

文章编号: 0253-2239(2010)06-1783-05

Solc 型液晶可调谐滤光片的研究

杨国伟 郑臻荣* 李海峰 刘 旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 对 Solc 型滤光片基本原理的分析,表明改变单轴晶体光程差就可实现可调谐滤光。向列相液晶具有电控双折射效应,因此提出利用平行定向的向列相液晶盒作为电控双折射相位元件构成可调谐的 Solc 型滤光片。设计并制作了一种具有代表性的六片式扇形结构形式。实验表明,该器件具有良好的调谐性能,可实现在 450~650 nm 区间光谱分辨率小于 93 nm 和在 550~650 nm 区间光谱分辨率 20 nm 的可调谐滤光。Solc 型滤光电具有透射率高、旁瓣少的优点,可应用在要求高透射率的场合。

关键词 光谱学;Solc 型可调谐滤光片;双折射;液晶

中图分类号 TB851.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1783

Research on Solc Liquid Crystal Tunable Filter

Yang Guowei Zheng Zhenrong Li Haifeng Liu Xu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract By analyzing the basic principle of Solc filter, it was concluded that the filter can be tuned by varying optical path difference of uniaxial crystal. As nematic liquid crystal provided with electric-control birefringent effect, a tunable Solc filter using parallel nematic liquid crystal cell as electric-control birefringent phase element was put forward. One representative form of six-patch fan structure has been designed and fabricated. Experimental results revealed a good tuning ability of the device. A tuning range of 450~650 nm with spectral resolution of less than 93 nm and a 550~650 nm tuning range with spectral resolution of 20 nm were obtained. The Solc filter has the advantages of high transmission and few sidelobes, and can be applied in high transmission requiring cases.

Key words spectroscopy; Solc tunable filter; birefringence; liquid crystal

1 引 言

可调谐滤光片在光通信技术和光谱成像技术领域有着重要应用,用来实现通信信道的切换和光谱通道的选择。可调谐滤光片种类很多,基于液晶电光效应的可调谐滤光片^[1,2]以其调谐连续、通光孔径大和可靠性好等优点,已成为目前最主要的可调谐滤光片之一。

液晶可调谐滤光片有三种基本结构,分别是 FP 腔型^[3]、Lyot 型^[4,5]和 Solc 型^[6]。FP 腔型液晶可调谐滤光片^[7~9]就是在普通 FP 腔中灌入液晶,通过调节加载在液晶 FP 腔两侧的电压来调节 e 光折射率,从而实现 e 光透射光谱的调谐。FP 腔型液晶可调谐滤光片可以实现很高的光谱分辨率,已应用于

光通信中的密集波分复用系统,在可见光区由于其自由光谱区过窄而限制了它的应用。Lyot 型滤光片是基于双折射晶体偏振干涉效应提出的,而液晶具有双折射效应且可由电场或磁场来调节。Lyot 型液晶可调谐滤光片^[10]是将向列相液晶盒作为相位元件,可用电压来调谐滤光。实际应用中一般要由多级构成,调谐范围宽,光谱分辨率高,旁瓣多,但因为所使用的偏振片数量多而导致透射率低。Solc 型滤光片是由 Ivan Solc 在 1953 年首次提出的,也是基于晶体偏振干涉效应的原理,由处于平行或正交偏振系中的一堆相同的以规定方位角取向的双折射晶片组成,每一个双折射晶片的方位角取向以前偏振器透光轴为参照。可以单级使用,透射率高,旁

收稿日期: 2009-06-17; 收到修改稿日期: 2009-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(60708013)资助课题。

作者简介: 杨国伟(1984—),男,硕士研究生,主要从事可调谐滤光器件方面的研究。E-mail: ericyang@zju.edu.cn

导师简介: 李海峰(1965—),男,博士,教授,主要从事显示技术及光学薄膜等方面的研究。E-mail: lihailfeng@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zZR@zju.edu.cn

瓣数少,但相位元件数较多和光谱分辨率低。可见, Lyot 型和 Solc 型滤光片有着一定的互补。

国内在 Lyot 型滤光片方面已有一定研究,如曲阜师范大学激光研究所研制的单级和两级 Lyot 型液晶可调谐滤光片^[11~13]、浙江大学光电显示所研制的四级^[14]和六级 Lyot 型液晶可调谐滤光片等。本文则按照 Lyot 型液晶可调谐滤光片的研究方法,将 Solc 型滤光片中相同晶片替换成相同的向列相液晶盒,来构成 Solc 型液晶可调谐滤光片,并对其进行了理论分析和实验研究。Solc 型滤光片有折叠式和扇形两种类型,两者处于不同的偏振系中并且在晶片方位角取向上不一致,但是理论分析和滤光效果基本一致,因此本文只对扇形 Solc 型滤光片进行讨论。通过模拟计算和实际测试的对比,总结出此类滤光片的一些基本特性和需要注意的问题,对各种影响因素进行讨论,也为研究 Lyot 和 Solc 综合型可调谐滤光片做出一些有益探索。

2 理论分析与设计

扇形 Solc 型滤光片由多个相同的双折射晶片组成,每个晶片的光轴平行于透光面,假定前偏振器透光轴方向为 x 轴方向,那么 N 个晶片的光轴与 x 轴夹角依次为 $\beta, 3\beta, 5\beta, \dots, (2N-1)\beta$, 后偏振器透光轴与前偏振器透光轴平行。扇形 Solc 型滤光片透射率公式^[6]

$$\begin{cases} -\cos 2\chi = \cos 2\beta \sin \frac{1}{2}\Gamma, \\ T = \left| \tan 2\beta \cos \chi \frac{\sin N\chi}{\sin \chi} \right|^2, \end{cases} \quad (1)$$

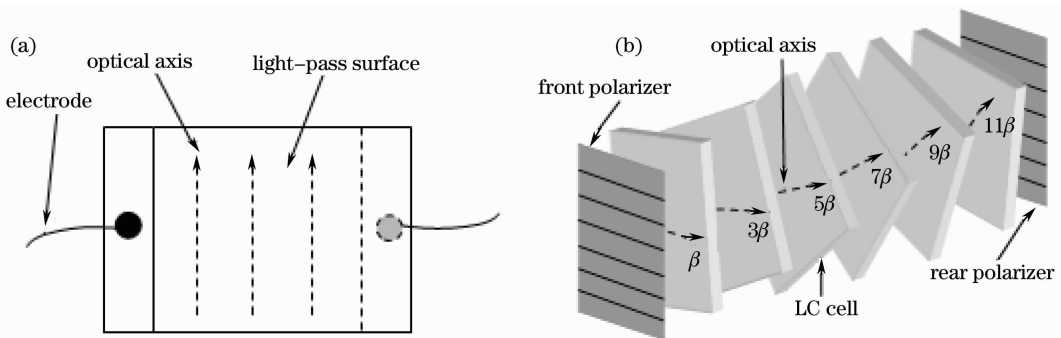


图 1 (a) 平行向列相液晶盒示意图; (b) 六片式扇形 Solc 型液晶可调谐滤光片结构示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of parallel nematic liquid crystal cell; (b) structure schematic diagram of six-patch fan Solc liquid crystal tunable filter

扇形 Solc 型液晶可调谐滤光片的基本结构就是用平行定向的向列相液晶盒代替双折射晶片,利用液晶电控双折射效应就可实现滤光片的调谐功能。滤

式中每个晶片的相位延迟量 $\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d$, Δn 为晶片双折射率, d 为晶片厚度。因此当 $\Gamma = 2m\pi, m = 0, 1, 2, \dots$ 和 $\beta = \pi/4N$ 时,透射率 T 最大。

由于晶片的相位延迟量 $\Gamma = 2m\pi$ 时产生透射极大值,可以导出滤光片自由光谱区公式为

$$\Delta\lambda_{\text{FSR}} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta n d}, \quad (2)$$

当双折射晶体材料选定后,滤光片自由光谱区与晶片厚度成反比。透射峰的半峰全宽(FWHM)公式可以根据(1)式得出

$$\Delta\lambda_{1/2} = 1.60 \frac{\lambda_0}{2mN}, \quad (3)$$

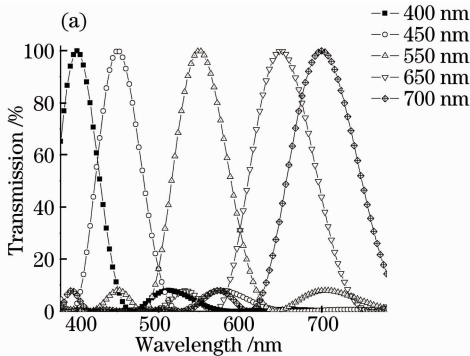
由(3)式可见, Solc 型滤光片透射峰的 FWHM(即滤光片光谱分辨率)与相位差和晶片数成反比。

根据上面概述, Solc 型滤光片中方位角 β 由所使用晶片个数 N 决定,即 $\beta = \pi/4N$,那么透射峰出现在 $\Gamma = 2m\pi, m = 1, 2, 3, \dots$ 时,即 $\Delta n d = m\lambda, m = 1, 2, 3, \dots$ 时。当双折射光程差 $\Delta n d$ 可以调节时, Solc 型滤光片就可实现可调谐滤光。液晶是一种“液态状”晶体,具有双折射性质,并且在电场或磁场的作用下液晶分子会转动而改变双折射率,因此液晶具有电控双折射效应。通常情况下向列相液晶分子长轴方向是不一致的,需要制作成平行定向的液晶盒,液晶盒中液晶分子长轴方向一致且平行于透光面。这种平行定向的向列相液晶盒结构如图 1(a)所示,它相当于一块正性晶体,在液晶盒上加载电压后,液晶分子长轴(即光轴)会沿电场方向转动改变 e 光折射率,从而改变双折射率 Δn 及双折射光程差 $\Delta n d$ 。

滤光片设计目标是实现 400~700 nm 区间的调谐滤光,液晶盒的双折射光程差必须满足能够在 400~700 nm 之间调节,滤光峰值必须处于 $\Gamma = 2\pi$ 的条件

下,即 $m = 1$ 。实际制作的液晶盒间隔层厚度为 $10 \mu\text{m}$,所用液晶材料为 Merck 公司的 E44 液晶,室温下该液晶在 589.3 nm 处双折射率 Δn 为 0.2627 ,此液晶盒的双折射光程差的调谐范围可从小于 $400 \sim 2600 \text{ nm}$,可以满足滤光片的设计要求。出于制作工艺和测试条件的考虑,实际应用中 N 一般不会大于 6 ,并且透射峰 FWHM 在 N 大于 6 后变化量很小,所以采用 6 个液晶盒构成的六片式扇形 Solc 型液晶可调谐滤光片具有代表性,其结构如图 1(b)所示。

根据(3)式可得出该滤光片的光谱分辨率小于



$\Delta\lambda_{1/2} = 93 \text{ nm}$ 。在不考虑元件光能损耗的情况下进行模拟计算,该 Solc 型滤光片在 $400, 450, 550, 650$ 和 700 nm 处调谐滤光模拟结果如图 2(a)所示。由于使用 $10 \mu\text{m}$ 厚液晶盒,利用其大于 700 nm 双折射光程差,可以实现较高光谱分辨率在较小调谐范围内的调谐滤光,如利用 $2200 \sim 2600 \text{ nm}$ 双折射光程差可实现光谱分辨率 20 nm ;在 $550 \sim 650 \text{ nm}$ 范围内调谐滤光,Solc 型滤光片在 $550, 600$ 和 650 nm 处调谐滤光的模拟结果如图 2(b)所示。

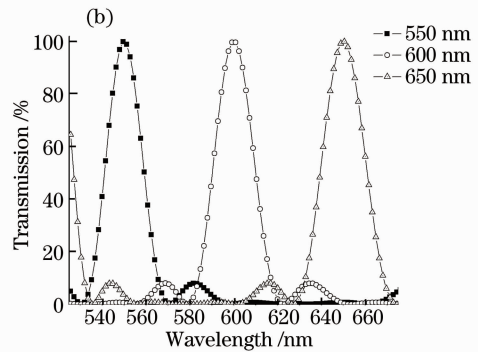


图 2 调谐范围在(a)400~700 nm,(b)550~650 nm 区间的滤光模拟图

Fig. 2 Simulated profile of filter in tuned range of (a) 400~700 nm, (b) 550~650 nm

3 器件制作与测试

在镀有 ITO 导电薄膜的平板玻璃上,用胶胶的方法甩上一层聚酰亚胺涂层胶,经高温烘烤固化后,进行平行摩擦定向处理,加入直径为 $10 \mu\text{m}$ 的微珠作为间隔材料,控制液晶盒厚度为 $10 \mu\text{m}$ 。然后灌入液晶材料 E44,用紫外胶封装,在液晶盒两侧预留的 ITO 薄膜上加电极,制成平行定向的向列相液晶盒。将 6 个相同的液晶盒放置于事先制作好的圆筒状夹具中,使得 6 个液晶盒光轴与前偏振器透光轴夹角依次为 $7.5^\circ, 22.5^\circ, 37.5^\circ, 52.5^\circ, 67.5^\circ$ 和 82.5° ,后偏振器透光轴与前偏振器透光轴平行,图 3 为六片式扇形 Solc 型液晶可调谐滤光片的实物图。

测试系统包括 UV-3101PC spectrophotometer 和由上位机控制的 8 路交流信号发生器,结构如图 4所示。将 8 路信号发生器中 6 路分别与 6 个液晶盒相连,每一路信号的幅值由上位机通过串口通信来调节。由于实际制作的液晶盒会有一定差异,在调谐滤光测试之前需要对每个液晶盒进行单独测试,以确定各个液晶盒所加电压与双折射光程差之间的大致关系。在调谐滤光测试中,将 6 个液晶盒依次插入对应夹角的夹具槽,调谐所加电压使主透射峰对准所滤波长,重复操作完成各个所滤波长处的调谐滤光。

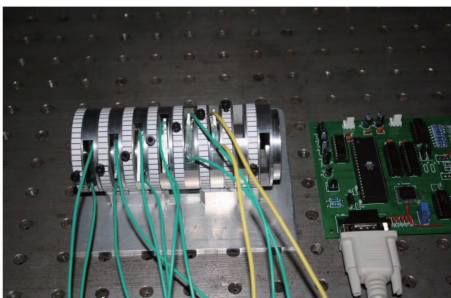


图 3 六片式扇形 Solc 型液晶可调谐滤光片的实物图

Fig. 3 Actual figure of six-patch fan Solc tunable filter

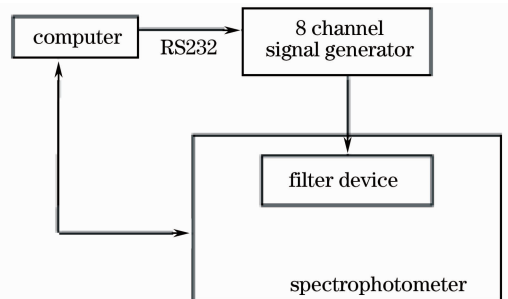


图 4 滤光片测试系统结构图

Fig. 4 Sketch of filter test system

4 测试结果与讨论

按照上述方法对实际制作的六片式扇形 Solc 型液晶可调谐滤光片进行测试,利用液晶盒双折射差在 400~700 nm 范围内完成滤光峰值分别在 400,450,550,650 和 700 nm 处的测试,此时 $m=1$,光谱分辨率小于 93 nm,如图 5(a)所示。调节液晶盒双折射差在 2200~2600 nm 区间完成滤光峰值在 550,600 和 650 nm 处的测试,此时 $m=4$,光谱分辨率为 20 nm,如图 5(b)所示。图中,透射率是以前偏振器出射偏振光作为 100% 的透射率。

从图 5 中可以看出,滤光片透射率在 20%~35% 之间,已明显高于使用相同材料制作的六级

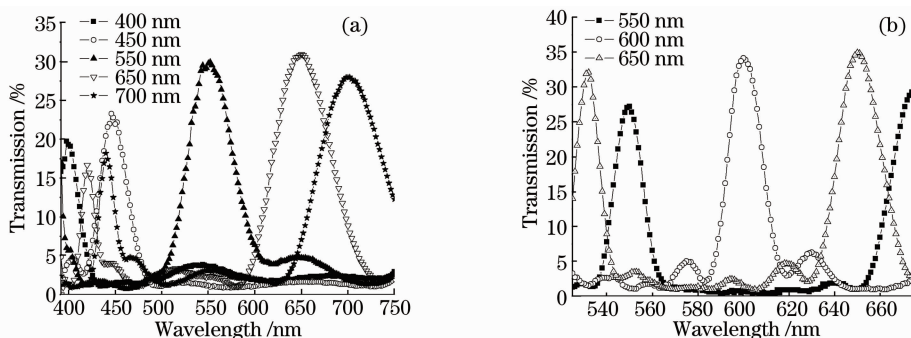


图 5 调谐范围在(a)400~700 nm, (b)550~650 nm 区间的滤光测试图

Fig. 5 (a) Test pattern of filter in tuned range of 400~700 nm, (b) test pattern of filter in tuned range of 550~650 nm

实际 Solc 型液晶滤光片在 $m=1$ 这种情况下调谐至 650 nm 和 700 nm 波长处,分别在 420 nm 和 440 nm 处出现第二级峰值,如图 5(a)所示。这与图 2(a)所示的模拟计算结果不一致,模拟计算可以实现 400~700 nm 区间的调谐,但实际测试结果显示无法达到设计要求。在测试多个液晶盒后,可以确定不是滤光片制作和测试上的问题,而是模拟计算时没有考虑液晶材料的色散,造成了模拟计算和实际测试不一致。液晶材料 E44 的制造商 Merck 公司只给出在 20 °C 下 589.3 nm 波长处的 $\Delta n = 0.2627$, $n_e = 1.7904$, $n_o = 1.5277$ 。在进行模拟计算时,400~700 nm 光谱区间内一致使用双折射率 $\Delta n = 0.2627$,实际液晶材料在不同波长处双折射率肯定不一致,因此使用不变双折射率 Δn 的模拟计算必然会有误差。为了确定实际器件调谐范围减小是液晶材料的色散造成的,设计了一个测量液晶双折射色散的简单实验。将制作的 10 μm 液晶盒置于平行偏振系中,且液晶盒光轴与偏振系透光轴夹角为 45°,构成单级 Lyot 型滤光片,测试图如图 6(a)所示。6 个透射峰所在波长分别为 401.8, 425.2, 458.4, 508.8, 589.3 和 731.8 nm,那么根据在 589.3 nm 处

Lyot 型液晶可调谐滤光片 10% 左右的透射率。原因在于六片式 Solc 型滤光片只用 2 个偏振片,六级 Lyot 型滤光片则使用 7 个偏振片,而每个偏振片实测透射率为 83%,因此六级 Lyot 型滤光片的透射率仅为六片式 Solc 型滤光片的 39.4%。可以通过选用更高透射率的偏振片来提高滤光片透射率。制作液晶盒用 2 mm 厚 ITO 玻璃,透射率约为 82%,液晶盒透射率为 80% 左右。选用透射率更高的 ITO 玻璃,如深圳莱宝公司提供 1.1 mm ITO 导电玻璃的透射率在 89% 左右,还可以在 ITO 玻璃上镀减反膜进一步提高滤光片的透射率。

液晶材料 E44 的双折射率,算出其余波长处的双折射率。对上述 6 个波长处的双折射率进行线性插值,计算出 400~700 nm 光谱区间的双折射率,来修正模拟计算。对 Solc 型滤光片中第三个液晶盒做模拟计算,实际测试和修正模拟计算的对比,图 6(b)为滤光波长为 700 nm 和 $m=1$ 时模拟计算、实际测试和修正模拟计算的对照图。从图 6(b)可以看出,实际测试结果和修正模拟计算结果非常接近,实际制作的 Solc 型滤光片是正确的,从图 5(a)可看出该滤光片可以实现 450~650 nm 的调谐。比较图 2(b)和图 5(b)可知,在 $m=4$ 这种情况下,实际 Solc 型滤光片的测试结果与理论值符合较好。但存在自由光谱区变小的现象,这一点也印证了液晶材料色散的影响,在今后设计时必须考虑。

实际制作的六片式扇形 Solc 型液晶可调谐滤光片在 $m=1$ 和 4 两种级数状态下,其光谱分辨率与理论值吻合较好,由于液晶材料的双折射色散,短波段光谱分辨率会比未经修正的理论值小,而长波段光谱分辨率比未经修正的理论值稍大。测试结果显示,Solc 滤光片的旁瓣数少但带外泄漏大,如图 5(a)和 5(b)所示。这些现象与理论分析符合,无

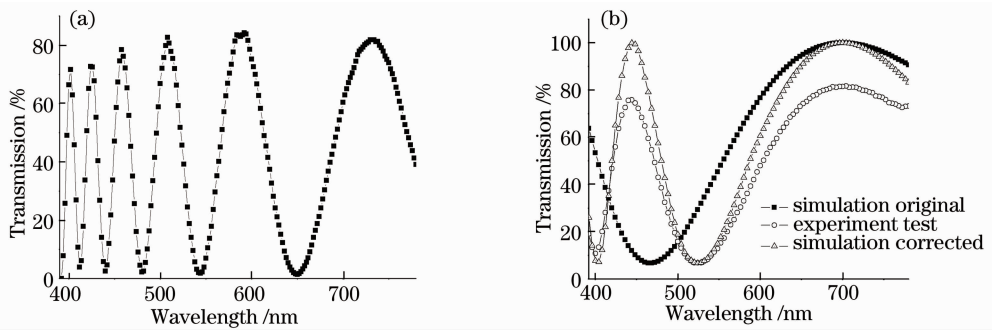


图 6 (a)单级 Lyot 型滤光片测试图;(b)模拟结果、测试结果和修正结果的对比

Fig. 6 (a) Test pattern of 1-stage Lyot filter; (b) comparison of simulation result, test result and corrected result

法通过完善 Solc 型滤光片本身来改进,但可以考虑加入 Lyot 型结构来减小带外泄漏。

5 结 论

阐述了 Solc 型滤光片的结构和原理,同时论述其实现可调谐的条件,而液晶及液晶盒的性质刚好成为满足这个条件的极佳选择。通过对六片式扇形 Solc 型液晶可调谐滤光片的理论设计、实际制作及测试分析,验证了这种结构滤光片完全可行。理论设计时滤光片可以实现 400~700 nm 区间光谱分辨率为 93 nm 的可调谐滤光,实际测试中只能实现 450~650nm 区间的可调谐滤光,原因是设计时没有考虑液晶材料的双折射色散。实际测试滤光片可以在 550~650 nm 区间实现光谱分辨率 20 nm 的调谐滤光,与理论吻合,但自由光谱区有所缩小。测试结果也显示出透射率高、旁瓣少和带外泄漏大等 Solc 型滤光片的典型特点,通过使用更高透射率的 ITO 玻璃、ITO 玻璃镀减反膜及选用高透射率偏振器,进一步提高滤光片透射率。该六片式扇形 Solc 型液晶可调谐滤光片可以应用在要求高透射率的场合,也为 Lyot 型和 Solc 型液晶可调谐滤光片的互补性结合起到一定指导和实践意义。

参 考 文 献

- 1 K. Greg. Tunable birefringent filters using liquid crystal variable retarders[C]. *SPIE*, 1994, **2265**: 193~201
- 2 S. Jackie, M. R. Simon, P. G. Michael. High-performance tunable filter[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(6): 1081~1088
- 3 J. T. Knudtson, D. S. Levy, K. C. Herr. Electronically tunable, first-order Fabry-Pérot infrared filter [J]. *Optical engineering*, 1996, **35**(8): 2313~2320
- 4 W. E. John. The birefringent filter[J]. *J. the Optical Society of America*, 1949, **39**(3): 229~242
- 5 H. Zongfu. A high performance tunable optical filter based on cascaded polarization interference filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1): 15~17
- 6 W. E. John. Solc birefringent filter[J]. *J. the Optical Society of America*, 1958, **48**(3): 142~145
- 7 Chen Haixing, Huang Tengchao, Shen Weidong *et al.*. Tunable liquid crystal Fabry-Pérot filter for dense wavelength division multiplexing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1095~1098
陈海星, 黄腾超, 沈伟东等. 一种用于密集波分复用系统中的可调谐液晶法布里-珀罗滤光片[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1095~1098
- 8 Lü Weige, Chen Haixing, Gu Peifu *et al.*. Study of the tuning performance of tunable liquid crystal filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1538~1542
吕玮阁, 陈海星, 顾培夫等. 可调谐液晶滤波器的调谐性能研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1538~1542
- 9 Shen Ruilin, Song Kai, Zhang Yang' an *et al.*. Experimental investigation of a tunable liquid-crystal-etalon filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(1): 41~45
申瑞林, 宋开, 张阳安等. 液晶可调谐光滤波器的实验研究 [J]. *中国激光*, 1997, **A24**(1): 41~45
- 10 Yun Maojin, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. Characteristics of Lyot tunable liquid crystal filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 627~631
云茂金, 李国华, 吴福全等. 利奥型可调谐液晶电光滤波器的特性分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 627~631
- 11 Yun Maojin, Li Guohua, Wang Ning *et al.*. Study of Lyot tunable liquid crystal filter[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2003, **18**(1): 26~30
云茂金, 李国华, 王宁等. Lyot 型可调谐液晶电光滤波器的特性分析[J]. *液晶与显示*, 2003, **18**(1): 26~30
- 12 Kong Yong, Li Guohua, Yun Maojin *et al.*. A research on multiple tunable liquid crystal filters[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(5): 474~476
孔勇, 李国华, 云茂金等. 多级液晶调谐滤光片的研究[J]. *光电子•激光*, 2001, **12**(5): 474~476
- 13 Zhang Jian, Li Guohua, Peng Handong *et al.*. Theoretical study of multiple tunable liquid crystal 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
- 14 Yang Guowei, Zheng Zhenrong, Chen Xiaoxi *et al.*. Study of multiple-stage Lyot liquid crystal tunable filter[J]. *J. Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, **43**(6): 1163~1167
杨国伟, 郑臻荣, 陈小西等. 多级 Lyot 型液晶可调谐滤光片的研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2009, **43**(6): 1163~1167