

双折射滤波器晶体片厚度精度与滤波性能的研究

吴闻迪^{1,2,3} 王会丽¹ 周田华^{2,3} 周 军^{2,3} 吴福全¹

¹ 曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165
² 中国科学院上海精密光学机械研究所, 上海 201800
³ 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

摘要 为了对双折射滤波器中晶体片厚度需要达到的精度进行定量分析, 根据双折射滤波器的滤波原理, 引入了晶体片材料的双折射率色散, 得出了晶体片的厚度偏差、相位延迟量偏差、目标波长移动量之间的关系, 最后进行了模拟验证。结果表明, 对于铌酸锂晶体制作的晶体片, 材料的双折射率色散是不可忽略的, 基于它得到的厚度精度是保证滤波器性能的必要条件, 这些研究结论对于高性能双折射滤波器的实际制作有重要的参考价值。

关键词 光学器件; 偏振光学; 双折射滤波器; 偏振干涉; 厚度精度; 滤波性能

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1208009

Research on the Filter Performance with Crystal Thickness Accuracy in the Birefringent Filters

Wu Wendi^{1,2,3} Wang Huili¹ Zhou Tianhua^{2,3} Zhou Jun^{2,3} Wu Fuquan¹

¹ The Laser Research Institute, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China
² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
³ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai 201800, China

Abstract In order to make quantitative analysis to the accuracy crystal thickness in the birefringent filters, based on the fundamental filter theory, by introducing the birefringent dispersion of crystal, the exact relationship of crystal thickness accuracy, phase retarder deviation and spectrum shift is built up. Theoretical analysis and simulation are put forward strictly. The results show that the birefringent dispersion cannot be neglected when using LiNbO₃ as the materials of plates and that the crystal thickness accuracy can ensure a good transmission spectrum, which may be useful for constructing high-performance birefringent filter.

Key words optical devices; polarization optics; birefringent filters; polarization interference; thickness accuracy; filter performance

OCIS codes 120.2440; 000.4430; 160.3730; 230.5440

1 引 言

目前, 双折射滤波器已在太阳物理^[1]、生物医学成像^[2]、水文观测^[3]、激光滤波^[4,5]等领域得到广泛的应用, 虽然不同的领域对滤波性能的要求不尽相同, 但是较窄的滤波带宽、更宽的自由光谱范围、更大的视场角是人们对滤波器性能要求的趋势^[6,11]。然而不管双折射滤波器的结构怎样复杂、使用的晶

体材料如何变化, 能够对各级晶体片的厚度精度、对滤波性能的影响进行准确的理论分析始终是至关重要的。此前, Title 等^[12-13]对双折射滤波器中各种制作偏差对透射光谱的影响作出了定性的分析, 但没有给出定量的计算结果, 而且忽略了材料的双折射率色散的影响, 得到的仅是目标波长移动量 $\delta\lambda$ 和相位延迟量偏差 $\delta\Gamma$ 之间的近似关系 ($\delta\Gamma/\Gamma =$

收稿日期: 2014-06-03; **收到修改稿日期**: 2014-07-28

基金项目: 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室开放课题(2012ADL02)、山东省高等学校科技计划项目(J13LJ06)

作者简介: 吴闻迪(1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光技术与应用方面的研究。E-mail: wuwendi_100@163.com

$\delta\lambda/\lambda$),因此直接应用到具体的设计时会有较大的误差。本文根据双折射滤波器的滤波原理,引入晶体片材料的双折射率色散的影响,得到目标波长移动量 $\delta\lambda$ 和相位延迟量偏差 $\delta\Gamma$ 之间的准确关系;结合多级结构,通过进一步的理论推导,以得到对各级晶体片厚度精度的要求;同时进行模拟验证,为实际晶体片的加工制作精度提供可靠的理论依据。

2 目标波长移动量 $\delta\lambda$ 和相位延迟量偏差 $\delta\Gamma$ 之间的准确关系

最简单的双折射滤波器结构^[14]如图1所示。起偏器 P_1 和检偏器 P_2 的透振方向相互平行,中间插入双折射晶体片 B,晶体光轴方向平行于晶体片表面,并且与起偏器的透振方向成 45° 角。入射的自然光通过起偏器后变为线偏振光,这束线偏振光在双折射晶体片内等振幅地分解为 o 光和 e 光,o、e 光在晶体片内的光程不同,经过晶体片后两振动分量产生一定的相位差。通过检偏器后产生振动方向相互平行的两个分量,从而发生偏振干涉。若忽略各元件的光能损失,可将最大透射光强归一化为 1,利用琼斯矩阵可以得到单级结构的透射光强公式:

$$T = \cos^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right), \quad (1)$$

式中 Γ 为 o 光波和 e 光波在晶体片内所产生的相位延迟量。

$$\Gamma = \frac{2\pi d(n_e - n_o)}{\lambda} = \frac{2\pi d\Delta n}{\lambda}, \quad (2)$$

式中 d 是晶体片的厚度; n_e 、 n_o 是晶体片中 e、o 光波的主折射率; Δn 是 o、e 光的双折射率。

由(1)式可知,只要某波长 λ 满足 $\Gamma = 2m\pi$,则该波长的透射光强最大,对应的干涉级为 $m = \frac{d\Delta n}{\lambda}$ (其中 m 为正整数);若某波长满足 $\Gamma = (2m + 1)\pi$,则该波长的透射光强为 0。

自由光谱范围($\Delta\lambda_{\text{FSR}}$)和半峰全宽($\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$)是描述双折射滤波器滤波效果的两个重要参量,它们

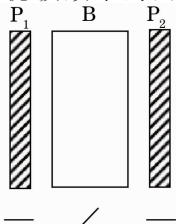


图1 单级双折射滤波器

Fig. 1 Single-stage birefringent filter

分别为

$$\Delta\lambda_{\text{FSR}} = \frac{\lambda_0}{d[\alpha - (\Delta n/\lambda)]}, \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 0.5 \frac{\lambda_0}{d[\alpha - (\Delta n/\lambda)]}, \quad (4)$$

式中 λ_0 是目标波长; α 是晶体片材料的双折射率色散。

根据(2)式,当晶体片的实际厚度与设计值存在 δd 的制作偏差时,目标波长 λ_0 通过晶体片后所产生的相位延迟量不再等于 $2m\pi$,对应的相位延迟量偏差为 $\delta\Gamma$ 。假设此时目标波长 λ_0 附近的某光波 λ' 满足 $\Gamma' = 2m\pi$,则定义两者的差值($\lambda_0 - \lambda'$)为目标波长移动量 $\delta\lambda$ 。由此可见,为了研究晶体片的厚度偏差对目标波长 λ_0 的影响,必须首先得到目标波长移动量 $\delta\lambda$ 和相位延迟量偏差 $\delta\Gamma$ 之间的准确关系。

对(2)式两边取微分得^[15]

$$\begin{aligned} \delta\Gamma &= 2\pi d \frac{\delta\Delta n}{\lambda} + 2\pi d \left(-\frac{\Delta n}{\lambda^2}\right) \delta\lambda, \\ \frac{\delta\Gamma}{\delta\lambda} &= \frac{2\pi d}{\lambda} \left(\frac{\delta\Delta n}{\delta\lambda} - \frac{\Delta n}{\lambda}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

通常,晶体材料的双折射率色散表示为

$$\alpha = \frac{\delta\Delta n}{\delta\lambda} = \frac{\delta n_e}{\delta\lambda} - \frac{\delta n_o}{\delta\lambda}. \quad (6)$$

则有

$$\frac{\delta\Gamma}{\delta\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \left(\alpha - \frac{\Delta n}{\lambda}\right). \quad (7)$$

对(7)式进行变形可得

$$\frac{\delta\Gamma}{\Gamma} = \frac{\delta\lambda}{\lambda} \frac{[\alpha - (\Delta n/\lambda)]}{\Delta n/\lambda}. \quad (8)$$

令 $\beta = \alpha - \frac{\Delta n}{\lambda}$, $\gamma = \frac{\beta}{(\Delta n/\lambda)}$,则(8)式可以简化为

$$\frac{\delta\Gamma}{\Gamma} = \gamma \frac{\delta\lambda}{\lambda}. \quad (9)$$

(9)式给出了目标波长移动量 $\delta\lambda$ 和相位延迟量偏差 $\delta\Gamma$ 之间的准确关系,它是进行分析晶体片厚度偏差对滤波性能影响的基础。显然,若忽略晶体材料的双折射率色散 α ,则有 $\gamma = -1$ 。当某种晶体的 γ 值越接近于 -1 ,它的双折射率色散可以忽略不计;反之,晶体的 γ 值偏离 -1 越大,它的双折射率色散就不可忽略。根据文献^[16]给出的铌酸锂材料的 Sellmeier 方程,作出的可见光范围内 $\Delta n/\lambda$ 和双折射率色散 α 关于波长的关系曲线如图2所示。以 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 为例,在温度 $T = 293 \text{ K}$ 时,铌酸锂材料的双折射率色散 $\alpha = 0.0399 \mu\text{m}^{-1}$, $\Delta n/\lambda = -0.1370 \mu\text{m}^{-1}$,此时 $\gamma = -1.291$ 。由此可知,在可见光范围内,铌酸锂材料的双折射率色散 α 是不可忽略的。

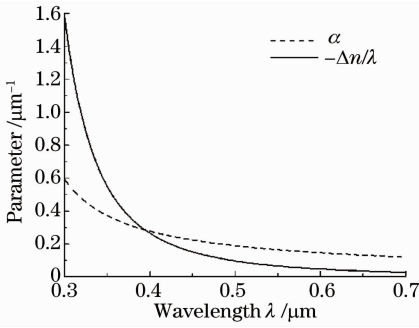

 图2 铌酸锂晶体 $-\Delta n/\lambda$ 、 α 与波长 λ 的关系曲线

 Fig.2 Curves of $-\Delta n/\lambda$ and birefringence dispersion α versus wavelength λ of LiNbO_3

3 多级双折射滤波器各级晶体片的厚度精度与目标波长移动量的关系

多级双折射滤波器通常设计成多个单级迭加的形式,各级起偏器和检偏器的透振方向相互平行,各级晶体片的光轴方向也相互平行,且与偏振器的透振方向成 45° 角,各级晶体片厚度比通常按 $1:2:4:\dots:2^{(N-1)}$ 的比例进行设计以达到最佳的滤波效果。此时,总的透射光强就等于各级元件的透射光强之积,其表达式为^[17]

$$T_N = \prod_{i=1}^{i=N} T_i = T_1 \times T_2 \times \dots \times T_N = \cos^2\left(\frac{\Gamma_1}{2}\right) \times \cos^2\left(\frac{\Gamma_2}{2}\right) \times \dots \times \cos^2\left(\frac{\Gamma_N}{2}\right). \quad (10)$$

在考虑由晶体片的厚度偏差 δd 所引起的透射光谱移动时,可以通过建立各个物理量之间的变化关系得到最终目标波长移动量 $\delta\lambda$ 。

在多级双折射滤波器中,允许目标波峰的移动量通常很小,可近似认为 $\frac{\Delta n}{\lambda}$ 为定值,利用(2)式可得

$$\frac{\delta\Gamma}{\Gamma} = \frac{\delta d}{d}. \quad (11)$$

根据(9)式给出的相位延迟量的变化量 $\delta\Gamma$ 与目标移波长的移动量 $\delta\lambda$ 之间的关系,可以得到由晶体片厚度偏差 δd 引起的目标波长的移动量 $\delta\lambda$ 满足

$$\delta d_n = d_n \gamma \frac{\delta\lambda}{\lambda}, \quad (12)$$

式中下角符 $n = 1, 2, 3, \dots, N$, N 是双折射滤波器的级数; d_n 与 δd_n 是第 n 级晶体片的设计厚度与厚度偏差。

在滤波器的设计中,可以根据滤波的具体需要提出可以接纳的目标波长移动量 $\delta\lambda$,由(12)式计算出各级晶体片需要达到的厚度精度。以目标波长

$\lambda = 632.8 \text{ nm}$,自由光谱范围 $\Delta\lambda_{\text{FSR}} = 16 \text{ nm}$,半峰全宽 $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 1 \text{ nm}$,各级晶体片使用铌酸锂晶体的四级结构双折射滤波器为例,各级晶体片的设计厚度为

$$d_1 = 0.17514 \text{ mm}, d_2 = 0.35029 \text{ mm}, \\ d_3 = 0.72247 \text{ mm}, d_4 = 1.46683 \text{ mm}.$$

那么由(12)式根据不同的目标波长移动量计算的各级晶体片允许的厚度加工偏差如表1所示。

由表中数据可见,对于相同的目标波长移动量,晶体片的厚度越薄,要求的厚度精度越高。显然,小于 100 nm 的厚度偏差要求对于晶体片的加工是困难的。作为验证与探索,用以上举例中各级晶体片的设计厚度以及表1中 $\delta\lambda = 0.20 \text{ nm}$ 和 0.35 nm 对应的 δd_4 两组数据,再利用(10)式和Matlab进行模拟^[18-19],得到的透射光谱如图3所示。之所以选择第四级的两组数据,是因为对于相同的目标波长移动量 $\delta\lambda$,第四级允许的晶体片厚度加工偏差 δd_4 较大,若各级晶体片厚度均以 δd_4 的精度要求而对滤波性能的影响可以接受,则可以将这一 δd_4 认定为各级晶体片允许的最低厚度加工偏差要求。

表1 不同的目标波长移动量对应的各级晶体片厚度偏差

Table 1 Crystal thickness deviation at each stage with corresponding spectrum shift

$\delta\lambda /$ nm	$\delta d_1 /$ nm	$\delta d_2 /$ nm	$\delta d_3 /$ nm	$\delta d_4 /$ nm
0.05	0.0179	0.0357	0.0737	0.1496
0.10	0.0357	0.0715	0.1474	0.2993
0.15	0.0536	0.1072	0.2211	0.4489
0.20	0.0715	0.1429	0.2948	0.5985
0.25	0.0893	0.1787	0.3685	0.7481
0.30	0.1072	0.2144	0.4422	0.8978
0.35	0.1251	0.2501	0.5159	1.0474
0.40	0.1429	0.2859	0.5896	1.1970
0.45	0.1608	0.3216	0.6633	1.3466
0.50	0.1787	0.3573	0.7370	1.4963

图中的实线是各级晶体片为设计厚度的理想情况;图3(b)中的点划线和虚线是分别取表1中 $\delta\lambda = 0.20 \text{ nm}$ 和 0.35 nm 对应的各级晶体片厚度偏差的正值作出的透射光谱。可以看出,按照表1中的对应数据控制晶体片的厚度精度,只会造成透射光谱的整体平移,而对透射顶峰的透射比没有影响。图3(c)中的点划线是各级晶体片的厚度偏差均按 $0.5985 \mu\text{m}$ (表1中 $\delta\lambda = 0.20 \text{ nm}$ 时 δd_4 的值)作出的透射光谱,图3(d)中的虚线是各级晶体片的厚度偏差均按 $1.0474 \mu\text{m}$ (表1中 $\delta\lambda = 0.35 \text{ nm}$ 时 δd_4 的值)作出的

透射光谱;由图中透射光谱的比较可以看出,若按照第四级晶片允许的厚度偏差 δd_4 控制同 $\delta\lambda$ 要求的一至三级晶片,不但仍存在透射峰波长的 $\delta\lambda$ 平移,

还会造成透射峰值的降低和透射旁瓣的出现,而且各级晶片的厚度偏差越大,影响越大。

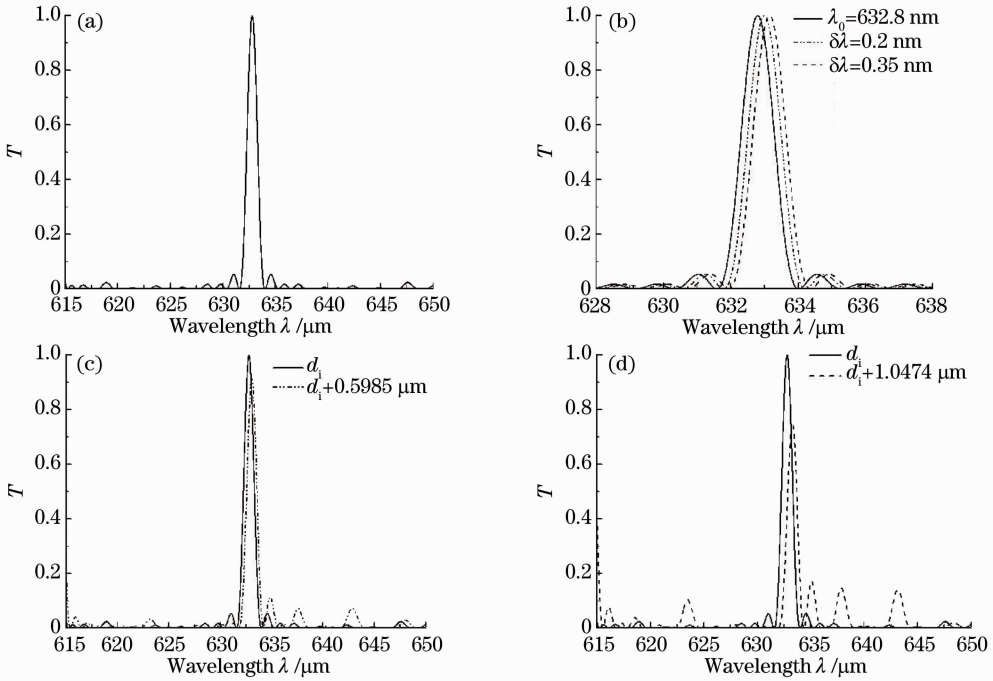


图 3 晶片理想厚度与有厚度偏差时的透射光谱

Fig. 3 Transmission spectra with ideal thickness and deviation

仍以目标波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 自由光谱范围 $\Delta\lambda_{\text{FSR}} = 16 \text{ nm}$, 半峰全宽 $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 1 \text{ nm}$, 各级晶片使用铌酸锂晶体的四级结构双折射滤波器为例, 设各级晶片厚度偏差相等(即 $\delta d_4 = \delta d_3 = \delta d_2 = \delta d_1$), 四级双折射光学滤波器目标波长的透射比随晶片厚度偏差变化的理论曲线如图 4 所示。由图中曲线可见, 晶片厚度偏差对目标波长透射比的影响是明显的; 当晶片厚度偏差为 $1 \mu\text{m}$ 时, 目标波长的透射比低于 50% 。

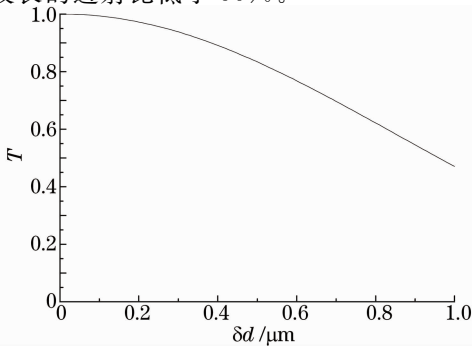


图 4 目标波长的透射比与晶片厚度偏差的关系曲线
Fig. 4 Curves of transmittance of target wavelength versus crystal thickness accuracy

4 结 论

在计入材料的双折射率色散、定义了 $(\lambda_0 - \lambda')$ 为目标波长移动量 $\delta\lambda$ 的基础上, 得出的晶片的厚度偏差与目标波长移动量之间的准确关系式, 对总透射光谱的理论模拟进一步表明了所得关系式的正确性。总透射光谱的理论模拟表明, 当各级晶片的厚度偏差为 $\delta d_4 = 2\delta d_3 = 4\delta d_2 = 8\delta d_1$, 且均为正直或均为负值时, 会造成透射光谱的整体平移, 虽然对透射顶峰的透射比没有影响, 但会降低目标波长的透射比; 当各级的厚度偏差均按 δd_4 控制时, 不但仍存在透射峰波长的 $\delta\lambda$ 平移, 还会造成透射峰值的降低和透射旁瓣的出现。研究结果为高性能双折射滤波器的实际制作提供了双折射晶片需要制作精度的理论依据。

参 考 文 献

- Li Ting. The construction of a 0.15\AA birefringent filter for solar observation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1986, 7(2): 142-148.
李 挺. 太阳观测用 0.15\AA 双折射滤波器的结构[J]. 仪器仪表学报, 1986, 7(2): 142-148.
- Ofir Aharon, I Abdulhalim. Liquid crystal Lyot tunable filter with extended free spectral range[J]. Optics Express, 2009, 17(14): 11426-11433.

- 3 Fred M Levinton. An optical filter for underwater laser communications[C]. Proceedings of Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications, 2011, LWA3.
- 4 Simon S M Rees, J Staromlynska, M P Gillyon, *et al.*. Final design and testing of the laser airborne depth sounder filter[J]. Opt Eng, 1997, 36(4): 1204-1213.
- 5 Li Shuqing, Wu fuquan, Yin Yanxue, *et al.*. Quartz crystal birefringent filter used for intracavity yellow Raman laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1199-1202.
李树清, 吴福全, 尹延学, 等. 对内腔拉曼黄光激光器谱线提取的石英晶体双折射滤波器[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1199-1202.
- 6 Su An, Meng Chengju, Gao Yingjun. Filter with one-dimensional photonic crystal quantum well possessing high-quality filtering functions [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1006001.
苏安, 蒙成举, 高英俊. 实现高品质滤波功能的一维光子晶体量子阱滤波器[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1006001.
- 7 Chen Zhiyong, Hao Xiaolong, Zheng Yanmin, *et al.*. Large-angle polarization-independent broadband filters based on silicon photonic crystal slabs [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305002.
陈志勇, 郝小龙, 郑彦敏, 等. 大角度偏振无关硅膜光子晶体宽带滤波器[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305002.
- 8 Li Jinming, Ma Youchun, Yan Shibin, *et al.*. High precision and wide scale fiber bragg grating sensor interrogation system based on tunable filter[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905002.
李锦明, 马游春, 闫树斌, 等. 基于可调谐滤波器的高精度宽量程光栅传感解调系统[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905002.
- 9 Jiang Hongbin, Liu Guangzhi, Zeng Xiaoping, *et al.*. Characteristics of microwave photonic filter by using simulated annealing genetic algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0817001.
蒋宏彬, 刘广智, 曾小平, 等. 基于模拟退火遗传算法的微波光子滤波器特性研究[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0817001.
- 10 Li Jinxing, Chen Kaixin, Zheng Yanlin. A novel asymmetric interleaver with arbitrary bandwidth ratio based on planar optical waveguide[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1105005.
李金星, 陈开鑫, 郑燕琳. 基于平板光波导任意带宽比的新型非对称交错滤波器[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1105005.
- 11 Sun Guodan, Wang Rong, Pu Tao, *et al.*. Design and implementation of comb filter with arbitrary channel spacing based on fiber bragg graings[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305007.
孙幅丹, 王荣, 蒲涛, 等. 任意波长间隔的光纤光栅梳状滤波器设计与实现[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305007.
- 12 A M Title, W J Rosenberg. Improvements in birefringent filters. 5: field of view effects [J]. Applied Optics, 1979, 18(20): 3443-3456.
- 13 Xuan Weijia, Wang Dongguang, Deng Yuanyong, *et al.*. Error analysis and performance optimization of birefringent filter[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 52-58.
玄伟佳, 王东光, 邓元勇, 等. 双折射滤波器的误差分析与性能优化[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 52-58.
- 14 John W Evans. The birefringent filter[J]. J Opt Soc Am, 1949, 39(3): 229-242.
- 15 W J Gunning. Narrow-Band Wide Field-of-View Filter Study [R]. California: Science Center, 1981. 1-76.
- 16 David N Nikogosyan. Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey[M]. Wang Jiyang Transl. Beijing: Higher Education Press, 2009. 42-55.
David N Nikogosyan. 非线性光学晶体: 一份完整的总结[M]. 王继扬译. 北京: 高等教育出版社, 2009. 42-55.
- 17 A Yariv, P Yeh. Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation[M]. New York: John Wiley, 1984. 122-152.
- 18 Ou Pan. Advanced Optics Simulation (The Version of Matlab) [M]. Beijing: Beihang University Press, 2011. 33-42.
欧攀. 高等光学仿真(Matlab版)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011. 33-42.
- 19 Wang Feng. The Study of The Technique of Ultra-Narrow Band Birefringent Filter [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2007.
王锋. 超窄带双折射滤光器技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2007.

栏目编辑: 张 雁