

文章编号: 0253-2239(2008)11-2215-05

石英晶体旋光光学滤波器的特征参量

张 珊^{1,2,3} 吴福全¹ 苏富芳¹ 吴闻迪¹ 邵俊平¹ 洪 芳¹

(¹ 曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165; ² 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)
³ 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 利用 Müller 矩阵和 Stokes 参量, 从石英晶体旋光光学滤波器的透射比公式, 推导出了石英晶体旋光光学滤波器特征参量的理论计算公式。研究发现, 特征参量的值与滤波器的级数和滤波器中最薄石英晶体的厚度存在直接联系。计算得到一、二、三级石英晶体旋光光学滤波器在不同透射主峰的特征参量, 并对其进行了实验验证。通过对不同透射主峰的特征参量进行比较可以看出, 对于确定的滤波器, 不同透射主峰处的自由光谱范围和通带半峰全宽随着波长的增大而增大; 同一透射主峰处的通带半峰全宽随滤波器级数的增大而减小。

关键词 物理光学; 滤波器; 旋光色散; 透射主峰波长; 自由光谱范围; 通带半峰全宽

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082811.2215

Characteristic Parameters of Quartz Optical Filter Based on Optical Rotatory Dispersion Effect

Zhang Shan^{1,2,3} Wu Fuquan¹ Su Fufang¹ Wu Wendi¹ Shao Junping¹ Hong Fang¹

(¹ Laser Research Institute, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)
² Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Using Müller matrix and Stokes parameter, theoretical calculation formulas for characteristic parameters of the quartz optical filter based on optical rotatory dispersion effect were deduced from the filter's transmission equation. The formulas show that the characteristic parameters have direct relationships with the stage number of the filter and the thinnest quartz's thickness. The filter characteristics of the one-, two-, and three-stage quartz optical filter at different main transmission peaks were calculated and proved by experiment. The filter characteristics were compared and the result shows that as the wavelength increases, the filter's free spectral range and full width at half maximum at different peaks increase, and the full width at half maximum at the same peaks decreases with the filter's stage, number.

Key words physical optics; filter; optical rotatory dispersion; main transmission peak's wavelength; free spectral range; passband full width at half maximum

1 引 言

光学滤波器是在连续光谱中用于透过一定宽度的光谱带或在线状光谱中用于提取某些辐射的波长选择器件^[1], 其中研究最为成熟且应用广泛的要属双折射滤光片和多光束干涉滤光片^[2]。近年来随着应用光学、开放式激光通信的发展出现了多种新型光学滤波器, 例如, Faraday 反常色散光学滤波器^[3] (Faraday anomalous dispersion optical filter, FADOF)、可调

谐声光光学滤波器^[4] (Acousto-optical tunable filter, AOTF)、可调谐固体腔 Fabry-Pérot (F-P) 标准具光学滤波器^[5] 等。最近国外报道了一种利用晶体的旋光色散特性研制而成的新型可调谐带通光学滤波器^[6]。它是由一系列偏振片和旋光器相间组合而成, 不需要消色差波片即可进行调谐, 制作方便、可调谐、低损耗且没有使用波段限制。但目前的研究侧重于它的可调谐性^[7], 而对它的滤波特性分析

收稿日期: 2007-11-15; 收到修改稿日期: 2008-05-17

作者简介: 张 珊 (1984—), 女, 博士研究生, 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, 教授, 主要从事偏光器件方面的研究。E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn (通信联系人)

较少。带通滤波器一般用透射主峰波长 λ_K 、自由光谱范围 $\Delta\lambda_{FSR,K}$ 和通带半峰全宽 $\Delta\lambda_{HW,K}^{[8\sim 10]}$ 三个特征参量来描述其滤波性能。本文从这种新型石英晶体旋光光学滤波器的透射比公式,推导出了用于描述石英晶体旋光光学滤波器滤波效果的各个特征参量的计算公式并给出了设计实例和实验验证。

2 滤波原理

n 级石英晶体旋光光学滤波器的结构和建立的主轴坐标系如图 1 所示(以石英晶体的个数来标记滤波器的级数)。 P_1, P_2, \dots, P_{n+1} 为平行放置且透振方向相同的偏光镜, Q_1, Q_2, \dots, Q_n 为由晶体光轴垂直于光学表面的石英晶体加工而成的平行平板,石英晶体的厚度分别为 d_1, d_2, \dots, d_n 且厚度比为 $1:2:4:\dots:2^{n-1}$ 。图 1 中的偏光镜和石英晶体的 Müller 矩阵分别为^[11]

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

$$M_{Q_n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta_n & \sin 2\theta_n & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta_n & \cos 2\theta_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 θ_n 为第 n 块石英晶体的旋光角^[12]

$$\theta_n = \alpha \cdot d_n = 2^{n-1} \alpha \cdot d_1, \quad (3)$$

式中 α ($^\circ/\text{mm}$) 为石英晶体的旋光系数, d_n (mm) 为第 n 块石英晶体的厚度。 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]

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

式中 λ (μm) 为入射光的波长。

若入射光为自然光,其 Stokes 参量为

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

可以得到从 n 级石英晶体旋光光学滤波器出射光的 Stokes 参量为

$$S_n = \frac{I_0 \cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \cdot \cos^2 2[\alpha(\lambda)d_1] \cdots \cos^2 2^{n-1}[\alpha(\lambda)d_1]}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

若令从 P_1 出射的光强为 $I_0/2$,并忽略光在各器件上的损失,则总透射比为

$$T = T_1 \cdot T_2 \cdots T_n = \prod_{i=1}^n \cos^2 \{2^{i-1}[\alpha(\lambda)d_1]\} = \left\{ \frac{\sin 2^n[\alpha(\lambda)d_1]}{2^n \sin[\alpha(\lambda)d_1]} \right\}^2. \quad (7)$$

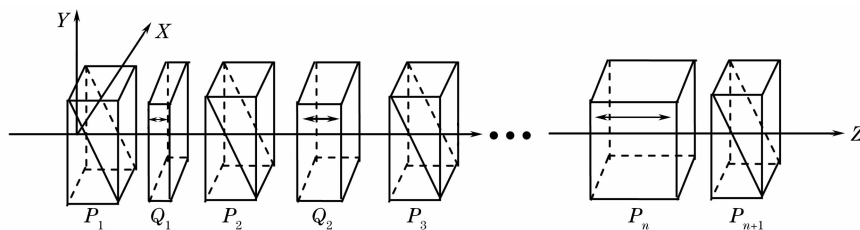


图 1 n 级石英晶体旋光光学滤波器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the n -stage quartz optical filter based the rotatory dispersion effect

从 n 级石英晶体旋光光学滤波器的透射比公式可以看出,滤波器的透射比与滤波器的级数 n 、最薄石英晶体的厚度 d_1 以及入射波长 λ 有关。

根据(7)式可作出常温下, $d_1 = 6.666 \text{ mm}$ 的三级石英晶体旋光光学滤波器以及 $d_1 = 6.666 \text{ mm}$ 和 $d_1 = 26.664 \text{ mm}$ 的单级石英晶体旋光光学滤波器

在 $300 \sim 800 \text{ nm}$ 波长范围内的理论透射曲线如图 2 所示。由图中曲线可以看出多级石英晶体旋光光学滤波器的透射曲线 A 与组成它的最薄 B 和最厚 C 石英晶体所对应单级滤波器的透射曲线存在一定的关系。

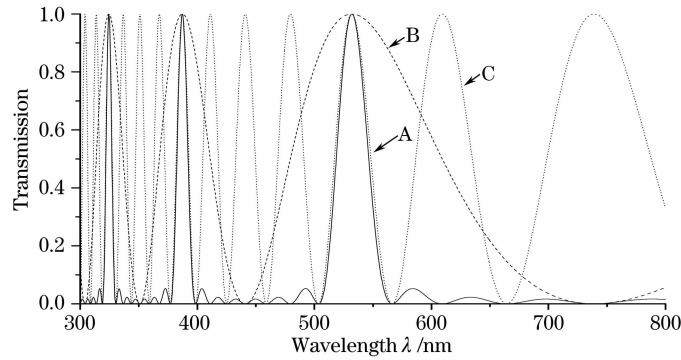


图 2 常温下石英晶体旋光光学滤波器理论透射曲线(300~800 nm)

Fig. 2 Theoretical transmission curves of quartz optical filters based on the rotatory dispersion effect (300~800 nm) at normal temperature

3 特征参量

3.1 透射主峰波长和自由光谱范围

光学滤波器透射比达到最大时所对应的波长定义为透射主峰波长。一个滤波周期所对应的波长范围称为自由光谱范围。根据图 2 的理论透射曲线 A、B 可以看出,多级石英晶体旋光光学滤波器的透射主峰波长和自由光谱范围由最薄石英晶体决定,因此根据单级石英晶体旋光光学滤波器的透射比公式进行分析。

当滤波器的透射曲线达到透射主峰时透射比公式应满足一阶导数为零且二阶导数小于零,对 $T = \cos^2[\alpha(\lambda)d_1]$ 进行求导可得

$$\begin{cases} T' = -\gamma d_1 \sin 2[\alpha(\lambda)d_1], \\ T'' = -2\gamma^2 d_1^2 \cos 2[\alpha(\lambda)d_1], \end{cases} \quad (8)$$

式中 γ 为石英晶体的旋光系数色散率 $d\alpha/d\lambda$ 。

当滤波器的透射曲线达到透射主峰时应满足 $\sin 2[\alpha(\lambda_K)d_1] = 0$; $\cos 2[\alpha(\lambda_K)d_1] > 0$, 进而可以得到

$$\alpha(\lambda_K) \cdot d_1 = K \cdot 180^\circ, \quad (9)$$

下标 K 为透射主峰的级数,取正整数且随透射主峰波长的减小而增大。

则透射主峰波长所对应石英晶体的旋光系数可表示为

$$\alpha(\lambda_K) = \frac{K \cdot 180^\circ}{d_1}. \quad (10)$$

利用(4)式、(10)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。

同理当滤波器的透射曲线达到极小值时满足 $\sin 2[\alpha(\lambda)d_1] = 0$; $\cos 2[\alpha(\lambda)d_1] < 0$ 。则相邻两个极小值处应满足

$$\begin{cases} \alpha(\lambda') \cdot d_1 = K \cdot 180^\circ - 90^\circ, \\ \alpha(\lambda'') \cdot d_1 = (K + 1) \cdot 180^\circ - 90^\circ, \end{cases} \quad (11)$$

式中 λ' 、 λ'' 分别为石英晶体旋光光学滤波器第 K 个透射带的自由光谱范围两边对应波长。则两处所对应旋光系数的差为

$$\alpha(\lambda') - \alpha(\lambda'') = -180^\circ/d_1. \quad (12)$$

设在窄的自由光谱范围内,石英晶体的旋光系数色散率为一常数,与相应透射主峰处的旋光系数色散率相等,即存在 $\gamma_K = \frac{\alpha(\lambda') - \alpha(\lambda'')}{\lambda' - \lambda''}$, 由此可得多级石英晶体旋光光学滤波器第 K 个透射带的自由光谱范围为

$$\Delta\lambda_{\text{FSR},K} = \lambda' - \lambda'' = \frac{[\alpha(\lambda') - \alpha(\lambda'')]}{\gamma_K} = \frac{-180^\circ}{d_1 \cdot \gamma_K}, \quad (13)$$

第 K 个透射主峰处的旋光系数色散率 γ_K 可由(4)式得到

$$\gamma_K = \frac{-19.1278\lambda_K}{(\lambda_K^2 - 0.0127493)^2} + \frac{4.6226\lambda_K}{(\lambda_K^2 - 0.000974)^2}. \quad (14)$$

3.2 通带半峰全宽

通常将光学滤波器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定义为通带半峰全宽。利用多级石英晶体旋光光学滤波器的透射比公式(7)不易直接得出通带半峰全宽的计算公式,但由图 2 的曲线 A、C 可以看出,多级石英晶体旋光光学滤波器和最厚石英晶体所对应单级滤波器透射曲线的透射主峰左右极小值所对应波长相同。利用最厚石英晶体所对应单级滤波器的透射比公式 $T = \cos^2[\alpha(\lambda)d_n]$ 可得相邻极小值所对应波长的差为

$$\Delta\lambda_K^n = \frac{-180^\circ}{d_n \cdot \gamma_K} = \frac{-180^\circ}{2^{n-1} \cdot d_1 \cdot \gamma_K}, \quad (15)$$

则相应的通带半峰全宽为

$$\Delta\lambda_{\text{HW},K}^n = \frac{-90^\circ N}{d_n \cdot \gamma_K} = \frac{-90^\circ N}{2^{n-1} \cdot d_1 \cdot \gamma_K}, \quad (16)$$

式中 N 为一常数,是多级滤波器的通带半峰全宽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 $n=1$ 时, $N=1$; $n=2$ 时, $N=0.911$; $n=3$ 时, $N=0.892$; $n=4$ 时, $N=0.887$; 且随着 n 的增大, N 的值趋向于 0.886。

4 设计实例与实验验证

对于如图 1 所示的 $d_1=6.666$ mm 的一、二、三级石英晶体旋光光学滤波器结构,由(10)式、(13)式、(16)式计算得到在不同透射主峰($K=1$; $K=2$)的

表 1 一、二、三级石英晶体旋光光学滤波器在不同透射主峰($K=1$; $K=2$)的透射主峰波长、自由光谱范围和通带半峰全宽

Table 1 Main transmission peak's wavelength, free spectral range and full width at half maximum of the single-, two-, three-stage quartz optical filter at different peaks ($K=1$; $K=2$)

K	λ_K/nm	$\Delta\lambda_{\text{FSR},K}/\text{nm}$	$\Delta\lambda_{\text{HW},K}^1/\text{nm}$	$\Delta\lambda_{\text{HW},K}^2/\text{nm}$	$\Delta\lambda_{\text{HW},K}^3/\text{nm}$
1	531.9	249.1	124.5	56.7	27.8
2	387.2	86.3	43.2	19.7	9.6

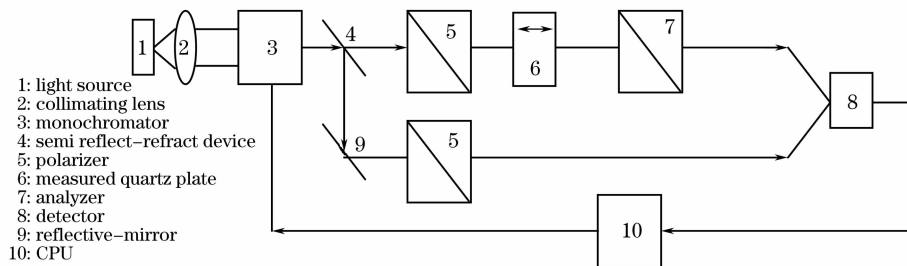


图 3 测试装置

Fig. 3 Measuring equipment

常温下, $d_1=6.666$ mm 的一级、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曲线如图 4 所示。

一级、二级、三级石英晶体旋光光学滤波器在第一个透射主峰($K=1$)处的透射主峰波长分别为 533.2 nm、532.8 nm、532.0 nm;自由光谱范围分别为 299.8 nm、298.4 nm、299.4 nm;通带半峰全宽分别为 130.2 nm、58.0 nm、28.0 nm。在第二个透射主峰($K=2$)处的透射主峰波长分别为 388.4 nm、388.1 nm、387.0 nm;自由光谱范围分别为 90.4 nm、90.2 nm、89.5 nm;通带半峰全宽分别为 43.4 nm、19.6 nm、9.6 nm。由此可见,实验曲线中的透射主峰波长值与理论计算得到的值是相符的,存在的微小差别是由石英晶体的厚度误差及测量误差引起的。自由光谱范围和通带半峰全宽实验值和理论值之间

透射主峰波长、自由光谱范围和通带半峰全宽,如表 1 所示。

表中 λ_1 、 λ_2 分别为石英晶体旋光光学滤波器的第一、二级透射主峰波长; $\Delta\lambda_{\text{FSR},1}$ 、 $\Delta\lambda_{\text{FSR},2}$ 分别为石英晶体旋光光学滤波器在第一、二级透射主峰的自由光谱范围; $\Delta\lambda_{\text{HW},1}^1$ 、 $\Delta\lambda_{\text{HW},2}^1$ 、 $\Delta\lambda_{\text{HW},1}^2$ 、 $\Delta\lambda_{\text{HW},2}^2$ 、 $\Delta\lambda_{\text{HW},1}^3$ 、 $\Delta\lambda_{\text{HW},2}^3$ 分别是一、二、三级石英晶体旋光光学滤波器在第一、二级透射主峰的通带半峰全宽。

制作了 $d_1=6.666$ mm 的一级、二级和三级石英晶体旋光光学滤波器,利用岛津 UV-3101PC 分光光度计对石英晶体旋光光学滤波器的透射光谱进行测试。测试光路如图 3 所示,由光源、分光系统、信号检测系统和数据采集与处理系统组成。

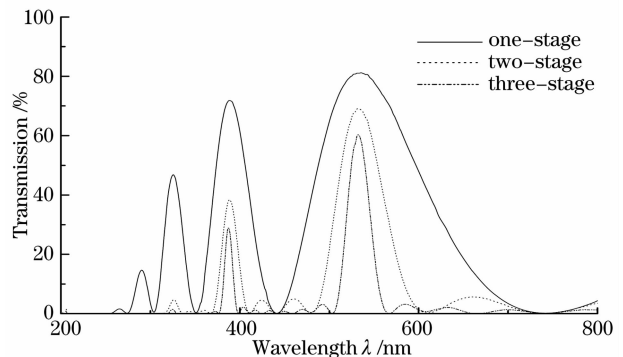


图 4 一级、二级和三级石英晶体旋光光学滤波器的透射光谱曲线

Fig. 4 Measured transmission spectrums of the one-, two-, three-stage quartz optical filters based on the rotatory dispersion effect

存在不同程度的差别,且差别的大小随参量的减小而减小。通过前面的公式推导可知这是由于石英晶体旋光系数的色散率随波长变化造成的,因此我们推导的公式更适用与窄带通旋光光学滤波器。

5 结 论

从石英晶体旋光光学滤波器的透射比公式推导出了用于描述滤波器滤波性能的特征参量计算公式。通过公式可以看出,特征参量的值与滤波器的级数和滤波器中最薄石英的厚度存在直接的联系。利用公式计算出最薄石英晶体厚度为 6.666 mm 的一、二、三级石英晶体旋光光学滤波器的自由光谱范围和通带半峰全宽;实验对这些参量的值进行了测量。结果证明得到的参量计算公式是正确的。通过对参量的比较可以看出,对于确定的滤波器,不同透射主峰处的自由光谱范围和通带半峰全宽随着波长的增大而增大;同一透射主峰处的通带半峰全宽随滤波器级数的增大而减小。这些变化是由旋光系数色散率的绝对值随波长的增大而减小和滤波器级数的增大造成的。因此对于确定的滤波器设计(已知 n 、 d_1)可以计算出各个特征参量的值,进而描述滤波器的滤波效果。而对于一定的滤波要求(透射主峰波长、自由光谱范围、通带半高宽)也可以设计出相应的滤波器。

参 考 文 献

- 1 M. Francon. *Optical Filters for Radiations Separation* [M]. Beijing: Science Press, 1984
M. 弗朗松. 用于辐射分离的光学滤波片[M]. 北京: 科学出版社, 1984
- 2 Zhang Jian, Li Guohua, Peng Handong *et al.*. Theoretical study of multiple tunable liquid crystals filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1835~1840
张 剑, 李国华, 彭捍东 等. 电压调谐多级液晶滤光片的理论研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(12): 1835~1840
- 3 Jia Xiaoling, Zhang Yundong, Wang Qi. The research advance of Faraday dispersion optical filter[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(4): 433~437
贾晓玲, 掌蕴东, 王 骐. Faraday 色散光学滤波器的研究进展[J]. 光电子·激光, 2001, **12**(4): 433~437
- 4 Guo Wei, Liu Ying, Xiao Lifeng *et al.*. Study on characteristics of acoustooptical tunable erbium-doped fiber ring laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(7): 877~881
郭 巍, 刘 迎, 肖立峰 等. 基于新型两级集成光学声光可调谐滤波器的环形腔掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(7): 877~881
- 5 Cao Changsheng, Luo Bin, Pan Wei *et al.*. A linear tuning filter base on thin-film interference filters[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1055~1058
曹昌胜, 罗 斌, 潘 炜 等. 基于薄膜干涉滤光片的线性调谐滤波器[J]. 中国激光, 2005, **32**(8): 1055~1058
- 6 Chun Ye. Wavelength-tunable spectral filters based on the optical rotatory dispersion effect [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(22): 4505~4513
- 7 Chun Ye. Liquid-crystal bandpass filter based on the optical rotatory dispersion effect [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(20): 4007~4010
- 8 Li Jingzhen. *Handbook of Optics* [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1986. 670~671
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986. 670~671
- 9 Yeh Pochi. Dispersive birefringent filters[J]. *Opt. Commun.*, 1981, **37**(3): 153~158
- 10 Zhang Wei-quan. Optimized parameters of birefringent filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1420~1424
张为权. 双折射滤波片的优化参量[J]. 光学学报, 2005, **25**(10): 1420~1424
- 11 Yan Jixiang, Wei Guanghui, Ha Liuzhu *et al.*. *Matrix Optics* [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995. 178~189
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
- 12 Liao Yanbiao. *Polarized Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 133~135
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 133~135
- 13 Su Fufang, Wu Fuquan. The research of thermal effect on the rotatory power of quartz[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 670~672
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
- 14 Chun Ye. Low-loss tunable filter based on optical rotatory dispersion[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(6): 1162~1168