

文章编号: 0258-7025(2009)05-1190-05

# 云母晶体最大双折射率温度系数的测定

孔凡美 李国华 宋连科 郝殿中 宋致堂 马丽丽

(曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165)

**摘要** 由于温度会对云母晶体的最大双折射率产生影响,影响云母波片的使用精确度。利用偏光干涉法测定了云母晶体的最大双折射率温度系数。利用岛津 UV-3101PC 分光光度计,在其样品室中加入温控装置,测出 80  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ 和 813.5  $\mu\text{m}$ 三个不同厚度的云母波片在不同温度下的偏光干涉谱,发现干涉谱发生漂移。通过对偏光干涉谱极值点所对应波长的精确判断,准确计算出相应温度下波片的最大双折射率。求出云母晶体在紫外波段和可见光波段的最大双折射率温度系数表达式。实验是在波长精度为 0.05 nm 时进行的,测量的双折射率精度可达到  $10^{-5}$ 。

**关键词** 材料;云母晶体;最大双折射率;温度系数;偏光干涉

中图分类号 O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1190

## Measurement of Thermal Maximal Birefringent Index Coefficients of Mica Crystal

Kong Fanmei Li Guohua Song Lianke Hao Dianzhong Song Zhitang Ma Lili

(Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)

**Abstract** The variation of temperature has an effect on maximal birefringent index of mica crystal, which accordingly influences the use precision of mica wave-plate. In order to reduce this negative effect and improve the precision of mica wave-plate under different temperature conditions, the thermal maximal birefringent index coefficients of mica crystal is measured by using the method of polarization interference spectrum. Firstly, with Daojing UV-3101PC spectrophotometer, the polarization interference spectrums of mica wave-plates with thickness of 80  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$  and 813.5  $\mu\text{m}$  are measured and the spectral drift is discovered at different temperatures. Then through accurate judgment of extreme points of the polarization interference spectrums, the maximal birefringent index of the mica wave-plate is calculated exactly. At last, expressions of the thermal maximal birefringent index coefficients for mica crystal are deduced at visible and ultraviolet bands. The experiment is performed under the condition of 0.05 nm wavelength resolution and the measurement accuracy of birefringent index can reach  $10^{-5}$ .

**Key words** materials; mica crystal; maximal birefringent index coefficient; temperature coefficient; polarization interference

## 1 引言

折射率温度系数是光学晶体的重要参数。双折射率对光波而言,有较大的色散性。以平行晶体光轴的晶面作为通光面,光在晶体内垂直晶体光轴传播,其双折射率为最大值,它是波片设计时的重要参量,此值是温度、波长的函数,它与通光方向厚度共同决定了波片的相位延迟大小。双折射率的精确测量是一件较困难的工作。近些年来,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<sup>[1]</sup>,目前常用的测量方法如最小偏向角法、折光率计法、浸油法、偏光干涉法<sup>[2]</sup>等,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<sup>[3]</sup>,而对晶体双折射率随温度变化方面的研究较少<sup>[4~6]</sup>。作为制作单级波片的理想双折射材料云母晶体,由于其晶片太薄,极易产生多次反射,且孔径稍大时面形难以

收稿日期:2008-08-05;收到修改稿日期:2008-09-01

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测试的研究。

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方面的研究。

E-mail: ghli@163169.net

保证。所以云母晶体最大双折射率随温度变化的精确测量有着重要的意义。本文采用偏光干涉法测量的最大双折射率精度可达到  $10^{-5}$ ，通过对云母晶体的最大双折射率与温度的拟合，得出不同波谱段的折射率温度系数。

## 2 实验测试系统及方法

测量系统采用日本岛津 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。为了避免测量光强的绝对值以及消除系统光源不稳定性对测量结果的影响，系统采用双光路形式<sup>[7]</sup>：信号光经反射镜  $M$  反射进入偏光干涉系统(虚框部分为一个“三明治”结构，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，消除了因探测器对入射光的偏振敏感性不同而引起的系统测量误差。信号光与参考光由探测器  $D$  接收，变成电信号经放大滤波等处理进入 PC 进行数据归一化处理，从而得到波片的偏光干涉谱。

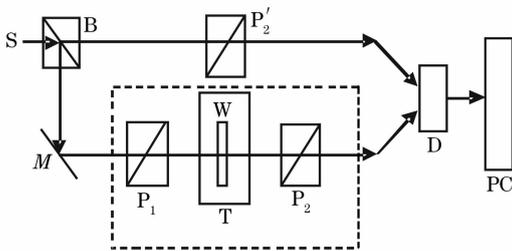


图 1 偏光干涉测量系统图

Fig. 1 Schematic diagram of the polarization interference measuring system

在常温 293 K 下，信号光路中不放入波片时，对两光路的光进行预校准，即进行连续波长扫描时，两光路的光强相等，此时透射率校准为 1。然后把云母波片按图 1 所示放入信号光路中，再进行连续波长扫描。通过温控装置调节波片的温度，即可得波片在不同温度下的偏光干涉谱，如图 2 所示。

## 3 测量原理

在实验测量系统中，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  $\theta$ ，波片的通光面与入射光垂直放置。当进行波长扫描

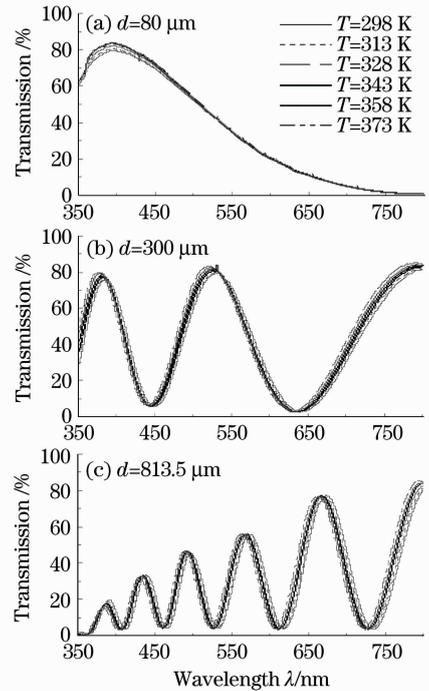


图 2 云母波片在不同温度下的偏光干涉谱

Fig. 2 Experimental polarization interference spectrum of a 300  $\mu\text{m}$  thick mica wave plate at different temperature. 通过系统的透射谱呈明显的正余弦振荡形式，这是发生了偏振干涉造成的<sup>[8]</sup>。光强为  $I_0$  的初始光经过此干涉系统后的出射光强  $I$  为

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

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

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

由(1),(2)式，当  $\theta, d$  为定值时，输出光强  $I$  由  $\Delta n$  和  $\lambda$  决定，当改变波长  $\lambda$  时，光强和双折射率  $\Delta n$  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表达式为

$$\Delta n_i = k_i \lambda_i / d \quad (\text{maximum}), \quad (3)$$

$$\Delta n_j = \left(k_j + \frac{1}{2}\right) \lambda_j / d \quad (\text{minimum}), \quad (4)$$

式中  $k_i$  为干涉级次， $\lambda_i$  和  $\lambda_j$  为干涉级  $k_i$  和其相邻极小干涉级对应的波长。

当改变云母波片的温度时，波片会产生热膨胀，双折射率也随温度变化，延迟量也产生变化，波片的

偏光干涉谱发生漂移。同一干涉级  $k_i$  所对应的波长  $\lambda_i$  也随温度发生了改变。故由(3),(4)两式可得

$$\Delta n_{i(T)} = k_i \lambda_{(T)i} / d_{(T)} \quad (\text{maximum}), \quad (5)$$

$$\Delta n_{j(T)} = \left(k_i + \frac{1}{2}\right) \lambda_{j(T)} / d_{(T)} \quad (\text{minimum}), \quad (6)$$

只要知道某一温度  $T$  时偏光干涉谱中  $k_i$  级所对应的波长  $\lambda_{i(T)}$  或  $\lambda_{j(T)}$  和厚度  $d_{(T)}$ , 就可求出此温度下的  $\Delta n_{(T)}$ 。

而云母晶体垂直于通光面方向的厚度满足关系<sup>[9]</sup>

$$d_{(T)} = d[1 + 7.37 \times 10^{-6}(T' - T)], \quad (7)$$

式中  $d$  为波片常温(293 K)下的厚度,  $T = 293$  K。

干涉级次  $k_i$  的确定<sup>[2]</sup>: 任选一极大值, 取其对应波长为  $\lambda_i$ , 并依据此波长时的低精度双折射率值<sup>[10]</sup>, 由(3)式求得一大致的  $k_i$  值, 此值一般情况下接近一整数, 此整数就是需要确定的  $k_i$ 。但当上述近似值取整困难时(此情况发生在短波区), 需要另择一极值重新试验, 直至确认符合取整要求。极值点的选取有一定的规律性, 因长波区极点稀少, 干涉

级次相应低, 各参数之间差距明显, 所以在此区域选点不易误判。一旦确定某一  $k_i$  值, 其他各极值点级次均按自然顺序依次增加或减小后被确定下来。

将分光光度计的 PC 系统在不同温度下自动精确采集的偏光干涉谱极值点所对应波长代入(6),(7)式, 可以准确计算出该温度下波片的最大双折射率。

## 4 测量结果及分析

当波长扫描精度为 0.05 nm, 实验测得常温下厚度分别 80  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$  和 813.5  $\mu\text{m}$  的云母波片在不同温度下的偏光干涉谱如图 2 中(a),(b),(c)所示。每个图像中从黑色谱线到白色谱线依次是在 298 K, 313 K, 328 K, 343 K, 358 K, 373 K 下测出的。明显可以看出, 当云母波片的温度升高时, 波片的偏光干涉谱整体向短波长方向发生漂移, 且温度变化越大, 漂移越明显。

将三个云母波片不同温度下谱线的波峰和波谷所对应的波长值分别代入(6),(7)式, 计算出相应的最大双折射率, 结果如表 1 所示。

表 1 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 mica crystal at different wavelengths and temperatures

$\times 10^3$

$d / \mu\text{m}$	$\lambda / \text{nm}$	$T / \text{K}$						
		298	313	328	343	358	373	
80	394.95	4.936875	4.934454	4.932659	4.931489	4.92907	4.927901	
	300	384.65	5.128867	5.116101	5.102872	5.052991	5.041104	5.029886
		449.55	5.24475	5.214424	5.194601	5.174784	5.153221	5.132829
		528.85	5.2885	5.274914	5.262336	5.232765	5.212195	5.30107
		641.55	5.34625	5.322328	5.296746	5.280749	5.264755	5.253346
813.5	364.75	4.707898	4.677694	4.634593	4.6315	4.607121	4.567911	
	390.85	4.804548	4.782508	4.765388	4.742742	4.725016	4.690708	
	411.65	4.807222	4.781002	4.763544	4.744923	4.716968	4.696021	
	439.4	4.861217	4.834131	4.812581	4.796012	4.77613	4.762887	
	466.15	4.870652	4.851308	4.830923	4.813155	4.792779	4.775019	
	497.65	4.893915	4.867809	4.84859	4.837732	4.817046	4.804228	
	532.5	4.909342	4.89947	4.874114	4.856134	4.834005	4.820635	
	573.7	4.93657	4.918817	4.904079	4.878161	4.85784	4.840963	
	618.4	4.94119	4.925393	4.904877	4.88836	4.865458	4.847351	
	673.65	4.968531	4.952864	4.928351	4.911586	4.901827	4.885806	
	735.2	4.970621	4.952495	4.936063	4.917607	4.898141	4.881721	

为了便于比较, 由表 1 中数据做出厚 80  $\mu\text{m}$  云母波片在 394.95 nm, 厚 300  $\mu\text{m}$  云母波片在 384.65 nm 和 528.85 nm, 厚 813.5  $\mu\text{m}$  云母波片在 390.85 nm, 532.50 nm 和 673.65 nm 处的最大双折射率随温度变化的曲线依次如图 3(a)~(f)所示。

比较发现, 相同温度下, 三个波片在波长非常相近处, 最大双折射率差别非常大, 这说明不同的云母

波片, 最大双折射率是不同的。

同一个云母波片在不同波长处最大双折射率是不同的。

可以看出同一波片在同一波长处, 不同温度下最大双折射率也是不同的。但所有波片在任何一个波长处的最大双折射率都随着温度的升高而减小。

由于不同的云母波片在不同波长处的最大双折

射率是不同的,为了更好地反映云母晶体最大双折射率随温度的变化情况,将表 1 中三个云母波片在

不同温度下的双折射率分别在紫外波段和可见光波段求平均值,如表 2 所示。

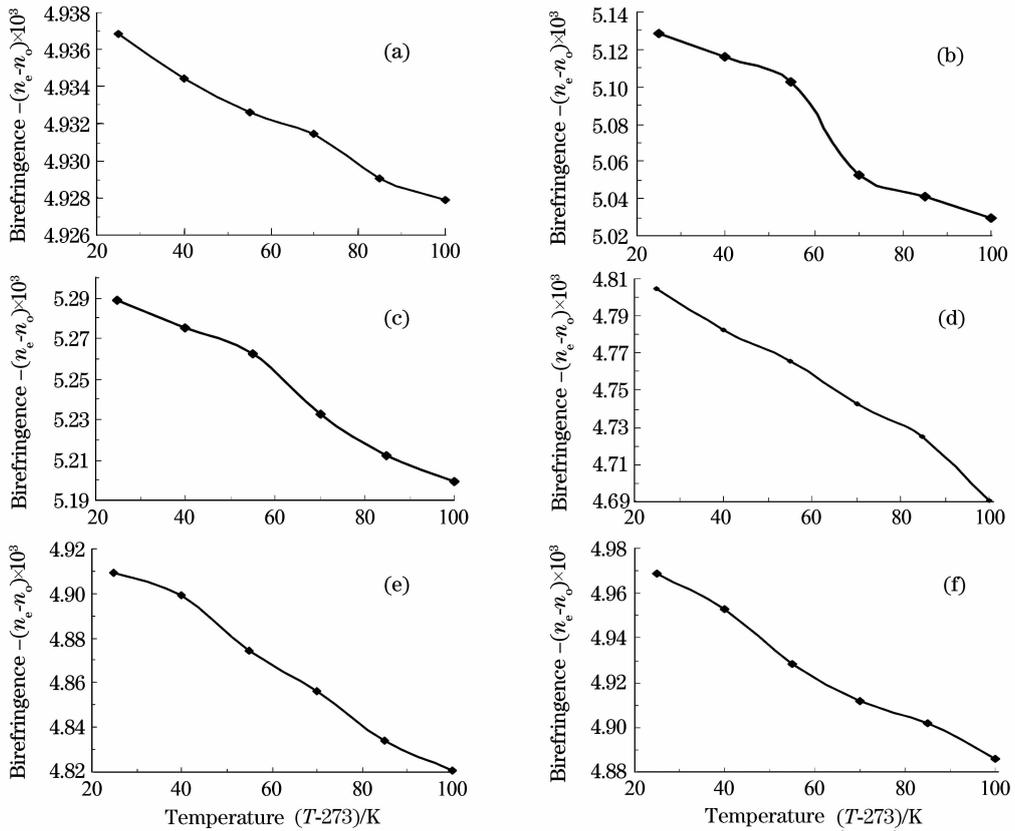


图 3 厚80  $\mu\text{m}$ 云母波片在394.95 nm(a),厚300  $\mu\text{m}$ 云母波片在384.65 nm(b)和529.85 nm(c),厚813.5  $\mu\text{m}$ 云母波片在390.85 nm(d),532.50 nm(e)和673.65 nm(f)处的最大双折射率随温度的变化

Fig. 3 Variation of birefringence of a 80  $\mu\text{m}$  thick mica with temperature at 394.95 nm wavelength (a), a 300  $\mu\text{m}$  mica with temperature at 384.65 nm (b) and 529.85 nm (c) wavelengths, a 813.5  $\mu\text{m}$  thick mica with temperature at 390.85 nm (d), 532.50 nm (e) and 673.65 nm (f) wavelengths

表 2 不同波谱范围和温度下云母晶体的最大双折射率

Table 2 Maximal birefringent index of mica crystal at different spectral bands and temperatures  $\times 10^3$

$T/\text{K}$	298	313	328	343	358	373
Ultraviolet	4.894547	4.877689	4.858878	4.839681	4.823579	4.804102
Visible	5.00323	4.98383	4.963067	4.944264	4.923364	4.907909

据表 2 中的数据可以做出云母晶体最大双折射率在紫外波段随温度的变化曲线,如图 4(a)所示。曲线显示,当温度在 298~373 K 之间变化时,云母晶体的最大双折射率随温度的增加而减小。通过最小二乘法进行曲线拟合,得到其多项式拟合函数为

$$\Delta n_{(T)} = 0.0049246 - 1.2 \times 10^{-6}(T - 273) - 2 \times 10^{-10}(T - 273)^2, \quad (8)$$

其线性回归的相关系数  $R^2 = 0.9985$ 。(8)式即为云母波片在紫外波段最大双折射率随温度变化的表达式。

同样的方法,云母晶体最大双折射率在可见光波段随温度的变化曲线,如图 4(b)所示,其多项式拟

合函数为

$$\Delta n_{(T)} = 0.0050401 - 1.5 \times 10^{-6}(T - 273) - 2 \times 10^{-9}(T - 273)^2, \quad (9)$$

其线性回归的相关系数  $R^2 = 0.9991$ 。(9)式即为云母波片在紫外波段最大双折射率随温度变化的表达式。(8),(9)两式中, $T$ 的取值范围在 298~373 K 之间。

## 5 结 论

在实际操作中,波片的通光面与入射光方向的不严格垂直,会导致偏光干涉谱的一些偏差,从而带

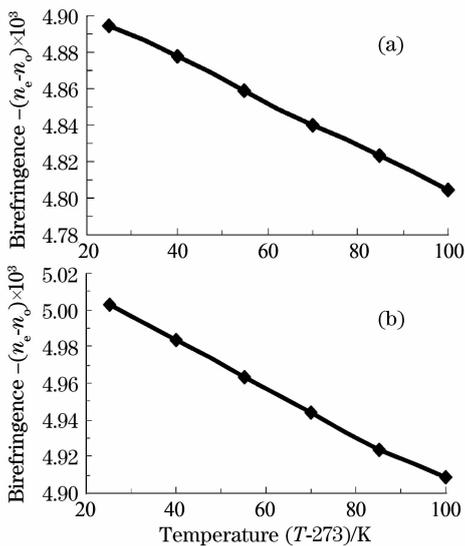


图4 紫外波段(a)和可见波段(b)云母晶体的最大双折射率随温度的变化

Fig. 4 Variation of birefringence of mica with temperature at ultraviolet spectral band (a) and visible spectral region (b)

来误差。在误差允许的范围內,要求夹角不能超过 $1^\circ$ ,波片的平行度误差不大于 $5''$ 。实验中使待测云母波片的快轴与偏光棱镜的透射方向夹角为 $\pi/4$ ,由此得到的偏光干涉谱的振荡幅度最大,便于峰、谷波长的精确判定。因云母波片的吸收使得偏光干涉系统的透射率的峰值不能为1,但这不影响峰、谷波长的判定。偏光干涉谱的准确度直接影响到标征延迟器件光学参量的精确度。在同样的实验条件下,选择较长光谱波段,小的光谱分辨力,能提高测量精度<sup>[11]</sup>。岛津UV-3101PC分光光度计波长精度最高可以达到0.05 nm,可对偏光干涉谱进行精确测量,测量的双折射率精度可达到 $10^{-5}$ 。

本文利用偏光干涉法测量云母波片最大双折射率温度系数,得到了云母晶体在紫外波段和可见波段的最大折射率温度系数表达式。实验采用的仪器调整自动化,微机控制自动数据采集处理,波长分辨率高,最大程度地消除了人为影响。此测量方法直观、简单,测量结果精确,是一种有实际意义的方法。最大双折射率精度可达到 $10^{-5}$ ,在紫外波段和可见波段的最大折射率温度系数表达式具有重要的参考价

值,为云母晶体器件的设计与使用提供了理论依据。

## 参 考 文 献

- Feng Weiwei, Song Lianke, Chen Ligang *et al.*. The study of the relation between circularly polarized light's refractive rate and wavelength [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(6):639~641  
冯伟伟,宋连科,陈立刚等. 旋光晶体中圆偏振光折射率与波长的关系探讨[J]. *激光技术*, 2004, **28**(6):639~641
- Song Lianke, Li Guohua, Dai Zuoxiao *et al.*. Continuous birefringence measurement in 0.29 to 2.5  $\mu\text{m}$  range by polarization interfering [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1996, **7**(6):356~360  
宋连科,李国华,代作晓等. 0.29~2.5  $\mu\text{m}$  波段晶体双折射率的连续偏光干涉测量[J]. *光电子·激光*, 1996, **7**(6):356~360
- Xu Yanqiang, Song Lianke, Zhao Peitao *et al.*. Birefringence measurements of muscovite mica with wavelength modulation compensation method [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1):99~100  
许言强,宋连科,赵培涛等. 测量云母双折射率的波长调制补偿方法[J]. *激光技术*, 2006, **30**(1):99~100
- 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
- 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
- Xu Ha, Shen Hongyuan. Expressions of thermal refractive index coefficients for LiNbO<sub>3</sub> crystal heavily doped with magnesium [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(4):393~397  
徐浩,沈鸿元. 高掺镁LiNbO<sub>3</sub>晶体折射率温度系数的表达式[J]. *光学学报*, 1994, **14**(4):393~397
- 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
- Liao Yanbiao. *Polarizing Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 100~102  
廖延彪. *偏振光学*[M]. 北京:科学出版社, 2003. 100~102
- Zhang He. *Synthetic Mica* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1962. 124  
张何. *合成云母*[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1962. 124
- Li Jingzhen. *Handbook of Optics* [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1986. 1304~1336  
李景镇. *光学手册*[M]. 陕西:陕西科学技术出版社, 1986. 1304~1336
- Weiwei Feng, Lihuang Lin, Ligang Chen *et al.*. A spectroscopic method for determining thickness of quartz wave plate [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(12):705~708