

## 百赫兹大能量 KTA 双波长光参量振荡器

孟君<sup>1</sup>, 丛振华<sup>1,2,3</sup>, 赵智刚<sup>1,2,3</sup>, 王上<sup>3</sup>, 亓云轩<sup>1,2</sup>, 张行愚<sup>1,2,3</sup>, 刘兆军<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> 山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 青岛 266237;<sup>3</sup> 激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237

**摘要** 报道了百赫兹大能量  $\text{KTiOAsO}_4$  (KTA) 晶体光参量振荡器(OPO)系统,并研制了脉冲重复频率为 100 Hz、输出能量达 580 mJ、波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 主振荡功率放大器。OPO 谐振腔采用平平腔结构,用在 X 方向切割的 KTA 晶体作为非线性晶体。在脉冲重复频率为 100 Hz 时,得到 1.53  $\mu\text{m}$  信号光和 3.47  $\mu\text{m}$  闲频光的单脉冲能量分别为 178 mJ 和 64 mJ,脉冲宽度分别为 13.7 ns 和 11.8 ns,泵浦光到参量光的光-光转换效率为 43.6%。

**关键词** 激光光学; 全固态激光; 非线性频率变换; 光参量振荡器

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1201009

## 1 引言

人眼安全波段的 1.5  $\mu\text{m}$  激光位于大气近红外窗口,对空气(包括战场硝烟,尤其是以红磷、白磷为主的烟雾)的穿透性很强,因此在激光测距、激光雷达、环境监测等方面有很泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>。中红外波段(3~5  $\mu\text{m}$ )也是大气窗口波段,受气体分子吸收和悬浮物散射的影响很小,在光谱测量、遥感和军事方面具有很高的应用价值<sup>[3-6]</sup>,因此研究大能量中短波双波长激光光源具有重要意义。

目前,基于光参量振荡器(OPO)的非线性频率转换技术是获得 1.5  $\mu\text{m}$  和 3~5  $\mu\text{m}$  波段激光的主要技术手段之一。技术成熟且可以高质量生产的非线性晶体主要有  $\text{KTiOAsO}_4$  (KTA)、 $\text{KTiOPO}_4$  (KTP)、 $\text{ZnGeP}_2$  (ZGP)等双轴晶体以及基于准相位匹配的周期极化晶体,如周期极化磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体、周期极化铌酸锂(PPLN)晶体、周期极化钽酸锂(PPLT)晶体。通常利用 KTP 晶体获得 1.5  $\mu\text{m}$  波段激光<sup>[7-8]</sup>,但 KTP 晶体在中红外波段有严重的吸收,限制了 3~5  $\mu\text{m}$  波长激光的产生。为了得到 3~5  $\mu\text{m}$  波段激光,人们对 ZGP 晶体

进行了大量研究<sup>[9-11]</sup>,但 ZGP-OPO 的信号光和闲频光都在 3~5  $\mu\text{m}$  波段<sup>[12]</sup>,其泵浦波长为 2  $\mu\text{m}$ ,实现难度较大。此外,PPLN 晶体也被广泛应用于中红外激光<sup>[13-14]</sup>的获得。KTA 晶体与 KTP 晶体属于同晶系,但相比 KTP 晶体,KTA 晶体的损伤阈值较低,具有高损伤阈值(大于 600  $\text{MW}/\text{cm}^2$ )、大非线性系数( $d_{24}=3.2 \text{ pm}/\text{V}$ );且 KTA 晶体的接收角大,适用温度范围广、物化性质稳定<sup>[15-16]</sup>,在中红外波段的透过性能优于 KTP 晶体。

目前,高重复频率(千赫兹量级及以上)和低重复频率(低于百赫兹量级)的 OPO 得到了国内外学者的广泛关注和研究。在高重复频率方面,Bai 等<sup>[17]</sup>通过腔内 OPO 分别获得了 3.77 W 的 1.5  $\mu\text{m}$  信号光和 1.18 W 的 3.5  $\mu\text{m}$  闲频光,重复频率为 50 kHz。Zhang 等<sup>[18]</sup>利用 KTA 晶体获得了 5.35 W 的 1.5  $\mu\text{m}$  激光输出,其重复频率为 6 kHz。Peng 等<sup>[19]</sup>通过 PPLN-OPO 获得了 16.7 W 的 3.91  $\mu\text{m}$  闲频光和 46 W 的 1.46  $\mu\text{m}$  信号光,重复频率为 7 kHz。Liu 等<sup>[20]</sup>报道了  $\text{Ho}:\text{YAG}$  激光泵浦 ZGP-OPO,获得了功率高达 161 W、重复频率为 20 kHz 的中红外激光。对于

收稿日期: 2021-03-03; 修回日期: 2021-03-18; 录用日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(62075116,12074222)、山东省重点研发计划、山东省自然科学基金(ZR2020MF114,ZR2019MF039,ZR2020QF095)、山东大学卓越团队基金、山东大学杰出中青年基金、山东大学齐鲁青年启动基金

\*E-mail: zhaojunliu@sdu.edu.cn

重复频率低于百赫兹量级的 OPO, Webb 等<sup>[21]</sup> 用 KTA-OPO 获得了重复频率为 100 Hz、单脉冲能量达 330 mJ 的 1.5  $\mu\text{m}$  信号光输出, 但该方案将 4 块长度为 20 mm 的 KTA 晶体串联, 转换效率仅为 30%。Hazama 等<sup>[22]</sup> 通过 ZGP-OPO 获得了 3.8  $\mu\text{m}$  的信号光, 单脉冲能量为 33 mJ, 重复频率为 10 Hz。穆宇等<sup>[23]</sup> 通过环形腔 KTP-OPO 实现了 500 mJ 的 1.5  $\mu\text{m}$  激光, 重复频率为 30 Hz。Liu 等<sup>[24]</sup> 通过 KTA-OPO 获得了脉冲能量分别为 218 mJ 和 60 mJ 的 1.5  $\mu\text{m}$  信号光和 3.8  $\mu\text{m}$  闲频光, 重复频率为 10 Hz。同时, 用重复频率为 100 Hz 的半导体侧泵 Nd: YAG 固体激光器泵浦源, 通过 KTA-OPO 获得了 89.7 mJ 的 1.54  $\mu\text{m}$  信号光以及 33.8 mJ 的 3.46  $\mu\text{m}$  闲频光<sup>[25]</sup>。针对已有研究结果, 本文报道了百赫兹大能量 KTA 晶体 OPO 系统, 并研制了脉冲重复频率为 100 Hz、输出能量达 580 mJ、波长为 1064 nm 的 Nd: YAG 主振荡功率放大器。

## 2 实验装置

表 1 给出了低重频、大能量 OPO 的代表性成果, 可以发现, 较大能量的中短波双波长激光脉冲重复频率大多低于 100 Hz。因此, 实验研究了百赫兹、大能量的 KTA-OPO, 解决了激光放大级中热效应导致的热退偏问题, 并对 OPO 的转换效率进行了优化。泵浦源采用半导体侧泵主振荡功率放大器 (MOPA) 系统, 振荡器为非稳腔结构, 获得了 30 mJ 的 1064 nm 激光; 采用两级功率放大器获得了 580 mJ 的 1064 nm 激光, 光束质量  $M_x^2$  和  $M_y^2$  分别为 4.6 和 3.7。选用 X 方向切割的 KTA 晶体作为参量转换介质, 当脉冲重复频率为 100 Hz、波长为 1064 nm 的激光输入能量为 580 mJ 时, 可获得单脉冲总能量为 242 mJ 的高稳定中短波激光输出, 泵浦光到输出参量光的光-光转换效率为 43.6%, 1.53  $\mu\text{m}$  和 3.47  $\mu\text{m}$  波长的单脉冲能量分别为 178 mJ 和 64 mJ, 脉冲宽度分别为 13.7 ns 和 11.8 ns。

表 1 中短波 OPO 的参数<sup>[21,23-31]</sup>

Table 1 Parameters of short-wave OPO<sup>[21,23-31]</sup>

Crystal	Wavelength / $\mu\text{m}$	Energy / mJ	Repetition rate / Hz	Ref.
KTA	1.5/3.8	218/60	10	[24]
KTP	1.5	450	10	[26]
KTA	3.5	10	10	[27]
KTA	1.5/3.5	151/53	10	[28]
KTA	1.5	150	10	[29]
KTP	1.5	400	20	[30]
KTP	1.5	245	30	[26]
KTA	1.5	243	30	[31]
KTP	1.5	500	30	[23]
KTA	1.5	330	100	[21]
KTA	1.5/3.8	89.7/33.8	100	[25]
KTA	1.5/3.4	178/64	100	ours

实验设计的 KTA-OPO 系统由半导体侧泵 Nd: YAG 主功率放大系统和 KTA-OPO 组成, 实验装置如图 1 所示。半导体侧泵 Nd: YAG 主功率放大系统作为 OPO 的泵浦源, 振荡器和两级放大器采用东方强光科技有限公司的半导体侧面泵浦模块 (光谱线宽为 2.2~2.5 nm), 增益介质采用中电科光电科技有限公司的 Nd: YAG 晶体棒, 增益介质  $\text{Nd}^{3+}$  离子的原子数分数为 0.6%。泵浦源采用水冷散热方式 (温度  $T=22\text{ }^\circ\text{C}$ ), 将两块完全相同的

Nd: YAG 晶体棒串接, 并在两个 Nd: YAG 晶体棒之间放置  $90^\circ$  石英旋光器, 以补偿高功率工作时的热退偏效应。为了获得高光束质量, 采用非稳腔振荡器+两级放大器的方案。相比稳定腔, 非稳腔能抑制高阶模, 从大直径的增益介质中得到衍射极限的输出光束。实验在设计主振荡器时采用的晶体尺寸为  $5\text{ mm} \times 78\text{ mm}$  ( $\Phi=5\text{ mm}$  为直径,  $L=78\text{ mm}$  为长度), 泵浦波长为 808 nm, 单模块峰值功率为 3000 W, 泵浦脉宽为 250  $\mu\text{s}$ 。为保证输出激

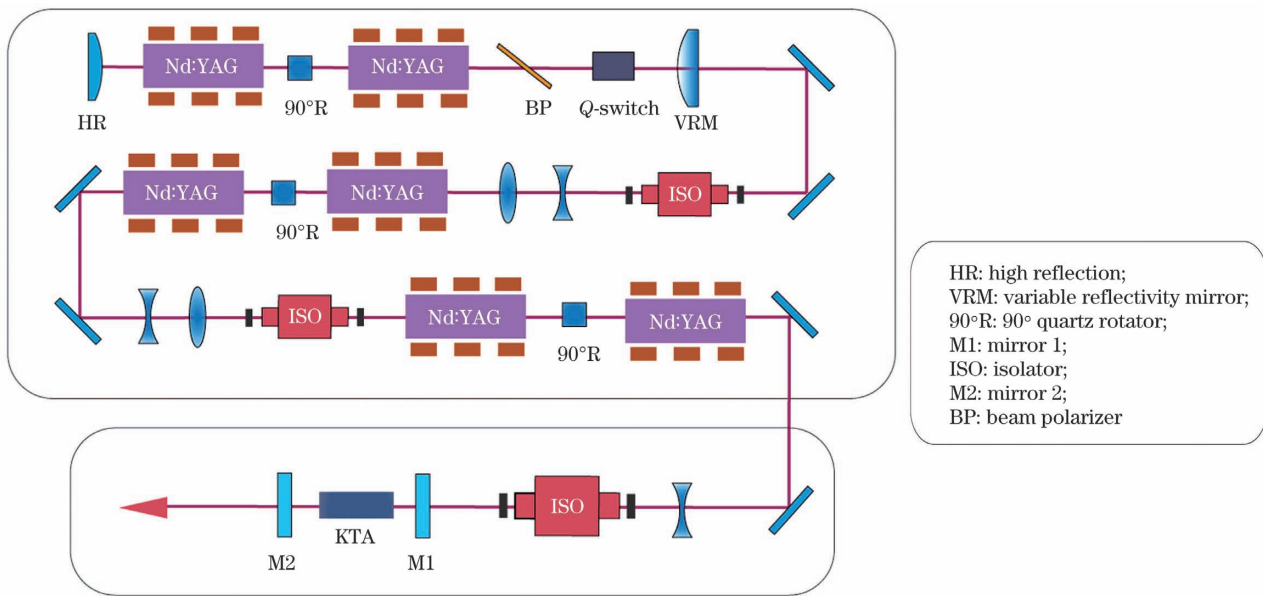


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

光具有更小的发散角,用高斯镜作为输出耦合镜,曲率半径为 $-1500\text{ mm}$ ,中心反射率为 $70\%$ ,高斯反射镜的镀膜直径为 $3\text{ mm}$ 。

一级放大泵浦模块的 LD 波长为 $808\text{ nm}$ ,单模块峰值功率为 $6000\text{ W}$ ,晶体 Nd:YAG 的尺寸为 $6\text{ mm}\times 130\text{ mm}$ 。二级放大泵浦模块的 LD 波长为 $808\text{ nm}$ ,单模块峰值功率为 $12000\text{ W}$ ,晶体 Nd:YAG 的尺寸为 $7\text{ mm}\times 188\text{ mm}$ 。为了抑制级间的自激振荡和自发辐射放大,同时保护各级光学元件,各级之间都放置隔离器。为了获得更高的提取效率,进入放大级的激光光束应具有较大的模体积,使输入激光光束的光斑与激光棒内的泵浦能量能够更好的重叠。因此,在各级放大器之间放置扩束系统,对进入每一级放大器的光束进行扩束准直,使输入光斑直径与晶体棒直径相匹配。

实验采用 X 方向(相位匹配角参数 $\phi=0^\circ$ , $\theta=90^\circ$ )切割的 KTA 晶体,采用 II 类非临界相位匹配,无走离效应。采用单块大尺寸 KTA 晶体,晶体的尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 33\text{ mm}$ ,为避免大能量泵浦光对晶体膜层造成损伤,晶体表面未镀膜,包裹铝箔后用夹持件固定。实验在室温下进行,没有进行强制冷却。OPO 平平稳腔具有阈值低、转换效率高的优点,因此由非线性晶体和两个腔镜 M1 和 M2 构成单共振 OPO 平平稳腔装置,腔长为 $65\text{ mm}$ 。M1 入射镜为 $\text{CaF}_2$  基底,对信号光和闲频光全反(反射率 $R>99\%$ ),对 $1064\text{ nm}$  泵浦光增透(透过率 $T>95\%$ )。泵浦光从 M1 入射后再由 M2 腔镜

反射,M2 输出镜也为 $\text{CaF}_2$  基底,对信号光的透过率为 $50\%$ ,对闲频光增透(透过率 $T>96\%$ )。

### 3 实验结果与分析

$1064\text{ nm}$  激光振荡级、一级放大和二级放大的能量输出如图 2 所示。可以发现,棒状激光介质在工作过程中的泵浦电流较高、热透镜效应明显,导致输出功率和光束质量较低。为了保证在每一级放大过程中具有较高的光束质量,需要控制放大级模块的泵浦电流,实验将振荡器模块的泵浦电流设为 $90\text{ A}$ 。为使进入一级放大器的光斑更均匀,对振荡器输出的光斑进行 2 倍扩束,扩束后的光斑直径约为 $5.6\text{ mm}$ ;一级放大模块的泵浦电流设为 $130\text{ A}$ ,对一级放大器输出光斑进行 1.5 倍扩束,扩束后的光斑直径约为 $6.8\text{ mm}$ ;二级放大模块的泵浦电流设为 $140\text{ A}$ ,对二级放大器输出光斑进行 2 倍扩束,扩束后的光斑直径约为 $8\text{ mm}$ 。一级放大器和二级放大器的提取效率分别为 $6.7\%$ 和 $10.8\%$ 。图 2 中的插图各级模块在相应泵浦电流下的光斑,可以发现,在高功率泵浦条件下,输出的激光光束质量受热效应的影响逐渐恶化。针对该现象,在放大过程中对侧泵模块采取高效率的水冷( $T=22^\circ\text{ C}$ )散热方式并使用负透镜补偿晶体的热透镜效应,采用双棒串接结构并在两个 Nd:YAG 晶体棒之间放置 $90^\circ$ 石英旋光器对热致双折射效应进行补偿。

经过两级放大最终得到 $1064\text{ nm}$ 激光的能量

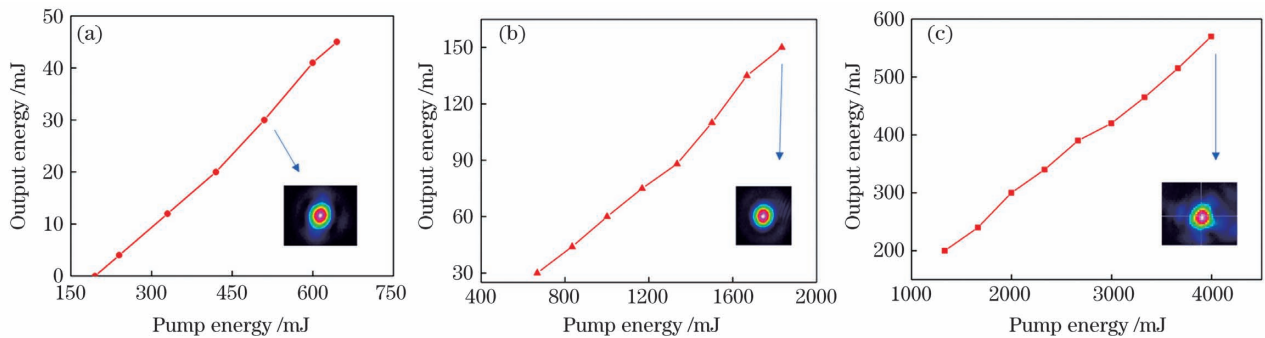


图 2 输出能量随泵浦能量的变化曲线。(a)振荡器;(b)一级放大器;(c)二级放大器

Fig. 2 Output energy change curve with the pump energy. (a) Oscillator; (b) primary amplifier; (c) secondary amplifier

为 580 mJ,用光束质量分析仪(M2MS,Thorlabs)测量脉冲的光束质量,得到光束质量  $M_x^2$  和  $M_y^2$  分别为 4.6 和 3.7,如图 3 所示。

用硅基探测器(DET10A/M,Thorlabs)和示波器(Wavesurfer 3034,LeCroy)对 1064 nm 激光的脉冲波形进行观测,得到的典型脉冲如图 4 所示。可以发现,在放大过程中脉冲宽度略有展宽,同时由于放大过程中的热效应,晶体棒内产生非均匀的温度分布,导致激光脉冲发生一定程度的畸变<sup>[32]</sup>。

实验中,通过改变平平腔的腔长、更换 KTA 晶体的长度优化泵浦光的转换效率。首先,用长度为 20 mm 的 KTA 晶体得到泵浦光到参量光的光-光

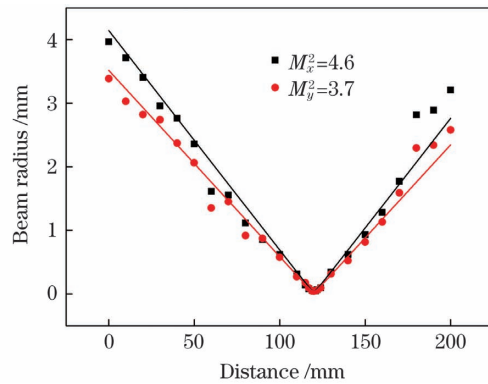


图 3 1064 nm 泵浦源输出激光的光束质量

Fig. 3 Beam quality of the output laser from 1064 nm pump source

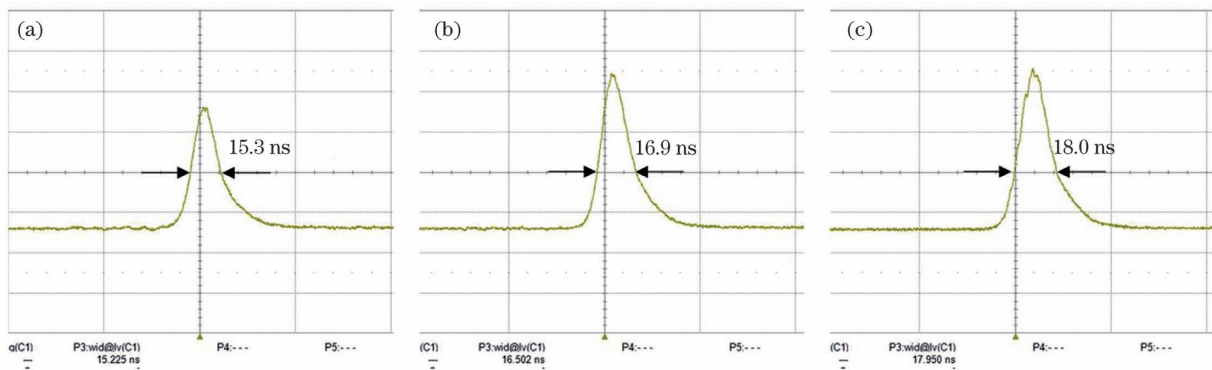


图 4 Nd:YAG 激光系统的典型脉冲形状。(a)振荡器;(b)一级放大器;(c)二级放大器

Fig. 4 Typical pulse shape of the Nd:YAG laser system. (a) Oscillator; (b) primary amplifier; (c) secondary amplifier

转换效率为 26%。然后,选用长度为 33 mm 和 38 mm 的两块 KTA 晶体在同一腔长(65 mm)下分别测得 OPO 的输出能量,结果如图 5(a)所示,可以发现,长度为 33 mm 的 KTA 晶体输出能量和转换效率高于长度为 38 mm 的 KTA 晶体。最后,用长度为 33 mm 的 KTA 晶体进行了不同 OPO 腔长的实验,在腔长为 65 mm 和 105 mm 时测得的输出能量如图 5(b)所示,可以发现,短腔长情况下的输出能量和转换效率更高。

最终用长度为 33 mm 的 KTA 晶体在 65 mm 腔长下得到 OPO 信号光、闲频光的单脉冲能量以及总单脉冲能量随泵浦能量的变化曲线,结果如图 6 所示。可以发现,光参量振荡的阈值为 20 mJ,最大泵浦入射能量为 580 mJ 时,参量光总能量为 242 mJ,泵浦光到参量光的光-光转换效率为 43.6%,远高于文献[21]中的结果,原因是文献[21]中的实验方案采用腔长较长的四镜腔 OPO,腔内损耗相对较高。1.53  $\mu\text{m}$  信号光和 3.47  $\mu\text{m}$  闲频光



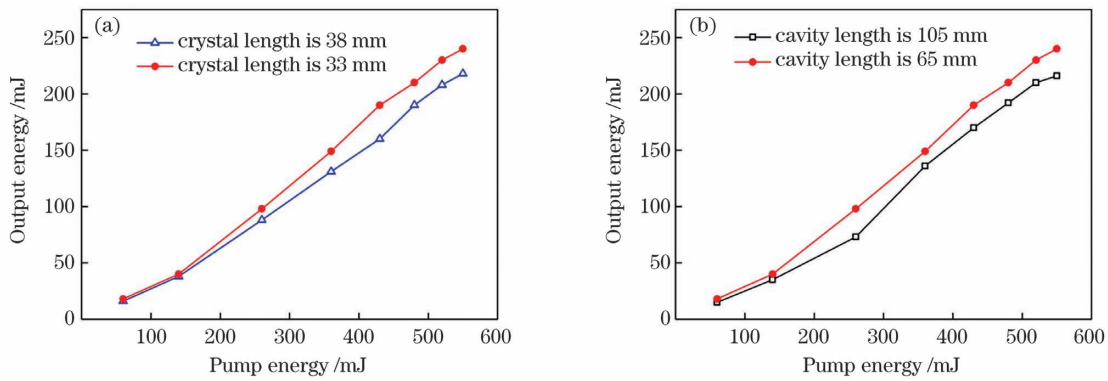


图 5 不同 OPO 的输出能量。(a)不同晶体长度下的输出能量;(b)不同腔长下的输出能量

Fig. 5 Output energies of different OPOs. (a) Output energies under different crystal lengths; (b) output energies under different cavity lengths

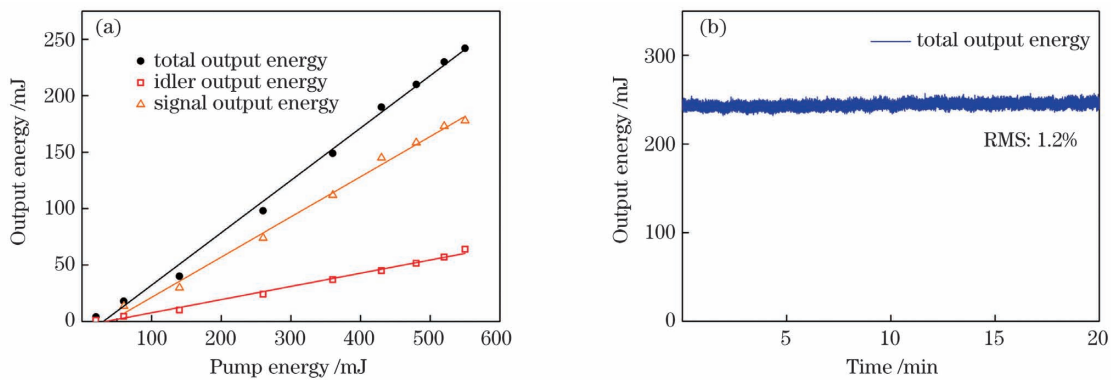


图 6 KTA-OPO 的输出能量曲线。(a)能量曲线;(b)输出稳定性

Fig. 6 Output energy curve of the KTA-OPO. (a) Energy curve; (b) output stability

的单脉冲能量分别为 178 mJ 和 64 mJ,是目前报道的 100 Hz 重复频率中短波双波长 OPO 输出的最大单脉冲能量。1.53  $\mu\text{m}$  信号光和 3.47  $\mu\text{m}$  闲频光单脉冲能量的比例约为 3 : 1。此外,OPO 的输出未出现饱和现象,但受限于 1064 nm 泵浦激光的能量,未获得更高的输出能量。图 6(b)为最大输出能量时 OPO 的输出稳定性,可以发现,OPO 的输出稳定性较好,能量波动范围的均方根值(RMS)为 1.2%。

用铟镓砷探测器、中红外探测器 (MIP-10-100M-F-M4, Vigo) 以及示波器 (Wavesurfer 3034, LeCroy) 对输出的中短波激光脉冲进行观测,结果如图 7 所示。可以发现,最大输出能量时,1.54  $\mu\text{m}$  和 3.47  $\mu\text{m}$  波长的脉冲宽度分别为 13.7 ns 和 11.8 ns。多次测量发现,闲频光的脉冲宽度明显窄于信号光,这与文献[17]的实验结果一致。由于 KTA-OPO 采用平平腔结构,参量光直接输出后的远场发散角较大,使用中红外 CCD 相机 (Pyrocom III, Spiricon) 测量信号光光斑大小,拟合得到信号光光束质量  $M_x^2$  和  $M_y^2$  分别为 30.5 和 28.2,如图 8 所

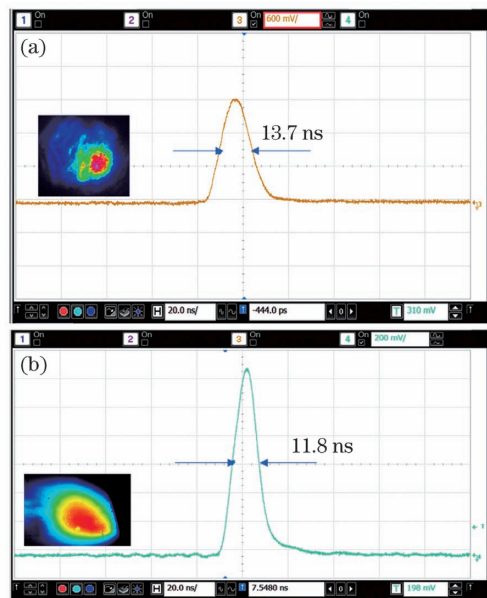


图 7 OPO 在最大输出能量时的典型脉冲。(a)信号光;(b)闲频光

Fig. 7 Typical pulse of OPO at maximum output energy. (a) Signal light; (b) idle frequency light

示。图 8 的插图为 1.54  $\mu\text{m}$  和 3.47  $\mu\text{m}$  波长激光

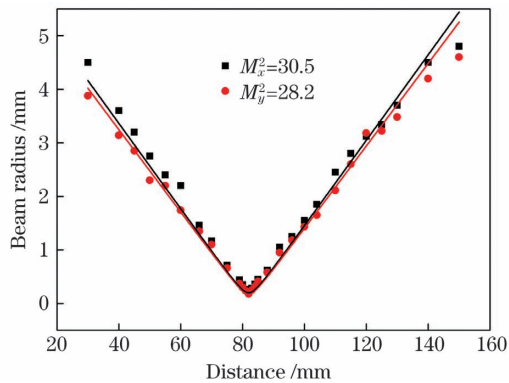


图 8 信号光的光束质量

Fig. 8 Beam quality of the signal light

的远场光斑。可以发现,导致参量光光斑轮廓产生不规则变化的原因是 KTA-OPO 腔形的优化和设计不是最佳的,且存在晶体散热不均匀的情况。

用光谱分析仪(AQ6370D, Yokogawa)对信号光的光谱进行测量,结果如图 9 所示。可以发现,信号光的中心波长为  $1.535 \mu\text{m}$ ,通过相位匹配条件,计算得到闲频光的波长为  $3.475 \mu\text{m}$ 。

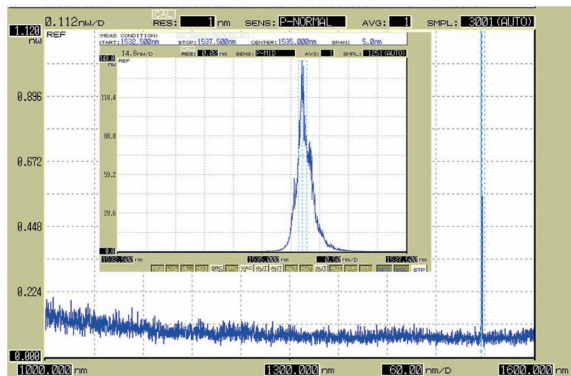


图 9 信号光光谱

Fig. 9 Spectrum of the signal light

## 4 结 论

为了获得重复频率为 100 Hz 的大能量中短波输出,解决百赫兹 1064 nm 脉冲泵浦源放大级中热效应引起的热退偏和光束质量退化问题,为 OPO 提供光束质量较好的大能量 1064 nm 泵浦源。优化了 OPO 腔长并选择最佳长度的非线性晶体,最终在输出脉冲重复频率为 100 Hz 时,获得了  $1.53 \mu\text{m}$  信号光和  $3.47 \mu\text{m}$  闲频光,对应的单脉冲能量分别为 178 mJ 和 64 mJ,脉冲宽度分别为 13.7 ns 和 11.8 ns,泵浦光到输出光的光-光转换效率为 43.6%,这在光电对抗等领域有重要的实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Huber G, Kränkel C, Petermann K. Solid-state lasers: status and future[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B93-B105.
- [2] Liu L P. Military prospect of  $1.57 \mu\text{m}$  OPO eye-safe laser[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(4): 300-303. 刘莉萍.  $1.57 \mu\text{m}$  OPO 人眼安全激光技术的军用前景分析[J]. 激光与红外, 2003, 33(4): 300-303.
- [3] Hu M L, Cai Y. Research progress on mid-infrared ultrafast fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500009. 胡明列, 蔡宇. 中红外波段超快光纤激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500009.
- [4] Huang C, Huang K, Yi A P, et al. A mid-infrared pulsed HF chemical laser with 100 Hz repetition rate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0201002. 黄超, 黄珂, 易爱平, 等. 100 Hz 重复频率脉冲中红外 HF 化学激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0201002.
- [5] Chen S Z, Chen B. Application of infrared technology in military[J]. Optical Technique, 2006, 32(S1): 581-583, 586. 陈胜哲, 陈彪. 红外技术在军事上的应用[J]. 光学技术, 2006, 32(S1): 581-583, 586.
- [6] Bekman H H P T, van den Heuvel J C, van Putten F J M, et al. Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5615: 27-38.
- [7] Bao Z R G T, Zhou S H, Zhao H X, et al. High beam quality  $1.57 \mu\text{m}$  OPO[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(5): 395-397. 包照日格图, 周寿桓, 赵海霞, 等. 高光束质量  $1.57 \mu\text{m}$  的光参量振荡器[J]. 中国激光, 2003, 30(5): 395-397.
- [8] Yao B Q, Wang Y Z, Ju Y L, et al. Tunable eye-safe laser based on KTP optical parametric oscillator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(11): 992-996. 姚宝权, 王月珠, 鞠有伦, 等. 利用 KTP 光学参量振荡器获得可调谐人眼安全激光[J]. 中国激光, 2000, 27(11): 992-996.
- [9] Yang C H, Zhang J. Development of new middle and far infrared nonlinear optical crystals  $\text{ZnGeP}_2$  [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2004, 33(2): 141-143. 杨春晖, 张建. 新型中、远红外波段非线性光学晶体磷化锗锌[J]. 人工晶体学报, 2004, 33(2): 141-143.
- [10] Gallagher H G, Ward K M, Dawson R W, et al. Progress in the growth and characterisation of zinc germanium phosphide crystals[C]//The 15th Annual

- Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, November 10-14, 2002, Glasgow, UK. New York: IEEE Press, 2002: 510-511.
- [11] Dergachev A, Armstrong D, Smith A, et al. High-power, high-energy ZGP OPA pumped by a 2.05- $\mu\text{m}$  Ho : YLF MOPA system[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6875: 687507.
- [12] Haakestad M W, Arisholm G, Lippert E, et al. High-pulse-energy mid-infrared laser source based on optical parametric amplification in ZnGeP<sub>2</sub>[J]. Optics Express, 2008, 16(18): 14263-14273.
- [13] Bosenberg W R, Drobshoff A, Alexander J I, et al. 93% pump depletion, 3.5-W continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator [J]. Optics Letters, 1996, 21(17): 1336-1338.
- [14] Myers L E, Bosenberg W R. Periodically poled lithium niobate and quasi-phase-matched optical parametric oscillators[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(10): 1663-1672.
- [15] Bierlein J D, Vanherzeele H, Ballman A A. Linear and nonlinear optical properties of flux-grown KTiOAsO<sub>4</sub> [J]. Applied Physics Letters, 1989, 54(9): 783-785.
- [16] Cussat-Blanc S, Ivanov A, Lupinski D, et al. KTiOPO<sub>4</sub>, KTiOAsO<sub>4</sub>, and KNbO<sub>3</sub> crystals for mid-infrared femtosecond optical parametric amplifiers: analysis and comparison [J]. Applied Physics B, 2000, 70(1): S247-S252.
- [17] Bai F, Wang Q P, Liu Z J, et al. Theoretical and experimental studies on output characteristics of an intracavity KTA OPO[J]. Optics Express, 2012, 20(2): 807-815.
- [18] Zhang B T, Dong X L, He J L, et al. High-power eye-safe intracavity KTA OPO driven by a diode-pumped Q-switched Nd : YAG laser [J]. Laser Physics Letters, 2008, 5(12): 869-873.
- [19] Peng Y F, Wang W M, Wei X B, et al. High-efficiency mid-infrared optical parametric oscillator based on PPMgO : CLN[J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 2897-2899.
- [20] Liu G Y, Mi S Y, Yang K, et al. 161 W middle infrared ZnGeP<sub>2</sub> MOPA system pumped by 300 W-class Ho : YAG MOPA system[J]. Optics Letters, 2021, 46(1): 82-85.
- [21] Webb M S, Moulton P F, Kasinski J J, et al. High-average-power KTiOAsO<sub>4</sub> optical parametric oscillator[J]. Optics Letters, 1998, 23(15): 1161-1163.
- [22] Hazama H, Yumoto M, Ogawa T, et al. Mid-infrared tunable optical parametric oscillator pumped by a Q-switched Tm, Ho : YAG ceramic laser[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7197: 71970J.
- [23] Mu Y, Bao Z R G T. Eye-safe ring cavity KTP-OPO with 500 mJ output[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(9): 998-999.  
穆宇, 包照日格图. 500 mJ 输出人眼安全环形腔 KTP-OPO 激光器[J]. 激光与红外, 2014, 44(9): 998-999.
- [24] Liu Q, Liu J H, Zhang Z L, et al. A high energy 3.75  $\mu\text{m}$  KTA optical parametric oscillator at a critical angle [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(7): 075407.
- [25] Liu Q, Zhang Z L, Liu J H, et al. 100 Hz high energy KTiOAsO<sub>4</sub> optical parametric oscillator [J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 61: 287-289.
- [26] Rines G A, Rines D M, Moulton P F. Efficient, high-energy, KTP optical parametric oscillators pumped with 1 micron Nd-lasers[C]//Advanced Solid State Lasers 1994, February 7, 1994, Salt Lake City, Utah United States. Washington, D. C.: OSA, 1994: PO9.
- [27] Sun Q B, Liu H J, Huang N, et al. High energy and high efficiency 3.4  $\mu\text{m}$  extracavity KTA optical parametric oscillator [J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(1): 16-20.
- [28] Liu J, Liu Q, Huang L, et al. High energy eye-safe and mid-infrared optical parametric oscillator [J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(12): 853-856.
- [29] Armstrong D J, Smith A V. 150-mJ 1550-nm KTA OPO with good beam quality and high efficiency[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5337: 71-80.
- [30] Bao Z R G T, Jiang D S, Zhou S H. High brightness eye safe KTP OPO[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(S1): 198-200.  
包照日格图, 姜东升, 周寿桓. 高亮度人眼安全 KTP OPO 激光器[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(S1): 198-200.
- [31] Foltynowicz R J, Wojcik M D. Demonstration of a high output power 1533 nm optical parametric oscillator pumped at 1064 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7838: 783815.
- [32] Koechnr W. Solid-state laser engineering [M]. Sun W, Jiang Z W, Cheng G X, et al, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 161-165.

# 100 Hz High-Energy KTA Dual-Wavelength Optical Parametric Oscillator

Meng Jun<sup>1</sup>, Cong Zhenhua<sup>1,2,3</sup>, Zhao Zhigang<sup>1,2,3</sup>, Wang Shang<sup>3</sup>, Qi Yunxuan<sup>1,2,3</sup>  
Zhang Xingyu<sup>1,2,3</sup>, Liu Zhaojun<sup>1,2,3\*</sup>

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

<sup>2</sup> Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Technology and Application, Qingdao, Shandong 266237, China;

<sup>3</sup> Key Laboratory of Laser and Infrared System Integration Technology Ministry of Education, Qingdao, Shandong 266237, China

## Abstract

**Objective** Laser sources at 1.5  $\mu\text{m}$ , providing high pulse energies and short pulse durations are used in various applications, such as electro-optical countermeasures and high precision ranging. Lasers at 3–5  $\mu\text{m}$  are used as lighting sources for active remote sensing and gas detection, which show important potential applications. Therefore, lasers with high energy at both wavelength bands have become research hotspots. The optical parametrical oscillators (OPO) are effective ways to generate lasers with wavelengths at 1.5  $\mu\text{m}$  and interval 3–5  $\mu\text{m}$  due to their compactness, wavelength-tunable property, and potential for generating high energy and short pulse width. Presently, the major nonlinear crystals with high-quality include biaxial crystals such as  $\text{KTiOAsO}_4$  (KTA),  $\text{KTiOPO}_4$  (KTP),  $\text{ZnGeP}_2$  (ZGP), and periodically poled crystals such as PPKTP, PPLN, PPLT, etc. KTP crystals are used to obtain lasers at 1.5  $\mu\text{m}$ , which is affected by severe absorption in the mid-infrared region. To obtain lasers at 3–5  $\mu\text{m}$ , ZGP crystals have been under investigation for a long time. However, 2  $\mu\text{m}$  pump sources are more in need, which is technically more difficult than their 1- $\mu\text{m}$  counterpart. PPLN crystals are used to obtain mid-infrared lasers. Compared with crystals such as KTP, the damage threshold of PPLN crystals is lower. KTA and KTP crystals belong to the same crystal group and have a high damage threshold ( $>600 \text{ MW}/\text{cm}^2$ ), large nonlinear coefficient ( $d_{24} = 3.2 \text{ pm}/\text{V}$ ), large acceptance angle, a wide temperature range, and stable physical and chemical properties. The transmission performance of KTA crystals in the mid-infrared band (3–5  $\mu\text{m}$ ) must be better than that of KTP crystals. These characteristics make KTA crystals suitable for high energy mid-infrared laser applications. In this study, we report a 100 Hz high energy KTA crystal-based OPO system.

**Methods** The 100 Hz high energy KTA-OPO system is composed of 1064 nm Nd: YAG main oscillator power amplifier (MOPA) and KTA crystal-based OPO. The Nd: YAG MOPA laser at 1064 nm served as the pump source. To obtain high beam quality, the Nd: YAG MOPA system adopted the “unstable cavity oscillator + two-stage amplifiers” scheme. Both the oscillator and the two-stage amplifier used a double rod structure connected in series, and a 90° quartz rotator between the two Nd: YAG crystal rods to compensate for the thermal depolarization effect. To prevent self-excited oscillation and spontaneous radiation between the stages while protecting the optical components of each stage, isolators are placed between each stage. The X-cut KTA crystal is used in the experiment, and the dimension of the KTA crystal is 10 mm  $\times$  10 mm  $\times$  33 mm. The cavity is designed as a signal resonant oscillator with a cavity length of 65 mm. The input mirror is coated to be highly reflective for the signal and high transmittance for the pump light. The output mirror is coated with a partial reflectivity of 50% for the signal and high transmittance for the idler. The pump light passed the OPO twice. An isolator protects the pump laser from the remaining pump light that comes back from the OPO cavity.

**Results and Discussions** A homemade 1064 nm Nd: YAG MOPA with a pulse energy of 580 mJ at 100 Hz repetition rate is employed as the pumping source. After two-stage amplification, 580 mJ of 1064 nm laser is obtained with the extraction efficiency of the primary amplifier and secondary amplifier at 6.7% and 10.8%, respectively (Fig. 3). The beam quality factor of the 1064 nm laser is  $M_x^2 = 4.6$  and  $M_y^2 = 3.7$  (Fig. 4). The pulse width of the laser from the oscillator and primary amplifier and secondary amplifier are 15.3, 16.9, and 18.0 ns, respectively (Fig. 5). In the OPO experiment, the optical-to-optical conversion efficiency is optimized by increasing the cavity length and KTA crystals length. The output energy and conversion efficiency of the KTA crystal with a length of 33 mm are higher than that of the KTA crystal with a length of 38 mm (Fig. 6). Then, experiments with different OPO cavity lengths are performed on the 33-mm KTA crystal. The results indicated that the output energy and conversion efficiency are higher for short cavity length (Fig. 6). The threshold of the OPO is about 20 mJ. When



the pump energy is 580 mJ, 64 mJ idler is obtained at 3.47  $\mu\text{m}$  and associated signal at 1.54  $\mu\text{m}$  is 178 mJ (Fig. 7). The OPO efficiency is 46.3% high, and OPO output stability is 1.2% rms (Fig. 7). The pulse width of the output laser at 1.54 and 3.47  $\mu\text{m}$  is 13.7 and 11.8 ns, respectively (Fig. 8). The beam quality factor of the 1.54  $\mu\text{m}$  laser is  $M_x^2 = 30.5$  and  $M_y^2 = 28.2$  (Fig. 9). In addition, the center wavelength of the signal laser is 1.535  $\mu\text{m}$  (Fig. 10).

**Conclusions** A 100-Hz, high-energy KTA crystal-based OPO system is reported. A homemade 1064 nm Nd : YAG MOPA with a pulse energy of 580 mJ at a 100 Hz repetition rate is used as the pumping source. We adopted plane-plane cavity configuration for the OPO, and an X-cut KTA crystal as the nonlinear crystal. The obtained pulse energies at a signal wavelength of 1.53  $\mu\text{m}$  and idler wavelength of 3.47  $\mu\text{m}$  are 178 and 64 mJ at a pulse repetition rate of 100 Hz, respectively. Furthermore, the pulse durations are 13.7 and 11.8 ns, respectively, and the optical-to-optical conversion efficiency is 43.6%.

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

**OCIS codes** 140.3280; 140.3580; 190.4970