

声光可调滤波技术在人掌皮组织光谱成像上的应用

张春光 王号* 高强 黄峻峰

(福建师范大学光电与信息工程学院, 福建省光子技术重点实验室,
医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要 利用非共线声光可调滤波器(AOTF)可以在较宽的光谱范围内实现对光信号波长的快速调谐。以往由于衍射效率、光谱分辨率、输出信号稳定性等方面的因素,制约了声光可调滤波技术在光谱成像上的应用。以自主设计的非共线 AOTF 作为分光元件,建立了光谱成像系统;并且在可见光范围的多个波段内获得了人手掌皮组织的显微图像及对应光谱。在整个工作波段,光谱成像系统获取的图像具有较好的清晰度和稳定性,光谱分辨率较高(2.10 nm@630.0 nm)。本研究显示了声光可调滤波技术在光谱成像上的适用性,能够为生物医学显微光谱成像的发展提供新的技术手段。

关键词 光电子学; 光谱成像; 声光可调滤波; 手掌皮肤; 组织

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s116006

Application of Acousto-Optic Tunable Technology on Palm Skin Spectral Imaging

Zhang Chunguang Wang Hao Gao Qiang Huang Junfeng

(Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract By the acousto-optic tunable filter (AOTF), the wavelength of the optical signal can be tuned fast in the wide spectral area. In the past study, the performance of the diffraction efficiency, the spectral resolution and the image stabilization is limit. It restricts the development of the AOTF on the spectral imaging area. In this study, we introduce the self-design non-collinear AOTF as the spectroscopic element, and set up the spectral imaging system. Further more, we obtain the microscopic images and the corresponding spectra of the plam skin tissue. In the whole working waveband, the image definition and stabilization is well, and the spectral resolution keeps on the higher level. This study indicates the applicability of the AOTF on the spectral imaging. It provides a new technology for the development of the biomedicine microscopic spectral imaging.

Key words optoelectronics; spectral imaging; acousto-optic tunable filter; plam skin; tissue

OCIS codes 220.4830; 230.7408; 050.1940

1 引言

光谱成像技术是指在多个波段获得被测目标的光谱信息和图像信息的技术。光谱成像为目标的精细识别提供了有效的手段,在军事侦查、生物医学、

资源调查、精细农业等领域得到广泛应用。在光谱成像领域,分光元件因其对于光谱成像系统的性能具有关键作用而成为研究的热点之一。传统的色散型分光元件和干涉型分光元件都具有性能稳定、技

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-10-01

基金项目: 国家自然科学基金(61107092)、教育部“长江学者和创新团队发展计划”(IRT1115)、福建师范大学优秀青年骨干教师培养基金(fjsdjk2012055)

作者简介: 张春光(1980—),女,博士,副教授,主要从事声光器件设计及应用方面的研究。

E-mail: cgzhang@fjnu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: haowang@fjnu.edu.cn

术相对成熟等优点,目前应用仍颇为广泛。但是,传统分光元件也存在着不可忽视的缺点,如光路复杂、体积和重量大(如棱镜、光栅)、使用灵活性较差、数据处理繁复(如干涉分光型)等。基于二氧化碲(TeO_2)材料的非共线声光可调滤波器(AOTF)是一种新型的电调谐分光元件,它利用各向异性介质中的反常布拉格衍射原理工作。非共线 AOTF 具有体积小、全固态结构、调谐范围宽、调谐灵活快速、信号接收方便等优点,这些均体现出非共线 AOTF 在光谱成像领域应用的潜力^[1-4]。目前,在国内外,非共线 AOTF 在光谱成像领域的应用有较多的报道,这反映出相关研究者对该领域研究的关注。不过,以往由于衍射效率、光谱分辨率、输出信号稳定性等方面的局限,限制了非共线 AOTF 在光谱成像领域的进一步应用^[5-15]。本文在深入剖析声光作用原理和 TeO_2 材料特征的基础上,结合具体应用领域的需要,自主设计了可见光波段非共线 AOTF,而且该器件各项设计性能良好。进一步地,利用自主设计的可见光波段非共线 AOTF 作为分光元件,建立了光谱成像系统。以人体手掌皮组织为目标,利用该系统在可见光波段内的多个中心光波长处获得了目标的光谱及清晰的显微图像。研究表明,图像的清晰度、稳定性以及光谱分辨率均保持在较好水平,显示了声光可调滤波技术在光谱成像上的适用性。

2 实验结果

2.1 非共线 AOTF 的设计

采用 TeO_2 晶体为声光材料。该材料的透明区在 $0.35\sim 5\ \mu\text{m}$, $[110]$ 方向传播的剪切声波的声速非常低($616\ \text{m/s}$),声光优值大,衍射效率很高,这些特性反映了 TeO_2 晶体能够作为制作非共线 AOTF 的适宜材料。目前,有关 TeO_2 非共线 AOTF 设计理论,大多基于动量匹配的切线平行关系;不同之处在于研究人员根据具体需要,从不同角度考虑 TeO_2 晶体的材料特性,提出了各自不同的非共线声光作用关系理论^[16-20]。本课题组在前期研究的基础上,充分考虑 TeO_2 声光晶体的相关材料学特性的影响,设计了适合可见光波段光谱成像应用的非共线 AOTF。

图 1 表示研究中采用的非共线声光作用矢量布局。在设计中,声光作用平面在 $[110]$ 面; TeO_2 被认为是左旋单轴正晶体(为了提高设计的准确性,已

计及 TeO_2 晶体的旋光性)。声光作用平面内传播的光波存在右旋 e 光和左旋 o 光两种本征模式。入射光波矢 \mathbf{k}_i 、衍射光波矢 \mathbf{k}_d 和声波矢 \mathbf{K}_a 之间满足动量匹配条件 $\mathbf{k}_i + \mathbf{K}_a = \mathbf{k}_d$ 。对于选定的超声波矢,对应的入射光波矢和衍射光波矢还要求满足切线平行条件(入射光波矢和衍射光波矢在对应波矢曲面的切线相互平行),该条件的采用,旨在为大孔径非共线 AOTF 设计创造条件,从而提高 AOTF 的光收集能力。

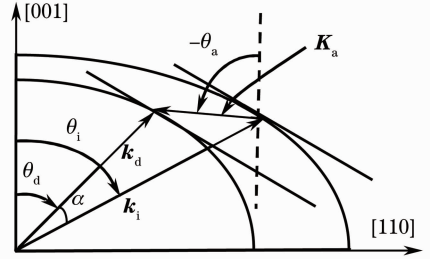


图 1 非共线声光相互作用矢量布局
(计及 TeO_2 晶体的旋光性)

Fig. 1 Wave vector diagram of the noncollinear acousto-optic interaction with considering the rotatory property of AOTF

在设计中,各个相关参数间的关系由如下公式给出:

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

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

$$\tan \theta_d = (n_o / n_e)^2 [(1 + \sigma)^2 / (1 - \sigma)^2] \tan \theta_i, \quad (3)$$

$$\tan(-\theta_a) = (n_i \sin \theta_i - n_d \sin \theta_d) / (n_i \cos \theta_i - n_d \cos \theta_d). \quad (4)$$

$$f_a = (V_a / \lambda_0) [n_i^2 + n_d^2 - 2n_i n_d \cos(\theta_i - \theta_d)]^{1/2}, \quad (5)$$

$$\Delta \lambda = 2\delta \lambda_0 = 1.8\pi \lambda_0^2 / b' L, \quad (6)$$

$$b' = 2\pi \left\{ (n_i - n_d) - \left[\frac{\partial(n_i - n_d)}{\partial \lambda_0} \right] \lambda_0 \right\}, \quad (7)$$

式中这里 q_i 和 q_d 分别是入射光极角和衍射光极角; f_a 和 l_0 分别是超声频率和入射光波长; n_o 和 n_e 分别是入射光和衍射光在垂直于光轴方向的折射率; n_i 和 n_d 分别是入射光折射率以及衍射光折射率; $\Delta \lambda$ 是光谱宽度; σ 反映了声光晶体的旋光性质^[21]。

以上关系表明,AOTF 的设计性能和声光晶体的几何参数、材料特性以及工作波长等因素存在着较复杂的关系。在综合考虑的基础上,这里给出设计参数及 AOTF 性能指标的理论值(如表 1 所示)。其中,声光晶体出射面的光楔角的设计,主要是考虑须要有效降低光波长扫描引起的图像漂移以及衍射角展宽^[22-23];而压电换能器长度这个参数主要与声光作

用的距离、超声波矢方向、入射光方向等有关^[24]。表1设计数据显示,该AOTF在理论上是可以满足光谱成像相关需要。图2给出了AOTF的设计草图。

表1 非共线AOTF的设计参数及性能指标
Table 1 Design parameters and performance index of the noncollinear AOTF

Item	Design parameters and performance index
Incident polar angle	23.80°
Working waveband	400~700 nm
Frequency tuning range	107.5~223.5 MHz
Incident angular aperture	2.85°@632.80 nm
Spectral bandwidth	2.9 nm@632.80 nm
Optical wedge angle	6.15°
Length of piezoelectric transducer	6.76 mm

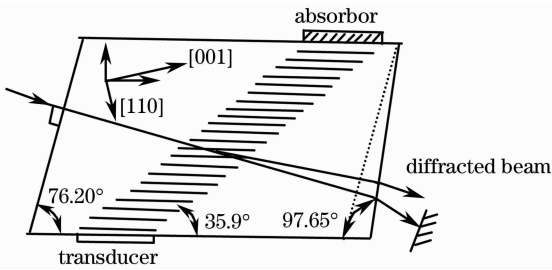


图2 非共线AOTF设计草图

Fig. 2 Design picture of the noncollinear AOTF

2.2 光谱成像系统的建立

为了展示声光可调滤波技术在光谱成像领域的适用性,以自主设计的非共线AOTF作为分光元件,建立了光谱成像系统。图3是光谱成像系统结构图。如图3所示,系统主要包括卤素灯、倒置显微镜、前端光学组件、非共线AOTF、后端成像组件、射频信号电源、光电探测设备(CCD或光谱仪)和计算机。实验中,将人体手掌皮组织置于倒置显微镜(Nikon, TE2000U)的载物台上,卤素灯作为透射光源,发出的光线照射样品上,从样品出射的光(携带着有关样品的光谱学信息和图像信息)再经倒置显微镜的出光口射出;然后经过前端光学组件进行光束的调整(主要起到缩束和准直的作用),进入AOTF后,在特定的超声信号作用下,发生声光布拉格衍射,使特定波长的衍射光从AOTF出射(而非衍射光被遮挡),再经后端成像系统(主要起会聚衍射光线和成像的作用),被光电探测设备所接收。实验中,射频驱动电源(最大功率可达2 W)不断地发射并调谐加载到AOTF上的超声信号频率,就可以在光电探测设备上接收到特定中心光波长的衍射光谱及样品图像。特别指出的是,在本系统中,由于倒置显微镜的引入,可以实现同时获得样品的显微图像和对应光谱,这为生物医学领域更加精细的目标识别提供了新的手段。

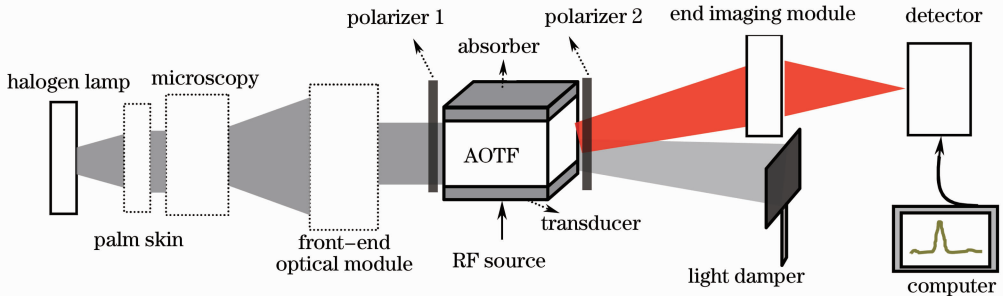


图3 基于非共线AOTF的显微光谱成像系统

Fig. 3 Setup for the noncollinear AOTF based microscopic spectral imaging system

2.3 人掌皮组织的光谱成像实验及结果

利用建立的光谱成像系统,在400~700 nm的可见光波段,通过调谐超声波的频率,获得在一系列光波长下的人掌皮组织光谱和对应的显微图像。图4(a)~(f)分别是当超声频率为110、120、130、140、160、170 MHz时的衍射光谱(测量衍射光谱时,图3所示光谱成像系统中的光电探测器位置采用了高性能光谱仪,Princeton Instrument, MS-2300i)。从图

4看出,对应的超声频率下,衍射光中心波长分别是675.6、630.0、590.2、557.0、504.5、483.3 nm;相应的光谱宽度分别是2.51、2.10、1.95、1.80、1.60、1.50 nm。研究结果显示,在选定的实验波段,光谱仪测得的光谱信号质量较好,谱形基本对称,无显著变形;光谱宽度的实验值与理论计算值基本相符,而且光谱宽度值较窄,满足光谱成像研究的需要。

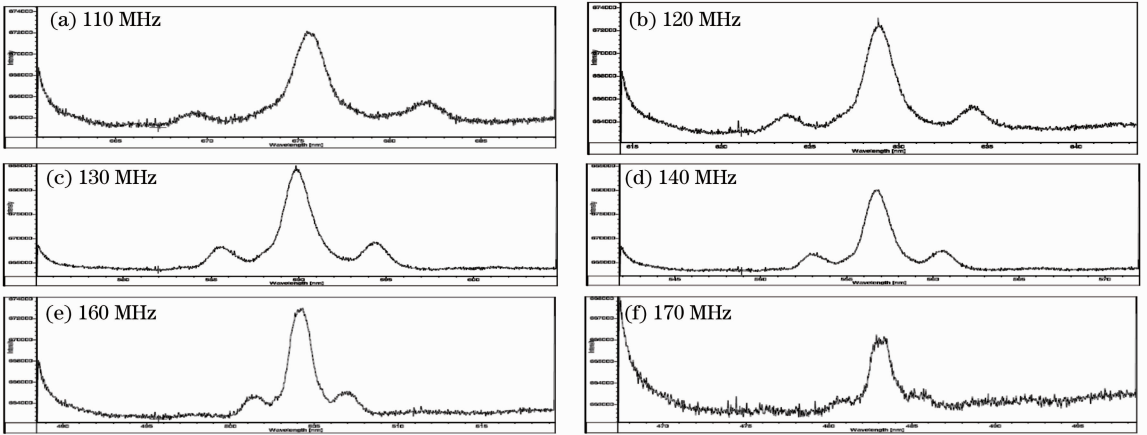


图 4 在不同超声频率下,基于 AOTF 的光谱成像系统获得的人掌皮组织光谱

Fig. 4 Spectrum of the palm skin based on the AOTF spectral imaging system at a series of acoustic frequency

图 5 给出了应用建立的光谱成像系统获得的在一系列超声频率作用下的人掌皮组织的显微图像(获得显微图像时,图 3 所示光谱成像系统中的光电探测器位置采用了科学级 CCD 设备, Nikon digital sight DS-SM)。从图 5 可以看出,在不同的超声频率下(对应着不同的光波长),掌皮组织的图像均比

较亮,说明该系统具有很好的光收集能力,这有利于更复杂目标的成像和识别;而且,图像均比较清晰,能够较好地分辨出掌皮组织的内部结构,反映了基于 AOTF 建立光谱成像系统进行显微光谱成像的可行性。

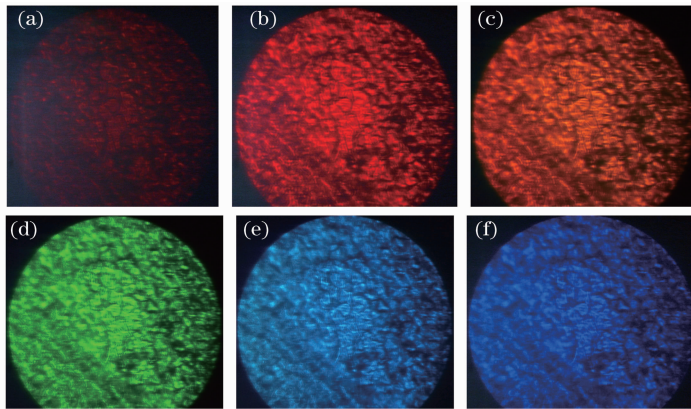


图 5 在一系列超声频率下,获得的人掌皮组织的显微图像。(a) 110 MHz; (b) 120 MHz;

(c) 130 MHz; (d) 140 MHz; (e) 160 MHz; (f) 170 MHz

Fig. 5 Microscopic images of the palm skin at a series of acoustic frequency. (a) 110 MHz; (b) 120 MHz;

(c) 130 MHz; (d) 140 MHz; (e) 160 MHz; (f) 170 MHz

为了更直观地测试基于光谱成像系统的图像清晰度和稳定性,在相同参数条件下获取了某标尺

的显微图像(在一系列超声频率下进行测量)如图 6 所示,图中采用 20 倍物镜,标尺每个格为

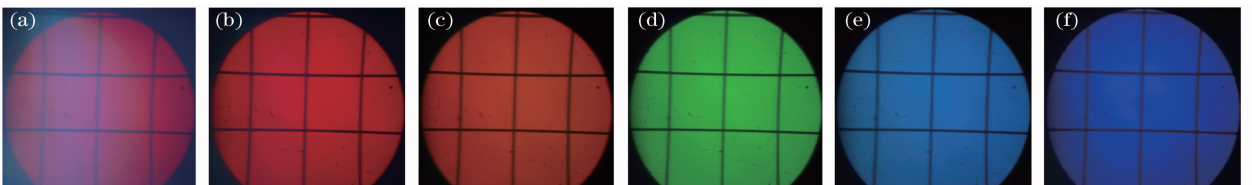


图 6 在一系列超声频率下,获得的标尺的显微图像。

(a) 110 MHz; (b) 120 MHz; (c) 130 MHz; (d) 140 MHz; (e) 160 MHz; (f) 170 MHz

Fig. 6 Microscopic images of the scaleplate at a series of acoustic frequency. (a) 110 MHz; (b) 120 MHz;

(c) 130 MHz; (d) 140 MHz; (e) 160 MHz; (f) 170 MHz

250 μm 。可以看出,在 110~170 MHz 的频率调谐范围内,CCD 成像面(其位置保持不变)上的标尺刻度并无明显移动,直观地反映出系统很好的图像稳定性;同时,各幅图上的标尺刻度在水平和垂直方向均是笔直、无明显的形变、边缘锐利,反映出系统在工作波段内具有很好的图像清晰度。

3 结 论

综合考虑声光作用原理、声光材料的特性以及应用领域,自主设计了一个应用于光谱成像的基于二氧化碲(TeO_2)材料的非共线 AOTF。设计的非共线 AOTF,在可见光波段各项性能良好(调谐范围宽:107.5~223.5 MHz;光谱分辨率高:2.9 nm@632.80 nm;孔径角大:2.85°@632.80 nm)。基于自主设计的非共线 AOTF,建立了显微光谱成像系统。利用该系统,以人掌皮组织为研究对象,在可见光波段,获得了人掌皮组织的光谱(一系列确定的光波长下)及对应的显微图像。研究结果表明,此光谱成像系统具有很高的光谱分辨性能(2.10 nm@630.0 nm)和较好的图像稳定性、清晰度。本研究充分展示了声光可调滤波技术在光谱成像研究领域的适用性,为光谱成像领域的进一步发展提供新的思路。特别是,人掌皮组织显微光谱图像的获得,显示了基于 AOTF 的光谱成像系统在生物医学研究方面的巨大潜力,将为该领域研究中更加精细的目标识别提供有利的技术手段。

参 考 文 献

- 1 N Gupta, R Dahmani, S Choy. Acousto-optic tunable filter based visible to near-infrared spectro-polarimetric imager[J]. *Opt Eng*, 2002, 41(5): 1033-1038.
- 2 N Gupta, D R Suhre. Acousto-optic tunable filter imaging spectrometer with full stokes polarimetric capability[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(14): 2632-2637.
- 3 N Gupta. Biosensors technologies: acousto-optic tunable filter-based hyperspectral and polarization imagers for fluorescence and spectroscopic imaging[J]. *Methods in Molecular Biology*, 2009, 503: 293-305.
- 4 Ye Yuan, Jiyoung Hwang, Mowleswaran Krishnamoorthy, et al.. High-throughput acousto-optic-tunable-filter-based time-resolved fluorescence spectrometer for optical biopsy[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(7): 1132-1134.
- 5 Xiao Lifeng, Hu Hongzhang, Zhang Mei, et al.. A near-infrared spectrometer based on an integrated optical AOTF[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(3): 269-272.
肖立峰, 胡鸿璋, 张梅, 等. 一种基于集成光学声光可调谐滤波器的近红外光谱仪[J]. *中国激光*, 2004, 31(3): 269-272.
- 6 I C Chang, P Katzka. Enhancement of acousto-optic filter resolution using birefringence dispersion in CdS [J]. *Opt Lett*, 1982, 7(11): 535-536.
- 7 Fan Guofang, Yang Jisheng, Sang Wei, et al.. Study on characteristics of acousto-optic tunable filter in near-infrared spectral monitoring[J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2005, 26

- (1): 63-66.
范国芳, 杨吉生, 桑伟, 等. 近红外光谱检测中声光可调谐滤波器性能研究[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(1): 63-66.
- 8 V B Voloshinov, K B Yushkov, B B J Linde. Improvement in performance of a TeO_2 acousto-optic imaging spectrometer[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2007, 9(4): 341-347.
- 9 J W You, J Ahn, S Kim, et al.. Efficient double-filtering with a single acousto-optic tunable filter[J]. *Opt Express*, 2008, 16(26): 21505-21511.
- 10 Yang Wei, Liu Ying, Xiao Lifeng, et al.. Suppression of sidelobe levels for acousto-optic tunable filters using cascaded single stage acousto-optic tunable filters[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(10): 2734-2739.
杨薇, 刘迎, 肖立峰, 等. 多级级联声光可调谐滤波器旁瓣的抑制[J]. *中国激光*, 2009, 36(10): 2734-2739.
- 11 Xu Kexin, He Zhonghai, Xue Bin. Theoretical analysis to acousto-optic tunable filter system with normal phase match condition[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(8): 1047-1050.
徐可欣, 贺忠海, 薛彬. 一般相位匹配条件下声光可调谐滤波器系统的理论分析[J]. *中国激光*, 2006, 33(8): 1047-1050.
- 12 Chang Lingying, Zhao Baochang, Qiu Yuehong, et al.. Eliminate chromatic aberrations for acousto-optic tunable filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(11): 2895-2899.
常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. 声光可调谐滤波器(AOTF)消色散设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(11): 2895-2899.
- 13 Chang Lingying, Zhao Baochang, Qiu Yuehong, et al.. Optical design of imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 3021-3026.
常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. 声光可调谐滤波器成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 3021-3026.
- 14 Zhang Chunguang, Zhang Zhonghua, Wang Hao. Improvement of the spectral resolution of acousto-optic tunable filter by double filtering method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s1): 348-353.
张春光, 张中华, 王号. 二次滤波提高声光可调谐滤波器光谱分辨率研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(s1): 348-353.
- 15 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.
- 16 I C Chang. Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture[J]. *Appl Phys Lett*, 1974, 25(7): 370-372.
- 17 P A Gass, J R Sambles. Accurate design of noncollinear acousto-optic tunable filter[J]. *Opt Lett*, 1991, 16(6): 429-431.
- 18 Zhang Chunguang, Zhang Zhonghua, Wang Hao, et al.. Analysis of the optimum optical incident angle for an imaging acousto-optic tunable filter[J]. *Opt Express*, 2007, 15(19): 11883-11888.
- 19 Zhang Chunguang, Wang Hao, Qiu Yishen. Selection of design theory for near infrared noncollinear acousto-optic tunable filter[J]. *Chinese J Laser*, 2011, 38(9): 0916001.
张春光, 王号, 邱怡申. 近红外非共线声光可调谐滤波器设计理论的选取方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0916001.
- 20 I C Chang. Analysis of the noncollinear acousto-optic filter[J]. *Electron Lett*, 1975, 11(25-26): 617-618.
- 21 N Uchida. Optical properties of single-crystal paratellurite (TeO_2)[J]. *Phys Rev B*, 1971, 4(10): 3736-3745.
- 22 Zhang Chunguang, Zhang Zhonghua, Yang Yu, et al.. Design and analysis of a noncollinear acousto-optic tunable filter[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(16): 2417-2419.
- 23 D R Suhre, J G Throdore. White-light imaging by use of a multiple passband acousto-optic tunable filter[J]. *Appl Opt*, 1996, 35(22): 4494-4501.
- 24 N Gupta, V B Voloshinov. Development and characterization of two-transducer imaging acousto-optic tunable filters with extended tuning range[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(7): 1081-1088.