

文章编号: 1001-3806(2007)04-0358-02

单轴晶体双折射率随温度变化的双光路测量

倪志波¹, 宋连科^{1*}, 刘建苹², 彭捍东¹, 周文平¹

(1. 曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165; 2 曲阜师范大学 物理系, 曲阜 273165)

摘要: 为了研究单轴晶体最大双折射率在某一波长下随温度的变化情况, 根据偏振光干涉的理论分析, 推导出了单轴晶体最大双折射率随温度变化的解析式。在此基础上, 设计、建立了一套双光路对比测试实验系统。利用该实验系统对石英晶体样品进行测试, 获得了其实验数据变化曲线, 并总结出了在测试波长下, 石英晶体最大双折射率随温度变化的数学式。结果表明, 单轴晶体在某一波长下的最大双折射率基本上与温度成线性关系; 实验过程中, 只要精确调整仪器, 并注意控制好实验所需温度, 其测量结果是可靠的。

关键词: 晶体光学; 双折射率; 双光路; 单轴晶体; 温度

中图分类号: O734⁺.2 文献标识码: A

Measurement of birefringence of a single axis crystal varying with temperature based on double light paths

NI Zhi-bo¹, SONG Lian-ke¹, LIU Jian-ping², PENG Han-dong¹, Zhou Wen-ping¹

(1. Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2 Department of Physics, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract In order to measure the variation of birefringence varying with temperature when incident wavelength is fixed firstly, the formula of the birefringence of a single axis crystal varying with temperature was deduced according to the theory of polarized light interference. Then an experimental system with double beam paths was set up for comparing measurement. With this system, a sample of quartz was measured and the curve of birefringence vs temperature was drawn. After analyzing the test results a formula of birefringence vs temperature was obtained. The results indicate that when the incident wavelength is fixed, the relationship between birefringence and temperature is linear. In the experimental process, if the instrument is regulated well and the temperature is controlled properly, the test result is reliable.

Key words crystal optics; birefringence; double light path; single axis crystal; temperature

引 言

最大双折射率是表征各向异性晶体光学性质的重要参量, 也是衡量晶体物理特性的最基本的内容之一。几十年来, 国内外许多光学测试者都致力于实现最大双折射率的高精度测量^[1], 但由于折射率测量的范围和精度一般都受测试方法本身所要求的条件限制, 所以目前常用的测量方法都存在一些缺点, 如最小偏向角法^[2], 对测试棱镜的精度要求很高, 加工难度大; 折光率计法、浸油法和国内生产的阿贝折射仪只能测试 1.3~1.9 范围内的折射率。20 世纪 90 年代初, 有人提出了偏光干涉法^[3] 测量晶体的最大双折射率, 并取得了较为理想的结果。但到目前为止, 这方面的研究

基本集中在晶体最大双折射率随波长变化的测量上^[4], 而对晶体双折射率随温度变化方面的研究相对较少。由于晶体的双折射率随温度的变化, 对器件性能会造成很大的影响^[5], 所以, 最大双折射率随温度变化的精确测量有着重要的意义。作者采用的双光路对比测量晶体最大双折射率的方法是以偏光干涉法为基础, 不受折射率范围的限制, 并且利用双光路对比的方法可以消除光源起伏的影响, 使测量精度和测量范围得到了很大的提高。

1 双折射率计算公式的推导

最简单的偏振光干涉光路如图 1 所示^[6], 待测单轴晶体薄片 C 的光轴平行于薄片表面, 起偏器 P 的振动面与待测晶体薄片光轴间的夹角为 θ , 检偏器透振方向与起偏器透振方向的夹角为 α 。一束平面单色自然光垂直入射到检偏器 P 上, 设透过检偏器的光强为 I_0 。经待测晶体薄片作用后, 从检偏器出射的光强可

作者简介: 倪志波 (1981-), 男, 硕士研究生, 目前主要从事激光偏光测量技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: lksong@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期: 2006-06-26 收到修改稿日期: 2006-07-20

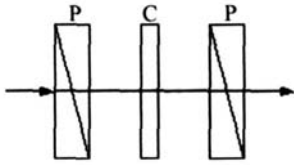


Fig 1 Polarized interference light path

表示为:

$$I = I_0 \left[\cos^2 \alpha - \sin^2 2\theta \sin^2(\theta - \alpha) \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2} \right] \quad (1)$$

式中的 $\Delta\varphi$ 可表示为:
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_T (1 + \xi_T) d \quad (2)$$

式中, Δn_T 表示待测晶体在不同温度下对应的最大双折射率, ξ 表示垂直于待测晶体光轴方向上的膨胀系数, d 表示在常温 (25°C) 下该薄片的厚度。若调节起偏器与检偏器, 使两者的透振方向相互平行, 即 $\alpha = 0$ 则 (1) 式可简化为:

$$I = I_0 \left[1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2} \right] \quad (3)$$

故待测晶体薄片的延迟量可表示为:

$$\Delta\varphi = 2 \sin^{-1} \frac{\sqrt{1 - I/I_0}}{\sin 2\theta} \quad (4)$$

根据 (2) 式和 (4) 式, 待测晶体最大双折射率可表示为:

$$\Delta n_T = \frac{\lambda \sin^{-1} B}{\pi d (1 + \xi_T)} \quad (5)$$

式中, $B = \frac{\sqrt{1 - I/I_0}}{\sin 2\theta}$ 。从公式推导过程可以看出: 偏光干涉法理论公式中的各个量不像浸油法和阿贝折射仪等受到其它介质折射率的限制^[7], 所以, 这种方法可以测量折射率在任意范围内的晶体最大双折射率。

2 测试系统设计及实验结果

利用如图 2 所示的实验系统进行测量。S 为光

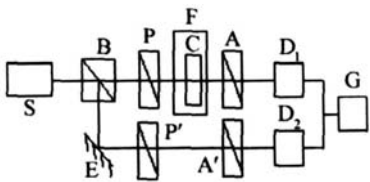


Fig 2 Experimental system

源, 光束经分束棱镜 B 被分为两束, 一束经起偏器 P、样品 C、检偏器 A 后到达探测器 D₁。另一束光经平面镜 E 反射后直接到达探测器 D₂, G 为处理系统, F 为控温装置, 此处待测样品为石英晶体薄片。因为待测石英材料的厚度不会对最大双折射率的值产生影响, 所以为了便于计算, 选取了 589.3nm 波长下的石英 $\lambda/4$ 波片作为测量对象。实验前先调整光路, 以消除光源起伏的影响, 并在参考光路中加入与测量光路中相

同的起偏器 P'、检偏器 A', 以补偿测量光路起偏器、检偏器对透射干涉光强的影响^[8]。样品置于控温装置 F 中, 为了使出射光强能真正反映出单轴晶体最大双折射率随温度的变化关系, 在此取样品方位 (即 θ 角的大小) 为 45°。

利用控温系统控制温度在 0°C 到 80°C 之间连续变化, 每变化一度记录一次光强值。将测得的数据点用平滑的曲线连接并做二次平滑, 得到的结果见图 3

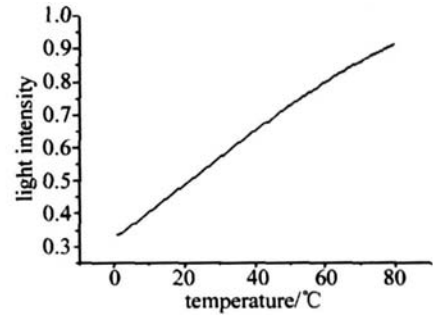


Fig 3 The variation of light intensity while temperature change

$N = 2$ 的多级 $\lambda/4$ 石英波片, 其加工厚度一般为 1504 μm 。在垂直于石英晶体光轴方向上, 石英晶体的膨胀系数 $\xi = 13.37 \times 10^{-6} / \text{m}^{[10]}$ 。将上述测量结果带入 (5) 式, 可以得到石英晶体双折射率随温度的变化曲线 (见图 4)。

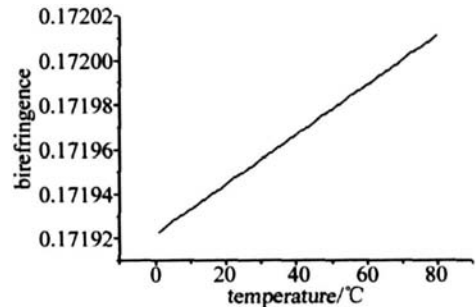


Fig 4 The variation of birefringence while temperature change

从图 4 中的曲线可以看出, 当温度在 1°C 到 80°C 之间变化时, 石英晶体的双折射率随温度的增加基本上是呈线性增加的, 其拟合数学式可表示为:

$$\Delta n_T = 0.17192 + 0.00001125 \times T \quad (6)$$

式中, T 的取值范围在 1°C ~ 80°C 之间。

3 误差分析及结论

在测量过程中, $\alpha = 45^\circ$ 的调节是最大的困难。在本实验中是利用步进电机来控制的, 其最小步进角为 0.05°, 基本可以满足实验对精度的要求。另外, 温度调节的误差是影响测量精度的另一重要因素。测量是在温度稳定 0.5h 以后进行的, 这基本可以保证测量时温度的准确性。通过实验以及对实验数据进行处理得到的结果可以看出: 这种通过在同一波长下波片的

(下转第 363 页)

将 C_{TSP} 和 C_{OPC} 作线性关系拟合, 判错率不大于 1%。

此外, 由光散射理论知, 颗粒的散射光强与被测颗粒的折射率、形状、颜色等特性有关, 且空气湿度对颗粒物质量浓度的测量也有较大影响, 尤其是相对湿度大于 50% 时^[10]。因此, 利用光散射法测量颗粒物质量浓度, 仪器需用标准粒子标定。如果由于气候和地区不同导致被测颗粒物与标定粒子的特性存在较大差异, 还要对比例系数 k 作适当修正。

4 结 论

在偏振入射光条件下, 基于米散射理论的数值计算表明在侧向采光角 $90^\circ \pm 60^\circ$ 范围内, 球形颗粒的散射光通量 F 与粒径 D 之间有好的单值对应关系。进一步由曲线拟合得到 F 与 D^2 成线性关系, 从而导出粒子计数器输出的电压脉冲 V 与 D^2 近似成正比。再利用光学粒子计数器测量的电压脉冲信号幅度分布, 得到了颗粒物质量浓度的计算公式, 并给出了公式中比例常数 k 的测定方法。实验表明, 在 $0.001 \text{ mg/m}^3 \sim 2 \text{ mg/m}^3$ 的质量浓度范围内, 该公式的计算值与实验测量值具有显著的相关性, 相关系数为 0.9953。

参 考 文 献

[1] NORBERT E. Fine particles and human health—a review of epidemiological studies [J]. *Toxicology Letters* 2004, 149(2): 235~242.

- [2] CHUENTA W, HOIKE P.K. Beta gauge for aerosol mass measurement [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, 35(4): 840~843.
- [3] SOUTAR A, WATT M, CHERRIE JW *et al* Comparison between a personal PM10 sampling head and the tapered element oscillating microbalance (TEOM) system [J]. *Atmospheric Environment* 1999, 33(27): 4373~4377.
- [4] GMITERKO A, SLOSARCK S, DOVICA M. Algorithm of nonrespirable dust fraction suppression using an optical transducer of dust mass concentration [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 1998, 47(5): 1228~1233.
- [5] SHENG D R. Research on evaluation of air-solid two phase particle distribution and mean concentration by laser scattering [J]. *Laser Technology* 2000, 24(3): 163~166 (in Chinese).
- [6] YAN F Q, HU H L, YU T M. Measurement of particulate mass concentrations and atmospheric visibility with an optical particle counter [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* 2004, 21(1): 98~102 (in Chinese).
- [7] GAO Y F, ZOU L X, HUANG H J *et al* Influence of the light source in airborne laser particle counter on the flux of transducer [J]. *Journal of Applied Optics* 2005, 26(3): 45~49 (in Chinese).
- [8] BOHTEN C F, HUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York: John Wiley & Sons, 1983. 1~533.
- [9] ZHU D Y, WU Ch Q, QIN W L. Multiple statistical analysis and software SAS [M]. 2nd ed. Nanjing: Southeast University Press, 2003. 257~270 (in Chinese).
- [10] SOUTAS G, KIM S, CHANG M Ch *et al* Field evaluation of a modified DataRAM ME scattering monitor for real time PM2.5 mass concentration measurements [J]. *Atmospheric Environment* 2000, 34(28): 4829~4838.

(上接第 359 页)

温度效应测量单轴晶体最大双折射率随温度变化的方法, 只要精确调整仪器, 并注意控制好实验所需温度, 其测量结果是可靠的。

参 考 文 献

- [1] FENG W W, SONG L K, CHEN L G. The study of the relation between circularly polarized light's refractive rate and wavelength [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 639~641 (in Chinese).
- [2] WANG W Sh, XU B, ZHANG J. The principle formula error of measuring the refractive index by the method of minimum deviation angle and the method of V-prism [J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics* 1995, 18(1): 5~9 (in Chinese).
- [3] XIE K Ch, LIU G Y. Measuring the refractivity of glass materials using laser interference [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics* 1994, 16(5): 57~60 (in Chinese).
- [4] XU Y Q, SONG L K, ZHAO P T. Birefringence measurements of mus-

covitemica with wavelength modulation compensation method [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 99~100 (in Chinese).

- [5] LI H X, WU F Q, SU F F. The effect of temperature on the polarizing prism [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(3): 266~270 (in Chinese).
- [6] LIAO Y B. Polarized optics [M]. Beijing: Science Press, 2003. 101 (in Chinese).
- [7] SHEN W M, ZHANG Y, JIN Y X *et al* Theoretical and experimental study on the interference of convergent polarized light for a biaxial crystal [J]. *Acta Optica Sinica* 2005, 25(11): 1558~1562 (in Chinese).
- [8] JIN G F, LI J Zh. Laser measurement [M]. Beijing: Science Press, 1998. 229~234 (in Chinese).
- [9] ZHAO Sh, WU F Q. Theoretic analysis of uniaxial optical axis interference patterns [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(5): 59~61 (in Chinese).
- [10] LI J Zh. Handbook of optics [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1990. 502 (in Chinese).