

文章编号: 0253-2239(2009)11-3148-04

云母晶体双折射率色散特性的研究

孔凡美¹ 李国华¹ 李春红² 杜洪刚³

(¹ 曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165; ² 曲阜市第一中学, 山东 曲阜 273100)
³ 山东省邹城监狱, 山东 邹城 273500

摘要 针对云母晶体材料本身性质所决定的双折射率色散关系不一致性, 给波片设计带来非常不利的影响, 提出偏光干涉法研究云母的色散特性。即由分光光度计测量出云母晶体的偏光干涉谱, 通过对干涉谱极值点所对应波长的精确判断, 准确计算出极值点的最大双折射率, 获得从紫外至近红外光波段云母晶体的双折射率色散曲线, 经多项式拟合数据处理, 得到任意波长的双折射率色散公式。为求解不同温度任意波长的云母晶体双折射率提供了一种精确简单的方法, 对云母晶体器件的设计与使用有重要的理论依据和参考价值。

关键词 材料; 云母晶体; 色散; 双折射率; 偏光干涉

中图分类号 O734 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3148

Study on the Dispersion of Birefringent Indexes of Mica Crystal

Kong Fanmei¹ Li Guohua¹ Li Chunhong² Du Honggang³

(¹ Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)
² The No.1 Middle School of Qufu, Qufu, Shandong 273100, China
³ The Zoucheng Prison, Zoucheng, Shandong 273500, China

Abstract The inherent discrepancy of birefringent dispersion relations of mica crystal has an unfavourable effect on designing wave-plate. A way of the polarization interference spectrum to study the dispersion of birefringent indexes of mica crystal is presented. The polarization interference spectrum of mica wave-plates are measured with spectrophotometer. Then through accurate judgment extreme points of the polarization interference spectrum, the maximal birefringent index at the extreme points can be calculated exactly and the dispersion curve is obtained from visible spectral band to ultraviolet spectral band. At last, expressions of the birefringent dispersion at any wavelength for mica crystal can be achieved through polynomial fitting data processing. This paper offers a accurate and simple method for measuring the birefringent index of mica crystal at any wavelength and temperature, also offers parameter choice basis for correctly using and designing crystal mica devices.

Key words materials; mica crystal; dispersion; birefringent indexes; polarized interference

1 引 言

负双轴晶体云母是设计制作单级光相位延迟片的理想材料, 但它的光轴间夹角几乎可以是在 $0 \sim 42^\circ$ 之间的任意一个角度。劈裂所沿的解理面不与任一光轴平行, 而沿着晶轴, 双折射率 ($n_e - n_o$) 色散关系不确定^[1]。媒质中折射率随入射光波长变化而变化的现象称为光的色散现象^[2]。通常通过实验

测定 n 随 λ 变化的关系, 并作成曲线, 这种曲线称为色散曲线。另外, 由于各种材料的色散曲线不尽相同, 所以无法从一种材料的色散曲线得到另一种材料的色散曲线^[3,4]。云母材料双折射率色散关系随测试样品不同而变化, 对光学调制器件设计, 尤其是波片设计带来非常不利的影响。虽然云母没有象石英晶体材料那样在确定方位上有确定双折射率色散

收稿日期: 2008-12-23; 收到修改稿日期: 2009-02-26

作者简介: 孔凡美(1980—), 女, 硕士研究生, 主要从事偏振光学和偏光器件的测试等方面的研究。

E-mail: kongfanmei2006@126.com

导师简介: 李国华(1937—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事偏光物理学与偏光技术等方面的研究。

E-mail: ghli@163169.net

关系,但是通过对不同样品测量研究发现,在波长 $0.3\ \mu\text{m}\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 范围内同一矿区的同一品种的云母,其双折射率值随波长变化的规律几乎是一致的^[1],这样简化了测量步骤提高了测试效率。此外,环境温度也影响材料的双折射率^[5~8]。而目前云母晶体在不同温度不同波长下所对应的折射率的变化规律却一直未见报道。本文利用偏光干涉法,精确测定出晶体材料特定波长的双折射率,拟合得到云母晶体在不同温度任意波长的双折射率变化规律,对云母晶体的使用具有指导性的意义。

2 测试原理及系统

设放置在相互平行的两高消光比偏光棱镜间的云母波片的快慢轴分别沿 x 轴和 y 轴,偏光棱镜的透光轴与 x 轴的夹角为 θ 角,波片的通光面与入射光垂直放置。光强为 I_0 的初始光经过第二棱镜的出射光强 I 为

$$I = I_0 [1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(\delta/2)], \quad (1)$$

式中 δ 为寻常光 o 和非寻常光 e 之间的相位差,由材料双折射 $\Delta n = |n_o - n_e|$ 和波片的厚度 d 和光波长决定:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \cdot d, \quad (2)$$

由(1)式和(2)式,当 θ, d 为定值时,输出光强 I 由 Δn 和 λ 决定,当改变波长 λ 时,光强和双折射率 Δn 随之改变。

当 $\delta = 2k\pi, k = 0, 1, 2, 3, \dots$ 时,输出光强有极大值,即偏光干涉谱的波峰位置;

当 $\delta = (2k+1)\pi, k = 0, 1, 2, 3, \dots$ 时,输出光强有最小值,即偏光干涉谱的波谷位置。

由此可确定极值点对应的双折射率如下:

$$\Delta n_i = k\lambda_i/d, \quad (\text{极大值时}) \quad (3)$$

$$\Delta n_j = \frac{(k_i + 1/2)\lambda_j}{d}, \quad (\text{极小值时}) \quad (4)$$

式中 k_i 为干涉级次, λ_i 和 λ_j 为干涉级 k_i 与其相邻极小干涉级对应的波长。

而云母晶体垂直于通光面方向的厚度满足如下关系^[9]

$$d_T = d[1 + 7.37 \times 10^{-6}(T' - T)], \quad (5)$$

式中 d 为波片常温(293 K)下的厚度, $T = 293$ K。

系统采用岛津 UV-3101PC 分光光度计,在其样品室建立如图 1 所示的温度可调的平行偏光干涉光路。系统采用双光路形式^[10~12]:信号光经反射镜 M 反射进入偏光干涉系统(虚框部分由两只平行放

置的高消光比的偏光棱镜 P_1, P_2 和待测波片 W 组成,为测量不同温度下的偏光干涉谱,在此光路中加入了温控装置 T,将待测波片放入其中);参考光路中放置一只与信号光光路中规格性能相同的偏振器 P'_2 ,使得参考光与信号光具有相同的偏振态。信号光与参考光由探测器 D 接收,变成电信号进入 PC 进行数据归一化处理,从而得到波片的偏光干涉谱。

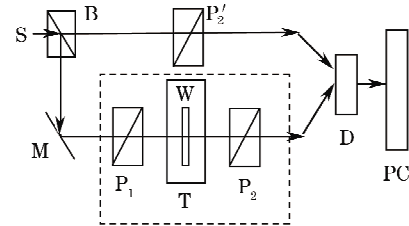


图 1 偏光干涉测量系统

Fig. 1 Schematic of the polarization interference measuring system

3 色散特性分析

选用厚度为 $813.5\ \mu\text{m}$ 的云母样品波片,将其放入信号光路的温控装置中,进行连续波长扫描。通过温控装置调节波片的温度,即可得到波片不同温度下的偏光干涉谱。波片在 298 K 和 373 K 时的偏光干涉谱如图 2 所示,可以清晰看出云母波片的偏光干涉谱随温度升高向短波长方向移动。将分光光度计 PC 系统自动精确采集的 298 K, 313 K, 328 K, 343 K, 358 K, 373 K 温度时的偏光干涉谱极值点所对应波长代入(3)式和(4)式,可以准确计算出该温度下波片的最大双折射率,结果如表 1 所示。

据表 1 中的数据可以做出云母晶体最大双折射率在 298 K 时随波长变化的曲线,如图 3 所示。

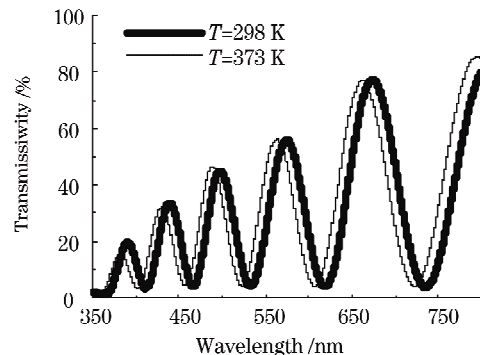
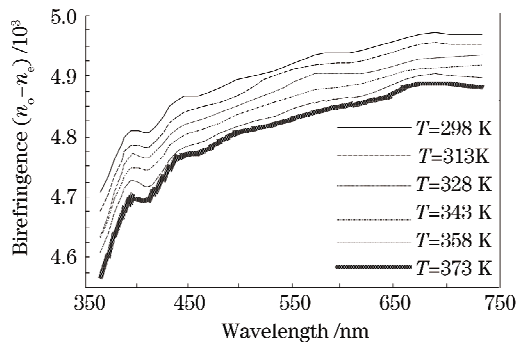
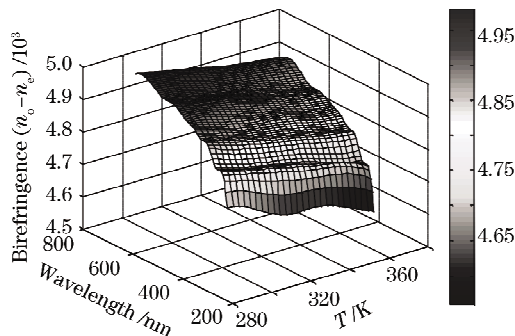


图 2 厚 $813.5\ \mu\text{m}$ 云母波片在 298 K 和 373 K 时的偏光干涉

Fig. 2 Experimental polarization interference spectrum of a $813.5\ \mu\text{m}$ thick mica wave plate at 298 K and 373 K

表 1 厚 813.5 μm 云母波片在不同波长和温度下云母晶体的最大双折射率值Table 1 Maximal birefringent index of a 813.5 μm thick mica crystal at different wavelength and temperature

T/K λ/nm	298	313	328	343	358	373
364.75	0.004707898	0.004677694	0.004634593	0.00463150	0.004607121	0.004567911
390.85	0.004804548	0.004782508	0.004765388	0.004742742	0.004725016	0.004690708
411.65	0.004807222	0.004781002	0.004763544	0.004744923	0.004716968	0.004696021
439.40	0.004861217	0.004834131	0.004812581	0.004796012	0.004776130	0.004762887
466.15	0.004870652	0.004851308	0.004830923	0.004813155	0.004792779	0.004775019
497.65	0.004893915	0.004867809	0.004848590	0.004837732	0.004817046	0.004804228
532.50	0.004909342	0.004899470	0.004874114	0.004856134	0.004834005	0.004820635
573.70	0.004936570	0.004918817	0.004904079	0.004878161	0.004857840	0.004840963
618.40	0.004941190	0.004925393	0.004904877	0.004888360	0.004865458	0.004847351
673.65	0.004968531	0.004952864	0.004928351	0.004911586	0.004901827	0.004885806
735.20	0.004970621	0.004952495	0.004936063	0.004917607	0.004898141	0.004881721

图 3 厚 813.5 μm 云母波片的最大双折射率随波长的变化Fig. 3 The variation of birefringence of a 813.5 μm mica with wavelength图 4 厚 813.5 μm 云母波片的最大双折射率随温度和波长的变化曲面Fig. 4 The variation of birefringence of a 813.5 μm mica with wavelength and temperature

曲线显示,从紫外至近红外光光谱范围内,云母晶体的最大双折射率随波长的增大而增大。通过最小二乘法进行曲线拟合,得到离散曲线的多项式拟合函数为:

$$\Delta n_{\lambda} = -0.13722 + 1.5985 \times 10^{-3} \lambda - 7.5 \times 10^{-6} \lambda^2 + 2 \times 10^{-8} \lambda^3 - 3 \times 10^{-11} \lambda^4 + 2 \times 10^{-14} \lambda^5 - 6 \times 10^{-18} \lambda^6. \quad (6)$$

其线性回归的相关系数 $R^2 = 0.9902$ 。此式即为云母晶体在 298 K 时的双折射率色散公式。通过此函数,我们可以非常方便地得到在温度 298 K 时从紫外至近红外光光谱范围内任意波长对应的云母晶体最大双折射率值,而不仅仅是某些特殊波长点上的数值。同样的方法可以拟合出云母晶体在 313 K, 328 K, 343 K, 358 K, 373 K 时的色散公式。

利用 MATLAB 程序做出最大双折射率随温度及波长变化的二维曲面图,如图 4 所示。分析知,在某一特定温度下,云母晶体的最大双折射率随着波长的增大而增大;某一特定波长下,最大双折射率随着温度的增大而减小,这说明最大双折射率既是温度的函数又是波长的函数。

4 结 论

本文通过对偏光干涉谱极值波长的精确判断,求解云母晶体的最大双折射率,得出了云母晶体 298 K 时在 350~750 nm 波段范围的双折射率色散表达式。由此式可计算出此波段范围内对应的 298 K 任意波长云母晶体的双折射率。利用 MATLAB 程序拟合云母晶体最大双折射率随温度和波长变化的曲面,直观简捷地观察到最大双折射率随温度和波长变化的规律。采用偏光干涉法测量,其精度可达到 10^{-5} 量级,且对样品无损伤和污染,为波片设计提供了重要的参考依据。

参 考 文 献

- 1 Song Lianke, Lin Changchun, Li Hua *et al.*. Impact of discrepant dispersions relations of birefringent indexes on mica waveplate designing[J]. *Qufu Normal University*, 2001, 27(2): 44~46
- 宋连科,林长春,李华等.云母双折射率色散关系不一致性对波片设计的影响[J].*曲阜师范大学学报*, 2001, 27(2): 44~46

- 2 Zhao Shuang, Wu Fuquan. The study on dispersive equation and thermal refractive index coefficient of quartz crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8): 1183~1185
赵爽, 吴福全. 石英晶体的色散方程及折射率温度系数[J]. *光子学报*, 2006, **35**(8): 1183~1185
- 3 Wang Ning, Liu Li, Wu Fuquan. The dispersion equation of iceland crystal[J]. *Qufu Normal University*, 2002, **28**(2): 63~64
王宁, 刘力, 吴福全. 冰洲石晶体的色散方程[J]. *曲阜师范大学学报*, 2002, **28**(2): 63~64
- 4 Li Hongxia, Wu Fuquan, Fan Jiyang. Sellmeier coefficients for refractive indices of calcite at crystal different temperatures[J]. *Journal of Applied Optics*, 2004, **25**(5): 7~10
李红霞, 吴福全, 范吉阳. 冰洲石晶体色散方程解析研究及折射率温度系数表达式[J]. *应用光学*, 2004, **25**(5): 7~10
- 5 Song Lianke, Li Guohua, Dai Zuoxiao *et al.*. Effect of temperature on phase delay of waveplates [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1997, **8**(6): 454~457
宋连科, 李国华, 代作晓. 波片延迟相位温度效应研究[J]. *光子·激光*, 1997, **8**(6): 454~457
- 6 Chen Zhenqiang, Zhang Ge, Shen Hongyuan *et al.*. Measurement of principal refractive indices and expression of thermal refractive index coefficients of emerald laser crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9): 843~846
陈振强, 张戈, 沈鸿元等. 绿宝石激光晶体的主折射率及温度系数的精确测量[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 843~846
- 7 Zhang Deying, Liu Wen, Chen Wenzhi *et al.*. Measurement of principal refractive indices and thermal refractive index coefficients of improved KTP crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(8): 1134~1137
张德颖, 刘文, 陈文志等. 改性KTP晶体主折射率及主折射率温度系数的测量[J]. *光学学报*, 1999, **19**(8): 1134~1137
- 8 Xu Hao, Zeng Zhengdong, Lin Wenxiong *et al.*. Measurements of principal refractive indices and their thermal coefficients of LiNbO₃ crystal heavily doped with magnesium[J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, **12**(10): 925~928
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[J]. *光学学报*, 1992, **12**(10): 925~928
- 9 Zhang He. Synthetic mica [M]. Shanghai: Science and Technology Press, 1962, 124
张何编译. 合成云母[M]. 上海: 上海科学技术出版社. 1962, 124
- 10 Zhang Dawei, Li Guohua, Song Lianke *et al.*. Study on the polarization interference spectrum of mica quarter wave-plate[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, **22**(2): 195~197
张大伟, 李国华, 宋连科等. 云母 1/4 波片偏振干涉谱的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, **22**(2): 195~197
- 11 Feng Weiwei, Lin Lihuang, Chen Ligang. Polarized-light interference spectrum of quartz wave plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1044~1048
冯伟伟, 林礼煌, 陈立刚. 石英波片偏光干涉谱的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1044~1048
- 12 Zhang Shan, Wu Fuquan, Hao Dianzhong *et al.*. A spectrometer method for determining thickness of quartz plate along the crystal axis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2082~2086
张珊, 吴福全, 郝殿中等. 测量石英晶体光轴方向厚度的光谱分析法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2082~2086