

## 7.5 mol-% Nb: KTP 晶体折射率 温度系数的表达式

沈 磊

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

刘 文

(中国科学院福建物质结构研究所 福州 350002)

**提要** 基于不同温度下主折射率的测量结果,报道了 7.5mol-% Nb: KTP 晶体作为波长函数的折射率温度系数的表达式.利用该式可以计算 539.75~1079.5nm 波长范围内 7.5mol-% Nb: KTP 晶体的折射率温度系数.计算结果与测量结果具有较好的一致性。

**关键词** Nb: KTP 晶体, 折射率, 折射率温度系数

在 KTP 晶体中掺入 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 可以使纯 KTP 晶体二类相位匹配的截止波长 994 nm 蓝移,从而开拓了这种晶体在重要的蓝色激光领域的应用<sup>[1]</sup>;另一方面,从添加适量 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的原料中生长出来的 Nb: KTP 晶体能对波长为 1064 nm 的 Nd: YAG 激光实现非临界 I I 类相位匹配的倍频<sup>[2]</sup>。为提高波长为 1064 nm 的 Nd: YAG 激光的倍频效率提供了一种有效的新途径。为了研究这种晶体的性能和拓宽它的应用,本文基于含 7.5mol-% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的原料中生长的 Nb: KTP 晶体(文中的该晶体为 7.5mol-% Nb: KTP 晶体)不同温度下主折射率的测量结果建立了作为波长函数的折射率温度系数的表达式。用这个表达式可以方便地计算 539.75~1079.5 nm 波长范围内该晶体的折射率温度系数,得到的计算结果与测量结果具有较好的一致性。

### 1 计 算

文献[3]报道了 319.25~416.15 K 温度范围内 539.75 nm, 632.8 nm 和 1079.5 nm 诸谱线下 7.5 mol-% Nb: KTP 晶体主折射率  $N_a$ ,  $N_b$  和  $N_c$  的测量结果,测量精度为  $\pm 1.5 \times 10^{-4}$ 。测量值在表 1 中给出。利用表 1 的测量值,通过单项 Sellmeier 方程

$$N_i^2(\lambda, T) = 1 + \frac{A_i(T) \lambda^2}{\lambda^2 - B_i(T)}, \quad i = a, b, c \quad (1)$$

可以计算出 Sellmeier 系数  $A_i(T)$  和  $B_i(T)$ 。这些系数也在表 1 中给出。

与温度有关的 Sellmeier 系数通常有以下形式<sup>[4]</sup>

$$X(T) = aT + b \quad (2)$$

$$X(T) = cT^2 + d \quad (3)$$

式中  $X(T)$  为 Sellmeier 系数,  $T$  为开氏温度,  $a, b$  为常数。

表 1 不同温度下折射率和 Sellmeier 系数的测量值

Table 1 The measured index of refractive indices and Sellmeier coefficients at different temperatures

Indices	$T / K$	Wavelength 539.75 nm	Wavelength 632.8 nm	Wavelength 1079.5 nm	$A_i(T)$	$B_i(T) / \mu\text{m}^2$
$N_a$	319.25	1.77942	1.76455	1.73912	1.98228	0.0248228
	348.65	1.77984	1.76505	1.73942	1.98362	0.0248579
	384.35	1.78036	1.76550	1.73985	1.98489	0.0249053
	416.15	1.78079	1.76584	1.74010	1.98551	0.0250054
$N_b$	319.25	1.79243	1.77596	1.74811	2.00926	0.0268589
	348.65	1.79319	1.77686	1.74862	2.01156	0.0269381
	384.35	1.79416	1.77742	1.74923	2.01244	0.0271738
	416.15	1.79493	1.77810	1.74980	2.01418	0.0272715
$N_c$	319.25	1.90332	1.87985	1.84155	2.32323	0.0332721
	348.65	1.90477	1.88105	1.84248	2.32595	0.0335035
	384.35	1.90626	1.88253	1.84357	2.33001	0.0336407
	416.15	1.90800	1.88381	1.84460	2.33247	0.0339806

对于表 1 中所列的 Sellmeier 系数, 分别利用最小二乘法对公式(2)和(3)进行数据拟合。根据拟合过程中得到的相关系数的结果发现表 1 中所列的 Sellmeier 系数与(2)式所示的 Sellmeier 系数与温度的线性关系非常吻合。对于公式(2), 拟合的相关系数均大于 0.97; 而对于公式(3), 则均小于 0.90。相关系数的结果表明了假设 Sellmeier 系数与温度成线性关系是合理的。即有

$$\begin{cases} A_i(T) = a_i T + b_i \\ B_i(T) = c_i T + d_i \end{cases} \quad i = a, b, c \quad (4)$$

再用最小二乘法通过(4)式对表 1 中的  $A_i(T)$  和  $B_i(T)$  进行拟合, 得到  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  和  $d_i$  的值, 结果列于表 2。将得到的数据代入(4)式后, 利用(4)式得到相应的温度和波长的折射率。它们与表 1 给出的测量值的相对偏差小于  $1.95 \times 10^{-4}$ , 这进一步说明了 Sellmeier 系数与温度成线性关系的假设对这种晶体是合理的。

表 2 依赖于温度的 Sellmeier 系数中的常数值  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$ Table 2 The constants  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  and  $d_i$  in temperature-dependent Sellmeier coefficients

Indices	$a_i \times 10^5 / K^{-1}$	$b_i$	$c_i \times 10^6 / \mu\text{m}^2 / K$	$d_i / \mu\text{m}^2$
$N_a$	3.35111	1.97177	1.82471	0.0242280
$N_b$	4.74863	1.99443	4.53902	0.0253943
$N_c$	9.30100	2.29390	6.34047	0.0312874

考虑(4)式后, 将(1)式对温度求导数, 可以得到

$$\frac{dn_i(\lambda, T)}{dT} = R_i + \frac{S_i}{\lambda^2} \quad (5)$$

$$R_i = \frac{2 \left[ (1 + A_i) - \frac{B_i}{\lambda^2} \right]^{1/2} \left[ 1 - \frac{B_i}{\lambda^2} \right]^{3/2}}{2 \left[ (1 + A_i) - \frac{B_i}{\lambda^2} \right]^{1/2} \left[ 1 - \frac{B_i}{\lambda^2} \right]^{3/2}} \quad (6)$$

$$S_i = \frac{b_i c_i - a_i d_i}{2 \left[ (1 + A_i) - \frac{B_i}{\lambda^2} \right]^{1/2} \left[ 1 - \frac{B_i}{\lambda^2} \right]^{3/2}}$$

将表 1 中不同温度的  $A_i(T)$  值和表 2 中的  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  和  $d_i$  的值代入(6)式得到不同温度时的  $R_i$  和  $S_i$  值。这些值在表 3 中给出。

表 3 不同温度下  $R_i(T)$  和  $S_i(T)$  的值及其平均值Table 3 The values of  $R_i(T)$  and  $S_i(T)$  at different temperatures and their average values

	$T / K$	$\lambda / \mu\text{m}$	$R_i' / K^{-1}$	$\overline{R_i'} / K^{-1}$	$S_i' / \mu\text{m}^2 \cdot K^{-1}$	$\overline{S_i'} / \mu\text{m}^2 \cdot K^{-1}$
a	319.25	0.53975	1.125105	1.070028	0.9353752	0.8895854
		0.6328	1.079280		0.8972774	
		1.0795	1.005698		0.8361037	
	348.25	0.53975	1.125091	1.069938	0.9353632	0.8895105
		0.6328	1.079200		0.8972108	
		1.0795	1.005522		0.8359575	
	384.35	0.53975	1.125176	1.069914	0.9354342	0.8894914
		0.6328	1.079191		0.8972039	
		1.0795	1.005376		0.8358362	
	416.25	0.53975	1.125757	1.070243	0.9359170	0.8897646
		0.6328	1.079555		0.8975060	
		1.0795	1.005418		0.8358709	
b	319.25	0.53975	1.607221	1.522083	2.655854	2.515167
		0.6328	1.536146		2.538406	
		1.0795	1.422881		2.351240	
	348.25	0.53975	1.607385	1.521990	2.656124	2.515013
		0.6328	1.536086		2.538307	
		1.0795	1.422498		2.350607	
	384.35	0.53975	1.609517	1.523253	2.659647	2.517101
		0.6328	1.537465		2.540586	
		1.0795	1.422778		2.351071	
	416.25	0.53975	1.610023	1.526887	2.660484	2.517382
		0.6328	1.537679		2.540938	
		1.0795	1.422568		2.350723	
c	319.25	0.53975	3.113976	2.910804	3.895187	3.641045
		0.6328	2.942575		3.680785	
		1.0795	2.675862		3.347162	
	348.25	0.53975	3.117234	2.912426	3.899262	3.643073
		0.6328	2.944385		3.683050	
		1.0795	2.675659		3.346908	
	384.35	0.53975	3.117982	2.912293	3.900198	3.642907
		0.6328	2.944350		3.683006	
		1.0795	2.674547		3.345517	
	416.25	0.53975	3.123533	2.912724	3.907141	3.646761
		0.6328	2.947716		3.687216	
		1.0795	2.674874		3.345926	

从表 3 看到不同温度的  $R_i$  和  $S_i$  值与平均值的相对误差小于  $7.5 \times 10^{-4}$ 。因此, 在测量温度范围内近似地认为  $R_i$  和  $S_i$  值与温度变化无关。计算时采用不同温度  $R_i$  和  $S_i$  值的平均值  $\overline{R_i}$  和  $\overline{S_i}$  值, 其值在表 3 中给出。这样(5)式变成

$$dn_i(\lambda, T)/dT = \overline{R_i} + (\overline{S_i}/\lambda^2) \quad (7)$$

## 2 结果和讨论

借助于表 3 中的  $\overline{R_i}$  和  $\overline{S_i}$  值, 从(7)式可以得到不同波长的三个折射率温度系数值。表 4 给

出了 539.75 nm, 632.8 nm 和 1079.5 nm 诸波长折射率温度系数的计算值, 也给出了测量值<sup>[3]</sup>以资比较。结果显示计算值与测量值的偏差普遍较小, 最大的相对偏差小于 7.5%。这一结果表明采用(7)式进行计算具有较高的精度。计算得到的不同波长的折射率温度系数值可用于与其他晶体相比较, 作为不同晶体该性能比较的判据, 并用于 Nb: KTP 晶体相关器件的设计。

表 4 折射率温度系数的理论值和测量值的比较

Table 4 The comparison between calculated and the measured values of thermal refractive index coefficients

	Wavelength 539.75 nm		Wavelength 632.8 nm		Wavelength 1079.5 nm		Wavelength 1341.4 nm	
	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.
$\frac{dN_a}{dT} \times 10^5$	1.38	1.42	1.29	1.30	1.15	1.01	1.12	1.04
$\frac{dN_b}{dT} \times 10^5$	2.53	2.59	2.15	2.13	1.74	1.74	1.66	1.75
$\frac{dN_c}{dT} \times 10^5$	4.48	4.84	3.88	4.08	3.23	3.15	3.12	3.43

为了更进一步验证公式的准确性, 利用公式(7)外推计算波长为 1341.4 nm 时晶体的折射率温度系数的计算值, 将其与实验测量得到的测量值相比较, 最大的相对偏差仅为 9%。这一结果更进一步说明采用(7)式进行计算所得计算值的精度是很高的。

折射率和折射率温度系数是研究晶体物理性质和设计相应器件的重要参数。精确测量不同波长的折射率和折射率温度系数是一件耗费人力的事。测量三个不同波长的折射率, 再由单项 Sellmeier 方程求出 Sellmeier 系数后, 可以由得到的 Sellmeier 方程计算出不同波长的折射率。同样, 利用本文给出的方法也可以在一定精度内计算出不同波长下折射率温度系数的值, 从而大大方便了使用。

### 参 考 文 献

- 1 L. T. Cheng, L. K. Cheng, R. L. Harlow *et al.*. Blue light generation using bulk single crystals of niobium-doped KTiOPO<sub>4</sub>. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(2): 155~ 157
- 2 Liu Wen, Zhang Deying, Chen Wenzhi *et al.*. The study of the SAG phase-matching conditions of the profile-changing crystal. *Acta of Fuzhou University* (福州大学学报), 1998, **26**(4): 97~ 100
- 3 H. Y. Shen, D. Y. Zhang, W. Liu *et al.*. Measurement of refractive indices and thermal refractive index coefficients of 7.5 mol% Nb: KTiOPO<sub>4</sub> crystal. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(6): 987~ 990
- 4 N. P. Barnes, M. S. Piltch. Temperature-dependent Sellmeier coefficient and coherent length for cadmium telluride. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(5): 628

## Expression of the Thermal Refractive Index Coefficients of the 7.5 mol% Nb: KTP Crystal

Shen Lei<sup>1</sup> Liu Wen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

<sup>2</sup>Fujian Institute of Research on Structure of Material, The Chinese Academy of Science, Fuzhou 350002

**Abstract** According to the measured values of the refractive indices of the Nb: KTP crystal at different temperature, the expression of the thermal refractive index coefficients as a function of the wavelength is got. The thermal refractive index coefficients of the Nb: KTP crystal at the wavelength range between 539.75 nm and 1079.5 nm are calculated. The calculated values agree with the measured values well.

**Key words** Nb: KTP crystal, refractive index, thermal refractive index coefficient