

多级石英晶体旋光光学滤波器的滤波特性

张 姗 吴福全[†] 吴闻迪

(曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 273165)

(2007 年 6 月 7 日收到, 2008 年 2 月 27 日收到修改稿)

根据石英晶体的旋光色散特性, 利用光学矩阵方法对多级石英晶体旋光光学滤波器的滤波原理进行了详细的理论分析, 推导出多级石英晶体旋光光学滤波器的透射主峰波长和通带半宽度的计算公式. 利用分光光度计对单级和多级石英晶体旋光光学滤波器的滤波特性进行了实验研究. 结果表明单级和多级石英晶体旋光光学滤波器滤波特性与理论曲线一致. 从理论和实验上证明了多级石英晶体旋光光学滤波器与单级相比通带半宽度得到了有效的压缩, 且随滤波器级数的增大, 压缩的程度也随之增大.

关键词: 光学滤波器, 偏振, 石英晶体, 旋光色散

PACC: 4280C, 4225J, 4270E, 7820E

1. 引 言

光学滤波器是能按照需要改变入射光的光谱强度分布, 在连续光谱中透过一定宽度的光谱带或在线状光谱中用来提取某些辐射的波长选择器件^[1]. 最初在天文学中用于观测太阳光谱^[2], 随着激光技术的发展, 滤波器也被广泛地用于激光滤波^[3]、波长信号分离^[4]、机载水文测试^[5]、遥感^[6]、光纤通信^[7]等领域. 滤波器的种类很多, 根据不同的滤波原理可分为选择吸收滤波器、多光束干涉(薄膜)滤波器、色散滤波器^[8]、双折射滤波器等等. 2003 年, 芬兰欧鲁大学的 Ye^[9]首次报道了一种利用旋光色散特性研制而成的新型可调谐光学滤波器^[9], 它是将 n 个厚度比分别为 $1:2:4:8:\dots:2^{n-1}$ 的旋光器依次放置在 $n+1$ 个方位角成比例的偏振片之间构成的, 只需通过改变滤波器中每级出射偏振片的方位角就可以对出射光进行调谐. 这种滤波器具有制作方便、透射率高且没有使用波段限制等优点. 目前国内对这种新型可调谐光学滤波器的研究尚无人涉足; Ye^[10]对这种滤波器的研究侧重于它的可调谐性, 而对它的滤波特性分析较少. 本文以石英晶体作为旋光器, 对这种新型多级石英晶体旋光光学滤波器的滤波性能进行研究.

2. 滤波原理

为了分析多级石英晶体旋光光学滤波器的滤波原理, 我们首先以单级为例, 建立的主轴坐标系和单级旋光光学滤波器的结构如图 1 所示. 图 1 中, P_1 , P_2 为两平行放置的偏光镜且透振方向相同, S 为由光轴垂直于通光表面的石英晶体加工而成的平行平板. P_1 , P_2 和 S 的 Muller 矩阵为^[11]

$$M_{P_1} = M_{P_2} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

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

式中 θ 为石英晶体的旋光角^[12],

$$\theta = \alpha d. \quad (3)$$

这里 d 为石英晶体光轴方向的厚度, 单位为 mm; α 为石英晶体的旋光系数, 单位为 $(^\circ)\text{mm}$. α 的值与波长、物质的性质、温度^[13]等因素有关. 常温下, 石英晶体的旋光系数与波长的关系由下式给出^[14]:

[†] E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn

$$\alpha(\lambda) = \frac{9.5639}{\lambda^2 - 0.0127493} - \frac{2.3113}{\lambda^2 - 0.000974} - 0.1905. \quad (4)$$

式中 λ 为入射光的波长 ,单位为 μm .

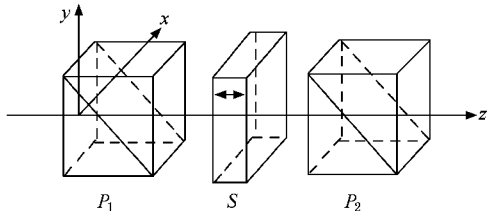


图 1 单级石英晶体旋光光学滤波器结构示意图

若入射光为自然光 ,其 Stokes 参量为

$$S_0 = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

那么经过单级石英晶体旋光光学滤波器后出射光的 Stokes 参量为

$$S_1 = M_1 M_2 M_1 S_0 = \frac{I_0 \cos^2[\alpha(\lambda)d]}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

这里 I_0 为入射自然光光强 .若忽略光在各器件上的

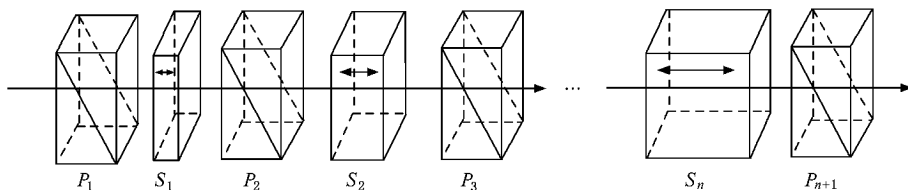


图 2 n 级石英晶体旋光光学滤波器结构示意图

从 (9) 式可以看出 ,多级石英晶体旋光光学滤波器的透射比为各单级的透射比之积 ,且与滤波器中最薄的石英晶体的厚度 d_1 、滤波器的级数 n 以及入射波长 λ 有关 .设温度为 $23\text{ }^\circ\text{C}$, $d_1 = 6.666\text{ mm}$ 根据 (9) 式得到的单级和多级 (二级、三级) 石英晶体旋光光学滤波器的透射曲线如图 3 所示 .由图 3 可以看出 ,多级石英晶体旋光光学滤波器可以达到在连续光谱中透过一定宽度光谱的滤波目的 .由图 3 还可以看出 ,随着滤波器级数的增加 ,通带半宽度得到了

损失 ,令从 P_1 出射的光强为 I_0 ($I_0 = I'_0/2$) ,则透射光强为

$$I = I_0 \cos^2[\alpha(\lambda)d],$$

透射比为

$$T = \cos^2[\alpha(\lambda)d].$$

图 2 为 n 级石英晶体旋光光学滤波器的结构示意图 .由上述可知 :当一束自然光经过由 n 块石英晶体 (厚度分别为 $d_1, 2d_1, \dots, 2^{n-1}d_1$,旋光角分别为 $\theta_1, 2\theta_1, \dots, 2^{n-1}\theta_1$) 和 $n+1$ 块 ($n=2, 3, 4, \dots$) 偏光镜 (透振方向相同) 所组成的 n 级石英晶体旋光光学滤波器后 ,出射光的 Stokes 参量为

$$S_n = \frac{1}{2} I'_0 \cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \dots \times \cos^2 2^{n-1}[\alpha(\lambda)d_1] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

其透射光强为

$$I = I_0 \cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \dots \times \cos^2 2^{n-1}[\alpha(\lambda)d_1], \quad (8)$$

透射比为

$$T = T_1 T_2 \dots T_n = \prod_{l=1}^n \cos^2 \{2^{l-1}[\alpha(\lambda)d_1]\} = \left(\frac{\sin 2^n[\alpha(\lambda)d_1]}{2^n \sin[\alpha(\lambda)d_1]} \right)^2. \quad (9)$$

压缩 .

作为比较 ,我们根据 (9) 式得到的 $d = 26.664\text{ mm}$ 的单级和 $d_1 = 6.666\text{ mm}$ 的三级石英晶体旋光光学滤波器的透射曲线如图 4 所示 .

3. 透射主峰波长 λ_K 与通带半宽度

$$\Delta\lambda_{\text{HW},K}^n$$

我们将滤波器透射比达到最大时所对应的波长

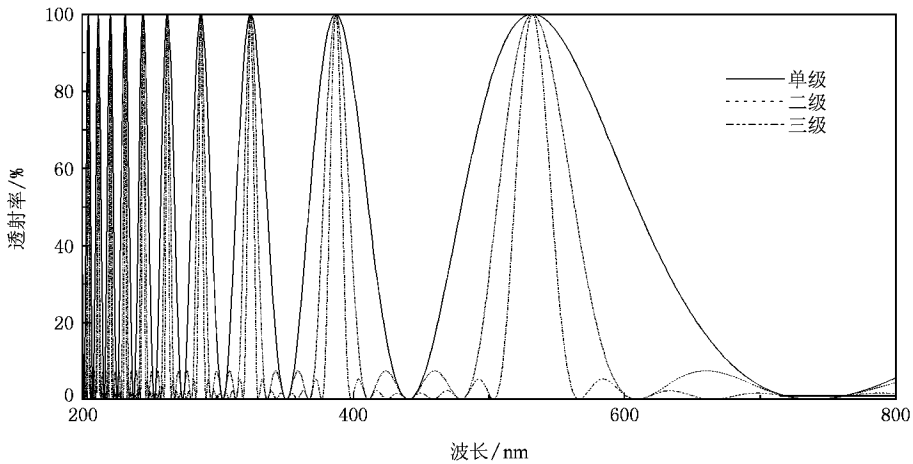


图3 单级、二级和三级石英晶体旋光光学滤波器($d_1 = 6.666 \text{ mm}$)理论透射曲线 $\lambda = 200\text{--}800 \text{ nm}$

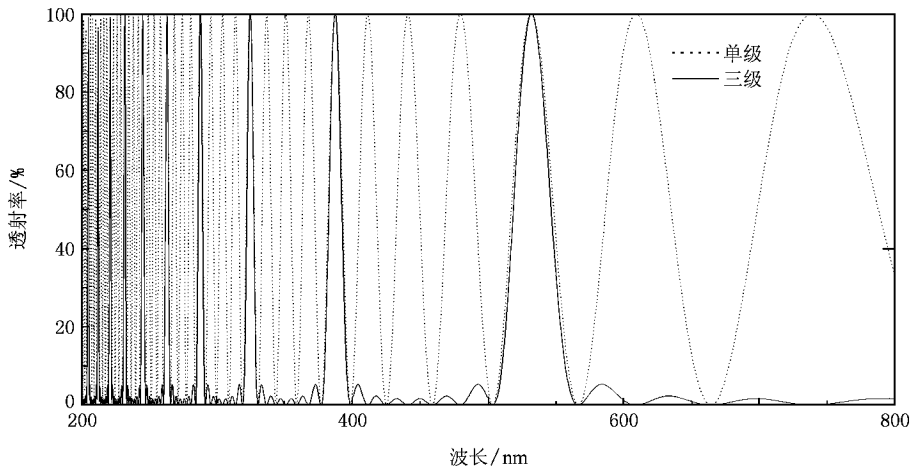


图4 单级($d = 26.664 \text{ mm}$)和三级($d_1 = 6.666 \text{ mm}$)石英晶体旋光光学滤波器理论透射曲线 $\lambda = 200\text{--}800 \text{ nm}$

定义为透射主峰波长.把透射主峰两边透射比下降为峰值一半时所对应波长的差值称为通带半宽度^[15].

根据图3的透射曲线可以看出,多级石英晶体旋光光学滤波器的透射主峰波长由最薄的石英晶体决定.当滤波器的透射曲线达到透射主峰时,透射比应满足一阶导数为零且二阶导数小于零,对最薄的石英晶体所对应的单级滤波器的透射比公式 $T = \cos^2[\alpha(\lambda)d_1]$ 求导可得

$$T' = -\frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda}d_1 \sin[2\alpha(\lambda)d_1], \quad (10)$$

$$T'' = -2\left(\frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda}\right)^2 d_1^2 \cos[2\alpha(\lambda)d_1]. \quad (11)$$

因此当滤波器的透射曲线达到透射主峰时应满足

$$\sin[2\alpha(\lambda_K)d_1] = 0,$$

$$\cos[2\alpha(\lambda_K)d_1] > 0. \quad (12)$$

这里下标 K 表示透射主峰的级数, K 取正整数且随透射主峰波长的减小而增大.进一步可以得到

$$\alpha(\lambda_K)d_1 = K\pi. \quad (13)$$

故透射主峰波长所对应石英晶体的旋光系数可表示为

$$\alpha(\lambda_K) = \frac{K\pi}{d_1}. \quad (14)$$

利用(4)(14)式即可求出多级石英晶体旋光光学滤波器第 K 个透射主峰波长.

对于单级石英晶体旋光光学滤波器,当透射主峰两边透射比下降为峰值一半时满足

$$\alpha(\lambda')d_1 = K\pi - \pi/4,$$

$$\alpha(\lambda'')d_1 = K\pi + \pi/4.$$

这两处所对应旋光系数的差为

$$\alpha(\lambda') - \alpha(\lambda'') = \frac{-\pi}{2d_1}. \quad (15)$$

设在窄的通带半宽度内,石英晶体旋光系数的色散率为一常数,与相应透射主峰处的旋光系数色散率相等,即存在

$$\left. \frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_K} = \frac{\alpha(\lambda') - \alpha(\lambda'')}{\lambda' - \lambda''}.$$

由此可得单级石英晶体旋光光学滤波器第 K 个透射带的通带半宽度为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{HW,K}^1 &= \lambda' - \lambda'' \\ &= \frac{\alpha(\lambda') - \alpha(\lambda'')}{\left. \frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_K}} \\ &= \frac{-\pi}{2d_1 \left. \frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_K}}, \end{aligned} \quad (16)$$

其中的旋光系数色散率可由(4)式得到,

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_K} &= \frac{-19.1278\lambda_K}{(\lambda_K^2 - 0.0127493)^2} + \frac{4.6226\lambda_K}{(\lambda_K^2 - 0.000974)^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

对于多级石英晶体旋光光学滤波器,由透射比公式(9)不易直接得出其通带半宽度的计算公式,但由图4可知,多级石英晶体旋光光学滤波器透射主峰两边极小值所对应的波长由最厚的石英晶体决定.因此,多级滤波器的透射曲线达到透射主峰两边极小值时应满足

$$\begin{aligned} \sin[2\alpha(\lambda_K)d_n] &= 0, \\ \cos[2\alpha(\lambda_K)d_n] &< 0. \end{aligned} \quad (18)$$

进一步可得相邻极小值所对应波长差值为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_K^n &= \frac{-\pi}{d_n \left. \frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_K}} \\ &= \frac{-\pi}{2^{n-1}d_1 \left. \frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_K}}. \end{aligned} \quad (19)$$

相应的通带半宽度为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{HW,K}^n &= \frac{N}{2}\Delta\lambda_K^n \\ &= \frac{-N\pi}{2^n d_1 \left. \frac{d\alpha(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_K}}, \end{aligned} \quad (20)$$

式中 N 为常数,是多级滤波器的通带半宽度与透射主峰两边第一个极小值所对应波长差值比值的二倍,与 n 的大小有关.利用 Matlab 程序对其进行分析可知:当 $n = 2$ 时, $N = 0.911$; 当 $n = 3$ 时, $N = 0.892$; 当 $n = 4$ 时, $N = 0.887$; 且随着 n 的增大, N 的值趋向于 0.886(与双折射滤波器特征参量计算公式中的值相等^[16]).

从(16)(20)式可以看出:相对于单级滤波器,多级石英晶体旋光光学滤波器透射光的通带半宽度压缩倍数为

$$\frac{\Delta\lambda_{HW,K}^1}{\Delta\lambda_{HW,K}^n} = \frac{d_n}{d_1 N} = \frac{2^{n-1}}{N} > 1.$$

因此,多级滤波器可以达到减小通带半宽度的目的.

4. 实 验

我们利用岛津 UV-3101PC 分光光度计对石英晶体旋光光学滤波器的滤波效果进行了测试.透射光谱测量装置由光源、分光系统、信号检测系统和数据

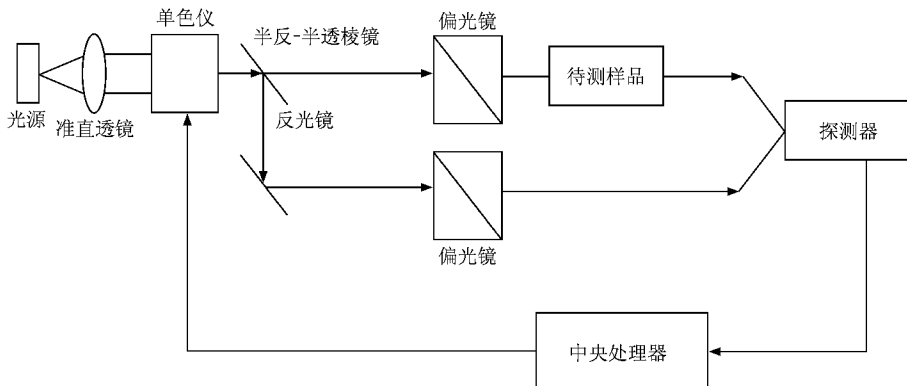


图 5 透射光谱测量装置示意图

采集与处理系统组成,如图 5 所示.

在 23 °C 的温度条件下, $d_1 = 6.666$ mm 的单级、二级和三级石英晶体旋光光学滤波器在 200—800 nm 波长范围内的透射光谱如图 6 所示; $d = 26.664$ mm 的单级和 $d_1 = 6.666$ mm 的三级石英晶体旋光光学滤波器的透射光谱如图 7 所示.

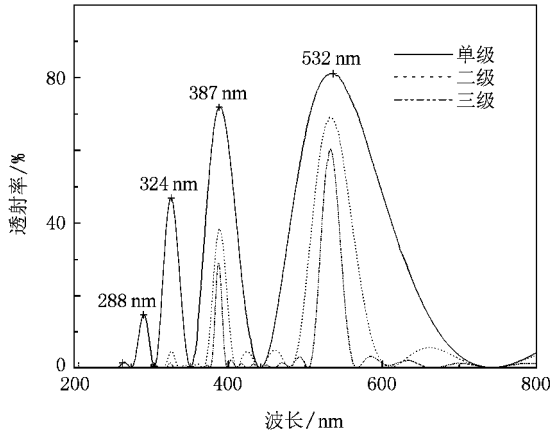


图 6 单级、二级和三级石英晶体旋光光学滤波器($d_1 = 6.666$ mm)的透射光谱

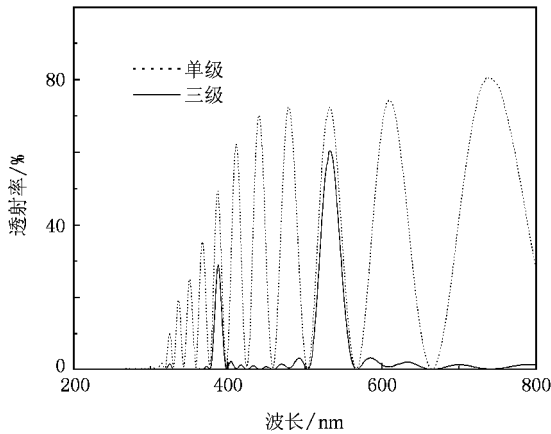


图 7 单级($d = 26.664$ mm)和三级($d_1 = 6.666$ mm)石英晶体旋光光学滤波器的透射光谱

光光学滤波器的透射曲线和理论曲线变化规律基本一致,实现了在连续光谱中透过一定光谱带的目的.由图 6、图 7 也可以看出,随着波长的减小,透射主峰的振幅逐渐降低.通过对单个石英晶体和偏光镜的透射光谱测量可知,这主要是由于偏光镜紫外透射比的下降引起的(图 8).由图 6、图 7 还可以看出,随着滤波器级数的增大,同一透射主峰的峰值逐渐降低.这是由组成滤波器的各分立器件实际透射率均小于 1 造成的.

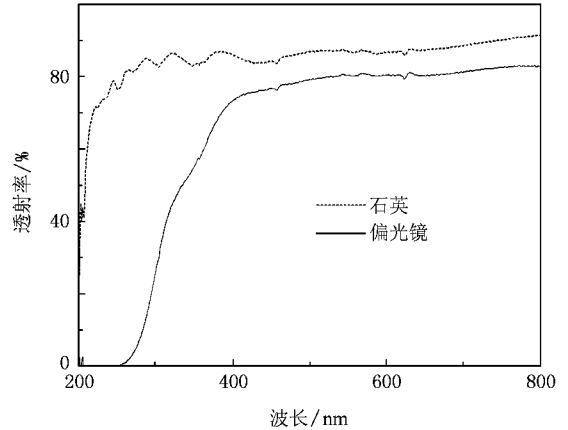


图 8 石英晶体和偏光镜在 200—800 nm 波段范围内的透射光谱

根据图 3、图 6 中的理论和实验透射曲线以及(20)式得出的不同透射主峰处的通带半宽度如表 1 所列.

由表 1 的数据可知,根据理论和实验透射曲线得出的通带半宽度的值基本相等,只存在一些微小的差别.我们认为,这种微小差别是由石英晶体的厚度误差以及测量误差造成的.利用(20)式和理论曲线得到的不同透射主峰处,单级、二级和三级石英晶体旋光光学滤波器的通带半宽度近似相等,但存在不同程度的差别,且差别的大小随通带半宽度的减小而减小.通过前面的公式推导可知,这是由于在通带半宽度内石英晶体旋光系数的色散率随波长变化造成的.

由图 6、图 7 可以看出,实验得到的石英晶体旋

表 1 单级、二级和三级石英晶体旋光光学滤波器在不同透射主峰的通带半宽度

	理论值		实验值		计算值	
	532 nm	387 nm	532 nm	387 nm	532 nm	387 nm
$\Delta\lambda_{1/2}$ /nm	129.715	43.581	130.238	43.498	124.561	43.069
$\Delta\lambda_{1/2}^2$ /nm	57.191	19.695	58.135	19.634	56.738	19.619
$\Delta\lambda_{1/2}^3$ /nm	27.828	9.629	28.098	9.654	27.777	9.604

5. 结 论

本文分析了多级石英晶体旋光光学滤波器的滤波原理, 推导出其特征参量(透射主峰波长和通带半宽度)的计算公式, 分析了多级石英旋光光学滤波器的通带半宽度. 实验测出了单级、二级和三级石英晶体旋光光学滤波器的透射光谱曲线. 从理论和实验上证明多级石英晶体旋光光学滤波器与单级相比通带半宽度得到了有效的压缩, 且随滤波器级数的增

大, 压缩的程度也随之增大. 实验中的偏光棱镜对滤波器的短波长透射性能影响较大, 因此要想得到较好的滤波效果, 选取光谱范围宽、透射比高的偏振器非常重要. 利用理论透射曲线和推导的计算公式分别得出了不同透射主峰处的通带半宽度, 由公式得到的计算值与理论值存在微小差别, 这主要是由通带半宽度内石英晶体的旋光系数色散率随波长的变化造成的. 对于通带半宽度较窄的透射带, 旋光系数色散率的影响较小, 因此推导的公式更适用于计算窄带通石英晶体旋光光学滤波器的特征参量.

- [1] Francon M 1984 *Optical Filters for Radiations Separation* (Beijing : Science Press) p6 (in Chinese) [弗朗松 M 1984 用于辐射分离的光学滤波片 (中译本) (北京 : 科学出版社) 第 6 页]
- [2] Evans J W 1949 *J. Opt. Soc. Am.* **39** 229
- [3] Cheng G H , Wang Y S , Yu L J , Zhao W , Chen G F 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 284 (in Chinese) [程光华、王屹山、于连君、赵卫、陈国夫 2004 光学学报 **24** 284]
- [4] Patel J S , Maeda M W 1991 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **3** 739
- [5] Penny M F , Abbot R H , Phillips D M , Billard B , Rees D , Faulkner D W , Cartwright D G , Woodcock B , Perry G J , Wilsen P J , Adams T R , Richards J 1986 *Appl. Opt.* **25** 2046
- [6] Burton C H , Leistner A J , Rust D M 1987 *Appl. Opt.* **26** 2637
- [7] Feng D Q , Sheng Q Q , Chen K , Jia B H , Han J 2002 *Opt. Commun. Technol.* **26** 46 (in Chinese) [冯丹琴、盛秋琴、陈凯、贾宝华、韩 军 2002 光通信技术 **26** 46]
- [8] Wang Q , Jia X L , Zhang Y D , Ma Z G 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1151 (in Chinese) [王 骐、贾晓玲、掌蕴东、马祖光 2003 物理学报 **52** 1151]
- [9] Ye C 2003 *Appl. Opt.* **42** 4505
- [10] Ye C 2004 *Appl. Opt.* **43** 4007
- [11] Yan J X , Wei G H , Ha L Z , Lin Y C , Jiang X J 1995 *Matrix Optics* (Beijing : Ordnance Industry Press) p189 (in Chinese) [阎吉祥、魏光辉、哈流柱、林永昌、江先进 1995 矩阵光学 (北京 : 兵器工业出版社) 第 189 页]
- [12] Liao Y B 2003 *Polarized Optics* (Beijing : Science Press) p133 (in Chinese) [廖延彪 2003 偏振光学 (北京 : 科学出版社) 第 133 页]
- [13] Su F F , Wu F Q 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 670 (in Chinese) [苏富芳、吴福全 2005 光学学报 **25** 670]
- [14] Ye C 2006 *Appl. Opt.* **45** 1162
- [15] Li J Z 1986 *Handbook of Optics* (Xi' an : Shaanxi Science and Technology Press) p671 (in Chinese) [李景镇 1986 光学手册 (西安 : 陕西科学技术出版社) 第 671 页]
- [16] Yeh P 1981 *Opt. Commun.* **37** 153

Characteristics of multistage quartz optical filter based on the optical rotatory dispersion effect

Zhang Shan Wu Fu-Quan[†] Wu Wen-Di

(*Institute of Laser , Qufu Normal University , Qufu 273165 , China*)

(Received 7 June 2007 ; revised manuscript received 27 February 2008)

Abstract

Based on optical rotatory dispersion effect , the principle of the multistage quartz crystal filter was theoretically analyzed by using Muller matrix and Stokes parameter. The wavelength of the main peak and full width at half maximum (FWHM) of peaks of the multistage optical filter were deduced. The characteristics of the single and multistage quartz crystal optical filters were systematically investigated by the spectrometer , and the experimental results verified the theoretical analysis . The results proved that , compared with the single quartz crystal optical filter , the FWHM can be effectively compressed by multistage quartz crystal optical filter , and the compression ability increases with the increase of the stage number.

Keywords : optical filter , polarization , quartz crystal , optical rotatory dispersion

PACC : 4280C , 4225J , 4270E , 7820E

[†] E-mail : fqwu@mail.qfnu.edu.cn