

文章编号: 0253-2239(2007)11-2082-5

测量石英晶体光轴方向厚度的光谱分析法

张 珊 吴福全 郝殿中 王海峰

(曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 273165)

摘要: 基于石英晶体的旋光色散原理, 提出了一种测量石英晶体光轴方向厚度的光谱分析方法。利用光学矩阵方法对测量原理进行了分析, 指出通过测量由两个正交的偏光镜和待测石英晶体所组成的系统的透射曲线就可以精确计算出待测石英晶体的厚度。在实验的过程中进行了误差分析, 分析表明选取长的测量波段、低的扫描速度、短的响应时间和小的狭缝宽度都有利于提高测量精度, 并从理论上证明所得厚度的精度高于电子数显千分尺的测量精度。利用三种不同的方法对两块不同厚度的石英晶体进行了测量, 测量结果表明利用提出的方法所得厚度的精度可以达到 $0.1 \mu\text{m}$, 与理论分析的结果相一致。

关键词: 光谱学; 光谱分析法; 旋光晶体; 透射曲线; 厚度误差

中图分类号: O433.1 文献标识码: A

A Spectrometer Method for Determining Thickness of Quartz Plate Along the Crystal Axis

Zhang Shan Wu Fuquan Hao Dianzhong Wang Haifeng

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

Abstract: A spectrometer method for determining the thickness of quartz plate along the crystal axis is presented based on the optical rotatory dispersion effect of the quartz. Its operating principle is analyzed by means of matrix formulation, and the result indicates that the thickness of the quartz plate along the crystal axis will be exactly obtained by accurate judgment of the transmission curve of a quartz plate sandwiched between two crossed polarizers. The error in the experiment is analyzed and it is found that the measuring accuracy will be improved by choosing longer wave band, lower scan speed, shorter response time and smaller slit width. At the same time, the theoretical analysis proves that the measuring accuracy of this method is higher than the digital micrometer's. In the end, two quartz plates with different thicknesses are measured by three different methods, respectively. It is shown that the accuracy of the tested thickness is $0.1 \mu\text{m}$ and is in good agreement with the theoretical prediction.

Key word: spectroscopy; spectrometer method; optically active crystal; transmission curve; thickness error

1 引 言

在所有的天然双折射材料中, 石英是分布最广的一种。石英晶体因为具有机械强度高、透射光谱范围宽、抗损伤阈值高、物理化学性质稳定等优点而被广泛地用于制作石英振子、偏光器件、相位延迟器件以及旋光器件^[1,2]。众所周知, 当一束单色线偏振光在石英晶体中沿晶体光轴方向传播时, 不发生

双折射现象, 但振动面会发生转动, 这就是各向异性晶体中的旋光现象^[3]。旋光性是石英晶体重要性质之一, 由石英晶体制作的旋光器件在很多方面都有重要的应用^[4,5]。因此对石英晶体沿光轴方向厚度的精确测量是非常有必要的。人们曾经做过对石英晶体光轴方向厚度的光学测量研究^[6], 即通过测量单色线偏振光经过石英晶体后偏振面旋转的角度

作者简介: 张 珊(1984—), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事偏光器件理论与参量测试等方面的研究。

E-mail: qfzhangshan@163.com

导师简介: 吴福全(1952—), 男, 山东郓城人, 教授, 主要从事偏光检测与器件以及薄膜光学等方面的研究。

E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期: 2007-03-16; 收到修改稿日期: 2007-05-14

来计算出石英晶体的厚度,但这种方法并不能最终确定所测晶体的厚度^[7]。最近又有人提出了一种利用分光光度计测量石英晶体厚度的方法^[8],它能直接确定所测晶体的厚度,精度高且不会对晶体表面造成损伤。但它没有考虑沿晶体光轴方向的特殊情况。本文以石英晶体为例,给出了利用分光光度计确定旋光晶体光轴方向厚度的原理,并且进行了实验验证,证明这是一种方便、有效、精确的测量方法。

2 测量原理

用于测量石英晶体光轴方向厚度的光路和建立的主轴坐标系如图 1 所示。

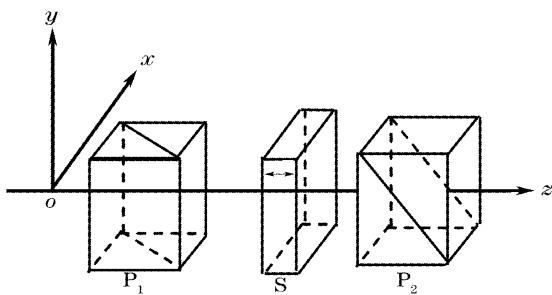


图 1 由两个正交的偏光镜和待测石英晶体组成的测试系统光路图

Fig. 1 Light path of the measuring system composed of two crossed polarizers and the tested quartz plate

其中主轴坐标系的 x 轴沿水平方向, y 轴沿竖直方向, z 轴沿入射光的传播方向。 P_1 、 P_2 为两个相同的偏光镜,通光面均与 xoy 平面平行。 P_1 的透振方向与 x 轴平行, P_2 的透振方向与 x 轴垂直。 S 为待测石英晶体,光轴垂直于光学表面且沿 z 轴方向。则 P_1 、 P_2 和 S 的米勒(Müller)矩阵分别为^[9]

$$M_{P_1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$M_{P_2} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$M_S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta(\lambda) & -\sin 2\theta(\lambda) & 0 \\ 0 & \sin 2\theta(\lambda) & \cos 2\theta(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 $\theta(\lambda)$ 为石英晶体的旋光角,满足^[3]

$$\theta(\lambda) = \alpha(\lambda) \cdot d, \quad (4)$$

式中 d 为石英晶体的厚度,单位为 mm, $\alpha(\lambda)$ 为石英

晶体的旋光率,单位为 $^\circ/\text{mm}$ 。 α 的值与波长、物质的性质、温度^[10] 等因素有关。常温下石英晶体的旋光率与波长的关系满足^[11]

$$\alpha = \frac{9.5639}{\lambda^2 - 0.0127493} - \frac{2.3113}{\lambda^2 - 0.000974} - 0.1905, \quad (5)$$

式中 λ 为入射光的波长,单位为 μm 。

若入射光为单色自然光 I'_0 , 其斯托克斯参量为

$$S_0 = I'_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

则经过如图 1 所示的系统后出射光的斯托克斯参量为

$$S_{\text{out}} = M_{P_2} M_S M_{P_1} S_{\text{in}} = \frac{\sin^2 \theta(\lambda) \cdot I'_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

若令从 P_1 出射的光强为 I_0 ($I_0 = I'_0/2$), 并忽略光在各器件上的损失,则透射比为

$$T = \sin^2 \theta(\lambda). \quad (8)$$

石英晶体的厚度分别为 10 mm 和 15 mm 时,由(4)式和(8)式作出的理论透射曲线(300~1200 nm)如图 2 所示。由图 2 可以看出,透射曲线与石英晶体的厚度有关,对应不同厚度的石英晶体,透射曲线达到最大或最小值时所对应的波长是不同的。以厚度为 15 mm 的石英晶体为例,为了分析方便,我们作出 400~900 nm 波段范围内的理论透射曲线,如图 3 所示。由(4)式、(8)式可以看出,当透射曲线达到波谷即透射比达到最小值时满足公式

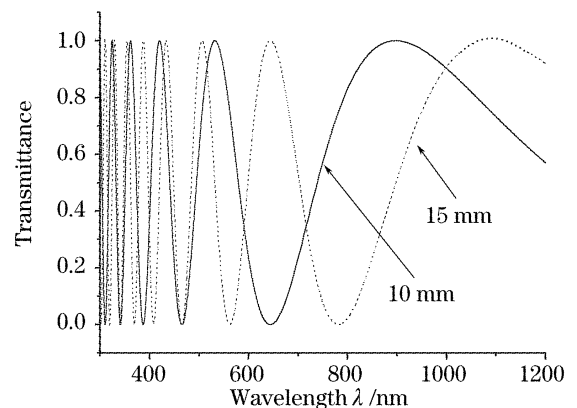


图 2 两正交偏光镜间石英晶体的厚度分别为 10 mm 和 15 mm 时,系统的理论透射曲线

Fig. 2 Theoretical transmission curve of the tested quartz plate sandwiched between two crossed polarizers with plate thicknesses of 10 mm and 15 mm

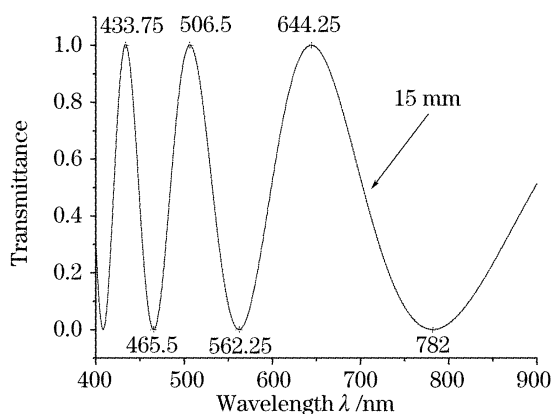


图 3 两正交偏光镜间石英晶体的厚度为 15 mm 时, 400~900 nm 波段范围内, 系统的理论透射曲线

Fig. 3 Theoretical transmission curve at 400~900 nm for a 15 mm thick quartz plate sandwiched between two crossed polarizers

$$\alpha(\lambda_m)d = 180^\circ \cdot m, \quad (9)$$

其中 m 是波谷的级数, 取正整数且随 λ 的增大而减小。于是通过从图中分别选取两个清晰且易测量的

波谷就可以得出石英晶体沿光轴方向厚度 d 的表达式为

$$d = \frac{180^\circ \cdot (m - n)}{\alpha(\lambda_m) - \alpha(\lambda_n)}, \quad (10)$$

其中 λ_m, λ_n 分别是所选取的第 m, n 级波谷所对应的波长。 $\alpha(\lambda_m), \alpha(\lambda_n)$ 分别是与波长 λ_m, λ_n 所对应的旋光率。因此利用如图 1 所示系统的透射曲线和石英晶体的旋光色散就可以准确地计算出所测量的石英晶体光轴方向的厚度。

同理也可以通过研究透射曲线上任意两个波峰来求出石英晶体光轴方向厚度的 d 。

3 测试方法与误差分析

3.1 测试方法

测试采用双光路方法, 整个测试系统主要部分是岛津 UV-3101PC 型分光光度计。测试光路如图 4 所示。

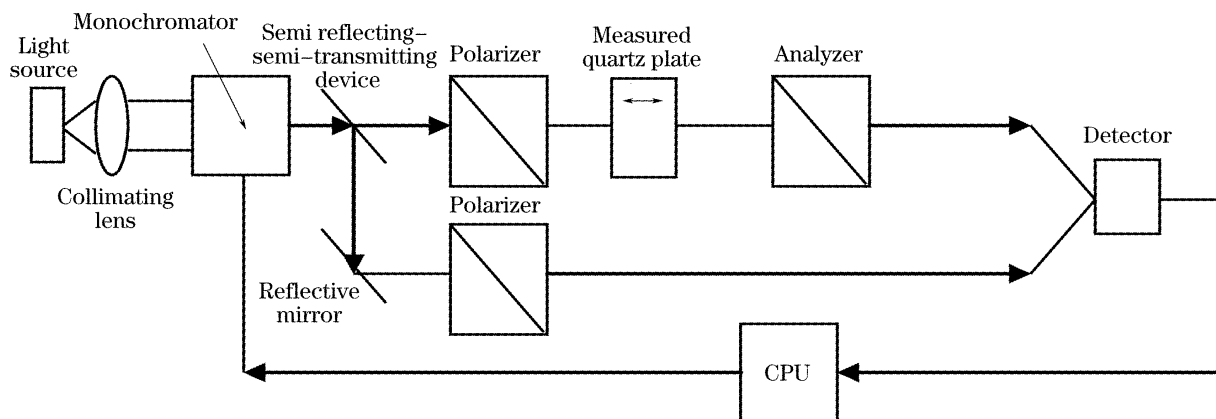


图 4 测试仪器

Fig. 4 Measuring equipment

首先在没有放入待测石英晶体时, 旋转检偏镜在保证光线正入射的同时使检偏镜和起偏镜的透振方向相互垂直。调整时利用光屏接收检偏镜后的光斑直到检偏镜后的光斑消失为止。此时利用分光光度计测得的透射率应为零。

然后, 将光轴垂直于光学表面的待测石英晶体放在起偏镜和检偏镜之间, 调整光线垂直入射于晶体的通光面。利用分光光度计即可测量得到相应的透射曲线。

最后在测得曲线上分别选取两个清晰且容易测量的波峰或波谷, 确定其所对应的波长, 代入公式 (9) 即可精确得到被测石英晶体沿光轴方向的厚度。

3.2 误差分析

由 (10) 式可知, 厚度误差 Δd 与透射曲线的波谷所对应的波长 λ_m, λ_n 的确定精度有关, 而透射曲线的波谷所对应波长 λ_m, λ_n 的确定又受到光谱分辨力大小 $\Delta \lambda$ 的影响, 设确定值的误差分别为 $\Delta \lambda_m, \Delta \lambda_n$, 则石英晶体的厚度误差 Δd 可表示为

$$\Delta d = \left| \frac{\partial d}{\partial \lambda_m} \right| \Delta \lambda_m + \left| \frac{\partial d}{\partial \lambda_n} \right| \Delta \lambda_n = \left| -\frac{180^\circ \cdot (m - n)}{[\alpha(\lambda_m) - \alpha(\lambda_n)]^2} \left[\left| \frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda_m} + \left| \frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda_n} \right] \right| \Delta \lambda = \frac{d^2}{180^\circ \cdot (m - n)} \left[-\frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \Big|_{\lambda_m} - \frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \Big|_{\lambda_n} \right] \Delta \lambda, \quad (11)$$

进而可得相对误差的表达式为

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{d}{180^\circ \cdot (m - n)} \left[-\frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \Big|_{\lambda_m} - \frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \Big|_{\lambda_n} \right] \Delta\lambda. \tag{12}$$

根据(11)式可以计算出在不同的样品厚度 d 、测量波段和光谱分辨力 $\Delta\lambda$ 且 $m - n = 1$ 时,测试厚度误差 Δd 的值如表 1 所示。

表 1 不同的样品厚度 d 、测量波段和光谱分辨力 $\Delta\lambda$ 且 $m - n = 1$ 时,测试厚度误差 Δd 的值

Table 1 Thickness errors Δd for different thicknesses d of sample at different wave bands with different spectral resolutions $\Delta\lambda$ and $m - n = 1$

$\Delta\lambda$ /nm	d /mm	Δd / μm at 285~315 nm	Δd / μm at 330~400 nm	Δd / μm at 450~750 nm
0.05	10	0.045	0.022	0.006
	15	0.106	0.054	0.015
0.25	10	0.229	0.112	0.037
	15	0.530	0.273	0.081

从表 1 可以看出:1)随着测量波段的增大,测量厚度的误差值减小。2)随着测试样品厚度和光谱分辨力的增大,测量厚度的误差值增大。(3)利用此方法所得厚度的精度大于电子数显千分尺的测量精度 ($1 \mu\text{m}$)。

由(12)式可知对于某一确定的石英晶体,相对误差的大小与 $\left[-\frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \Big|_{\lambda_m} - \frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \Big|_{\lambda_n} \right]$ 和光谱分辨力 $\Delta\lambda$ 的大小有关。由(5)式可知 $-\frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda}$ 的值随波长的增大而减小,因此在测量时应尽量选取长的测量波段。这些都与从表 1 中得出的结论一致。由文献[12]可知,光谱分辨力大小受扫描速度、响应时间、狭缝宽度等测试参量的影响,且扫描速度和响应时间对峰值波长的测定影响较大,因此需适当设定分光光度计的各参量,来减小测量时的相对误差以提高测量精度。

在 250~2500 nm 和 220~1500 nm 波段范围内,分别对两块厚度为 22.353 mm 和 8.783 mm(经

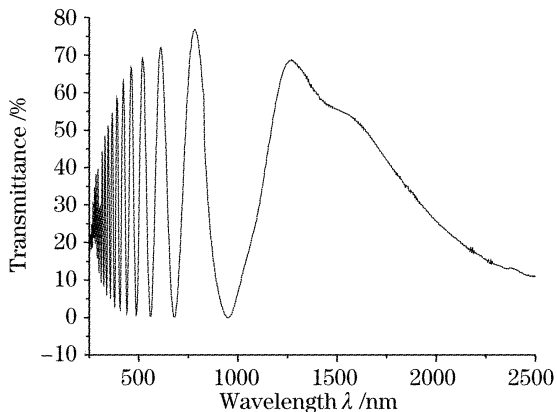


图 5 两正交偏光镜间石英晶体厚度为 22.353 mm, 250~2500 nm 波段范围内,系统的测试透射曲线

Fig.5 The measured transmission curve of a quartz plate sandwiched between two crossed polarizers at 250~2500 nm with the plate thickness of 22.353 mm

电子数显千分尺多次测量的平均值)光轴垂直于表面的石英晶体进行了测试,测试结果如图 5、图 6 所示。从图中可以看出:两块石英晶体的透射曲线的可见光波段变化较均匀和规则,紫外波段曲线的最大值和最小值随波长的变短逐渐接近,红外波段曲线强度变化不规则,因此我们均选取可见光波段作为研究波段。

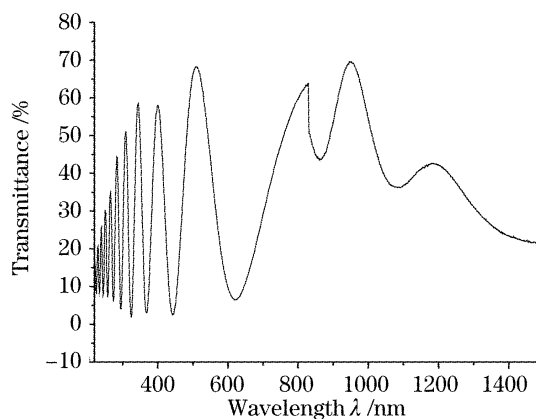


图 6 两正交偏光镜间石英晶体厚度为 8.783 mm, 220~1500 nm 波段范围内,系统的测试透射曲线

Fig.6 The measured transmission curve of a quartz plate sandwiched between two crossed polarizers at 220~1500 nm with the plate thickness of 8.783 mm

设定分光光度计的扫描速度为慢、狭缝宽度为 1.0 nm、取样间隔为 0.05 nm,在 400~750 nm 和 250~600 nm 波段范围内,又分别对这两块晶体进行了测量,测得的透射曲线如图 7、图 8 所示。分别在图 7 中选取波长为 562.95 nm 和 684.60 nm,图 8 中选取波长为 365.80 nm 和 438.90 nm 的波谷作为研究对象,经计算得到晶体的厚度分别为 22.35278 mm 和 8.78316 mm。

将测量值保留小数点后 3 位有效数字,可得到两块石英晶体的厚度分别为 22.353 mm 和 8.783 mm,与经电子数显千分尺所测厚度一致,表明这种测量

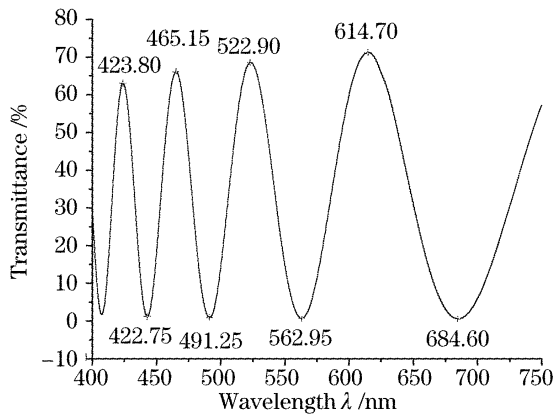


图 7 两正交偏光镜间石英晶体厚度为 22.353 mm, 400~750 nm 波段范围内,系统的测试透射曲线

Fig. 7 The measured transmission curve of a quartz plate sandwiched between two crossed polarizers at 400~750 nm with the plate thickness of 22.353 mm

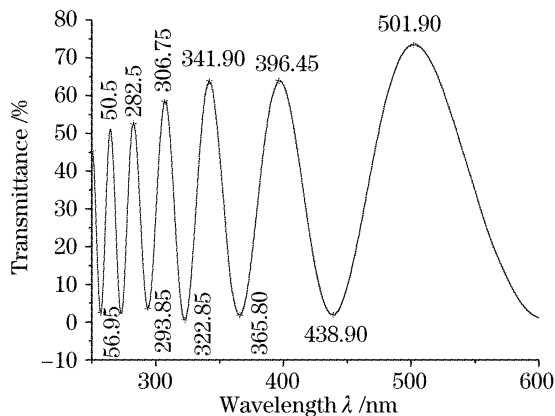


图 8 两正交偏光镜间石英晶体厚度为 8.783 mm, 250~600 nm 波段范围内,系统的测试透射曲线

Fig. 8 The measured transmission curve of a quartz plate sandwiched between two crossed polarizers at 250~600 nm with the plate thickness of 8.783 mm

光轴方向旋光晶体厚度的方法是正确的。

为了验证测量结果的正确性,又采用了文献[6]所介绍的方法(通过测量入射线偏振光电矢量振动方向的旋转角度来计算石英晶体光轴方向的厚度)对同一样品进行了测量。这种测量方法的最大测试误差为 0.0002 mm。两块样品所测结果分别为: 22.3538 mm 和 8.7832 mm。因此将这三种方法得到的测试厚度进行比较可以看出,利用本文介绍的方法所得厚度的精度可以达到 $0.1\mu\text{m}$, 高于电子数显千分尺的测量精度。

4 结 论

本文介绍了一种测量石英晶体光轴方向厚度的光谱测量方法并对其测量原理和误差进行了详细的分析。通过误差分析可知在测量的过程中,分光光

度计测量参量(测量波段、扫描速度、响应时间、狭缝宽度)的设定将决定测量误差的大小,综合多方面因素提出了提高测量精度的方法:选取长的测量波段、低的扫描速度、短的响应时间和小的狭缝宽度。分别从理论和实验上证明了此方法的测量精度高于电子数显千分尺且不会对晶体的光学表面造成损伤,是一种方便有效的测量方法。

参 考 文 献

- 1 Cai Xijie, Xu Faming, Lin Zunqi *et al.*. An assemble of a half-wave plate and polarizers for precision controlled attenuator[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **A26**(1): 47~51 (in Chinese)
蔡希洁,许发明,林尊琪等. 用于精密衰减控制的半波片和偏振片组合装置[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(1): 47~51
- 2 Hou Jie, Yang Kuntao, Wu Li *et al.*. Study of infrared broadband compound waveplate[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 281~283 (in Chinese)
侯杰,杨坤涛,吴励等. 红外复合宽带波片的研制[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 281~283
- 3 Liao Yanbiao. *Polarized Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 133~135 (in Chinese)
廖延彪. *偏振光学*[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 133~135
- 4 Chun Ye. Wavelength-tunable spectral filters based on the optical rotatory dispersion effect[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(22): 4505~4513
- 5 Li Biao, Chen Huaixin, Sui Zhan *et al.*. Spatial filtering in near field based on rotating and polarizing property of crystal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(1): 41~44 (in Chinese)
李彪,陈怀新,隋展等. 基于晶体旋光效应的近场光学空间滤波[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(1): 41~44
- 6 Feng Taizhong, Wu Fuquan, Li Guohua. Optical measurement of the thickness along the quartz crystal axis[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(2): 124~125 (in Chinese)
封太忠,吴福全,李国华. 石英晶体光轴方向厚度的光学测量研究[J]. *激光技术*, 2003, **27**(2): 124~125
- 7 Wen Jianhui. A logical analyse in measuring the optical rotation of a solution [J]. *J. Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2005, **28**(3): 301~302 (in Chinese)
温建辉. 旋光度确定方法的逻辑分析[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2005, **28**(3): 301~302
- 8 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
- 9 Yan Jixiang, Wei Guanghui, Ha Liuzhu *et al.*. *Matrix Optics* [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995. 178~189 (in Chinese)
阎吉祥,魏光辉,哈流柱等. *矩阵光学*[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995. 178~189
- 10 Su Fufang, Wu Fuquan. The research of thermal effect on the rotatory power of quartz[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 670~672 (in Chinese)
苏富芳,吴福全. 石英晶体旋光性的温度效应测试研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 670~672
- 11 Chun Ye. Low-loss tunable filter based on optical rotatory dispersion[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(6): 1162~1168
- 12 Chen Shufang, Zhou Fengkun. The effect of variation of instrument factors on spectral measurement accuracy [J]. *J. Lighting Engineering*, 1995, **6**(3): 31~36 (in Chinese)
陈淑芳,周丰昆. 光谱仪器测试参数对测试结果的影响[J]. *照明工程学报*, 1995, **6**(3): 31~36