

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0323-04

# 声光可调谐滤光器的等值点理论\*

徐可欣 薛 彬 蒋诚志 胡小唐

(天津大学精密仪器及光电子工程学院精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 系统地给出了满足平行切线动量匹配条件下的声光相互作用关系曲线, 发现仅当光的入射方向与晶体光轴间的夹角约为  $56^\circ$  时, 在可见至近红外光谱范围内, 同一声波矢量可使  $\circ$  光入射  $e$  光衍射和  $e$  光入射  $\circ$  光衍射同时满足平行切线动量匹配条件, 并且这两束衍射光的波长相等。称这一特殊的角度为声光可调谐滤光器理论设计的等值点, 并通过实验验证了这一分析结果的正确性。应用等值点原理设计声光可调谐滤光器, 在不降低波长分辨率的前提下可大幅度提高光谱测量的信噪比。

关键词: 声光可调谐滤光器; 等值点;  $\text{TeO}_2$  晶体; 动量匹配

中图分类号: O426.3 文献标识码: A

## 1 引 言

近年来, 依据各向异性介质中声光互作用原理制成的声光可调谐滤光器(简称 AOTF)作为分光元件, 已有着十分广泛的应用。由于声光可调谐滤光器的工作原理是依靠电信号频率的变化来达到波长选择的目的, 具有扫描速度快、光谱调谐范围宽、入射光孔径角大等优点, 所以越来越受到人们的关注。特别是对于近年来急速成长的光谱检测技术, 如在食品工业中的饮料成分的光谱鉴别, 化工工业中的产品成分的在线分析, 医学中的人体血糖的无创检测等各种应用中, 声光可调谐滤光器已成为不可替代的分光元件。

在使用中如何增加输出光谱的信号光强, 提高波长分辨率, 获得声光可调谐滤光器的最佳设计特性, 这些年来一直是人们研究和关注的重点。如何确定决定其主要特性的声入射角  $\theta_a$  和光入射角  $\theta_i$  之间最佳匹配关系是研究的主要内容之一。最早的共线型声光可调谐滤光器设计原理于 1967 年被提出<sup>[1]</sup>, 而真正实用的声光可调谐滤光器是以  $\text{TeO}_2$  晶体作为材料, 于 1974 年由 Chang<sup>[2]</sup>提出了非共线光学设计方法后才得以实现的。之后, 论述新型声光可调谐滤光器的设计和改进的方案很多, 它们在理论上都基于平行切线动量匹配条件<sup>2,3</sup>(见图 1), 并相继提出了数学描述的有价值的方程组<sup>4,5</sup>。但

各种具体的设计方案对声波矢量  $\theta_a$  的选择差别很大, 如有选取  $-80.23^\circ$ <sup>[6]</sup>、 $105^\circ$ <sup>[7]</sup> 的等等。

我们进行了大量的分析研究<sup>[8,9]</sup>, 得出了设计时选择最佳声波矢角和光波矢角的等值点理论, 并通过实验验证了这一理论。

## 2 理论分析

图 1 描述了非同向声光相互作用下的波矢量和晶体光轴的基本关系。

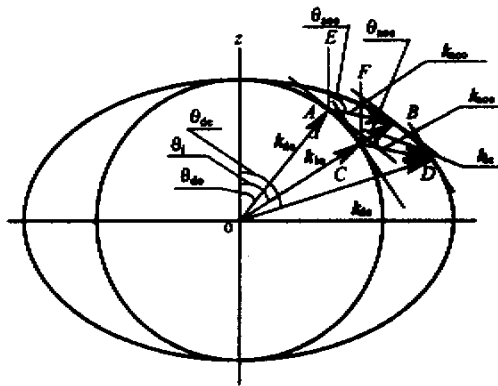


Fig. 1 The noncollinear AOTF wave vectors and phase match condition

单轴晶体寻常光线  $\circ$  光与非寻常光线  $e$  光的波矢截面为圆和椭圆,  $z$  轴为晶体的  $[001]$  轴, 矢量  $OC$  和  $OB$  分别为  $\circ$  光和  $e$  光的入射光波矢, 图中分别以  $k_{io}$  和  $k_{ie}$  表示, 它们具有相同的入射角  $\theta_i$ 。  $k_{ao}$  表示实现  $e$  光入射  $\circ$  光衍射的声波矢, 方向角为  $\theta_{ao}$ , 它和  $e$  光入射波矢  $k_{ie}$  的耦合得到衍射光波矢  $k_{do}$ ,

\* 天津市自然科学基金(003800311)及国家自然科学基金(60077010)资助课题。

方向角为  $\theta_{do}$ 。同样  $k_{aco}$  为实现  $o$  光入射、 $e$  光衍射的声波矢, 方向角为  $\theta_{aco}$ , 它和入射波矢  $k_{io}$  产生衍射光波矢  $k_{de}$ , 方向角为  $\theta_{de}$ 。平行切线动量匹配条件的数学描述为

$$\left. \begin{aligned} k_{aco} &= k_{ie} - k_{do}, \\ k_{aco} \sin \theta_{aco} &= k_{ie} \sin \theta_i - k_{do} \sin \theta_{do}, \\ k_{aco} \cos \theta_{aco} &= k_{ie} \cos \theta_i - k_{do} \cos \theta_{do}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

光波矢和声波矢值为

$$\left. \begin{aligned} k_i &= 2\pi n_i / \lambda_0, \\ k_d &= 2\pi n_d / \lambda_0, \\ k_a &= 2\pi f_a / V_a, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中的  $n_i$  和  $n_d$  为折射率,  $f_a$  为声频率,  $V_a$  为矢量  $V_a$  方向的声速度值,  $\lambda_0$  是真空光波长。根据对折射率关系的分析<sup>[2,3]</sup>,  $o$  光的折射率曲面为半径  $n_o$  的球面, 而  $e$  光的折射率可用长短轴为  $n_e$  和  $n_o$  的椭球面描述, 其方程为

$$n_{ie}(\theta_i, \lambda) = \left[ \frac{\cos^2 \theta_i}{n_o^2(\lambda)} + \frac{\sin^2 \theta_i}{n_e^2(\lambda)} \right]^{-1/2}, \quad (3)$$

式中的  $n_{ie}$  为晶体对入射  $e$  光的折射率;  $n_o$  和  $n_e$  由塞耳迈耶尔方程式表示<sup>[4]</sup>, 以下计算均使用的是  $TeO_2$  晶体的参数:

$$\left. \begin{aligned} n_o^2 &= 1 + \frac{2.5844\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1342^2} + \frac{1.1557\lambda^2}{\lambda^2 - 0.2638^2}, \\ n_e^2 &= 1 + \frac{2.8525\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1342^2} + \frac{1.5141\lambda^2}{\lambda^2 - 0.2631^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

利用平行切线动量匹配条件<sup>[2,4]</sup>, 可得到  $e$  光入射  $o$  光衍射的衍射角和入射角相对晶体光轴的关系为:

$$\tan[\theta_{do}(\theta_i, \lambda)] = \left[ \frac{n_o(\lambda)}{n_e(\lambda)} \right]^2 \tan \theta_i, \quad (5)$$

式中  $\theta_{do}$  为衍射的  $o$  光与晶体光轴之间的夹角。

由(1)式、(2)式、(5)式, 可得声波矢角和光入射角的关系:

$$\tan[\theta_{aco}(\theta_i, \lambda)] = \frac{n_{ie}(\theta_i, \lambda) \sin \theta_i - n_o(\lambda) \sin[\theta_{do}(\theta_i, \lambda)]}{n_{ie}(\theta_i, \lambda) \cos \theta_i - n_o(\lambda) \cos[\theta_{do}(\theta_i, \lambda)]}. \quad (6)$$

利用余割定理, 得到在平行切线动量匹配条件下的声波频率和衍射光波长的关系为

$$\begin{aligned} f_{aco}(\theta_i, \lambda) &= \frac{V_a}{\lambda_0} \{ n_{ie}^2(\theta_i, \lambda) + n_o^2(\lambda) - \\ &2n_{ie}(\theta_i, \lambda)n_o(\lambda) \cos[\theta_{do}(\theta_i, \lambda) - \theta_i] \}^{1/2}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $f_{aco}$  表示  $e$  光入射  $o$  光衍射时对应的声波频率。

同理, 对于  $o$  光入射  $e$  光衍射的情况, 我们导出相应的方程组为

$$\left. \begin{aligned} k_{aco} &= k_{de} - k_{io}, \\ k_{aco} \sin \theta_{aco} &= k_{de} \sin \theta_{de} - k_{io} \sin \theta_{io}, \\ k_{aco} \cos \theta_{aco} &= k_{de} \cos \theta_{de} - k_{io} \cos \theta_{io}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\tan[\theta_{de}(\theta_i, \lambda)] = \left[ \frac{n_o(\lambda)}{n_e(\lambda)} \right]^2 \tan \theta_i, \quad (9)$$

$$n_{de}(\theta_i, \lambda) = \left[ \frac{\cos^2 \theta_{de}(\theta_i, \lambda)}{n_o^2(\lambda)} + \frac{\sin^2 \theta_{de}(\theta_i, \lambda)}{n_e^2(\lambda)} \right]^{-1/2}, \quad (10)$$

$$\tan[\theta_{aco}(\theta_i, \lambda)] = \frac{n_o(\lambda) \sin \theta_i - n_{de}(\theta_i, \lambda) \sin[\theta_{de}(\theta_i, \lambda)]}{n_o(\lambda) \cos \theta_i - n_{de}(\theta_i, \lambda) \cos[\theta_{de}(\theta_i, \lambda)]}. \quad (11)$$

$$\begin{aligned} f_{aco}(\theta_i, \lambda) &= \frac{V_a}{\lambda_0} \{ n_o^2(\lambda) + n_{de}^2(\theta_i, \lambda) - \\ &2n_o(\lambda)n_{de}(\theta_i, \lambda) \cos[\theta_{de}(\theta_i, \lambda) - \theta_i] \}^{1/2}. \end{aligned} \quad (12)$$

上述理论表明对于单轴双折射晶体在非共线光学结构下的声光可调谐滤光器设计, 可依据平行切线动量匹配条件下的声波和光波相互作用公式, 在  $e$  光入射  $o$  光衍射和  $o$  光入射  $e$  光衍射两种情况下, 求出相应的各种声光参数。

### 3 声光可调谐滤光器平行切线动量匹配等值点设计原理

我们对用于制作声光可调谐滤光器的最佳材料  $TeO_2$  晶体的声光参数按理论公式(1)式~(12)式进行了系统的分析计算。当入射光波长在  $2.5 \mu\text{m} \sim 0.3 \mu\text{m}$ , 光入射角在  $0 \sim 90^\circ$  范围内变化时, 经精确计算得到了满足平行切线动量匹配条件的理论曲线, 由此得到其声波矢角从  $90^\circ \sim 110^\circ$  (见图 2), 声频率从  $0 \sim 350 \text{ MHz}$  (见图 3) 的范围内的特性。

图 2 给出了波长从  $300 \text{ nm} \sim 2600 \text{ nm}$   $o$  光入射  $e$  光衍射和  $e$  光入射  $o$  光衍射两种情况下, 满足平行切

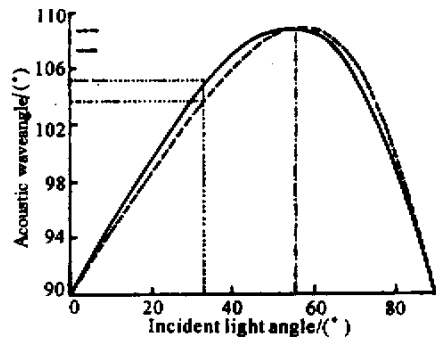


Fig. 2 The matching plot of light incident angle vs. acoustic wave vector angle ( $TeO_2$ )

线动量匹配条件的光入射角和声波矢角的关系曲线。

从曲线明显可见,当光入射角约为 $56^\circ$ 时,一个声波矢角可同时使 $e$ 光入射和 $o$ 光入射两种声光作用过程满足平行切线动量匹配条件,且衍射 $o$ 光与 $e$ 光的峰值波长相同。而对于其他的光波入射角(如 $31^\circ$ )要使这两种声光作用过程同时满足平行切线动量匹配条件,需要不同的声波矢角。

图3给出了波长从 $400\text{ nm}\sim 2400\text{ nm}$   $o$ 光入射 $e$ 光衍射和 $e$ 光入射 $o$ 光衍射两种情况下满足平行切线动量匹配条件的光入射角和声波频率的关系曲线。

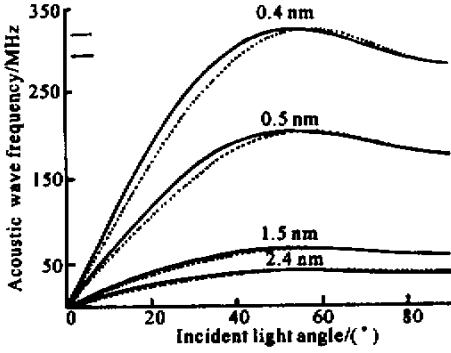


Fig. 3 The matching plot of light incident angle vs. acoustic wave frequency for  $\text{TeO}_2$

由图可见,对近红外至可见光的所有光波长,当光入射角为 $56^\circ$ 左右时,同一个声波频率可同时使 $e$ 光入射和 $o$ 光入射两种声光作用过程满足平行切线动量匹配条件,而对于其他的光波入射角,需要不同的声波频率来分别使这两种过程满足平行切线匹配条件。且当光入射角约为 $56^\circ$ 时,两路衍射光波具有相同的波长,这一特点在近红外至可见的宽广的波长范围内均成立。显然 $56^\circ$ 这一光波入射角对声光可调谐滤光器的设计具有重要的价值,我们把这

一点称为等值点。

理论计算表明,等值点 $56^\circ$ 随波长不同而稍有变化,其变化量在 $0.15^\circ$ 以内。精确计算结果如表1所示,在不同的光谱区间的变化幅度为:可见光谱相对于声波矢角为

$$\theta_{io}(\lambda = 0.76\ \mu\text{m}) - \theta_{io}(\lambda = 0.4\ \mu\text{m}) = -0.097^\circ,$$

相对于声波频率为

$$\theta_{io}(\lambda = 0.76\ \mu\text{m}) - \theta_{io}(\lambda = 0.4\ \mu\text{m}) = -0.115^\circ,$$

近红外谱区相对于声波矢角为

$$\theta_{io}(\lambda = 2.4\ \mu\text{m}) - \theta_{io}(\lambda = 0.76\ \mu\text{m}) = -0.03^\circ,$$

相对于声波频率为

$$\theta_{io}(\lambda = 2.4\ \mu\text{m}) - \theta_{io}(\lambda = 0.76\ \mu\text{m}) = -0.03^\circ.$$

显然,这样小的入射角差别相对于光的入射孔径角而言在实际应用中是可以忽略的。

Table1. The relationship of the value of the equivalent point and the wavelength ( $\text{TeO}_2$ )

$\theta_i / (^\circ)$	condition	$\theta_{aco} = \theta_{oce}$	$f_{aco} = f_{oce}$
$\lambda / \mu\text{m}$			
0.40		55.71	55.76
0.55		55.64	55.67
0.76		55.61	55.64
1.00		55.60	55.63
1.50		55.59	55.62
2.00		55.59	55.62
2.40		55.59	55.61

### 4 实验验证

图4是我们测量的不按等值点设计( $\theta_i = 31^\circ$ )的声光可调谐滤光器和按 $56^\circ$ 等值点设计的声光可调谐滤光器的各三组衍射光的光谱曲线。

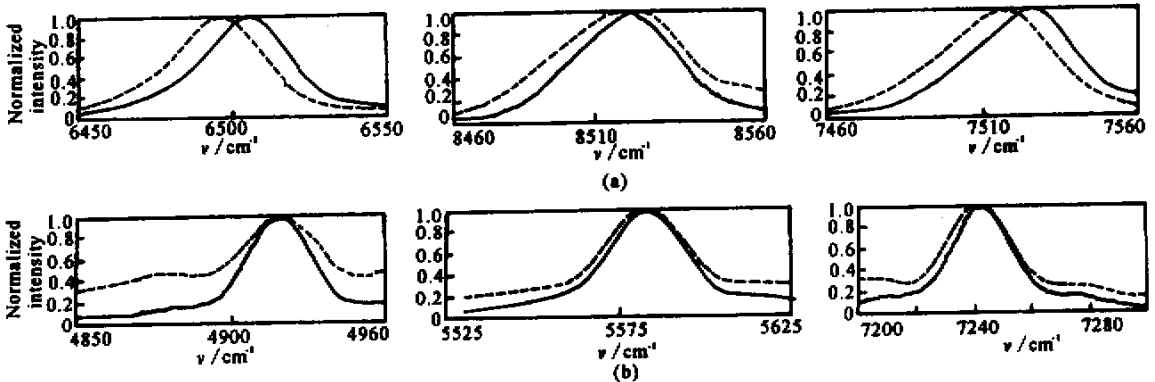


Fig. 4 (a) Experiment curve of the  $31^\circ$  cutting AOTF cell ( $\text{TeO}_2$ ) (----- e ray ; — o ray) ;  
(b) Experiment curve of the  $56^\circ$  cutting ATOF cell ( $\text{TeO}_2$ ) (----- e ray ; — o ray)

图中横坐标表示衍射光波数,纵轴为经归一化处理后的相对光强。显然在等值点设计下三组光谱的 $e$ 衍射光和 $o$ 衍射光具有相同的波长,而按非等值点( $\theta_i = 31^\circ$ )设计的声光可调谐滤光器的三组衍射光谱都存在较明显的波长差。测量用仪器为美国Perkin-Elmer公司的傅里叶变换红外光谱仪。

## 结论

1) 在平行切线动量匹配条件下,同一声波矢角或声波频率在 $e$ 光入射和 $o$ 光入射两种情况下一般对应不同的光波入射角。

2) 在通常的光波入射角下,同一声波矢量不能使 $e$ 光入射 $o$ 光衍射及 $o$ 光入射 $e$ 光衍射这两种声光作用过程同时满足平行切线动量匹配条件,仅当光在某一特殊角度(约为 $56^\circ$ )入射时,才存在唯一相对应的声波频率和声波矢角,使这两种声光作用过程同时满足平行切线动量匹配条件。

3) 在可见光至近红外光谱区间内 $e$ 光入射和 $o$ 光入射两条曲线的交点( $56^\circ$ )随波长而有微小的变化。但其变化量最大也不超过 $0.15^\circ$ ,相对于光的入射孔径角而言,这样小的入射角的差别在实际上是可以忽略的。因此,这一特殊的光波入射角( $56^\circ$ )可称为整个光谱区间内严格意义下的等值点。

4) 由图4可知,不按等值点设计的声光可调谐滤光器,因衍射 $o$ 光和 $e$ 光存在较明显的波长差,因此在实际使用中一般仅选择其中的一束,否则将降低光谱分辨率,影响测量精度。按等值点原理设计的声光可调谐滤光器,因两束衍射光的峰值波长几

乎完全重合,在实际中若将两束光合用,在不降低光谱分辨率的前提下,可提高光能利用率近一倍,有效提高光谱测量的信噪比。特别对于微弱光信号的光谱测量,具有重要的理论意义和应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Dixon R W. Acoustic diffraction of light in anisotropic media. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1967, **QE-3**(2):85~93
- [2] Chang I C. Noncollinear acousto-optic filters with large angular aperture. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**(7):370~372
- [3] Yano T, Watanabe A. Acoustooptic  $\text{TeO}_2$  tunable filter using far-off-axis anisotropic Bragg diffraction. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(9):2250~2258
- [4] Mo Fuqin. Design of a large angular aperture  $\text{TeO}_2$  acousto-optic tunable filter. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1986, **6**(5):446~449(in Chinese)
- [5] Epikhin V M, Vizen F L, Pal'tsev L L. Acoustooptic filtering of arbitrarily polarized radiation. *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 1987, **32**(10):1149~1153
- [6] Gass P A, Sambles J R. Accurate design of a noncollinear acousto-optic tunable filter. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6):429~431
- [7] Ren Quan, Zhang Mingdong, Ding Lanying. Accurate analysis of non-collinear acousto-optic interaction in  $\text{TeO}_2$  crystal. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1993, **13**(3):568~571(in Chinese)
- [8] Xu Kexin, Yamamoto H, Xue Bin. Acousto-optic tunable filter and method of calculating its equivalence incident angle. *US Patent 5 973 822*, 10/26/1999
- [9] Xue Bin, Xu Kexin, Yamamoto H. Discussion to the equivalent point realized by the two polarized beams in AOTF system. *Opt. Express*, 1999, **4**(3):139~146

## The Equivalent Point Theory of Acousto-Optic Tunable Filter

Xu Kexin Xue Bin Jiang Chengzhi Hu Xiaotang

(State Key Laboratory of Precision Measuring and Instruments, Precision Instruments and Optic-Electronic Engineering Department, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 20 December 2000; revised 26 March 2001)

**Abstract:** The relation curves of reaction of acoustic and optical wave under the momentum matching condition are presented. It is found that, in the scope of visible and infrared spectrum range, only when the angle between the incident ray and the crystal optical axis is about  $56^\circ$ , there exists a unique acoustic wave vector, which enables two situations [ $o$ (the ordinary ray) in  $e$ (the extraordinary ray) out and  $e$  in  $o$  out] to satisfy the parallel tangent momentum matching condition, and the wavelength of two diffraction rays equals each other. This specific angle is labeled as the equivalent point in theoretical design of acousto-optic tunable filter (AOTF). This result has been proved through experiments. Applying equivalent point theory in designing AOTF can improve the signal-to-noise ratio of spectrum measurement significantly without sacrificing any wavelength resolution.

**Key words:** acousto-optic tunable filter; equivalent point;  $\text{TeO}_2$  crystal; momentum matching