

基于TeO₂晶体的声光可调谐滤波器消色散设计

赵昭¹ 安志勇¹ 高铎瑞^{1,2} 王劲松¹ 蔡红星³

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

²长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

³长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 声光可调谐滤波器(AOTF)是一种新型的色散元件,被广泛应用到光谱成像领域,但由于其在调谐时,衍射角会随着波长的变化而变化,造成图像漂移。为了解决AOTF光谱相机晶体色散引起的图像漂移问题,采用了在晶体出射面外添加棱镜的方法。通过分析晶体旋光性对介质外衍射角的影响,比较发现当入射光极角很大时,必须考虑晶体的旋光性对介质外衍射角的影响,在此基础上分析棱镜偏折角与棱镜顶角和材料的关系,当入射光极角为28°时,添加顶角为10.1°的棱镜可得到0.0007°的消色散偏差。由此说明,在光路中添加材料和顶角合适的棱镜,可以很好地消除AOTF光谱相机中晶体的色散。

关键词 光谱学;光谱成像;声光可调谐滤波器;介质外衍射角;色散;棱镜

中图分类号 TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.062301

De-Dispersion Design of Acousto-Optic Tunable Filter Based on TeO₂

Zhao Zhao¹ An Zhiyong¹ Gao Duorui^{1,2} Wang Jinsong¹ Cai Hongxing³

¹Department of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

³College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Acousto-optic tunable filter (AOTF) is a new type of dispersion components. It is widely used in the field of hyper-spectral imaging, but diffraction angle changes along with wavelength when tuning, which will cause drift of images. To solve the problem caused by crystal dispersion of AOTF spectral camera, a prism is added to the emergent surface of the crystal. Through the analysis of crystal optical rotation influence on crystal outside diffraction angle, it is found that when the incident angle is very large, crystal optical rotation must be taken into consideration. According to the basic analysis above, the relationship among prism vertex angle, the prism material and prism deviation angle is analyzed. The results show that when the incident angle is 28°, dispersion residual deviation of 0.0007° is achieved by adding 10.1° prism. This implies that the dispersion of AOTF spectral camera can be eliminated by adding the prism of proper material and vertex angle.

Key words spectroscopy; spectral imaging; acousto-optic tunable filter; crystal outside diffraction angle; dispersion; prism

OCIS codes 230.5480; 260.2030; 110.4234; 260.1960

1 引言

声光作用的概念是1922年由法国物理学家布里渊首先提出的,在各向同性介质中,声光作用将引起入

收稿日期: 2013-12-11; 收到修改稿日期: 2014-01-08; 网络出版日期: 2014-05-07

基金项目: 国家科技攻关项目(2007BA107A00-1)

作者简介: 赵昭(1991—),女,硕士研究生,主要从事光学系统设计及声光可调谐滤波器光谱相机的研究。

E-mail: zhaozhao_cust@163.com

导师简介: 安志勇(1943—),男,教授,博士生导师,主要从事光电测控技术、光学系统设计等方面研究。

E-mail: an_zhiyong@126.com

射光的频率、方向和振幅变化,人们利用这种声光作用原理研制成了声光调制器、声光偏转器等。在各向异性的介质中,声光作用不仅使入射光的频率、方向发生变化,也会使光波长发生变化,这种各向异性介质中的声光作用可以用反常布拉格原理解释,声光可调谐滤波器(AOTF)便是利用各向异性介质内的反常布拉格衍射制成的声光器件。AOTF分为共线型和非共线型,共线型AOTF器件结构复杂,应用受到限制;非共线AOTF具有扫描速度快、调谐范围宽、孔径角大、衍射效率高的优点,且结构简单,应用广泛。1974年,Chang^[1]采用TeO₂材料研制成了非共线AOTF,并且提出了“切面平行动量匹配条件”,在设计中忽略了TeO₂晶体的旋光性,对折射率取了一级近似,使设计公式相对简化,但同时引入了较大的误差,影响了AOTF的设计精度。1991年,Gass等^[2]对Chang的理论进行了修正,采用折射率的一般表达式代替了一阶表达式,得到了更为精确的结果。

早在20世纪90年代,人们就已经开展了利用TeO₂作为AOTF的分光晶体进行光谱成像的研究,但是随着研究的深入,人们发现利用AOTF进行光谱成像时,图像质量不高。这主要是由于晶体中存在的色散使衍射光线随着入射光波长变化而变化。AOTF工作时,波长扫描过程是通过调节超声波频率来实现的,衍射光的方向将随光波长的扫描在一定范围内出现漂移,最终造成图像的漂移,影响成像质量。鉴于此,人们对晶体外衍射角随入射光波长的变化关系进行分析研究,并采取了各种方法来消除色散。例如,在晶体出射面外添加光学元件^[3],在晶体的出射面上加工一定的光楔角^[4],进行色散补偿,达到良好的成像质量。

2 衍射光漂移

AOTF在工作时,晶体中的色散使衍射光线的方向随着入射光波长的变化而变化,而波长扫描是通过调节超声频率来实现的,自然衍射光的方向将随光波长的扫描在一定范围内出现漂移,降低成像分辨率,从而影响成像质量^[5-6]。

2.1 不考虑晶体旋光性时介质外衍射角的变化

基于Chang的理论,忽略TeO₂的旋光性,应用动量匹配条件,图1表示AOTF入射面与出射面相互平行,光线通过AOTF,满足一定条件时在其内部发生的声光作用。 θ_i 为入射光极角,表示入射光与光轴的夹角, θ_d 表示衍射角, β 为介质外衍射角,在声光晶体内部发生衍射它们之间的几何关系如图1所示^[7]。

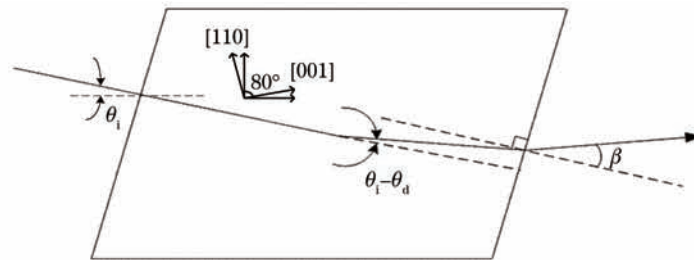


图1 入射光极角度 θ_i 、衍射角度 θ_d 和晶体外衍射角 β 间的几何关系

Fig.1 Geometric relationship between incident angle θ_i , diffraction angle θ_d and crystal outside diffraction angle β

根据图1,可以得到 θ_i 、 θ_d 和 β 的关系满足

$$\sin \beta = n_d \sin(\theta_i - \theta_d), \quad (1)$$

式中 n_d 表示TeO₂晶体内衍射光的折射率,它是波长的函数。在不考虑旋光性的条件下,设入射光为e光,衍射光为o光,则(1)式可写为

$$\sin \beta = n_o \sin(\theta_i - \theta_d), \quad (2)$$

式中介质内衍射角的表达式为

$$\tan \theta_d = \left(\frac{n_o}{n_e} \right)^2 \tan \theta_i, \quad (3)$$

n_o 、 n_e 一般由塞耳迈耶方程来表示^[8]

$$n_o^2 = 1 + \frac{2.5488\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.1342^2} + \frac{1.1557\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.2638^2}, \quad (4)$$

$$n_c^2 = 1 + \frac{2.8525\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.1342^2} + \frac{1.5141\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.2631^2}. \quad (5)$$

将(3)、(4)式代入(2)式中,可得介质外衍射角 β

$$\beta = \arcsin \left\{ \sqrt{1 + \frac{2.5488\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.1342^2} + \frac{1.1557\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.2638^2}} \cdot \sin \left[\theta_i - \arctan \left(\frac{n_o}{n_c} \right)^2 \tan \theta_i \right] \right\}. \quad (6)$$

由(6)式可以看出介质外衍射角 β 和入射光极角 θ_i 和波长 λ_0 有关。

图2表示波长在 0.4~1 μm 间变化,入射光极角在 0°~80°间变化时,介质外衍射角的变化。

图3表示在忽略晶体旋光性时,不同入射光极角所对应的介质外衍射角的变化。在当入射光极角为 5° 时,介质外衍射角为 0.2390°;入射光极角为 10° 时,介质外衍射角为 0.4731°;入射光极角为 28° 时,介质外衍射角为 1.1971°。由以上数据可得入射光对介质外衍射角存在一定的影响,介质外衍射角随着入射光极角的增大而增大。

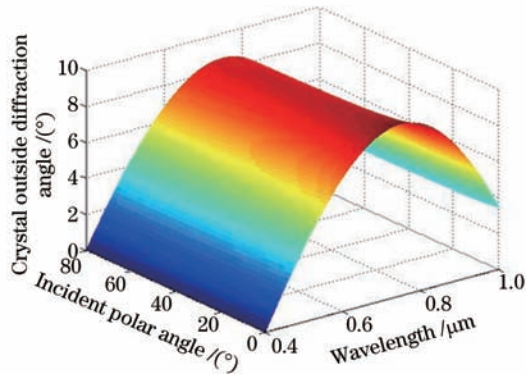


图2 不考虑旋光性时 β 随入射光极角的变化

Fig.2 Relationship between β and incident polar angle without optical rotation

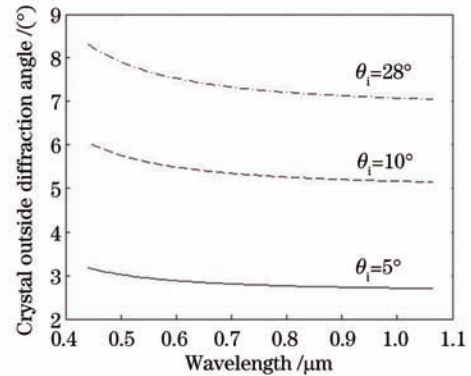


图3 不考虑旋光性时不同入射光极角对应的介质外衍射角

Fig.3 Different incident polar angles corresponding to different crystal outside diffraction angles without optical rotation

2.2 考虑晶体旋光性时介质外衍射角的变化

TeO_2 晶体不但具有双折射特性,还具有旋光性,这里考虑了晶体的旋光性对介质外衍射角的影响,设晶体内部的入射光为 e 光,衍射光为 o 光,衍射光的折射率 n_d 可以表示为^[9]

$$n_d = \left\{ \frac{\cos^2 \theta_d}{[n_o^2(1 - \sigma)^2]} + \frac{\sin^2 \theta_d}{n_o^2} \right\}^{-1/2}, \quad (7)$$

式中 σ 是一个与晶体旋光率 ρ 有关的量,旋光率 ρ 与波长 λ_0 有关。 n_o 的大小与不考虑旋光性时的表达式一致, σ 的大小可以表示为

$$\sigma = \frac{\lambda_0 \rho}{2\pi n_o}. \quad (8)$$

衍射角的表达式为

$$\tan \theta_d = \left(\frac{n_o}{n_c} \right)^2 [(1 + \sigma)^2 / (1 - \sigma)^2] \tan \theta_i. \quad (9)$$

将(7)、(9)式代入(1)式可得介质外衍射角的表达式

$$\beta = \arcsin \left\{ \frac{\cos^2 \theta_d}{[n_o^2(1 - \sigma)^2]} + \frac{\sin^2 \theta_d}{n_o^2} \right\}^{-1/2} \sin(\theta_i - \theta_d). \quad (10)$$

从(10)式可以看出介质外衍射角与入射光极角 θ_i 、衍射角 θ_d 、晶体旋光率有关,而这些量又都是波长 λ_0 的函数。图4表示考虑晶体旋光性时,波长在 0.4~1 μm 间变化,入射光极角在 0°~80°间变化时,介质外衍射角的变化。

图5表明,介质外衍射角随着入射光极角变化而变化,变化趋势与不考虑晶体旋光性时一致。在入射光

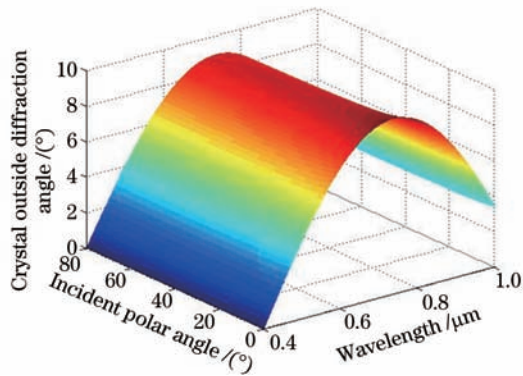
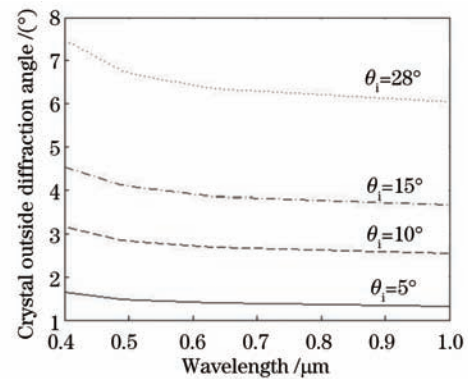
图4 考虑旋光性时 β 随入射光极角的变化Fig 4 Relationship between β and incident polar angle with optical rotation

图5 考虑旋光性时不同入射光极角对应的介质外衍射角

Fig.5 Different incident polar angles corresponding to different crystal outside diffraction angles with optical rotation

极角为 5° 时,介质外衍射角为 0.3119° ;当入射光极角增加为 10° 时,介质外衍射角为 0.6021° ;当入射光极角为 28° 时,介质外衍射角为 1.4476° 。相比不考虑晶体旋光性时的情况,介质衍射角明显增大,说明在大角度入射时,晶体的旋光性必须考虑。

表1表示在考虑旋光性和未考虑旋光性时,介质外衍射角随着入射光角度的变化而变化的数据。分析表1的数据可得到入射光极角变化引起的介质外衍射角变化。当入射光极角小于 10° 时,可认为晶体的旋光性对其影响不大,可以忽略;而当入射光极角度增大时,考虑旋光性后,衍射角明显要比不考虑时增大很多。有研究表明,AOTF中光线进入 TeO_2 晶体的最优入射光极角应控制在 $20^\circ\sim 30^\circ$ ^[9],这样设计出的AOTF从声光优值、光学带宽、衍射效率以及衍射光束的扩展等方面来看都是非常合适的。

表1 旋光性对介质外衍射角的影响

Table 1 Optical rotation influence on crystal outside diffraction angle

Incident angle /($^\circ$)	Regardless of optical rotation /($^\circ$)	Regard optical rotation /($^\circ$)	Difference /($^\circ$)
5	0.2390	0.3119	0.0729
10	0.4731	0.6021	0.1290
15	0.6974	0.8699	0.1725
20	0.9068	1.1138	0.2070
22	0.9851	1.2041	0.2190
25	1.0958	1.3312	0.2354
28	1.1971	1.4476	0.2505
30	1.2589	1.5188	0.2599
40	1.4846	1.7887	0.3041
50	1.5420	1.8848	0.3428

3 棱镜消色散设计

利用AOTF成像时,由于晶体的色散导致衍射角对入射光波长的改变而漂移严重影响了成像质量。因此对晶体外衍射角随入射光波长的变化关系具体分析的基础上,采用在AOTF的出射面外添加棱镜,通过棱镜的色散来补偿 TeO_2 晶体色散的减小图像漂移,主要研究棱镜的材料以及棱镜的顶角对介质外衍射角的影响,通过选择恰当的棱镜可以很大限度地减小衍射光的漂移。

3.1 色散棱镜计算

3.1.1 棱镜角度计算

光线以入射角 I_1 入射到顶角为 α 的棱镜上,并向下折射,折射角是 I_1' ,光线经过折射棱镜后的偏折角 δ 可表示^[10]为

$$\delta = I_1 - \alpha + \arcsin[(n^2 - \sin^2 I_1)^{1/2} \sin \alpha - \cos \alpha \sin I_1], \quad (11)$$

式中 $\sin I_1 = n \sin I_1'$, $\sin I_2 = n \sin I_2'$, 从(11)式可以看出, 光经过折射棱镜后, 产生的偏折角 δ 与棱镜顶角 α 、棱镜折射率 n 、入射角 I_1 有关。当确定入射角后, 偏折角随棱镜材料和顶角的变化而变化。

3.1.2 棱镜材料分析

偏折角是棱镜折射率的函数, 并随折射率的增大而增大。折射角随波长的变化为棱镜的色散, 对(11)式相对于折射率 n 微分得

$$\frac{d\delta}{dn} = \frac{\cos I_2 \tan I_1' + \sin I_2}{\cos I_2'} \frac{dn}{dn}, \quad (12)$$

式中 $d\delta/d\lambda$ 表示相对于波长的角色散, $dn/d\lambda$ 表示棱镜材料的折射率色散。

3.2 棱镜补偿分析

设入射到 AOTF 上的入射光极角为 28° , 根据 TeO_2 晶体折射率和阿贝数选择棱镜的材料, 根据消色散理论^[11], 选择和它阿贝数相差不大的玻璃材料 ZF14 玻璃^[12], 在两个折射面上分别用折射定律求出 I_1' 、 I_2 和 I_2' , 代入(11)式在 Matlab 中可求出不同棱镜顶角 α 相对应的偏折角和 δ 角色散 $d\delta$ 。以棱镜顶角作为自变量, 棱镜偏折角和角色散作为因变量画出它们的关系图, 如图 6 和图 7 所示, 从图中可以看出偏折角和角色散均随棱镜顶角的增大而增大。

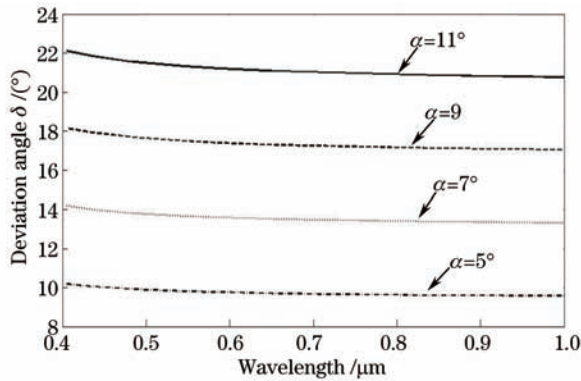


图6 偏折角 δ 随棱镜顶角 α 变化

Fig.6 Relationship between deviation angle δ and prism vertex angle

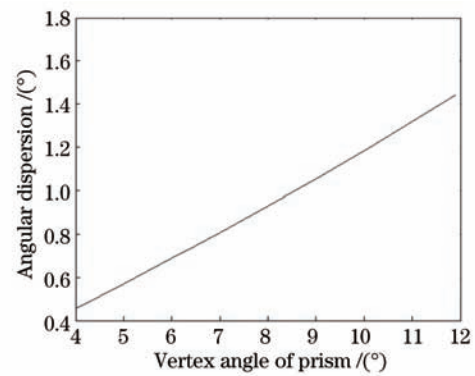


图7 角色散随棱镜顶角的变化

Fig.7 Relationship between angular dispersion and prism vertex angle

不同顶角的棱镜产生的偏折角的数据如表 2 所示。当入射光极角为 28° 时, TeO_2 介质外衍射角是 1.1971° , 选择棱镜顶角为 10.1° , 根据表 2 中的数据可知棱镜偏折角是 1.1964° , 补偿偏差为加入 10.1° 棱镜产生的偏折角与介质外衍射角之差, 即 $1.1971^\circ - 1.1964^\circ = 0.0007^\circ$; 在考虑晶体的旋光性后, TeO_2 介质外衍射角是 1.4476° , 加顶角为 11.9° 的棱镜, 棱镜偏折角是 1.4416° , 补偿偏差为 0.006° 。由以上数据可见棱镜的色散能够很好地补偿 TeO_2 晶体的色散。

表2 顶角不同的棱镜产生的偏折角

Table 2 Different deviation angles caused by different vertex angles of prism

Vertex angle of prism /($^\circ$)	Refractive angle /($^\circ$)@0.4 μm	Refractive angle /($^\circ$)@0.9 μm	Deviation angle /($^\circ$)
4	4.0090	3.5554	0.4537
4.5	4.5148	4.0035	0.5113
5	5.0225	4.4531	0.5694
6	6.0443	5.3574	0.6868
6.5	6.5590	5.8126	0.7463
7	7.0766	6.2702	0.8064
8	8.1217	7.1930	0.9287
8.5	8.6498	7.6588	0.9910
9	9.1820	8.1279	1.0541
10.1	10.3692	9.1728	1.1964
11.9	12.3693	10.9277	1.4416

3.3 棱镜优化设计结果

通过上面的分析,当入射光极角为 28° 时,选择棱镜材料和 TeO_2 晶体阿贝数相差不大的ZF14玻璃时,添加顶角为 $11^\circ\sim 12^\circ$ 的棱镜,可以很好地校正 TeO_2 晶体的色散。为了能同时很好地补偿考虑和忽略旋光性两种情况下的晶体色散,以棱镜顶角为自变量,棱镜补偿偏差的绝对值为因变量,作出它们之间的关系,如图8所示,当添加顶角为 11.6° 的ZF14棱镜时,两种情况下补偿偏差相同,即这个角度的棱镜顶角可以很好地补偿晶体的色散。

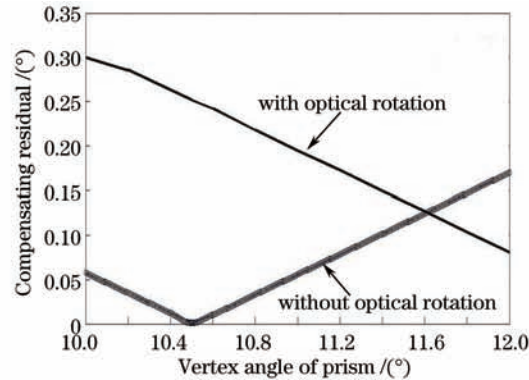


图8 在考虑旋光性和忽略旋光性两种情况下的补偿偏差

Fig.8 Compensating residual with and without optical rotation

4 结 论

分析了晶体旋光性对介质外衍射角的影响,比较了在忽略晶体旋光性和考虑旋光性两种情况下,不同入射角对于介质外衍射角的影响。通过在Matlab软件中进行数值模拟分析,结果表明当入射光极角度小时,可以忽略旋光性对衍射角的影响。针对AOTF设计中存在的色散问题,采用在晶体出射面外添加棱镜的方法来校正晶体色散。结果表明选择ZF14玻璃,添加顶角为 $10^\circ\sim 12^\circ$ 的棱镜,可以很好校正 TeO_2 晶体的色散。通过进一步优化,当添加棱镜顶角为 11.6° 时,能同时很好地补偿考虑和忽略旋光性两种情况下的晶体色散。

参 考 文 献

- 1 I C Chang. Noncollinear acousto-optic tunable filter with large angular aperture [J]. Appl Phys Lett, 1974, 25(7): 370-372.
- 2 P A Gass, J R Sambles. Accurate design of noncollinear acousto-optic tunable filter [J]. Opt Lett, 1991, 16(6): 429-431.
- 3 Jiang Yi, Zeng Libo, Wu Qionghui, *et al.*. Microscopic spectral imaging based on an acousto-optic tunable filter [J]. Optical Technique, 2005, 31(2): 193-195.
江 益, 曾立波, 吴琼水, 等. 基于声光可调谐滤波器的显微光谱成像技术[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 193-195.
- 4 Ren Yu, Cai Hongxing, Tan Jianyao, *et al.*. Imaging drift of acousto-optic modulator spectral camera [J]. Chinese Optics, 2013, 6(2): 179-186.
任 玉, 蔡红星, 谭见瑶, 等. 声光调制光谱相机的成像漂移[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 179-186.
- 5 Ruan Lifeng, Tang Zhilie, Liu Xueling. Investigation on light intensity distribution of Raman-Nath acousto-optic diffraction based on Fourier analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0307001.
阮立锋, 唐志列, 刘雪凌. 基于傅里叶分析的拉曼-奈斯声光衍射光强分布的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0307001.
- 6 Xiong Shengjun, Zhang Ying, Zhao Huijie, *et al.*. Aspheric optical design of an imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0622002.
熊胜军, 张 颖, 赵慧洁, 等. 声光可调谐滤波器成像光谱仪非球面光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0622002.
- 7 Zhang Chunguang. The Technology of the Acousto-Optic Tunable Filter Based on the Hyperspectral Imaging System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. 51-52.
张春光. 基于超光谱成像系统的声光可调谐滤波技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. 51-52.

- 8 N Uchida. Optical properties of single crystal paratellurite (TeO_2) [J]. Phys Rev B, 1971, 4(10): 3736–3745.
- 9 Zhang Chunguang. Analysis of the optimum optical incident angle for an imaging acousto-optic tunable filter [J]. Opt Express, 2007, 15(19): 11883–11888.
- 10 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: Beijing Mechanical Industry Press, 2006. 51–52.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 北京机械工业出版社, 2006. 51–52.
- 11 Tang Xingli, Zhao Meicun, Qian Yulan, *et al.*. An undispersive four prism beam expander [J]. Chinese J Laser, 1985, 13(5): 298–301.
汤星里, 赵梅村, 钱玉兰, 等. 消色散四棱镜扩束器[J]. 中国激光, 1985, 13(5): 298–301.
- 12 Li Shixian. Zhen Nianle. Optical Design Handbooks [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. 8.
李世贤, 郑年乐. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990. 8.