要** 光参量啁啾脉冲放大器(OPCPA)在实现高功率、大能量、光学周期量级的超短激光脉冲输出方面极具优势。对具有高脉冲重复频率( $\geq 1$  kHz)的OPCPA系统展开研究讨论,全面介绍OPCPA系统的组成;针对不同波段的OPCPA系统,对泵浦源、前端、光参量放大级和压缩器等关键模块分别进行对比和讨论,对限制OPCPA系统性能提升的因素进行分析;最后总结不同输出波长的高重复频率OPCPA系统的研究现状,并对未来的发展方向进行展望。

**关键词** 激光技术; 光参量啁啾脉冲放大器; 超快激光; 高功率; 高重复频率; 光学周期

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1201004

## 1 引言

飞秒激光技术诞生于 20 世纪 70 年代,当时从染料激光振荡器中首次实现了亚皮秒(百飞秒)量级的激光脉冲<sup>[1]</sup>。但是由于激光染料能量存储能力较差,飞秒激光单脉冲能量和峰值功率被限制在微焦和兆瓦量级。随着啁啾脉冲放大(CPA)技术的发明和具有大能量存储能力的宽带宽固体激光器(增益介质为单晶、玻璃等)的出现,基于固体增益介质的飞秒激光产生技术得到了迅速发展<sup>[2-3]</sup>,飞秒激光单脉冲能量和峰值功率被迅速提升至焦耳和拍瓦(PW)量级,打开了超强超快激光在各个领域应用的大门。由于 CPA 技术采用稀土离子掺杂固体介质作为增益介质,在脉冲放大过程中会出现严重的增益窄化效应和热效应,大大限制了脉冲的最窄脉冲宽度和最高平均输出功率。与 CPA 相比,光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术利用非线性晶体中的光参量过程进行放大,增益带宽超宽且晶体内部不

存储能量,从而不具有增益窄化效应和热效应。此外 OPCPA 技术还有单程增益极高、脉冲对比度高等优势,因此基于 OPCPA 技术的飞秒激光系统被认为是可以进一步提升激光脉冲峰值功率至几十拍瓦乃至更高量级的主要技术路线之一,也是产生光学周期量级超短脉冲的主要手段之一。利用 OPCPA 技术,可以将前所未有的高通量水平的超短脉冲拓展到 X 射线以及中远红外波段,为超快科学领域带来了一场新的革命<sup>[4]</sup>。

OPCPA 技术的快速发展促使依赖高次谐波产生(HHG)的惰性气体超快 X 射线桌面光源的出现<sup>[5]</sup>。超快 X 射线桌面光源可对材料进行飞秒和阿秒时间分辨的动力学研究,在医学、生物学和材料学等方面具有极大的应用前景。其中利用千赫兹高重复频率 OPCPA 系统驱动的 X 射线光源可以有效地提高探测效率,使更短的时间内实现材料中粒子运动状态的追踪成为可能<sup>[6]</sup>。另一方面,提高 HHG 的截止光子能量具有十分重要的意义。例

收稿日期: 2021-02-25; 修回日期: 2021-03-12; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家重点研发开发项目(2016YFB1102201)、国家自然科学基金(62005144,61775119)、山东省自然科学基金(ZR2020QF096,ZR2018MF033)、山东省泰山学者基金(tsqn201812010)、山东大学齐鲁青年项目

\*E-mail: tlfeng@sdu.edu.cn; \*\*E-mail: litao@sdu.edu.cn

如,为了对活体生物样本进行显微成像,需要将 HHG 的截止光子能量提高至水窗波段(300~500 eV),该波段的 X 射线会被碳原子强烈吸收但是对水却完全透明<sup>[7]</sup>。为了研究电子、磁性和催化等高级材料(Fe、Co、Ni、Cu 等)中电荷、自旋、原子和声子的耦合运动,需要光子能量为 1 keV 的 X 射线,以接近这些材料原子的内壳吸收峰<sup>[8]</sup>。对于激光驱动的惰性气体 X 射线桌面源,考虑到截止光子能量可以表示为  $E_{\text{cutoff}} = I_p + 3.17U_p$  ( $U_p \sim I_L \lambda_L^2$ ) ( $I_p$  是气体的电离势,  $I_L$  是驱动激光的强度,  $\lambda_L$  是驱动激光的波长),可以通过两种途径来提高 HHG 的截止光子能量。一种比较简单的方法是利用紧聚焦透镜结合强驱动激光脉冲来增加  $I_L$ 。例如,在强电离的极端条件下,利用 800 nm 波长的飞秒钛宝

石激光,在氦气中可以将截止光子能量扩展到 460 eV<sup>[9]</sup>。但是紧聚焦破坏了驱动激光和高次谐波之间的相位匹配,限制了 X 射线在截止频率附近的光子通量,阻碍了其在实际应用中的应用。另一种方法则需要增加驱动激光的波长  $\lambda_L$ ,即利用波长更长的 OPCPA 系统作为驱动光源。图 1 给出了在完全相位匹配条件下 HHG 的发射光谱与驱动激光波长的关系(黄色:0.8  $\mu\text{m}$ ,绿色:1.3  $\mu\text{m}$ ,蓝色:2  $\mu\text{m}$ ,紫色:3.9  $\mu\text{m}$ )<sup>[6]</sup>。可以看出,在完全相位匹配条件下,HHG 的截止光子能量与驱动激光的波长成正比。利用 2  $\mu\text{m}$  超短脉冲可以产生覆盖水窗波段的 X 射线。而要想实现光子能量为 keV 量级的 X 射线,则需要波长更长的超短脉冲作为驱动源。

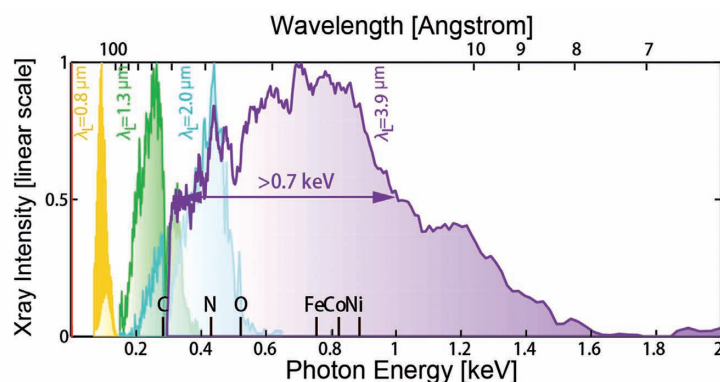


图 1 完全相位匹配条件下 HHG 的发射光谱与驱动激光波长的关系<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Relationship between emission spectrum of HHG and driving laser wavelength under the condition of perfect phase matching<sup>[6]</sup>

本文围绕工作在可见光到中远红外波段的高重复频率( $\geq 1$  kHz)OPCPA 系统展开研究讨论。介绍了 OPCPA 系统的组成,并针对不同波段的 OPCPA 系统,对泵浦源、前端、光参量放大级和压缩器等关键部分分别进行了对比和讨论;总结了不同输出波长的高重复频率 OPCPA 系统的研究现状;对以往的研究工作进行了总结,并对未来的发展方向进行展望。

## 2 OPCPA 系统组成、发展现状及展望

### 2.1 OPCPA 系统组成

一个完整的 OPCPA 系统主要包括泵浦源(pumping source)、前端(front-end)、光参量放大级(optical parametric amplification stage)和色散控制模块(dispersion controller)四个部分。

#### 2.1.1 泵浦源

泵浦源是 OPCPA 系统的核心部分,提供整个

系统所需要的能量。泵浦源是一个基于光纤或固体增益介质的能量( $\mu\text{J}$  或  $\text{mJ}$  量级)飞秒或皮秒 CPA 系统。因此泵浦源的工作波长与稀土离子的发射波长或其二次谐波匹配,多位于  $\sim 500$  nm(对应  $\text{Ti}^{3+}$ 、 $\text{Yb}^{3+}$  或  $\text{Nd}^{3+}$  离子发射波长的二次谐波)<sup>[10-12]</sup>、 $\sim 800$  nm(对应  $\text{Ti}^{3+}$  离子发射峰)<sup>[13]</sup>、 $\sim 1 \mu\text{m}$ (对应  $\text{Yb}^{3+}$  和  $\text{Nd}^{3+}$  离子发射峰)<sup>[14-15]</sup>、 $\sim 2 \mu\text{m}$ (对应  $\text{Tm}^{3+}$ 、 $\text{Ho}^{3+}$  及  $\text{Cr}^{4+}$  离子发射峰)附近<sup>[16-18]</sup>。

工作在  $\sim 800$  nm 波段的泵浦源以 Ti:Sapphire 固体和碟片再生或多通 CPA 系统为主,受益于钛宝石晶体的宽增益带宽,在 800 nm 附近很容易实现百飞秒乃至几十飞秒的千赫兹毫焦超短脉冲<sup>[19]</sup>。输出波长在 1  $\mu\text{m}$  附近的泵浦源以掺  $\text{Yb}^{3+}$  的光纤或 Yb:YAG 碟片再生放大器为主。光纤中的非线性效应较强,因此掺  $\text{Yb}^{3+}$  的单根光纤输出的脉冲能量被限制在微焦量级,脉冲宽度为几百飞秒,重复频

率在兆赫兹量级<sup>[20]</sup>。虽然相干合束可以大幅度提高光纤激光器的单脉冲能量,但是仍难以达到毫焦量级<sup>[21]</sup>。利用 Yb:YAG 碟片再生放大器,能够获得百毫焦量级的单脉冲能量,脉冲宽度在百飞秒和皮秒量级,重复频率可达几十千赫兹<sup>[22-23]</sup>。工作在 2 μm 波段的 OPCPA 泵浦源以掺 Tm<sup>3+</sup> 的光纤放大器、Ho:YLF 固体再生放大器及 Cr:ZnSe 多通放大器为主。利用掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤,目前已实现单脉冲能量为 260 μJ、重复频率为 417 kHz、脉冲宽度为 250 fs 的 2 μm 超快激光<sup>[17]</sup>。Ho:YLF 固体再生放大器输出的单脉冲能量高达 52.5 mJ,重复频率为 1 kHz,脉冲宽度为 2.4 ps<sup>[16]</sup>。Cr:ZnSe 多通放大器输出的波长位于 2.4 μm,单脉冲能量为 7 mJ,重复频率为 1 kHz,脉冲宽度为 100 fs<sup>[18]</sup>。目前已经有工作在 4.4 μm 波段的 Fe:ZnSe 大能量超快激光放大器的报道,单脉冲能量为 3.5 mJ,脉冲宽度为 150 fs,但是重复频率仅有 10 Hz,还无法应用到高重复频率 OPCPA 系统中<sup>[24]</sup>。

在一个 OPCPA 系统中,泵浦源的选择需要从输出波长和脉冲宽度两个方面综合考虑。为了获得较高的转换效率,泵浦源的工作波长需要尽可能接近 OPCPA 系统中信号光的波长。窄脉冲宽度的泵浦源有利于提高非线性晶体的损伤阈值(晶体的损伤峰值功率密度阈值  $P_{th} \propto \tau^{-1/2}$ ,  $\tau$  为脉冲宽度)且能够增加 OPCPA 系统的增益带宽,但当泵浦激光脉宽较小时,泵浦脉冲和种子脉冲之间的时间走离效应会增强,且二者之间的时间抖动会严重影响 OPCPA 系统的输出稳定性。因此兼顾晶体的损伤阈值、转换效率及系统输出的稳定性,1~10 ps 的脉冲宽度最适合用于泵浦 OPCPA 系统。

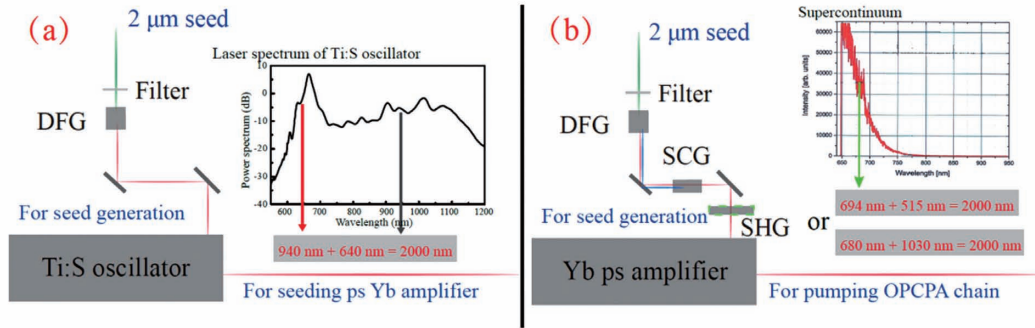
### 2.1.2 前 端

前端系统用于产生 OPCPA 系统的种子脉冲。种子脉冲具有脉宽极窄、光谱极宽的特点,单脉冲能量多在 pJ 到 nJ 量级。种子脉冲的产生方式决定了前端系统的结构。一种方式是通过锁模激光振荡器直接产生种子脉冲。钛宝石克尔透镜锁模振荡器在 800 nm 波段附近容易产生脉宽极窄的周期量级超短脉冲<sup>[25-27]</sup>,因此这种种子脉冲产生方式通常见于工作在 800 nm 波段附近的 OPCPA 系统。此外,由于钛宝石振荡器的光谱范围很宽,能够覆盖至 1 μm 附近,还可以用该振荡器作为 OPCPA 系统泵浦源的前端,使种子脉冲和泵浦脉冲被动锁定,实现时域上的同步,但是种子脉冲的载波包络相位(CEP)仍需通过主动的方式进行稳定。工作在 1.5 μm 波段

附近的 OPCPA 系统也有类似的结构,其前端是一个 1.5 μm 的掺 Er 超快光纤激光器<sup>[28]</sup>。因在其他波段缺少能够直接产生极窄脉冲的激光振荡器,所以在 OPCPA 系统中,通过锁模激光振荡器直接产生种子脉冲的方式并不常见。另一种方式是可以通非非线性晶体中的差频过程产生种子脉冲。这种方式能够被动锁定种子脉冲的 CEP,常见于工作中在远红外波段的 OPCPA 系统。基于差频方式的 OPCPA 系统前端又可以分为两类。一类前端的种子脉冲通过超连续脉冲的带内差频产生。超连续脉冲可以直接从一个钛宝石超快激光振荡器中获得<sup>[29]</sup>,也可以从利用非线性过程拓宽钛宝石激光放大器或掺 Er 的超快光纤激光器输出脉冲的光谱中获得<sup>[30-31]</sup>。另一类前端直接用 OPCPA 系统的泵浦源产生种子脉冲,该泵浦源是一个脉冲宽度为亚皮秒(<1 ps)或皮秒量级的 Yb 激光放大器<sup>[14,32-34]</sup>。泵浦脉冲(1030 nm)首先在透明介质晶体(YAG、Sapphire 或 CaF<sub>2</sub>)中通过激光成丝过程产生超连续光谱,产生的超连续光谱与泵浦脉冲进行差频产生种子脉冲;或者利用泵浦脉冲的二次谐波(515 nm)与二次谐波在透明介质晶体中产生的超连续光谱进行差频。虽然倍频过程能够缩短基频光的脉冲宽度,更有利于实现稳定的激光成丝,但是基于二次谐波的超连续光谱更接近透明介质晶体的紫外波段吸收峰,不利于晶体长时间的工作。以 2 μm 波段的 OPCPA 系统为例,给出基于差频过程产生种子脉冲的两类前端结构,如图 2 所示。

### 2.1.3 光参量放大级

光参量放大级的作用是利用非线性晶体对种子脉冲的单脉冲能量进行进一步放大。千赫兹的 OPCPA 系统的平均输出功率通常较大,因此放大级的非线性晶体需要对泵浦光、信号光和闲频光的吸收较小,以减轻晶体吸收引起的热效应和相位失配。图 3 给出了几种常见非线性晶体的透光窗口和最大有效非线性系数。光参量放大级可分为预放大级(pre-amplification stage)和功率放大级(power amplification stage)两个部分。预放大级通常被整合在 OPCPA 系统前端中,对种子脉冲能量进行初步放大的同时保持种子脉冲的光谱宽度。预放大级对种子脉冲的放大倍数通常限制在~1000 倍以内,以保证对光参量超荧光产生的抑制,从而确保较高的脉冲对比度。在 515 nm 泵浦的 800 nm OPCPA 系统中,通常采用 BBO 晶体进行预放大,在非共线相位匹配条件下(非共线角 2.4°),该晶体在 800 nm



DFG: difference frequency generation; SCG: supercontinuum generation; SHG: second harmonic generation

图 2 基于差频过程的两类 2 μm 波段 OPCPA 系统前端。(a) 第一类前端, 包含一个钛宝石飞秒激光振荡器, 直接通过差频过程产生 2 μm 种子光<sup>[29-31]</sup>; (b) 第二类前端, 基于 OPCPA 的泵浦源是一个皮秒 Yb 激光放大器, 需要借助超连续光谱产生 2 μm 种子光<sup>[14]</sup>

Fig. 2 Schematic of two kinds of 2-μm OPCPA system front-ends based on difference frequency process. (a) One kind of front-end includes a femtosecond Ti : Sapphire oscillator, the 2-μm seed pulses are generated by a DFG process directly<sup>[29-31]</sup>; (b) another kind of frond-end is the pump laser based on OPCPA system, this pump laser is a picosecond Yb-doped laser amplifier, which is used to generate the 2-μm seed laser with the assistance of SCG<sup>[14]</sup>

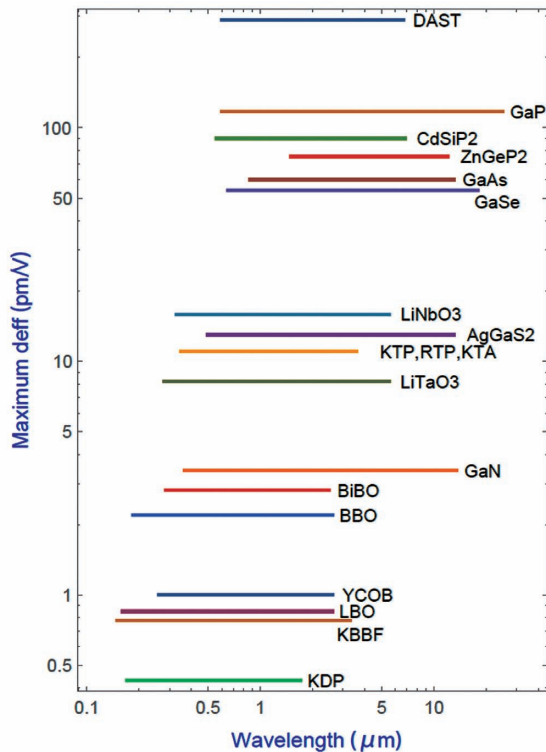


图 3 几种常见非线性晶体的透光窗口和最大有效非线性系数<sup>[4]</sup>

Fig. 3 Transmittance windows and the maximum effective nonlinear coefficients of several typical nonlinear crystals<sup>[4]</sup>

附近具有超宽的相位匹配带宽。中远红外 OPCPA 系统多利用准相位匹配在 PPLN 晶体中进行预放大。相比于预放大级, 功率放大级的放大倍数较小, 但是泵浦能量很大, 因此功率放大级采用大孔径的非线性晶体。这些非线性晶体主要包括 BBO、

BiBO、LBO、KTA、YCOB、ZGP 等。由于铌酸锂晶体具有较严重的光折变效应、大孔径的 PPLN 晶体很难制备, 因此这两类晶体不适合用于大能量 (mJ 量级) 高功率的 OPCPA 系统中。表 1 给出了几种常见非线性晶体的损伤阈值。同一晶体在不同波长和脉冲宽度下的损伤阈值可以通过相关计算公式

( $P_{th} = E_0 \sqrt{\frac{W_{ave}}{W_{ave0} \cdot \tau_0 \cdot \tau}}$ , 其中  $W_{ave0}$  和  $\tau_0$  为波长常数和脉宽常数,  $E_0$  为在  $W_{ave0}$  和  $\tau_0$  下晶体的损伤能量密度阈值,  $P_{th}$  为在波长  $W_{ave}$  和脉宽  $\tau$  下对应的晶体损伤峰值功率密度阈值) 计算获得。

表 1 几种常见非线性晶体的损伤阈值

Table 1 Damage thresholds of several typical nonlinear crystals

Crystal	Damage threshold 2 ps@1030 nm/(GW · cm <sup>-2</sup> )
BBO	70 <sup>[4,35]</sup>
BiBO	70 <sup>[4]</sup>
LBO	490 <sup>[36]</sup>
LiNbO <sub>3</sub>	70 <sup>[37]</sup>
KTA	63 <sup>[38]</sup>
YCOB	125 <sup>[39]</sup>
ZGP	16@2 μm <sup>[40]</sup>

### 2.1.4 色散控制模块

色散控制模块主要用于补偿脉冲在放大过程中的二阶及高阶色散, 实现种子脉冲的脉宽在放大过程中的控制, 即在放大之前对种子脉冲进行展宽, 放大之后对种子脉冲的脉宽进行压缩。可

用于色散补偿的器件包括光栅、固体介质、啁啾镜、声光可编程色散滤波器、空间光调制器等。目前 kHz 的 OPCPA 系统输出的单脉冲能量最高在 mJ 量级,在放大过程中,种子脉冲需被展宽至 ps 量级,以将峰值功率降低至晶体的损伤阈值以下。OPCPA 系统的种子脉冲宽度在几个光学周期左右,在放大前后均具有较宽光谱,展宽至 ps 量级所需的色散量较小。但是光栅能够提供的色散量大,能轻易将 fs 脉冲展宽至 ns 量级,通常适用于输出能量较大的(J量级)低重复频率 OPCPA 系统,在高重复频率 OPCPA 系统中的应用较少,并且光栅具有相对较高的插入损耗且对脉冲的 CEP 稳定性有一定的影响。固体介质以玻璃、YAG、半导体(Si 或 Ge)为主,可用于补偿超短脉冲的二阶色散。图 4 给出了几种常见固体介质的透光窗口,其中玻璃、YAG 等能够用于可见光和近红外波段。单晶 Si 等半导体在可见光波段的透过率较差,适用于中远红外波段。图 5 给出了这些固体

介质(厚度为 1 mm)从 600 nm 到 4000 nm 的群速度色散(GVD)和三阶色散(TOD)。大多数固体材料(Si 除外)在可见光和近红外波段的 GVD 为正,在中远红外波段的 GVD 为负,随着波长的增加,GVD 增强,如图 5(a)所示。单晶 Si 在中远红外波段的 GVD 为正且随着波长增加色散减弱。所有固体介质的 TOD 均为正,如图 5(b)所示,因此无法用固体介质补偿超短脉冲中立的 TOD。啁啾镜能够在一定波长范围内补偿二阶色散的同时提供负的 TOD,但能够提供的 TOD 量较小。大的 TOD 和更高阶的色散可以通过声光可编程色散滤波器(AOPDF)精确控制。AOPDF 以法国 Fastlite 公司的 Dazzler 为代表,能够实现波长为 250~7000 nm 的色散精确控制,但 AOPDF 的透过率较低,特别是在中远红外波段(透过率  $T < 10\%$ )。空间光调制器具备和 AOPDF 相似的功能且能够提供较高的透过率( $T > 10\%$ ),需要配合一个 4f 系统和棱镜使用。

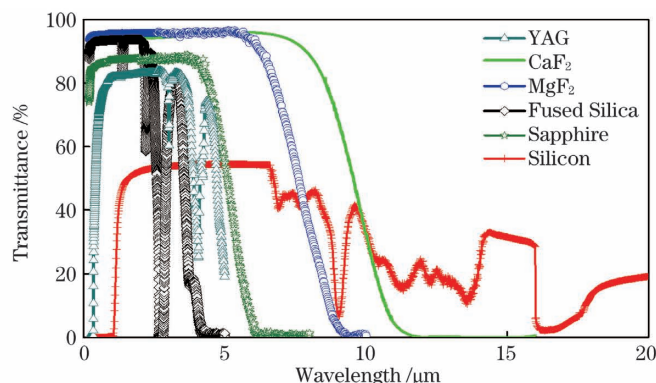


图 4 几种常见固体介质的透过率

Fig. 4 Transmittance of several typical solid mediums

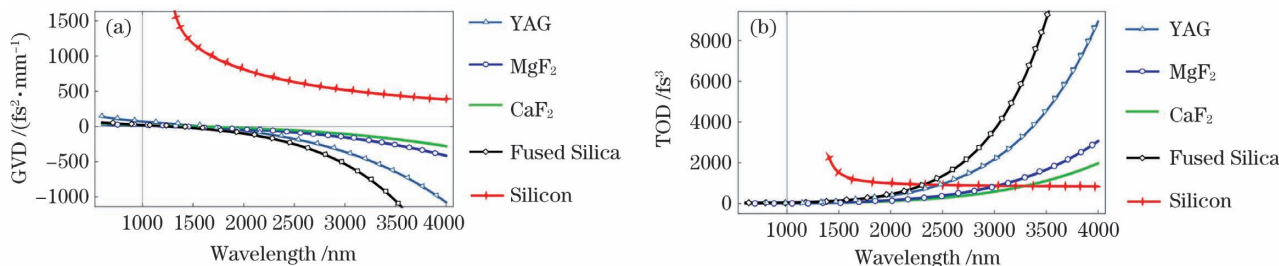


图 5 固体介质在不同波段的 GVD 和 TOD。(a) GVD;(b) TOD

Fig. 5 GVD and TOD of solid mediums at different wavelengths. (a) GVD; (b) TOD

## 2.2 高重复频率 OPCPA 系统研究进展

Ti:Sapphire 超快固体激光技术成熟较早,促进了中心波长在 800 nm 附近的 OPCPA 技术的发展,并率先取得了一系列的研究成果。随着固体激光技术的进一步发展及相关光学元件性能的提升,OPCPA 的研究波长被拓展到波长更长的红外波

段:1.5  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ ,  $>4 \mu\text{m}$  波段。高重复频率的超短脉冲在阿秒科学、超快光谱学等领域具有重要的应用价值<sup>[26,41]</sup>,目前欧洲、美国和日本等已进行了较多的研究,我国复旦大学、中国科学院在该领域也开展了相关的研究工作。有关高重复频率 OPCPA 系统的研究自 2010 年得到快速发展,本文

对报道的高重复频率( $\geq 1$  kHz)OPCPA 系统进行总结。

### 2.2.1 $\sim 800$ nm OPCPA 系统

$\sim 800$  nm OPCPA 系统根据结构不同可分为两类,分别对应两种不同的种子脉冲产生方式。一种种子脉冲通过 Ti:Sapphire 激光振荡器直接产生<sup>[11,25-27,41-43]</sup>;另一种种子脉冲可通过 Yb<sup>3+</sup>皮秒激光泵浦的超连续光谱产生<sup>[12,44-45]</sup>。图 6 总结了 $\sim 800$  nm 高重复频率 OPCPA 系统的研究进展。

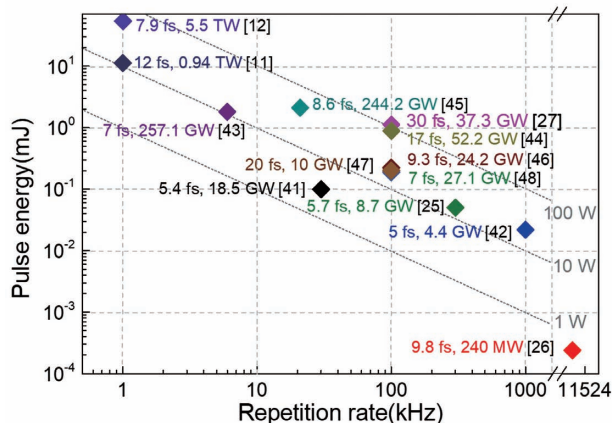


图 6  $\sim 800$  nm 高重复频率( $\geq 1$  kHz)OPCPA 系统的输出参数<sup>[11-12, 25-27, 41-48]</sup>

Fig. 6 Output parameters of  $\sim 800$ -nm high repetition rate ( $\geq 1$  kHz) OPCPA systems<sup>[11-12, 25-27, 41-48]</sup>

目前最高脉冲重复频率在兆赫兹量级,最大平均功率为百瓦,最大脉冲能量在毫焦量级,最高峰值功率在太瓦量级<sup>[12,26-27,42]</sup>。2012 年,Fattahi 等<sup>[26]</sup>在 LBO 晶体中对高功率 Yb:YAG 薄片锁模皮秒脉冲进行倍频后泵浦 BBO 晶体,利用 Ti:Sapphire 振荡器的输出脉冲作为种子,在 BBO 晶体中进行放大并通过啁啾镜压缩,最终得到重复频率为 11.5 MHz,脉冲宽度为 9.8 fs,单脉冲能量为 240 nJ 的 $\sim 800$  nm 超短脉冲。该重复频率也是目前在 $\sim 800$  nm OPCPA 系统中实现的最高重复频率。同年,Rothhardt 等<sup>[42]</sup>利用 ANDi 光子晶体光纤对 Ti:Sapphire 激光振荡器的输出脉冲进行光谱展宽,产生的超短脉冲作为种子脉冲。掺 Yb 的光纤 CPA 激光脉冲在 BBO 晶体中倍频后泵浦 BBO 晶体,对种子脉冲进行二级放大,经啁啾镜压缩获得脉冲重复频率为 1 MHz 的 $\sim 800$  nm 超短脉冲,脉冲宽度仅 5 fs,约合 1.7 个光学周期,这是目前 $\sim 800$  nm OPCPA 系统实现的最短脉冲宽度。2015 年,Höppner 等<sup>[27]</sup>采用宽带 Ti:Sapphire 振荡器同时获得 1.03  $\mu\text{m}$  和 $\sim 800$  nm CEP 稳定的超

短脉冲,并用作泵浦源和 OPCPA 系统的种子脉冲,其中 1.03  $\mu\text{m}$  的超短脉冲经掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤和 YAG 再生放大器放大后在 LBO 晶体中倍频,倍频脉冲泵浦 BBO 晶体实现对种子脉冲的放大,后经压缩后得到重复频率为 100 kHz,脉冲宽度为 30 fs,脉冲能量为 1.12 mJ 的 800 nm 激光脉冲。平均功率 112 W 是目前 $\sim 800$  nm OPCPA 系统实现的最高平均输出功率。2017 年,Budriūnas 等<sup>[12]</sup>对 Yb:KGW 飞秒固体振荡器输出的部分能量经 Nd:YAG 再生放大器分级放大后在 LBO 晶体中进行倍频,倍频脉冲泵浦 BBO 晶体;Yb:KGW 飞秒固体振荡器输出的另一部分能量经放大倍频后,通过固体介质中的激光成丝和非线性晶体中的差频过程产生 0.7~1.1  $\mu\text{m}$  的种子脉冲,经过 BBO 晶体进行四级放大后,利用啁啾镜和玻璃块进行压缩后,最终获得重复频率为 1 kHz,脉冲宽度为 7.9 fs,脉冲能量为 53.8 mJ 的 $\sim 800$  nm 激光脉冲。该脉冲能量和峰值功率是目前 $\sim 800$  nm OPCPA 系统实现的最高值。

### 2.2.2 $\sim 1.5$ $\mu\text{m}$ OPCPA 系统

$\sim 1.5$   $\mu\text{m}$  OPCPA 系统的泵浦源以 Ti:Sapphire 激光放大器和掺 Yb 激光放大器为主,种子脉冲多利用钛宝石激光振荡器、掺 Yb 或掺 Er 光纤、固体激光振荡器通过惰性气体或者固体透明介质中的超连续光谱过程产生<sup>[13,18,49-57]</sup>。 $\sim 1.5$   $\mu\text{m}$  高重复频率 OPCPA 系统的主要参数总结于图 7。目前实现的最大脉冲重复频率为 350 kHz,平均输出功率为 106 W,单脉冲能量为 3 mJ,峰值功率在 GW 量级<sup>[50,54-56]</sup>。2016 年,Yin 等<sup>[50]</sup>的报道中,Ti:Sapphire 激光振荡器的出射激光经再生放大后分成两束,其中一束经装有 Ne 气的空芯光纤进行光谱展宽,在 BiBO 中通过带内差频获得种子脉冲,另一束脉冲光经两次再生放大后分成三路,分别泵浦 BiBO 晶体对种子脉冲进行放大,最后利用熔融石英压缩获得脉冲重复频率为 1 kHz,单脉冲能量为 3 mJ,峰值功率为 263.2 GW 的 $\sim 1.5$   $\mu\text{m}$  超短脉冲。脉冲能量和峰值功率是目前 $\sim 1.5$   $\mu\text{m}$  OPCPA 系统输出的最高值。2019 年,Grguraš 等<sup>[54]</sup>将掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光作为泵浦源,种子脉冲通过透明介质中的超连续光谱过程产生,利用有机晶体 DSTMS 实现了对种子脉冲的放大,最后利用啁啾镜压缩后获得脉冲宽度为 36 fs,脉冲能量为 31  $\mu\text{J}$  的 $\sim 1.5$   $\mu\text{m}$  超短脉冲。重复频率 350 kHz 是目前 $\sim 1.5$   $\mu\text{m}$  OPCPA 系统中的最高

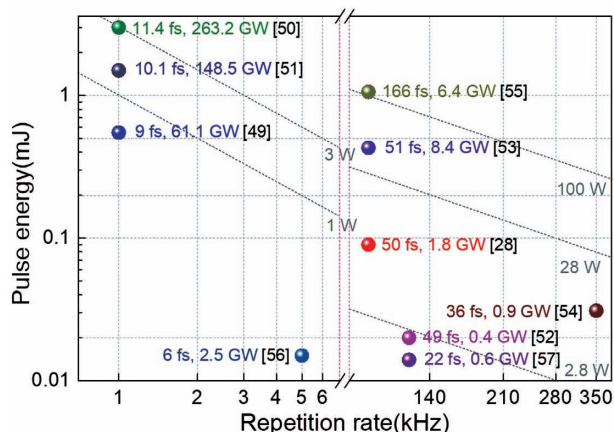


图 7  $\sim 1.5 \mu\text{m}$  高重复频率 ( $\geq 1 \text{ kHz}$ ) OPCPA 系统输出参数<sup>[13,17,28,49-57]</sup>

Fig. 7 Output parameters of  $\sim 1.5\text{-}\mu\text{m}$  high repetition rate ( $\geq 1 \text{ kHz}$ ) OPCPA systems<sup>[13,17,28,49-57]</sup>

重复频率。同年, Windeler 等<sup>[55]</sup> 利用 Yb: YAG 放大器输出的小部分能量 (功率为 15.4 W), 通过 YAG 晶体中的超连续光谱和 BBO 晶体中的差频过程产生种子脉冲, 并利用 KTA 晶体对种子脉冲进行初步预放大。另一部分经过空间整形和压缩后的能量 (功率为 1.49 kW) 泵浦 KTA 晶体, 实现对脉冲信号光的二级放大, 经熔融石英色散补偿后, 得到重复频率为 100 kHz, 脉冲能量为 1.06 mJ, 平均输出功率为 106 W 的  $\sim 1.5 \mu\text{m}$  超短脉冲, 106 W 是目前  $\sim 1.5 \mu\text{m}$  波段 OPCPA 系统的最高平均输出功率。2020 年, Alismail 等<sup>[56]</sup> 将 Yb: YAG 碟片再生放大器的输出激光脉冲分成三路, 其中一路用于在非线性光纤中产生波长为  $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ , 中心波长在  $1.5 \mu\text{m}$  附近的宽带宽种子脉冲。另一路光经 BBO 晶体倍频后泵浦 LBO 晶体, 实现光谱位于  $0.7 \sim 1.4 \mu\text{m}$  的种子脉冲的放大。第三路泵浦光在 PPLN 晶体中泵浦波长为  $1.6 \sim 2.5 \mu\text{m}$  的种子脉冲。放大后的种子脉冲可用于时域的光脉冲合成, 实现亚周期的超短脉冲产生。其中  $0.7 \sim 1.4 \mu\text{m}$  对应的脉冲宽度为 6 fs, 这是目前  $\sim 1.5 \mu\text{m}$  OPCPA 系统实现的最窄脉冲宽度。

### 2.2.3 $\sim 2 \mu\text{m}$ OPCPA 系统

$\sim 2 \mu\text{m}$  高重复频率 OPCPA 系统的输出参数如图 8 所示<sup>[14,29-30,58-68]</sup>。种子脉冲通过 Ti: Sapphire 飞秒激光带内差频或掺 Yb<sup>3+</sup> 皮秒激光与其在固体透明介质中的超连续光谱差频产生。目前  $\sim 2 \mu\text{m}$  高重复频率 OPCPA 系统输出的单脉冲能量为几个毫焦, 最高平均功率数十瓦, 峰值功率为吉瓦量级。2012 年, Deng 等<sup>[30]</sup> 首先利用 Ti: Sapphire 激光器

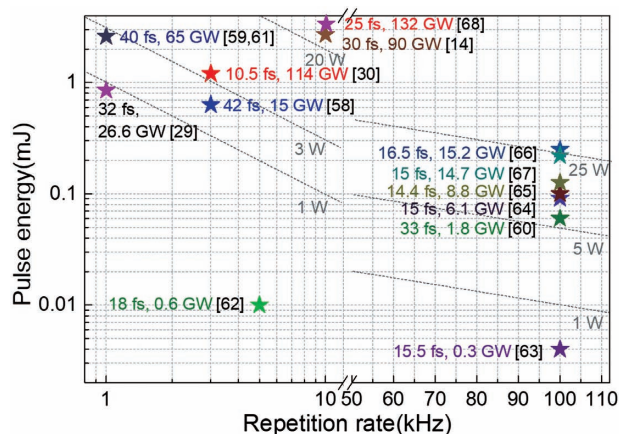


图 8  $\sim 2 \mu\text{m}$  高重复频率 ( $\geq 1 \text{ kHz}$ ) OPCPA 系统输出参数<sup>[14,29-30,58-68]</sup>

Fig. 8 Output parameters of  $\sim 2\text{-}\mu\text{m}$  high repetition rate ( $\geq 1 \text{ kHz}$ ) OPCPA systems<sup>[14,29-30,58-68]</sup>

在 Kr 气中进行光谱展宽, 之后在 PPLN 晶体进行差频获得  $2 \mu\text{m}$  种子脉冲, 并利用 Yb: YAG 碟片激光泵浦 PPLN 晶体和 LiNbO<sub>3</sub> 晶体, 实现对种子脉冲的三级放大, 最后利用 Si 块对放大后的种子脉冲进行压缩, 最终实现脉冲宽度为 10.5 fs, 峰值功率为 114 GW 的  $2 \mu\text{m}$  超短脉冲。10.5 fs 脉冲宽度是  $\sim 2 \mu\text{m}$  高重复频率 OPCPA 系统输出的最窄脉冲。2020 年, Pupeikis 等<sup>[66]</sup> 对 Ti: Sapphire 激光振荡器产生的  $\sim 800 \text{ nm}$  激光进行放大后, 在 BBO 晶体中进行差频, 获得  $2.2 \mu\text{m}$  的种子脉冲; 利用 PPLN 晶体实现对种子脉冲的三级放大, 最后利用 ZnSe 进行色散补偿, 最终获得平均功率为 25 W 的  $2.2 \mu\text{m}$  超短激光脉冲。Feng 等<sup>[14]</sup> 将掺 Yb<sup>3+</sup> 的薄片再生放大器作为泵浦源, 泵浦源的小部分能量用于透明介质晶体中的超连续光谱产生, 随后在 BBO 晶体中进行差频获得种子脉冲, 并利用 PPLN 晶体, 经过两级放大至  $\mu\text{J}$  量级; 泵浦源的大部分能量泵浦 BiBO 和 YCOB 晶体组成的二阶功率放大级, 将种子脉冲放大至 mJ 量级; 最后利用中红外石英玻璃对放大后的  $2 \mu\text{m}$  脉冲进行压缩, 最终获得重复频率为 10 kHz, 脉冲能量为 2.7 mJ 的  $\sim 2 \mu\text{m}$  超短脉冲, 平均功率为 27 W。随后采用更大口径的 YCOB 晶体实现了脉冲能量为 3.3 mJ, 平均功率为 33 W, 峰值功率为 132 GW 的  $2 \mu\text{m}$  超短脉冲<sup>[68]</sup>。该单脉冲能量、平均功率和峰值功率是目前  $\sim 2 \mu\text{m}$  高重复频率 OPCPA 系统实现的最大值。

### 2.2.4 $\sim 3 \mu\text{m}$ OPCPA 系统

$\sim 3 \mu\text{m}$  波段的超短脉冲可以通过两种方式在 OPCPA 系统中获得, 第一种  $3 \mu\text{m}$  超短脉冲是

$\sim 1.5 \mu\text{m}$  OPCPA 系统中的闲频光,在放大  $\sim 1.5 \mu\text{m}$  种子脉冲的同时输出  $3 \mu\text{m}$  超短脉冲。但是由于系统采用非共线相位匹配的方法,产生的  $3 \mu\text{m}$  超短脉冲角色散严重,需要利用光栅对  $3 \mu\text{m}$  超短脉冲进行光束整形。另一种,利用 OPCPA 系统直接对  $3 \mu\text{m}$  种子脉冲进行放大,放大后的  $3 \mu\text{m}$  脉冲不存在角色散的问题。 $\sim 3 \mu\text{m}$  高重复频率 OPCPA 系统的输出参数如图 9 所示<sup>[31-33,53,69-78]</sup>。目前  $\sim 3 \mu\text{m}$  高重复频率 OPCPA 系统输出的最高脉冲重复频率为  $160 \text{ kHz}$ ,单脉冲能量为  $5.8 \text{ mJ}$ ,峰值功率在  $\text{GW}$  量级。2011 年,Thai 等<sup>[70]</sup>利用非线性光纤将掺 Er 光纤超快激光的光谱展宽至  $1.05 \mu\text{m}$  后与  $1.55 \mu\text{m}$  激光在 PPLN 晶体中进行差频,获得  $\sim 3 \mu\text{m}$  种子脉冲,随后利用 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光放大器泵浦 PPLN 晶体,实现对种子脉冲的三级放大,最后利用光栅进一步压缩信号脉冲,实现了重复频率为  $160 \text{ kHz}$ ,脉冲能量为  $5.3 \mu\text{J}$  的  $\sim 3 \mu\text{m}$  超短激光脉冲输出。 $160 \text{ kHz}$  重复频率是目前  $\sim 3 \mu\text{m}$  OPCPA 系统实现的最高值。2017 年,Elu 等<sup>[31]</sup>采用同样的系统和相似的技术路线,实现了重复频率为  $160 \text{ kHz}$  的  $\sim 3 \mu\text{m}$  激光脉冲输出,通过 PPLN 晶体和 KNbO<sub>3</sub> 晶体放大后,脉冲能量被提升至  $131 \mu\text{J}$ ,对应的平均功率为  $21 \text{ W}$ ,是目前  $\sim 3 \mu\text{m}$  OPCPA 系统实现的最大值。2016 年,Yin 等<sup>[73]</sup>利用装满 Ne 气的空心光纤对 Ti:Sapphire 激光放大器输出的一部分激光进行光谱展宽,随后在 KTA 晶体中进行差频产生种子脉冲。另一部分,Ti:Sapphire 激光经过再次放大后泵浦 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体,对种子脉冲进行三级放大,最后利

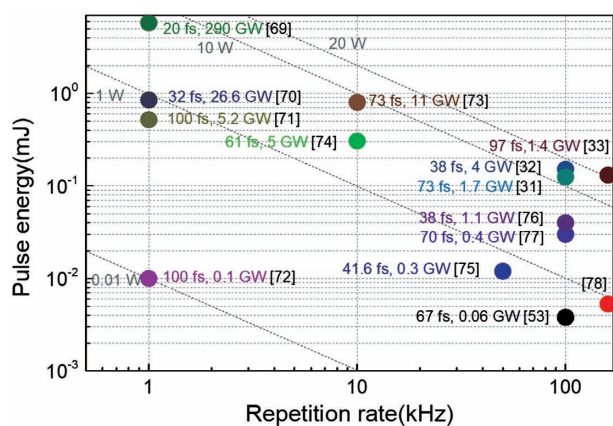


图 9  $\sim 3 \mu\text{m}$  高重复频率 ( $\geq 1 \text{ kHz}$ ) OPCPA 系统输出参数<sup>[31-33,53,69-78]</sup>

Fig. 9 Output parameters of  $\sim 3\text{-}\mu\text{m}$  high repetition rate ( $\geq 1 \text{ kHz}$ ) OPCPA systems<sup>[31-33,53,69-78]</sup>

用 Si 块进行色散补偿,最终获得单脉冲能量为  $5.8 \text{ mJ}$ ,脉冲宽度为  $20 \text{ fs}$ ,峰值功率为  $290 \text{ GW}$  的  $3 \mu\text{m}$  超短脉冲,是目前  $\sim 3 \mu\text{m}$  OPCPA 系统中的最高单脉冲能量,最窄脉冲宽度,最高峰值功率。

### 2.2.5 $>4 \mu\text{m}$ 的 OPCPA 系统

受限于相位匹配条件和非线性晶体的透明窗口,利用  $1 \mu\text{m}$  超短脉冲作为泵浦源,能实现输出波长在  $\sim 4 \mu\text{m}$  附近的 OPCPA 系统。虽然 LGS 等在  $1 \mu\text{m}$  波段透明的非线性晶体也能在 OPCPA 系统中实现波长大于  $4 \mu\text{m}$  的激光产生,但是由于这些非线性晶体的损伤阈值较小,只能获得较小的单脉冲能量。实现波长大于  $4 \mu\text{m}$  的大能量脉冲需要工作在  $2 \mu\text{m}$  波段的泵浦源。表 2 总结了输出波长大于等于  $4 \mu\text{m}$  的高重复频率 OPCPA 系统的输出参数<sup>[15,79-84]</sup>。2013 年,Zhao 等<sup>[15]</sup>将 Nd:YVO<sub>4</sub> 再生放大器作为泵浦源,在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中实现了  $3.3\sim 3.95 \mu\text{m}$  调谐激光脉冲输出,脉冲宽度为  $111 \text{ fs}$ ,脉冲能量为  $13.3 \text{ mJ}$ ,平均功率和峰值功率分别为  $13.3 \text{ W}$  和  $120 \text{ GW}$ 。2017 年,von Grafenstein 等<sup>[79]</sup>搭建了一个  $5 \mu\text{m}$  波段的 OPCPA 系统,该系统将工作在  $2 \mu\text{m}$  波段的 Ho:YLF 放大器作为泵浦源。泵浦源和 OPCPA 系统的前端是一个利用高非线性光纤光谱展宽的掺 Er 光纤激光器, $3.4 \mu\text{m}$  的种子脉冲在 PPLN 晶体中通过差频过程获得。种子脉冲在 ZGP 晶体中得到放大,为了避免  $5 \mu\text{m}$  闲频光的角色散,最后一级放大采用共线相位匹配。最终利用 CaF<sub>2</sub> 压缩后得到脉冲宽度为  $75 \text{ fs}$ ,脉冲能量为  $0.65 \text{ mJ}$ ,平均功率为  $0.65 \text{ W}$ ,峰值功率为  $8.7 \text{ GW}$  的  $5 \mu\text{m}$  闲频光超短脉冲。系统经过优化后于 2020 年实现单脉冲能量为  $3.4 \text{ mJ}$ ,峰值功率为  $38 \text{ GW}$  的  $5 \mu\text{m}$  超短脉冲<sup>[80-81,83]</sup>。2019 年,Qu 等<sup>[82]</sup>将 Yb:YAG 激光器(脉冲能量为  $14 \text{ mJ}$ )作为泵浦源,通过 YAG 晶体中的超连续光谱和 LGS 中的差频过程产生种子脉冲,种子脉冲被采用共线相位匹配的级联 LGS 放大,闲频光经 Ge 块进行色散补偿,最终获得脉冲重复频率为  $10 \text{ kHz}$ ,脉冲宽度为  $142 \text{ fs}$ ,脉冲能量为  $14 \mu\text{J}$ ,平均功率为  $0.14 \text{ W}$ ,峰值功率为  $0.1 \text{ GW}$  的  $9 \mu\text{m}$  超短脉冲。该波长是目前高重复频率 OPCPA 系统输出的最长波长。2020 年,Qian 等<sup>[84]</sup>将 Nd:YAG 激光放大器作为泵浦源,Ti:Sapphire 激光差频产生  $4 \mu\text{m}$  种子脉冲,在 KTA 晶体中实现了对  $4 \mu\text{m}$  涡旋光种子脉冲的放大,经光栅对压缩后得到脉冲宽度为  $119 \text{ fs}$ ,



表 2  $\geq 4 \mu\text{m}$  高重复频率 OPCPA 系统的主要输出参数Table 2 Output parameters of high repetition rate ( $\geq 1 \text{ kHz}$ ) OPCPA systems operating beyond  $4 \mu\text{m}$  wavelength

Time	Wavelength / $\mu\text{m}$	Repetition rate /kHz	Pulse duration /fs	Pulse energy /mJ	Average output power /W	Peak power /GW	Reference
2013	3.95	1	111	13.3	13.3	120	[15]
2017	5	1	75	0.65	0.65	8.7	[79]
2018	5	1	80	1	1	12.5	[80]
2019	5	1	68	1	3.1	14.7	[81]
2019	9	10	142	0.014	0.14	0.1	[82]
2020	4.9	1	89.4	3.4	3.4	38	[83]
2020	4	1	119	9.53	9.53	80.1	[84]

脉冲能量为 9.53 mJ, 平均功率为 9.53 W, 峰值功率为 80.1 GW 的  $4 \mu\text{m}$  涡旋光。

### 2.3 总结和展望

表 3 给出了目前在不同波段高重复频率 OPCPA 系统输出参数的最优值。受益于 Yb 泵浦源的快速发展及 BBO 晶体的高损伤阈值、大尺寸可用和宽增益带宽,  $\sim 800 \text{ nm}$  高重复频率 OPCPA 系统的研究趋于成熟。目前已实现的最大单脉冲能量为 53.8 mJ, 最高平均功率为 112 W, 最短脉冲宽度为 5 fs, 最高峰值功率为 5.5 TW。  $\sim 1.5 \mu\text{m}$  的高重复频率 OPCPA 系统利用钛宝石或者掺 Yb 超快激光放大器作为泵浦源。利用 800 nm 钛宝石激光泵浦时, OPCPA 系统工作在简并模式下, 信号光和闲频光均位于  $1.5 \mu\text{m}$  波长附近, 有利于减小二者之间的群速失配, 保持信号光的光谱宽度, 产生 10 fs 以内的周期量级超短脉冲。  $1 \mu\text{m}$  激光泵浦时, 非共线相位匹配的方式也可有效地增加增益带宽, 但是获得的脉冲宽度较宽, 在几十个

fs 左右。工作在  $\sim 2 \mu\text{m}$  波段的 OPCPA 系统主要基于 BBO、BiBO、LiNbO<sub>3</sub>/PPLN 和 YCOB 等非线性晶体。 BBO 和 BiBO 在  $> 2 \mu\text{m}$  波段吸收较为严重, 采用这两种晶体的  $\sim 2 \mu\text{m}$  OPCPA 系统的最高功率被限制在 10 W 左右。 LiNbO<sub>3</sub> 和 PPLN 晶体的吸收较小, 但严重的光折变效应妨碍了其产生大能量超短脉冲, 产生的脉冲能量在  $\mu\text{J}$  量级。 YCOB 晶体在  $2 \mu\text{m}$  波段也具有较高的透过率, 然而非线性系数仅有 BBO/BiBO 的二分之一, 虽然可以采用较长的晶体确保较高的转换效率, 但是会限制晶体的增益带宽同时引入过多的 B 积分因子, 不利于周期量级脉冲的产生。  $\sim 3 \mu\text{m}$  OPCPA 系统采用 LiNbO<sub>3</sub>/PPLN、KTA (800 nm 或  $1 \mu\text{m}$  激光泵浦) 和 ZGP 晶体 ( $2 \mu\text{m}$  激光泵浦)。 利用  $1 \mu\text{m}/2 \mu\text{m}$  激光泵浦时, 受限于非线性晶体的增益带宽, 很难直接获得周期量级的超短脉冲。 利用钛宝石激光泵浦的双啁啾光参量放大器输出的脉冲宽度为 20 fs。

表 3 不同波段 OPCPA 系统输出的最优参数

Table 3 Optimal output parameters of the OPCPA systems operation in different wavelengths

Wavelength / $\mu\text{m}$	Repetition rate /kHz	Pulse duration /fs	Pulse duration /mJ	Average output power /W	Peak power /GW
0.8	11500	5	53.8	112	$5.5 \times 10^3$
1.5	350	6	3	106	263.2
2	100	10.5 (Pump source is Ti : Sapphire)	3.3	33	132
3	160	20 (Pump source is Ti : Sapphire)	5.8	21	290

目前高重复频率 OPCPA 系统朝着更大能量、更高功率和更长波长的研究方向发展。该目标的实现依赖于高能泵浦源及大孔径高质量非线性晶体。钛宝石激光泵浦源的发射光谱虽然较宽, 在光参量放大过程中能够保持较宽的增益带宽, 但是难以直

接采用大功率高亮度的半导体激光器 (LD) 进行泵浦, 功率的进一步拓展受到了限制。掺 Yb 超快激光放大器能够利用 LD 直接泵浦, 相比于钛宝石激光, 功率更易拓展, 是实现大能量高功率 OPCPA 系统的基础。目前已经有输出功率 kW 左右、单脉冲

能量 mJ 量级的 kHz 掺 Yb 超快激光放大器报道, 脉冲宽度有几个 ps, 能够进一步通过非线性压缩手段实现百飞秒量级的超短脉冲, 非常适合用于泵浦 OPCPA 系统<sup>[22]</sup>。相比于 800 nm 的钛宝石激光, 掺 Yb 激光放大器的输出波长更长, 在实现高转换效率的中红外 OPCPA 系统方面更具优势。此外波长大于 4  $\mu\text{m}$  的高能 OPCPA 系统还需要 2  $\mu\text{m}$  超快激光放大器作为泵浦源, 但是受到中红外激光增益介质及 LD 泵浦源性能的限制, 长波长的超快激光放大器的研究有待进一步发展。要想在 OPCPA 系统中进一步实现更高的功率/能量输出, 需借助具有大口径、高损伤阈值的非线性晶体。BBO、BiBO、LBO、YCOB、LiNbO<sub>3</sub> 及 KTA 晶体的生长手段已趋于成熟, 均具有较高的损伤阈值且能够实现大尺寸生长, 但是受晶体透过率的限制, 这些晶体主要应用于 < 4  $\mu\text{m}$  的 OPCPA 系统。周期性极化的 PPLN 晶体能够保持更宽的增益带宽, 但是目前还无法实现大口径 PPLN 晶体的制备, 还无法应用到大能量 OPCPA 系统中<sup>[85-86]</sup>。大于 4  $\mu\text{m}$  的 OPCPA 系统主要以 ZGP 晶体为基础, ZGP 晶体在 2  $\mu\text{m}$  以下具有较强的吸收, 需要 2  $\mu\text{m}$  的超快激光放大器作为泵浦源<sup>[87]</sup>。其他晶体例如 AGS、AGSe 或 GaSe、GaAs 等半导体虽然也在中红外波段具有较高的透过率, 却面临着损伤阈值低、大尺寸生长困难等问题。

周期量级的 OPCPA 技术也是目前研究的发展方向之一。只有少数波段的 OPCPA 系统能够直接产生周期量级的超短脉冲, 例如 800 nm、1.5  $\mu\text{m}$  和 2  $\mu\text{m}$ <sup>[30,42,56]</sup>。一方面周期量级超短脉冲的产生可以通过增加 OPCPA 系统的增益带宽实现, 例如采用双啁啾 OPCPA 技术和频域光参量啁啾脉冲放大 (FOPA) 技术。双啁啾 OPCPA 技术采用强啁啾的超短脉冲作为泵浦源, 能够有效地拓宽 OPCPA 系统的增益带宽<sup>[88-90]</sup>。FOPA 技术在频域内对脉冲进行光参量放大, 该技术利用具有不同相位匹配角的非线性晶体放大脉冲不同的光谱成分, 以增加 OPCPA 系统的增益带宽, 最终能够实现周期量级超短脉冲输出<sup>[91]</sup>。另一方面, 非线性压缩技术能够拓宽入射激光脉冲的光谱, 因此结合 OPCPA 技术能够实现任意波长的宽光谱周期量级的超短脉冲, 尤其在 OPCPA 技术不易直接产生周期量级超短脉冲的中远红外波段<sup>[57,92]</sup>。

### 3 结 论

OPCPA 技术不仅可以利用非线性晶体的宽增

益带宽, 而且可以避免 CPA 中存在的增益窄化和热效应对功率进一步放大的限制。因此, 基于 OPCPA 技术的飞秒激光系统有望实现更高脉冲峰值功率的周期量级超短激光脉冲输出。而且随着激光技术的发展, OPCPA 超快激光系统不仅在 800 nm 附近实现了优良的性能, 在实现高功率红外波段 (1.5  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  及 > 4  $\mu\text{m}$  波段) 超快激光输出方面同样具有重要的优势。介绍的 OPCPA 系统包括泵浦源、前端、光参量放大级和压缩器在内的主要关键组成部分。对比和讨论了不同波段的 OPCPA 系统关键模块的异同; 总结了不同输出波长的高重复频率 OPCPA 系统的研究现状, 并分别对各波段 OPCPA 输出参数进行了分析对比。目前高重复频率的 OPCPA 系统仅能在 ~800 nm 波段实现峰值功率在 TW 量级的超短脉冲 (1.7 个光学周期) 输出。受到泵浦源及非线性晶体的限制, 中远红外高重复频率 OPCPA 系统的峰值功率被限制在 GW 量级, 且输出波长不超过 9  $\mu\text{m}$ 。未来高重复频率 OPCPA 系统朝着更大能量、更高功率和更长波长的方向发展。改善大口径晶体生长技术、发展长波长的超快激光放大器是实现此目标的关键。此外结合非线性压缩技术能够进一步压缩输出脉冲的宽度, 产生任意波段的周期量级高峰值功率超短脉冲。

### 参 考 文 献

- [1] Shank C, Ippen E, Dienes A. Passive mode locking of the CW dye laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1972, 8(6): 525.
- [2] Liu W W, Xue J Y, Su Q, et al. Research progress on ultrafast laser filamentation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500003.  
刘伟伟, 薛嘉云, 苏强, 等. 超快激光成丝现象研究综述 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500003.
- [3] Li Z X, Gong C, Hua L Q, et al. Supercontinuum generation in calcium fluoride crystals using high-intensity femtosecond laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508021.  
李子熙, 龚成, 华林强, 等. 强飞秒激光在氟化钙晶体中产生的超连续谱 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508021.
- [4] Fattahi H, Barros H G, Gorjan M, et al. Third-generation femtosecond technology [J]. Optica, 2014, 1(1): 45-63.
- [5] Pertot Y, Schmidt C, Matthews M, et al. Time-resolved X-ray absorption spectroscopy with a water window high-harmonic source [J]. Science, 2017, 355(6322): 264-267.

- [6] Popmintchev T, Chen M C, Popmintchev D, et al. Bright coherent ultrahigh harmonics in the keV X-ray regime from mid-infrared femtosecond lasers [J]. *Science*, 2012, 336(6086): 1287-1291.
- [7] Attar A R, Bhattacharjee A, Pemmaraju C D, et al. Femtosecond X-ray spectroscopy of an electrocyclic ring-opening reaction[J]. *Science*, 2017, 356(6333): 54-59.
- [8] Seres E, Seres J, Spielmann C. X-ray absorption spectroscopy in the keV range with laser generated high harmonic radiation[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(18): 181919.
- [9] Chang Z H, Rundquist A, Wang H W, et al. Generation of coherent soft X-rays at 2.7 nm using high harmonics[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 79(16): 2967.
- [10] Adachi S, Ishii N, Kanai T, et al. 5-fs, multi-mJ, CEP-locked parametric chirped-pulse amplifier pumped by a 450-nm source at 1 kHz [J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14341-14352.
- [11] Batysta F, Antipenkov R, Novák J, et al. Broadband OPCPA system with 11 mJ output at 1 kHz, compressible to 12 fs[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 17843-17848.
- [12] Budriūnas R, Stanislauskas T, Adamonis J, et al. 53 W average power CEP-stabilized OPCPA system delivering 5.5 TW few cycle pulses at 1 kHz repetition rate[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5797-5806.
- [13] Ishii N, Kaneshima K, Kitano K, et al. Sub-two-cycle, carrier-envelope phase-stable, intense optical pulses at 1.6  $\mu\text{m}$  from a  $\text{BiB}_3\text{O}_6$  optical parametric chirped-pulse amplifier [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(20): 4182-4184.
- [14] Feng T L, Heilmann A, Bock M, et al. 27 W 2.1  $\mu\text{m}$  OPCPA system for coherent soft X-ray generation operating at 10 kHz[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8724-8733.
- [15] Zhao K, Zhong H Z, Yuan P, et al. Generation of 120 GW mid-infrared pulses from a widely tunable noncollinear optical parametric amplifier[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2159-2161.
- [16] von Grafenstein L, Bock M, Ueberschaer D, et al. 2.05  $\mu\text{m}$  chirped pulse amplification system at a 1 kHz repetition rate: 2.4 ps pulses with 17 GW peak power[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(14): 3836-3839.
- [17] Wang Z Y, Heuermann T, Gebhardt M, et al. 108 W average power ultrashort pulses with GW-level peak power from a Tm-doped fiber CPA system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11260: 112600K.
- [18] Leshchenko V E, Talbert B K, Lai Y H, et al. High-power few-cycle Cr: ZnSe mid-infrared source for attosecond soft X-ray physics[J]. *Optica*, 2020, 7(8): 981-988.
- [19] Ding C Y, Xiong W, Fan T T, et al. High flux coherent super-continuum soft X-ray source driven by a single-stage, 10 mJ, Ti: Sapphire amplifier-pumped OPA [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 6194-6202.
- [20] Liu Y Z, Krogen P, Hong K H, et al. Fiber-amplifier-pumped, 1-MHz, 1- $\mu\text{J}$ , 2.1- $\mu\text{m}$ , femtosecond OPA with chirped-pulse DFG front-end [J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 9144-9154.
- [21] Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [22] Wandt C, Herkommer C, Jung R, et al. Ultrafast thin-disk based CPA system with  $>1$  kW output power and  $<500$  fs pulse duration [C] // *High Intensity Lasers and High Field Phenomena*, February 16-18, 2020, Istanbul, Turkey. Washington, D.C.: OSA, 2020: HM2B.4.
- [23] Nubbemeyer T, Kaumanns M, Ueffing M, et al. 1 kW, 200 mJ picosecond thin-disk laser system[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1381-1384.
- [24] Migal E, Pushkin A, Bravy B, et al. 3.5-mJ 150-fs Fe: ZnSe hybrid mid-IR femtosecond laser at 4.4  $\mu\text{m}$  for driving extreme nonlinear optics [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2550-2553.
- [25] Prinz S, Haefner M, Teisset C Y, et al. CEP-stable, sub-6 fs, 300-kHz OPCPA system with more than 15 W of average power[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1388-1394.
- [26] Fattahi H, Teisset C Y, Pronin O, et al. Pump-seed synchronization for MHz repetition rate, high-power optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9833-9840.
- [27] Höppner H, Hage A, Tanikawa T, et al. An optical parametric chirped-pulse amplifier for seeding high repetition rate free-electron lasers[J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(5): 053020.
- [28] Mero M, Noack F, Bach F, et al. High-average-power, 50-fs parametric amplifier front-end at 1.55  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33157-33163.
- [29] Hong K H, Huang S W, Moses J, et al. High-energy, phase-stable, ultrabroadband kHz OPCPA at 2.1  $\mu\text{m}$  pumped by a picosecond cryogenic Yb: YAG laser[J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 15538-15548.
- [30] Deng Y, Schwarz A, Fattahi H, et al. Carrier-

- envelope-phase-stable, 1.2 mJ, 1.5 cycle laser pulses at 2.1  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 4973-4975.
- [31] Elu U, Baudisch M, Pires H, et al. High average power and single-cycle pulses from a mid-IR optical parametric chirped pulse amplifier[J]. *Optica*, 2017, 4(9): 1024-1029.
- [32] Thiré N, Maksimenka R, Kiss B, et al. 4-W, 100-kHz, few-cycle mid-infrared source with sub-100-mrad carrier-envelope phase noise [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1505-1514.
- [33] Zou X, Li W K, Liang H K, et al. 300  $\mu\text{J}$ , 3 W, few-cycle, 3  $\mu\text{m}$  OPCPA based on periodically poled stoichiometric lithium tantalate crystals [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2791-2794.
- [34] Zou X, Li W K, Liang H K, et al. Sub-millijoule, 3  $\mu\text{m}$  optical parametric chirped-pulse amplifier at 10 kHz repetition rate [C] // CLEO: QELS \_ Fundamental Science 2019, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2019: FTh1B.5.
- [35] Bhar G C, Chaudhary A K, Kumbhakar P, et al. A comparative study of laser-induced surface damage thresholds in BBO crystals and effect of impurities [J]. *Optical Materials*, 2004, 27(1): 119-123.
- [36] Traub T, Ruebel F, L'huillier J A. Efficient injection-seeded kHz picosecond LBO optical parametric generator[J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(1): 25-29.
- [37] Wesch W, Rensberg J, Schmidt M, et al. Damage evolution in  $\text{LiNbO}_3$  due to electronic energy deposition below the threshold for direct amorphous track formation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 126(12): 125105.
- [38] Baudisch M, Hemmer M, Pires H, et al. Performance of  $\text{MgO}:\text{PPLN}$ ,  $\text{KTA}$ , and  $\text{KNbO}_3$  for mid-wave infrared broadband parametric amplification at high average power[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5802-5805.
- [39] Zheng Y Q, Wu A H, Gao P, et al. Laser damage threshold and nonlinear optical properties of large aperture elements of YCOB crystal [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8206: 82062G.
- [40] Hildenbrand A, Kieleck C, Tyazhev A, et al. Laser damage studies of  $\text{CdSiP}_2$  and  $\text{ZnGeP}_2$  nonlinear crystals with nanosecond pulses at 1064 and 2090 nm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8964: 896417.
- [41] Hädrich S, Demmler S, Rothhardt J, et al. High-repetition-rate sub-5-fs pulses with 12 GW peak power from fiber-amplifier-pumped optical parametric chirped-pulse amplification [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 313-315.
- [42] Rothhardt J, Demmler S, Hädrich S, et al. Octave-spanning OPCPA system delivering CEP-stable few-cycle pulses and 22 W of average power at 1 MHz repetition rate [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10870-10878.
- [43] Prinz S, Schnitzenbaumer M, Potamianos D, et al. Thin-disk pumped optical parametric chirped pulse amplifier delivering CEP-stable multi-mJ few-cycle pulses at 6 kHz [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1108-1124.
- [44] Mecseki K, Windeler M K R, Miahnahri A, et al. High average power 88 W OPCPA system for high-repetition-rate experiments at the LCLS X-ray free-electron laser [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(5): 1257-1260.
- [45] Mackonis P, Rodin A M. OPCPA investigation with control over the temporal shape of 1.2 ps pump pulses [J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 12020-12027.
- [46] Hrisafov S, Pupeikis J, Chevreuil P A, et al. High-power few-cycle near-infrared OPCPA for soft X-ray generation at 100 kHz [J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 40145-40154.
- [47] Golz T, Buß J H, Schulz M, et al. High power CEP-stable OPCPA at 800 nm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11259: 112591L.
- [48] Furch F J A, Witting T, Osolodkov M, et al. High-repetition rate optical parametric chirped pulse amplification system for attosecond science experiments [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11034: 110340I.
- [49] Ishii N, Kaneshima K, Kanai T, et al. Generation of ultrashort intense optical pulses at 1.6  $\mu\text{m}$  from a bismuth triborate-based optical parametric chirped pulse amplifier with carrier-envelope phase stabilization [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(9): 094001.
- [50] Yin Y C, Li J, Ren X M, et al. High-efficiency optical parametric chirped-pulse amplifier in  $\text{BiB}_3\text{O}_6$  for generation of 3 mJ, two-cycle, carrier-envelope-phase-stable pulses at 1.7  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1142-1145.
- [51] Ishii N, Kaneshima K, Kanai T, et al. Generation of sub-two-cycle millijoule infrared pulses in an optical parametric chirped-pulse amplifier and their application to soft X-ray absorption spectroscopy with high-flux high harmonics [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(1): 014003.
- [52] Rigaud P, van de Walle A, Hanna M, et al. Supercontinuum-seeded few-cycle mid-infrared

- OPCPA system[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26494-26502.
- [53] Mero M, Heiner Z, Petrov V, et al. 43 W, 155  $\mu\text{m}$  and 125 W, 31  $\mu\text{m}$  dual-beam, sub-10 cycle, 100 kHz optical parametric chirped pulse amplifier [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5246-5249.
- [54] Grguraš I, Golz T, Schulz M, et al. A high power (11 W), tunable (1.45–1.65  $\mu\text{m}$ ) OPCPA for THz generation in organic crystals [C] // *CLEO: Science and Innovations 2019*, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2019: STh3E.3.
- [55] Windeler M K R, Mecseki K, Miahnahri A, et al. 100 W high-repetition-rate near-infrared optical parametric chirped pulse amplifier [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4287-4290.
- [56] Alismail A, Wang H C, Barbiero G, et al. Multi-octave, CEP-stable source for high-energy field synthesis [J]. *Science Advances*, 2020, 6(7): eaax3408.
- [57] Jargot G, Daher N, Lavenu L, et al. Self-compression in a multipass cell [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(22): 5643-5646.
- [58] Silva F, Bates P K, Esteban-Martin A, et al. High-average-power, carrier-envelope phase-stable, few-cycle pulses at 2.1  $\mu\text{m}$  from a collinear  $\text{BiB}_3\text{O}_6$  optical parametric amplifier [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(5): 933-935.
- [59] Hong K H, Lai C J, Siqueira J P, et al. Multi-mJ, kHz, 2.1  $\mu\text{m}$  optical parametric chirped-pulse amplifier and high-flux soft X-ray high-harmonic generation [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3145-3148.
- [60] Shamir Y, Rothhardt J, Hädrich S, et al. High-average-power 2  $\mu\text{m}$  few-cycle optical parametric chirped pulse amplifier at 100 kHz repetition rate [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5546-5549.
- [61] Lai C J, Hong K H, Siqueira J P, et al. Multi-mJ mid-infrared kHz OPCPA and Yb-doped pump lasers for tabletop coherent soft X-ray generation [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(9): 094009.
- [62] Bigler N, Phillips C R, Pupeikis J, et al. Ultra-broadband optical parametric chirped-pulse amplifier generating 9.1 W at 2.2  $\mu\text{m}$  [C] // *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, June 25-29, 2017, Munich. New York: IEEE Press, 2017.
- [63] Neuhaus M, Wnuk P, Fuest H, et al. High power CEP-stable 2  $\mu\text{m}$  source based on fiber-laser seeded Innoslab with 100-kHz to 1-MHz repetition rate [C] // *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, June 25-29, 2017, Munich. New York: IEEE Press, 2017.
- [64] Neuhaus M, Fuest H, Seeger M, et al. 10 W CEP-stable few-cycle source at 2  $\mu\text{m}$  with 100 kHz repetition rate [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16074-16085.
- [65] Bigler N, Pupeikis J, Hrisafov S, et al. High-power OPCPA generating 1.7 cycle pulses at 2.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26750-26757.
- [66] Pupeikis J, Chevreuil P A, Bigler N, et al. Water window soft X-ray source enabled by a 25 W few-cycle 2.2  $\mu\text{m}$  OPCPA at 100 kHz [J]. *Optica*, 2020, 7(2): 168-171.
- [67] Pupeikis J, Chevreuil P A, Phillips C R, et al. Power scaling of few-cycle PPLN-based mid-IR OPCPA [C] // *Advanced Solid State Lasers 2019*, September 29-October 3, 2019, Vienna Austria. Washington, D.C.: OSA, 2019: AM2A.1.
- [68] Heilmann A, Bock M, Ehrentraut L, et al. 33 W OPCPA at 10 kHz repetition rate with four cycle pulse duration at 2.1  $\mu\text{m}$  based on a single pump laser [J]. *EPJ Web of Conferences*, 2020, 243: 10002.
- [69] Chalus O, Thai A, Bates P K, et al. Six-cycle mid-infrared source with 3.8  $\mu\text{J}$  at 100 kHz [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19): 3204-3206.
- [70] Thai A, Hemmer M, Bates P K, et al. Sub-250-mrad, passively carrier-envelope-phase-stable mid-infrared OPCPA source at high repetition rate [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19): 3918-3920.
- [71] Mayer B W, Phillips C R, Gallmann L, et al. Sub-four-cycle laser pulses directly from a high-repetition-rate optical parametric chirped-pulse amplifier at 3.4  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(21): 4265-4268.
- [72] Lu F M, Kanai T, Matsumoto Y, et al. KTA-based optical parametric amplifiers for MJ-class mid-IR source [C] // *CLEO: Applications and Technology 2016*, June 5-10, 2016, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2016: JTu5A.72.
- [73] Yin Y C, Li J, Ren X M, et al. High-energy two-cycle pulses at 3.2  $\mu\text{m}$  by a broadband-pumped dual-chirped optical parametric amplification [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 24989-24998.
- [74] Wang S, Gerrity M, Backus S, et al. Multi-mJ, 1 kHz, 3.1  $\mu\text{m}$  OPCPA [C] // *CLEO: Science and Innovations 2017*, May 14-19, 2017, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2017: STh1L.5.
- [75] Mero M, Petrov V. High-power, few-cycle, angular dispersion compensated mid-infrared pulses from a noncollinear optical parametric amplifier [J]. *IEEE*

- Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-8.
- [76] He H J, Wang Z H, Hu C Y, et al. 520- $\mu\text{J}$  mid-infrared femtosecond laser at 2.8  $\mu\text{m}$  by 1-kHz KTA optical parametric amplifier [J]. Applied Physics B, 2018, 124(2): 1-5.
- [77] Thiré N, Maksimenka R, Kiss B, et al. Highly stable, 15 W, few-cycle, 65 mrad CEP-noise mid-IR OPCPA for statistical physics [J]. Optics Express, 2018, 26(21): 26907-26915.
- [78] Alves J, Pires H, João C P, et al. 5 mJ, 5-optical-cycles operation of a 3  $\mu\text{m}$  OPCPA pumped by a 1  $\mu\text{m}$  source [C] // Frontiers in Optics 2020, September 14-17, 2020, Washington, United States. Washington, D.C.: OSA, 2020: JTh4A.14.
- [79] von Grafenstein L, Bock M, Ueberschaer D, et al. 5  $\mu\text{m}$  few-cycle pulses with multi-gigawatt peak power at a 1 kHz repetition rate [J]. Optics Letters, 2017, 42(19): 3796-3799.
- [80] Bock M, von Grafenstein L, Griebner U, et al. Generation of millijoule few-cycle pulses at 5  $\mu\text{m}$  by indirect spectral shaping of the idler in an optical parametric chirped pulse amplifier [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(12): C18-C24.
- [81] von Grafenstein L, Bock M, Griebner U, et al. Few-cycle midwave-IR OPCPA with 32 GW peak power at a 1 kHz repetition rate [C] // 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 23-27, 2019, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2019.
- [82] Qu S Z, Liang H K, Liu K, et al. 9  $\mu\text{m}$  few-cycle optical parametric chirped-pulse amplifier based on LiGaS<sub>2</sub> [J]. Optics Letters, 2019, 44(10): 2422-2425.
- [83] von Grafenstein L, Bock M, Ueberschaer D, et al. Multi-millijoule, few-cycle 5  $\mu\text{m}$  OPCPA at 1 kHz repetition rate [J]. Optics Letters, 2020, 45(21): 5998-6001.
- [84] Qian J Y, Peng Y J, Li Y Y, et al. Femtosecond mid-IR optical vortex laser based on optical parametric chirped pulse amplification [J]. Photonics Research, 2020, 8(3): 421-425.
- [85] Xu X Z, Gui Y X, Wang Y G. Research progress of high quality and large size laser crystals [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(4): 295-299.  
徐学珍, 桂尤喜, 王永国. 优质大尺寸激光晶体研究进展 [J]. 激光与红外, 2007, 37(4): 295-299.
- [86] Sobolev E, Komm P, Noah S, et al. Parametric amplification in large-aperture diffusion-bonded periodically poled crystals [J]. Optics Letters, 2019, 44(5): 1261-1264.
- [87] Yuan L G, Chen G, Hou T Y, et al. Damage threshold measurement of 2  $\mu\text{m}$  laser on ZnGeP<sub>2</sub> crystal and its influencing factors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0802001.  
苑利钢, 陈国, 侯天禹, 等. 2  $\mu\text{m}$  激光对磷锗锌晶体的损伤阈值测量及影响因素分析 [J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802001.
- [88] Fu Y X, Xue B, Midorikawa K, et al. TW-scale mid-infrared pulses near 3.3  $\mu\text{m}$  directly generated by dual-chirped optical parametric amplification [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(24): 241105.
- [89] Fu Y X, Takahashi E J, Midorikawa K. High-energy infrared femtosecond pulses by dual-chirped optical parametric amplification [C] // CLEO: Science and Innovations 2015, May 10-15, 2015, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2015: SF1M.4.
- [90] Yin Y C, Li J, Ren X M, et al. High-energy two-cycle pulses at 3.2  $\mu\text{m}$  by a broadband-pumped dual-chirped optical parametric amplification [J]. Optics Express, 2016, 24(22): 24989-24998.
- [91] Schmidt B E, Thiré N, Lassonde P, et al. Frequency domain optical parametric amplification [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim 2015, August 24-28, 2015, Busan Republic, Korea. Washington, D.C.: OSA, 2015: 25C1\_1.
- [92] Wang P F, Li Y Y, Li W K, et al. 26 mJ/100 Hz CEP-stable near-single-cycle 4  $\mu\text{m}$  laser based on OPCPA and hollow-core fiber compression [J]. Optics Letters, 2018, 43(9): 2197-2200.

# High Repetition-Rate Optical Parametric Chirped-Pulse Amplifiers

Shang Jingcheng<sup>1,2,3</sup>, Liu Yizhou<sup>1,2</sup>, Zhao Shengzhi<sup>1,2</sup>, Feng Tianli<sup>1,2,3\*</sup>, Yang Kejian<sup>1,3,4</sup>,  
Qiao Wenchao<sup>1,2,3</sup>, Zhao Yuantao<sup>1,2,3</sup>, Li Tao<sup>1,2,3\*\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;*

<sup>2</sup>*Shandong Key Laboratory for Laser Technologies and Applications, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;*

<sup>3</sup>*Key Laboratory of Laser & Infrared System, Ministry of Education, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;*

<sup>4</sup>*Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China*

## Abstract

**Significance** Optical parametric chirped-pulse amplifier (OPCPA), which relies on the optical parametric process existing in nonlinear crystals to realize pulse amplification, can further enhance a yielded peak power by avoiding the gain narrowing and thermal effects that usually exist in a chirped-pulse amplifier. The generated ultrashort pulse with high peak power from OPCPA can considerably extend the ultrafast pulse to X-ray and infrared regimes, thereby bringing a new revolution to ultrafast science. OPCPA system pumped ultrafast X-ray desktop light source has potential applications in medicine, biology, and materials science. In this article, we review the development of OPCPA systems, including its main characteristics and research progresses in different wavelength regimes ( $\sim 0.8$ ,  $\sim 1.5$ ,  $\sim 2$ ,  $\sim 3$ , and  $>4$   $\mu\text{m}$ ).

**Progress** In  $\sim 0.8$ - $\mu\text{m}$  OPCPA systems, the pumping laser pulse (0.515  $\mu\text{m}$ ) is usually generated via the second harmonic generation process from a Yb-doped laser amplifier. The seed pulses can be generated using a mode-locking few-cycle Ti: Sapphire oscillator directly or via the supercontinuum generation process. The energy/power of seed pulses is usually scaled up inside the BBO nonlinear crystals. The dispersion compensation for the amplified seed pulses is realized by the chirped mirror or glass block. Currently, the highest pulse repetition rate of 11.5 MHz, shortest pulse duration of 5 fs, maximum average output power of 112 W, largest pulse energy of 54 mJ, and highest peak power of 5.5 TW have been realized in the  $\sim 0.8$ - $\mu\text{m}$  OPCPA systems (Fig. 6).

In  $\sim 1.5$ - $\mu\text{m}$  OPCPA systems, the pumping source is a Ti: Sapphire laser amplifier or Yb-doped laser amplifier. The seed pulses are generated via the supercontinuum generation process in noble gas or transparent medium, which is stimulated by the Ti: Sapphire laser oscillator and Er- or Yb-doped fiber/solid-state laser oscillators. Different crystals, such as BIBO, DSTMS (organic crystal), KTA, and LBO, have been employed to amplify the seed pulses. The dispersion of the amplified seed pulses is compensated by the fused quartz, Si, or chirped mirrors. A 350-kHz pulse repetition rate, 6-fs pulse duration, 106-W average output power, 3-mJ pulse energy, and 263-GW peak power have been achieved in the  $\sim 1.5$ - $\mu\text{m}$  OPCPA systems (Fig. 7).

For  $\sim 2$ - $\mu\text{m}$  OPCPA systems, the Yb-doped disk laser or Ti: Sapphire laser amplifiers are mainly used as the pumping sources. The seed pulses are generated via the difference frequency generation after the supercontinuum generation process. The seed pulse energy/power is enhanced in a crystal, such as PPLN, LiNbO<sub>3</sub>, BIBO, or YCOB. The amplified seed pulses are compressed by a high-transmittance crystal, such as Si, ZnSe, or quartz. The optimal output parameters achieved from the  $\sim 2$ - $\mu\text{m}$  OPCPA systems are 100-kHz pulse repetition rate, 10.5-fs pulse duration, 33-W average output power, 3.3-mJ pulse energy, and 132-GW peak power (Fig. 8).

A  $\sim 3$ - $\mu\text{m}$  OPCPA system is usually pumped with the Ti: Sapphire laser or Yb-doped lasers. A 3- $\mu\text{m}$  ultrafast pulse can be directly amplified using the  $\sim 3$ - $\mu\text{m}$  OPCPA system or can be the idler pulse from a  $\sim 1.5$ - $\mu\text{m}$  OPCPA system. The employed nonlinear crystals for amplification are PPLN, KNbO<sub>3</sub>, and MgO:LiNbO<sub>3</sub>. The pulse is compressed with grating pairs or solid medium (Si). The highest pulse repetition rate of 160 kHz, shortest pulse duration of 20 fs, highest average output power of 21 W, largest pulse energy of 5.8 mJ, and highest peak power of 290 GW have been reported from  $\sim 3$ - $\mu\text{m}$  OPCPA systems (Fig. 9).

In OPCPA systems operating beyond 4- $\mu\text{m}$  wavelength region, the pump lasers are 1- $\mu\text{m}$  Yb-doped or 2- $\mu\text{m}$  Ho-doped laser amplifiers. In particular, the Ho-doped laser amplifiers are beneficial to realize a high-efficient long wavelength from the OPCPA system. The seed pulses realized from the difference frequency process are amplified by

the ZGP, KTA, or LGS (@ 1  $\mu\text{m}$ ). The dispersion management is performed by  $\text{CaF}_2$ , Ge, or grating pair. At present, OPCPA systems can deliver a laser pulse with the longest wavelength of up to 9  $\mu\text{m}$  (Table 2).

**Conclusion and Prospect** Although the performances of OPCPA systems in different wavelength regimes have remarkably improved, there is still scope for further improvement. With the progress of high-power pump laser sources and high-quality nonlinear crystals, the OPCPA system is heading toward achieving shorter pulse duration, larger pulse energy, higher peak power, and longer output wavelength than the existing ones.

**Key words** laser technology; optical parametric chirped-pulse amplifier; ultrafast laser; high output power; high repetition-rate; optical period

**OCIS codes** 140.3280; 140.3410; 140.3580; 140.7090