

新型内反射旋光光学滤波器研究*

张斌 潘雪丰 陶卫东[†]

(宁波大学理学院, 宁波 315211)

(2010年8月4日收到; 2010年8月18日收到修改稿)

基于氯酸钠晶体的各向同性和旋光色散特性, 利用线偏振光以 Brewster 角内反射时 P 分量反射率为零的特性, 研制出一种新型内反射旋光光学滤波器, 该光学滤波器仅需采用单个偏振片, 即可达到良好的滤波效果. 利用 Mueller 矩阵对该滤波器的滤波特性进行理论分析以及实验测试, 结果表明对含有 532 nm 和 632.8 nm 谱线的线偏振光, 改变起偏器角度即可连续调制出射红、绿光的光强, 当起偏器较初始位置旋转过 133.36° 和 173.06° 时, 绿光和红光分别消光, 绿光和红光的隔离度可达 10 dB.

关键词: 光学滤波器, 各向同性, 旋光色散, 偏振

PACS: 42.79.Ci, 78.20.Ek, 42.25.Ja

1. 引言

光学滤波器是一种波长选择器件, 能够在连续谱中能透过一定宽度的波长或在线状谱中提取某些辐射的波长^[1], 它在空间通讯、光谱分析、光纤通信、激光技术以及雷达技术等有着广泛的应用. 当前所使用的光学滤波器主要基于双折射效应以及干涉原理, 也有基于光纤光栅等结构设计的可调谐的光学滤波器, 但基于具有旋光特性的手性晶体所设计的滤波器在国内报道较少. 近年来, 手性材料及其波导器件的理论、设计和实验测试等也正受到越来越多学者的关注^[2-5], 但国内外基于晶体旋光色散特性的光学滤波器的设计几乎集中在石英晶体^[6-10], 而石英晶体作为一种各向异性的固体手性介质存在双折射现象. 氯酸钠晶体作为一种合适的各向同性的手性晶体, 较之石英晶体在光学特性上有很大的优势, 因为其各向同性的特性, 并不存在类似石英晶体的光轴, 故能更好的利用光在晶体内部传输时的各种光学特性, 同时由于手性晶体自身所具有的旋光色散特性, 故具有高透射率、易制作、无使用波段限制等优势, 且原材料易于制备, 所以将其设计成光滤波器有着良好的前景. 由于目前大尺寸氯酸钠晶体的制备较为困难, 一直限制了

对氯酸钠晶体的光学特性及其相关应用的研究, 本文基于标准溶液法生长出大尺寸氯酸钠晶体(长 30.62 mm、宽 29.60 mm、高 28.34 mm), 首次设计并研制出了基于各向同性手性晶体的光学滤波器, 它使得线偏振光的偏振方向在晶体内部旋转的同时在氯酸钠晶体界面上以 Brewster 角反射, 利用了布儒斯特角内反射时 P 分量没有反射光的特性, 较之于其他基于旋光色散原理的光学滤波器, 只需一个偏振器用于起偏, 不需要检偏器, 故结构更加简单, 又由于其能连续调制两种波长的透射光强, 故其还是一种优异的双稳态器件, 且经过理论模拟和实验测试均表明该设计具有良好的滤波性能.

2. 原理与方法

手性晶体由于自身的独特结构而存在旋光现象, 当入射光为单色线偏振光时, 振动面的旋转角度 δ 与光在晶体内所经过的路程 l 成正比, 即

$$\delta = \alpha \times l, \quad (1)$$

式中 α 为晶体的旋光率, 在晶体中旋光率与光波的波长有关, 旋光率 α 的单位是 $(^\circ)/\text{mm}$.

根据菲涅耳反射折射定律, 当自然光在介质的界面上发生反射和折射时, 其入射光以及反射、折射光均可分解为垂直于入射面的 S 分量和平行于入

* 宁波市自然科学基金(批准号: 2009A610011)和宁波大学王宽诚幸福基金资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: taoweidong@nbu.edu.cn

射面的 P 分量,且发生反射和折射时 P 分量和 S 分量的振幅都会有一定的衰减或增强,其反射和透射的振幅比遵循以下各式^[11]:

$$r_s = \frac{E'_{1S}}{E_{1S}} = -\frac{\sin(i_1 - i_2)}{\sin(i_1 + i_2)}, \quad (2)$$

$$r_p = \frac{E'_{1P}}{E_{1P}} = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)}, \quad (3)$$

$$t_s = \frac{E_{2S}}{E_{1S}} = \frac{2\cos i_1 \sin i_2}{\sin(i_1 + i_2)}, \quad (4)$$

$$t_p = \frac{E_{2P}}{E_{1P}} = \frac{2\cos i_1 \sin i_2}{\sin(i_1 + i_2) \cos(i_1 - i_2)}. \quad (5)$$

式中 r_p 和 r_s 代表 P 分量和 S 分量的振幅反射比, t_p 和 t_s 代表 P 分量和 S 分量的振幅透射比, i_1 为入射角, i'_1 为反射角, i_2 为折射角.

由(3)式可知,当入射光以一定角度(Brewster角)入射时,P分量的反射率为零,故将(3)式转化,得出 Brewster 角 i_B 的表达式为

$$i_B = \arctan \frac{n_2}{n_1}. \quad (6)$$

对于一束线偏振光以 Brewster 角反射时,其反射光强随入射光相对于入射面的偏振方向的变化会有不同,又由于氯酸钠晶体的旋光色散特性,当以同一偏振方向入射时,不同波长的线偏振光的偏振方向会在晶体内部旋转过不同的角度,故对于入射晶体时偏振方向相同的线偏振光,其在晶体内部以 Brewster 角反射时,反射光强会因波长而有不同.

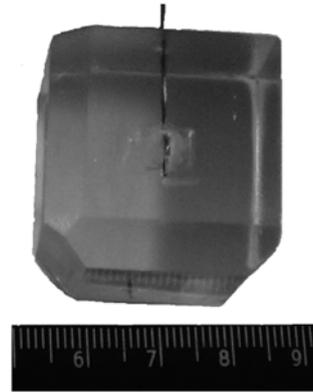


图1 实验用氯酸钠晶体实物图

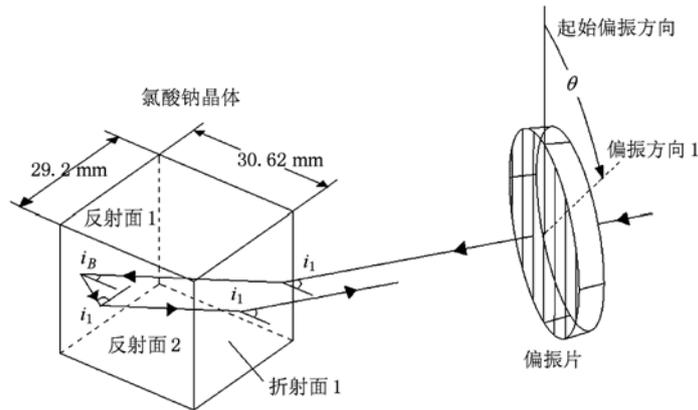


图2 滤波器结构示意图

本文所设计的反射型旋光光学滤波器结构如图2所示,仅由一个起偏器和各向同性旋光晶体组成.入射光经起偏器起偏后直接入射氯酸钠晶体,经反射面1以 Brewster 角反射后,再从折射面1出射.由于氯酸钠晶体的立方晶结构,出射光恰与入射光平行且方向相反.图2中的 i_1, i_B 表示相应界面上的入射角.

已知入射光的 Stokes 矢量 S_{in} ^[8]和偏振片的 Mueller 矩阵 M_p ^[12]以及旋光晶体的 Mueller 矩阵 M_R ^[12]分别为

$$S_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$M_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & C(2) & S(2) & 0 \\ C(2) & C^2(2) & C(2)S(2) & 0 \\ S(2) & C(2)S(2) & S^2(2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

上式中, $C(2) = \cos 2\alpha, S(2) = \sin 2\alpha$. 又由于如图3所示,本设计测试时令偏振片从竖直方向开始按顺时针旋转,故需令 $\alpha = 90^\circ - \theta$.

$$M_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\delta & \sin 2\delta & 0 \\ 0 & -\sin 2\delta & \cos 2\delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

已知在介质界面上的透射光的 Jones 矩阵 J_t 和 Brewster 角反射光的 Jones 矩阵 J_B 分别为^[13]

$$J_t = \begin{bmatrix} t_p & 0 \\ 0 & t_s \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$J_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}. \quad (11)$$

根据文献 [14] 的 Jones 矩阵与 Mueller 矩阵的转换关系, 得出 J_t, J_B 对应的 Mueller 矩阵 M_t 和 M_B 为

$$M_t = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} t_p^2 + t_s^2 & t_p^2 - t_s^2 & 0 & 0 \\ t_p^2 - t_s^2 & t_p^2 + t_s^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2t_p t_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2t_p t_s \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$M_B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_s^2 & -r_s^2 & 0 & 0 \\ -r_s^2 & r_s^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

所以从如图 2 所示的反射面 1 反射后的 Stokes 参量为

$$S_r = M_B M_t M_p S_{in},$$

$$S_r = (\sin\theta t_p \sin\delta - \cos\theta t_s \cos\delta)^2 r_s^2 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

依据 Brewster 角反射的性质, 经如图 2 反射面 1 反射后只剩下光矢量的 S 分量, 从而经反射面 2 全反射后在折射面 1 界面上的偏振态不随入射光偏振方向而有所变化, 即 P 分量和 S 分量的相对大小不变, 已知光在晶体内部传输时各界面上入射角、反射角、折射角均不发生变化, 故各界面上的 P 分量和 S 分量的振幅反射透射比 r_p, t_p, r_s, t_s 为定值, 故而折射面 1 上再次透射时的透射光强与入射光的偏振方向无光, 仅与反射面 1 反射后的光强有关, 所以最终在晶体折射面 1 出射光的光强正比于下式:

$$I \propto [\cos\theta t_s \cos\delta - \sin\theta t_p \sin\delta]^2. \quad (15)$$

由上式可知, 当 θ 满足 (16) 式时, 出射光强 I 为零, θ 即为该波长下的消光角所对应的偏振方向, 也就是起偏器的旋转角度.

$$\theta = \left(n + \frac{1}{2}\pi \right) - \arccos \frac{t_s \cos\delta}{\sqrt{t_s^2 \cos^2\delta + t_p^2 \sin^2\delta}}; \quad n \in N. \quad (16)$$

3. 实验结果及分析

实验使用的是如图 1 所示的氯酸钠晶体, 经实际测量, 该氯酸钠晶体长 30.62 mm, 宽 29.60 mm, 高 28.34 mm, 氯酸钠晶体的折射率为 1.5139. 经由 (6) 式得氯酸钠晶体的 Brewster 角为 33.44°, 所以相应的入射角 i_1 为 56.56°.

将氯酸钠晶与偏振片组成的滤波器置于如图 3 所示的实验测试装置, 由波长为 632.8 nm 的 HJ-1B 型 He-Ne 激光器, 波长为 532 nm、功率为 100 mW 的半导体激光器, KH-22-1A 步进电机带动的偏振片, Ocean Optics 的 USB 4000 光纤光谱仪组成. 从 He-Ne 激光器发出的红光和从半导体激光器出射的绿光经半透-半反镜调节而会合成同一束光, 依次透过格兰棱镜、菲涅耳棱体, 起偏器, 最后以 56.56° 的入射角入射氯酸钠晶体 (参见图 2), 由光纤光谱仪读取从氯酸钠晶体内部反射后的透射光光谱图, 起偏器每旋转 5°, 采集相应的红光和绿光的光强值, 绘制出图 4 所示的出射光强随入射线偏振光偏振方向和波长变化的三维数据图.

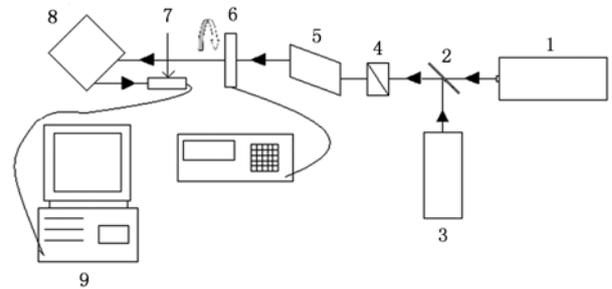


图 3 实验装置示意图 1-He-Ne 激光器; 2-半透半反镜; 3-半导体激光器; 4-格兰棱镜; 5-菲涅耳棱体; 6-由步进电机带动的起偏器; 7-光纤光谱仪; 8-氯酸钠晶体; 9-PC 终端

根据实验测试, 得到对应实验所使用的 632.8 nm 的红光和 532 nm 的绿光的旋光率分别为 2.70°/mm 和 3.88°/mm, 且路程 l 为 36.69 mm, 故红光和绿光的旋光角度 δ 分别为 99.26° 和 142.31°. 另外由 (4), (5) 式求得以 56.56° 的入射角入射晶体时的 S 光和 P 光的透射率分别为 0.607 和 0.66, 将其代入 (15) 式推得对于线偏振光的不同偏振角度所对应的光强变化, 即

$$I_{\text{green}} \propto [0.4806\cos\theta + 0.4037\sin\theta]^2. \quad (17)$$

$$I_{\text{red}} \propto [0.0977\cos\theta + 0.6518\sin\theta]^2. \quad (18)$$

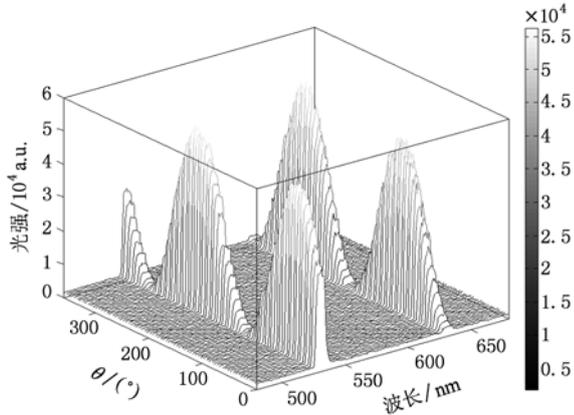


图4 不同偏振方向下出射光谱线三维图

将(17)和(18)式所作的图线归一化后便是绿光和红光的最终出射光的相对光强大小的理论值,之后再和实际测量值所描绘的图线归一化处理作比较(见图5).可知所测得的绿光和红光的相对光强与入射光偏振方向的变化与理论预期很好地符合.且图5表明,绿光和红光的出射光强可随起偏器偏振方向的变化而被连续的调制,即可作为一种强度可调的连续的二值信号输出,所以亦可用作光学双稳态器件.

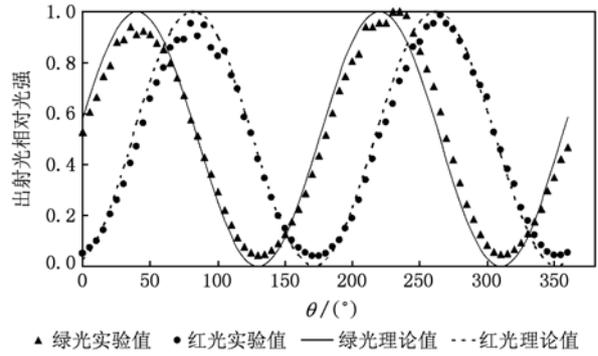


图5 归一化后的出射光强随入射线偏振光偏振取向变化曲线

根据(16)式的计算得出当 θ 等于 130.03° 和 310.03° 时绿光消光,当 θ 等于 171.47° 和 351.47° 时红光消光,而实验也测得在 θ 分别等于 $130^\circ, 310^\circ$ 和 $170^\circ, 350^\circ$ 时绿光和红光基本消光(见图6).参照文献[15],本文用(19)式定义红光和绿光的隔离度,同时依据(19)式计算出不同 θ 值下的隔离度值(图7).

$$N_{\text{green(red)}} = 10\log_{10} \frac{P_{\text{out,green(red)}}}{P_{\text{out,red(green)}}}, \quad (19)$$

式中 $P_{\text{out,green(red)}}$ 和 $P_{\text{out,red(green)}}$ 分别为绿光(红光)和红光(绿光)输出功率.

另将(17),(18)式直接代入(19)式,可分别求得理论上的红绿光对应的隔离度曲线.

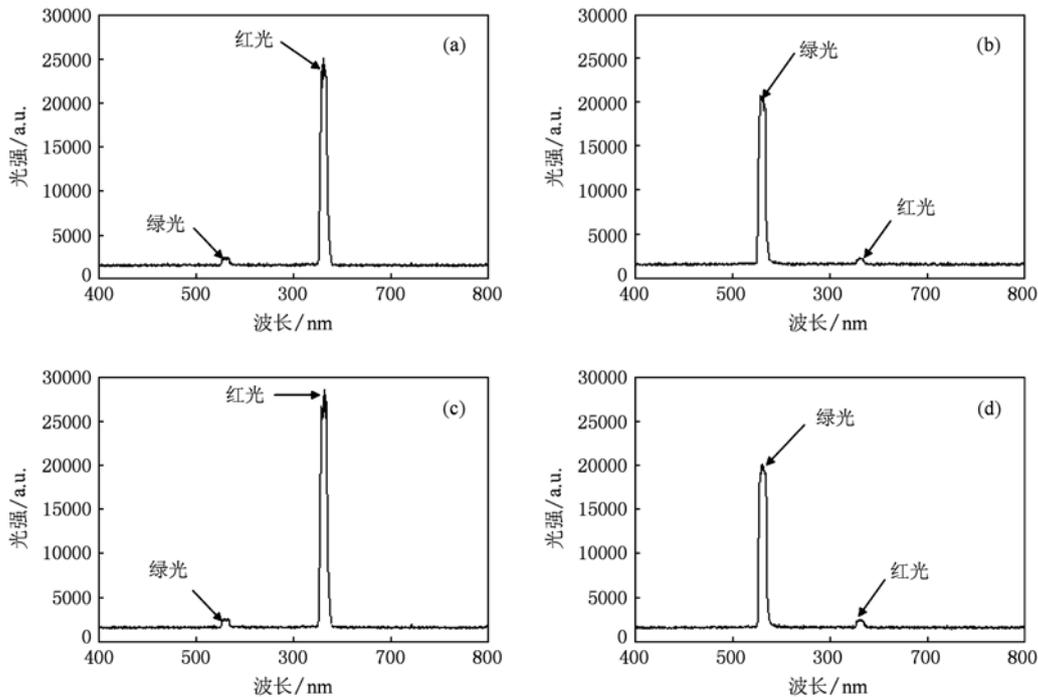


图6 起偏器旋转 $130^\circ, 170^\circ, 310^\circ$ 和 350° 所测得的谱线 (a) $\theta=130^\circ$; (b) $\theta=170^\circ$; (c) $\theta=310^\circ$; (d) $\theta=350^\circ$

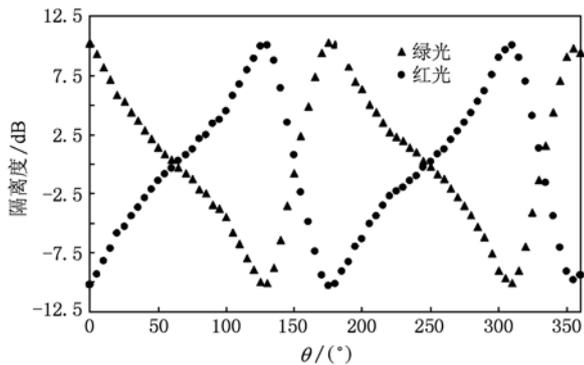


图7 不同偏振方向下红光和绿光隔离度

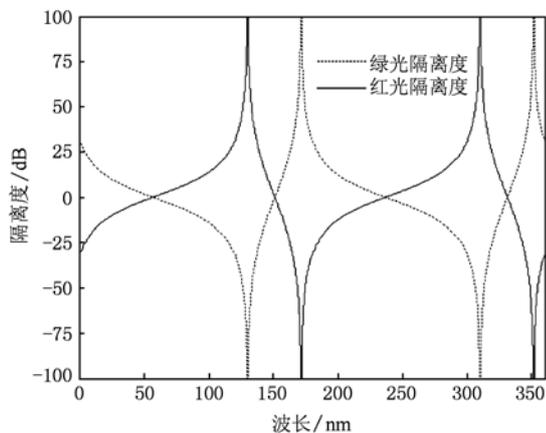


图8 不同偏振方向下红绿光隔离度理论曲线

图7所示结果表明,实验测得红绿光的隔离度

可以超过 10 dB,且随入射偏振方向隔离度变化明显;而图8曲线表明,理论上红、绿光的隔离度可超过 100 dB. 因此可以预计,在实际应用中,如对构成滤波器的元器件作进一步改进,例如对晶体作精细抛光处理、提高起偏器的性能等等,则有可能进一步提高该滤波器的实际隔离度性能.

4. 结 论

本文设计了一种新型的内反射型旋光光学滤波器,经实验检测,可对由红、绿两色激光耦合而成的线偏振光取得良好的滤波效果,在消光位置处绿光和红光的隔离度均超过或接近 10 dB,实验测得的光强随入射线偏振光的偏振方向的变化与理论模拟很好地符合. 另外,实验和理论一致表明,对应相同的输入光强,本文所设计的滤波器,能通过偏振片的转动,稳定且连续地调制出射的红光和绿光的光强,故本设计亦可作为可连续调谐的双稳态器件. 本文所设计的滤波器除必需的各向同性旋光晶体氯酸钠外,只需再配合一个偏振片,不需附加其他构件,即可巧妙利用晶体内部 Brewster 角内反射的性质而成为一种反射型的光学滤波器,较之其他光学滤波器在结构设计上更为简单,精巧,而同时具备优异的滤波性能. 本文的研究工作为进一步设计小型化、高性能的光学滤波器提供了新的方法和思路.

[1] Francon M, (Translated by Xu S L) 1984 *Optical Filters for Radiations Separation* (Beijing: Science Press) p6 (in Chinese) [弗朗松 M. 著,徐森祿译 1984 用于辐射分离的光学滤光片(北京:科学出版社)第6页]

[2] Mazur J, Mrozowski M, Okoniewski M 1992 *J. Electromagn. Waves. Appl.* **6** 641

[3] Tao W D, Xia H P, Bai G R, Dong J F, Nie Q H 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 685 (in Chinese) [陶卫东、夏海平、白贵儒、董建峰、聂秋华 2002 物理学报 **51** 685]

[4] Simon H J, Bloembergen N 1968 *Phys. Rev.* **171** 1104

[5] Cory H 1995 *J. Electromagn. Waves. Appl.* **9** 805

[6] Chun Ye 2003 *Appl. Opt.* **42** 4505

[7] Chun Ye 2006 *Appl. Opt.* **45** 1162

[8] Zhang S, Wu F Q, Wu W D, Wang H F 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 717

[9] Zhang S, Wu F Q, Wu W D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5020 (in Chinese) [张 姗、吴福全、吴闻迪 2008 物理学报 **57** 5020]

[10] Zhang S, Wu F Q, Su F F, Wu W D, Shao J P, Hong F 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 2215 (in Chinese) [张 姗、吴福全、苏富芳、邵俊平、洪 芳 2008 光学学报 **28** 2215]

[11] You P, Yu G P 2003 *Optics* (Beijing: Higher Education Press) p50 (in Chinese) [游 璞、于国萍 2003 光学(北京:高等教育出版社)第50页]

[12] Lu Y X, Lv B D 1989 *Matrix Optics* (Dalian: Dalian University of Technology Press) pp356—357 (in Chinese) [卢亚雄、吕百达 1989 矩阵光学(大连:大连理工大学出版社)第356—357页]

[13] Yu Q Z, Li G H 2000 *J. of Qufu Norm. Univ.* **26** 43 (in Chinese) [于全芝、李国华 2000 曲阜师范大学学报 **26** 43]

[14] Rochester Institute of Light (Translated by Zhu Q C, Chen S S) 1991 *Introduction to Matrix Optics* (Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Literature Publishing House) p323 (in Chinese) [罗彻斯特光学院著 竺庆春、陈时胜译 矩阵光学导论(上海:上海科学技术文献出版社)第323页]

[15] Yu K, Liu W, Huang S X 2009 *Act Phot. Sin.* **38** 670 (in Chinese) [俞 侃、刘 文、黄德修 2009 光子学报 **38** 670]

Study on a novel optical filter by internal reflection and optical rotation*

Zhang Bin Pan Xue-Feng Tao Wei-Dong[†]

(Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

(Received 4 August 2010; revised manuscript received 18 August 2010)

Abstract

Based on the optical rotatory dispersion and the isotropy of the sodium chlorate crystal, a new type of optical filter by internal reflection and optical rotation is firstly developed. Due to the speciality of the zero reflectivity when the linearly polarized light is reflected at Brewster angle, the optical filter can give a good filtering effect by using only a single polarizer. The filtering characteristics were analyzed by Mueller matrix and tested by experiment. The results show that the intensity of emitted red or green light can be continuously modulated by changing the angle of the polarizer. The extinction of green or red light appears when the rotation angle of the polarizer is respectively 133.36° or 173.06° relative to the initial position. The isolation of green and red can be about 10 dB.

Keywords: optical filter, isotropic, rotatory dispersion, polarization

PACS: 42.79.Ci, 78.20.Ek, 42.25.Ja

* Project supported by the Ningbo Natural Science Foundation (Grant No. 2009A610011) and the K. C. Wong Magna Fund in Ningbo University.

[†] Corresponding author. E-mail: taoweidong@nbu.edu.cn