

临界相位匹配砷酸钛氧钾光参量振荡器研究

张 伟, 万 勇, 陈鸿鸣, 吴振宇, 王 滨
(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘 要:为得到 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中红外输出, 对非共线泵浦砷酸钛氧钾 (KTA) 的临界相位匹配 ($\theta = 41.4^\circ, \varphi = 0^\circ$) 光参量振荡器 (OPO) 进行了理论分析及实验研究。当以电光调 Q 的 Nd:YAG 激光器泵浦 KTA-OPO 时, 对应输出为 $3.75 \mu\text{m}$ 的中红外激光, 重复频率为 $1 \sim 25 \text{ Hz}$, 最高输出单脉冲闲频光能量 $\geq 4.5 \text{ mJ}$ 。

关键词:非线性光学; 光参量振荡器; 临界相位匹配; KTA 晶体

中图分类号: O437.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.12.006

Study of critically phase-matched KTA optical parametric oscillator

ZHANG Wei, WAN Yong, CHEN Hong-ming, WU Zhen-yu, WANG Bin
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to obtain the $3 \sim 5 \mu\text{m}$ mid-infrared laser output, a non-collinear pump potassium titanyl arsenate critically phase-matched optical parametric oscillator (KTA-OPO) is analyzed theoretically and studied experimentally. When the KTA-OPO is pumped by an electro-optic Q -switched Nd:YAG laser, the repetition rate is $1 \sim 25 \text{ Hz}$, the pulse energy of idler output is 5.4 mJ and the wavelength is $3.75 \mu\text{m}$.

Key words: nonlinear optics; optical parametric oscillator; critically phase-matched; KTA crystal

1 引 言

处在大气窗口的 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 中红外激光在遥感、光谱分析、光生物、光化学等相关领域, 特别是军事上应用非常广泛。而光学参量振荡器 (OPO) 作为获得相干光源的重要手段, 特别是在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 中红外波段具有广泛的应用。近年来, 由于性能优良的中红外非线性晶体的不断出现, 如 KTP, ZGP, LiNbO₃ 等, 使 OPO 技术得到了不断成熟与发展。而对于大多中红外非线性晶体来说由于非线性系数小、损伤阈值低或难于生长等原因而限制了它们的应用, 而作者选用性能优良的 KTA 晶体^[1-2] 作为光参量振荡器的非线性材料, 从而获得了 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中红外激光输出。

砷酸钛氧钾 (KTiOAsO₄, KTA) 晶体属于 mm^2 晶系, 是正双轴晶体, 具有损伤阈值高 ($> 600 \text{ MW/cm}^2$), 非线性系数大 ($d_{24} = 3.43 \text{ pm/V}$), 物化性能稳定, 生长技术成熟等优点; 透光范围 ($0.35 \sim$

$5.3 \mu\text{m}$) 宽, 在 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 处, 透过率高, 解决了 KTP 晶体在 $3.4 \mu\text{m}$ 附近的吸收峰问题; 在 $1 \sim 4 \mu\text{m}$ 时吸收系数 $a < 0.01 \text{ cm}^{-1}$, 热传导系数高, 因而在泵浦功率较高时不会产生明显的热透镜效应。在国内外, 对 KTA 晶体的非临界相位匹配 ($\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$) 已经进行了大量研究^[3-5], 并且采用非临界相位匹配时, 其走离角为零, 接受角达到最大, 且转换效率也最高^[6], 但是, 其输出波长为 $3.475 \mu\text{m}$, 对于一些工程应用来说还不算太理想。本文采用 KTA 晶体一种新的相位匹配角, 即 $\theta = 41.4^\circ, \varphi = 0^\circ$, 当采用 $1.064 \mu\text{m}$ 泵浦时, 对应的 KTA-OPO 输出波长为 $3.75 \mu\text{m}$, 其应用前景更为广阔。

2 KTA-OPO 理论分析

由于 KTA 晶体第 II 类相位匹配的有效非线性

作者简介: 张 伟 (1985 -), 男, 在读硕士研究生, 主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: zhangwei3017@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-05-27

系数及增益远远大于第 I 类相位匹配,因此一般都采用 KTA 晶体的第 II 类相位匹配。

而对于光参量振荡器的三波互作用来说,应同时满足能量守恒与动量守恒,即:

$$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2 \tag{1}$$

$$n_3(\omega_3)\omega_3 = n_1(\omega_1)\omega_1 + n_2(\omega_2)\omega_2 \tag{2}$$

其中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为闲频光、信号光和泵浦光对应的频率,而 n_1, n_2, n_3 分别为闲频光、信号光和泵浦光对应在晶体内的折射率。对于 KTA 晶体来说,任意方向平面波在晶体中传播时,其折射率曲线为:

$$\frac{(\sin\theta\cos\varphi)^2}{n^{-2} - n_x^{-2}} + \frac{(\sin\theta\sin\varphi)^2}{n^{-2} - n_y^{-2}} + \frac{(\cos\varphi)^2}{n^{-2} - n_z^{-2}} = 0 \tag{3}$$

其中, θ, φ 为波矢的传播方向; n 为光波的折射率; n_x, n_y, n_z 为对应光波在晶体中的主折射率;而 KTA 晶体的 Sellmeier 方程^[7]为:

$$n_x = \left(1.90713 + \frac{1.23522}{1 - (0.19692/\lambda)^2} - 0.01025\lambda^2 \right)^{1/2} \tag{4}$$

$$n_y = \left(2.15912 + \frac{1.00099}{1 - (0.21844/\lambda)^2} - 0.01096\lambda^2 \right)^{1/2} \tag{5}$$

$$n_z = \left(2.14786 + \frac{1.29559}{1 - (0.22719/\lambda)^2} - 0.01436\lambda^2 \right)^{1/2} \tag{6}$$

因此,由式(1)~式(6),可得出 KTA II 类相位匹配曲线,如图 1 所示。由图 1 可知,在 3~5 μm 中红外波段范围内,KTA 晶体主折射率之间相差很大,因而理论上可以在这一波段范围内找到相应的相位匹配角。且当临界相位匹配($\theta = 41.4^\circ, \varphi = 0^\circ$),泵浦光为 1.064 μm 时,对应的输出闲频光和信号光波长分别为 3.75 μm 和 1.48 μm 。对于 KTA-OPO 的第 II 类相位匹配,对应的有效非线性系数为:

$$d_{\text{eff}} = d_{24} \times \sin\theta \tag{7}$$

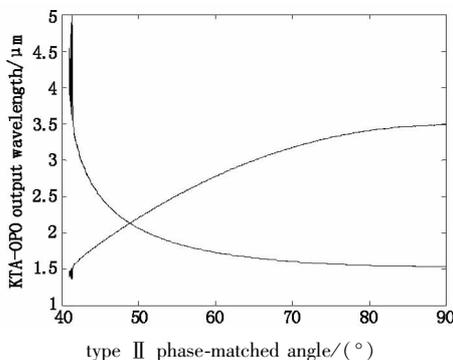


图 1 KTA-OPO II 类相位匹配曲线

Fig. 1 type II phase-matching curve of KTA-OPO

其中, $d_{24} = 3.43 \text{ pm/V}$, θ 为相位匹配角,对应的曲线如图 2 所示。随着相位匹配角 θ 的增大,有效非线性系数 d_{eff} 也不断地增大,并可求得,当 $\theta = 41.4^\circ$ 时,对应的 $d_{\text{eff}} = 2.2683 \text{ pm/V}$ 。同理,可得到 KTA-OPO II 类相位匹配时的走离角、允许角随相位匹配角的变化曲线,如图 3 所示。随着相位匹配角的增大,KTA-OPO 的走离角不断变小,而 KTA-OPO 的接收角却不断增大,到达 90° 时,其走离角为零,接收角达到最大。

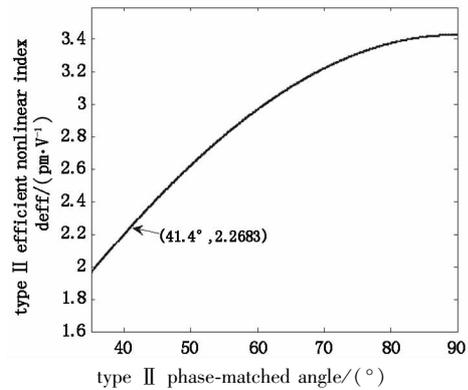
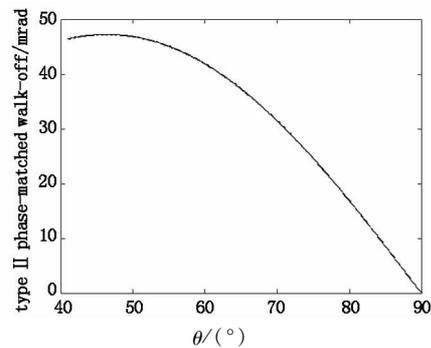


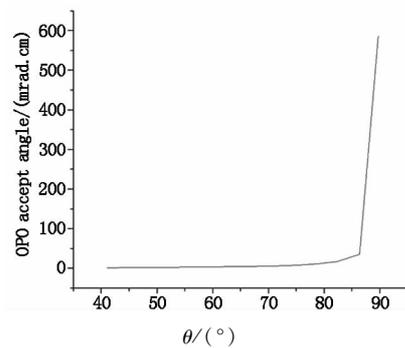
图 2 KTA-OPO II 类相位匹配的有效非线性系数曲线

Fig. 2 type II phase-matching efficient nonlinear index d_{eff} curve of KTA-OPO



(a) 走离角曲线

(a) walk-off



(b) 允许角曲线

(b) accept angle

图 3 KTA-OPO II 类相位匹配时的走离角及允许角曲线

Fig. 3 type II phase-matching walk-off angle and acceptangle of KTA-OPO

由以上可知,对于 KTA 晶体非临界相位匹配与临界相位匹配来说,它们之间的特性参数存在很大的差异:KTA 晶体的临界相位匹配有效非线性系数和允许角比非临界相位匹配的都要小,而走离角比非临界相位匹配时又要大,因而对于 KTA - OPO 的 II 类相位匹配来说,临界相位匹配与非临界相位匹配相比,临界相位匹配的光 - 光转换效率要低,晶体的有效作用长度要短,而且对泵浦光的光束质量要求更高。

3 KTA - OPO 实验装置及结果分析

3.1 KTA - OPO 实验装置

如图 4 所示,是一个 Nd:YAG 激光器泵浦外腔 KTA - OPO 的实验装置图。其中 KTA - OPO 的泵浦激光 $1.064 \mu\text{m}$ 由一单灯双棒、电光调 Q 的 Nd:YAG 激光器产生,它含有两根 Nd:YAG 激光棒,分别作为 Nd:YAG 激光器的主振荡级与放大级,并且都通过水冷进行冷却。平面镜 M1 与 M2 构成 $1.064 \mu\text{m}$ Nd:YAG 激光谐振腔,M1 为 $1.064 \mu\text{m}$ 的全反镜,M2 为 $1.064 \mu\text{m}$ 输出镜,其输出的偏振方向与 KTA 晶体的 Y 轴平行。KTA - OPO 腔采用平 - 平腔型结构,其腔内包括一个 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 规格的 II 类临界相位匹配 ($\theta = 41.4^\circ, \varphi = 0^\circ$) 的 KTA 晶体,其端面镀有对 $1.064 \mu\text{m}, 1.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 和 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的增透膜。OPO 的输入镜 M3 镀有对 $1.064 \mu\text{m}$ 的高透 (HT) 膜和对 $1.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 与 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的高反 (HR) 膜。对于 OPO 的输出耦合镜 M4 镀有对 $1.064 \mu\text{m}$ 和 $1.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的 HR 膜,而对 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 则镀有增透膜,由此可知,OPO 只对信号光,即 $1.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 形成振荡,且为单谐振光参量振荡器 (SRO - OPO),且泵浦光双程通过 KTA 晶体,从而有利于减少 OPO 起振阈值。M5 为一锗片,对 $2 \mu\text{m}$ 以下的光波进行截止,以消除 $2 \mu\text{m}$ 以下光波对输出能量的影响,而对 $3.475 \mu\text{m}$ 透过率约为 48%,并且文中出现的所有输出能量值均为 M5 后所测得的并经过换算后的最终值。

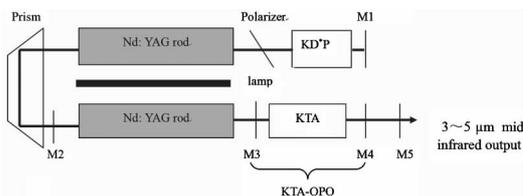


图 4 KTA - OPO 实验结构图

Fig. 4 experimental setup of KTA-OPO

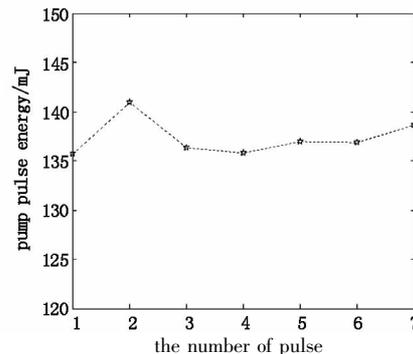
实验中,为了避免 OPO 输出耦合镜 M4 对 $1.064 \mu\text{m}$ 的高反而使泵浦光原路返回到泵浦激光

腔内,从而影响泵浦激光器的特性,因此采用非共线泵浦,由参考文献[8]可知:非共线泵浦会使阈值增加,转换效率下降,但在非共线角度较小 ($\leq 1^\circ$) 时,影响很小,且非共线泵浦能得到更高的增益和更好的光束质量^[9]。

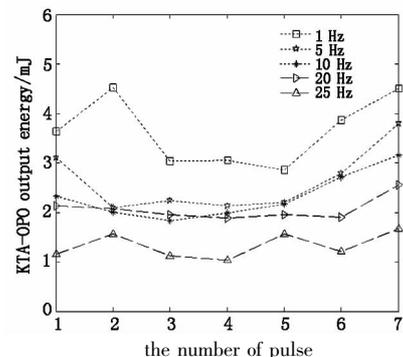
3.2 实验结果及分析

首先使用 WDG30 光栅单色仪和 PVI - 5 型红外探测器对 KTA - OPO 输出波长进行检测,测得输出的闲频光波长为 $3.75 \mu\text{m}$,与理论值一致。并且对所有输出的能量采用 EPM2000 能量/功率计与 J25 探头进行测量。

当工作频率为 $1 \sim 25 \text{ Hz}$ 时,对应的泵浦光和输出的闲频光能量如图 5 所示。



(a) 泵浦光能量



(b) 输出闲频光的能量

图 5 KTA - OPO 泵浦光能量与输出闲频光的能量

Fig. 5 the pump pulse energy and output idler pulse energy of KTA-OPO

由图 5 可知,随着工作频率的增加,由于热透镜效应的影响,KTA - OPO 输出闲频光的能量不断降低,当泵浦能量为 142 mJ 时,最高输出能量为 4.5 mJ,其光 - 光转换效率为 3.19%,相对于非临界相位匹配来说,转换效率较低,其主要原因有:①临界相位匹配的有效非线性系数较少,从而 KTA - OPO 的起振阈值较高;②临界相位匹配存在走离效应,使泵浦光与信号光的有效作用距离缩短;③临界相位匹配的允许角较小,从而对泵浦光的光

束质量要求更高。然而可以通过采取一些措施进行补偿,如采用双晶体进行走离效应补偿^[10],采用光束质量好的泵浦激光作为泵浦源等,另外由于输出的闲频光能量较低,也可通过将 OPO 输出的 3.75 μm 光作为光参量放大(OPA)的种籽光进行参量放大以提高闲频光的输出能量,而且此技术也能减少 OPO 输出闲频光的发散角^[11],从而更好地满足工程应用。

4 结 论

本文对电光调 Q 的 Nd:YAG 激光器非共线泵浦外腔的临界相位匹配 KTA - OPO 进行了实验,并对其理论进行了分析,对 KTA 临界相位匹配与非临界相位匹配的特性参数进行了对比,且当泵浦光为 1.064 μm ,采用 KTA 临界相位匹配($\theta = 41.4^\circ$, $\varphi = 0^\circ$)时,其输出的闲频光波长为 3.75 μm ,比 KTA 非临界相位匹配时输出的闲频光 3.475 μm 在军事上具有更广泛的应用。

参考文献:

- [1] Mark S Webb, Peter F Moulton, Jeffrey J Kasinski, et al. High-average-power KTiOAsO₄ optical parametric oscillator[J]. Optics Letters, 1998, 23(15): 1161 - 1163.
- [2] S Das. Line-tunable singly resonant optical parametric oscillator in mid-infrared spectral range based on KTA crystal[J]. IEEE, 2009, 45(9): 1100 - 1105.
- [3] Yelena Isyanova, Evgeni Slobodtchikov, John H Flint. High repetition rate [J]. Rapidly Tunable KTA OPO. OSA, 2005: 407 - 411.
- [4] R F Wu, K S Lai, H F Wong, et al. Multiwatt mid-IR output from an Nd:YALO laser pumped intracavity KTA OPO [J]. OSA, 2001, 8(13): 694 - 698.
- [5] Ren Gang, Cai Bangwei, Zhong Ming, et al. Theoretical design of 3 ~ 4 μm KTA optical parametric oscillator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33, Suppl: 694 - 698.
- [6] Zhong Kai, Li Jiansong, Cui Haixia, et al. Low threshold and high conversion efficiency nanosecond mid-infrared KTA OPO [J]. Chin. Phys, 2009, 26: 124213 - 1 - 124213 - 4.
- [7] K Kato. Second-harmonic and sum-frequency generation in KTiOAsO₄ [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, April, 1994, 30(4): 881 - 883.
- [8] Liu Yanwei, Gong Mali, Zhai Gang, et al. KTP optical parametric oscillator with noncollinear pump [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(4): 398 - 402.
- [9] Zhao Yonghua, He Huijuan, Wang Zhijiang. Analysis on parametric gain in noncollinear phase-matching configuration [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(12): 9229 - 9235.
- [10] Ystein Farsund, Gunnar Arisholm, Gunnar Rustad. Improved beam quality from a high energy optical parametric oscillator using crystals with orthogonal critical planes [J]. Optical Society of America, 2010, 18(9): 1611 - 1615.
- [11] Wang Li, Yang Jian, Huang Liu. BBO crystal optical parametric amplifier of a narrow linewidth, ns tunable pulse Ti:sapphire laser on injection-seeded [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, A29(2): 104 - 106.