

## 低阈值高稳定性飞秒光参量放大器

曾文<sup>1,2</sup>, 李博瀚<sup>1,2\*</sup>, 李煌<sup>1</sup>, 任泽峰<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>中国科学院大连化学物理研究所分子反应动力学国家重点实验室, 辽宁 大连 116650;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 设计并搭建了一台具有高重复频率(1 MHz)和低泵浦阈值的飞秒光参量放大器(OPA)。该 OPA 使用掺镱飞秒光纤激光器进行泵浦,超连续白光作为种子在  $\beta$ -偏硼酸钡(BBO)晶体内被 515 nm 倍频光放大,实现了 650~950 nm 范围内的可调谐输出。该 OPA 的最高转换效率超过 20%,功率稳定性可以达到 0.22%,压缩后的最短脉宽小于 34 fs,当 1030 nm 波段的脉冲能量为 300 nJ 时即可实现稳定输出。相比于飞秒光参量振荡器,该系统更加简单稳定;相比常规飞秒光参量放大器,该 OPA 具有更低的阈值,更适合高重复频率低能量的应用场景,例如多光子成像、显微瞬态吸收光谱等。

**关键词** 激光器;飞秒光参量放大器;低阈值;可调谐激光;高稳定性

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2301004

## 1 引言

高重复频率的可调谐飞秒激光在时间分辨光谱学<sup>[1-2]</sup>、非线性光谱学<sup>[3]</sup>、生物成像<sup>[4-5]</sup>等科学研究中有着广泛的应用。飞秒光参量放大器(OPA)是获得波长可调谐飞秒激光的重要方法之一<sup>[6]</sup>。相比于飞秒光参量振荡器(OPO)<sup>[7-11]</sup>,OPA 具有更简单的结构,不需要反馈腔长,容易调谐,可以获得更高的能量<sup>[12-13]</sup>和更宽的增益带宽<sup>[14-15]</sup>。早期 OPA 一般使用千赫兹飞秒钛宝石放大系统进行泵浦<sup>[16-18]</sup>。近年来,随着高重复频率掺镱光纤和固体放大技术的成熟,OPA 的重复频率也逐渐被提高到 100 kHz 和 1 MHz 量级<sup>[14-15]</sup>。相比于 OPO,OPA 需要注入超连续白光作为种子并进行放大,而使用固体介质产生白光一般需要  $\mu$ J 量级的脉冲能量<sup>[6]</sup>,因此 OPA 的泵浦能量阈值不会低于超连续种子的产生能量。同时,为了保证足够高的增益,泵浦光必须要有足够的能量。对于千赫兹飞秒放大系统,通常输出的单脉冲能量为 mJ 量级,因此产生种子所需的能量微乎其微,且泵浦光能量充足,可以很容易实现 OPA 输出。但是,对于高重复频率飞秒放大系统,单脉冲能量在  $\mu$ J 量级,产生超连续白光种子需要的能量比例较大,这限制了其转换效率,泵浦光甚至无法达到产生白光的阈值。而对于很多科学研究,例如非线性光学成像<sup>[4-5]</sup>,常常需要较高的重复频率(若干 MHz),但只需要几十 nJ 单脉冲能量。如果需要使用  $\mu$ J 量级的单脉冲能量泵浦 OPA,不但需要几

十或百瓦量级的平均功率输出,而且 OPA 产生的可调谐输出光还需要衰减后才能使用,这造成了极大的浪费。因此,低阈值的 OPA 是一种可行的方案,既具有可以与 OPO 比拟的高重复频率和高转化率,又具备简单的机械结构和高稳定性。

为了降低 OPA 的泵浦阈值,Tzeng 等<sup>[19]</sup>使用光子晶体光纤作为种子光产生介质,以周期极化铌酸锂(PPLN)作为增益介质,仅用能量为 100 nJ、中心波长为 1040 nm、脉宽为 1 ps 的激光就实现了 OPA 的泵浦,其调谐范围为 0.7~1.9  $\mu$ m,重复频率为 50 MHz,最大输出能量超过 10 nJ。Krauth<sup>[20]</sup>使用 8 cm 长的锥形光纤(tapered fiber)产生白光,以 PPLN 或 GaSe 作为增益介质,实现了近红外到中红外的可调谐输出,重复频率高达 41.7 MHz,输出平均功率超过 500 mW。以上工作都使用光纤作为白光产生介质,其优势在于可以大幅降低白光产生的阈值,但是光纤存在以下问题:光纤的成本较高,尤其是光子晶体光纤;需要复杂的耦合系统;比起固体介质,色散管理也更加复杂,因此文献<sup>[17]</sup>也仅获得了 110 fs 的最短输出。使用具有更高非线性系数的固体材料作为白光种子产生介质也是一种降低 OPA 泵浦阈值的方法。Hansel 等<sup>[21]</sup>使用具有更高三阶非线性系数的 YAG 晶体作为白光产生介质,以 PPLN 作为放大介质,仅用能量为 500 nJ 的 800 nm 钛宝石激光就实现了 OPA 的泵浦及近红外和中红外的可调谐输出。

本文设计了一个结构简单且具有低泵浦阈值的

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-01-21; 录用日期: 2022-03-02

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0208700)、国家自然科学基金(22073097)

通信作者: \*bhli@dicp.ac.cn; \*\*zfren@dicp.ac.cn

OPA, 使用  $\text{YVO}_4$  晶体产生白光, 以  $\beta$ -偏硼酸钡 (BBO) 晶体作为放大介质, 仅需要能量为 300 nJ、中心波长为 1030 nm、脉宽为 300 fs 的激光即可实现泵浦, 产生覆盖 650~970 nm 波长范围的可调谐输出, 具有优异的光斑质量, 输出功率的稳定性优于 0.22%, 压缩后脉宽最短可以低于 35 fs。该 OPA 保证了低阈值的高稳定性, 结构简单, 成本低, 有望取代现有的 OPO, 在高重复频率和低能量的实验中有广阔的应用前景。

## 2 仪器设计和搭建

### 2.1 白光产生介质的选择

超连续白光的产生是影响 OPA 阈值的重要因素之一。为了降低阈值, 需要介质材料具有较大的非线性折射率 ( $n_2$ )。常见的用于产生超连续白光的介质有熔融石英玻璃、蓝宝石、 $\text{CaF}_2$ 、YAG、KGW 等。在固体介质中产生超连续白光首先需要能够产生自聚焦效应。高斯光束自聚焦的功率阈值<sup>[22-23]</sup>为

$$P_{SF} \approx \frac{0.15\lambda_0^2}{n_0 n_2}, \quad (1)$$

式中:  $n_0$  是介质的折射率;  $n_2$  是介质的非线性折射率;  $\lambda_0$  是入射光的波长;  $P_{SF}$  是自聚焦所需要的最小功率。需要指出的是, 自聚焦功率阈值在近似条件下与聚焦情况无关。在常见的用于产生超连续白光的材料中,

$\text{YVO}_4$  具有较大的  $n_2$  和  $n_0$ , 在 1030 nm 波长处  $\text{YVO}_4$  只需要不到 0.54 MW 的峰值功率即可实现自聚焦<sup>[24]</sup>。

### 2.2 光路设计和搭建

实验中使用一台国产飞秒光纤放大器作为 OPA 的泵浦源, 其中心波长为 1030 nm, 重复频率为 1 MHz, 平均功率为 10 W, 脉宽为 300 fs。本次实验中仅使用 0.3 W 功率泵浦 OPA, 对应单脉冲能量为 300 nJ。OPA 的光路设计如图 1 所示。一个 1/2 波片 (WP) 和一个偏振分光平片 (TFP1) 组成分光系统, 透过的 180 nJ 能量用于产生白光。剩下的 120 nJ 光经过透镜 (L1) 后聚焦在一块 BBO 晶体 (BBO1, 极角  $\theta = 23.4^\circ$ , 方位角  $\varphi = 0^\circ$ , 厚度为 1 mm) 上发生倍频, 产生的大约 60 nJ 的倍频光作为 OPA 放大的泵浦光。透过 TFP1 的光经过透镜后聚焦在  $\text{YVO}_4$  晶体中, 产生的超连续白光作为种子。泵浦光和种子光被二向色镜 (DM1) 合束后聚焦到一个 BBO 晶体 (BBO2,  $\theta = 22.3^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , 厚度为 5 mm) 上进行放大。通过调节安装有反射镜 M3、M4 的平移台实现种子光和泵浦光在时间上的重合。当实现时间和空间重合后, 可以观察到晶体后面出现放大后的光斑。放大光斑再被一个透镜 (L6) 准直后, 利用二向色镜 (DM2) 过滤掉剩余的 515 nm 泵浦光, 即可获得信号光 (signal) 和闲频光 (idler)。输出的信号光和闲频光经过一个分光镜 (SP) 后分光, 信号光再经过一对棱镜进行脉宽压缩。

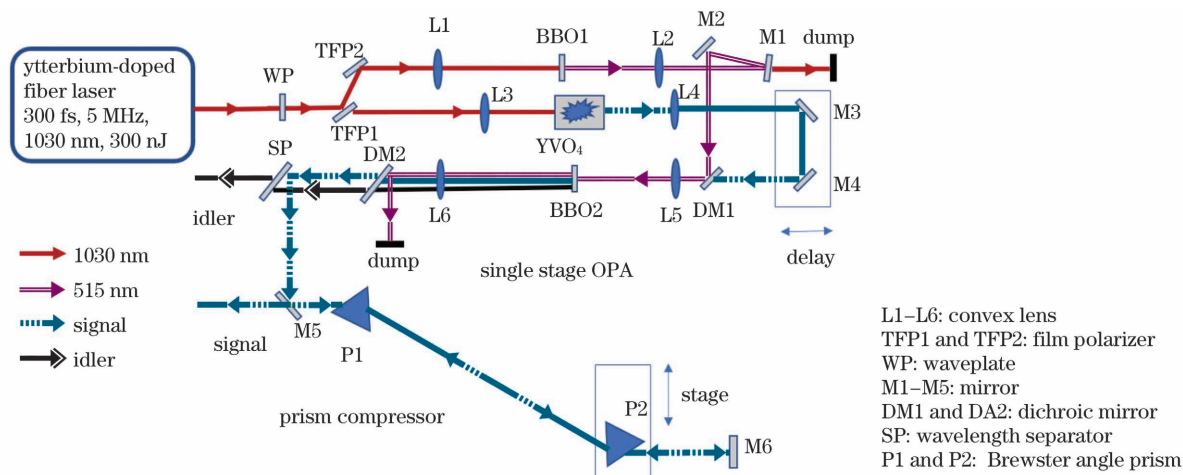


图 1 OPA 光路示意图

Fig. 1 Optical path diagram of OPA

## 3 实验结果和分析

利用能量约为 180 nJ 的光即可在  $\text{YVO}_4$  晶体中产生稳定的超连续白光, 其峰值功率约为 0.6 MW, 与计算得到的 0.54 MW 接近, 但是  $\text{YVO}_4$  产生的白光稳定性并不高。几乎没有文献报道使用  $\text{YVO}_4$  产生的白光作为 OPA 的种子源, 一般使用蓝宝石或者 YAG 晶体产生的白光<sup>[6,14]</sup>。其原因有以下几点:  $\text{YVO}_4$  晶体的带隙比 YAG 和蓝宝石小,  $\text{YVO}_4$  透过截止波长约为 450 nm, 而蓝宝石透过截止波长约为 150 nm, YAG 晶

体为 250 nm,  $\text{YVO}_4$  晶体可以在 1030 nm 处发生 3 光子及更多光子的吸收, 但是蓝宝石和 YAG 晶体在 1030 nm 处需要分别吸收 7 光子和 5 光子才能跃迁至激发态, 因此  $\text{YVO}_4$  晶体对聚焦的 1030 nm 激光有更强的多光子吸收能力。同时,  $\text{YVO}_4$  晶体在室温下的热导率仅为  $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 蓝宝石和 YAG 晶体在室温下的热导率分别为  $42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  和  $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 前者的散热性能不如后两者。实验中使用的激光器具有 1 MHz 的重复频率, 这很可能是局部热效应导致了白光的不稳定。因此, 我们模仿板条的结构, 把  $\text{YVO}_4$  制成

通光面尺寸为  $1.2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 、长度约为  $2.5\text{ mm}$  的薄片并将其粘在一块铝的热沉上,通过调整聚焦透镜,尽可能使焦点和成丝的位置位于  $\text{YVO}_4$  晶体的中间部分,避免端面的热效应。经过调整后,仪器的整体稳定性大幅提升。从侧面观察  $\text{YVO}_4$  晶体,可以明显看到其中的

成丝现象,如图 2(a)所示。光斑的形状如图 2(b)所示。产生的超连续白光经过短通滤光片后的光谱如图 3 所示。该超连续白光覆盖了  $650\sim 950\text{ nm}$  的可见光范围,该范围基本是可调谐钛宝石飞秒激光器和 OPO 的输出范围<sup>[9, 11, 25]</sup>。

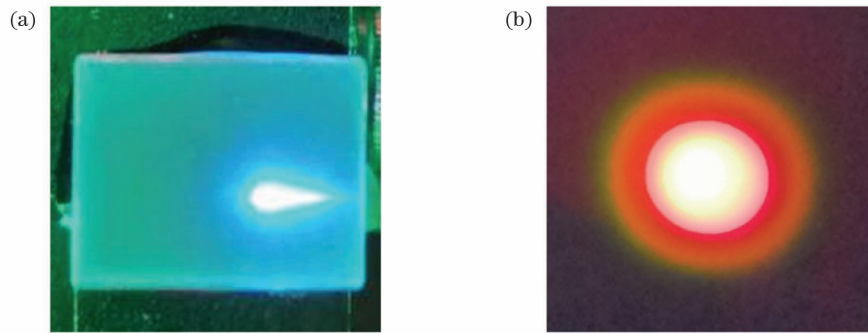


图 2 超连续白光照片。(a)  $\text{YVO}_4$  晶体中产生的超连续白光; (b)超连续白光光斑

Fig. 2 Photographs of supercontinuum white light . (a) Supercontinuum white light generated in  $\text{YVO}_4$  crystal; (b) supercontinuum white light spot

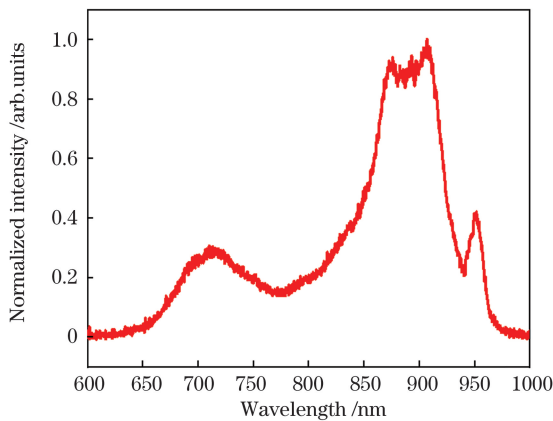


图 3  $\text{YVO}_4$  晶体中产生的超连续白光光谱

Fig. 3 Spectrum of supercontinuum white light generated in  $\text{YVO}_4$  crystal

将能量为  $60\text{ nJ}$  的  $515\text{ nm}$  泵浦光和超连续白光种子同时聚焦在 BBO 晶体上,通过调节空间重合和时间延迟,即可看见放大信号,且在  $690\text{ nm}$  处可以输出超过  $18.5\text{ nJ}$  的脉冲能量。由  $1030\text{ nm}$  基频光可计算得到转换效率超过  $20.6\%$ 。在  $690\text{ nm}$  处获得最大能量输出的原因如下:一个  $515\text{ nm}$  光子在非线性晶体内部转化成一个信号光光子和一个闲频光光子,信号光光子的波长越短,可提取能量的比例就越高;另一方面超连续白光种子恰好在  $700\text{ nm}$  附近出现了一个能量局部极大值,更容易实现较高的能量输出。此时,如果使用一对布儒斯特角棱镜对输出信号光进行压缩处理,压缩系统的整体压缩效率约为  $93\%$ ,且压缩光路中所使用的镀银反射镜会损失一部分能量。该系统在  $690\text{ nm}$  处可以获得脉宽约为  $59\text{ fs}$  的脉冲, $870\text{ nm}$  输出光的脉宽小于  $35\text{ fs}$ 。压缩输出信号的自相关测量结果如图 4 所示,测量使用的自相关仪的分辨率为  $1\text{ fs}$ 。通过微调 BBO 晶体的角度及种子光与泵浦光的时间延迟,可以得到覆盖  $650\sim 950\text{ nm}$  范围的不同

波长输出。调谐光谱如图 5 所示,光谱分辨率为  $2\text{ nm}$ 。图 6 是调谐输出脉冲的能量和压缩后的最短脉宽。相比于 OPO,该系统可以获得更窄的脉宽<sup>[9]</sup>。

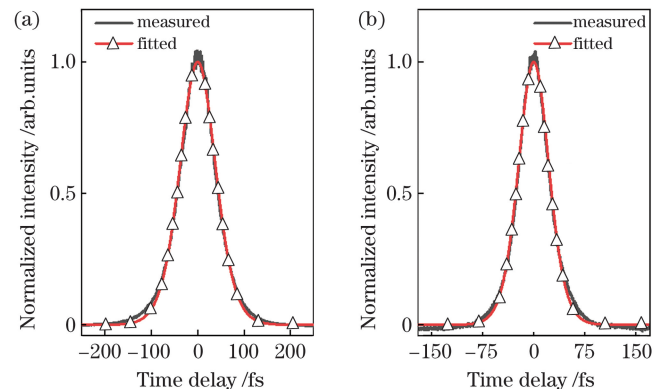


图 4 压缩输出信号的自相关测量结果。(a) 中心波长为  $690\text{ nm}$ ; (b) 中心波长为  $870\text{ nm}$

Fig. 4 Autocorrelation measurement results of compressed output signals. (a) Central wavelength is  $690\text{ nm}$ ; (b) central wavelength is  $870\text{ nm}$

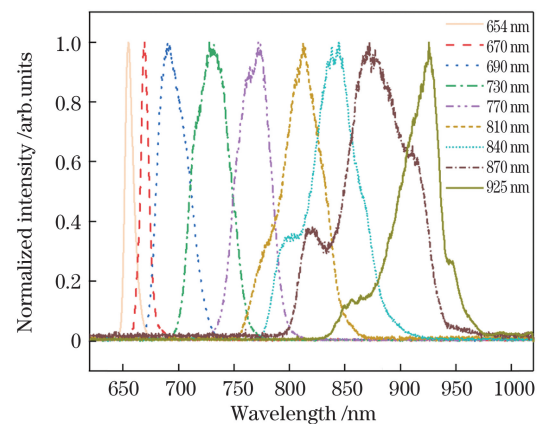


图 5 调谐输出信号的光谱

Fig. 5 Spectra of tunable output signals

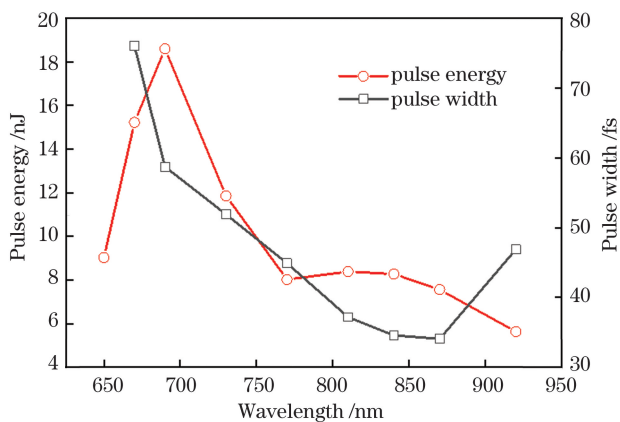


图 6 调谐输出脉冲的能量和压缩后的最短脉宽

Fig. 6 Energy of tunable output pulse and shortest pulse width after compression

这是因为将注入的超连续白光进行放大可以获得更高的输出带宽,且 OPO 的腔内色散较大,而 OPA 仅需要单通放大,所以色散管理更好。

本文还测量了 OPA 在峰值输出时的长时间功率稳定性,测试过程中,实验室温度控制为  $(22.0 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $35\% \sim 40\%$ 。6 h 内的功率波动大约为  $0.22\%$ ,如图 7 所示,优于其他类似的 OPA 的稳定性<sup>[9, 19-20]</sup>。飞秒 OPO 由于其内部谐振腔的结构,很难保持非常高的输出稳定性。相比于采用了两级或者多级放大结构的飞秒 OPA,本文报道的 OPA 光程更短,结构更简单,因而容易获得较高的稳定性。

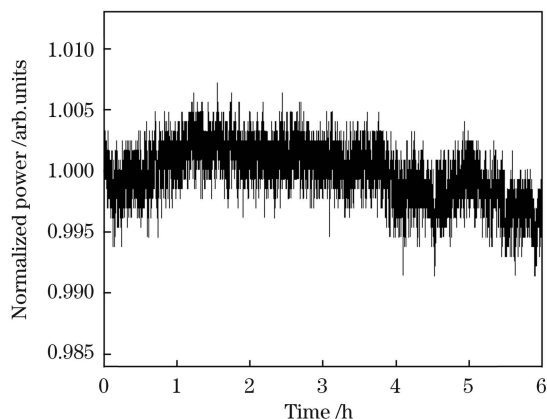


图 7 OPA 在 690 nm 处输出时的长时间功率稳定性

Fig. 7 Long term power stability of OPA output at 690 nm

根据以往的报道,一般需要若干  $\mu\text{J}$  能量才能在固体介质中产生白光<sup>[12, 14-15, 26]</sup>,如果需要稳定的光参量放大过程,则需要更高的能量。Antipenkov 等<sup>[12]</sup>通过使用  $2 \mu\text{J}$  能量,在蓝宝石晶体中制备了超连续白光。Rigaud 等<sup>[14]</sup>通过使用  $5 \mu\text{J}$  能量,在 YAG 晶体中制备了超连续白光种子。如果是脉宽更长的皮秒激光系统,则需要数十  $\mu\text{J}$  的泵浦光才能得到超连续白光<sup>[27]</sup>。Hansel 等<sup>[28]</sup>提出了以  $200 \text{ nJ}$  钛宝石飞秒激光产生的超连续光作为种子的 OPA,但是还需要  $300 \text{ nJ}$  光作为光参量放大的泵浦光。飞秒 OPA 作为一个较成熟的技术,目前已有商业化产品。立陶宛的 Light

Conversion 公司是飞秒光参量放大器生产商之一,该公司生产的  $1030 \text{ nm}$  激光泵浦的飞秒 OPA 的最低泵浦能量为  $10 \mu\text{J}$ 。相比于以上报道,本文所提的 OPA 只需要  $300 \text{ nJ}$  能量即可正常工作,且仅需要  $180 \text{ nJ}$  的能量就可以产生稳定的超连续白光,大幅降低了泵浦阈值。在输出稳定性方面,OPO 和 OPA 的输出功率稳定性为  $1.5\% \sim 2.0\%$ <sup>[9, 14]</sup>。而本文所提的 OPA 在 6 h 内的功率稳定性达到了  $0.22\%$ ,这与 Light Conversion 公司同类型商品的参数( $2\%$ )具有可比性。

本文提出的 OPA 不仅可以在低泵浦能量下实现输出,当增加泵浦能量时,仍然可以实现稳定工作。激光器的最大输出脉冲能量仅为  $10 \mu\text{J}$ ,即使其全部输入后,系统仍工作稳定,因此该 OPA 的最大工作能量不低于  $10 \mu\text{J}$ 。

## 4 结 论

设计并搭建了一台低阈值且高稳定的飞秒 OPA,仅需要能量为  $300 \text{ nJ}$  的  $1030 \text{ nm}$  飞秒光即可实现泵浦,实现了  $650 \sim 950 \text{ nm}$  连续可调谐输出,其最大泵浦光子转换效率超过  $20\%$ ,压缩后的脉宽最短低于  $35 \text{ fs}$ ,在 6 h 内的测试中相对稳定性约为  $0.22\%$ 。该 OPA 比现有的飞秒 OPO 更简单更稳定,有望替代飞秒 OPO 作为高重复频率的可调谐飞秒激光光源。

## 参 考 文 献

- [1] Berera R, van Grondelle R, Kennis J T M. Ultrafast transient absorption spectroscopy: principles and application to photosynthetic systems [J]. *Photosynthesis Research*, 2009, 101(2/3): 105-118.
- [2] Luo C W, Wang Y T, Yabushita A, et al. Ultrabroadband time-resolved spectroscopy in novel types of condensed matter [J]. *Optica*, 2016, 3(1): 82-92.
- [3] 曾庆伟,刘磊,胡帅,等. 强飞秒激光在云雾环境中的非线性传输 [J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1519001.  
Zeng Q W, Liu L, Hu S, et al. Nonlinear propagation of intense femtosecond laser pulses in a foggy and cloudy environment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1519001.
- [4] Theer P, Hasan M T, Denk W. Two-photon imaging to a depth of  $1000 \mu\text{m}$  in living brains by use of a Ti:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  regenerative amplifier [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(12): 1022-1024.
- [5] Horton N G, Wang K, Kobat D, et al. *In vivo* three-photon microscopy of subcortical structures within an intact mouse brain [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(3): 205-209.
- [6] Cerullo G, de Silvestri S. Ultrafast optical parametric amplifiers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(1): 1-18.
- [7] 高亚萍,李霄,王鹏,等.  $10 \text{ W}$  级中红外光学参量振荡器偏振合成技术 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1019001.  
Shang Y P, Li X, Wang P, et al. Polarized combination of mid-infrared optical parametric oscillator at  $10 \text{ W}$  levels [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1019001.
- [8] Adler F, Cossel K C, Thorpe M J, et al. Phase-stabilized,  $1.5 \text{ W}$  frequency comb at  $2.8\text{--}4.8 \mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1330-1332.
- [9] Tian W L, Wang Z H, Meng X H, et al. High-power, widely tunable, green-pumped femtosecond  $\text{BiB}_3\text{O}_6$  optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 4851-4854.
- [10] 胡明列,王珏,范锦涛. 光纤激光器泵浦的飞秒光学参量振荡器研究进展 [J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1901001.

- Hu M L, Wang J, Fan J T. Research progress on fiber laser-pumped femtosecond optical parametric oscillators[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1901001.
- [11] 范锦涛, 胡明列, 顾澄琳, 等. 基于 LBO 的高功率飞秒绿光抽运的光学参量振荡器[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902009. Fan J T, Hu M L, Gu C L, et al. High power femtosecond green-pumped optical parametric oscillator based on lithium triborate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0902009.
- [12] Antipenkov R, Varanavičius A, Zaukevičius A, et al. Femtosecond Yb: KGW MOPA driven broadband NOPA as a frontend for TW few-cycle pulse systems[J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3519-3524.
- [13] Yin Y C, Li J, Ren X M, et al. High-efficiency optical parametric chirped-pulse amplifier in BiB O<sub>6</sub> for generation of 3 mJ, two-cycle, carrier-envelope-phase-stable pulses at 1.7 μm [J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1142-1145.
- [14] 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.
- [15] Riedel R, Stephanides A, Prandolini M J, et al. Power scaling of supercontinuum seeded megahertz-repetition rate optical parametric chirped pulse amplifiers [J]. Optics Letters, 2014, 39(6): 1422-1424.
- [16] Brida D, Marangoni M, Manzoni C, et al. Two-optical-cycle pulses in the mid-infrared from an optical parametric amplifier [J]. Optics Letters, 2008, 33(24): 2901-2903.
- [17] Mücke O D, Sidorov D, Dombi P, et al. Scalable Yb-MOPA-driven carrier-envelope phase-stable few-cycle parametric amplifier at 1.5 microm [J]. Optics Letters, 2009, 34(2): 118-120.
- [18] Silva F, Bates P K, Esteban-Martin A, et al. High-average-power, carrier-envelope phase-stable, few-cycle pulses at 2.1 μm from a collinear BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> optical parametric amplifier[J]. Optics Letters, 2012, 37(5): 933-935.
- [19] Tzeng Y W, Lin Y Y, Huang C H, et al. Broadband tunable optical parametric amplification from a single 50 MHz ultrafast fiber laser[J]. Optics Express, 2009, 17(9): 7304-7309.
- [20] Krauth J, Steinmann A, Hegenbarth R, et al. Broadly tunable femtosecond near- and mid-IR source by direct pumping of an OPA with a 41.7 MHz Yb: KGW oscillator [J]. Optics Express, 2013, 21(9): 11516-11522.
- [21] Hansel T, Köhler W, Assion A, et al. NIR and MIR tunable 130 fs supercontinuum-seeded OPA with 25 nJ pulse energy and 5 MHz repetition rate [C] // 2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC, May 12-16, 2013, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2013.
- [22] Cumberland B A, Travers J C, Popov S V, et al. 29 W High power CW supercontinuum source [J]. Optics Express, 2008, 16(8): 5954-5962.
- [23] Selivanov A G, Denisov I A, Kuleshov N V, et al. Nonlinear refractive properties of Yb<sup>3+</sup>-doped KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> and YVO<sub>4</sub> laser crystals [J]. Applied Physics B, 2006, 83(1): 61-65.
- [24] Bradler M, Baum P, Riedle E. Femtosecond continuum generation in bulk laser host materials with sub-μJ pump pulses [J]. Applied Physics B, 2009, 97(3): 561-574.
- [25] Coyle J C E, Kemp A J, Hopkins J M, et al. Ultrafast diode-pumped Ti: sapphire laser with broad tunability [J]. Optics Express, 2018, 26(6): 6826-6832.
- [26] Penwell S B, Whaley-Mayda L, Tokmakoff A. Single-stage MHz mid-IR OPA using LiGaS<sub>2</sub> and a fiber laser pump source [J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1363-1366.
- [27] Indra L, Batysta F, Hřebek P, et al. Picosecond pulse generated supercontinuum as a stable seed for OPCPA [J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 843-846.
- [28] Hansel T, Köhler W, Assion A, et al. NIR and MIR tunable 130 fs Supercontinuum-Seeded OPA with 25 nJ pulse energy and 5 MHz repetition rate [C] // 2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC, May 12-16, 2013, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2013.

## Low Threshold and Highly Stable Femtosecond Optical Parametric Amplifier

Zeng Wen<sup>1,2</sup>, Li Bohan<sup>1,2\*</sup>, Li Huang<sup>1</sup>, Ren Zefeng<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Molecular Reaction Dynamics, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116650, Liaoning, China;

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** High repetition tunable femtosecond light sources are widely used in time-resolved spectroscopy, nonlinear spectroscopy, and bioimaging, and other fields. Optical parametric oscillators (OPO) and optical parametric amplifiers (OPA) are the most frequent equipment to generate tunable femtosecond pulses and the high pump energy in single pass amplification. The threshold of OPA is limited by the minimum pulse energy to create a supercontinuum seed. OPA is usually applied in low repetition and high-energy laser systems. For high repetition system, a high average power pump laser source is required. OPO is applied in high repetition systems, where the threshold is much lower. However, the complex cavity and poor stability constrain its application. OPA with an extremely low threshold is a possible solution for a stable high repetition tunable ultrafast laser source. In earlier studies, various techniques were used to lower the OPA threshold. These techniques fall into two categories: lowering the threshold of seed generation through supercontinuum generation in highly nonlinear optical fibers, and replacing the gain medium with crystals with high nonlinear coefficients like PPLN. The cost of these OPAs is much higher, and the stability is also poor. The article reports a femtosecond OPA design with an extremely low threshold and excellent stability. The threshold of our setup is only 300 nJ at 1030 nm and the long-time stability for 6 h is approximately 0.22%. Our design is possible to replace femtosecond OPOs.

**Methods** To reduce the OPA threshold, a  $\text{YVO}_4$  crystal, the nonlinear refractive index of which is much higher than that of common crystals, is used as the medium of supercontinuum generation. The calculated threshold of the  $\text{YVO}_4$  crystal is 0.54 MW at 1030 nm. Details of the setup of OPA are shown in Fig. 1. The pump laser source is a femtosecond fiber laser with a central wavelength of 1030 nm, a repetition rate of 1 MHz, an average power of 10 W, and a pulse width of 300 fs. The 0.3 W power is used to pump the OPA. The pump laser is split by a half wave plate and a thin film polarizer. Approximately, the 180 nJ energy is focused in the  $\text{YVO}_4$  crystal to generate the supercontinuum seed. The residue pulse is frequency doubled in a barium borate crystal (polar angle  $\theta = 23.4^\circ$ , azimuth angle  $\varphi = 0^\circ$ , and thickness  $t = 1$  mm) to generate the pump pulse and the conversion efficiency is approximately 50%. The pump pulse at 515 nm and the supercontinuum seed are combined by a dichromic mirror and focused into another barium borate crystal ( $\theta = 22.3^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , and  $t = 5$  mm). A wavelength separator separates the amplified signal and idler pulse, and the reflected signal is compressed by a pair of Brewster angle prisms.

**Results and Discussions** The supercontinuous white light is generated in the  $\text{YVO}_4$  crystal using 1030 nm light with energy of about 180 nJ. The spectrum of supercontinuum white light generated in the  $\text{YVO}_4$  crystal is shown in Fig. 3. The amplified signal is observed when the delay between the seed and pump pulse is carefully adjusted. The maximum output energy of the signal is 18.5 nJ at 690 nm. The transmission efficiency of the compressor is 93%. The compressed pulse width at 690 nm is 59 fs and the minimum pulse width is 35 fs at 870 nm. The wavelength of tunable pulses is 650–950 nm, which is limited by the spectrum of the supercontinuum seed. The time-bandwidth of the output signal is far from the Fourier transfer limit because the higher order dispersion is not compensated. The compressed pulse width is shorter than the pulse width of the reported OPO. The spectra of output signals are shown in Fig. 5. The energy and the minimum compressed pulse width are shown in Fig. 6. Also, the 6 h stability test reveals an excellent result. The power stability is 0.22%. This design's framework is straightforward, the optical distance is less, and the seed is only amplified once. These are the primary causes of the output power's stability. Due to the single-stage architecture, the input pump pulse energy of this OPA could not be so high. Herein, the highest pump pulse energy is 10  $\mu\text{J}$ , which is limited by the fiber laser. Under the highest pump energy, the output of the OPA is still stable.

**Conclusions** In this article, a new design of single-stage OPA is reported. A  $\text{YVO}_4$  crystal is used for supercontinuum seed generation to achieve an extremely low threshold, and the threshold is down to 300 nJ at 1030 nm. The tunable output is achieved at 650–950 nm, and the minimum compressed pulse width is shorter than 35 fs. This design also exhibits excellent long-time stability, and the stability of the output power for 6 h is only 0.22%. It is possible to replace OPO with a pump laser at the repetition rate of dozens of MHz. This OPA design has great potential in time-resolved spectroscopy, nonlinear spectroscopy, bioimaging, etc.

**Key words** lasers; femtosecond optical parametric amplifier; low threshold; tunable laser; high stability