

# 大角孔径声光可调滤光器设计

莫 服 勤  
(华东工学院光学系)

## 提 要

本文介绍了大角孔径  $\text{TeO}_2$  晶体声光可调滤光器的设计方法, 提出了声入射角  $\theta_s=100^\circ$ , 光入射角  $\theta_i=23.4^\circ$  的新的晶体取向, 从实验上证明了这种声光可调滤光器满足准确的切线动量匹配条件, 测得的调谐关系与理论值相一致, 这种参数的声光可调滤光器其分辨率提高近  $10 \text{ \AA}$ 。经过补偿后的衍射偏转角变化减小到  $\pm 0.06^\circ$ 。

声光可调滤光器(简称 AOTF)是一种新型的分光元件。它具有电子调谐的优点, 在某些领域中解决了棱镜、光栅等分光元件难以解决的问题。声光可调滤光器的特性, 主要取决于声入射角  $\theta_s$  和光入射角  $\theta_i$  之间的关系。设计中对  $\theta_i$  与  $\theta_s$  之间的取值精度要求极为严格。过去的设计, 通常是按美国的 Chang 给出的公式计算<sup>[1]</sup>

$$\text{tg } \theta_i \text{tg } (\theta_s - \theta_i) = 2, \quad (1)$$

在  $\theta_s=100^\circ$  时, Chang 认为  $\theta_i=20.7^\circ$  为最佳。实际中我们发现, 对高精度要求的晶体取向的设计, 公式(1)的精度是不够的。按(1)式设计出的声光可调滤光器调谐曲线实验值与理论值相差较大, 动量匹配对  $\theta_i$  的变化较为敏感。本文的研究工作重点是根据精确公式, 计算出满足切线动量匹配的晶体取向, 观察光入射角  $\theta_i$  的变化对动量匹配的影响, 测试出新取向后的声光可调滤光器主要性能参数。

## 一、理 论 设 计

由声光互作用原理可知, 当声光发生互作用时应有公式

$$\mathbf{k}_i + \mathbf{k}_s = \mathbf{k}_d, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{k}_i$ 、 $\mathbf{k}_d$ 、 $\mathbf{k}_s$  分别是入射光波矢、衍射光波矢和声的波矢。大角孔径声光可调滤光器要求光入射角稍有偏离入射方向时, 对它的衍射特性无多大影响, 动量守恒仍能成立。因此在  $f_s$  和  $\lambda_0$  恒定时对(2)式变分, 于是

$$\delta \mathbf{k}_d = \delta \mathbf{k}_i, \quad (3)$$

其物理意义见图1, 入射光波矢  $\mathbf{k}_i$  和衍射光波矢  $\mathbf{k}_d$  的端点处在波矢曲线上的切线相平行, 即与入射光和衍射光能量传播方向相同。由图1可得

$$k_i \sin \theta_i + k_s \sin \theta_s = k_d \sin \theta_d, \quad (4)$$

$$k_i \cos \theta_i + k_s \cos \theta_s = k_d \cos \theta_d, \quad (5)$$

式中  $\theta_i$  与  $\theta_d$ 、 $\theta_s$  分别是入射光波矢、衍射光波矢和声波矢与晶轴  $[0 \ 0 \ 1]$  的夹角。由(4)、(5)

两式可得  $k_a = [k_i^2 + k_d^2 - 2k_i k_d \cos(\theta_d - \theta_i)]^{\frac{1}{2}}$ 。所以有

$$f_a = \frac{V}{\lambda_0} [n_i^2 + n_d^2 - 2n_i n_d \cos(\theta_d - \theta_i)]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

其中

$$\frac{1}{n_i^2} = \frac{\cos^2 \theta_i}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta_i}{n_e^2}, \quad (7)$$

式中  $n_o$ 、 $n_e$  由 Sellmeier 方程表示<sup>[2]</sup>

$$n_o^2 = 1 + \frac{2.5844\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1342)^2} + \frac{1.1557\lambda^2}{\lambda^2 - (0.2638)^2}, \quad (8)$$

$$n_e^2 = 1 + \frac{2.8525\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1342)^2} + \frac{1.5141\lambda^2}{\lambda^2 - (0.2631)^2}. \quad (9)$$

(6) 式是声光可调滤光器的准确调谐关系式。理论上可以证明, 切变波模式的反常布拉格衍射的非共线声光可调滤光器, 入射光与衍射光是正交偏振的, 因此当入射光为  $e$  光偏振时, 衍射光为  $o$  光偏振, 所以有  $n_d = n_o$ 。

根据图 1 中切线平行条件, 很易得到

$$\operatorname{tg} \theta_a = (n_o/n_e)^2 \operatorname{tg} \theta_i. \quad (10)$$

由 (4)、(5) 式得

$$\operatorname{tg} \theta_a = \frac{n_i \sin \theta_i - n_d \sin \theta_d}{n_i \cos \theta_i - n_d \cos \theta_d}, \quad (11)$$

由 (7)、(10)、(11) 式联立方程组可解得, 当  $\theta_a = 100^\circ$

时, 对应的光入射角为  $\theta_i = 23.4^\circ$ 。当然, 根据以上的计算也可得到其他参数的器件。

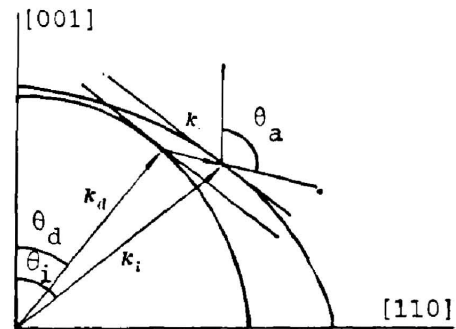


Fig. 1 Wave vectors representing acousto-optic interaction

## 二、实验结果

为了验证大角孔径声光可调滤光器对  $\theta_i$  的变化是否不敏感、是否满足切线时的动量匹配, 我们用单色会聚光入射到声光可调滤光器中, 以实现  $\lambda_0$  和  $f_a$  恒定而  $\theta_i$  变化的条件, 并用此时声光可调滤光器的衍射光斑来确定动量匹配对  $\theta_i$  变化的敏感程度。图 2 是实验光路。图 3 是  $\theta_a = 100^\circ$ ,  $\theta_i = 20.70^\circ$  声光可调滤光器的衍射光斑, 图 4 是  $\theta_a = 100^\circ$ ,  $\theta_i = 23.4^\circ$  声光可调滤光器的衍射光斑, 图的水平方向是光入射角  $\theta_i$  的变化方向, 图中左边的亮斑是没有衍射时的光斑, 右边的亮斑是衍射光斑。由声光相互作用原理可知, 只有满足动量匹配的光才能被衍射, 因此从图 3 中可以确认入射光只有一部分满足动量匹配,  $\theta_i$  的变化对动量匹配的影响较大。而图 4 中的衍射光斑完全是一个亮斑, 这说明在  $\theta_a = 100^\circ$  时,  $\theta_i = 23.4^\circ$  的声光可调滤光器, 动量匹配对光入射角  $\theta_i$  的变化不敏感, 可以获得大角孔径。

图 5、图 6 中的虚线, 是用光栅摄谱仪和频率计测得的两种参数的声光可调滤光器的调谐曲线, 实线是用 (6) 式和 (10) 式计算出的曲线, 黑点为测量点。由图 5 可以看出, 实验值和理论值相一致 (误差是由声发散引起的)。图 6 中的实验值和理论值误差较大, 其原因是这种参数的声光可调滤光器的  $\theta_i$  和  $\theta_a$  之间并不满足切线动量匹配条件, 自然也就不满足由此条件推出的 (10) 式, 因此造成了实验值偏离理论值。

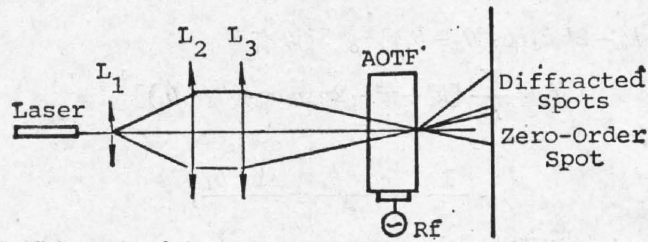
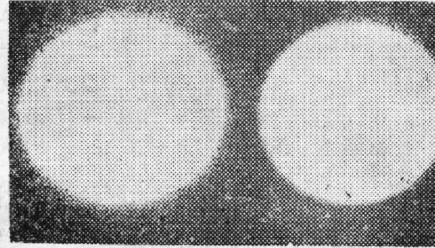
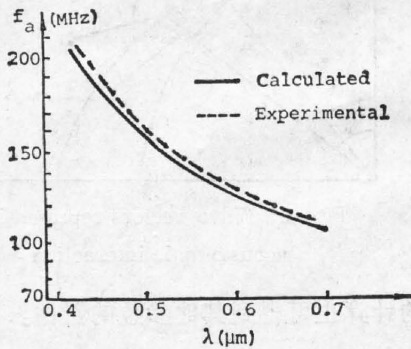
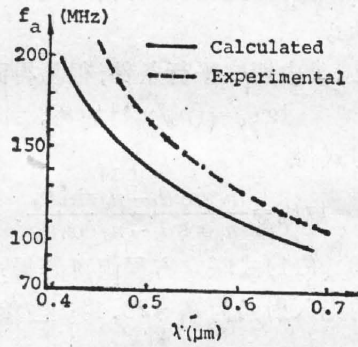


Fig. 2 Schematic of the optic system with an incident convergent light

Fig. 3 Diffraction of AOTF with  $\theta_i=20.7^\circ$ Fig. 4 Diffraction of AOTF with  $\theta_i=23.4^\circ$ Fig. 5 Tuning curve for  $\theta_i=23.4^\circ$ Fig. 6 Tuning curve for  $\theta_i=20.7^\circ$ 

新晶体取向的声光可调滤光器,在 $\theta_i$ 增加后,声驱动频率略有下降,光谱分辨率有较明显提高。对于光入射角不同,其他参数则完全相同的两种器件,波长 $\lambda_0$ 在 $6328 \text{ \AA}$ 处的 $\Delta\lambda$ 值可提高 $10 \text{ \AA}$ 以上。例如,原 $\theta_i=20.7^\circ$ 的声光可调滤光器,在 $\lambda_0=6328 \text{ \AA}$ 处测得的 $\Delta\lambda=48 \text{ \AA}$ ,改成 $\theta_i=23.4^\circ$ 后,同一器件 $\Delta\lambda$ 提高到 $31 \text{ \AA}$ 。此外,我们对声光可调滤光器的衍射角随衍射波长改变而变化的现象进行了研究,计算了补偿量,在出射面上磨了 $6^\circ 48'$ 的补偿角,经补偿后的声光可调滤光器,其衍射角的变化在可见光波段由 $1^\circ$ 以上减小到 $\pm 0.06^\circ$ 以内。

### 三、结 束 语

综上所述,  $\text{TeO}_2$  声光可调滤光器的晶体取向为 $\theta_a=100^\circ$ ,  $\theta_i=23.4^\circ$ 时满足于切线动量匹配条件。此参数器件可获得大角孔径,并且它的性能也优越于 $\theta_i=20.7^\circ$ 的器件。如果换能器的加工工艺水平能够得到改善,光谱分辨率还可进一步提高。

本文中的工作是在黎俊杰导师指导下完成的,在本文的修改过程中,陶纯堪同志提出了宝贵的意见,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] I. C. Chang; *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**, No. 7 (1 Oct), 370.  
[2] I. C. Chang; *Proc. SPIE*, 1978, **131**, 2.

**Design of a large angular aperture TeO<sub>2</sub> acousto-optic tunable filter**

Mo Fuqin

*(Department of Optics, East China Institute of Technology, Nanjing)*

(Received 3 October 1985; revised 7 December 1985)

**Abstract**

In this paper the design of a large angular aperture acousto-optic tunable filter (AOTF) using TeO<sub>2</sub> crystals is described. A new crystal orientation with  $\theta_a=100^\circ$  and  $\theta_i=23.4^\circ$  is proposed. It has been proved in the experiments that this AOTF meets the exact condition of tangent momentum match. The measured tuning relation is in good agreement with theoretical calculations and the spectral resolution has been improved by nearly 10 Å. After compensation, the change in deflection angle is decreased to  $\pm 0.06^\circ$ .