

材料特性对声光可调滤波器频率调谐关系的影响

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 声光可调滤波器(AOTF)是利用各向异性介质中声光作用原理工作的优良分光元件。通过介绍 AOTF 的工作原理,指出声光晶体中传播的超声波频率与衍射光波长之间一一对应的频率调谐关系;给出了不同情况下的频率调谐关系,并说明了二氧化碲声光材料的双折射特性和旋光特性等材料特性对频率调谐关系中的作用。讨论了光波长、入射光极角等参数对频率调谐关系产生综合影响的具体规律。

关键词 光电子学;可调谐滤波器;超声频率;声光材料

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.042602

Influence of Material Characteristics on Frequency Tuning Relationship of Acousto-Optic Tunable Filter

Zhang Chunguang Wang Hao* Qiu Yishen

(Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine, Ministry of Education, Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, School of Physics and Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract The acousto-optic tunable filter (AOTF) is a good prismatic element based on the acousto-optic interaction in anisotropic material. By introducing the working principle of AOTF, the frequency tuning relationship of the applied acoustic frequency in the crystal and the wavelength of the diffracted light is presented, the frequency tuning relationships under different conditions are given, and the function of the birefringence and rotatory property for the TeO₂ crystal on the frequency tuning relationship is explained. The regulation how the parameters such as the optical wavelength and the incident polar angle influence the tuning relationship is discussed.

Key words optoelectronics; tunable filter; acoustic frequency; acousto-optic material

OCIS codes 260.1440; 250.0250; 050.7330; 300.6550; 160.1050

1 引言

声光可调滤波器(AOTF)是一种利用各向异性介质中的反常布拉格衍射工作的分光元件,它在激光调谐、光谱分析以及光谱成像等众多领域中广泛应用^[1~6]。AOTF的主要结构包括声光晶体和键合在声光晶体上的压电换能器。压电换能器能把加载于它上面的电信号转换成同频超声波;当入射光波在晶体中传播的超声波作用下而发生布拉格衍射时,衍射光的波长与驱动电信号的频率一一对应。通过改变驱动电信号的频率即可改变衍射光的波长。超声频率与入射光波长之间的调谐关系,在 AOTF 的设计和使用中都显得十分重要。依据频率调谐关系,可以利用加载的超声频率信息来把握 AOTF 输出光信号的光谱学信息。因此,根据实际应用的具体情况,明确超声频率与入射光波长的调谐关系的具体表达形式以及调谐关系的影响因素,是很有研究必要的。二氧化碲(TeO₂)作为一种优良的声光材料,具有工作波长范围宽、声光优值高等一系列的优点,这为 TeO₂ 非共线 AOTF 广泛应用起到极大的推动作用。本文以 TeO₂ 非共线 AOTF 为研究对象,给出了频率调谐关系的具体表达形式,系统地讨论了声光材料的双折射特性和旋光特性对于频率调谐关系的综合影响。

收稿日期: 2010-08-21; 收到修改稿日期: 2010-11-03

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

作者简介: 张春光(1980—),女,博士,讲师,主要从事声光技术方面的研究。E-mail: cgzhang@fjnu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: haowang@fjnu.edu.cn

2 超声频率与入射光波长的调谐关系

以非共线声光作用关系为出发点,考虑 TeO₂ 声光材料的特性,给出了超声频率与入射光波长的调谐关系的表达形式,并分析和比较了前人的传统调谐公式。

2.1 超声频率与入射光波长调谐关系的导出

图 1 给出了 TeO₂ 非共线 AOTF 内的声光作用矢量布局。TeO₂ 声光材料不仅具有双折射特性,还具有旋光特性。声光作用平面为 [110] 面。如图 1(a) 对于一般的入射光方向,TeO₂ 晶体内存在着右旋椭圆偏振模式(右旋 e 光)和左旋椭圆偏振模式(左旋 o 光)两个本征振动模式。

入射光波矢 k_i , 衍射光波矢 k_d 和超声波矢 K_a 的大小分别满足关系式

$$k_i = 2\pi n_i / \lambda_0, \quad k_d = 2\pi n_d / \lambda_0, \quad K_a = 2\pi f_a / V_a, \quad (1)$$

式中 λ_0 为真空中的光波长, n_i 和 n_d 分别为晶体内的入射光折射率和衍射光折射率, f_a 和 V_a 分别为超声波频率和声速。声速由 $V_a(\theta_a) = (V_{ss}^2 \sin^2 \theta_a + V_{ts}^2 \cos^2 \theta_a)^{1/2}$ 来计算, V_{ss} 为 617 m/s, V_{ts} 为 2104 m/s^[7]。 θ_a 为超声极角, 是超声方向与光轴的夹角。 k_i , k_d 和 K_a 之间满足三角形闭合条件: $k_i + K_a = k_d$ 。对于选定的超声波矢 K_a , 对应的入射光波矢 k_i 和衍射光波矢 k_d 要求满足动量匹配切线平行条件, 即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。

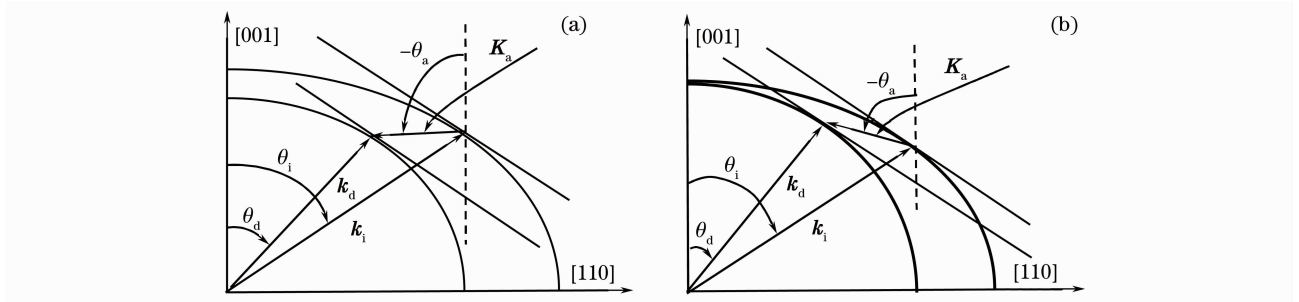


图 1 非共线声光作用的矢量布局。(a) 考虑了 TeO₂ 旋光特性的情况, (b) 不计 TeO₂ 旋光特性的情况

Fig. 1 Wave vector diagram of noncollinear AOTF. (a) considering rotatory property of TeO₂,

(b) without considering rotatory property of TeO₂

设入射光为右旋 e 光, 衍射光为左旋 o 光。入射光折射率 n_i 和衍射光折射率 n_d 分别满足

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

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

式中 θ_i 为入射光极角, 表示入射光方向与光轴的夹角。 n_i 和 n_d 均与方向有关, 体现了声光晶体的双折射特性。 σ 是与晶体旋光率 ρ 以及光波长 λ_0 有关的量, 反映了声光晶体的旋光特性^[8]。 n_o 和 n_e 分别表示垂直于光轴方向上的 o 光和 e 光的折射率, 都是光波长的函数, 由塞耳迈耶尔方程描述。

由动量匹配条件和切线平行条件, 可得

$$\tan(-\theta_a) = \frac{n_i \sin \theta_i - n_d \sin \theta_d}{n_i \cos \theta_i - n_d \cos \theta_d}, \quad (3)$$

$$\tan \theta_d = \left(\frac{n_o}{n_e} \right)^2 \frac{(1 + \sigma)^2}{(1 - \sigma)^2} \tan \theta_i, \quad (4)$$

式中 θ_d 为衍射光极角。由图 1(a) 所示几何关系和切线平行动量匹配关系, 对于非共线 AOTF, 非共线声光作用关系为

$$\tan(-\theta_a) = \frac{\tan \theta_i \{ [n_o^4 n_e^2 (1 + \sigma)^6 \tan^2 \theta_i + n_e^6 (1 - \sigma^2)^2]^{1/2} - [n_o^4 (1 + \sigma)^6 \tan^2 \theta_i + n_o^4 n_e^2 (1 + \sigma)^4]^{1/2} \}}{[n_o^4 n_e^2 (1 + \sigma)^6 \tan^2 \theta_i + n_e^6 (1 - \sigma^2)^2]^{1/2} - [n_o^4 n_e^2 (1 - \sigma)^4 (1 + \sigma)^2 \tan^2 \theta_i + n_e^6 (1 - \sigma)^4]^{1/2}}. \quad (5)$$

可以用(5)式来判断确定的超声方向下的入射光方向。

由 k_i , k_d 和 K_a 三角形闭合条件以及余弦定理, 可得

$$K_a^2 = k_i^2 + k_d^2 - 2k_i k_d \cos(\theta_i - \theta_d). \quad (6)$$

把(1)式代入(6)式,即可得到超声频率调谐关系式

$$f_a = (V_a/\lambda_0)[n_i^2 + n_d^2 - 2n_i n_d \cos(\theta_i - \theta_d)]^{1/2}. \quad (7)$$

(7)式说明,根据非共线声光作用理论,对于设计完成的 AOTF,超声频率 f_a 与入射光波长 λ_0 之间存在一一对应的关系。调节超声频率 f_a ,即可改变入射光波长 λ_0 。

2.2 传统的超声频率与入射光波长调谐关系

对于 AOTF 的设计,前人为了设计的简化以及理解设计理论的方便,只考虑了 TeO_2 晶体的双折射特性,不计 TeO_2 晶体的旋光性。这导致传统的声光作用关系在表达形式上与本文给出的相关结果存在一定差别,这种差别也反应在超声频率调谐关系的表达形式上。

图 1(b)为 TeO_2 非共线 AOTF 内的声光作用矢量布局(不计声光晶体的旋光性的情形)。在声光作用面内光波存在 e 光和 o 光两种本征模式。e 光和 o 光的波面是在光轴方向相切的椭圆和圆。入射光波矢 \mathbf{k}_i , 衍射光波矢 \mathbf{k}_d 和声波矢 \mathbf{K}_a 仍满足三角形闭合条件和动量匹配切线平行条件。 $\mathbf{k}_i, \mathbf{k}_d$ 和 \mathbf{K}_a 的大小仍满足关系(1)式。

设入射光为 e 光,衍射光为 o 光,如图 1(b),入射光折射率 n_i 和衍射光折射率 n_d 的大小表示为

$$n_i = \left(\frac{\cos^2 \theta_i}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta_i}{n_e^2} \right)^{-1/2}. \quad (8)$$

$$n_d = n_o. \quad (9)$$

由切线平行条件,得到

$$\tan \theta_d = \left(\frac{n_o}{n_e} \right)^2 \tan \theta_i. \quad (10)$$

引入因子 $\delta = (n_e - n_o)/n_o$,忽略 δ^2 以上项,可给出 n_i 的一级近似式

$$n_i \approx n_o (1 + \delta \sin^2 \theta_i). \quad (11)$$

再利用动量匹配条件(3)式,得到超声极角 θ_a 与入射光极角 θ_i 的关系

$$\tan(-\theta_a) = -\frac{2 + \tan^2 \theta_i}{\tan \theta_i}. \quad (12)$$

由三角形余弦定理,并利用(9)和(11)式,得到超声频率 f_a 与衍射光波长 λ_0 的调谐关系

$$f_a = (V_a/\lambda_0)(n_e - n_o)(\sin^4 \theta_i + \sin^2 2\theta_i)^{1/2}. \quad (13)$$

(12)和(13)式所给出的声光作用关系,代表了 I. C. Chang^[9]于 1974 年提出的非共线 AOTF 设计理论。

此后,P. A. Gass 等^[10]于 1991 年在 I. C. Chang 的 AOTF 设计理论的基础上,为提高设计精度,给出了 Gass 设计理论。Gass 理论的改进是源于对入射折射率选用一般表达式[(8)式],代替一级近似式[(11)式]。相应地,超声极角 θ_a 与入射光极角 θ_i 的关系与超声频率调谐关系分别为

$$\tan(-\theta_a) = -\frac{2 + \tan^2 \theta_i + \delta(4 - \tan^2 \theta_i)}{\tan \theta_i}, \quad (14)$$

$$f_a = \left(\frac{V_a B_i}{\lambda_0} \right) \left\{ C_i + \left\{ C_i^2 + \left[\left(\frac{n_o}{n_e} \right)^2 - 1 \right] D_i \right\}^{1/2} \right\}, \quad (15)$$

式中 $B_i = \left(\frac{\cos^2 \theta_i}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta_i}{n_e^2} \right)^{-1/2}$, $C_i = -\cos(\theta_i - \theta_a)$, $D_i = \sin^2 \theta_i$ 。

3 材料特性对超声频率调谐关系的影响

以上共给出了 3 种不同形式的非共线 AOTF 超声频率调谐关系。分析 3 种超声频率调谐关系的推导过程,不难看出,3 种关系存在着差别是源于对声光材料的特性采取了不同的考虑(采用不同的入射光折射率 n_i 和衍射光折射率 n_d)。

3.1 入射光极角对超声频率的影响规律

对声光晶体的材料学特性采取了不同的考虑是使得 3 种超声频率调谐关系(7),(13)和(15)式表现出明显差异的主要原因。分析可知,入射光折射率 n_i 和衍射光折射率 n_d 是与光波长 λ_0 和入射光极角 θ_i 有关的;分析光波长 λ_0 和入射光极角 θ_i 两个因素对超声频率产生影响的具体规律,有益于对超声频率调谐关系的把握。

图2给出了在固定的光波长($0.6\ \mu\text{m}$)下,根据3种超声频率调谐关系(7)、(13)和(15)式得到的超声频率 f_a 与入射光极角 θ_i 关系曲线。如图2,在3种理论下,超声频率随入射光极角的变化趋势大体相同;随着入射光极角 θ_i 的增加,超声频率 f_a 先增大后减小,对应某一入射光极角 θ_i 处,超声频率 f_a 达到极值。超声频率极值的出现表明,为避免对超声频率值提出过高要求,在AOTF的设计中最好避开对应极值附近的入射光极角。同时可以看到,3条超声频率与入射光极角关系曲线在具体数值点上存在明显差别,这表明了在不同的设计精度要求下采取不同的频率调谐关系的必要性。

图3显示了分别利用3种频率调谐关系得到的,在一系列确定的入射光波长 λ_0 下,超声频率 f_a 与入射光极角 θ_i 的关系。分析得,3种理论下,对于每一个确定的 θ_i 值,超声频率 f_a 均随着入射光波长 λ_0 的增大而减小。

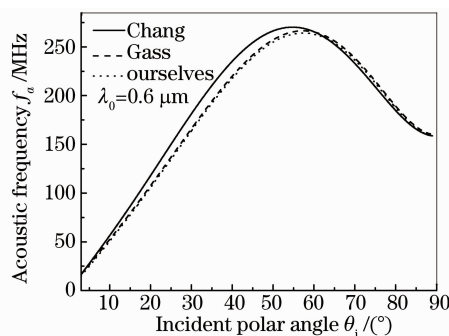


图2 对于固定光波长 λ_0 ,超声频率 f_a 与入射光极角 θ_i 的关系

Fig. 2 Acoustic frequency f_a versus the incident polar angle θ_i at fixed optical wavelength λ_0

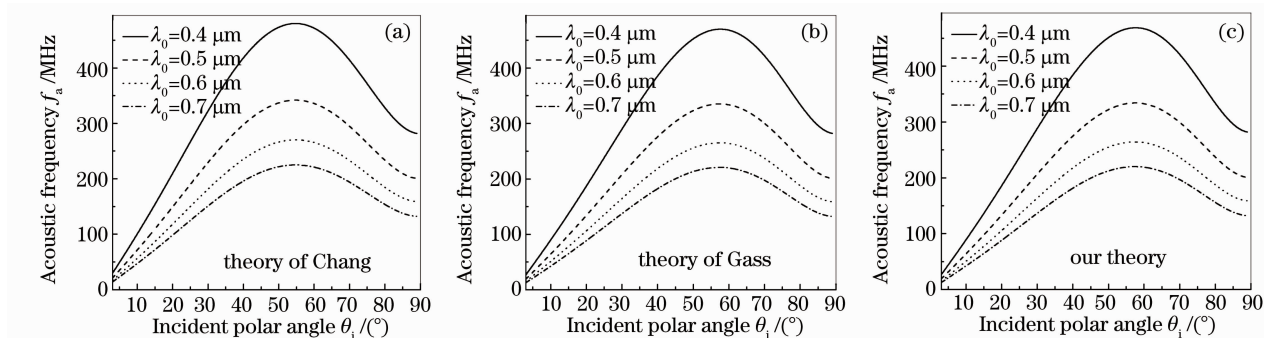


图3 在一系列确定的光波长 λ_0 下,3种理论给出的超声频率 f_a 与入射光极角 θ_i 的关系

Fig. 3 Acoustic frequency f_a versus the incident polar angle θ_i at a series of optical wavelength λ_0

3.2 入射光波长对超声频率的影响规律

图4给出了在固定的入射光极角下($\theta_i=20^\circ$ 和 $\theta_i=24^\circ$),超声频率 f_a 与光波长 λ_0 的调谐关系。比较和分析3种理论下的频率调谐关系曲线发现:一方面,3种理论下, $f_a-\lambda_0$ 关系曲线的变化趋势基本一致,超声频率 f_a 均随着光波长 λ_0 的增大而减小;另一方面,3种 $f_a-\lambda_0$ 曲线在具体数据值点上有着明显偏差,更进一步说明了在不同的设计精度要求下采取不同的频率调谐关系的必要性。

图5反映了在一系列确定的入射光极角 θ_i 下,利用调谐关系(15)式得到的超声频率 f_a 随入射光波长 λ_0 变化的规律。从图5看出,对应任意一个确定的光波长 λ_0 值,超声频率 f_a 随着入射光极角 θ_i 的增大而增大。

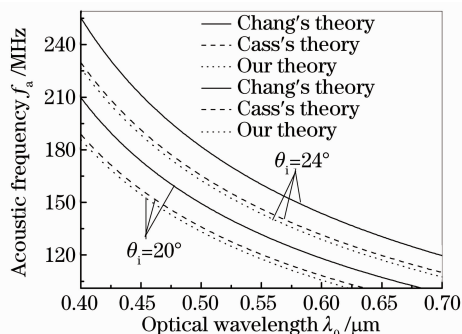


图4 在固定的入射光极角 θ_i 下,超声频率 f_a 与光波长 λ_0 的调谐关系

Fig. 4 Acoustic frequency f_a versus the optical wavelength λ_0 at a fixed incident polar angle θ_i

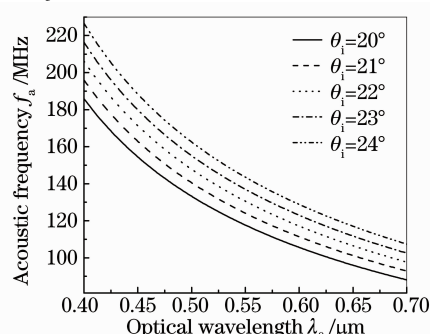


图5 在一系列入射光极角 θ_i 下,超声频率 f_a 与入射光波长 λ_0 的关系

Fig. 5 Acoustic frequency f_a versus the optical wavelength λ_0 at a series of incident polar angle θ_i

4 结 论

从非共线 AOTF 的基本工作原理出发,给出了综合考虑 TeO_2 声光材料自身的双折射和旋光特性情况下的超声频率调谐关系式;同时分析了前人在适当近似下得到的 2 种超声频率调谐关系理论。进一步地通过多个角度对比和分析 3 种频率调谐关系,讨论了声光晶体的材料特性对超声频率调谐关系的影响,得到了入射光极角和入射光波长对超声频率产生影响的具体规律。研究表明,在不同的精度要求下,应当结合声光材料自身特性和实际应用需要采用适当的超声频率关系。

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 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 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
- 5 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
- 6 K. B. Yushkov, Samuel Dupont, Jean-Claude Kastelik *et al.*. Polarization-independent imaging with an acousto-optic tandem system[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(9): 1416~1418
- 7 T. Yano, A. Watanabe. Acoustooptic TeO_2 tunable filter using far-off-axis anisotropic Bragg diffraction[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**: 2250~2258
- 8 N. Uchida. Optical properties of single-crystal paratellurite (TeO_2)[J]. *Phys. Rev. B.*, 1971, **4**(10): 3736~3745
- 9 I. C. Chang. Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**(7): 370~372
- 10 P. A. Gass, J. R. Sambles. Accurate design of noncollinear acousto-optic tunable filter[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6): 429~431