

文章编号 1674-2915(2013)02-0179-08

声光调制光谱相机的成像漂移

任 玉, 蔡红星*, 谭见瑶, 谭 勇, 张喜和, 郑 峰, 马文联
(长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘要:研究了基于声光可调滤波机理的光谱相机在成像时由声光晶体的色散而产生的图像漂移现象。利用色散补偿法和图像位移补偿法,理论计算并实验测量了声光可调滤波器(AOTF)在可见光(488~644 nm)波段内由晶体外衍射角所引起的图像漂移,并进行了优化实验。采用色散补偿法,调整入射光为准平行光,入射光波长为488~644 nm时,在晶体出射面添加 0.6° 的光楔,晶体外衍射角的变化量可由 0.0665° 降低到 0.0042° ,即图像漂移量由 $162.1\ \mu\text{m}$ 降低到 $10.9\ \mu\text{m}$;采用图像位移补偿法,不添加光楔,入射光波长为488~644 nm时,图像水平漂移量可从 $468\ \mu\text{m}$ 降低到 $0.658\ \mu\text{m}$,漂移量在一个像元内。实验表明:基于提出的两种方法可忽略成像漂移对图像的影响,有效提高了基于AOTF机理的光谱相机的成像分辨率。

关键词:声光可调滤波器;光谱相机;图像漂移;晶体色散;消色散

中图分类号:TN65 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20130602.0179

Imaging drift of acousto-optic modulator spectral camera

REN Yu, CAI Hong-xing*, TAN Jian-yao, TAN Yong, ZHANG Xi-he, ZHENG Feng, MA Wen-lian
(College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: ciomsz@126.com

Abstract: The image drift phenomenon caused by the dispersion of an acousto-optic crystal is researched when the spectral camera is imaging based on acousto-optic tunable filtering mechanism. The image drift caused by the crystal outside diffraction angle is calculated theoretically and measured experimentally by the dispersion compensation and the image displacement compensation methods when a Acousto-optic Tunable Filter(AOTF) is in the visible band of 488 – 644 nm, and the experiments are also optimized and analyzed. Using the dispersion compensation method and in the incident light wavelength of 488 – 644 nm, when we adjust the incident subject as a parallel light and add a wedge of 0.6° in the crystal exit surface, the change of the crystal outside diffraction angle can be reduced from 0.0665° to 0.0042° , and the image drift is reduced from $162.1\ \mu\text{m}$ to $10.9\ \mu\text{m}$. Using the image displacement compensation method without adding the optical wedge, when the

收稿日期:2012-11-11;修订日期:2013-01-13

基金项目:国家重点科技攻关资助项目(No. 2007BA107A00-1)

incident light wavelength is in 488 – 644 nm, the image level drift can be reduced from 468 μm to 0.658 μm within a pixel drift. Experimental results show that the effect of the imaging can be neglected, and the two methods can improve the imaging resolution of the AOTF based on mechanism of the spectral camera.

Key words: Acoustic-optic Tunable Filter (AOTF); spectral camera; image drift; crystal dispersion; achromatism dispersion

1 引言

1922年布里渊首次提出了光被声波衍射的理论,其物理模型是单级光衍射;10年后,Debye和Sears、Lucas、Biguard等人提出了多级光衍射模型^[1-3]。由于当时所研究的材料仅限于各向同性介质,所以技术手段并不成熟。1967年,W. R. Klein和B. D. Cook对介质中的耦合波方程做出了完整的数值解^[4],并得出了拉曼-纳斯衍射和布拉格(Bragg)衍射^[5]两种理论模型。根据作用介质的不同,布拉格衍射分为正常布拉格衍射和反常布拉格衍射,声光可调滤波器(AOTF)是依据反常布拉格衍射的同向相互作用原理制成的^[5-9]。1974年,I. C. Chang提出了非共线声光可调滤波器的设计思想^[10],这为声光器件的发展奠定了坚实的基础。

按工作模式AOTF可分为共线和非共线。首个共线型AOTF是Harris和Wallace于1969年用铌酸锂晶体设计制成的。随后,利用 CaMoO_4 、水晶和 Ti_3AsO_3 等晶体制成的AOTF器件也相继出现了。采用共线型AOTF模式时,入射光、衍射光和声波的传播方向相同。共线型AOTF虽然具有较大的入射孔径和较高的分辨率,但其向量匹配关系要求声波波矢与光波波矢共线,满足这种条件的声光晶体并不多,另外这种器件在结构上相对复杂,因此其应用范围有限。1974年,I. C. Chang采用 TeO_2 材料首次研制成了非共线型AOTF,在设计 and 实用化方面为声光可调滤波器开创了新纪元。声光晶体 TeO_2 的问世,推动了声光可调滤波器的进一步发展。不过由于 TeO_2 材料本身的色散造成的图像漂移和模糊问题,阻碍了它的实际应用。

我国对于AOTF的研究相对起步较晚,但在

理论研究及光谱分析领域的应用研究上取得了一定的进展和突破。

AOTF是根据声光衍射原理制成的分光器件。由于超声波在光透明介质中传播时,介质的折射率会由于弹光效应表现出周期性变化,从而提供一个动态的相位光栅,使部分入射光向一个或多个方向衍射,改变超声波频率时,衍射光(透射光)波长也随之改变。但是,当AOTF应用于成像系统时,由于晶体外的衍射角是入射光波长的函数,当改变换能器输入的超声波频率时,晶体外的衍射角也相应改变。在光谱成像过程中,由于衍射角随入射波长的改变,造成了光谱图像在像面上位置的不同,即产生了光谱图像的漂移效应^[10-13],从而影响了AOTF的成像质量。

AOTF的工作机理使它拥有了诸多特点:在较宽的光谱范围内快速调谐,保持高光谱分辨率的情况下输出较大的能量,有较高的成像分辨率,无移动部件结构等。AOTF的这些特性,使其在光谱成像领域中具有很大的发展潜能^[14-15]。

本文从AOTF的工作原理出发,利用 TeO_2 晶体作为分光元件,对晶体外的衍射角漂移进行了定量计算和实验测量。为解决图像漂移问题,提高AOTF的成像质量,提出两种解决方案:一是在晶体的出射面添加光楔,即色散补偿法,二是探测器位移补偿法。通过对AOTF参数的精确计算以及在晶体出射面添加光楔,从理论上解决了传统的AOTF图像漂移问题。对其模拟计算的结果表明:采用本论文所用方法,可以基本消除图像漂移现象,并能提高图像分辨率。

2 图像漂移研究

引起衍射图像漂移的原因主要是入射光角度改变时,衍射角随波长改变而改变^[16-17]。设定

AOTF 的分光晶体的入射面与出射面相互平行,入射光角度 θ_i 、衍射光角度 θ_d 与晶体外衍射角 β 满足图 1 所示的几何关系。

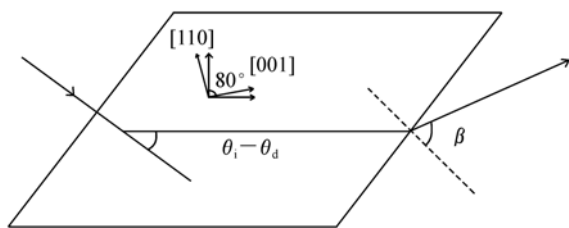


图 1 入射光角度 θ_i 、衍射角度 θ_d 和晶体外衍射角 β 间的几何关系

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

由图 1 的几何关系得到衍射角 β 的表达式为:

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

式中: n_d 为 TeO_2 对应衍射光波长时的折射率, 当不考虑晶体的旋光性时, $n_d = n_o$, n_o 为 o 光的折射率, 是入射光波长的函数。

设入射光为 e 光, 衍射光为 o 光, 由图 2 可以得到:

$$n_i = (\cos^2\theta_i/n_o^2 + \sin^2\theta_i/n_e^2)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$\tan\theta_d = (n_o/n_e)^2 \tan\theta_i, \quad (3)$$

式中: n_e 是 e 光折射率, n_o 和 n_e 都是光波长的函数, 一般由塞耳迈耶尔方程来描述。

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

$$n_e^2 = 1 + \frac{2.8525\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.1342^2} + \frac{1.5141\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.2631^2}. \quad (4)$$

由式(1)、(4)可得到晶体外衍射角的表达式为:

$$\beta = \arcsin\left[\left(1 + \frac{2.5488\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.1342^2} + \frac{1.1557\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.2638^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \sin(\theta_i - \theta_d)\right]. \quad (5)$$

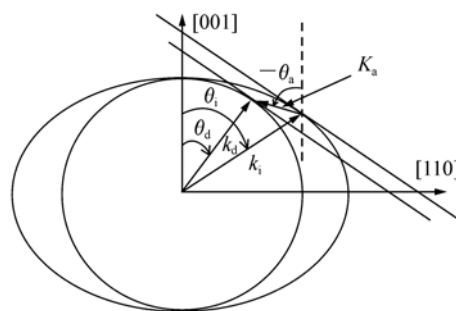


图 2 非共线声光相互作用矢量布局(不计 TeO_2 晶体的旋光性)

Fig. 2 Vector layout of non-collinear acousto-optic interaction(excluding the TeO_2 crystal optical activity)

根据式(5)可得到 β 随入射光波长和入射光

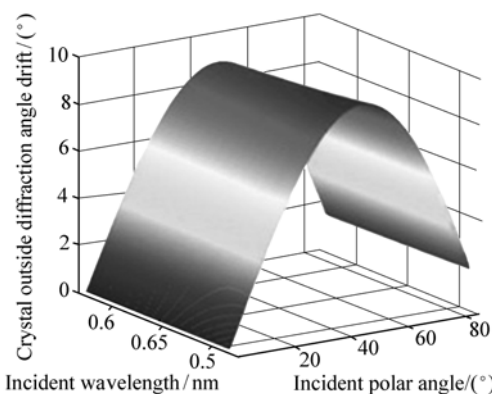


图 3 入射光波长为 448 ~ 644 nm 时, β 随入射光波长和入射光角度的变化

Fig. 3 Variation of β with the incident wavelength and incident angle at incident light in 448 ~ 644 nm

角度的变化关系, 如图 3 所示。图 3 是入射光波长为 448 ~ 644 nm 时, β 随入射光波长与入射光角度的变化关系。当入射光接近于平行光入射 ($\theta_i = 2^\circ$) 时, 衍射角 β 随入射光波长变化关系如图 4 所示, 在整个波长范围 β 角内改变了 0.0665° , 若采用焦距 f 为 15 cm 时:

$$\text{像面平移} = f \times \tan 0.0665^\circ \approx 174.1 \mu\text{m}. \quad (6)$$

可见衍射角随波长的改变严重影响了基于 AOTF 的成像质量^[18-19]。

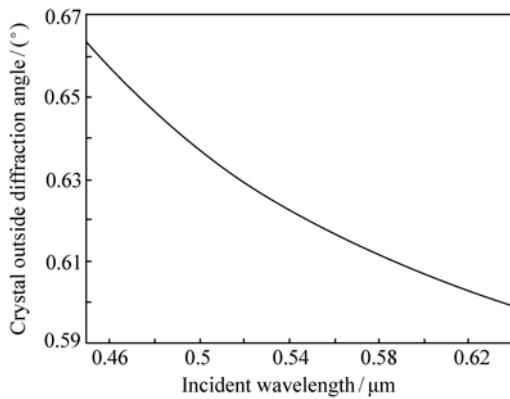


图 4 晶体外衍射角随入射光波长的变化趋势

Fig. 4 Change trend of crystal outside diffraction angle with incident light wavelength

3 用色散补偿法降低图像漂移

为解决图像漂移问题,人们已采取各种方法来消除色散,例如:计算机软件处理图像、晶体设计、添加光学元件等^[20]。本文采用在晶体的出射面添加光楔的方法以及 CCD 探测器位移补偿的方法来降低图像漂移。

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,因此在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,采用在晶体的出射面添加光楔的方法,进行色散补偿,以解决图像漂移问题。

在晶体的出射面添加角度为 θ_w 的光楔,其消色散原理图如图 5 所示^[21]。

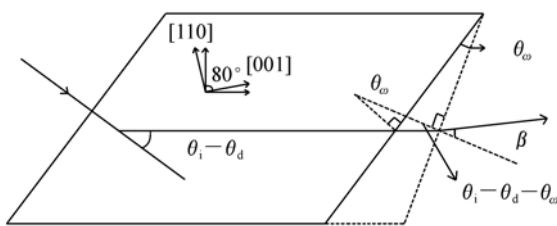


图 5 消色散原理图

Fig. 5 Schematic diagram of achromatic

衍射角 β 的表达式为:

$$\sin\beta = n_d \sin(\theta_i - \theta_d - \theta_w) . \quad (7)$$

取不同角度的光楔,可以看出晶体外衍射角

在整个波长范围内的变化趋势。

由图 6 可以看出,对准平行入射光的调制,添加 0.6° 的 TeO_2 晶体光楔时,晶体外衍射角的变化最小。当添加最佳角度的光楔时,晶体外衍射角随入射光波长的变化关系如图 7 所示。可知,衍射角的漂移量降低到 0.0042° ,相对于未添加光楔时降低了 0.0345° ,当焦距 f 为 15 cm 时,图像漂移量由 $162.1\ \mu\text{m}$ 降低到 $10.9\ \mu\text{m}$,可见在晶体的出射面添加光楔可有效降低晶体外衍射角的漂移,针对不同的图像分辨率要求可调整所添加 TeO_2 晶体光楔的角度。

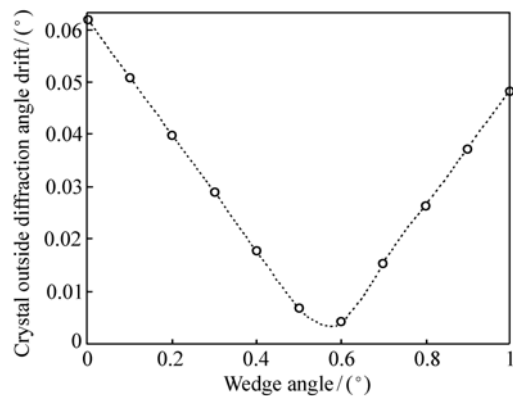


图 6 添加不同角度的光楔时,晶体外衍射角变量的变化趋势

Fig. 6 Change trends of crystal outside diffraction angle by adding wedge with different angles

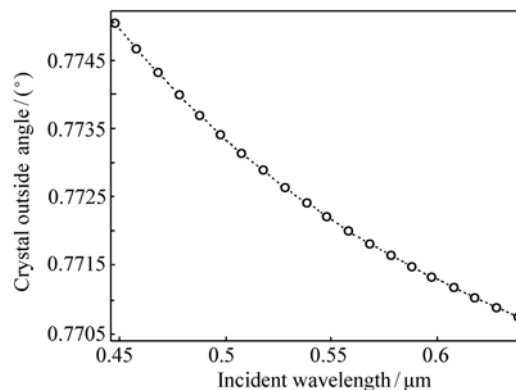


图 7 在晶体出射面添加 0.6° 的光楔后,晶体衍射随入射光波长变化趋势

Fig. 7 Change trends of crystal outside diffraction angle with the incident light wavelength by adding a wedge of 0.6°

4 用图像位移补偿法降低图像漂移

AOTF 应用于成像系统时,晶体外衍射角随入射光波长的漂移相当于图像在水平方向上位置的变化,若对其图像位移进行补偿,利用计算机软

件控制与图像的变化量一致时,即可降低图像漂移,提高 AOTF 的成像质量。

(1) 利用图像位移补偿法降低图像漂移的实验仪器搭建如图 8 所示。搭建为一个光学平台且高度调整为一致,能使入射光为准直平行光。搭建完成后,打开卤素灯、超声发生器以及 PC 控制器各部件的电源。

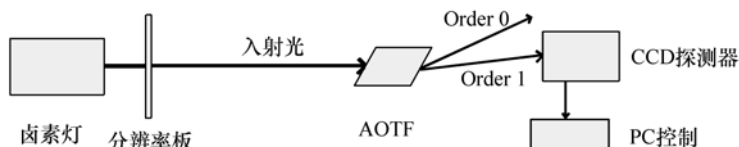


图 8 图像位移补偿法降低图像漂移的实验原理图

Fig. 8 Experimental schematic diagram of reducing image drift by image displacement compensation method

(2) 调节光路

实验中采用卤素灯作为光源,其光谱范围较大,可见光范围内强度较高,通过分辨率板后的亮度足够强,透射效果较好,满足实验要求。调整分辨率板和 AOTF 的位置,使透过分辨率板的光为准直平行入射到 AOTF 内,衍射光线垂直入射到 CCD 探测器中。

射光所成的像,对不同波长下的图像进行对比,并计算图像的漂移量。

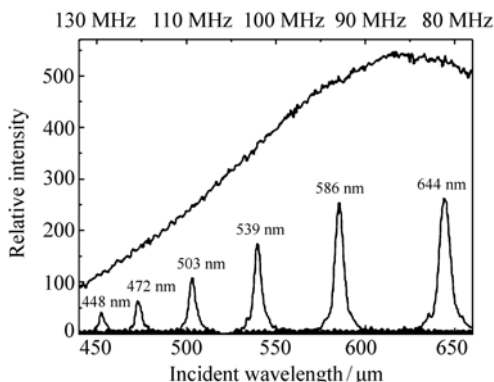


图 9 448 ~ 644 nm 波段的卤素灯光谱和 AOTF 在不同波段下的衍射光谱

Fig. 9 Diffraction spectra of halogen lamp in 448 ~ 644 nm and AOTF under different bands

(3) 实验数据

入射光波长选取 488 ~ 644 nm, 选定 6 个波长进行图像漂移测试实验。利用透射光成像,从分辨率板发出的透射光入射到 AOTF 中,调节超声波频率进行分光,用 CCD 探测器拍摄 +1 级衍

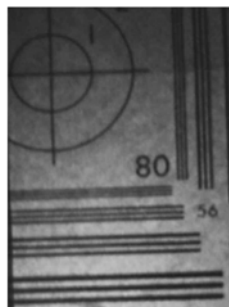


图 10 CCD 探测器得到分辨率板部分图像

Fig. 10 Part of an image of resolution board obtained by CCD detector

(4) 实验数据分析

利用配准算法,取不同波长下的图像最左端 100 个关键点,再做平均,经计算机配准得到各波长下图像最左端的像素位置,其图像漂移量随入射光波长变化关系如图 11 所示。可知入射光波长在 488 ~ 644 nm 内,图像最左端在水平方向上从 196 变化到 72,即漂移了 124 个像素,实验中采用的 CCD 探测器像素为 1 944 × 2 896,即将 10.16 × 13.547 mm 分为 1 944 × 2 896 个格子,经计算可得图像水平偏移了 468 μm,这会使成像分辨率降低,严重影响成像质量^[21]。

实验中,根据图像漂移量随入射光波长变化

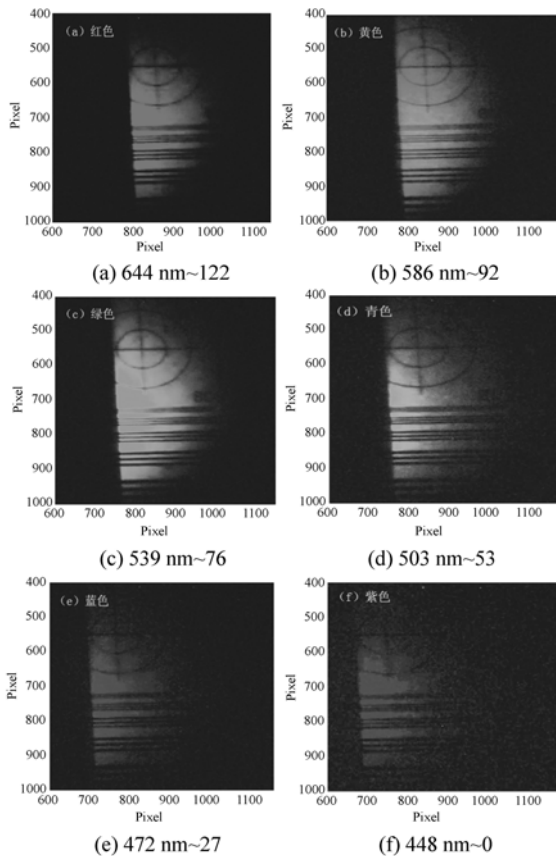


图 11 超声波频率在 80.0 ~ 130.0 MHz 间变化时,以 448 nm 处的光谱图像漂移量为准(即其相对漂移量为 0 个像元),不同波长下的光谱图像相对漂移量

Fig. 11 Relative drifts of spectral images under different wavelengths with ultrasonic frequencies between 80 - 130 MHz by spectral image drift in 448 nm as standards, the relative drift is 0 pixel

关系,得到图 12,对图中的曲线进行拟合,得到拟合函数为:

$$y = -0.0011x^2 + 15x - 4.5 \times 10^3 \quad (8)$$

根据式(8)编程,控制电脑跟踪图像。采用这种方法,当入射光波长为 488 ~ 644 nm 时,漂移量为 0.658 μm ,漂移量在一个像元内,几乎不影响成像质量^[22],如图 13 所示。

5 结 论

本文对基于 TeO_2 晶体的声光可调滤波光谱

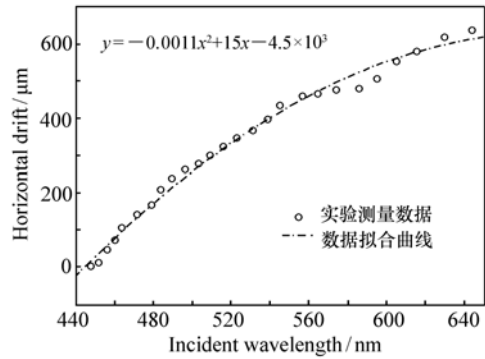


图 12 图像水平漂移量随入射光波长的变化曲线及其拟合曲线

Fig. 12 Change curves and the fitting curve of horizontal drift with the incident light wavelength

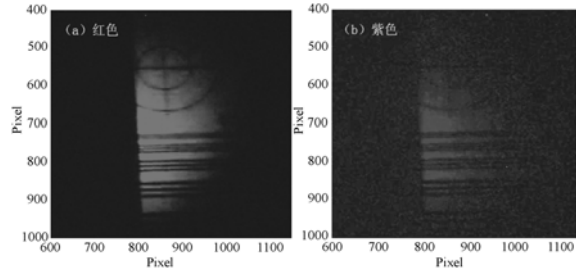


图 13 以 644 nm 处的光谱图像 (a) 为准,经 CCD 探测器位移补偿法得到 448 nm 处的光谱图像 (b),相对漂移量为 0.658 μm

Fig. 13 Spectral image at 448 nm (b) obtained with CCD detector displacement compensation law by a spectral image at 644 nm (a) as standards, and the relative drift is 0.658 μm

相机的成像漂移效应进行了研究。首次利用色散补偿法和探测器位移补偿法理论计算并实验测量了 AOTF 在可见光(488 ~ 644 nm)内的晶体外衍射角的漂移量。通过模拟仿真得出了由于晶体色散导致的衍射角漂移量。当入射光为准平行光时,在晶体出射面添加 0.6° 光楔,晶体外衍射角的变化量可由 0.061 9° 降低到 0.004 2°,即图像漂移量由 162.1 μm 降低到 10.9 μm ,这种方法有效降低了晶体外衍射角的漂移量所引起的成像质量问题,在理论上提高了光谱成像系统的图像分辨率。另外,通过设计实验,利用图像补偿法解决了图像漂移问题,当入射光波长为 488 ~ 644 nm

时,图像水平偏移量从468 μm 降低到0.658 μm ,声光可调滤波器的成像分辨率,在对光谱相机的几乎不影响成像质量。两种方法都有效地提高了设计中具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] BRILLOUIN L, DE PHYSIQUE A. Diffusion de la lumiere et des rayons X par un corps transparent homogène-influence de l'agitation thermique[J]. *Annales de Physique*, 1922, 17:88-122.
- [2] DEBYE P, SEARS F W. On the scattering of light by supersonic waves[J]. *Proceedings of the National Academy of Science*, 1932, 18(6):409-414.
- [3] LUCAS P M R, BIQUARD P. Optical properties of solid and liquid medias subjected to high-frequency elastic vibrations[J]. *Le Journal de Physique et le Radium*, 1932, 549(3):464-477.
- [4] KLEIN W R, COOK B D. Analysis of Kapitza-Dirac diffraction patterns beyond the Raman-Nath regime[J]. *Optics Express*, 2009, (17):19173-1180.
- [5] ZENG S, BI K, XUE S, et al. Acousto-optic modulator system for femtosecond laser pulses[J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, 78(1):015103.
- [6] 杨薇, 刘迎, 肖立峰, 等. 声光可调谐环形腔掺铒光纤激光器[J]. *物理学报*, 2010, 59(2):1030-1035.
YANG W, LIU Y, XIAO L F, et al. Acousto-optic wavelength-tunable erbium-doped fiber ring laser[J]. *Acta Phys Sin*, 2010, 59(2):1030-1035. (in Chinese)
- [7] DIXON R W. Acoustic diffraction of light in anisotropic media[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1967, 3(2):85-93.
- [8] TAKAHASHI K, TANAKA K, HASHIMOTO N, et al. Widely(132 nm) wavelength tunable laser using semiconductor optical amplifier and acousto-optic tunable filter[J]. *Electronics Lett.*, 2004, 40(19):1187-1188.
- [9] HARRIS S E, WALLACE R W. Acousto-optic tunable filter[J]. *J. Optical Society America*, 1969, 59(6):744-747.
- [10] CHANG I C. Phosphorescence imaging system using an acousto-optic filter-based charge coupled device[J]. *SPIE*, 1997, 351:229-239.
- [11] GLENAR D A, HILLMAN J J, SAIF B, et al. Acousto-optic imaging spectropolarimetry for remote sensing[J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(31):7412-7424.
- [12] GLENAR D A, HILLMAN J J. Acousto-optic imaging spectropolarimetry for remote sensing[J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(31):7412-7424.
- [13] LÜ X, ZHAN C, ZENG S, et al. Construction of multiphoton laser scanning microscope based on dual-axis acousto-optic deflector[J]. *Rev Sci. Instrum*, 2006, 77(4):046101.
- [14] 赵慧洁, 程宣, 张颖. 用于火星探测的声光可调谐滤波器成像光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9):945-1952.
ZHAO H J, CHENG X, ZHANG Y. Design of acousto-optic imaging spectrometer for mars exploration[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):945-1952. (in Chinese)
- [15] 张建英, 谢文明, 曾志平, 等. 光声成像技术的最新进展[J]. *中国光学*, 2011, 4(2):111-117.
ZHANG J Y, XIE W M, ZENG ZH P, et al. Recent progress in photoacoustic imaging technology[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2):111-117. (in Chinese)
- [16] 吕晓华, 占成, 张红民, 等. 随机扫描多光子荧光显微成像系统[J]. *光学学报*, 2006, 26(11):1823-1828.
LÜ X H, ZHAN CH, ZHANG H M, et al. Construction of random-access scanning multiphoton fluorescence microscope system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11):1823-1828. (in Chinese)
- [17] NGOI B K A, VENKATAKRISHNAN K, TAN B, et al. Angular dispersion compensation for acousto-optic devices used for ultrashort-pulsed laser micromachining[J]. *Opt Express*, 2001, 9(4):200-206.
- [18] BELLON V, VIGNEAU J L, SÉVILA F. Infrared and near-infrared technology for the food industry and agricultural uses: on-line applications[J]. *Food Control*, 1994, 5(1):21-27.
- [19] KHOSHNEVISAN M, SOVERO E. Development of a cryogenic infrared acousto-optic tunable spectral filter[J]. *SPIE*, 1980, 245:63-68.
- [20] 任玉, 蔡红星, 谭勇, 等. 基于 TeO_2 旋光特性对声光可调滤波器消色散的设计[J]. *中国科学*, 2011, 41(8):917-

923.

REN Y, CAI H X, TAN Y, *et al.*. Design of the acousto-optic tunable filter base on the rotatory property of TeO_2 [J]. *Scientia Sinica*, 2011, 41(8):917-923. (in Chinese)

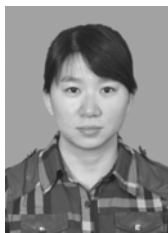
[21] 任玉. 基于布拉格调制下的成像光谱仪的分光部分研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.

REN Y. Study on dispersion parts by bragg modulating in imaging spectrometer[D]. Changchun: Changchun University of science and Technology, 2011. (in Chinese)

[22] 德荣, 吕晓华, 吴萍, 等. 声光偏转器扫描飞秒激光的时间色散补偿[J]. *物理学报*, 2006, 55(9):4729-4733.

DE R, LÜ X H, WU P, *et al.*. Compensation of temporal dispersion for acousto-optical deflector scanning femtosecond laser[J]. *Acta Phys Sin*, 2006, 55(9):4729-4733. (in Chinese)

作者简介:



任玉(1985—), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 2008年于、2011年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事飞秒激光等离子体通道对射频电磁能的传导等方面的研究。E-mail: renyu0101@163.com



张喜和(1954—), 男, 吉林农安人, 博士, 教授, 博士生导师, 1980年于吉林大学获得学士学位, 1993年于长春光学精密机械学院获得硕士学位, 1999年于北京理工大学获得博士学位, 主要从事非线性光学等方面的研究。E-mail: zhangxihe@cust.edu.cn



蔡红星(1975—), 男, 陕西岐山人, 博士, 教授, 硕士生导师, 1998年于长春光学精密机械学院获得学士学位, 2003年、2011年于长春理工大学分别获得硕士、博士学位, 主要从事光谱成像、光谱测量与分析、拉曼散射等方面的研究。E-mail: ciomsz@126.com



郑峰(1981—), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 2004年、2007年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事光度与辐射度探测、复杂体系分析仪器的建模及模型评估、分子光谱及化学计量等方面的研究。E-mail: feng1214@126.com



谭见瑶(1986—), 女, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事基于声光可调滤波器的光谱相机的研究工作。E-mail: Thelma_928@yahoo.com.cn



马文联(1964—), 男, 吉林长春人, 教授, 1987年、1998年于东北师范大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事常微分方程的定性理论与Hopf分支等方面的研究工作。E-mail: mawl@cust.edu.cn



谭勇(1975—), 男, 重庆垫江人, 副教授, 硕士生导师, 1999年于长春光学精密机械学院获得学士学位, 2005年于长春理工大学获得硕士学位, 主要从事非线性光学、光谱测量与分析、光与物质相互作用等方面的工作。E-mail: laser95111@yahoo.com.cn