

光学方解石晶体温度特性

吴福全 吴闻迪 苏富芳 史 萌

曲阜师范大学激光研究所山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 山东 曲阜 273165

摘要 利用热膨胀系数张量推导出光学方解石晶体(OCC)的任意方向热膨胀系数的表达式,确定了晶体的零膨胀方向;推导出晶体任意方向双折射率的温度变化量的表达式,并给出晶体中任意方向光程差随温度的变化关系。结果表明,对应方位角为 65.35° 或 114.65° 的方向是 OCC 的零膨胀方向;温度对晶体中光程差的影响随方位角的变化而变化,在垂直于晶体光轴的方向这种影响最大。

关键词 物理光学; 温度特性; 光学方解石晶体; 光程差; 相位差

中图分类号 O731 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0826002

Temperature Characteristics of Optical Calcite Crystals

Wu Fuquan Wu Wendi Su Fufang Shi Meng

Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology,
Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China

Abstract Through the coefficient of thermal expansion tensor, the formula of the omnidirectional thermal expansion coefficient of the optic calcite crystal (OCC) is deduced, and the zero-expansion direction of the OCC is determined. The expression of the omnidirectional birefringence versus temperature is derived, and the relationship between the omnidirectional optical path difference and temperature is also provided. These results show that the zero-expansion of the OCC occurs at the azimuth angle of 65.35° or 114.65° . The effect of temperature on the optical path difference is subject to the azimuth angle and along the direction perpendicular to the optical axis, this effect is the most.

Key words physical optics; temperature characteristic; optical calcite crystal; optical path difference; phase difference

OCIS codes 260.1180; 160.4670

1 引 言

随着现代激光应用技术的发展,偏光器件^[1-3]得到越来越广泛的重视。偏光器件在使用过程中,通常会受到诸多因素的影响,其中温度就是不容忽视的因素之一,如偏振干涉成像光谱仪^[4-5]在自然环境中使用时,必须考虑到温度对其中的 Wollaston 棱镜光程差、平行分束偏光镜光程差的影响。面型和双折射率的变化是温度对晶体偏光器件影响的主要表现^[6-7],虽然变化不大但足以影响光通过晶体后的性质^[8-10]。考虑到偏光器件结构的多样性,目前只对制作偏光器的材料的温度特性进行研究。天然光学方解石晶体(OCC)通常称为冰洲石晶体,较大双折射率和较高透射率使其成为制作偏光器件的主要材料^[11-12]。

本文对 OCC 的热膨胀特性和温度对其双折射率、光程差及相位差的影响进行研究,为在晶体器件的设计和实际使用中合理利用 OCC 温度特性提供参考依据。

2 OCC 任意方向的热膨胀系数

在温度变化不改变晶体所属晶类的前提下,根据已知的 OCC 主热膨胀系数^[13]建立热膨胀系数张量模型:

收稿日期: 2016-02-05; **收到修改稿日期:** 2016-04-01

基金项目: 山东大学晶体材料国家重点实验室开放课题(KF1406)、山东省高等学校科技计划(J13LJ06)

作者简介: 吴福全(1952—),男,教授,博士生导师,主要从事偏振光学与技术方面的研究。E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn

$$\alpha = \begin{bmatrix} -5.6 & 0 & 0 \\ 0 & -5.6 & 0 \\ 0 & 0 & 26.6 \end{bmatrix} \times 10^{-6}, \quad (1)$$

二阶示性曲面方程为

$$-5.6x^2 - 5.6y^2 + 26.6z^2 = 1 \times 10^6. \quad (2)$$

图 1 所示为 OCC 热膨胀系数的二阶示性面。图中 z 方向为晶体光轴方向,该方向上 OCC 的热膨胀系数为最大值,即 $\alpha_{\max} = 26.6 \times 10^{-6}$,属于热胀冷缩性质; xy 平面垂直于晶体光轴,平行于该平面的任意方向上的热膨胀系数都为最小值,即 $\alpha_{\min} = -5.6 \times 10^{-6}$,属于热缩冷胀性质;在平行于 z 轴的任意平面内,热膨胀系数随方向在最大值和最小值之间变化,这些平面内应存在热膨胀系数为零(即 $\alpha = 0$)的方向。

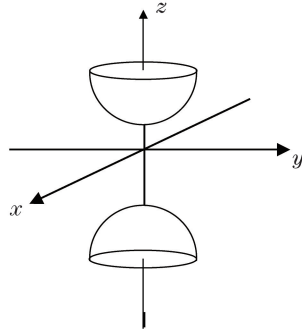


图 1 OCC 热膨胀系数的二阶示性面

Fig. 1 Two order characteristic surface of thermal expansion coefficients of OCC

在 yz 平面内($x=0$),设 r 为二阶示性面上与 z 轴成 θ 角方向的矢径大小^[14],将 $y = r \sin \theta, z = r \cos \theta$ 代入(2)式得

$$r^2 = \frac{1}{-5.6 \sin^2 \theta + 26.6 \cos^2 \theta} \times 10^6, \quad (3)$$

那么与 z 轴成 θ 角方向上 OCC 热膨胀系数为

$$\alpha_\theta = \frac{1}{r^2} = (-5.6 \sin^2 \theta + 26.6 \cos^2 \theta) \times 10^{-6}. \quad (4)$$

OCC 热膨胀系数随方位角的变化关系图如图 2 所示。从图中曲线可以看出,OCC 的热膨胀系数随方位角呈非线性变化。方位角 $\theta = 65.35^\circ$ 或 $\theta = 114.65^\circ$ 时,热膨胀系数等于零,即这两个方向为 OCC 的零膨胀方向;方位角在 0° 和 90° 附近时,热膨胀系数 α 随 θ 角的变化最小;方位角在 $20^\circ \sim 70^\circ$ 的范围内改变时, α 近似线性变化。另外 α 曲线关于晶体光轴方向和垂直晶体光轴方向对称,这说明温度变化不会改变晶体本身的对称性。

图 3 采用极坐标形式给出了 OCC 热膨胀系数在(001)平面上的分布。图中极角表示晶体内任一方向与晶体光轴(z 轴)的夹角, $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 与 270° 表示晶体内 4 个特殊方向的极角角度;曲线上各点到原点的长度表示该方向上热膨胀系数的绝对值, 26.6×10^{-6} 与 -5.6×10^{-6} 分别对应极角为 0° 和 90° 时 OCC 的热膨胀系数。

3 温度对 OCC 双折射率的影响

当温度变化为 ΔT 时,寻常光(o 光)的折射率可表示为

$$n_o^* = n_o + \frac{dn_o}{dT} \Delta T, \quad (5)$$

式中 n_o 是 o 光的主折射率。那么 o 光折射率的温度变化量为

$$\Delta n_o^* = \frac{dn_o}{dT} \Delta T, \quad (6)$$

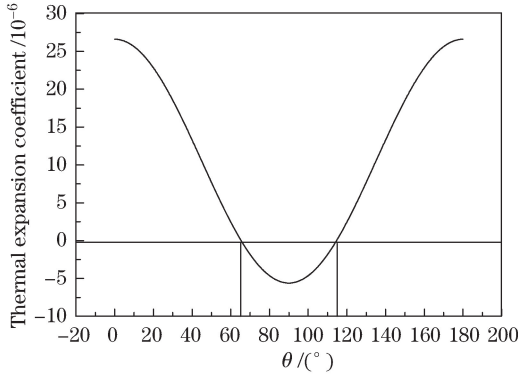


图 2 OCC 热膨胀系数随方位角的变化
Fig. 2 Thermal expansion coefficient of OCC versus azimuth angle

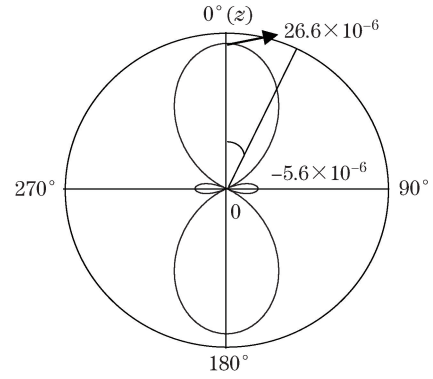


图 3 (001)面热膨胀系数的空间方位分布
Fig. 3 Spatial azimuth distribution of thermal expansion coefficients at surface (001)

传播方向与晶体光轴夹角为 θ 的非常光(e 光)波在晶体内的折射率为^[15]

$$n'_e = \left(\frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

式中 n_e 为 e 光波的主折射率。e 光波折射率的温度系数为

$$\frac{dn'_e}{dT} = (n_e^{-2} \sin^2 \theta + n_o^{-2} \cos^2 \theta)^{-\frac{3}{2}} \left(n_e^{-3} \sin^2 \theta \frac{dn_e}{dT} + n_o^{-3} \cos^2 \theta \frac{dn_o}{dT} \right), \quad (8)$$

则 e 光波折射率的温度变化量为

$$\Delta n_e^* = \frac{dn'_e}{dT} \Delta T. \quad (9)$$

图 4 和图 5 分别为 o 光、e 光波主折射率温度系数随波长的变化关系。

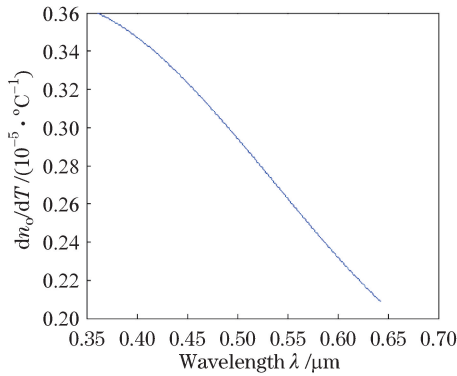


图 4 o 光折射率温度系数与波长的关系
Fig. 4 Relationship between temperature coefficient of refractive index and wavelength of o light

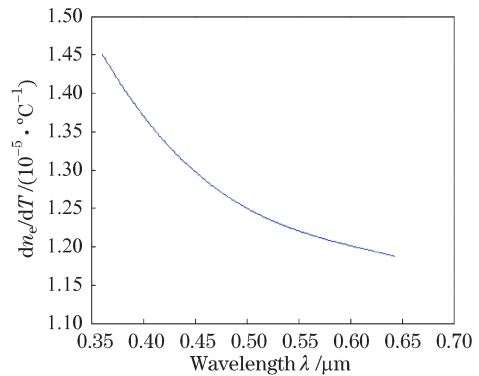


图 5 e 光折射率温度系数与波长的关系
Fig. 5 Relationship between temperature coefficient of refractive index and wavelength of e light

根据 o 光、e 光波折射率的温度系数,可以得到 OCC 双折射率的温度系数为

$$\Delta n^* = \Delta n_o^* - \Delta n_e^* = \frac{dn_o}{dT} - \frac{dn'_e}{dT} = \frac{dn_o}{dT} - (n_e^{-2} \sin^2 \theta + n_o^{-2} \cos^2 \theta)^{-\frac{3}{2}} \left(n_e^{-3} \sin^2 \theta \frac{dn_e}{dT} + n_o^{-3} \cos^2 \theta \frac{dn_o}{dT} \right). \quad (10)$$

当波长分别为 589, 441, 361 nm 时,由(10)式拟合的 OCC 双折射率温度系数随方位角 θ 的变化情况如图 6 所示。由图中曲线可以看出,OCC 双折射率的温度系数随方位角 θ 的变化而变化,在平行于晶体光轴的方向上($\theta=0^\circ$ 或 $\theta=180^\circ$),OCC 双折射率的温度系数最小值为零,对应双折射率也为零;在垂直于晶体光轴的方向上($\theta=90^\circ$),OCC 双折射率温度系数最大,且对方位角的变化不敏感,但受波长变化的影响较大。

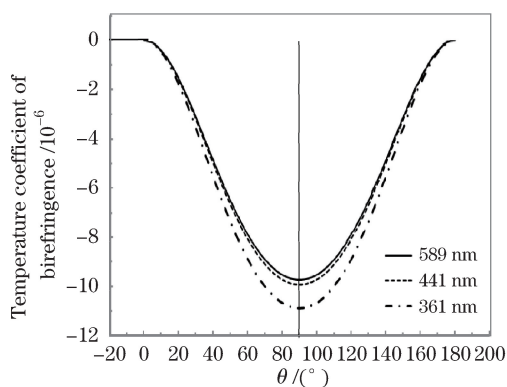


图 6 不同波长下双折射率温度系数随方位角的变化

Fig. 6 Temperature coefficient of birefringence versus azimuth angle for different wavelengths

4 温度对 OCC 内任意方向光程差的影响

设晶体的长度为 L , 双折射率为 $n_o - n'_e$, 当温度变化时, 光程差 τ 为

$$\tau = L(1 + \alpha_\theta \Delta T) \left(n + \frac{dn}{dT} \Delta T \right). \quad (11)$$

在忽略二阶小量的情况下, 单位长度晶体中单位温度变化引入的光程差为

$$\tau^* = \alpha_\theta n + \frac{dn}{dT} = \alpha_\theta (n_o - n'_e) + \frac{d(n_o - n'_e)}{dT} = \alpha_\theta (n_o - n'_e) + \Delta n^*. \quad (12)$$

单位温度对单位长度晶体光程差的影响随方位角的变化曲线如图 7 所示。从图中曲线可以看出, 在垂直晶体光轴方向上 ($\theta = 90^\circ$), 温度对光程差的影响最为明显, 且其与波长的关系与图 6 有相似的变化规律, 这是由于热膨胀系数与波长无关, 光程差的变化仅取决于双折射率的温度系数与波长的关系。在方位角接近 0° 和 180° 时, 温度对光程差的影响较小, 单位温度引入的光程差为负值, 说明温度对 e 光折射率的影响大于 o 光, 这在图 4 与图 5 中已有明确的展示。当方位角在 $20^\circ \sim 60^\circ$ 之间变化时, OCC 单位厚度上的光程差随方位角呈线性变化。由于相位延迟量与光程差有着直接的关系, 因此图 7 也反映出温度对相位差的影响程度。

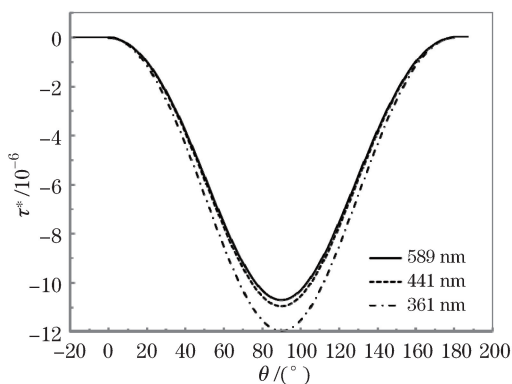


图 7 不同波长下单位温度对单位长度晶体光程差的影响随方位角的变化曲线

Fig. 7 Optical path difference introduced by the change of the unit temperature versus azimuth angle for different wavelengths

5 温度对相位延迟量影响的实验测试

采用同步抛光的方法, 制作了方位角分别为 30° 、 65.35° 与 90° 的三个 OCC 待测样品, 样品的厚度均为 1.871 mm 。鉴于实验条件的限制和测量的可操作性, 采用光相位延迟量的归一化偏振调制测量^[16]方法, 对样品的相位延迟量随温度的变化进行实验测试, 并验证温度对光程差的影响。

测试光路如图 8 所示。L 为光阑, P_0 、P 为线起偏器, R 为四分之一波片, R_x 为待测样品, TC 为温度控制装置, W 为 Wollaston 棱镜, D_1 、 D_2 为中国计量科学研究院定标的 LM-200 激光功率计, 光源为 670 nm 稳功率激光器。实验测试中, 为避免样品表面结霜, 只进行升温测试; 为避免样品存在温度梯度, 在每一个测试温度点恒温 5 min, 然后打开 TC 两端的密封塞, 让光束直接通过样品进行测试。按照文献[16]的方法进行测试, 测试结果见表 1。

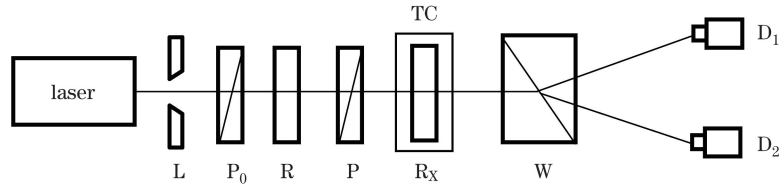


图 8 测试光路

Fig. 8 Optical path for testing

表 1 相位延迟量 δ 的测试结果

Table 1 Measurement results of phase retardation δ

Parameter	Value								
$\theta / (^{\circ})$	30.00	30.00	30.00	65.35	65.35	65.35	90.00	90.00	90.00
Temperature / $^{\circ}\text{C}$	20	25	30	20	25	30	20	25	30
$\delta / (^{\circ})$	40.4	31.3	22.1	149.5	113.2	77.1	102.3	57.1	12.1

需要说明的是, 表 1 中测量结果不含总延迟量 2π 的整数部分, 而只是 2π 的小数部分。从表 1 数据可以看出, OCC 相位延迟量随温度的升高而减小; 对于相同的温度变化, 方位角 θ 越大, 相位延迟量的变化量就越大, 这与图 7 中曲线的变化规律是相同的。

6 结 论

通过对 OCC 热膨胀系数建模分析了温度对晶体中任意方向双折射率和光程差的影响, 得出 OCC 存在热膨胀系数为零的方向, 该方向对应的方位角为 65.35° 或 114.65° 。经过晶体光轴方向上任意一点, 作与光轴成 65.35° 或 114.65° 的直线, 该直线绕晶体光轴旋转形成的双锥面是 OCC 零膨胀方向的空间展示。在垂直晶体光轴方向上, 无论是 OCC 双折射率的温度系数还是温度对光程差的影响均达到最大, 这是因为在垂直于晶体光轴方向上, 双折射率为最大值, 且双折射率的温度系数与晶体的热膨胀系数均为负的最大值。对于 OCC 的应用而言, 灵活地选择晶体光轴方向可以满足不同的应用需要。

参 考 文 献

- 1 Wu W, Wu F, Shi M, *et al.* A unit structure Rochon prism based on the extraordinary refraction of uniaxial birefringent crystals[J]. *Opt Express*, 2013, 21(11): 13162-13168.
- 2 Wu F, Li G, Huang J, *et al.* Calcite /barium fluoride ultraviolet polarizing prism[J]. *Appl Optics*, 1995, 34(19): 3668-3670.
- 3 Wu Fuquan, Li Guohua, Song Lianke, *et al.* Study of high efficiency laser polarizers[J]. *Chinese J Lasers*, 1995, 22(1): 37-39.
吴福全, 李国华, 宋连科, 等. 激光高效偏光镜的研究[J]. *中国激光*, 1995, 22(1): 37-39.
- 4 Zhang C, Jian X. Wide-spectrum reconstruction method for a birefringence interference imaging spectrometer[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(3): 366-368.
- 5 Mu T, Zhang C, Jia C, *et al.* Static hyperspectral imaging polarimeter for full linear Stokes parameters[J]. *Opt Express*, 2012, 20(16): 18194-18201.
- 6 Li Hongxia, Wu Fuquan, Fan Jiyang. Thermodynamic effect on transmitted intensity perturbation of air-gaped Glan-type polarizing prisms[J]. *Acta Phys Sin*, 2003, 52(8): 2081-2086.
李红霞, 吴福全, 范吉阳. 空气间隙格兰型棱镜偏光器透射光强扰动的温度效应[J]. *物理学报*, 2003, 52(8): 2081-2086.

- 7 Hu Qihong, Chen Shuguang, Mo Dang. Measurement of anisotropic optical constants by ellipsometry[J]. *Acta Phys Sin*, 1989, 38(8): 1245-1252.
胡其宏, 陈树光, 莫 党. 椭偏光法研究晶体各向异性光学性质[J]. *物理学报*, 1989, 38(8): 1245-1252.
- 8 Li Hongxia, Wu Fuquan, Su Fufang. The effect of temperature on the polarizing prisms[J]. *Laser Technology*, 2004, 28(3): 266-270.
李红霞, 吴福全, 苏富芳. 偏光棱镜温度特性的研究[J]. *激光技术*, 2004, 28(3): 266-270.
- 9 Li Zizhong, Li Zhihong, Yao Xiaotian, *et al.* Research on influence of polarization crosstalk on the zero drift and random walk of fiber optic cyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1206001.
李子忠, 李志宏, 姚晓天, 等. 偏振串扰对光纤陀螺零漂及随机游走影响的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1206001.
- 10 Liu Jia, Huang Haiqing, Bai Yan, *et al.* Influences of liner polarization light on the measurement of water absorption coefficient[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0601003.
刘 佳, 黄海清, 白 雁, 等. 不同线偏振光对水体吸收系数测量的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0601003.
- 11 Li Jianli, Wang Yingwei, Li Yanhong, *et al.* Research on performance of C_6CO_3 for light-polarized device[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2002, 31(4): 413-416.
李建利, 王英伟, 李艳红, 等. 冰洲石晶体偏光器件性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2002, 31(4): 413-416.
- 12 Wu Fuquan, Wu Wendi, Su Fufang, *et al.* Study on colour and optical properties of iceland crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0916004.
吴福全, 吴闻迪, 苏富芳, 等. 有色冰洲石晶体退色及光学性能的研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0916004.
- 13 Chen Gang, Liao Liji, Hao Wei. *Crystal physics basis*[M]. Beijing: Science Press, 2007: 113.
陈 纲, 廖理几, 郝 伟. *晶体物理学基础*[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 113.
- 14 Jiang Minhua. *Crystals physics*[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1980: 63.
蒋民华. *晶体物理*[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1980: 63.
- 15 Yu Wenhai, Liu Wanyu. *Crystal physics*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1998: 122.
俞文海, 刘皖育. *晶体物理学*[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998: 122.
- 16 Zhao Qiuling, Wu Fuquan. Optical phase retardation measurement by nonmalized polarizing modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(3): 360-362.
赵秋玲, 吴福全. 光相位延迟量的归一化偏振调制测量[J]. *光学学报*, 2002, 22(3): 360-362.