

临界及非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器*

王月珠 姚宝权 王 骥

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要 报道了利用 Nd:YAG 激光器二次谐波 532 nm 及基频波 1064 nm 作抽运源, 采用临界及非临界相位匹配方式抽运 KTP 光学参量振荡器的实验结果。实验中获得了具有实用价值的 1.53~1.84 μm 人眼安全激光, KTP 光学参量振荡器输出总能量最大达 130 mJ, 最高能量转换效率 64%。分析比较了调谐范围、离分角、接收角、阈值及转换效率, 讨论了离分角对参量输出的光束质量、转换效率的影响。

关键词 KTP, 临界相位匹配, 非临界相位匹配, 光参量振荡器。

1 引 言

自从激光问世以来, 激光技术在军事及民用等领域应用的愈来愈广泛。在人口密集的地方使用激光器, 特别是在激光测距、目标指示、环境监测、激光雷达等方面, 要求激光源对人眼是安全的。1.5~1.8 μm 是对人眼安全的激光波段之一, 人眼晶状体及视网膜在该波段的损伤阈值比其它波长大得多。利用高压甲烷气体的拉曼频移^[1]及掺铒、掺钕激光器^[2]可获得该波段的激光。另一种获得对人眼安全的激光的简捷而有效的方法是利用非线性晶体的光参量转换。由于优质非线性晶体 KTP、BBO 的出现和抽运技术的改进, 光参量频率转换技术越来越受到重视。KTP 晶体的生长技术已经很成熟, 采用合适的相位匹配条件, 能有效地将 Nd:YAG 的基频光及倍频光转换成人眼安全激光, 因此本文着重对 KTP 光学参量振荡器进行了研究。

KTP 属于 mm^2 晶类, 正双轴晶体, 具有较高的非线性系数 ($d_{24} = 3.3 \text{ pm/V}$, $d_{15} = 2.6 \text{ pm/V}$), 宽的光学透明谱 (0.35~4.5 μm), 合适的相位匹配条件和高的损伤阈值 (大于 400 MW/cm^2), 且物化性能稳定, 容易抛光及镀膜。因此 KTP 是一种非常适合做非线性频率转换的晶体。尹佳斌、谢发力等人利用 0.532 μm 激光抽运临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器获得调谐范围 0.785~1.200 μm 的近红外相干光, 能量转换效率为 19.5%^[3, 4]; Bosenberg 等人利用 KTP 光参量转换系统, 获得 0.70~0.92 μm , 1.3~4.0 μm 宽调谐、窄线宽的输出^[5]。Marshall 等人^[6]采用非临界相位匹配 KTP 光学参量转换形式, 获得人眼安全 1.61 μm

* 国家自然科学基金(69388002)资助项目。

收稿日期: 1999-01-26; 收到修改稿日期: 1999-05-18

与 $1.54 \mu\text{m}$ 激光, 最大能量转换效率为 47%。作者分别以 Nd:YAG 基频光 $1.064 \mu\text{m}$ 及倍频光 $0.532 \mu\text{m}$ 两种抽运源, 利用临界与非临界两种相位匹配形式, 重点对人眼安全输出的 KTP 光学参量振荡器进行了研究, 并对这两种匹配形式的调谐范围、离分角、接收角、阈值及转换效率进行了比较和分析。

2 理论分析

2.1 相位匹配方式

KTP 晶体三个主轴折射率的塞耳迈耶尔(Sellmeier) 方程为^[7]

$$n^2 = A + B/(\lambda^2 - C) - D\lambda^2, \quad (1)$$

其系数在表 1 中列出(由山东大学晶体材料研究所提供)。双轴晶体相位匹配曲线计算非常复

Table 1. Sellmeier equation coefficient of KTP crystal

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
<i>x</i>	3.0129	0.03807	0.04283	0.01664
<i>y</i>	3.0333	0.04106	0.04946	0.01695
<i>z</i>	3.3209	0.05305	0.05960	0.01763

杂, 但如果选择在主平面内, 则相对简单些。在 $x-z$ 平面内, KTP 的 II 类相位匹配的有效非线性系数 ($d_{\text{eff}} = d_{24} \sin \theta$, $18.5^\circ < \theta < 90^\circ$) 大于 I 类匹配 ($d_{\text{eff}} = d_{15} \sin \theta$, $0^\circ < \theta < 18.5^\circ$)^[4]。对于 II 类相位匹配($o \rightarrow o + e$), 抽运波、信号波、闲频波在非线性晶体内相互作用满足动量守恒、能量守恒及菲涅耳方程; 在 $x-z$ 平面内, 菲涅耳方程简化为

$$\frac{\cos^2 \theta}{1/n^2 - 1/n_x^2} + \frac{\sin^2 \theta}{1/n^2 - 1/n_z^2} = 0, \quad (2)$$

其中, θ 为光波波矢方向与晶体 z 轴的夹角, n_x 与 n_z 为 KTP 晶体主轴折射率, 由(1)式得出。根据上述关系, 可求出任一波长抽运的 KTP 光参量相位匹配过程。

图 1 为 Nd:YAG 基频光 $1.064 \mu\text{m}$ 与倍频光 $0.532 \mu\text{m}$ 抽运的 KTP 光参量相位匹配曲线。

从图中可看出, 对于 $1.5 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 的人眼安全可调谐输出, 二者都有合适的相位匹配角。 $0.532 \mu\text{m}$ 抽运的 KTP 光学参量振荡器相位匹配角在 $55^\circ \sim 61^\circ$ 范围内, 而 $1.064 \mu\text{m}$ 抽运的在 $62^\circ \sim 90^\circ$ 之间。考虑到晶体通光孔径的限制, 要实现简便的角度调谐, $0.532 \mu\text{m}$ 抽运的 KTP 光学参量振荡器是较适合的。从图 1 还可看到实现人眼安全输出, 可利用 $1.064 \mu\text{m}$ 抽运 90° 相位匹配方式, 即非临界相位匹配。非临界相位匹配较临界相位匹配在接收角、走离角、非线性系数方面都有着较大的差别。例如对 Nd:YAG 激光的倍频, 广泛运用非临界相位匹配技术, 以减小基频光发散角及晶体离分效应对倍频效率及光束质量的影响。

2.2 临界与非临界相位匹配的特性分析

由于晶体的双折射效应, 临界相位匹配的非寻常光在晶体中传播会产生离散效应, 即光波的波矢方向与坡印廷矢量方向产生偏离。同时在参量相互作用过程中, 非线性晶体具有有

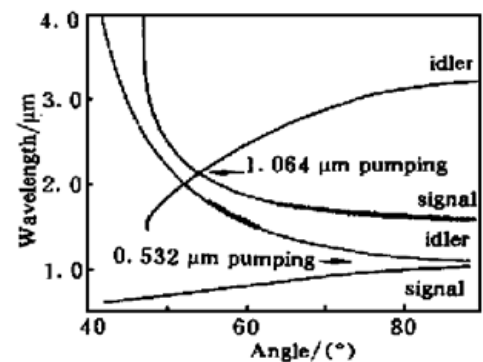


Fig. 1 KTP OPO phase-matching curve with the tuning wavelength as function of crystal internal angle pumped at $1.064 \mu\text{m}$ and $0.532 \mu\text{m}$

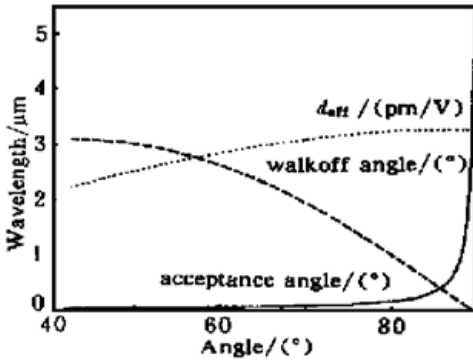


Fig. 2 The KTP effective nonlinear coefficient, walkoff angle, and acceptance angle dependence of crystal internal angle

限的接收角。接收角定义为：在相位匹配失谐量 $|\Delta k|$ 小于 l/π 条件下，抽运光的传播方向所允许的变化范围。图 2 为 1064 nm 抽运 KTP 光学参量振荡器的有效非线性系数、离分角、接收角随抽运光波矢方向与晶体 z 轴夹角 θ 的变化情况。从图中可看出，随着 θ 角增大，离分角减小而接收角增大；当到达非临界相位匹配点 ($\theta = 90^\circ$) 时，离分角等于 0° 而接收角达到最大。表 2 列出的是输出参量光同为 1.57 μm , 532 nm 抽运的临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器与 1064 nm 抽运的非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器的比较。

Table 2. Comparison of critically and non-critically phase-matching KTP

	phase-matching angle/($^\circ$)	$D_{\text{eff}}/(\text{pm/V})$	walk-off angle/($^\circ$)	acceptance angle $2\delta\theta/\text{mrad}$
CPM	59	2.8	2.7	0.9
NCPM	90	3.3	0	56

Brosnan 与 Marshall 等人分析了离分角对光学参量振荡器阈值、转换效率的影响^[8, 9]，考虑到离分角的有效参量增益长度为

$$\zeta = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{w_p}{\rho} \sqrt{\frac{w_p^2 + w_s^2}{w_p^2 + w_s^2/2}} \operatorname{erf} \left[l \left(\frac{w_p}{\rho} \sqrt{\frac{w_p^2 + w_s^2}{w_p^2 + w_s^2/2}} \right)^{-1} \right], \quad (3)$$

其中， w_p 为抽运光高斯光束模半径， w_s 为信号光高斯模半径， ρ 为离分角， l 为晶体长度， $\operatorname{erf}()$ 为误差函数。当抽运光束直径 $2w_p = 3 \text{ mm}$ ，离分角 $\rho = 2.7^\circ$ 时，有效参量增益长度 $\zeta = 0.88l$ 。Brosnan 脉冲阈值公式为

$$J_0 = \frac{2.25}{\kappa g_s \zeta^2} \tau \left[\frac{L}{2\pi c} \ln \frac{P_s}{P_n} + 2\alpha l + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 2 \right], \quad (4)$$

其中， 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 为光学参量振荡器谐振腔的物理腔长， τ 为抽运脉冲宽度， c 为光速，信号光功率 P_s 与初始噪声功率 P_n 的比值 P_s/P_n 为达到阈值时的信号光功率与初始噪声功率的比值， α 为晶体吸收系数， R 为输出耦合镜对信号光的反射率。从上式看出，阈值大小与有效参量增益长度的平方成反比，因而阈值比无离分效应时增加了 25%。同时，离分效应限制了抽运光束与信号光在非线性和相互作用过程中有效的耦合，使得抽运光横截面只有一部分参与了耦合作用。因此其最大可能效率被减小了，其效率近似为^[9]

$$\eta_w = \exp \left[- \left(\frac{l \tan \rho}{w_p} \right)^2 \right], \quad (5)$$

其中， l 为晶体长度。离分角也可理解为产生的信号光峰值没有正好对应抽运光强度峰值，而是落在其中的一个翼上，这两个峰值产生离分，致使参量转换没有发生在最大峰值功率处，因而影响了转换效率。对于晶体长度 $l = 13 \text{ mm}$ ， $2w_p = 3 \text{ mm}$ ， $\rho = 2.7^\circ$ 的情况下， $\eta_w = 84\%$ ，效率降低了 16%。

非临界相位匹配的接收角比临界相位匹配的接收角大一个数量级。对于近衍射极限的抽

运光束来说, 其本身的发散角在晶体接收角范围之内, 因而接收角对参量转换效率的影响不是很大; 然而较小的接收角对发散角大的抽运光进行参量转换就非常不利。1.064 μm 抽运的非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器接收角为 3.2° , 超过几倍的衍射极限, 因而就发散角较大光束质量较差的抽运源来说, 非临界相位匹配形式能够保证较高的转换效率。

3 实验及结果

0.532 μm 抽运的临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器实验装置如图 3 所示。采用的 KTP 晶体 56° 切割, 大小为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 13\text{ mm}$, II 类相位匹配, 光轴位于 $x-z$ 平面, 两端未镀膜, 抽运源采用的是 Spectra Physics 公司的 GCR290 型 Nd:YAG 激光器, 0.532 μm 倍频光光束发散角小于 0.5 mrad , 最大输出能量 1 J, 脉宽 6~7 ns (半峰全宽), 重复频率 10 Hz, 能量稳定度 $\pm 3\%$ 。光学参量振荡器的谐振腔采用平行平面腔, 输入镜 M_1 为 $R_s > 99\%$, $R_p = 10\%$, 输出耦合镜 M_2 为 $R_s = 85\%$, $R_p = 5\%$, 及滤光镜 M_3 为 $T_s > 85\%$, $R_p > 99\%$ 。

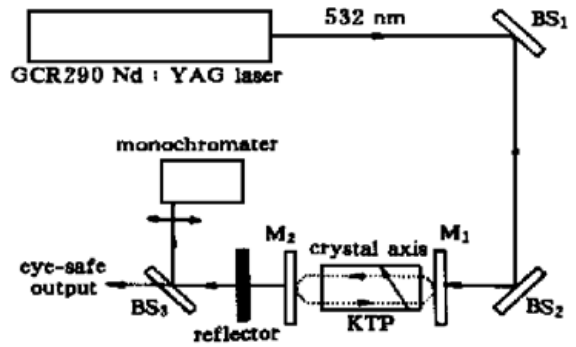


Fig. 3 Experimental setup of critically phase-matching KTP OPO

图 4 为 1.064 μm 抽运的非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器示意图, 抽运源为 PIANO 1000 型 Nd:YAG 激光器, 其振荡腔采用高斯镜非稳腔选单横模 (同 GCR290 激光器), 输出近衍射极限基频光, 重复频率 1~10 Hz, 脉宽 10 ns (半峰全宽), 光束呈平顶型分布。用一个 $\phi 3\text{ mm}$ 光阑限制输出光束直径以利用其中心部分。光学参量振荡器的腔型仍

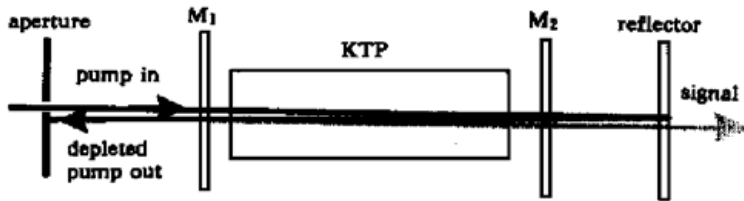


Fig. 4 Experimental setup of KTP OPO with a reflector

采用平行平面腔, 输入镜 M_1 对 1.57 μm 全反 ($R = 99.8\%$), 对 1.06 μm 高透 ($T = 86\%$); 输出镜 M_2 对 1.06 μm 波长的光高透 ($T = 96\%$), 对 1.57 μm 高反 ($R \approx 82\%$); 反射镜对 1.06 μm 全反, 对 1.57 μm 高透 ($T > 90\%$)。KTP 晶体尺寸 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, x 轴切割 ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$), 两端镀 1.06~1.57 μm 增透膜。

图 5 为实验测得的 0.532 μm 及 1.064 μm 抽运的 KTP 光学参量振荡器在人眼安全波段范围内的调谐范围。用 WDG30 光栅单色仪测量, PbS 探测器探测。0.532 μm 抽运的光学参量振荡器, 当晶体内角在 $53^\circ \sim 59^\circ$ 范围内变化时, 获得参量光调谐范围为 1.53~1.84 μm ; 而对于 1.064 μm 抽运的光学参量振荡器, 晶体内角转角 $79^\circ \sim 90^\circ$, 信号光变化从 1.57~1.60 μm 。

实验测得的 0.532 μm 抽运光学参量振荡器阈值为 17 MW/cm^2 , 1.064 μm 抽运的非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器阈值为 31 MW/cm^2 。0.532 μm 抽运非线性耦合系数 κ 大, 有利于光学参量振荡器低阈值运转; 而 KTP 晶体对 3.2 μm 以后波长有较强的吸收, 增加了 1.064 μm 抽运的光学参量振荡器阈值。但是阈值增加并不影响对信号光的转换效率, 如果有足够的能量可以利用, 且不需要调谐, 则利用 1.064 μm 抽运非临界相位匹配的 KTP 光学参

量振荡器输出人眼安全激光是可取的。

图 6 为 0.532 μm 抽运的临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器抽运光损耗和能量转换效率与抽运能量的关系(脉冲能量的测量采用 Newport 能量计,探头型号 818J-25B),在 8 倍阈值处最高能量转换效率 25.4%,此时抽运损耗达 70%;当抽运能量达到 520 mJ 即 10 倍阈值时,输出总能量为 130 mJ。1.064 μm 抽运非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器,抽运能量达到 2.5 倍阈值时,最高能量转换效率达 64%(见图 7),量子转换效率为 94%,二者最高能量转换效率相差 38.6 个百分点。一方面临界相位匹配存在的离分效应使光学参量振荡器转换效率降低;另一方面,非临界相位匹配参量谐振腔中 3.2 μm 闲频波在 KTP 晶体中吸收较大,客观上阻止了逆转波的形成,有助于效率的提高。

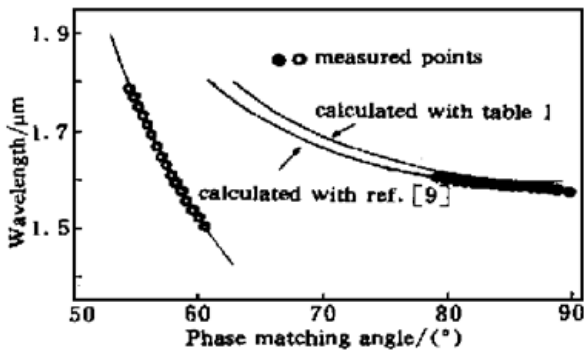


Fig. 5 Tunable eye-safe output from KTP OPO pumped at 532 nm and 1064 nm

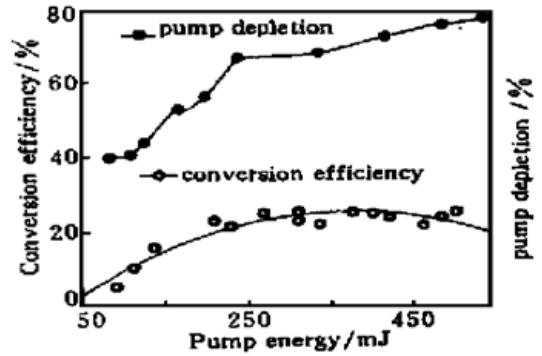


Fig. 6 Pump depletion and energy conversion efficiency versus the energy sent into KTP crystal

图 8 为 0.532 μm 抽运光的光斑及参量光输出的光斑,临界相位匹配输出的参量光呈明显的椭圆型。非临界相位匹配的信号光光斑基本与抽运光一致,只是由于抽运光反向非共线抽运使其呈略不规则的圆形。对于平行平面腔的非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器来说,参量输出的光束质量完全由抽运光“增益波导”决定,TE₀₀模近衍射极限的抽运光,其参量光仍是 TE₀₀模。对于临界相位匹配,其光束质量不光是由抽运光决定,离分效应将会引起光束质量变差,离分方向上的光束将被拉长,引起输出的功率密度减小。

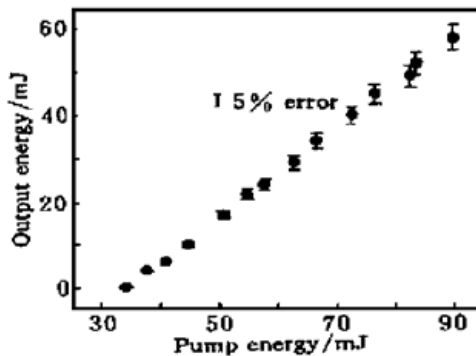


Fig. 7 Dependence of the output energy on the input pump energy in noncritically phase-matched KTP OPO

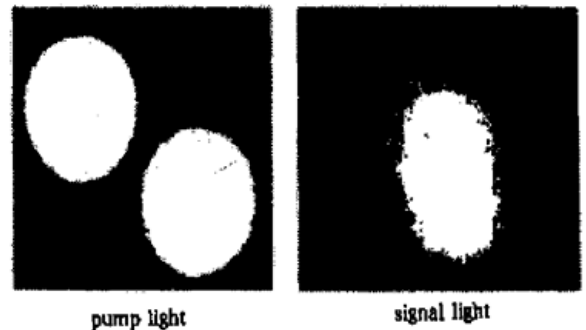


Fig. 8 The spatial profile of pump and signal light from CPM KTP OPO

由于 1.064 μm 抽运非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器有较大的接收角,对抽运光的光束质量要求不高。作者利用不经选横模的平行平面腔 Nd:YAG 激光器作抽运源,仍能获

得 30% 的能量转换效率。但是多横模激光经倍频, 再抽运临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器, 效率不到 1%。因此, 高转换效率, 低要求的 Nd:YAG 基频光抽运的非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器, 在某些需要使用人眼安全激光的应用领域更具有优越性。

结 论 1.064 μm 抽运非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器与 0.532 μm 抽运的临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器相比, 前者在效率、光束质量及对抽运光源的低要求等方面具有一定的优势, 而 0.532 μm 光抽运的 KTP 光学参量振荡器具有的宽带调谐性又是无可比拟的。

参 考 文 献

- [1] Chu Z, Singh U N, Wilkerson T D. A self-seeded SRS system for the generation of 1.54 μm eye-safe radiation. *Opt. Commun.*, 1990, **75**(2): 173~ 177
- [2] Stoneman R C, Esterowitz L. Laser-pumped room-temperature 1.50 μm CW Tm^{3+} -YLF lasers, In: *Advanced Solid-State Lasers, OSA Proc. Series*, Vol. 7 Washington, D. C., Optical Society of America, 1990, 176~ 178
- [3] 尹佳斌, 赵庆春, 何慧娟等. 近红外 KTP 单共振光参量振荡器. *光学学报*, 1993, **13**(3): 224~ 227
- [4] 谢发利, 范琦康. 双轴晶体 KTP 光参量振荡器. *中国激光*, 1990, **17**(9): 263~ 268
- [5] Bosenberg W R, Guyer D R. Broadly tunable, singly-frequency optical parametric frequency-conversion system. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1993, **10**(9): 1716~ 1722
- [6] Marshall L R, Kaz A. Eye-safe output from noncritically phase-matched parametric oscillators. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1993, **10**(9): 1730~ 1736
- [7] Kato K. Second harmonic and sum-frequency generation to 4950 and 458.9 nm in KTP. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(1): 3~ 4
- [8] Brosnan S J, Byer R L. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1979, **15**(6): 415~ 431
- [9] Marshall L R, Kaz A, Aytur O. Multimode pumping of optical parametric oscillators. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1996, **32**(2): 177~ 182

KTP Optical Parametric Oscillator with Both Critically and Non-Critically Phase-Matching

Wang Yuezhu Yao Baoquan Wang qi

(National Key Laboratory of Tunable laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 26 January 1999; revised 18 May 1999)

Abstract The experimental results of KTP optical parametric oscillator(OPO) pumped by Nd:YAG lasers are reported at both wavelengths 1064 nm and 532 nm with critically phase-matching (CPM) and non-critically phase-matching (NCPM). The eye-safe lasers have been demonstrated with tuning range of 1.53 to 1.84 μm , maximum energy of 130 mJ, and energy conversion efficiency as high as 64%. The tuning range, walk-off angle, acceptance angle, threshold and conversion efficiency are compared and analyzed, and the effects of walk-off on the beam quality and conversion efficiency of OPO are discussed.

Key words KTP, critically phase-matching, non-critically phase-matching, optical parametric oscillator.