

# 基于动量匹配的声光滤波器设计与性能分析

王 号 黄峻峰 张春光\* 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,福建 福州 350007

**摘要** 声光滤波技术作为一种新的分光手段在光谱成像等领域有着广阔的应用前景。高性能声光滤波器的设计与制作是声光滤波技术的核心关键。从声光相互作用的基本理论出发,研究了声光作用过程中动量失配量对声光滤波器衍射效率的影响。并进一步分析了声光滤波器的角孔径以及衍射线宽的变化规律。研究表明,声光滤波器的调谐关系随入射光角度的变化而变,在确定入射光角度的情况下,衍射光波长和超声波频率一一对应。另外,随着入射角度的变化,衍射光的波长发生变化的同时,其线宽以及角孔径发生明显变化,通过调整入射光的角度可以相应改变衍射光的线宽,实现窄带的声光滤波,提高声光滤波器的光谱分辨本领,也可以调整入射光的角度获得较大的角孔径,提高滤波器的集光能力。理论的计算结果与实验结果符合的较好。研究结果对高性能声光滤波器的设计提供有意义的借鉴和参考,并推动声光滤波技术更广泛应用。

**关键词** 光学器件;声光滤波器;TeO<sub>2</sub>;动量失配;旋光性

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0616003

## Design and Performance Evaluation of an AOTF Based on Momentum Match Condition

Wang Hao Huang Junfeng Zhang Chunguang Gao Qiang

*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** As a method for light-filtering, acousto-optic tunable filter (AOTF) has wide application prospect. Design and manufacture of high-performance AOTF are key part of this tech. In this work, based on the momentum mismatch, the diffracted efficiency of an AOTF is calculated. Also the relations between momentum mismatch and band-pass and aperture are investigated. The results demonstrated that the tune relation of an AOTF changed with the incident angle of light and the diffracted wavelength is decided by acoustic wave at a fixed incident angle of light. Otherwise, the aperture and band-pass of an AOTF changed with the incident wavelength; we can acquire narrow band-pass and big aperture with a proper incident angle. The theoretical calculations are in agreement with experimental results. This research will be helpful for the design of an AOTF with good performance.

**Key words** optical devices; acousto-optic tunable filter; TeO<sub>2</sub>; momentum mismatch; rotatory property

**OCIS codes** 230.1040; 050.1950; 230.1950

## 1 引 言

光学滤波技术在光谱学,光学检测以及光学成像等领域有着广泛的应用<sup>[1-10]</sup>。声光可调滤波器(AOTF)是一种基于声光效应的新型分光器件。当声波和光波相互作用时,入射光将被由周期性声波对声光晶体产生的周期性折射率调制产生的折射率光栅部分衍射,只有满足动量匹配的光波得以被衍射并从入射光中得以分离,实现滤波。当光波以及声波的方向确定时,衍射光的中心波长和声波的频率相对应,改变超声频率就

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-02-11

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,主要从事声光器件设计及应用方面的研究。E-mail: haowang@fjnu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: cgzhang@fjnu.edu.cn

可以实现窄带的可调滤波。相比其他滤波器件和手段,声光滤波器有很多优点,比如调谐快速、通光范围宽、装置无活动部件具有高稳定性等,因此在很多领域都得到了广泛的应用。

目前声光滤波器的设计中一般不考虑晶体的旋光性<sup>[5-10]</sup>。前期研究表明,在声光滤波器的设计中考虑声光晶体的旋光性将提高声光滤波器的设计精确度,并进一步提高其滤波性能<sup>[11-13]</sup>。本文在综合考虑二氧化碲(TeO<sub>2</sub>)晶体的旋光性以及双折射特性的基础上,从声光相互作用的一般理论出发,考虑一般情况,得到了动量失配的一般表达式。通过该表达式计算了不同参数情况下声光滤波器的衍射效率问题。并进一步利用衍射效率分析了声光滤波器的集光能力(孔径角),以及滤波器的带通情况,理论的计算结果与实验的测量结果符合的较好。

## 2 理论分析

为了便于说明,图1给出了非共线声光作用一般情况(非匹配)下的波矢量布局。图中  $k_i, K_a, k', k_d$ , 和  $\Delta k$  分别表示入射光波矢量,声波波矢量,极化波矢量,衍射光波矢量和动量失配量。并假设入射光是右旋椭圆偏振光,衍射光为左旋椭圆偏振光,声波波矢与入射光波矢相互作用产生极化波矢量  $k'$ ,极化波矢量  $k'$  进一步激发具有特定频率的光辐射  $k_d$ 。沿光轴方向极化波矢量与衍射光波矢的矢量差  $\Delta k$  为动量失配量。通过动量失配可以分析声光相互作用过程中的调谐关系,衍射效率,滤波器带通以及角孔径等关键参数,为进行高性能声光滤波器的设计提供参考。

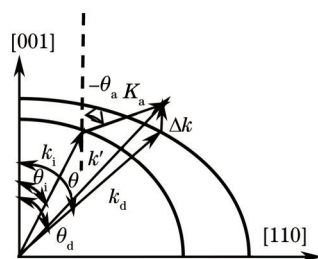


图1 非共线情况下声光作用矢量图

Fig.1 Wave vector diagram of noncollinear AOTF

入射光和衍射光的折射率的表达式为:

$$\begin{aligned} n_i &= \left\{ \cos^2 \theta_i / [n_o^2(1 + \sigma)^2] + \sin^2 \theta_i / n_c^2 \right\}^{-1/2} \\ n_d &= \left\{ \cos^2 \theta_d / [n_o^2(1 - \sigma)^2] + \sin^2 \theta_d / n_c^2 \right\}^{-1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $\theta_i, \theta_a$  和  $\theta_d$  分别是入射光极角,超声极角和衍射光极角。 $\sigma$  由晶体的旋光性以大小决定: $\sigma = \lambda\rho/2\pi\nu_o$ ,  $\rho$  为晶体的旋光度。 $n_o$ 和  $n_c$ 是在垂直于光轴方向的寻常光和非寻常光的折射率,可以表示为:

$$\begin{aligned} n_o &= [1 + A\lambda_o^2/(\lambda_o^2 - B^2) + C\lambda_o^2/(\lambda_o^2 - D^2)]^{1/2} \\ n_c &= [1 + E\lambda_o^2/(\lambda_o^2 - B^2) + F\lambda_o^2/(\lambda_o^2 - G^2)]^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $A, B, C, D, E, F, G$  均为常数。

进而,在一般情况下可以获得失谐量的一般表达式:

$$\Delta k = \sqrt{\left\{ \sqrt{n_o^2 \left[ \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 - \frac{k' \sin \theta'}{n_c^2} \right] (1 + \delta)^2 - k' \cos \theta'} \right\}^2}, \quad (3)$$

其中  $\theta'$  表示极化波矢量与光轴的夹角。

声光滤波器的衍射效率可以表示为:

$$\eta = \left( \frac{\xi}{2} \right)^2 \left( \frac{\sin \sigma}{\sigma} \right)^2, \quad \sigma^2 = \zeta^2 + \left( \frac{\xi}{2} \right)^2, \quad (4)$$

其中  $\xi = \sqrt{\xi_0 \xi_1}$ ,  $\zeta = \frac{\Delta k L}{2}$ ,  $\xi_0 = -\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_0 L$ ,  $\xi_1 = -\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_1 L$ ,  $L$  表示声光作用距离,  $\Delta n_1$  以及  $\Delta n_2$  表示声致折射率变化。

### 3 结果与讨论

从声光相互作用的最一般情况出发,并考虑声光材料的旋光性,建立了声光相互作用中动量失配量的一般表达式。利用该表达式,计算了由动量失配带来的滤波器衍射效率变化,通过分析衍射效率的变化考察了不同条件下,滤波器的角孔径以及带通等关键设计参数的变化规律。

图2为确定超声极角为 $100^\circ$ 在不同入射光极角以及衍射光波长条件下获得的衍射效率分布的灰度图。从图2可以看出,如果确定入射光极角,入射信号光中只有严格满足动量匹配条件的具有特定频率的光波才会达到100%的衍射效率,如果信号光频率偏离该特定频率,衍射效率将逐渐下降,直至衍射效率为零。另外,可以看出入射光一般可以在两个不同的角度与声波实现动量匹配,保证相同波长的衍射光达到100%的衍射效率,实现滤波。该灰度图对应衍射效率为100%的峰值曲线在 $X$ - $Y$ 平面有极值。该极值表示在一级近似下,入射光极角的变化不破坏动量匹配条件,也就是通常说的切面平行条件。满足切面平行条件时,即使入射角有一个小的变化,动量匹配条件仍然能够近似满足,这就是具有大角孔径非共线AOTF的设计基础。也就是说,在非共线AOTF的设计中必需考虑大孔径角的条件来选取入射光极角,以保证AOTF具有更好的性能。

为了能更直观的看出衍射效率的变化规律,图3给出了衍射效率随着入射光极角和衍射光波长变化关系的三维(3D)曲面图。图3的结果表明,衍射效率随着衍射光波长和入射光极角的变化表现出震荡衰减。这一规律表明滤波器在滤波过程中在带通的峰值波长附近将出现几乎对称的次级大,也就是旁瓣。而且,旁瓣是不可避免的,要想提高滤波器带通的光谱纯度,抑制旁瓣可以采用二次滤波等方法<sup>[12-16]</sup>。

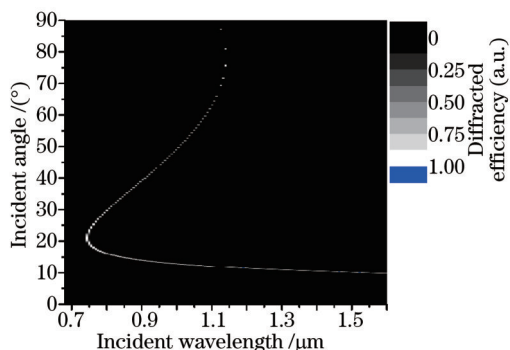


图2 衍射效率随入射光极角以及衍射光波长变化规律的灰度图

Fig.2 Grey scale map demonstrating the relationship between incident angle, diffracted wavelength and diffracted efficiency

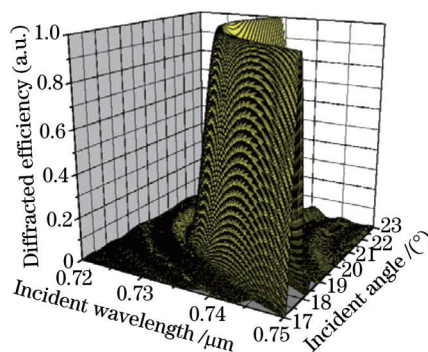


图3 衍射效率随着入射角和波长的变化的三维曲面图

Fig.3 3D surface map demonstrate the relation between incident angle, wavelength and diffraction efficiency

进一步将图3局部放大,同时,为了直观分析声光滤波器的角孔径以及滤波带通等参数,图4中给出了三维图的两个剖面。从中可以看出, $Y$ - $Z$ 平面表示的二维剖面反映了特定入射光极角的情况下,衍射光信号的光谱形状; $X$ - $Z$ 剖面反映出,对于特定的衍射光波长,随着入射光极角的变化,信号的衍射效率变化情况,也就是滤波器的角孔径。从衍射光的光谱形状可以看出,除主瓣外,旁瓣客观存在,并随着波长偏离衍

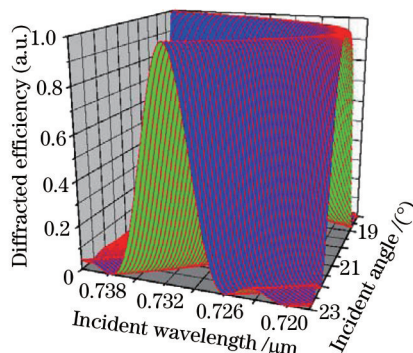


图4 图3的局部放大

Fig.4 Partial enlargement of fig.3

射光的中心波长呈现震荡衰减。另外,该结果还表明。超声极角确定的情况下,改变入射光的方向可以调节衍射光的中心波长,滤波器的角孔径也相应改变。在满足切线平行条件(大孔径角条件)的情况下,也就是图2在XY平面内的函数曲线在X轴的极值处时,角孔径最大。

确定超声极角为 $100^\circ$ ,计算了满足切线平行条件时的角孔径(介质内孔径角),并与实验的测量结果进行了比较,如图5所示。其中黑色实线表示理论计算获得角孔径。可以看出,角孔径的曲线成平顶的高斯型。平顶部分对应的衍射效率为100%,也就是说,在入射光的方向在一定的范围内变化时(图5中约 $1.5^\circ$ ),由双折射效应补偿了动量失配,保证了动量匹配得以满足。

角孔径的实验测量中,采用的方法是波长跟踪的光谱测量方式。具体说来,首先将准直的白光注入声光滤波器,然后调整滤波器的角度,利用光谱仪测量在不同入射光角度下滤波信号的光谱。利用获得的不同入射光角度下的大量信号光谱,研究某一波长的衍射效率随入射角的变化情况,也就是角孔径。图5中红色实心圆点给出了实验测量得到的最大的角孔径,也就是所谓的大孔径角,对应的波长为 $732.4\text{ nm}$ 。可以看出实验的测量结果和理论的计算结果符合的较好。

在计算角孔径的同时,也获得了满足切线平行条件时的衍射光线宽情况,如图6中红色实线所示。在主瓣的两侧几乎对称的出现次峰,也就是常说的衍射光的旁瓣。在满足切线平行条件的情况下,衍射光的主瓣宽度(线宽)最窄,这一点可以由图3和图4的结果分析而得。也就是说,在满足切线平行条件的时候,滤波器的滤波效果好,同时保证了较好的集光能力。图6中蓝色虚线为实验的测量结果,测量光谱采用的是光纤光栅光谱仪,将衍射光注入光谱仪的光纤探头即可测量其光谱。比较实验和理论的计算结果可以看出,在滤波信号的主瓣与理论计算符合的较好。但是实验中获得信号光谱的旁瓣更为明显,产生这种现象的原因主要是前端光学系统以及压电换能器的设计不够完善<sup>[17]</sup>。如果进一步改进相关设计将进一步抑制信号的旁瓣现象,或者采取比如二次滤波等方法也可相应压缩信号的旁瓣<sup>[12]</sup>。

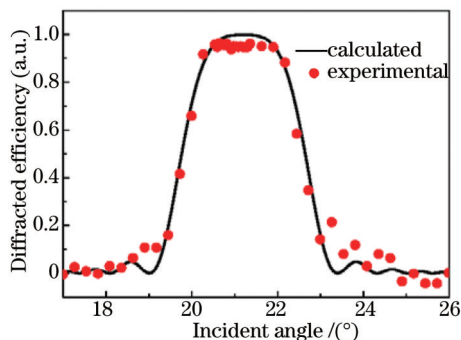


图5 满足切线平行条件(大孔径角条件)下角孔径的理论计算与实验测量结果

Fig.5 Calculated and the experimental measured aperture meeting the parallel-tangent momentum matching condition

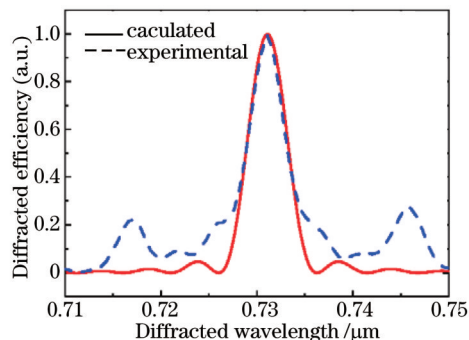


图6 满足切线平行条件(大孔径角条件)下衍射光光谱的计算结果与实验测量结果的比较

Fig.6 Calculated and experimental measured spectrum of the diffracted light meeting the parallel-tangent momentum matching condition

## 4 结 论

从声光相互作用的基本理论出发,获得了声光作用中动量失配量的一般表达式,利用该表达式分析了动量失配对声光滤波器衍射效率的影响。重点研究了声光滤波器的两个关键参数,即角孔径以及衍射光线宽。研究表明,声光滤波器的调谐关系随入射角度的变化而变,在确定入射角度的情况下,衍射光波长和超声波频率一一对应。另外,随着入射角度的变化,衍射光的波长发生变化的同时,其线宽以及角孔径发生明显变化。通过调整入射光的角度可以相应改变衍射光的线宽,实现窄带的声光滤波,提高声光滤波器的光谱分辨本领。也可以调整入射光的角度获得较大的角孔径,提高滤波器的集光能力。实验的结果与理论的计算也有较好的符合,证明了设计理论的正确性。直观地给出了动量失配对滤波器性能的影响,也清楚地表明滤波器设计中要综合考虑多方面的因素,这样才能获得最佳的效果。对高性能声光滤波

器的设计提供有意义的借鉴和参考,并推动声光滤波技术更广泛应用。

## 参 考 文 献

- 1 K Liu, X Guo, H Yi, *et al.*. Off-beam quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. *Opt Lett*, 2002, 34(10): 1594–1596.
- 2 D Weidmann, W J Reburn, K M Smith. Ground-based prototype quantum cascade laser heterodyne radiometer for atmospheric studies[J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, 78 (7): 073107.
- 3 Li Jinming, Ma Youchun, Yan Shubin, *et al.*. High precision and wide scale fiber Bragg grating sensor interrogation system based on tunable filtering[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.
- 4 Kang Zexin, Liu Chao, Sun Jiang, *et al.*. Investigation on the cladding etched single-mode fiber acousto-optic tunable filter and its axial strain characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1206003  
康泽新, 刘超, 孙将, 等. 基于包层腐蚀的单模光纤型声光滤波器及其轴向应力特性的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1206003.
- 5 N Uchida. Optical properties of single crystal paratellurite ( $\text{TeO}_2$ )[J]. *Phys Rev B*, 1971, 4(10): 3736–3745.
- 6 I C Chang. Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture[J]. *Appl Phys Lett*, 1974, 25(7): 370–372.
- 7 T Yano, A Watanabe. Acousto-optic  $\text{TeO}_2$  tunable filter using far off axis anisotropic Bragg diffraction[J]. *App Opt*, 1976, 15(9): 2250–2258.
- 8 P A Gass, J R Sambles. Accurate design of noncollinear acousto-optic tunable filter[J]. *Opt Lett*, 1991, 16(6): 429–431.
- 9 V B Voloshinov, K B Yushkov, B B Linde. Improvement in performance of a  $\text{TeO}_2$  acousto-optic imaging spectrometer[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2007, 9 (4): 341–347.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Zhang Chunguang, Wang Hao, Qiu Yishen. Selection of design theory for near infrared noncollinear 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.
- 14 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.
- 15 H Herrmann, Member, K Schafer, *et al.*. Low-loss tunable integrated acoustooptical wavelength filter in  $\text{LiNbO}_3$  with strong sidelobe suppression[J]. *IEEE Photon Techn Lett*, 1998, 10(1): 120–122.
- 16 Chunguang Zhang, Zhonghua Zhang, Hao Wang, *et al.*. Development of double-filtering imaging acousto-optic tunable filter with increased spectral resolution[J]. *Opt Express*, 2008, 33(18): 2020–2022.
- 17 D Voelz, B Kodali, Characterization of an acousto-optic tunable filter imaging system[C]. *SPIE*, 2006, 6302: 63020P.

栏目编辑: 韩峰