

考虑旋光影响的窄带声光滤波器设计及其性能分析

王 号 张春光* 黄峻峰 高 强

(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,
福州 福建 350007)

摘要 基于电信号调谐的声光可调滤波器具有宽光谱、快速调谐、大孔径角以及窄滤波线宽等特点。在考虑了二氧化碲晶体的旋光性的基础上,设计了一种非共线型声光滤波器。实验研究了该滤波器调谐关系以及不同中心波长的滤波线宽等性能。该滤波器的性能与理论预期符合较好。另外,结合倒置光学显微镜系统,搭建了超光谱显微成像实验系统,并进行了初步的超光谱显微成像实验研究,在可见光范围内获得了较好的超光谱成像结果。

关键词 光学器件;声光滤波器;旋光性;超光谱显微成像;TeO₂

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0423002

Design and Performance Evaluation of a Narrow Band Acousto-Optic Filter Considering the Rotatory Property

Wang Hao Zhang Chunguang Huang Junfeng Gao Qiang

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

Abstract Acousto-optic tunable filter has many merits such as, wide spectrum range, rapid tuning large aperture angle and narrow band pass and etc.. In this work, the authors design a noncolliner acousto-optic tunable filter considering the rotatory property of TeO₂. Moreover, we evaluate the performance of the acousto-optic tunable filter theoretically and experimentally and the experimental results are in accordance with the theoretical expect. Also, this filter is used in hyperspectral microscopic imaging system combining with inverse optical microscope system and it is capable of detecting and mapping material with different ingredient monochromatically.

Key words optical devices; acousto-optic filter; rotatory property; hyperspectral imaging; TeO₂

OCIS codes 220.4830; 230.7408; 050.1940

1 引 言

声光可调滤波器(AOTF)是一种基于声光效应的新型的分光器件。当声波作用于声光晶体时,光弹效应将引起材料的折射率发生变化,光波通过声光晶体时将受到声波的调制作用。具体说来,周期的声波对声光晶体产生周期性的折射率调制,形成折射率光栅,入射光将被折射率光栅部分衍射。确

定的声波频率下,入射光中只有很窄的光谱可以满足衍射条件从而发生衍射,而改变声波的频率被衍射的光波频率将相应发生变化,实现窄带的可调滤波。相比于传统的滤波器件,声光滤波器输出的频率调谐方便快捷。因为声光滤波器的调谐是基于晶体内声波频率的改变,而声波由射频源是通过声光晶体上的换能器来产生的,因此只需改变射频信号

收稿日期: 2013-10-08; **收到修改稿日期**: 2013-11-09

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)、福建师范大学青年骨干教师资助计划(fjsdjk2012055)

作者简介: 王 号(1978—),男,博士,副教授,主要从事超光谱成像以及非线性光学等方面的研究。

E-mail: haowan@fjnu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: cgzhang@fjnu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

的频率就可以实现滤波器输出波长的快速调节,并且这种调节方式可以是连续的也可以是随机的。另外,由于声光滤波器工作中无活动部件,系统的稳定性高,可以适应多种应用的需要。

传统的声光滤波器的设计通常不考虑晶体的旋光性^[1-6]。前期理论研究结果表明,忽略旋光性将影响声光滤波器的准确设计,并会进一步影响其滤波性能^[7-9]。本文在综合考虑二氧化碲晶体的旋光性以及双折射特性的基础上,设计了基于二氧化碲材料的窄带声光滤波器,实验分析了该滤波器的性能并与理论预期进行了比较,利用其进行了初步的超光谱显微成像实验研究。

2 理论分析

非共线情况下,声光作用的波矢量布局由图1

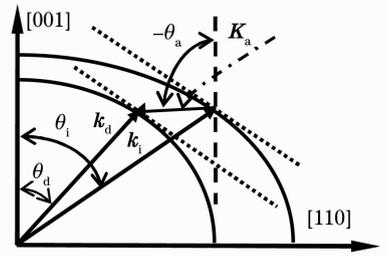


图1 非共线情况下声光作用矢量图

Fig. 1 Wave vector diagram of noncollinear AOTF

给出。其中, $k_i + K_a = k_d$, k_i , k_d 和 K_a 分别表示入射光波矢量,衍射光波矢量和声波波矢量。假设入射光是右旋椭圆偏振光,衍射光为左旋椭圆偏振光,声波的方向满足切线平行动量匹配条件,此时,波矢量的极角可以表示为

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

$$\tan(-\theta_a) = (n_i \sin \theta_i - n_d \sin \theta_d) / (n_i \cos \theta_i - n_d \cos \theta_d), \quad (2)$$

式中 θ_a , θ_i 和 θ_d 分别表示声波的角度、入射光和衍射光极角, σ 由晶体的旋光性大小决定: $\sigma = \lambda\rho / (2\rho n_o)$, ρ 为晶体的旋光度, n_o 和 n_e 是在垂直于光轴方向的寻常光和非寻常光的折射率。 θ_a 和 θ_i 的关系为

$$\tan(-\theta_a) = \frac{\tan \theta_i \{ [n_o^4 n_e^2 (1 + \sigma)^6 \tan^2 \theta_i + n_e^6 (1 - \sigma^2)^2]^{1/2} - [n_o^4 (1 + \sigma)^6 \tan^2 \theta_i + n_o^4 n_e^2 (1 + \sigma)^4]^{1/2} \}}{[n_o^4 n_e^2 (1 + \sigma)^6 \tan^2 \theta_i + n_e^6 (1 - \sigma^2)^2]^{1/2} - [n_o^2 n_e^4 (1 - \sigma)^4 (1 + \sigma)^2 \tan^2 \theta_i + n_e^6 (1 - \sigma)^4]^{1/2}}. \quad (3)$$

根据(3)式,设计了基于二氧化碲的窄带声光可调滤波器,图2给出了滤波器中核心部分——声光晶体的设计参数。在该设计中,为了有效控制衍射光的角度随着波长变化,在晶体的出射端还加工成光楔的形状。

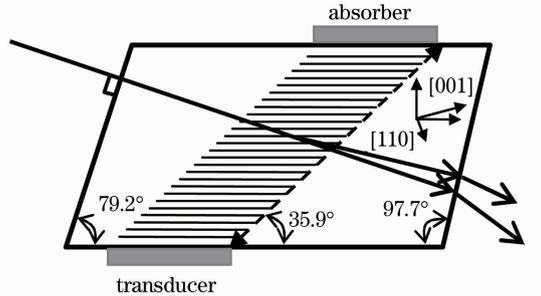


图2 二氧化碲声光晶体的设计

Fig. 2 Design of TeO₂ crystal for AOTF

3 实验设计与结果讨论

为了测试上述声光滤波器性能,设计了一套性能测试系统,如图3所示。实验中选用卤素灯作为光源,经前端光学系统准直后,平行光沿垂直晶体表

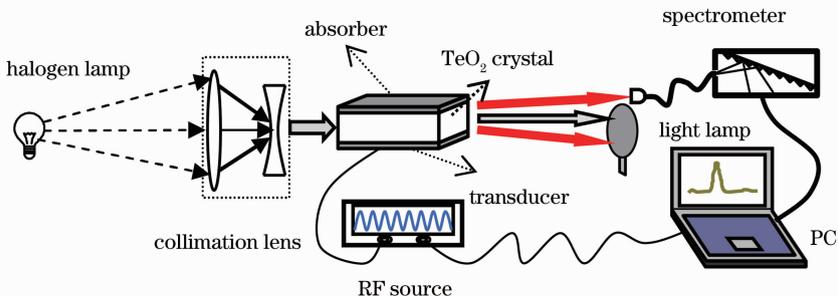


图3 声光滤波器性能测试原理框图

Fig. 3 Sketch for the performance evaluation of AOTF

面入射。声吸收体和压电换能器分别固定于声光晶体的上下表面，压电换能器接射频源。经滤波后出射光分为零级和正负一级三束，只选取正一级衍射光做测量，其余两束利用挡光板滤除。正一级光经光谱仪接收进行光谱采集。数据的分析以及整套设备的控制由计算机完成。

首先测量了声光滤波器的调谐关系，也就是衍射光的中心波长和加载到压电换能器的射频信号频率的关系，并与理论计算结果进行了比较，如图 4 所示。

图中实线为理论的计算结果，点为实验的测量结果，可见实验结果与理论预期符合的很好。在可见光的范围内，随着超声频率的增加衍射光的中心波长向短波方向移动，超声频率和衍射光波长一一对应。通过调节超声信号的频率可以准确的选择来自目标的特定波长信号光，进行相应的光谱分析。

另外，还测量了在不同超声频率下的衍射光带宽并与理论计算结果进行了比较，图 5 给出了超声信号频率为 120 MHz 的理论计算以及实验观测结果。

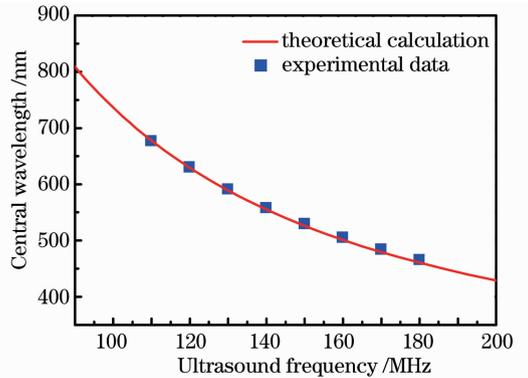


图 4 声光滤波器的调谐关系

Fig. 4 Relationship between ultrasound frequency and diffracted wavelength

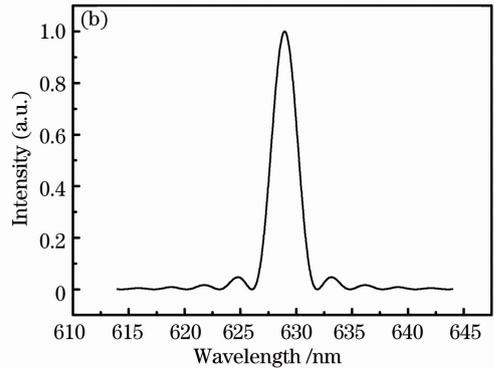
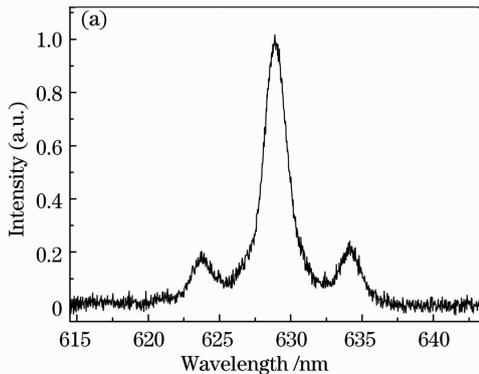


图 5 超声频率为 120 MHz 的衍射信号光谱。(a) 实验测量结果；(b) 理论计算结果

Fig. 5 Spectra of the diffracted light when RF is 120 MHz. (a) Experimental result; (b) theoretical calculation result

图 5 的结果表明，在确定的超声频率下理论计算结果与实验观测到信号的中心波长一致，带宽也基本相同，只是衍射光的旁瓣相比理论预期更明显。产生较大旁瓣的原因可能是以下几方面：首先，在实验中为了对光线进行准直，滤波器前后都放置了光学系统，光学系统会明显影响旁瓣的大小^[10]。另外，声光晶体材料本身的性能以及射频信号源的信号质量等因素都与旁瓣有关。因此，使用高质量的声光材料以及性能更佳的驱动信号，同时改进前端光学系统都会有效压缩旁瓣。事实上，为了有效抑制衍射信号的旁瓣，除了上述方式之外，还可以采取二次滤波等方式^[8,11]。

将上述设计的声光滤波器，与光学倒置显微镜相结合，搭建了超光谱显微成像的实验装置。该装置与图 3 中实验装置的不同之处主要在于光源以及光谱分析部分。在超光谱显微成像实验中，直接利

用倒置显微镜的出射光作为信号光，该信号光为经过待测样品的透射信号。在接收端利用成像 CCD 替代光谱仪，为了提高呈现质量，在 CCD 前端设置光学镜头。

实验中，选取新鲜的牵牛花蕊作为实验观测对象，将其置于石英载玻片上并加盖玻片，一方面防止成像过程中由于光照产生水分的丢失导致样品变性，另一方面对样品有很好的固定作用。实验中，光学显微镜的放大倍率为 20 倍，不同超声频率下的超光谱显微成像结果如图 6 所示。

从成像结果来看，对不同的衍射波长，成像效果都较好。在超声信号为 130 MHz，对应波长约为 590 nm 时，可以十分清楚地分辨出牵牛花蕊纤维的纵向结构。随着衍射波长向短波长移动这种精细逐渐变得模糊，这表明为了识别牵牛花蕊的纵向显微结构选择超声信号在 130 MHz 附近较为适合。

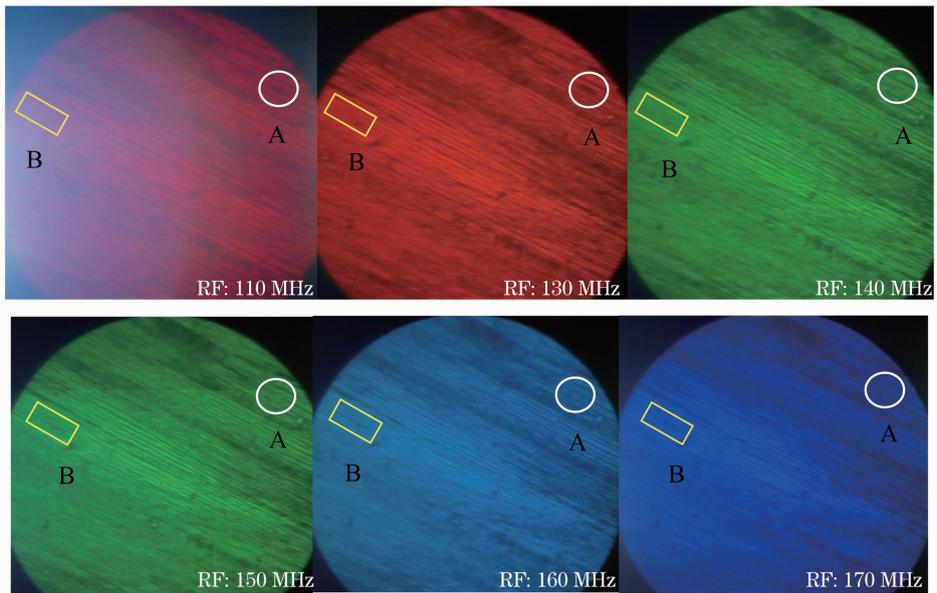


图 6 不同超声频率下牵牛花蕊的超光谱显微成像结果

Fig. 6 Hyperspectral microscopic imaging of the pistil of morning glory under different ultrasound frequencies

同时,在相同的目标区域,不同波长的显微成像结果存在差异,这说明该区域的生物组织成分与其周边的环境成分对信号光中不同波长成分的吸收不同。比如,在图 6 中用白色圆圈标识的目标区域 A 成像结果中,在红光区域可以看到暗斑,随着超声频率的增加,衍射光波长逐渐变短,在绿光以及蓝光区域该暗斑消失,表明该区域与其周围的物质成分有区别,导致其相比周边环境对红光的吸收更强,因此表现得 darker。而在波长较短的绿光和蓝光的透射成像过程中,该成分与周边环境对蓝绿光具有相当的吸收,因此成像的亮度相当,暗斑消失。

在黄色矩形标识的目标区域 B 的成像结果中,在蓝光以及绿光波段可以看到暗的线条,而随着超声频率降低,衍射光波长增加,在红光区域该暗条纹消失。这一结果说明,该区域的物质成分与周边的成分不同,该成分对红光的吸收与周边成分相当,不出现暗纹,而其对蓝绿光的吸收强于周边的环境,成像结果中变暗为暗纹。

从上述的结果可以看出,由于超光谱显微成像具有准单色成像的本领,通过超光谱显微成像可以将生物组织中的不同成分区分开来。另外,值得一提的是,从成像结果来看,由于在声光晶体的设计中,考虑了消色散的光楔设计,图像的漂移也得到了很好的控制,成像的稳定性较高。

4 结 论

从考虑晶体旋光性的非共线声光作用理论出

发,理论设计了基于二氧化碲晶体的非共线型声光滤波器,分析了其调谐关系以及滤波带通等主要指标,并与实验结果进行了比较。结果表明理论计算结果和实验观测符合得较好,说明考虑旋光性的设计理论客观反映了滤波器的滤波行为。以该理论为指导可以进一步提高声光滤波器的设计精度。另外,还将滤波器与光学倒置显微镜系统相结合,搭建了一套超光谱显微成像系统。利用该系统进行了新鲜牵牛花蕊样品的超光谱显微成像初步实验研究。在透射成像模式下,不同波长均有较好的显微成像结果,并且衍射光的漂移被很好地抑制,图像的稳定性较好。实验结果表明声光可调滤波器在超光谱显微成像领域有一定的应用前景。

参 考 文 献

- 1 N Uchida. Optical properties of single crystal paratellurite (TeO_2) [J]. *Phys Rev B*, 1971, 4(10): 3736–3745.
- 2 I C Chang. Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture [J]. *Appl Phys Lett*, 1974, 25(7): 370–372.
- 3 T Yano, A Watanabe. Acousto-optic TeO_2 tunable filter using far off axis anisotropic Bragg diffraction [J]. *App Opt*, 1976, 15(9): 2250–2258.
- 4 P A Gass, J R Sambles. Accurate design of noncollinear acousto-optic tunable filter [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(6): 429–431.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Chunguang Zhang, Zhonghua Zhang, Yu Yang, *et al.*. Design and analysis of a noncollinear acousto-optic tunable filter [J]. *Opt*

- Lett, 2007, 32(16): 2417–2419.
- 8 Chunguang Zhang, Zhonghua Zhang, Hao Wang, *et al.*. Spectral resolution enhancement of acousto-optic tunable filter by double filtering [J]. Opt Express, 2008, 16(14): 10234–10239.
- 9 Zhang Chunguang, Wang Hao, Qiu Yishen. Selection of design theory for near infrared noncolliner acousto-optic tunable filter [J]. Chinese J Lasers, 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.
- 10 D Voelz, B Kodali. Characterization of an acousto-optic tunable filter imaging system [C]. SPIE, 2006, 6302: 63020p.
- 11 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.

栏目编辑：殷建芳