

# 改性 KTP 晶体主折射率及主折射率 温度系数的测量\*

张德颖\* 刘文 陈文志 张国芳 张戈 林文雄 沈鸿元  
(中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002)

**摘 要** 报道了用自准直法在  $0.5398\ \mu\text{m}$ 、 $0.6328\ \mu\text{m}$ 、 $1.0795\ \mu\text{m}$  和  $1.3414\ \mu\text{m}$  激光波长上测量了摩尔比为 0.075 的  $\text{Nb} \cdot \text{KTiOPO}_4$  晶体的主折射率及其温度系数, 得到了该晶体的塞耳迈耶尔 (Sellmeier) 方程, 用此结果计算了该晶体对  $1.0795\ \mu\text{m}$   $\text{Nd} \cdot \text{YAlO}_3$  激光倍频的  $\pi$  类最佳相位匹配角, 计算结果与实验结果相当符合。

**关键词**  $\text{Nb} \cdot \text{KTiOPO}_4$  晶体, 折射率, 温度系数。

$\text{KTiOPO}_4$  (KTP) 晶体是性能优良的并已成为中小功率倍频器件中首选的一种非线性晶体, 但是它的  $\pi$  类相位匹配的截止波长为  $994\ \text{nm}^{[1]}$ , 这限制了它在兰紫色相干辐射的应用。另外对于常用的  $1064\ \text{nm}$   $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$  激光的  $\pi$  类相位匹配角为  $23.1^\circ$ <sup>[2]</sup>, 由于基波和谐波的离散效应, 无法通过增加晶体的通光长度来提高转换效率。文献[3]报道了在 KTP 晶体中添加 Nb 能有效地使  $\pi$  类相位匹配的截止波长蓝移, 掺入摩尔比为 0.122 Nb 的 KTP 晶体截止波长已蓝移到  $892\ \text{nm}$ 。作者自 1987 年开始研究 KTP 晶体的光学和非线性光学性能<sup>[4-8]</sup>, 1992 年开始着手 KTP 晶体改性的研究工作, 研究了掺 Nb 对 KTP 晶体生长习性、晶体线性、非线性光学性能的影响。本文报道了用融盐顶籽晶法生长的原料中含摩尔比为 0.075 Nb 的 KTP 晶体(下文所指浓度均同此)的折射率和折射率温度系数的测量结果。

## 1 测量方法

用自准直法测量改性 KTP 晶体的主折射率, 由于该晶体属正交晶系, 空间群  $\text{Pna}2_1$ , 为了测定该晶体的三个主折射率, 必须加工一对直角边沿不同主轴的直角棱镜。用以加工直角棱镜的改性 KTP 晶体的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的尺寸分别为  $5\ \text{mm}$ 、 $25\ \text{mm}$  和  $55\ \text{mm}$ 。 $\pi$  号直角棱镜的直角边沿  $y$  ( $7.06\ \text{mm}$ ) 和  $z$  ( $3.74\ \text{mm}$ ) 方向,  $\pi$  号直角棱镜的直角边沿  $z$  ( $5.70\ \text{mm}$ ) 和  $y$  ( $3.20\ \text{mm}$ ) 方向, 两个棱镜直角边与结晶的  $b(z)$  和  $c(y)$  轴的差小于  $8'$ , 它们的宽度沿  $x$  方向分别为  $4.20\ \text{mm}$  和  $4.00\ \text{mm}$ , 如图 1 所示。二个棱镜的  $b$  面、 $c$  面和斜面抛光, 平面度优于  $\lambda/4$ ,

\* 福建省自然科学基金资助。

\* 现通讯地址: 福州大学电子科学和应用物理系, 福州 350002。

收稿日期: 1998-02-16; 收到修改稿日期: 1998-04-27

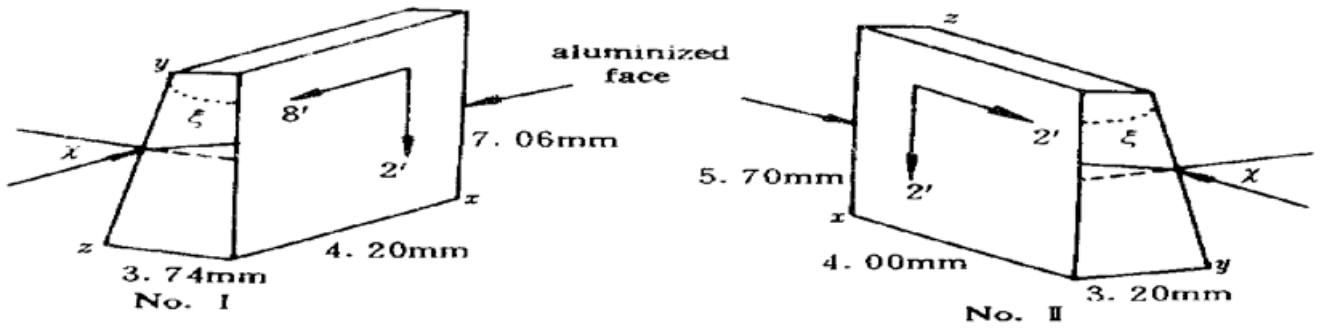


Fig. 1 The Littrow prisms used to measure the principal refractive indices and their thermal coefficients

在  $b$  和  $c$  面真空蒸镀铝膜。单色平行光以最小偏向角  $\chi$  射向利特罗(Littrow)棱镜的斜面, 折入棱镜并在镀铝面反射后即以原光路返回。此时

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \xi} \tag{1}$$

式中  $n$  为晶体某一主折射率,  $\xi$  为利特罗棱镜的顶角。对于入射的单色光可从  $\bar{\text{I}}$  号棱镜对  $n_x$  和  $n_y$  得到二个自准直位置, 同样从  $\bar{\text{I}}$  号棱镜对  $n_x$  和  $n_z$  也可得到二个自准直位置, 从而从(1)式得到三个主折射率的值。二个棱镜得到的公共  $n_x$  的一致性可作为衡量测量结果可靠性的依据。

测量装置由单色光源(0.6328  $\mu\text{m}$  He-Ne 激光、高稳定 1.0795  $\mu\text{m}$  和 1.3414  $\mu\text{m}$  TEM<sub>00</sub> 模 Nd:YAlO<sub>3</sub> 连续激光和 1.0795  $\mu\text{m}$  倍频的 0.5398  $\mu\text{m}$  激光)、32 J 测角仪(0.5") 和接收系统(接收屏或变象管)组成, 待测样品放在自制的恒温炉中, 并将炉子放在测角仪旋转平台的中央, 炉子温度用 DWT-702 型精密温度自动控制仪探温, 探温精度为  $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

## 2 结 果

采用上述方法测量了 Nb:KTP 晶体室温下的主折射率, 结果如表 1 所列。

Table 1. The principal refractive indices of Nd:KTP crystal at room temperature

wavelength / $\mu\text{m}$	No. $\bar{\text{I}}$ prism		No. $\bar{\text{II}}$ prism	
	$n_x$	$n_y$	$n_x$	$n_z$
0.5398	1.7791	1.7918	1.7791	1.9024
0.6328	1.7640	1.7751	1.7640	1.8790
1.0795	1.7390	1.7479	1.7388	1.8409
1.3414	1.7326	1.7412	1.7326	1.8318

由表 1 中四个波长下折射率的测量结果计算出 Sellmeier's 方程的色散系数, 得到该晶体的塞耳迈耶尔方程为

$$\left. \begin{aligned} n_x^2 &= 3.0060 + \frac{0.038424}{\lambda^2 - 0.056149} - 0.014512\lambda^2 \\ n_y^2 &= 3.0351 + \frac{0.041414}{\lambda^2 - 0.061208} - 0.015125\lambda^2 \\ n_z^2 &= 3.3575 + \frac{0.061421}{\lambda^2 - 0.061847} - 0.020850\lambda^2 \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

式中波长单位为  $\mu\text{m}$ 。表 2 给出了不同温度下 Nd:KTP 的主折射率值, 从表中的值得到了四个波长下折射率的温度系数, 这些值在表 3 中给出。

Table 2. The principal refractive indices of Nd·KTP crystal at different temperature

wavelength / $\mu\text{m}$	temperature / $^{\circ}\text{C}$	No. I prism		No. II prism	
		$n_x$	$n_y$	$n_x$	$n_z$
0.5398	46.1	1.7794	1.7924	1.7794	1.9033
	75.5	1.7799	1.7932	1.7798	1.9047
	111.2	1.7804	1.7942	1.7803	1.9063
	143.0	1.7808	1.7949	1.7808	1.9080
0.6328	46.1	1.7646	1.7760	1.7645	1.8799
	75.7	1.7652	1.7769	1.7650	1.8811
	111.2	1.7655	1.7774	1.7655	1.8823
	143.0	1.7659	1.7781	1.7658	1.8838
1.0795	46.1	1.7391	1.7481	1.7391	1.8416
	75.5	1.7394	1.7486	1.7394	1.8425
	111.2	1.7398	1.7492	1.7400	1.8436
	143.0	1.7401	1.7498	1.7401	1.8446
1.3414	46.1	1.7331	1.7417	1.7330	1.8328
	75.5	1.7335	1.7422	1.7333	1.8338
	111.2	1.7338	1.7428	1.7337	1.8348
	143.0	1.7341	1.7434	1.7340	1.8361

Table 3. The thermal refractive index coefficients of Nd·KTP crystal for four wavelengths/  
( $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

wavelength/ $\mu\text{m}$	0.5398	0.6328	1.0795	1.3414
$dn_x/dt$	1.45	1.35	1.01	1.04
$\Delta n_y/dt$	2.57	2.22	1.75	1.75
$\delta n_z/dt$	4.86	4.03	3.09	3.43

### 3 讨 论

作者曾用自准直法测量了双轴晶体 Nd·YAlO<sub>3</sub><sup>[9]</sup>、KTiOPO<sub>4</sub><sup>[4]</sup>、Mg·LiNbO<sub>3</sub><sup>[10]</sup>、Mg·Ti·LiNbO<sub>3</sub><sup>[11]</sup>等单轴晶体的折射率和折射率温度系数,并分析了影响测量精度的诸因素,表明这种方法的测量精度可控制在 $\pm 1.5 \times 10^{-4}$ 以内。从本文已提到 I 号和 II 号棱镜均能测得  $n_x$ ,二个棱镜测得的  $n_x$  的一致性可作为衡量测量结果可靠性的依据。从表 1 和表 2 看到,二个棱镜测得的  $n_x$  的差异最大为  $2 \times 10^{-4}$ ,落在测量精度范围内。

为了进一步检验测量结果的可靠性,测量了 Nb·KTP 晶体对 1.0795  $\mu\text{m}$  Nd·YAlO<sub>3</sub> CW 激光进行倍频时的最佳相位匹配角,将晶体放在五轴旋转台上,晶体的  $y$  轴与旋转台转轴重合,输出功率为 10 W 的 1.0795  $\mu\text{m}$  Nd·YAlO<sub>3</sub> CW 激光经焦距 8.5 cm 的透镜聚焦于 Nb·KTP 晶体上,绕旋转台转动,使 1.0795  $\mu\text{m}$  激光在晶体的  $xz$  平面围绕晶体的  $y$  轴左右转动,当激光与  $x$  轴成  $\pm(90 - \theta_m)$  位置时,0.5398  $\mu\text{m}$  激光输出最大。测定二次绿光输出最强时转台的位置,即得到该晶体对 1.0795  $\mu\text{m}$  激光最佳相位匹配角,实验测量结果  $\theta_m = 77.6^{\circ}$ ,  $\phi_m = 0^{\circ}$ 。

另一方面,根据表 1 中给出的折射率的测量值和双轴晶体相位匹配角的计算方法<sup>[12]</sup>,在 IBM 微机上计算 Nb·KTP 晶体对 1.0795  $\mu\text{m}$  激光的最佳相位匹配角,计算结果为  $\theta_m = 77.5^{\circ}$ ,  $\phi_m = 0^{\circ}$ ,它与实验测量结果仅差  $0.1^{\circ}$ 。这个结果表明本文测得的折射率值的确是可靠

的。在纯 KTP 晶体中, 对 1.0795 mm 激光的最佳相位匹配角是  $\theta_m = 86.7^\circ$ ,  $\phi_m = 0^\circ$ 。由此可见掺 Nb 引起了 KTP 晶体对该波长最佳相位匹配角的显著变化。

### 参 考 文 献

- [1] Risk W P, Payne R N, Lenth W. Noncritically phase-matched frequency doubling using 994 nm dye and diode laser radiation in  $\text{KTiOPO}_4$ . *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(12) : 1179~ 1181
- [2] Zusmteg F C, Bieslein J D, Gier T.  $\text{K}_x\text{Rb}_{1-x}\text{TiOPO}_4$ : A new nonlinear optical material. *J. Appl. Phys.*, 1975, **47**(11) : 4980~ 4985
- [3] Cheng L T, Cheng L K, Harlow R L *et al.*. Blue light generation using bulk single crystals of niobium-doped  $\text{KTiOPO}_4$ . *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(2) : 155~ 157
- [4] 曾政东, 沈鸿元, 徐浩等. KTP 晶体折射率和折射率温度系数的测量. *人工晶体*, 1987, **16**(3) : 274~ 277
- [5] Liao H, Shen H Y, Zeng Z D *et al.*. Accurate values of the index of refraction and optimum phase match parameters in a flux grown  $\text{KTiOPO}_4$  crystal. *Opt. and Laser Technol.*, 1988, **20**(2) : 103~ 104
- [6] Shen H Y, Zhou Y P, Lin W X *et al.*. 0.5981 sum frequency mixing in a  $\text{KTiOPO}_4$  crystal. *Chinese Physics Letters.*, 1991, **8**(4) : 215~ 217
- [7] Lin W X, Shen H Y, Zhou Y P *et al.*. Tripling the harmonic generation of 1.3414  $\mu\text{m}$  Nd:YAlO<sub>3</sub> laser in  $\text{LiIO}_3$  and KTP crystals to get 447.1 nm blue coherent radiation. *Opt. Commun.*, 1991, **82**(3/4) : 333~ 336
- [8] Shen H Y, Zhou Y P, Lin W X *et al.*. Second harmonic generation and sum frequency mixing of dual wavelength Nd:YAlO<sub>3</sub> laser in flux grown  $\text{KTiOPO}_4$  crystal. *IEEE. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(1) : 48~ 51
- [9] Zeng Z D, Shen H Y, Huang M L *et al.*. Measurement of the refractive indices and thermal refractive index coefficients of Nd:YAP crystal. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(9) : 1281~ 1286
- [10] Shen H Y, Xu H, Zeng Z D *et al.*. Measurement of refractive indices and thermal refractive index coefficients of  $\text{LiNbO}_3$  crystal doped with 5 mol% MgO. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(31) : 6695~ 6697
- [11] Zeng Z D, Shen H Y, Huang C H *et al.*. Measurement of the refractive indices and thermal refractive index coefficients of the Ti:Mg:LiNbO<sub>3</sub> crystal. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1993, **10**(3) : 551~ 553
- [12] Yao J Q, Fahlen T S. Calculation of optimum phase match parameters for the biaxial crystal  $\text{KTiOPO}_4$ . *J. Appl. Phys.*, 1984, **56**(1) : 65~ 68

## Measurement of Principal Refractive Indices and Thermal Refractive Index Coefficients of Improved KTP Crystal

Zhang Deying    Liu Wen    Chen Wenzhi    Zhang Guofang  
Zhang Ge    Lin Wenxiong    Shen Hongyuan

(Fujian Institute of Research on the Structure of Mater, The Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002)

(Received 16 February 1998; revised 27 April 1998)

**Abstract** The principal refractive indices and the thermal refractive index coefficients of 0.075 mol fraction Nb:K<sub>2</sub>TiOPO<sub>4</sub> crystal have been measured by the autocollimation method at wavelengths of 0.5398, 0.6328, 1.0795 and 1.3414  $\mu\text{m}$ . The sellmeier's equations were obtained and used to calculate the type II optimum phase matching angle, the calculated results agree well with the experimental results.

**Key words** Nb:K<sub>2</sub>TiOPO<sub>4</sub> crystal, refractive index, thermal coefficient.