

近红外非共线声光可调谐滤波器设计 理论的选取方法

张春光 王 号 邱怡申

(福建师范大学物理与光电信息科技学院, 医学光电科学与技术教育部重点实验室,
福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要 根据对二氧化碲声光材料特性的不同考虑, 存在几种不同的非共线声光可调谐滤波器(AOTF)设计理论。分析和比较了 3 种常用的非共线声光作用关系, 研究结果表明, 在近红外波段, P. A. Gass 非共线声光作用关系能较准确地反映 AOTF 各参数之间的关系。选取 P. A. Gass 理论作为设计基础, 针对 0.8~2.0 μm 非共线 AOTF, 阐述了入射光极角选择、色散补偿以及几何参数选择等优化设计方法; 给出了 0.8~2.0 μm 非共线 AOTF 的设计参数, 理论计算各项性能指标保持在较好水平, 表明了 P. A. Gass 理论对该波段 AOTF 设计的适用性。对于推进近红外非共线 AOTF 的广泛应用具有指导意义。

关键词 光学器件; 可调谐滤波器; 数值分析; 非共线; 声光材料

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0916001

Selection of Design Theory for Near Infrared Noncollinear Acousto-Optic Tunable Filter

Zhang Chunguang Wang Hao Qiu Yishen

(Key Laboratory of Opto-Electronic Science and Technology for Medicine, Ministry of Education,
Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, School of Physics and Opto-Electronics
Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract For the different consideration of the TeO_2 acousto-optic material, there are several theories of the noncollinear acousto-optic tunable filter (AOTF) design. Three relationships of noncollinear acousto-optic interaction are analyzed in this paper. The results indicate that the P. A. Gass' theory can describe the relationship of AOTF parameters, and the correlative equations are simple. On the basis of P. A. Gass' theory, the optimization design method of the incident polar angle, the dispersion elimination and the geometry parameters are discussed. The theoretic index of the designed 0.8~2.0 μm noncollinear AOTF are better, indicating the applicability of P. A. Gass' theory. The study is meaningful for pushing the widely applications of noncollinear AOTF.

Key words optical devices; tunable filter; numerical analysis; noncollinear; acousto-optic material

OCIS codes 220.4830; 230.7408; 050.1940

1 引 言

声光可调谐滤波器(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。AOTF 的主要优点有体积小、全固态结构、调谐范围宽、调谐灵活快速等。这些特点使得 AOTF 在激光调谐、光谱分析以及光谱成像等领域中得到广泛应用, 而且发展空间广阔^[1~21]。特别

是具有优良声光特性的二氧化碲(TeO_2)晶体用于 AOTF 制作, 对 AOTF 的发展起到了显著的推动作用。基于 TeO_2 材料的非共线 AOTF, 除具有传统 AOTF 的优点以外, 由于采用入射光和衍射光不共线的工作方式, 给 AOTF 设计和使用带来了很大方便。研究者迄今已总结出许多有关非共线 AOTF 的设计理论, 对非共线 AOTF 的设计和应用起着指

收稿日期: 2011-04-19; 收到修改稿日期: 2011-05-11

基金项目: 福建省自然科学基金(2010J05131, 2010J05129)资助课题。

作者简介: 张春光(1980—), 女, 博士, 讲师, 主要从事声光器件设计及应用方面的研究。E-mail: cgzhang@fjnu.edu.cn

导作用。然而,对于这些设计理论的特点和适用领域仍缺乏系统的讨论,在如何根据实际情况来选择最适宜的非共线 AOTF 设计理论方面,还需进行深入的研究。近红外区常携带着有关被测目标的诸多有用信息,是光谱检测和光谱成像应用中多为使用的波段之一^[7~10]。研究近红外光谱探测元件的设计方法具有理论价值和现实意义。本文以近红外波段 TeO₂ 非共线 AOTF 为研究对象,分析了常用的 3 种非共线 AOTF 设计理论,比较了 3 种理论的非共线声光作用关系,明确了近红外 TeO₂ 非共线 AOTF 设计理论的选择方法。以声光作用理论为基础,对近红外波段(0.8~2.0 μm) TeO₂ 非共线 AOTF 的设计方法和关键设计环节展开讨论,并给出了非共线 AOTF 的具体设计参数。

2 声光作用关系及其选取规律

TeO₂ 晶体是一种具有优良声光性能的声光材料,它属于左旋单轴正晶体,透明区在 0.35~5 μm。值得一提的是,TeO₂ 晶体沿[110]方向传播的剪切声波具有非常低的声速(616 m/s),并且声光优值很大,因而衍射效率很高;这些特性反映了 TeO₂ 晶体制作 AOTF 的优势和适用性。不过,TeO₂ 材料自身性质决定其不适合工作在共线模式。1974 年 I. C. Chang^[13]提出了基于动量匹配切线平行关系的 TeO₂ 非共线 AOTF 设计思想。后来,研究者从不同角度考虑 TeO₂ 材料的特性,提出了其他的非共线声光作用关系理论^[14~16]。这里,对非共线 AOTF 设计常用的几种声光作用关系进行比较,以近红外非共线 AOTF 设计为例,讨论适宜非共线声光作用关系的选取方法。

2.1 I. C. Chang 的非共线声光作用关系

图 1 表示 I. C. Chang 提出的非共线声光作用矢量布局。在此设计中,声光作用平面为[110]面;不计 TeO₂ 晶体的旋光性,TeO₂ 被认为是单轴正晶体,声光作用平面内传播的光波存在反常 e 光和寻常 o 光两种本征模式。e 光和 o 光的波面分别为在光轴方向相切的椭圆和圆。入射光波矢 k_i 、衍射光波矢 k_d 和声波矢 K_a 之间满足动量匹配条件 $k_i + K_a = k_d$ 。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。动量匹配切线平行条件,保证了折射率随着双折射角度的变化能够补偿因角度变化引起的动量失配,从而构成了大孔径非共线 AOTF 设计的理论基础。

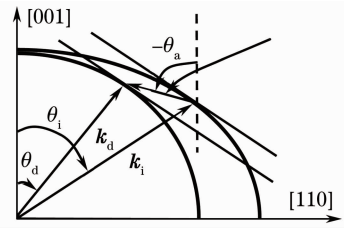


图 1 非共线声光相互作用矢量布局(不计 TeO₂ 晶体的旋光性)

Fig. 1 Wave vector diagram of the noncollinear acousto-optic interaction without considering the rotatory property of TeO₂ crystal

设入射光为 e 光,衍射光为 o 光。TeO₂ 晶体内的入射光折射率 n_i 和衍射光折射率 n_d 分别为

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

$$n_d = n_o, \quad (2)$$

式中 θ_i 为入射光极角,表示入射光方向与光轴的夹角。 n_o 和 n_e 分别为垂直于光轴方向上的 o 光和 e 光折射率,它们都是光波长 λ_0 的函数^[17]:

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

$$n_e^2 = 1 + \frac{2.8525\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.1342^2} + \frac{1.5141\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.2631^2}. \quad (3)$$

由动量匹配切线平行条件可知:

$$\tan(-\theta_a) = \frac{n_i \sin \theta_i - n_d \sin \theta_d}{n_i \cos \theta_i - n_d \cos \theta_d}, \quad (4)$$

$$\tan \theta_d = (n_o/n_e)^2 \tan \theta_i, \quad (5)$$

式中 θ_d 为衍射光极角, θ_a 为超声波极角。

在 I. C. Chang 的设计中,对入射光折射率采用了一级近似,引入 $\delta = (n_e - n_o)/n_e$,并忽略 δ^2 以上项。从而有:

$$n_i \approx n_o(1 + \delta \sin^2 \theta_i), \quad (6)$$

将(2)、(5)和(6)式代入(4)式中,得

$$\tan(-\theta_a) = -(2 + \tan^2 \theta_i)/\tan \theta_i. \quad (7)$$

从(7)式看出,入射光极角只与超声极角这一因素有关。(7)式可以用来确定在固定超声波方向情况下的入射光方向,进而决定 AOTF 的晶体角度方面参数。

利用三角形余弦定理,能够得到非共线 AOTF 的频率调谐关系的一般表达式

$$f_a = (V_a/\lambda_0)[n_i^2 + n_d^2 - 2n_i n_d \cos(\theta_i - \theta_d)]^{1/2}, \quad (8)$$

式中 V_a 为超声波的声速。(8)式表明,超声频率 f_a 与衍射光波长存在着对应关系,调谐超声频率即可达到滤波的目的。I. C. Chang 的理论形式简单,

对 AOTF 的发展起到了显著的推动作用。

2.2 P. A. Gass 的非共线声光作用关系

P. A. Gass^[14]关于非共线声光作用关系的理论于 1991 年提出。该理论认为, I. C. Chang 的设计公式由于对折射率取了一级近似, 设计公式在相

对简化的同时引入了显著误差, 影响了非共线 AOTF 的设计精度和性能。P. A. Gass 的修正理论中, 采用入射光折射率的一般表达(1)式代替折射率的一级近似(6)式。相应地, 超声极角 θ_a 与入射光极角 θ_i 的关系为

$$\tan(-\theta_a) = -\frac{(n_e/n_o) + \{(n_e/n_o)^2 + [(n_e/n_o)^2 + 1](n_o/n_e)^2 \tan^2 \theta_i + (n_o/n_e)^4 \tan^4 \theta_i\}^{1/2}}{(n_o/n_e) \tan \theta_i} \quad (9)$$

从(9)式看出, 超声极角 θ_a 与入射光极角 θ_i 以及光波长 λ_0 两个因素有关。相比之下, (9)式虽然比(7)式更加复杂, 实践证明其在保障 AOTF 设计精度方面具有很大优势。

2.3 改进型非共线声光作用关系

事实上, TeO_2 晶体具有一定的旋光性。在 I. C. Chang 和 P. A. Gass 的设计理论中, 均出于设计简化的考虑, 没有计及 TeO_2 晶体的旋光性, 这对非共线 AOTF 设计精度存在一定的影响^[13,14]。在前期研究中, 考虑声光晶体旋光性对非共线声光作用关系的影响, 得到超声极角 θ_a 与入射光极角 θ_i 的关系为^[15]

$$\tan(-\theta_a) = \frac{\tan \theta_i \{ [n_o^4 n_e^2 (1 + \sigma)^6 \tan^2 \theta_i + n_e^6 (1 - \sigma^2)^2]^{1/2} - [n_o^4 (1 + \sigma)^6 \tan^2 \theta_i + n_o^4 n_e^2 (1 + \sigma)^4]^{1/2} \}}{[n_o^4 n_e^2 (1 + \sigma)^6 \tan^2 \theta_i + n_e^6 (1 - \sigma^2)^2]^{1/2} - [n_o^2 n_e^4 (1 - \sigma)^4 (1 + \sigma)^2 \tan^2 \theta_i + n_e^6 (1 - \sigma)^4]^{1/2}}, \quad (10)$$

式中, 旋光系数 σ 与晶体旋光率 ρ 以及光波长 λ_0 有关, $\sigma = \lambda_0 \rho / (2\pi n_o)$, σ 反映了声光晶体的旋光性质。(10)式全面地考虑了 TeO_2 声光晶体的相关材料特性的影响(既体现了双折射特性的影响, 又体现了旋光特性的作用), 能够精确地反映非共线声光作用关系; 缺点是(10)式的形式复杂, 使非共线 AOTF 设计的计算量偏大。

2.4 非共线声光作用关系的选取方法

以上介绍的 3 种用于非共线 AOTF 设计的非共线声光作用关系, 它们在形式上繁简有别, 考虑因素各不相同。如何结合实际需要来选取最适宜的非共线声光作用关系作为设计的理论基础, 在非共线 AOTF 设计中非常重要。下面以近红外波段非共线 AOTF 为例, 分析非共线声光作用关系的选取方法。

分析超声极角 θ_a 与入射光极角 θ_i 的关系式, (7)式是与光波长 λ_0 无关的; 而(9)、(10)式均与光波长 λ_0 有关。图 2 给出了 0.8~2.0 μm 波段内入射光极角值 θ_i 随光波长 λ_0 的变化情况(固定超声方向为 82°)。从图 2 看出, 按照 I. C. Chang 的设计理论, 固定超声方向下的入射光极角 θ_i 是不随光波长变化的量; 对于 P. A. Gass 理论和本小组的改进理论, 在固定的超声方向下, 入射光极角 θ_i 是随着光波长变化的。此外, 在图 2 中, 对于任意确定的光波长, (9)、(10)式得到的入射光极角值均明显大于(7)式计算值, 这说明在所研究波段内(7)式由于采用双折射近似而引入了显著的设计误差, 因而(7)式

不适用于该波段(0.8~2.0 μm)非共线 AOTF 的设计。通过比较发现, 在 0.8~2.0 μm 波段, (9)、(10)式的关系曲线差别较小(在 0.8~2.0 μm , 入射光极角 θ_i 的差值平均在 0.37°), 这说明声光晶体旋光特性的作用在本研究波段内不是非常明显; (9)式可以保证较高的非共线 AOTF 设计精度。同时, 考虑(9)式的形式相对简单, 便于设计简化, 因而 0.8~2.0 μm 波段非共线 AOTF 的设计宜选定(9)式作为设计基础。

通过以上分析认为, 应当充分考虑声光材料特性对非共线声光作用关系影响情况以及实际应用具体需要(工作波段、公式繁简以及设计精度要求)来选取适合的非共线 AOTF 设计理论。

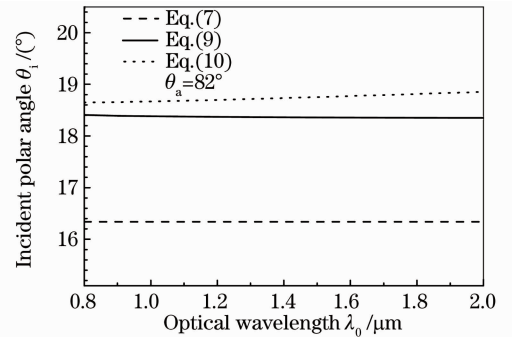


图 2 0.8~2.0 μm 波段内在固定的超声方向下入射光极角随光波长的变化关系

Fig. 2 Relationship between the incident polar angle and the optical wavelength at a fixed acoustic direction in 0.8~2.0 μm

3 非共线 AOTF 的优化设计方法

下面,以 P. A. Gass 非共线声光作用理论为基础,阐述 0.8~2.0 μm 波段非共线 AOTF 设计的关键环节。

3.1 入射光极角的选取

最佳入射光极角的选取是非共线 AOTF 设计中的一个重要环节,是确定声光晶体相关角度参数的基础。

由于入射光极角随着光波长变化而变化,取 0.8~2.0 μm 波段的中心波长(1.4 μm)作为非共线 AOTF 设计的波长基准;根据 1.4 μm 处超声极角与入射光极角的关系,并考虑影响入射光极角值选取的因素,确定入射光极角值。

入射光极角值过大或过小均会影响非共线 AOTF 的综合性能。前期研究发现,入射光极角的选取会受到声光优值、超声频率、光谱分辨特性、空间分辨特性以及工作波段等因素的影响^[16]。经过分析以上因素,确定 0.8~2.0 μm 波段的入射光极角值为 18.43°,此情况下非共线 AOTF 的理论性能良好:由 P. A. Gass 理论计算得,声光优值平均处在 $815.37 \times 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}$ 的较高水平;超声频率 26.74~69.84 MHz;光谱分辨率在 2.23~15.89 nm(声光作用距离 L 取 15 mm),达到一般应用需要;衍射角展宽平均在 0.46°,体现出 AOTF 的较好空间分辨能力。图 3 给出了在 1.4 μm 处由 P. A. Gass 理论[(9)式]得到的超声极角 θ_a 与入射光极角 θ_i 的关系。图 3 中,对应入射光极角值为 18.43°,超声极角值为 82°。

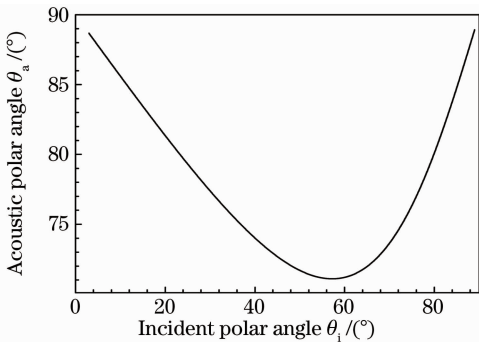


图 3 在光波长 1.4 μm 处,超声极角与入射光极角的关系[根据(9)式计算]

Fig. 3 At the optical wavelength of 1.4 μm, the acoustic polar angle versus the incident polar angle by Eq. (9)

3.2 色散补偿方法

分析(5)式可知,衍射光极角 θ_d 是入射光极角 θ_i 和光波长 λ_0 的函数。因而,对于确定的入射光方向,晶体的色散将导致衍射光方向随着入射光波长

的变化而变化。在非共线 AOTF 工作时,伴随着通过超声频率调谐实现光波长扫描的过程,衍射光方向将在一定范围内发生漂移;同时,由于声光晶体内外折射率的差异,衍射光方向的漂移现象还会在出射面处被进一步放大。

对于非共线 AOTF 的入射面与出射面互相平行的情况,介质外衍射角 β 满足 $\sin \beta = n_d \sin(\theta_i - \theta_d)$ 。衍射光折射率 n_d 和介质内衍射角 θ_d 均为光波长 λ_0 的函数,体现了介质外衍射角 β 明显漂移的原因。计算得,对于入射光极角为 18.43°,在 0.8~2.0 μm 范围内衍射光漂移达到 0.21°。这样大的衍射光漂移会显著降低输出信号的稳定性,必须尽力加以消除。

这里利用光楔来消除衍射光漂移。光楔法的思路是:令声光晶体的入射面与出射面呈一定角度 θ_ϕ (计为光楔角),此时介质外衍射角 β 满足 $\sin \beta = n_d \sin(\theta_i - \theta_d - \theta_\phi)$ 。分析此式,当入射光极角值 θ_i 确定时,衍射光极角 θ_d 和衍射光折射率 n_d 都是光波长的函数,因而恰当地选取光楔角能够达到最大限度减小衍射光漂移的目的。图 4 给出了在一系列光楔角值下的衍射光漂移情况。从图 4 看出,随着光楔角的增大,介质外衍射光漂移先逐渐减小,然后达到最小值,接着逐渐增大。在 0.8~2.0 μm 范围内,当光楔角取 5.0°时,衍射光漂移最小。

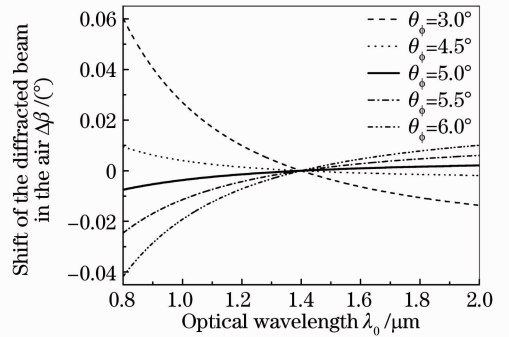


图 4 一系列确定的光楔角下介质外衍射光随波长变化的漂移情况

Fig. 4 Shift of the diffracted beam in air with optical wavelength at a series of fixed optical wedge angles

4 非共线 AOTF 几何参数的确定

对于声光晶体的几何形状参数(即各顶角角度),可以根据已经确定的入射光极角值、超声极角值、光楔角值以及声光晶体的材料学特性(光轴取向等信息)等共同决定。声光晶体的几何尺寸应根据 AOTF 实际应用领域的需要和压电换能器晶体尺

寸来确定。比如,在光谱成像领域,要求 AOTF 具有较大的光通量,可在允许范围内将声光晶体尺寸设计得稍大些;压电换能器的长度 l 可计算为

$$l = L \cos^2(\Delta - \theta_0) / \cos^2 \Delta, \quad (11)$$

式中 L 为声光相互作用距离, Δ 为超声能流方向与超声波矢方向的夹角, θ_0 为入射面与超声波矢的夹角。另外,为防止超声波在介质内来回反射传播,在压电换能器所在表面的对表面上需要粘贴声吸收体,而声吸收体处在超声波能量传播方向。由于声光晶体的各向异性,超声能流方向与超声波矢方向不同。在 TeO_2 晶体声速椭圆上,超声能流方向沿着 $1/V_a$ 曲面的法线方向;经计算得,超声能流角为 58.60° 。考虑光谱分辨率等因素,取 $L = 15 \text{ mm}$, 超声极角为 82° , 算得换能器的长度 $l = 21.74 \text{ mm}$ 。图 5 给出了 $0.8 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 非共线 AOTF 的设计图,并标示出了相关的角度参数。

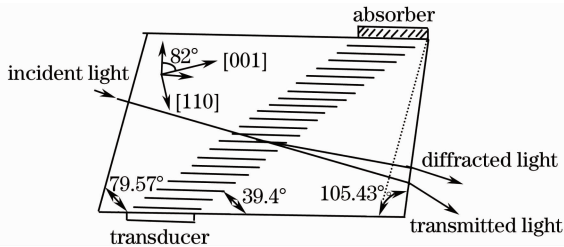


图 5 $0.8 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 近红外非共线 AOTF 的设计图

Fig. 5 Design picture of the noncollinear AOTF at $0.8 \sim 2.0 \mu\text{m}$

5 结 论

通过比较和分析几种常用的非共线声光作用关系的异同,表明在所研究波段内应当充分考虑声光晶体的材料特性和应用需要来决定非共线声光作用关系的选取。研究发现,在 $0.8 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的近红外波段, P. A. Gass 非共线声光作用关系更适合作为该波段非共线 AOTF 设计的理论基础。非共线声光作用理论选取方法研究,能够为高精度、高性能非共线 AOTF 的设计提供有力的理论保障。基于 P. A. Gass 理论,研究了包括入射光极角选取、色散补偿设计以及几何参数确定等关键环节的 $0.8 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 非共线 AOTF 优化设计方法,为近红外非共线 AOTF 的设计提供现实的技术支持。理论计算获得的近红外非共线 AOTF 各项性能指标良好:入射光极角选择为 18.43° , 超声极角为 82° , 光谱分辨率 $2.23 \sim 15.89 \text{ nm}$, 超声频率范围 $26.74 \sim 69.84 \text{ MHz}$ 。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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 and Appl. Opt.*, 2007, **9**(4): 341~347
- 3 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
- 4 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
- 5 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
- 6 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
- 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 He Zhihui, Lian Wenliu, Wu Mingjian *et al.*. Analysis of tobacco constituents by acousto-optic tunable filter near infrared spectroscopy [J]. *Chinese J. Analytical Chemistry*, 2006, **34**(5): 702~704
何智慧, 练文柳, 吴名剑等. 声光可调-近红外光谱技术分析烟草主要化学成分 [J]. *分析化学*, 2006, **34**(5): 702~704
- 9 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
- 10 Wang Ning, Sun Dai, Dong Haiping. Quick identification of shuanghuanglian oral liquid and yinhuang oral liquid by AOTF-near infrared spectroscopy principal component analysis [J]. *China Pharmacy*, 2009, **20**(30): 2355~2357
王 宁, 孙 岱, 董海平. 声光可调滤波器-近红外主成分分析法快速鉴别银黄口服液和双黄连口服液 [J]. *中国药房*, 2009, **20**(30): 2355~2357
- 11 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
- 12 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

- 13 I. C. Chang. Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**(7): 370~372
- 14 P. A. Gass, J. R. Sambles. Accurate design of noncollinear acousto-optic tunable filter [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6): 429~431
- 15 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
- 16 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
- 17 N. Uchida. Optical properties of single-crystal paratellurite (TeO_2)[J]. *Phys. Rev. B*, 1971, **4**(10): 3736~3745
- 18 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
- 19 I. C. Chang. Analysis of the noncollinear acousto-optic filter[J]. *Electron. Lett.*, 1975, **11**(25): 617~618
- 20 I. C. Chang, P. Katzka. Enhancement of acousto-optic filter resolution using birefringence dispersion in CdS[J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(11): 535~536
- 21 Ye Yuan, Ji-Young Hwang, Mowleswaran Krishnamoorthy *et al.*. Highthroughput acousto-optic-tunable-filter-based time-resolved fluorescence spectrometer for optical biopsy[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 1132~1134