

TeO₂ 晶体中非同向声光相互作用的精确分析

任 谏 张明栋 丁兰英

(山东大学光学系, 济南 250100)

提 要

在分析了关于非同向声光可调谐滤光器的两种设计理论^[1,2]的基础上,得到了在严格满足切面平行动量匹配条件下,大角孔径可调谐 TeO₂ 滤光器的 $\theta_o-\theta_i$ 曲线. 所得的曲线明显地修正了 Chang^[2] 的 $\theta_o-\theta_i$ 曲线,对 TeO₂ 声光滤光器的正确设计提供了可靠的理论依据.

关键词 声光相互作用, 声光可调谐滤光器.

1 引 言

自从激光问世以来,各向异性介质中的声光互作用得到了人们极大地关注. 通过改变反常声光互作用的超声频率,从而改变衍射光波长,制成的声光可调谐滤光器 (Acousto-Optic Tunable Filter) 已广泛应用于光谱分析、光计算等方面. 最早报道的声光可调谐滤光器是采用入射光与衍射光基本在同一方向^[3]上的所谓同向声光互作用,尽管同向声光互作用声光可调谐滤光器具有较大的入射光角孔径和较高的光谱分辨率,但在利用四方晶系 TeO₂ 晶体的慢切变波时则无法实现这种同向声光互作用. 为此,Chang^[4] 提出了“切面平行动量匹配条件”,使得在非同向声光互作用时,仍能够保持大的入射光角孔径和高的光谱分辨率.

虽然,采用 TeO₂ 晶体的非同向互作用声光可调谐滤光器已进入了实用阶段,但以往对其进行分析时,忽略了偏振光在各向异性声光互作用介质中传播时的双折射问题,这使得在设计计算光的最佳入射角时造成一定的偏差,以致于降低声光可调谐滤光器的性能. 最近, Gass 等人^[1]指出了在非同向声光可调谐滤光器的设计中考虑双折射的问题. 本文在分析 Chang^[2] 和 Gass 的设计理论的基础上,考虑了非同向 TeO₂ 声光滤光器的设计问题,精确计算了超声波极角 θ_o 与入射光极角 θ_i 之间的关系,得到了声光可调谐滤光器的准确的调谐曲线. 这些结论对于提高声光可调谐滤光器性能,改进器件最佳入射角设计,提供了可靠的理论依据.

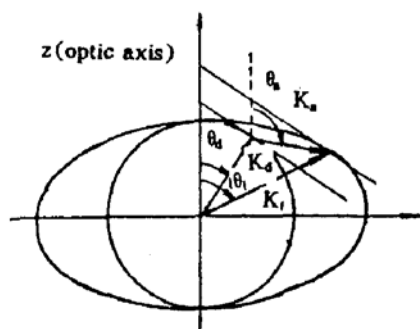


Fig. 1 Wavevector diagram for a non-collinear AOTF. Where K_i and K_o are the wave vectors for the incident and diffracted optical beams respectively, K_a is the acoustic wave vector

2 理论分析

图 1 示出 Chang 提出的非同向声光相互作用声光可调谐滤光器的波矢量布局图. 设入射光为 e 光, 则动量匹配条件为:

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{K}_d + \mathbf{K}_s \quad (1)$$

\mathbf{K}_i 、 \mathbf{K}_d 和 \mathbf{K}_s 分别为入射光、衍射光和超声波矢量, 其大小分别为:

$$K_i = 2\pi n_i/\lambda_0, \quad K_d = 2\pi n_d/\lambda_0, \quad K_s = 2\pi f_s/V_s \quad (2)$$

式中 n_i 、 n_d 分别为入射光和衍射光的折射率, λ_0 为真空波长, f_s 和 V_s 为超声频率和声速. 入射光的折射率

$$n_i = \left(\frac{\cos^2\theta_i}{n_o^2} + \frac{\sin^2\theta_i}{n_e^2} \right)^{-1/2} \quad (3)$$

式中 n_o 、 n_e 分别为单轴晶的两个主折射率; 同时, 衍射光的折射率

$$n_d = n_o \quad (4)$$

由 \mathbf{K}_i 曲面和 \mathbf{K}_d 曲面在 \mathbf{K}_i 矢量与 \mathbf{K}_d 矢量的端点处的切面互相平行, 可得动量匹配条件为:

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

式中 θ_d 和 θ_i 分别为衍射光与入射光的极角. 由(1)式和(3)式可得到超声波极角 θ_s 的方程

$$\tan\theta_s = \frac{n_i \sin\theta_i - n_o \sin\theta_d}{n_i \cos\theta_i - n_o \cos\theta_d} \quad (6)$$

同时要求超声频率

$$f_s = (V_s/\lambda_0) [n_i^2 + n_o^2 - 2n_i n_o \cos(\theta_d - \theta_i)]^{1/2} \quad (7)$$

此式即为非同向相互作用声光可调谐滤光器的调谐关系式.

依照 Chang 的设计理论, 忽略 $(\Delta n/n_o)^2$ 以上的项, 对(3)式进行一级近似, 得

$$\left. \begin{aligned} n_i &\approx n_o(1 + \delta \sin^2\theta_i) \\ \delta &= \Delta n/n_o, \quad \Delta n = |n_e - n_o| \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由此, 得到动量匹配的近似方程

$$\tan\theta_s = -(\tan^2\theta_i + 2)/\tan\theta_i \quad (9)$$

显然, 入射角 θ_i 仅与超声波极角 θ_s 有关, 而与介质的具体性质(折射率和 Δn 的数值)无关. 这实际上是忽略了双折射的高阶影响.

倘若考虑到偏振光在各向异性介质中传播时的双折射问题, 将(3)式, (5)式代入(6)式, 将得到超声极角的确切表达式

$$(\tan\theta_s)_e = - \left(\left(\frac{n_e}{n_o} \right) + \left\{ \left(\frac{n_e}{n_o} \right)^2 + \left[\left(\frac{n_e}{n_o} \right)^2 + 1 \right] \left(\frac{n_o}{n_e} \tan\theta_i \right)^2 + \left(\frac{n_o}{n_e} \tan\theta_i \right)^4 \right\}^{1/2} \right) / \left[\left(\frac{n_e}{n_o} \right) \tan\theta_i \right] \quad (10)$$

(10)式是满足切面平行动量匹配条件的表示超声极角 θ_s 与入射光极角 θ_i 的关系的精确的表达式. 由于 $\delta \sim 0.07$, 故 δ^2 以上的项可以忽略, 即用双折射一级近似后(10)式可以简化为

$$\tan\theta_s \approx - [2 + \tan^2\theta_i + \delta(4 - \tan^2\theta_i)] / \tan\theta_i \quad (11)$$

类似地, 当采取 o 光入射时, 亦可以得到满足切面平行动量匹配条件的超声极角的确切表达式

$$(\tan\theta_s)_o = - \left(\left(\frac{n_e}{n_o} \right) + \left\{ \left(\frac{n_e}{n_o} \right)^2 + \left[\left(\frac{n_e}{n_o} \right)^2 + 1 \right] \left(\frac{n_e}{n_o} \tan\theta_i \right)^2 + \left(\frac{n_e}{n_o} \tan\theta_i \right)^4 \right\}^{1/2} \right) / \left[\left(\frac{n_e}{n_o} \right) \tan\theta_i \right] \quad (12)$$

对其用双折射一级近似展开, 得

$$\tan\theta_s \approx - [2 + \tan^2\theta_i + \delta \tan^2\theta_i] / \tan\theta_i \quad (13)$$

在声光可调谐滤光器的具体设计中,由(11)式和(13)式可获得光入射角的准确的数值.

3 计 算

在可见光、近红外和中红外光谱区, TeO_2 晶体是制作非同向声光可调谐滤光器时优先选用的材料. 根据上面的理论分析, 对非同向 TeO_2 声光滤光器的超声波极角 θ_s 与入射光极角 θ_i 之间的关系进行了具体的计算.

设待选择波长为 632.8 nm, 此时, TeO_2 的折射率为 $n_o = 2.2597, n_e = 2.4119$. 根据(9)式和(11)式, 取一系列的 θ_s 的值计算出 θ_i 的值, 其关系表示在图 2 中. 虚线为(9)式表示的 θ_s 与 θ_i 的关系, 可见, 在 $\theta_i = 54.74^\circ$ 时, θ_s 取极大值. 实线为(11)式表示的 θ_s 与 θ_i 的关系, θ_s 的极大值取在 $\theta_i = 56.77^\circ$ 处. 对于每一 θ_s 的值, 一般都有两个 θ_i 的值, 分别大于和小于 56.77° , 在通常的实际应用中, 为了节省材料及加工上的便利, 都采用较小的 θ_i 值作为光的入射角.

由图 2 可见, 当入射光为 e 光时, 取 $\theta_s = 105^\circ$ (即 K_s 在 $(\bar{1}10)$ 面与 $[110]$ 方向夹角, 亦即离轴角为 15°) 时, 由图 2 虚线得到入射角 $\theta_i = 32.97^\circ$ 和 72.03° , 一般取 $\theta_i = 32.97^\circ$. 由实线得到入射角的精确数值为 $\theta_i = 36.79^\circ$ 和 72.92° , 一般取 $\theta_i = 36.79^\circ$, 可见, 精确值与近似值相差 $\sim 4^\circ$. 这一结果表明, 采用近似方法计算光入射角引入的误差为 $(4/36.79) \times 100\% \sim 10\%$. Gass 等人^[1]的实验结果曾指出, 当采用精确方法设计光入射角, 消除近似计算方法导致的约 10% 的误差时, 可使声光可调谐滤光器件的入射光角孔径增大将近 6 倍. 由此可见, 入射角取值的精确程度对入射光角孔径的影响还是比较大的, 在设计时, 光入射角取值的误差是不容忽略的. 只有将入射角取精确值, 光在 TeO_2 晶体中传播时方能严格满足动量匹配条件, 从而增大声光可调谐滤光器件的入射光角孔径, 使之具有良好的性能.

当入射光为 o 光时, 根据(9)式和(13)式, 作出 θ_s 与 θ_i 的关系曲线示于图 3 中, 虚线与实线分别为近似值与精确值, 其差异是不大的.

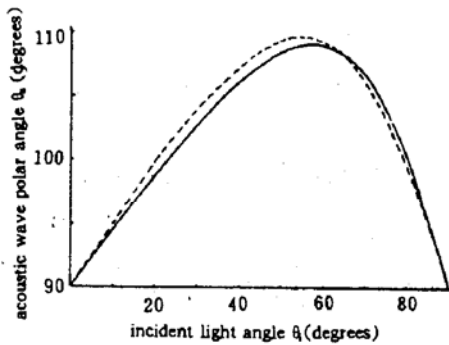


Fig. 2 Plot of incident light polar angle vs. acoustic polar angle (for an e -polarized incident beam)

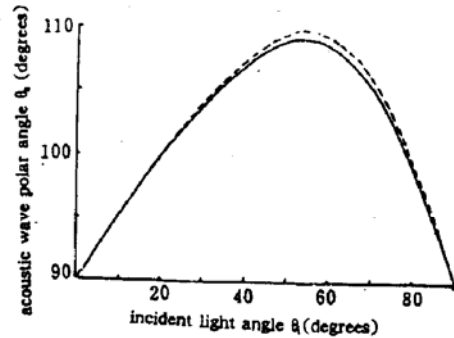


Fig. 3 Plot of incident light angle vs. acoustic polar angle (for an o -polarized incident beam)

器件工作时, 当待选择波长改变, 由于晶体的折射率色散, 将引起最佳入射角的变化. 例如, 取超声波极角为 $\theta_s = 105^\circ$, 当待选择波长为 404.7 nm 时, 光的最佳入射角为 $\theta_i = 37.24^\circ$; 而当待选择波长为 1000 nm 时, 光的最佳入射角为 $\theta_i = 36.68^\circ$.

当 TeO_2 非同向声光滤光器采用精确的最佳入射角设计, 不仅使入射光严格满足动量匹配条件, 而且可以获得超声波极角和超声频率的更加可靠的数值. 经计算, 当 $\theta_s = 100^\circ$ 时, 由入

射角的精确值得到的滤光器的声波频率 f_s 与滤过波长 λ 的调谐曲线(图 4 中的实线),与运用折射率近似的方法得到的调谐关系曲线(图 4 中的虚线)出现了明显的差异.

本文说明采用精确的最佳入射角设计,不仅使入射光严格满足动量匹配条件,同时,可获得超声波极角和超声频率的更加准确的数值,进而可增大器件的入射光角孔径,进一步提高 TeO₂ 非同向声光可调谐滤光器件的性能.

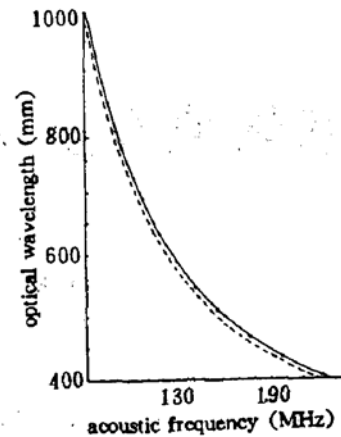


Fig. 4 Tuning curve of the TeO₂ acousto-optic filter

参 考 文 献

- [1] P. A. Gass, J. R. Sambles, Accurate design of a noncollinear acousto-optic tunable filter. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6): 429~431
- [2] I. C. Chang, Acousto-optic tunable filters, *Opt. Eng.*, 1981, **20**(6): 824~829
- [3] S. E. Harris, R. W. Wallace, Acousto-optic tunable filter. *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, **59**(6): 744~747
- [4] I. C. Chang, Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**(7): 370~372

Accurate analysis of non-collinear acoustooptic interaction in TeO₂ crystal

REN Quan ZHANG Mingdong DING Lanying

(Department of Optics, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 14 July 1992; revised 11 September 1992)

Abstract

Based on the analysis of the design theories^[1,2] for non-collinear acoustooptic tunable filter (AOTF), this paper analysed and accurately calculated the angular dependence between the acoustic polar angle θ_a and incident light polar angle θ_i for TeO₂. θ_a - θ_i curve satisfied the parallel-tangents momentum-matching condition for non-collinear AOTF with a maximum angular aperture is obtained. The resulted curve obviously improved the θ_a - θ_i curve of Chang^[2], and it provides a solid theoretical basis for the design of TeO₂ AOTF.

Key words acoustooptics interaction, acoustooptic tunable filter.