

铌酸锂和钽酸锂的频率温度系数研究

王立福¹, 王志斌^{1,2}, 赵冬娥^{1,2}, 陈友华¹, 张 瑞¹

(1. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要: 铌酸锂(LN)和钽酸锂(LT)具有弹光及电光效应, 可用于压电振子、压电换能器及压电驱动器, 而这些器件受切角对频率温度系数影响大。该文主要研究了一级频率温度系数分别随绕 x 轴和 z 轴旋转切角 θ_1 和 θ_3 的变化, 且画出了各个切型下, 一级频率温度系数随切角变化的曲线图, 从而确定了 LT 晶体的零温度切角和 LN 的近似零温度切角, 对由 LT 和 LN 制成的晶体器件的切角选择具有指导意义。

关键词: 弹光晶体; 频率温度系数; 零温度切角

中图分类号: O799 **文献标识码:** A

Research on Frequency-temperature Coefficient of Lithium Niobate and Lithium Tantalate Frequency Temperature Coefficient

WANG Lifu¹, WANG Zhibin^{1,2}, ZHAO Dong'e^{1,2}, CHEN Youhua¹, ZHANG Rui¹

(1. Center of Engineering and Technology Research, Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Lab. of Instrument Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Due to the elastic-optic and electro-optical effect of lithium niobate and lithium tantalite, they can be applied to piezoelectric vibrator, piezoelectric transducer and piezoelectric drive. These devices are largely influenced by frequency-temperature coefficient changing with shear angle, based on which the variation of the primary frequency-temperature coefficient with around x axis and z axis rotary respectively at cutting angle θ_1 and θ_3 are mainly studied, and the change curve of level 1 frequency-temperature coefficient with the cutting angle are drawn out at each cut. The zero-temperature cutting angle of LT crystal and the approximate zero-temperature cutting angle of LN crystal is then determined, which is of importance in selecting the cutting angle of the crystal device by lithium niobate and lithium tantalate.

Key words: elastic-optic crystal; frequency-temperature coefficient; zero-temperature corner cut

0 引言

铌酸锂(LN)晶体和钽酸锂(LT)在结构和性能上相似, 常称其为具有铌酸锂型结构的晶体, 是集压电、铁电、热释电、非线性、电光、光弹及光折变等性能于一体的多功能材料, 具有良好的热稳定性和化学稳定性, 且易加工, 成本低, 是少数经久不衰、并不断开辟应用新领域的重要功能材料。它们都具有压电性质良好, 机电耦合系数高, 机械 Q 值高和声学传输损耗低的优良特性, 是良好的传声介质的高频换能器^[1]。因此, 它们在表面波滤波器、电光调制、

电光开关^[2-3]、光波导^[4]及其激光器、倍频、高密度信息存储等方面有着广泛的应用前景^[5]。

介于这两种晶体的弹光效应和电光效应, 在作为压电驱动器或压电换能器等器件使用时, 根据所需应力的必须考虑晶体的切割方向性, 除此之外, 切割方向对器件的频率温度的稳定性也有很大影响^[6], 为此本文通过对它们的频率温度系数性与绕轴旋转切角的关系进行研究, 在室温附近, 分别画出了它们的不同振动模式下的一级频率温度系数 α_0 与切角 θ_i 的关系直观图, 并进行了简单的归纳,

收稿日期: 2012-11-13

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项基金资助项目(61127015); 国际科技合作项目基金资助项目(2012DFA10680); 国际科技合作项目基金资助项目(2010 * * *); 山西省国际科技合作项目基金资助项目(2010081038)

作者简介: 王立福(1986-), 男, 山西大同人, 硕士生, 主要从事光弹光晶体方面的研究。E-mail: wlf198886@126.com. 导师: 王志斌(1966-), 男, 山西长治人, 教授, 博士生导师, 主要从事光谱成像技术及遥感遥测方面的研究。E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

并找到了 LT 的零温度切角和 LN 的近似零温度切角。由于在室温附近,切角的变化对材料频率温度系数稳定性的影响很大,所以,本文的结果对这两种晶体在制作压电振子或压电换能器及压电驱动器等压电器件对频率的稳定性要求很高器件的切割角度选取,具有重要的指导意义。

1 理论依据

1.1 晶体结构

LN 和 LT 晶体在结构上都可以看成是氧八面体构成的。相邻的氧八面体具有共同的顶点,构成 ABO_3 晶体^[2]。氧八面体出现的正离子顺序为 Nb(或 Ta)、空位、Li、Nb(或 Ta)、空位、……,居里点以下时,这两种晶体铁电相结构属 $3m$ 点群^[1,5],而在居里点以上顺电相结构属 $\bar{3}m$ 点群。这两种晶体都属于三方晶系^[7],都是各向异性的负单光轴晶体。

1.2 频率温度系数 τ_f

当温度变化时,铌酸锂晶体除产生热胀冷缩外,它的弹性性质、介电性质、压电性质和密度等也会发生变化。所以频率温度特性主要与晶体的线膨胀、弹性和密度有关。

频率温度特性方程^[4]的一般表达式^[8]为

$$f = f_0 [1 + a_0(T - T_0) + b_0(T - T_0)^2 + c_0(T - T_0)^3 + \dots] \quad (1)$$

式中: T_0 为参考温度; T 为任意温度; f_0 为参考温度 T_0 下的谐振频率, f 为任意温度时的谐振频率; a_0, b_0, c_0 分别为 T_0 时的一级、二级和三级频率温度系数。用微分形式表示,任意温度 T 时频率温度系数为

$$\tau_f = \frac{1}{f_0} \frac{\partial f}{\partial T} \quad (2)$$

式中: $\frac{1}{f_0} \frac{\partial f}{\partial T}$ 为相对频率随温度的变化率。

$$a_0 = \frac{1}{f_0} \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_{T_0} \quad (3)$$

$$b_0 = \frac{1}{2f_0} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial T^2} \right)_{T_0} \quad (4)$$

$$c_0 = \frac{1}{6f_0} \left(\frac{\partial^3 f}{\partial T^3} \right)_{T_0} \quad (5)$$

把式(1)代入式(2)中可得

$$\tau_f = a_0 + 2b_0(T - T_0) + 3c_0(T - T_0)^2 \quad (6)$$

由式(6)可看出,压电器件的 τ_f 与 a_0, b_0 及 c_0 有关。 τ_f 是温度的函数,因此不能笼统地说“频率温度系数等于多少”,而应明确指出“某一温度附近

时的频率温度系数等于多少”。压电器件的 τ_f 的大小反映谐振器的 τ_f 稳定性。 τ_f 的绝对值越大,表明在该温度附近频率温度的变化越大,温度稳定性差^[4]; τ_f 的绝对值越小,表明在该温度附近频率温度的变化越小,温度稳定性好。当 $T = T_0$ 时, $\tau_f = a_0$,表明只有在 $a_0 = 0$ 的条件下,才存在零温度系数。从而 $a_0 = 0$ 的切型称为零温度系数切型^[9]。为获得温度稳定性好的切型,首先应找到 $a_0 = 0$ 的切型,由于晶体切型的不同,其频率温度特性也不同。

2 重要公式推导及结果曲线

2.1 $(xyt)\theta_1$ 切型长度伸缩振动模式

LN 和 LT 晶片在作长度伸缩振动时(见图 1(a)),产生伸长和缩短的交替变化,片内质点的位移方向和波的传播方向平行,形成纵波,所以又叫纵模振动。由于长度伸缩振动的晶片可很长,所以它适用于中低频范围。

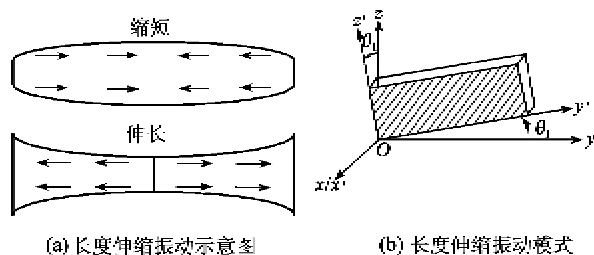


图1 长度伸缩振动示意图及其模式

由图 1(b)可看出,晶片的长度沿 y' 轴方向,厚度沿 x' 轴方向。电极面与 x' 轴垂直,所以只需考虑沿厚度方向的电场 E'_1 的作用。当晶片长度远大于宽度和厚度时,则可认为晶片内只存在沿长度方向的应力 T'_2 的作用,即该切型下的薄片是在电场 E'_1 和应力 T'_2 的作用下,通过压电常数 d'_{12} 和弹性柔顺常数 s'_{22} 产生沿 y' 方向长度伸缩振动模式。而此时的频率方程为

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{1}{\rho s'_{22}}} \quad (7)$$

式中: l 为晶片长度; ρ 为 LN 晶体密度。 s'_{22} 为^[3,10]

$$s'_{22} = s_{11} \cos^4 \theta_1 + s_{33} \sin^4 \theta_1 + (s_{44} + 2s_{13}) \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_1 - 2s_{14} \cos^3 \theta_1 \sin \theta_1 \quad (8)$$

将式(7)代入式(3)可得 $(xyt)\theta_1$ 切型的长度伸缩振动模式的 T_0 下的 a_0 为

$$a_0 = \frac{1}{f_0} \left(\frac{\partial}{\partial T} \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{1}{\rho s'_{22}}} \right)_{T_0} = \left(-\frac{1}{2} \frac{1}{s'_{22}} \frac{\partial s'_{22}}{\partial T} - \frac{1}{2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} - \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial T} \right)_{T_0} =$$

$$-\frac{1}{2}T_{s_{22}}^{(1)}-\frac{1}{2}T_{\rho}^{(1)}-\alpha_i^{(1)} \quad (9)$$

式中: $T_{s_{22}}^{(1)} = \left(\frac{1}{s_{22}} \frac{\partial s'_{22}}{\partial T} \right)_{T_0}$ 为一级弹性温度系数;
 $T_{\rho}^{(1)} = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{T_0}$ 为一级密度温度系数; $\alpha_i^{(1)} = \left(\frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial T} \right)_{T_0}$ 为一级线膨胀系数。 $T_{s_{22}}^{(1)}$ 可通过式(8)求得,即

$$T_{s_{22}}^{(1)} = \frac{1}{s'_{22}} [s_{11} T_{s_{11}}^{(1)} \cos^4 \theta_1 + s_{33} s_{11} T_{s_{33}}^{(1)} \sin^4 \theta_1 + (s_{44} T_{s_{44}}^{(1)} + 2s_{13} T_{s_{13}}^{(1)}) \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_1 - 2s_{14} T_{s_{14}}^{(1)} \cos^3 \theta_1 \sin \theta_1] \quad (10)$$

而 $\alpha_i^{(1)}$ 和 $T_{\rho}^{(1)}$ 可通过下式求得:

$$\alpha_i^{(1)} = \alpha_s^{(1)} + (\alpha_l^{(1)} - \alpha_s^{(1)}) \sin(90^\circ - \theta_1) = \alpha_s^{(1)} + (\alpha_l^{(1)} - \alpha_s^{(1)}) \cos^2 \theta_1 \quad (11)$$

$$T_{\rho}^{(1)} = -(2\alpha_l^{(1)} + \alpha_s^{(1)}) \quad (12)$$

式中 $\alpha_i^{(1)}$ 为一级线膨胀系数^[9], $i=1,2,3$ 时分别代表晶体沿 x, y, z 轴的线膨胀系数,这里2种晶体的线膨胀系数在文献[11]中给出了参考值。

将式(10)、(11)、(12)代入式(9)可得 $(xyt)\theta_1$ 切型模式的 a_0 与切角 θ_1 的关系式为

$$a_0 = -\frac{1}{2s'_{22}} [s_{11} T_{s_{11}}^{(1)} \cos^4 \theta_1 + s_{33} T_{s_{33}}^{(1)} \sin^4 \theta_1 + (s_{44} T_{s_{44}}^{(1)} + 2s_{13} T_{s_{13}}^{(1)}) \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_1 - 2s_{14} T_{s_{14}}^{(1)} \cos^3 \theta_1 \sin \theta_1] - \frac{1}{2} T_{\rho}^{(1)} - \alpha_i^{(1)} - (\alpha_l^{(1)} - \alpha_s^{(1)}) \cos^2 \theta_1 \quad (13)$$

表1~4为 $T_0=25^\circ\text{C}$ 时弹性柔顺系数、弹性刚度系数、一级弹性柔顺温度系数及一级弹性刚度温度系数的数值^[10-13]。

表1 弹性柔顺系数 $s_{ij} (\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N})$

s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}	s_{33}	s_{44}	s_{66}	材料
5.78	-1.01	-1.47	-1.02	5.02	17.0	13.6	LN
4.87	0.58	-1.25	0.64	4.36	10.8	10.9	LT

表2 弹性刚度系数 $c_{ij} (\times 10^{-11} \text{N}/\text{m}^2)$

c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{33}	c_{44}	c_{66}	材料
2.03	0.53	0.75	0.09	2.45	0.60	0.75	LN
2.33	0.47	0.80	-0.11	2.75	0.94	0.93	LT

表3 一级弹性柔顺温度系数 $T_{s_{ij}}^{(1)} (\times 10^{-4}/^\circ\text{C})$

s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}	s_{33}	s_{44}	s_{66}	材料
1.66	0.28	1.94	1.33	1.60	2.05	1.43	LN
1.11	-3.83	2.14	7.74	1.24	0.60	0.64	LT

表4 一级弹性刚度温度系数 $T_{c_{ij}}^{(1)} (\times 10^{-4}/^\circ\text{C})$

c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{33}	c_{44}	c_{66}	材料
-1.74	-2.52	-1.59	-2.14	-1.53	-2.04	-1.43	LN
-1.03	-3.41	-0.50	6.67	-0.96	-0.43	-0.47	LT

应当指出^[9]: $(xyt)\theta_1$ 振动模式下,有与其他一些振动模式的耦合,由于长度伸缩振动模式要求频率较低,所以,一般情况下,其他振动模式对其影响很小。

在不改变晶片形状的情况下,只改变晶片随坐标轴的绕向,即可得晶片绕 y 轴和绕 z 轴旋转的切型 $(xyl)\theta_2$ 和 $(xyw)\theta_3$,对于各向异性的晶体,晶片的特征频率方程主要取决于它的形状,切割方向只影响特征频率的大小,所以,这2个切型晶片的频率方程和频率温度系数方程与 $(xyt)\theta_1$ 切型的一样,所以直接给出结果曲线如图2所示,绕 y 轴的频率温度曲线与绕 z 轴的相同。由图可看出,LT的频率温度系数随绕 z 轴旋转后可找到零频率温度系数切角在 -55° 和 50° 附近。

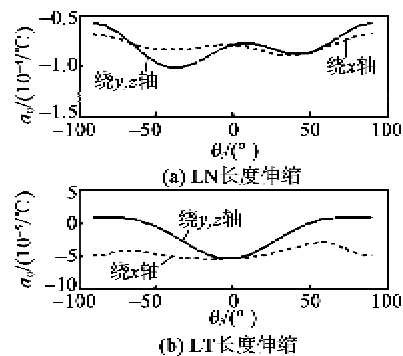


图2 $(xyt)\theta_1$ 、 $(xyl)\theta_2$ 和 $(xyw)\theta_3$ 切型LN和LT的 a_0 与 θ_1 的关系 ($T_0=25^\circ\text{C}$)

2.2 $(yxl)\theta_1$ 切型面切变振动模式

当晶片面切变振动(一般为基频)时,主平面上的一个对角线伸长,而另一个对角线缩短,面中心为节点,称为面振动模式面切变绕 x 轴旋转示意图如图3所示。该切型下,晶片的厚度是沿 y' 方向, l 是沿 x 方向,电极面与 y' 轴垂直。晶片在切应力 T'_{55} 和电场力 E'_2 作用下,通过压电常数 d'_{25} 和弹性柔顺常数 s'_{55} ,在 y' 面上产生面切变振动模式。而面切变振动的频率方程为

$$f = \frac{1}{2\sqrt{l^2 + \frac{1}{\omega^2 \rho s'_{55}}}} \quad (14)$$

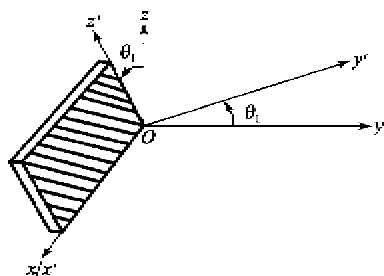


图3 (yxl)θ₁ 切型空间方位

s'_{55} 的表达式通过矩阵变换得到:

$$s'_{55} = s_{44} \cos^2 \theta_1 + s_{66} \sin^2 \theta_1 - 4s_{14} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \quad (15)$$

一级频率温度系数表示为

$$a_0 = -\frac{1}{2} T_{s'_{55}}^{(1)} - \frac{1}{2} T_p^{(1)} - \frac{1}{2} \alpha_l^{(1)} - \frac{1}{2} \alpha_w^{(1)} \quad (16)$$

式中一级弹性温度系数为

$$T_{s'_{55}}^{(1)} = \frac{1}{s'_{55}} [s_{55} T_{s_{55}}^{(1)} \cos^2 \theta_1 + s_{66} T_{s_{66}}^{(1)} \sin^2 \theta_1 - 2s_{14} T_{s_{14}}^{(1)} \sin \theta_1 \cos \theta_1] \quad (17)$$

一级膨胀系数为

$$\alpha_l^{(1)} + \alpha_w^{(1)} = \alpha_1^{(1)} + \alpha_3^{(1)} + (\alpha_1^{(1)} - \alpha_3^{(1)}) \sin \theta_1 \quad (18)$$

将式(12)、(17)和(18)代入式(16)可得

$$a_0 = -\frac{1}{2} T_{s'_{55}}^{(1)} - \frac{1}{2} T_p^{(1)} - \frac{1}{2} [\alpha_1^{(1)} + \alpha_3^{(1)} + (\alpha_1^{(1)} - \alpha_3^{(1)}) \sin^2 \theta_1] \quad (19)$$

应当指出:

1) (yxl)θ₁ 切型的晶片, 在 y' 方向 E'_2 作用下, 除通过 d_{35} 在 y' 面上产生的面切变振动模式外, 还可通过 d_{35} 在 z' 面上产生厚度切变振动模式。如果 LN 晶片厚度远小于长度和宽度, 则厚度切变对面切变的影响很小。

2) 频率方程只适用用面切变振动的基频和低次泛音, 高次泛音的频率方程与其不同, 由于一般工业上面切变振动不会用到高次泛音, 故这一方面不详细讨论^[9]。

在 (yxl)θ₁ 切型面切变振动模式下, 不改变晶片的形状, 只改变晶片随坐标轴的绕向, 即可确定出该晶片分别绕 y 轴和 z 轴的切型为 (yxt)θ₂ 和 (yxw)θ₃, 对于各向异性的晶体, 晶片的特征频率方程主要取决于其形状, 切割方向只影响特征频率的大小, 所以, 这 2 个切型的晶片的频率方程和频率温度系数方程与 (xyt)θ₁ 相同。因此, 本文直接给出结果曲线, 如图 4 所示。由图可看出, 由于 2 种晶体参数不同, 导致 LT 面切变振动绕 x 轴旋转后也能找到零频率温度系数切角为 -90° 和 20° 附近, 绕 z

轴旋转后也能找到零频率温度系数切角为 40° 附近。而二者绕 y 轴旋转的频率温度曲线具有周期性, 主要受晶体的坐标轴选取时镜面结构的影响。

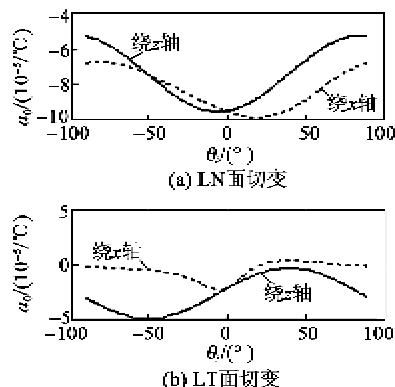


图4 (yxl)θ₁ 和 (yxw)θ₃ 切型 LN 和 LT 的 a_0 与 θ_1 的关系 ($T_0 = 25^\circ\text{C}$)

2.3 (yxl)θ₁ 切型厚度切变振动模式

如图 3 所示, 厚度切变振动模式空间切型与面切变相同。当晶片作厚度振动(基频)时, 侧面的一个对角线伸长, 而另一个对角线缩短, 波节面通过片心, 并与主面平行。和面切变振动模式相同, 由于侧面的切变与厚度有关, 故称为厚度切变, 如图 5 所示。因为晶片厚度可磨得很薄^[14], 故厚度切变振动模式适用于高频和超高频范围。

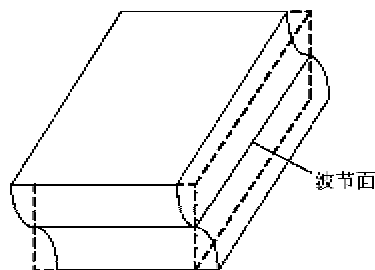


图5 (yxl)θ₁ 切型厚度切变振动示意图

该切型下, LN 和 LT 晶片都是在切应力 T'_s 和电场 E'_2 的作用下, 通过压电常数 e'_{26} 和弹性刚度常数 c'_{66} 产生沿厚度切变振动模式。而当长度和宽度远大于厚度时, 厚度切变振动的频率方程为

$$f = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{c'_{66}}{\rho}} \quad (20)$$

式中: t 为晶片厚度; c'_{66} 为弹性刚度系数, 通过晶体的矩阵变换, c'_{66} 为

$$c'_{66} = c_{44} \sin^2 \theta_1 + c_{66} \cos^2 \theta_1 + 2c_{14} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \quad (21)$$

一级频率温度系数为

$$a_0 = -\frac{1}{2} T_{c'_{66}}^{(1)} - \frac{1}{2} T_p^{(1)} - \alpha_t^{(1)} \quad (22)$$

式中一级弹性刚度温度系数为

$$T_{c_{66}}^{(1)} = \frac{1}{c_{66}} [c_{44} T_{c_{44}}^{(1)} \sin^2 \theta_1 + c_{66} T_{c_{66}}^{(1)} \cos^2 \theta_1 + 2c_{14} T_{c_{14}}^{(1)} \sin \theta_1 \cos \theta_1] \quad (23)$$

一级膨胀系数为

$$\alpha_t^{(1)} = \alpha_s^{(1)} - (\alpha_1^{(1)} - \alpha_3^{(1)}) \cos \theta_1 \quad (24)$$

将式(12)、(23)和(24)代入式(22)可得

$$a_0 = -\frac{1}{2} T_{c_{66}}^{(1)} - \frac{1}{2} T_{\rho}^{(1)} - \{\alpha_s^{(1)} - [(\alpha_1^{(1)} - \alpha_3^{(1)}) \cos^2 \theta_1]\} \quad (25)$$

应当指出:

1) 频率方程和频率温度系数都是在晶片长度和宽度远大于厚度(或直径远大于厚度)的条件下得到的。因此,由于确定的频率温度系数只与 θ_1 有关,而与晶片的边比无关,但在实际应用中,晶片尺寸不一定满足长度和宽度远大于厚度的条件,所以频率温度系数与边比有关。

2) 对于 LN 和 LT 晶片,在电场 E'_z 的作用下,除通过压电常数 e'_{26} 激发沿 z' 的厚度切变振动外,还可通过压电常数 e'_{25} 激发沿 y' 面的面切变振动。面切变的高次泛音将会与厚度切变振动发生耦合作用。

在 $(yxl)\theta_1$ 切型厚度切变振动模式下,与面切变振动相同,可确定出该晶片形状下分别绕 y 轴和 z 轴的切型为 $(yxt)\theta_2$ 和 $(yxw)\theta_3$,对于各向异性的晶体,晶片的特征频率方程主要取决于它的形状,所以,这 2 个切型晶片的频率方程和频率温度系数方程与 $(yxt)\theta_1$ 相同,这里就不在赘述,因此,直接给出结果曲线,如图 6 所示。

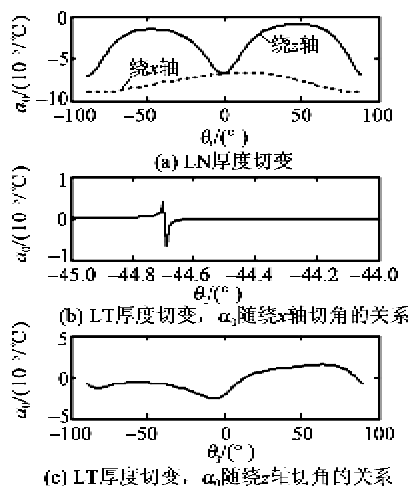


图 6 $(yxl)\theta_1$ 和 $(yxw)\theta_3$ 切型 LN 和 LT 的 a_0 与 θ_1 的关系 ($T_0 = 25^\circ\text{C}$)

由图 6 可看出,在厚度切变中, LN 绕 z 轴旋转

后也能找到接近温度切角的角度, $\theta_3 = -45^\circ$ 附近时, $a_0 = -14 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; $\theta_3 = -50^\circ$ 附近时, $a_0 = -8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。其值已很小,可满足零温度切角的最大限制范围,且这时曲线平缓,频率随温度变化不大。而 LT 绕 z 旋转后,仍能找到零温度系数切角为 15° 附近,且 LN 和 LT 绕 y 轴旋转后和面切变相同,都呈现出周期规律性,这与它们之间的结构相似有关。

3 结束语

在室温附近, LN 的各种切型的一级频率温度系数均为负值,但其绕 z 轴旋转后厚度切变振动模式的一级频率温度系数曲线可找到近似零温度切角。而 LT 可找到绕 z 轴旋转后的长度伸缩振动和厚度切变振动模式的频率温度系数的零温度切角,绕 x 轴旋转后可找到面切变振动模式的频率温度系数的零温度切角。

参考文献:

- [1] 李敏毅. 铌酸锂高频超声换能器的研制与输出功率测量[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- [2] 付博, 张大勇, 罗飞, 等. 一种低驱动电压的电光开关设计[J]. 强激光与离子束, 2012, 24(2): 312-314.
FU Bo, ZHANG Dayong, LUO Fei, et al. A low drive voltage of electro-optic switch design[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(2): 312-314.
- [3] 孙军. 高性能铌酸锂晶体与光电器件产品化的关键技术研究[D]. 天津:南开大学, 2008.
- [4] BURGESS J W, HALES MC. Temperature coefficients of frequency in LiNbO_3 and LiTaO_3 plate resonators[J]. Proc IEE, 1976, 123(6): 499-504.
- [5] 张福学. 现代压电学 [M]. 中册. 北京:科学出版社, 2002.
- [6] 颜涛. 高品质铌酸锂、钽酸锂晶体的生长、结构与性质研究[D]. 山东:山东大学, 2011.
- [7] 张一兵. 铌酸锂的晶体结构[J]. 上饶师范学院学报, 2001, 21(6): 52-56.
ZHANG Yibin. Crystal structure of lithium niobate [J]. Journal of Shangrao Normal College, 2001, 21(6): 52-56.
- [8] 田文杰, 路峻岭, 张福学, 等. AT 切石英谐振器频率温度系数的研究[J]. 电子元件与材料, 2002, 21(9): 1-3.
TIAN Wenjie, LU Junling, ZHANG Fuxue, et al. A research of AT cut quartz resonator frequency temperature coefficient[J]. Electronic Components & Materials, 2002, 21(9): 1-3.
- [9] 秦自楷. 压电石英晶体 [M]. 北京:国防工业出版社, 1980.

(下转第 742 页)