

种子注入环形腔人眼安全 KTP 参变振荡器的研究

龙启强¹ 钟 凯^{2*} 洪光烈¹

(¹ 中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电系统技术实验室, 上海 200083)
(² 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072)

摘要 利用电光调 Q 的 Nd:YAG 激光器抽运非临界相位匹配 ($\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$) 环形腔 KTP 光学参变振荡器 (OPO), 实现了高能量人眼安全波段的 $1.57 \mu\text{m}$ 激光输出。理论与实验结果表明, 减小谐振腔长度和注入种子源激光可以有效降低阈值, 提高输出能量。当 Nd:YAG 激光器抽运能量为 88 mJ 时, 注入种子源功率由 0 mW 增加到 6 mW, 输出能量由 8.8 mJ 增加到 14 mJ。当抽运能量为 167.7 mJ, 注入种子源功率达到 6 mW 时, 最大输出能量达到 46 mJ, 峰值功率 7.44 MW。

关键词 激光器; 人眼安全激光; 光参变振荡器; 磷酸氧钛钾; 环形腔; 种子注入

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0614003

Investigation on Eye-Safe Ring-Cavity KTP Optical Parametric Oscillator with Seed Injection

Long Qiqiang¹ Zhong Kai² Hong Guanglie¹

¹ Space Active Electronic-Optical Systems Laboratory, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

² College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Institute of Laser and Optoelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract An eye-safe laser source at $1.57 \mu\text{m}$ is demonstrated by using a non-critically phase-matched ($\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$) ring cavity optical parametric oscillator pumped by an electro-optic Q-switched Nd:YAG laser. Theoretical and experimental results show that reducing the cavity length and injection of seed laser can effectively reduce the threshold, and increase the output energy. When the Nd:YAG laser energy is 88 mJ and the injected signal power changes from 0 to 6 mW, the output energy is enhanced from 8.8 to 14 mJ. When the pump energy is 167.7 mJ and the injected signal power is 6 mW, the maximum output energy of 46 mJ is obtained, corresponding to the peak power of 7.44 MW.

Key words lasers; eye-safe laser; optical parametric oscillator; KTP; ring cavity; seed injection

OCIS codes 140.3560; 190.4410; 140.3070; 190.4970

1 引 言

波长在 $1.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的激光位于对人眼最安全的波段^[1], 且处于 $1.5 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 大气透过窗口, 大气透射率高, 同时对云、烟雾穿透力强, 可应用于激光测距、遥感探测和目标识别^[2~5] 等领域。光学参变振荡器 (OPO) 是一种获取人眼安全激光的可靠方法, 采用非临界相位匹配方式抽运磷酸氧钛钾

(KTP)、磷酸氧钛钾 (KTA) 等晶体可以非常方便地获得该波段的激光。20 世纪 90 年代美国 Marshall 采用非临界相位匹配 KTP 参变振荡器获得高效率的近红外激光输出^[6,7]。1994 年, Rines 等^[8] 利用 1.1 J, 10 Hz Nd:YAG 激光器抽运 KTP 单谐振 OPO, 获得 450 mJ 1571 nm 的脉冲激光输出。2008 年, 德国 Amediek 等^[3,4] 利用单频激光器作为抽运源抽运环形

收稿日期: 2011-12-13; 收到修改稿日期: 2012-01-17

作者简介: 龙启强 (1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光探测方面的研究。E-mail: passuid@gmail.com

导师简介: 洪光烈 (1966—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事激光遥感技术方面的研究。

E-mail: glhong@mail. sitp. ac. cn

* 通信联系人。E-mail: zhongkai@tju. edu. cn

腔 KTP 光学参变振荡器,同时注入 $1.57\ \mu\text{m}$ 种子激光,实现单频 $1.57\ \mu\text{m}$ 输出,成功用于大气 CO_2 探测。近年来国内研究者利用 KTP 和 KTA 晶体作为非线性介质,在人眼安全波段光学参变振荡器的研究也取得了巨大的进步。哈尔滨工业大学的姚宝权等^[9,10]研究了临界和非临界相位匹配 KTP 光学参变振荡器,获得最高能量转换效率为 64% 的近红外激光输出。山东大学对连续激光二极管端泵和侧泵内腔式光学参变振荡器进行了研究,获得最高平均功率输出值为 13.6 W 的人眼安全激光^[11~13]。天津大学的钟凯等^[14~16]利用内腔式 KTP OPO 实验获得 1572 nm 激光输出能量 66.5 mJ, KTA OPO 获得 1536 nm 激光输出能量 75 mJ, 闲频光 $3.47\ \mu\text{m}$ 中红外激光输出能量达到 31 mJ。清华大学报道的 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光输出能量已经达到 260 mJ^[17,18]。长春理工大学已研制出小型化无水冷无风冷 $1.57\ \mu\text{m}$ 激光器^[19]。然而,目前国内研究主要针对直腔式的 KTP/KTA OPO,还没有人对该波段注入种子源激光的环形腔 OPO 进行过研究。直腔 OPO 虽然结构简单紧凑,转换效率和输出能量也较高,但一些特殊的应用场合如光谱分析,大气激光雷达等,需要种子注入的单频激光作为光源。直腔 OPO 不易实现种子注入,因此一般采用环形腔结构。此外,环形腔为行波腔,相对于驻波腔具有更好的稳定性。本文采用电光调 Q 的 Nd:YAG 激光作为抽运源,采用非临界相位匹配($\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ$)方式,构建了单谐振环形腔 KTP 参变振荡器,实现了最高能量为 46 mJ 的 1572 nm 人眼安全激光输出,并研究了种子源激光注入对光学参变振荡器的影响,对今后实现单频运转的高能量人眼安全 KTP OPO 具有重要意义。

2 理论分析与实验装置

2.1 理论分析

根据相位匹配过程的能量守恒、动量守恒关系

以及 KTP 晶体的色散方程^[20],可以得到 $1.064\ \mu\text{m}$ 波长激光抽运 KTP 参变振荡器的相位匹配关系。光参变振荡器中 KTP 晶体切割角度不同,可得到不同波长的激光,这在国内外多篇文献中已有报道^[15,21,22]。采用 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光抽运沿 x 轴($\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ$)切割的 KTP 晶体,实现非临界相位匹配,可以获得 $1.57\ \mu\text{m}$ 人眼安全激光。根据相关的理论研究,当达到非临界相位匹配($\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ$)时, KTP OPO 的走离角达到最小值(约为 0°)而接受角达到最大值(约为 3.2°),最大有效非线性系数约为 $3.64\ \text{pm}/\text{V}$ ^[15,23]。小的走离角和大的有效非线性系数非常有利于参变振荡器中的三波相互作用,而接受角大可以允许 Nd:YAG 基频 $1.064\ \mu\text{m}$ 抽运光具有较大的发散角,从而非常适用于多模激光抽运的光学参变振荡器。

2.2 实验装置

图 1 为 $1.064\ \mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 激光器抽运非临界相位匹配 KTP 环形腔 OPO 的实验装置示意图。Nd:YAG 激光棒长度为 104 mm,直径为 5 mm,掺杂浓度为 0.6% (原子数分数),激光棒两端端面镀有 $1.06\ \mu\text{m}$ 增透膜。3 个激光二极管阵列环绕在 Nd:YAG 激光棒周围。激光二极管输出波长为 808 nm,脉冲宽度设定为 $200\ \mu\text{s}$,重复频率为 10 Hz,采用循环去离子水冷却。Nd:YAG 激光器谐振腔由平面镜 M1 和 M3 组成。M1 镀有 $1.06\ \mu\text{m}$ 高反膜, M3 是没有镀膜的 BK7 玻璃镜片,对 1064 nm 的透射率约为 92%。KD*P 电光 Q 开关和布儒斯特起偏镜 M2 实现电光调 Q。OPO 谐振腔由平面镜 M4、M5、M6 和非线性晶体 KTP 组成,组成等腰直角三角形结构的环形腔。环形腔腔镜镀膜参数分别为:输入镜 M4 镀有对横向电偏振 22.5° 入射的 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光增透膜($T>99.5\%$)和 $1.57\ \mu\text{m}$ 激光高反膜($R>99.8\%$); 输出镜 M5 镀有对横向电偏振 22.5° 入射的 $1.57\ \mu\text{m}$ 激光部分透过膜($T=30\%$),其对

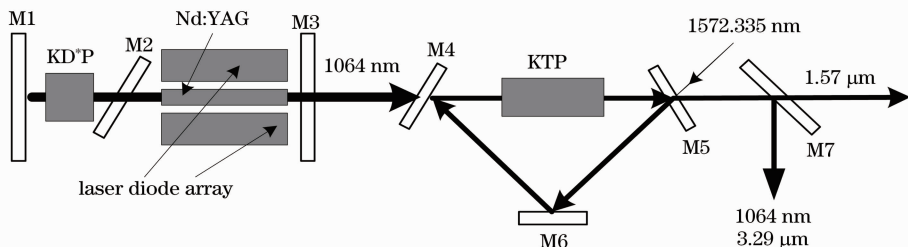


图 1 电光调 Q Nd:YAG 激光器抽运环形腔光学参变振荡器结构图

Fig. 1 Scheme of ring cavity OPO pumped by an electro-optic Q-switched Nd:YAG laser

1.06 μm 的透射率大于 80%；腔镜 M6 镀对横向电偏振 45° 入射的 1.57 μm 激光高反膜 ($R > 99.8\%$)，其对 1.06 μm 激光的透射率也大于 80%。

KTP 晶体的尺寸为 7 mm × 7 mm × 20 mm， x 方向切割，采用 II 类非临界相位匹配 ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$)，两端端面都镀有 1.06 μm 和 1.57 μm 激光的增透膜。输出镜 M5 后面放置滤波片 M7，用以滤除剩余的 1064 nm 抽运光。KTP 晶体采用半导体制冷器 (TEC) 控温在 20 °C 左右，控温精度 ± 0.1 °C。

2.3 阈值分析

由于 KTP 晶体端面没有镀 3.29 μm 增透膜，同时晶体材料对 3.29 μm 激光的吸收率较大，再加上 OPO 腔镜也没有镀 3.29 μm 反射膜，可以认为 KTP OPO 仅靠 1.57 μm 信号光单独提供反馈，即为单谐振光学参变振荡器 (SROPO)。

环形腔 KTP OPO 腔内的抽运光为单向传输，非临界相位匹配 KTP 晶体内的走离角为 0°，且忽略抽运光和信号光在腔内的传输损耗，根据文献 [23] 中的阈值公式，该阈值公式可以简化为

$$I_{\text{th}} = \frac{2.25\tau}{\kappa g_s l^2} \left[\frac{L}{4\pi c} \ln\left(\frac{P_s}{P_n}\right) + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 2 \right]^2, \quad (1)$$

式中 κ 为非线性耦合系数， g_s 为抽运光波与信号光波高斯模耦合系数， l 为 KTP 晶体的长度，在这里等于有效参变增益长度， τ 为抽运光脉冲宽度， L 为 OPO 谐振腔长度， c 为光速，信号光功率 P_s 与初始参变噪声功率 P_n 的比值 P_s/P_n 指 OPO 参变振荡过程中抽运光达到阈值时的信号光功率与初始噪声功率的比值， R 为输出耦合镜对信号光的反射率。

根据 SROPO 的阈值条件公式，减小谐振腔长度 L ，增大输出镜反射率 R ，或者增大初始信号功率 P_n ，都有助于降低 OPO 输入抽运光阈值。

3 实验结果与分析

实验中 Nd:YAG 激光器的重复频率为 10 Hz，脉冲半峰全宽 (FWHM) 为 11.20 ns，OPO 谐振腔长度为 115 mm。调节 Nd:YAG 激光器抽运电流，采用 Molectron EPM1000 激光能量计测量 OPO 输出能量。抽运电流达到 40 A 时，OPO 输出微弱的 1.57 μm 激光，说明抽运光刚好达到 OPO 阈值，此时 Nd:YAG 激光器输出能量为 51 mJ。继续增加抽运电流，OPO 输出能量随抽运光能量的增加而不断增加。当抽运电流增加到 56 A 时，输出抽运光能量为 167.7 mJ，OPO 输出能量达到最大值，输出能量为 37 mJ。Nd:YAG 激光器和 OPO 输出能量随抽

运电流变化曲线如图 2 所示。调节抽运电流为 50 A，统计 OPO 输出脉冲能量，统计结果利用均方误差公式

$$\Delta\bar{P}/\bar{P} = \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 / n \right]^{1/2}, \quad (2)$$

处理，每隔 10s 测一次脉冲能量，60 个输出脉冲 $\Delta\bar{P}/\bar{P} = 9.35\%$ 。OPO 输出能量稳定性主要受抽运源影响，采用能量稳定性更好的 Nd:YAG 激光器，可以很好地改善 OPO 输出稳定性。

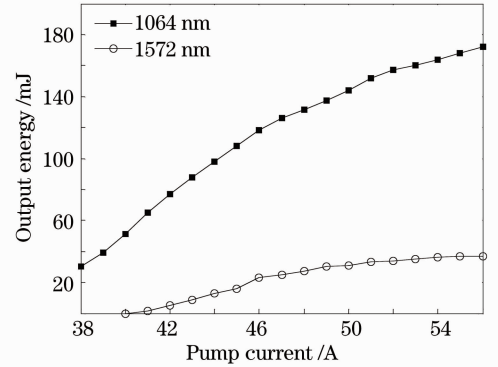


图 2 Nd:YAG 激光器和 OPO 输出能量随抽运电流变化曲线

Fig. 2 Curve of pump energy of Nd:YAG laser and OPO output energy as a function of the pump current

利用快速响应的光电二极管探测 OPO 输出的 1.57 μm 激光脉冲波形，并在 Tektronix TDS620B 示波器上进行观察，OPO 输出激光脉冲宽度随抽运脉冲能量变化的曲线如图 3 所示，抽运能量为 88 mJ 时，OPO 输出 1.57 μm 激光脉冲波形如图 4 所示。OPO 输出脉冲 FWHM 在阈值附近为 11.8 ns，随抽运能量增加而迅速下降，当抽运能量达到 88 mJ 时脉冲宽度为 6.9 ns，典型脉宽为 6~7 ns。最大输出能量 37 mJ 时，脉冲 FWHM 为 6.18 ns，对应峰值功率为 5.99 MW。利用 Agilent 86142B 光纤光谱

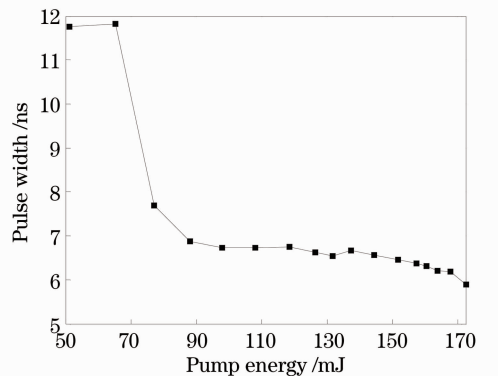


图 3 信号光脉冲宽度随抽运光能量变化曲线图

Fig. 3 Signal pulse width as a function of pump energy

分析仪测量 OPO 输出频谱,如图 5 所示,OPO 输出激光中心波长为 1572.33 nm,线宽约为 0.29 nm。

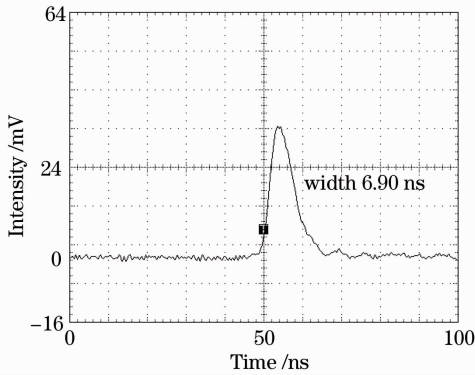


图 4 抽运能量 88 mJ 时,OPO 输出激光脉冲波形

Fig. 4 Profile of temporal signal pulse when the pump energy is 88 mJ

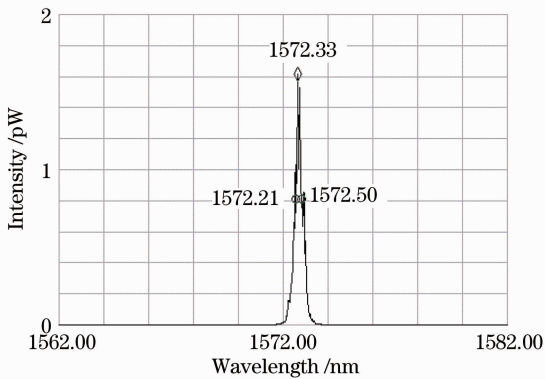


图 5 KTP OPO 输出频谱图

Fig. 5 Output spectrum of the KTP OPO

前面的理论分析表明,OPO 谐振腔长度会影响抽运阈值。本实验分别测量谐振腔长度为 100、115、150 mm 时 OPO 输出能量值,测量结果如图 6 所示。图 6 显示谐振腔长度为 100、115、150 mm 时 OPO 对应的阈值分别为 97.9、51、39 mJ。缩短 OPO 谐振腔长度,非常明显地降低了 OPO 输入抽运光阈值。同时,在实验中还发现,OPO 谐振腔长度减小,OPO 输出能量也会增加。当 OPO 谐振腔长度由 150 mm 减小到 115 mm 时,输出能量增加非常明显。当 OPO 谐振腔长度为 100 mm,抽运光输入能量为 163.8 mJ 时,OPO 输出能量达到最大值,最大值为 43 mJ,转换效率为 26.25%,脉宽为 6.20 ns,对应峰值功率为 6.94 MW。

单谐振光学参变振荡器阈值公式表明,与无种子光注入时的噪声功率相比,种子激光的注入会极大地增加腔内信号光初始功率 P_n ,从而大大降低 OPO 的阈值。当 OPO 谐振腔长度为 115 mm 时,

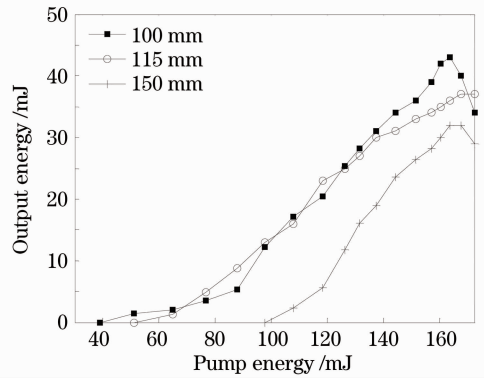


图 6 不同谐振腔长度时 OPO 输出能量随抽运光能量变化曲线

Fig. 6 OPO output energy curve as a function of the pump energy with different cavity lengths

采用丹麦 NKT 公司窄带激光器 E15 输出的窄线宽单频激光注入到环形腔 KTP OPO 中。种子源激光从光学参变振荡器输出耦合镜 M5 注入,避免透射的激光进入种子激光器造成设备的损坏。输出耦合镜 M5 对 $1.57 \mu\text{m}$ 激光的透射率 $T=30\%$,E15 输出波长设为 1572.335 nm,输出功率为 20 mW,实际注入到 KTP 晶体的功率约为 6 mW。图 7 给出注入和没有注入种子激光时 OPO 输出能量随抽运能量变化曲线。没有注入种子激光时抽运光阈值为 51 mJ,注入种子激光时 OPO 输入抽运光阈值降低为 39 mJ。此外,注入种子激光后 OPO 输出能量和转换效率也得到增加。当抽运光能量达到 167.7 mJ 时,OPO 输出能量达到最大值,未注入种子激光时输出能量为 37 mJ,转换效率为 22.06%,而注入种子激光后输出能量则增加到 46 mJ,转换效率为 27.43%,脉宽为 6.18 ns,对应峰值功率达到 7.44 MW。

为了观察注入种子源功率的变化对 OPO 输出

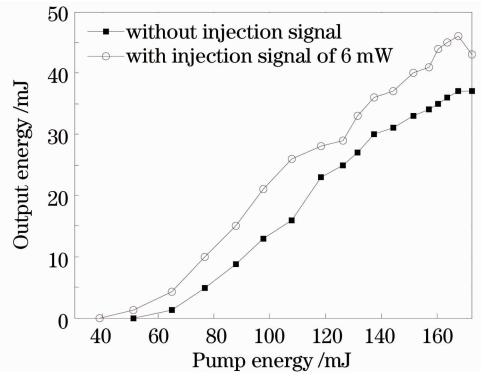


图 7 注入和不注入种子源激光时 OPO 输出能量随抽运能量变化曲线

Fig. 7 OPO output energy as a function of pump energy with and without injection signal

能量的影响,通过调节 E15 的输出功率来改变注入的种子源功率。当抽运光能量为 88 mJ,种子源功率在 0~6 mW 范围内改变时,OPO 输出能量变化曲线如图 8 所示。当没有注入种子激光时,OPO 输出能量为 8.8 mJ。当种子激光功率增加到 1.45 mW 时,OPO 输出能量由 8.8 mJ 上升至 14 mJ。种子激光功率继续增加,OPO 输出能量增加变缓,当注入功率达到 6 mW 时,OPO 输出能量为 15 mJ。以上实验结果说明,向环形腔中注入种子源激光能有效地降低 OPO 阈值,同时提高 OPO 输出能量。

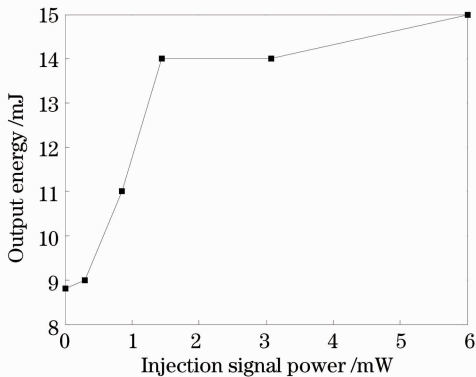


图 8 抽运能量为 88 mJ 时 OPO 输出能量随注入种子源激光功率变化曲线

Fig. 8 OPO output energy as a function of injection signal power when pump energy is 88 mJ

4 结 论

对电光调 Q Nd:YAG 激光器 1.06 μm 激光抽运的非临界相位匹配 ($\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ$) 环形腔 KTP 晶体光学参变振荡器进行研究,获得了中心波长为 1572.33 nm,频谱宽度约 0.29 nm,脉冲宽度为 6~7 ns,重复频率 10 Hz 的人眼安全的 1.57 μm 激光,最大输出能量为 46 mJ,最大峰值功率为 7.44 MW。理论分析了 KTP 晶体相位匹配曲线及谐振腔长度和种子源激光注入对光学参变振荡器阈值的影响条件,并在实验中得到了很好的证明。此外,实验结果表明,减小谐振腔长度和注入种子源激光还可以提高 OPO 的输出能量,注入种子激光的功率对输出能量也有影响。当 Nd:YAG 激光器基频光输出能量为 88 mJ,注入种子源功率由 0 增加到 6 mW 时,OPO 输出能量由 8.8 mJ 增加到 14 mJ。当抽运能量为 167.7 mJ 时,OPO 输出脉冲能量达到最大值,未注入种子激光时输出能量为 37 mJ,对应峰值功率为 5.99 MW,转换效率为 22.06%,而注入 6 mW 种子激光后最大输出能量为 46 mJ,转换效率为

27.43%,对应峰值功率为 7.44 MW。在今后的工作中,还须在理论和实验上进一步深入分析谐振腔长度、种子激光注入功率对转换效率的影响,并将通过采用单频 Nd:YAG 激光器作为抽运源和加入压电陶瓷谐振腔稳定系统,获取高能量单频 1.57 μm 激光光源。

参 考 文 献

- Shane D. Mayor, Scott M. Spuler. Raman-shifted eye-safe aerosol lidar [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(19): 3915~3924
- Sarah Harrell-Klein, William E. Wilcox, Dennis K. Killinger *et al.*. High power eye-safe 1.57 μm optical parametric oscillator (OPO) lidar for atmospheric boundary layer measurements [C]. *SPIE*, 1995, **2366**: 354~357
- A. Amediek, A. Fix, M. Wirth *et al.*. Development of an OPO system at 1.57 μm for integrated path DIAL measurement of atmospheric carbon dioxide [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **92**: 295~302
- A. Amediek, A. Fix, G. Ehret *et al.*. Airborne lidar reflectance measurements at 1.57 μm in support of the A-SCOPE mission for atmospheric CO₂ [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2009, **2**: 1487~1536
- Philip E. Cassady, Ronald N. Murata, Sean McKenna *et al.*. Laser radar technology for airborne theater missile defense [C]. *SPIE*, 1995, **2472**: 50~61
- Larry R. Marshall, Jeff Kasinski, Ralph L. Burnham. Diode-pumped eye-safe laser source exceeding 1% efficiency [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(21): 1680~1682
- Larry R. Marshall, A. Kaz. Eye-safe output from noncritically phase-matched parametric oscillators [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(9): 1730~1736
- Glen A. Rines, David M. Rines, Peter F. Moulton. Efficient high-energy, KTP optical parametric oscillators pumped with 1 micron Nd-lasers [J]. *OSA Proceedings on Advanced Solid-State Lasers*, 1994, **20**: 461~463
- Yao Baoquan, Wang Yuezhu, Wang Qi *et al.*. Efficient noncritically phase-matched KTP optical parametric oscillator [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(11): 969~972
- 姚宝权,王月珠,王 骐等. 高效率非临界相位匹配 KTP 光学参变振荡器 [J]. *中国激光*, 1999, **A26**(11): 969~972
- Yao Baoquan, Wang Yuezhu, Wang Qi *et al.*. KTP optical parametric oscillator with both critically and non-critically phase-matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1368~1373
- 姚宝权,王月珠,王 骐等. 临界及非临界相位匹配 KTP 光学参变振荡器 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1368~1373
- J. F. Yang, B. T. Zhang, J. L. He *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator based on GTR-KTP pumped by diode-side-pumped acousto-optically Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **98**(1): 49~54
- Dong Xiaolong, Zhang Baitao, He Jingliang *et al.*. High-power 1.5 and 3.4 μm intracavity KTA OPO driven by a diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**: 1668~1670
- W. J. Sun, Q. P. Wang, Z. J. Liu *et al.*. High efficiency KTiOAsO₄ optical parametric oscillator within a diode-side-pumped two-rod Nd:YAG laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2011, **104**(1): 87~91
- Zhong Kai, Wang Yuye, Xu Degang *et al.*. Efficient compound-cavity eye-safe KTP OPO at 1.57 μm pumped by an electro-optic Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(6): 064210

- 15 K. Zhong, Y. Y. Wang, D. G. Xu *et al.*. Efficient electro-optic Q-switched eye-safe optical parametric oscillator based on KTiAsO_4 [J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **97**(1): 61~66
- 16 K. Zhong, J. Q. Yao, D. G. Xu *et al.*. High-pulse-energy high-efficiency mid-infrared generation based on KTA optical parametric oscillator [J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **100**(4): 749~753
- 17 Liu Jianhui, Liu Qiang, Gong Mali. Back conversion in optical parametric process [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(2): 342~346
刘建辉, 柳 强, 巩马理. 光参变过程中的逆转换问题[J]. *物理学报*, 2011, **60**(2): 342~346
- 18 Liu Jianhui, Liu Qiang, Gong Mali. Angular spectrum characters of high gain non-critical phase match optical parametric oscillators [J]. *Chin. Phys. B*, 2011, **20**(5): 0542041
- 19 Wang Yibo, Jin Guangyong, Wang Chao *et al.*. 1574 nm minitype eye-safe laser without water or air cooled [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 47~51
王奕博, 金光勇, 王 超等. 小型无水冷无风冷 1574 nm 人眼安全激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(s1): 47~51
- 20 K. Kato. Parametric oscillation at $3.2 \mu\text{m}$ in KTP pumped at $1.064 \mu\text{m}$ [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(5): 1137~1140
- 21 Wen Wuqi, Kang Jianyi, Zhai Ning *et al.*. Measurement of phase-matching angle of KTP crystal applied for third harmonic generation of 1319 nm laser at room temperature [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0802007
温午麒, 康建翊, 翟 宁等. 常温条件下 KTP 晶体应用于 1319 nm 激光三倍频相位匹配角的测量[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802007
- 22 Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin *et al.*. $2 \mu\text{m}$ pulsed laser with 100 mJ intracavity KTP optical parametric oscillator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2762~2765
魏星斌, 彭跃峰, 王卫民等. 百毫焦腔内 KTP 光参变振荡 $2 \mu\text{m}$ 脉冲激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2762~2765
- 23 Stephen J. Brosnan, Robert L. Byer. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **15**(6): 415~431

栏目编辑: 宋梅梅