

3.5 μm KTiOAsO_4 光参量振荡器温度调谐特性卞进田^{1,2*}, 孔辉^{1,2}, 徐海萍^{1,2}, 叶庆^{1,2}, 孙晓泉^{1,2}¹国防科技大学电子对抗学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;²国防科技大学先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 对 3.5 μm KTiOAsO_4 光参量振荡器(KTA-OPO)的温度调谐性能进行研究, 仿真计算不同温度下 KTA 的相位匹配曲线, 以及光束与 z 轴的夹角 θ 与调谐斜率的对应关系。仿真结果表明, 随着 θ 值的增大, 闲频光的峰值波长呈单调递增的趋势, 调谐斜率呈单调递减的趋势, 且 I 类相位匹配的调谐斜率普遍大于 II 类。对于非临界相位匹配(NCPM)KTA-OPO, 对其温度调谐性能进行理论和实验研究。实验结果表明, 当温度从 30 $^\circ\text{C}$ 升高到 180 $^\circ\text{C}$ 时, 在 II 类相位匹配的条件下, 闲频光的峰值波长从 3463 nm 移动到 3474 nm, 调谐斜率为 0.073 nm/ $^\circ\text{C}$, 理论上的调谐斜率为 0.077 nm/ $^\circ\text{C}$, 实验与理论计算结果相符, 说明非临界相位匹配 KTA-OPO 在不同温度下的中红外闲频光输出波长受到温度的影响小, 环境适应性强。

关键词 激光器; 3.5 μm 激光; 光参量振荡器; KTiOAsO_4 晶体; 温度调谐

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0401015

1 引言

中红外波段位于许多分子的吸收峰, 对中红外激光产生技术的研究一直是激光技术领域的研究热点之一^[1-3]。3.5 μm 波段位于大气窗口和 C—H 键伸缩振动吸收峰处, 该波段的激光在光谱学、遥感、环境监测及红外对抗领域有着广泛而重要的应用前景。利用非线性晶体的频移特性, 可将近红外波段的激光转换至中远红外波段, 这是产生中红外激光的有效手段之一^[4-5]。磷酸氧钛钾(KTiOAsO_4 , KTA)晶体是一种优良的非线性材料^[6], 是磷酸氧钛钾(KTiOPO_4 , KTP)晶体中的一种, 透光范围为 0.35~5.30 μm , 而且在 3~5 μm 波段的吸收损耗远低于 KTP 晶体。KTA 晶体具有非线性系数大、角度和温度匹配带宽宽和损伤阈值高的特点, 而且物理化学性能稳定^[7]。使用 Nd:YAG 激光器输出波长为 1.064 μm 的激光泵浦非临界相位匹配(NCPM)KTA-OPO, 可以输出波长为 3.5 μm 的中红外激光^[8-9]。当晶体的温度变化时, OPO 输出的波长也会发生变化, 从而可以

实现波长调谐^[10], 其中周期极化的铌酸锂晶体(PPLN)的调谐斜率可达 2 nm/ $^\circ\text{C}$ 以上。目前, 对于 KTA-OPO 的温度调谐性能的研究较少, 且仅为理论研究, 鲜有实验研究报道。文献[2]利用了波长为 1.06 μm 的激光泵浦 NCPM KTA-OPO, 可以得到温度调谐范围为 0~100 $^\circ\text{C}$, 在 3464~3506 nm 的波长范围内的调谐斜率为 0.42 nm/ $^\circ\text{C}$ 。2003 年, ShaiEmanueli 等测量了 KTP 和 KTA 晶体在 25~200 $^\circ\text{C}$ 温度范围内, 而且在 532~1585 nm 的波长范围内的晶体折射率, 并给出了两者随温度变化的 Sellmeier 方程^[7]。

本文利用文献[11]的 Sellmeier 方程仿真计算不同温度下 KTA 晶体的相位匹配曲线, 得到 KTA 在 II-A 类相位匹配的条件下有较小的闲频光波长和温度变化率。通过实验对仿真计算结果进行验证, 证明文献[7]的温度色散方程可以拓展到中红外波段。本文详细研究波长为 1.06 μm 的激光泵浦 NCPM KTA-OPO 的温度调谐特性, 为不同场合的应用提供参考。

收稿日期: 2020-07-30; 修回日期: 2020-08-29; 录用日期: 2020-09-07

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金(SKL2019ZR06)

*E-mail: bianjintian17@nudt.edu.cn

2 理论方法

2.1 KTA-OPO 相位匹配计算

KTA 晶体在常温下的 Sellmeier 方程^[12]可表示为

$$\begin{cases} n_x^2 = 1.90713 + \frac{1.23522}{1 - (0.19692/\lambda^2)} - 0.01025\lambda^2 \\ n_y^2 = 2.15912 + \frac{1.00099}{1 - (0.21844/\lambda^2)} - 0.01096\lambda^2, \\ n_z^2 = 2.14786 + \frac{1.29559}{1 - (0.22719/\lambda^2)} - 0.01436\lambda^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: n_i 表示晶体在不同主轴上的折射率, 其中 i 为 x 、 y 和 z ; λ 为入射激光的波长。

入射到 KTA 晶体中的光束方向可用 (θ, φ) 来表示, 其中 θ 表示光束与 z 轴的夹角, φ 表示光束与 z 轴组成的平面 kOz 与 x 轴的夹角。每个方向的光束都可以分解为相互垂直的两个偏振分量, 折射率大的称为慢光, 用 $n_{e_1}(\theta, \varphi)$ 来表示, 折射率小的称为快光, 用 $n_{e_2}(\theta, \varphi)$ 来表示, 与 n_x^2 、 n_y^2 和 n_z^2 的关系参见文献^[13]。

泵浦光与信号光和闲频光的关系可表示为

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad (2)$$

式中: λ_p 、 λ_s 和 λ_i 分别表示泵浦光、信号光和闲频光的波长。I 类相位匹配中, λ_p 、 λ_s 和 λ_i 与折射率的关系可表示为

$$\frac{n_{e_2}^{\lambda_p}}{\lambda_p} = \frac{n_{e_1}^{\lambda_s}}{\lambda_s} + \frac{n_{e_1}^{\lambda_i}}{\lambda_i}, \quad (3)$$

表 1 a_0 、 a_1 、 a_2 和 a_3 在不同轴、不同折射率下的取值

Table 1 Values of a_0 , a_1 , a_2 , and a_3 in different axes with different refractive indices

Parameter	z-axis		y-axis		x-axis	
	$n_1/10^{-6}$	$n_2/10^{-8}$	$n_1/10^{-6}$	$n_2/10^{-8}$	$n_1/10^{-6}$	$n_2/10^{-8}$
a_0	-6.1537	-0.96751	-4.1053	0.5857	-4.1053	0.5857
a_1	64.5050	13.19200	44.2610	3.9386	44.2610	3.9386
a_2	-56.4470	-11.78000	-38.0120	-4.0081	-38.0120	-4.0081
a_3	17.1690	3.62920	11.3020	1.4316	11.3020	1.4316

使用波长为 1064 nm 的 Nd : YAG 激光器对 λ_i 进行采样, 采样精度为 1 nm, λ_s 值可由(2)~(4)式给出。为了方便起见, 仅考虑 $\varphi = 0^\circ$ 和 $T = 25, 80, 130, 180^\circ\text{C}$, I 类和 II 类相位匹配条件下 θ 与 λ_i 和 λ_s 的对应关系如图 1 所示。

式中: $n_{e_2}^{\lambda_p}$ 为 λ_p 在晶体中快光的折射率; $n_{e_1}^{\lambda_s}$ 和 $n_{e_2}^{\lambda_s}$ 分别为 λ_s 在晶体中慢光和快光的折射率; $n_{e_1}^{\lambda_i}$ 和 $n_{e_2}^{\lambda_i}$ 分别为 λ_i 在晶体中慢光和快光的折射率。II-B 相位匹配中, λ_p 、 λ_s 和 λ_i 与折射率的关系可表示为

$$\frac{n_{e_2}^{\lambda_p}}{\lambda_p} = \frac{n_{e_1}^{\lambda_s}}{\lambda_s} + \frac{n_{e_2}^{\lambda_i}}{\lambda_i}. \quad (4)$$

II-A 相位匹配中, λ_p 、 λ_s 和 λ_i 与折射率的关系可表示为

$$\frac{n_{e_2}^{\lambda_p}}{\lambda_p} = \frac{n_{e_2}^{\lambda_s}}{\lambda_s} + \frac{n_{e_1}^{\lambda_i}}{\lambda_i}. \quad (5)$$

使用(1)~(5)式即可计算 KTA 晶体在常温下的相位匹配角。当温度变化时, KTA 晶体在三条主轴上的折射率 n_i 也将发生变化, 温度 T 下的折射率 $n_i(T)$ 与常温下的 n_i ^[7] 可表示为

$$n_i(T) = n_i + \Delta n(\lambda, T), \quad (6)$$

其中 $\Delta n(\lambda, T)$ 可表示为

$$\Delta n(\lambda, T) = n_1(\lambda)(T - 25) + n_2(\lambda)(T - 25)^2, \quad (7)$$

其中 $n_{1(2)}(\lambda)$ 可表示为

$$n_{1(2)}(\lambda) = a_0 + \frac{a_1}{\lambda} + \frac{a_2}{\lambda^2} + \frac{a_3}{\lambda^3} + \frac{B_{1(2)}(\lambda - 1.55)}{1 + \exp[-10 \times (\lambda - 1.55)]}, \quad (8)$$

式中: $B_1 = 4.6 \times 10^{-6}$; $B_2 = 8 \times 10^{-9}$; a_0 、 a_1 、 a_2 和 a_3 的取值如表 1 所示。

联立(1)式、(6)~(8)式可以计算 KTA 晶体在不同温度下的主轴折射率, 再综合(2)~(5)式可得到 KTA 晶体在不同温度下的相位匹配角。

从图 1 可以看到, 当 T 从 25°C 上升到 180°C 时, 闲频光 λ_i 的波长值随之增加, 信号光 λ_s 的波长值随之减小。即在 I 类和 II 类相位匹配的条件下, KTA-OPO 输出的闲频光波长随着温度的升高而变长。

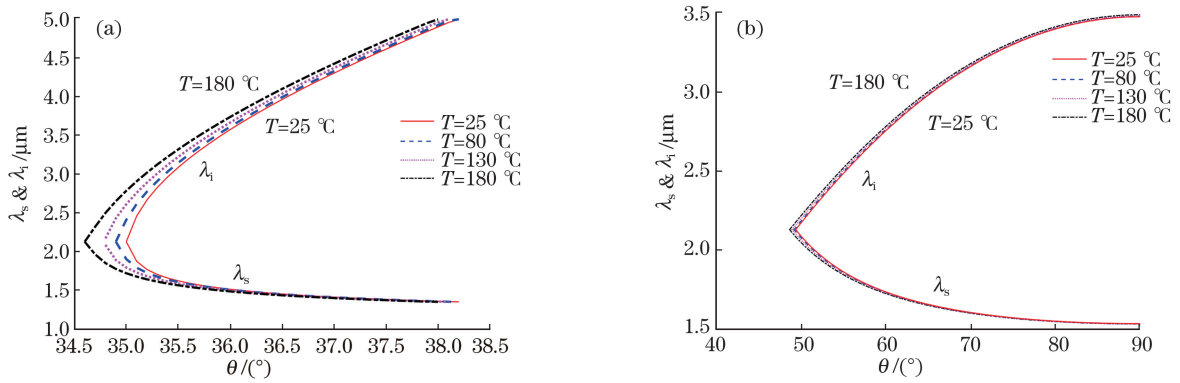


图 1 KTA-OPO 在相位匹配条件下的相位匹配曲线。(a) I 类;(b) II 类

Fig. 1 Phase matching curves of KTA-OPO under phase matching condition. (a) Type I; (b) type II

2.2 KTA-OPO 温度调谐曲线

从图 1 可以看到,在不同 θ 的条件下,调谐斜率 $\Delta\lambda_i/\Delta T$ 各不相同,为此给出 I 类和 II 类相位匹配的条件下, θ 与 λ_i 和 $\Delta\lambda_i/\Delta T$ 在 $\varphi=0^\circ$ 的条件下的关系如图 2 所示。

从图 2 可以看到,随着 θ 值的增加, λ_i 呈单调递增的趋势,但调谐斜率 $\Delta\lambda_i/\Delta T$ 呈单调递减的趋势;

在 I 类相位匹配的条件下,当 $\theta = 35.5^\circ$ 时, $\lambda_i = 3088 \text{ nm}$, $\Delta\lambda_i/\Delta T = 1.4968 \text{ nm}/^\circ\text{C}$; 当 $\theta = 37.5^\circ$ 时, $\lambda_i = 4614 \text{ nm}$, $\Delta\lambda_i/\Delta T = 0.7290 \text{ nm}/^\circ\text{C}$; 在 II-A 类相位匹配的条件下,当 $\theta = 50^\circ$ 时, $\lambda_i = 2169 \text{ nm}$, $\Delta\lambda_i/\Delta T = 0.3548 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 当 $\theta = 90^\circ$ 时, $\lambda_i = 3475 \text{ nm}$, $\Delta\lambda_i/\Delta T = 0.0774 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

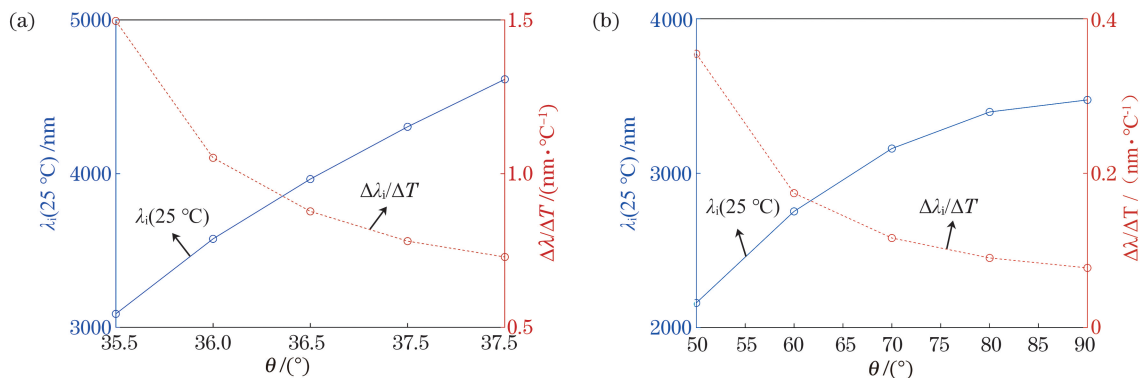


图 2 在不同的相位匹配条件下 θ 与 λ_i 和 $\Delta\lambda_i/\Delta T$ 的关系。(a) I 类;(b) II 类

Fig. 2 Relationship of θ and λ_i and $\Delta\lambda_i/\Delta T$ under different phase matching conditions. (a) Type I; (b) type II

综上所述,对于 KTA 晶体,在 I 类相位匹配的条件下, $\Delta\lambda_i/\Delta T$ 值普遍大于 II 类,且在 II 类相位匹配的条件下, $\theta = 90^\circ$ 的温度调谐范围最小。由此可知,在 II 类相位匹配的条件下,KTA 晶体($\theta = 90^\circ$ 和 $\varphi = 0^\circ$) 的输出波长对温度变化不敏感,说明其在对激光波长精度要求较低の場合中可以不考虑温度

对波长的影响,如果应用场合对波长精度要求高 (nm 级),则需要考虑温度对波长的影响。

3 实验装置

KTA-OPO 温度调谐的实验装置如图 3 所示,其中 D 为小孔光阑, T 为望远镜系统, Oven 为温控

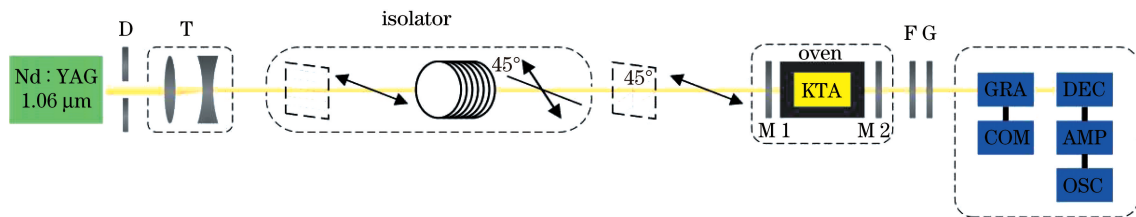


图 3 KTA-OPO 温度调谐的实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of experimental apparatus for KTA-OPO temperature tuning

炉, F 为滤光片, G 为锗片, GRA 为光栅光谱仪, COM 为计算机, DEC 为探测器, AMP 为信号放大器, OSC 为示波器, M 1 和 M 2 为输入镜和输出镜。将型号为 SL800 Series Pulsed 的 Nd: YAG 激光器作为泵浦源, 半峰全宽(FWHM)为 13 ns, 光斑直径为 8 mm, 重复频率为 1 Hz。激光器后放置一个小孔光阑用于调光, 通过一个望远镜系统将光斑的直径压缩至 4 mm 以提高泵浦光的能量密度。

输出镜镀有对泵浦光的高反膜, 用来防止反射的泵浦光返回至 Nd: YAG 激光器中以损坏 Nd: YAG 腔内的元件, 因此需在望远镜系统后放置由一个偏振片和一个磁旋光器组成的光隔离器。由于 Nd: YAG 激光器输出泵浦光的偏振方向为水平方向, 因此偏振片的偏振方向也调为水平方向, 而泵浦光偏振方向通过光隔离器后在水平方向顺时针旋转 45°。KTA 晶体是一个尺寸为 10 mm × 10 mm × 20 mm 的长方体, 当泵浦光为快光时满足相位匹配, 而快光的偏振方向垂直于 xoz 面, 因此偏振方向需沿着 y 轴方向振动, 即平行于 y 轴方向 10 mm 长的边。由于泵浦光的偏振方向顺时针旋转 45°, 为了使 KTA 晶体水平放置在温控炉上, 并提高设备的稳定性, 使用一个 45° 旋光片将偏振方向逆时针旋转 45°, 使得偏振方向为水平方向。

M 1 在 1064 nm 处高透(透过率大于 95%), 在 1.4 ~ 1.6 μm 处高透(透过率大于 95%); M 2 在 1064 nm 处高透(透过率大于 95%), 在 1.4 ~ 1.6 μm 范围内的反射率为 90%, 在 3.4 ~ 4.3 μm 范围内的高透(透过率大于 95%)。首先对 KTA 晶体进行抛光处理并镀有泵浦光、信号光和闲频光的增透膜, 然后将晶体放置在温控炉中, 温控炉的最大可调温度为 200 °C, 调整精度为 0.1 °C。

M 2 后端放置滤光片和 Ge 片, 滤光片对波长为 1064 nm 的激光具有高反性, 对波长为 3 ~ 5 μm 激光的透过率大于 95%, 而 Ge 片对波长为 1064 nm 的激光全部吸收, 对波长为 3 ~ 5 μm 激光的透过率约为 80%。Ge 片后放置由北京卓立汉光公司提供型号为 Omni-300 λ 的光栅光谱仪, 闪耀光栅的中心波长为 3000 nm, 光栅刻线为 300 g/mm。使用计算机控制光栅转动, 使其透射波长在 2000 ~ 6000 nm 范围内连续可调, 调整精度为 1 nm。光栅光谱仪后端放置由北京卓立汉光公司提供的 DEC-M204-InSb 探测器和 ZAMP 放大器, 并使用其对指定透射波长的激光进行检测和信号放大, 随后使用型号为 DSOX3054T 的示波器对由 ZAMP 放大器

输出的信号幅度进行测量, 当示波器上的能量最大时, 光栅光谱仪所设置的波长即为输出闲频光的峰值波长。

4 实验结果

使用温控炉对 KTA 晶体的温度进行控制, 并记录温度分别为 30, 80, 130, 180 °C 的闲频光输出的峰值波长, 并与文献[12, 14-15]中 Sellmeier 方程计算的理论值进行对比, 结果如图 4 所示。

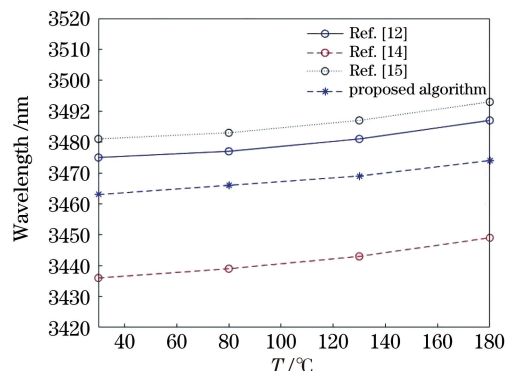


图 4 不同温度下闲频光的峰值波长

Fig. 4 Peak wavelengths of idle light at different temperatures

从图 4 可以看到, 当温度分别为 30, 80, 130, 180 °C 时, 实测的峰值波长分别为 3463, 3466, 3469, 3474 nm, 则 $\Delta\lambda_i/\Delta T = 0.073 \text{ nm}/^\circ\text{C}$; 文献[12]给出的计算结果分别为 3475, 3477, 3481, 3487 nm, 则 $\Delta\lambda_i/\Delta T = 0.0774 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 理论值与实测值最为接近, 但实测的波长值略小于理论值, 原因在于晶体的切割角度存在误差或晶体在光路中稍有倾斜会导致 θ 值略小于 90°, 也可能是由轻微的非共线匹配所致^[8,16]。实验结果表明, 在 II 类相匹配的条件下, KTA 晶体的闲频光波长受到温度变化的影响小, 这与理论研究的结论一致, 同时也可认为文献[7]的温度色散方程可以扩展到中红外波段。

5 结 论

相比于其他中红外非线性晶体, KTA-OPO 在不同温度下的闲频光输出波长相对稳定。在 I 和 II 类相位匹配的条件下, 随着 θ 值的增加, 闲频光的波长呈单调递增的趋势, 闲频光与温度的调谐斜率呈单调递减的趋势, 且 I 类相位匹配的调谐斜率普遍大于 II 类。在 II 类相位匹配的条件下, $\theta = 90^\circ$ 的温度调谐范围最小, 且理论下的调谐斜率为 0.0774 nm/°C。实验结果表明, 当温度分别为 30, 80, 130, 180 °C 时, 实测的峰值波长分别为 3463,

3466, 3469, 3474 nm, 则调谐斜率为 0.073 nm/°C, 实测值与理论值非常接近。理论和实验研究结果均表明, KTA-OPO 输出的中红外激光波长受到温度的影响小, 为 KTA-OPO 在复杂环境下的实际应用具有一定的参考意义。

参 考 文 献

- [1] Yuan Y, Chai X L, Yang C A, et al. 2.75 μm mid-infrared GaSb-based quantum well lasers with quinary alloy barrier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701026.
袁野, 柴小力, 杨成奥, 等. 2.75 μm 中红外 GaSb 基五元化合物势垒量子阱激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701026.
- [2] Qu C B, Kang M Q, Xiang X J, et al. Theoretical study of 4.3 μm dual-wavelength pumped Dy : InF₃ high-energy mid-infrared fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0801003.
瞿崇兵, 康民强, 向祥军, 等. 双波长泵浦 4.3 μm Dy : InF₃ 高能中红外光纤激光理论研究[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0801003.
- [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] Kong H, Bian J T, Sun X Q. Calculation of phase-matching angles and effective nonlinear coefficients of BaGa₄Se₇ crystals[J]. Optik, 2019, 193: 163004.
- [5] Ren G, Cai B W, Zhang M, et al. Theoretical design of 3~4 μm KTA optical parametric oscillator [J]. Chinese Journal of Laser, 2006, 33(Suppl.): 222-225.
任刚, 蔡邦维, 钟鸣, 等. 3~4 μm KTA 光参量振荡器的理论设计[J]. 中国激光, 2006, 33(Suppl.): 222-225.
- [6] Xu J J, Zhang X Y, Cong Z H, et al. Tunable Nd³⁺ : YAG/KTiOAsO₄ Raman lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0601002.
徐瑾瑾, 张行愚, 丛振华, 等. Nd³⁺ : YAG/KTiOAsO₄ 可调谐拉曼激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0601002.
- [7] Kong H, Bian J T, Ye Q, et al. Comparison of mid-infrared laser generated by optical parametric oscillation of BaGa₄Se₇ and KTiAsO₄ [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(6): 172-178.
- [8] Zhang W, Wan Y, Chen H M, et al. Experimental study on mid-infrared KTA optical parametric oscillator[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(7): 742-746.
张伟, 万勇, 陈鸿鸣, 等. 中红外脉冲 KTA 光参量振荡器实验研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(7): 742-746.
- [9] He J L, Wang R H, Huang H T, et al. Efficiency and high power all-solid-state 1.5 μm intracavity optical parametric oscillator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1789-1792.
何京良, 王瑞华, 黄海涛, 等. 高效大功率全固态 1.5 μm 腔内光参量振荡器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1789-1792.
- [10] Niu S J, Aierken P, Ababaike M, et al. Widely tunable, high-energy, mid-infrared (2.2-4.8 μm) laser based on a multi-grating MgO : PPLN optical parametric oscillator [J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 104: 103121.
- [11] Emanuelli S, Arie A. Temperature-dependent dispersion equations for KTiOPO₄ and KTiOAsO₄ [J]. Applied Optics, 2003, 42(33): 6661-6665.
- [12] Fenimore D L, Schepler K L, Ramabadran U B, et al. Infrared corrected Sellmeier coefficients for potassium titanyl arsenate[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1995, 12(5): 794-796.
- [13] Zhang W Q. General ray-tracing formulas for crystal [J]. Applied Optics, 1992, 31(34): 7328-7331.
- [14] Fève J P, Boulanger B, Pacaud O, et al. Refined Sellmeier equations from phase-matching measurements over the complete transparency range of KTiOAsO₄, RbTiOAsO₄ and CsTiOAsO₄ [C]// Advanced Solid State Lasers, February 13, 2000, Davos Switzerland. Washington, D.C.: OSA, 2000: WC5.
- [15] Zhu Y C, Lan G, Li T, et al. Analysis of temperature influence on 2 μm KTA OPO[J]. Laser Technology, 2007, 31(5): 551-554.
朱雅琛, 兰戈, 李彤, 等. 温度对 2 μm KTA 光参变振荡激光器影响的理论分析[J]. 激光技术, 2007, 31(5): 551-554.
- [16] Zhong K, Mei J L, Liu Y, et al. Widely tunable eye-safe optical parametric oscillator with noncollinear phase-matching in a ring cavity[J]. Optics Express, 2019, 27(8): 10449-10455.

Temperature Tuning Properties of 3.5- μm KTiOAsO₄ Optical Parametric Oscillator

Bian Jintian^{1,2*}, Kong Hui^{1,2}, Xu Haiping^{1,2}, Ye Qing^{1,2}, Sun Xiaoquan^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, College of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China;

² Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract

Objective Lasers operated at 3.5 μm stretch the absorption peaks in the C—H bonds and exhibit high transparency in the atmosphere windows, making the lasers that generate beams with frequencies of 3.5 μm useful in applications using spectroscopy, remote sensing, environmental monitoring, and infrared (IR) countermeasures. Optical parametric oscillation (OPO) is an effective method to radiate mid-IR laser beams that can transform near-IR lasers into mid- and far-IR radiation. The KTiOAsO₄ (KTA) crystal is a member of the KTiOPO₄ (KTP) crystal family and an excellent nonlinear material. The spectroscopy transmittance range of KTA is 0.35–5.30 μm . The absorption loss in KTA crystals in the 3–5 μm bandwidth is much lower than that of the KTP crystal. The KTA crystal has a large nonlinear coefficient, a wide-angle and temperature-matching bandwidth, a high damage threshold, and stable physical and chemical properties. Experiments on noncritical phase matching (NCPM) demonstrated that the KTA optical parametric oscillator (OPO) pumped by a Nd : YAG 1064-nm laser can radiate a 3.5- μm laser beam. Due to the influence of temperature dispersion, the wavelength value of KTA-OPO changes as a function of temperature. The detailed study of KTA-OPO temperature tuning properties presented herein can guide the application of KTA-OPO lasers. To date, there are few theoretical or experimental studies concerning the temperature tuning performance of KTA-OPO.

Methods Temperature tuning properties of KTA-OPO are studied theoretically and experimentally. Based on the normal temperature dispersion equation and the temperature dispersion equation of the KTP crystal, the temperature tuning properties of KTA-OPO at different cutting angles (θ) are calculated. The wavelength of idle light (λ_i) at $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ and the temperature tuning slope ($\Delta\lambda_i/\Delta T$) of KTA-OPO at different cutting angles are calculated with an accuracy of 1° when the wavelength of the pump laser is set at 1064 nm. An experimental study using a 3.5- μm NCPM KTA-OPO laser pumped by a Nd : YAG 1064 nm laser is conducted. The pump source is an SL800 series pulsed Nd : YAG laser with a pulse width of 13 ns, a spot diameter of 8 mm, and a repetition rate of 1 Hz. A small hole is placed behind the laser for dimming, and the spot diameter is compressed to 4 mm using a telescope system to increase the energy density of the pump laser. The temperature of the KTA crystal is controlled in a temperature-controlled furnace with an accuracy of $0.1\text{ }^\circ\text{C}$. The wavelengths of the KTA-OPO idlers at 30, 80, 130 and 180 $^\circ\text{C}$ are measured using an Omni-300 λ spectrometer (Zolix Instruments Co., Ltd) with an accuracy of 1 nm. At the back end of the grating spectrometer, a DEC-M204-InSb detector and a ZAMP amplifier (Zolix Instruments Co., Ltd) are used to detect and amplified the laser signal at the specified transmission wavelength. A DSOX3054T oscilloscope is used to display and measure the signal amplitude from the ZAMP amplifier. The value of the maximum wavelength of the laser signal is set equal to the peak wavelength of the output idler by the grating spectrometer.

Results and Discussions The temperature tuning properties of KTA at different θ angles and the OPO pumped by a 1064-nm laser are studied (**Fig. 1**). Comparison of the laser wavelength and $\Delta\lambda_i/\Delta T$ of the idler at different θ angles revealed that the wavelength of the idler increased monotonically as the value of θ increased, while $\Delta\lambda_i/\Delta T$ decreased monotonically (**Fig. 2**). When the temperature is 30, 80, 130, and 180 $^\circ\text{C}$, the measured values of λ_i are 3463, 3466, 3469, and 3474 nm, respectively, and $\Delta\lambda_i/\Delta T$ is $0.073\text{ nm}/^\circ\text{C}$. The experimental results show that the wavelength of the output idler of KTA-OPO ($\theta = 90^\circ$ and $\phi = 0^\circ$) is less affected by changes in temperature under conditions of type II phase matching, which confirms the theoretical conclusions (**Fig. 4**). The results demonstrate that the temperature dispersion equation (**Table 1**) can be extended from near-IR to mid-IR band spectroscopy.

Conclusions The laser wavelength value of KTA-OPO is relatively stable at different temperatures. In type I and II

phase matching, with the increase of θ , the idler wavelength value increased monotonically, but $\Delta\lambda_i/\Delta T$ decreased monotonically and ranged from 0.0774 to 1.4968 nm/°C. The $\Delta\lambda_i/\Delta T$ value of the type I phase matching KTA-OPO is generally larger than the $\Delta\lambda_i/\Delta T$ value of the type II phase match. Among all phase matching points for angle θ , the temperature tuning range is smallest when $\theta = 90^\circ$ under type II phase matching, and the theoretical value of $\Delta\lambda_i/\Delta T$ is 0.0774 nm/°C. The experimental results are consistent with the theoretical calculations. Both theoretical and experimental studies show that the wavelength of the mid-IR laser beam of the NCPM KTA-OPO is less affected by temperature. This results of this study demonstrate the potential application of KTA-OPO pumped by a 1064-nm laser.

Key words lasers; 3.5 μm laser; optical parametric oscillator; KTiOAsO_4 crystal; temperature tuning

OCIS codes 140.3600; 190.4970; 230.4910; 300.6360