

# 高掺镁 $\text{LiNbO}_3$ 晶体折射率温度系数的表示式

徐 浩\* 沈鸿元

(中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002)

**摘 要** 推导了掺 5 mol% MgO 的  $\text{LiNbO}_3$  晶体折射率温度系数的表示式. 利用这些表示式可以计算 293~428 K 温度和 0.5398  $\mu\text{m}$ ~1.3414  $\mu\text{m}$  波长范围内的折射率温度系数, 结果表明: 计算值和实验值的最大相对偏差是 12%, 用具有最大相对偏差的折射率温度系数的计算值, 计算 1.0795  $\mu\text{m}$  波长的非临界相位匹配温度, 其值为 382.4 K, 它与实验值仅差 6 K. 因此, 本文得到的表示式, 对于采用这种晶体, 设计在上述波长范围内的非临界相位匹配倍数频器件是有用的.

**关键词** 高掺镁  $\text{LiNbO}_3$  晶体, 折射率温度系数.

## 1 引 言

折射率温度系数是光学晶体的重要参数, 对于非线性光学晶体, 折射率温度系数是设计非临界相位匹配器件必不可少的参数, 通常文献中仅给出几个特定波长下的折射率温度系数的测量值, 因此无法设计不同波长的非临界相位匹配器件, 作者曾经根据在一定温度范围内, 几个特定波长下测得的 Nd:YAlO<sub>3</sub> 晶体的主折射率, 并借助于单项 Sellmeier 方程, 得到 Nd:YAlO<sub>3</sub> 晶体的折射率温度系数表示式, 利用这个表示式可以计算 0.5398  $\mu\text{m}$ ~1.0795  $\mu\text{m}$  波长范围和 311~455 K 温度区间内 Nd:YAlO<sub>3</sub> 晶体的折射率温度系数, 计算值与测量值的百分偏差小于 5.2%<sup>[3]</sup>, 基于上述方法, 根据高掺镁铌酸锂晶体在 0.53975  $\mu\text{m}$ , 0.6328  $\mu\text{m}$ , 1.0795  $\mu\text{m}$  和 1.3414  $\mu\text{m}$  波长上和 293、348、389、428 K 温度下的主折射率及其温度系数的高精度测量<sup>[1,2]</sup>, 借助于修正的 Sellmeier 方程:

$$n_i^2 = A_i + \frac{B_i}{\lambda^2 - C_i} - D_i \lambda^2 \quad (i = o, e) \quad (1)$$

得到这种晶体折射率温度系数的表示式, 用此表示式可以算出高掺镁  $\text{LiNbO}_3$  晶体在 293~428 K 温度区间 0.53975  $\mu\text{m}$ ~1.3414  $\mu\text{m}$  波长范围内的折射率温度系数的值, 现有的计算值与实验值的最大百分偏差是 12%, 用此最大偏差的计算值计算的非临界相位匹配温度与实验所得的相位匹配温度仅差 6 K, 这一结果说明: 折射率温度系数表示式, 对于掺 5% mol MgO 的  $\text{LiNbO}_3$  晶体, 估算其非临界相位匹配温度及其它非线性应用是适用的.

\* 现在福州大学物理系工作, 福州 350002

收稿日期: 1993年2月3日; 收到修改稿日期: 1993年6月29日

## 2 分析与结果

文献[1,2]给出掺 5 mol% MgO 的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体在 293、348、389、428 K 温度条件下,在 0.53975 μm、0.6328 μm、1.0795 μm、1.3414 μm 波长处的主折射率,及在上述温度条件时方程(1)的参数  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ 、 $D_i$ ,其中主折射率的测量精度为  $\pm 1 \times 10^{-4}$ ,结果分别列于表 1,表 2.

Table 1 Principal refractive indices of LiNbO<sub>3</sub> crystal doped with 5 mol% MgO

		293 K	348 K	389 K	428 K
0.53975 (μm)	$n_o$	2.31197	2.31287	2.31374	2.31423
	$n_e$	2.21937	2.22298	2.22609	2.22924
0.6328 (μm)	$n_o$	2.27924	2.27978	2.28038	2.28083
	$n_e$	2.19164	2.19497	2.19777	2.20032
1.0795 (μm)	$n_o$	2.22512	2.22536	2.22564	2.22570
	$n_e$	2.14543	2.14810	2.15042	2.15269
1.3414 (μm)	$n_o$	2.21256	2.21299	2.21323	2.21343
	$n_e$	2.13494	2.13757	2.13984	2.14197

Table 2 Constants of modified sellmeier' s equations at different temperature

	293 K	348 K	389 K	428 K
$A_o$	4.88810	4.88909	4.88355	4.88164
$B_o(\mu\text{m}^2)$	0.110312	0.108702	0.114031	0.115104
$C_o(\mu\text{m}^2)$	0.0547884	0.0612498	0.0527038	0.0523894
$D_o(\mu\text{m}^{-2})$	0.0312103	0.0301465	0.0280968	0.0268854
$A_e$	4.54302	4.55258	4.56077	4.57071
$B_e(\mu\text{m}^2)$	0.0951117	0.0971915	0.0990084	0.0984224
$C_e(\mu\text{m}^2)$	0.0465648	0.0458041	0.0440980	0.0479860
$D_e(\mu\text{m}^{-2})$	0.0217155	0.0214950	0.0213655	0.0215288

根据 N. P. Barnes, M. S. Pilch 的文章,与温度有关的 Sellmeier 参数通常有以下形式:

$$x(T) = a + bT, \quad (2)$$

$$x(T) = a + bT^2. \quad (3)$$

式中  $x(T)$  或 Sellmeier 方程参数,  $T$  是以 K 为单位的绝对温度,  $a$ ,  $b$  是常数<sup>[4]</sup>. 对于表 2 中所列的 Sellmeier 参数,略去个别偏差较大的点,分别按(2),(3)式用最小二乘法进行拟合,计算其线性回归的相关系数  $r$ ,发现按(2)式拟合时,除个别参数的相关系数是 0.96 外,都在 0.98 以上. 根据(2)式用最小二乘法拟合所得的常数  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $d_i$ 、 $e_i$ ……,计算不同温度时的  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ 、 $D_i$ ,进而计算 MgO : LiNbO<sub>3</sub> 晶体在 293、348、389、428 K 时在 0.53975 μm、0.6328 μm、1.0795 μm、1.3414 μm 波长下的  $n_o$ 、 $n_e$  值,发现它们与测量值之差,除一个点为  $3 \times 10^{-4}$  外,其余的都在  $2 \times 10^{-4}$  之内,且相当多的主折射率值是相符的. 因此,取

$$A_i = a_i + b_i T, \quad B_i = d_i + e_i T, \quad C_i = f_i + g_i T, \quad D_i = h_i + k_i T \quad (i = o, e) \quad (4)$$

拟合所得的  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $d_i$ 、 $e_i$ ……常数列于表 3

Table 3 The constants  $a_i, b_i, \dots$  of sellmeier parameters vs. temperature

	$a_i$	$b_i \times 10^5 \text{K}^{-1}$	$d_i (\mu\text{m}^2)$	$e_i \times 10^5 \mu\text{m}^2 \text{K}^{-1}$	$f_i (\mu\text{m}^2)$	$g_i \times 10^5 \mu\text{m}^2 \text{K}^{-1}$	$h_i (\mu\text{m}^{-2})$	$k_i \times 10^5 \mu\text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$
N <sub>0</sub>	4.90210	-4.77657	0.0997886	3.61091	0.0601448	-1.85160	0.0412151	-3.32793
N <sub>0</sub>	4.48270	20.3199	0.0832197	4.04393	0.0540859	-2.50396	0.0227838	-3.66539

既然  $A_i, B_i, C_i, D_i$  是温度  $T$  的线性函数, 求(1)式对于温度  $T$  的导数得:

$$\frac{dn_i}{dT} = \frac{1}{2\sqrt{A_i + \frac{B_i}{\lambda^2 - C_i} - D_i\lambda^2}} (b_i + \frac{e_i}{\lambda^2 - C_i} + \frac{B_i g_i}{(\lambda^2 - C_i)^2} - k_i \lambda^2)$$

其中  $\lambda$  是波长(取  $\mu\text{m}$  为单位), 对上式用级数展开, 忽略  $\lambda^8$  等高次项, 得折射率温度系数的表示式

$$\frac{dn_i}{dT} = P_i + \frac{Q_i}{\lambda^2} + \frac{R_i}{\lambda^4} + S_i \lambda^2 + U_i \lambda^4 + V_i \lambda^6 + \frac{W_i}{\lambda^6} \quad (5)$$

(5)式中  $P_i, Q_i, R_i, S_i, U_i, W_i$  等参数有下列关系式

$$P_i = \frac{1}{2\sqrt{A_i}} \left[ \left( \frac{1}{2} \frac{D_i}{A_i} + \frac{3}{8} \frac{C_i D_i^2}{A_i^2} \right) e_i + \left( 1 - \frac{3}{4} \frac{B_i D_i}{A_i^2} \right) b_i + \left( \frac{B_i}{2A_i} + \frac{3}{4} \frac{B_i C_i D_i}{A_i^2} - \frac{3}{8} \frac{B_i^2}{A_i^2} k_i \right) + \frac{3}{8} \frac{B_i D_i^2}{A_i^2} g_i \right],$$

$$Q_i = \frac{1}{2\sqrt{A_i}} \left[ \left( 1 + \frac{D_i C_i}{2A_i} + \frac{3}{8} \frac{C_i^2 D_i^2}{A_i^2} - \frac{3}{4} \frac{B_i D_i}{A_i^2} \right) e_i + \left( \frac{B_i C_i}{2A_i} + \frac{3}{4} \frac{B_i D_i C_i^2}{A_i^2} - \frac{3}{8} \frac{B_i^2}{A_i^2} \right) k_i - \left( \frac{3}{4} \frac{B_i D_i C_i}{A_i^2} + \frac{B_i}{2A_i} \right) b_i + \left( \frac{3}{4} \frac{B_i C_i D_i^2}{A_i^2} + \frac{B_i D_i}{2A_i} \right) g_i \right] (\mu\text{m}^2)$$

$$R_i = \frac{1}{2\sqrt{A_i}} \left[ \left( \frac{3}{8} \frac{B_i^2}{A_i^2} - \frac{B_i C_i}{2A_i} - \frac{3}{4} \frac{B_i C_i^2 D_i}{A_i^2} \right) b_i + \left( \frac{C_i^2 D_i}{2A_i} + C_i - \frac{B_i}{2A_i} - \frac{3}{2} \frac{B_i C_i D_i}{A_i^2} \right) e_i + \left( B_i + \frac{B_i C_i D_i}{A_i} + \frac{9}{8} \frac{B_i C_i^2 D_i^2}{A_i^2} - \frac{3}{4} \frac{B_i^2}{A_i^2} D_i \right) g_i + \left( \frac{B_i C_i^2}{2A_i} - \frac{3}{4} \frac{B_i^2 C_i}{A_i^2} \right) k_i \right] (\mu\text{m}^4),$$

$$S_i = \frac{1}{2\sqrt{A_i}} \left[ \frac{D_i}{2A_i} b_i + \left( \frac{3}{4} \frac{B_i D_i}{A_i^2} - 1 \right) k_i + \frac{3}{8} \frac{D_i^2}{A_i^2} e_i \right] (\mu\text{m}^{-2}),$$

$$U_i = \frac{1}{2\sqrt{A_i}} \left[ \frac{3}{8} \frac{D_i^2}{A_i^2} b_i - \frac{D_i}{2A_i} k_i \right] (\mu\text{m}^{-4}),$$

$V_i \lambda^6$  项远小于其它项忽略不计.

$$W_i = \frac{1}{2\sqrt{A_i}} \left[ \left( C_i^2 - \frac{B_i C_i}{A_i} + \frac{3}{8} \frac{B_i^2}{A_i^2} - \frac{9}{4} \frac{B_i C_i^2 D_i}{A_i^2} \right) e_i + \left( 2C_i B_i + \frac{3B_i C_i^2 D_i}{A_i} - \frac{B_i^2 C_i}{2A_i} - \frac{9}{4} \frac{B_i C_i D_i}{A_i^2} \right) g_i + \left( \frac{B_i}{2A_i} C_i^3 + \frac{3}{4} \frac{B_i D_i C_i^5}{A_i} - \frac{9}{8} \frac{B_i^2}{A_i^2} C_i^2 \right) k_i + \left( \frac{3}{4} \frac{B_i^2}{A_i^2} C_i - \frac{3}{4} \frac{B_i C_i^3 D_i}{A_i^2} - \frac{B_i C_i^2}{2A_i} \right) b_i \right] (\mu\text{m}^6).$$

由上述参数关系式计算在不同温度下的  $P_i, Q_i, \dots$  值及在 293~428 K 温度区间的平均值, 列于表 4.

Table 4 The values of  $P_i, Q_i, \dots$  at different temperature and their average values

	293 K	348 K	389 K	428 K	average values
$P_0 \times 10^5$	-1.08584	-1.08644	-1.08689	-1.08732	-1.08662
$Q_0 \times 10^5 (\mu\text{m}^2)$	0.828399	0.828852	0.829191	0.829514	0.828989
$R_0 \times 10^5 (\mu\text{m}^4)$	-0.0103280	-0.0121724	-0.0135481	-0.0148578	-0.0127266
$S_0 \times 10^5 (\mu\text{m}^{-2})$	0.749070	0.749474	0.749776	0.750063	0.749596

	293 K	348 K	389 K	428 K	average values
$U_0 \times 10^5 (\mu\text{m}^{-4})$	2.40547	2.26828	2.16579	2.06813	2.22692
$W_0 \times 10^5 (\mu\text{m}^6)$	-2.91467	-2.99550	-3.05219	-3.10330	-3.01642
$P_s \times 10^5$	4.76815	4.76225	4.75786	4.75370	4.76049
$Q_s \times 10^5 (\mu\text{m}^2)$	0.898690	0.896542	0.894947	0.893436	0.895904
$R_s \times 10^5 (\mu\text{m}^4)$	-0.0229847	-0.0257191	-0.0277498	-0.02967432	-0.0265324
$S_s \times 10^5 (\mu\text{m}^{-2})$	0.973626	0.971092	0.969213	0.967432	0.970341
$U_s \times 10^5 (\mu\text{m}^{-4})$	0.246337	0.242680	0.239977	0.237425	0.241605
$W_s \times 10^5 (\mu\text{m}^6)$	-3.46103	-3.52556	-3.56617	-3.59888	-3.53791

Table 5 The calculated and measured values of thermal refractive index coefficients and deviations

	0.53975 $\mu\text{m}$			0.6328 $\mu\text{m}$			1.0795 $\mu\text{m}$			1.3414 $\mu\text{m}$		
	cal.	exp.	dev(%)	cal.	exp.	dev(%)	cal.	exp.	dev(%)	cal.	exp.	dev(%)
$dn_0/dT \times 10^5$	1.71	1.68	1.8	1.16	1.18	1.7	0.49	0.43	12	0.73	0.65	11
$dn_e/dT \times 10^5$	7.41	7.34	0.9	6.82	6.45	5.4	5.62	5.4	3.9	5.42	5.23	3.5

综观  $P_s$ 、 $Q_s$ ……在各温度时的值, 相差都在  $10^{-8}$  甚至  $10^{-9}$  的数量级, 因而对折射率温度系数的影响至多为  $10^{-7}$ , 所以取  $P_s$ 、 $Q_s$ ……各参数的平均值作为折射率温度系数表示式(5)中相应的常数, 如此由(5)式计算得到 293~428 K 温度区间, 0.53975  $\mu\text{m}$ ~1.3414  $\mu\text{m}$  波长范围的折射率温度系数。

用(5)式计算了 0.53975  $\mu\text{m}$ 、0.6328  $\mu\text{m}$ 、1.0795  $\mu\text{m}$ 、1.3414  $\mu\text{m}$  波长条件下的折射率温度系数, 与实验测量值相比较, 列于表 5, 其中 1.0795  $\mu\text{m}$ 、1.3414  $\mu\text{m}$  的  $n_0$  随温度  $T$  变化最少, 因而折射率温度系数的测量精度较低, 实验测量值与用(5)式计算值的百分偏差达 11%~12%, 而其余的百分偏差都在 5.4% 以内。

为检验折射率温度系数表示式的可靠性和实用性, 本文利用百分偏差最大的 1.0795  $\mu\text{m}$  波长下折射率温度系数的计算值以及表 1 所列这种晶体主折射率的测量值, 通过下式:

$$\Delta T = \frac{n_0(\omega, T_0) - n_e(2\omega, T_0)}{\left(\frac{dn_e}{dT}\right)_{2\omega} - \left(\frac{dn_0}{dT}\right)_\omega} \quad (6)$$

计算这种晶体在 1.0795  $\mu\text{m}$  波长倍频的非临界相位匹配温度。计算时基准温度取  $T_0 = 348$  K, 得到  $\Delta T = 34.4$  K, 非临界相位匹配温度是 382.4 K。实验测得在同一 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体上切下的倍频器的非临界相位匹配温度(在 1.0795  $\mu\text{m}$  波长)是 388 K, 与计算值的差小于 6 K。这一结果表明, (5)式对于设计这种晶体的非临界相位匹配器件是有用的。

### 参 考 文 献

- [1] 徐浩, 曾政东, 林文雄等, 高掺镁铌酸锂晶体的主折射率及其温度系数的测量. 光学学报, 1992, 12(10): 925~928
- [2] 徐浩, 吴瑞芬, 曾政东等, 高掺镁铌酸锂晶体的临界和非临界相位匹配条件. 激光技术, 1992, 16(5): 287~290
- [3] 沈鸿元, 曾政东, 林文雄等, Nd<sup>3+</sup>:YAlO<sub>3</sub> 晶体折射率温度系数的表示式. 光学学报, 1991, 11(9): 825~828
- [4] N. P. Barnes, M. S. Piltch, Temperature-dependent sellmeier coefficients and coherence length for cadmium

- telluride. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(5) : 628~629
- [5] C. D. Boyd, W. L. Bond, H. L. Carter, Refractive index as a function of temperature in LiNbO<sub>3</sub>. *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**(4) : 1941~1943
- [6] M. V. Hobden, J. Warner, The Temperature dependence of the refractive indices of pure lithium niobate. *Phys. Lett.*, 1966, **22**(3) : 243~244
- [7] D. S. Smith, H. D. Riccius, Refractive indices of lithium niobate. *Opt. Commun.*, 1976, **17**(3) : 332~335
- [8] J. E. Midwinter, Lithium niobate : effects of composition on the refractive indices and optical second-harmonic generation. *J. Appl. Phys.*, 1968, **39**(7) : 3033~3039

## Expressions of Thermal Refractive Index Coefficients for LiNbO<sub>3</sub> Crystal Heavily Doped with Magnesium

Xu Hao\*      Shen Hongyuan

(Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Science, Fujian 350002)

(Received 3 February 1993; revised 24 June 1993)

**Abstract** Principal refractive indices and its thermal coefficients of LiNbO<sub>3</sub> crystal doped with 5 mol% MgO were carefully measured at the wavelengths of 0.5397 μm, 0.6328 μm, 1.0795 μm and 1.3414 μm and the temperature of 293 K, 348 K, 389 K and 428 K in the pervious papers<sup>[1]</sup>. On the basis of measured values and modified Sellmeier's equations, the expressions of thermal refractive index coefficients of this kind of crystal are derived in this paper. Using these expressions, the thermal refractive index coefficients in the temperature range of 293~428 K and the wavelength range of 0.5397 μm~1.3414 μm have been calculated. It is shown that the maximum relative deviations between the calculated and experimental values is 12%. Based on the calculated value of thermal refractive index coefficient with maximum relative deviation, the noncritical phase matching temperature for 1.0795 μm is calculated to be 382.4 K, only 6 K difference with the experimental value. The expressions are useful for design of the nonlinear optical device using this kind of crystal adopted noncritical phase matching technology.

**Key words** LiNbO<sub>3</sub> crystal heavily doped with magnesium, thermal refractive index coefficients.

\* Xu Hao is with the Fuzhou University, Fujian 350002