

红外声光可调谐滤光器

崔 岩

摘要: 本文报导了一个红外声光可调谐滤光器的研制, 该器件的光谱调谐范围为1.2~3.0 μm , 在2.1 μm 处的通带宽度为40 \AA 。文中详细地讨论了器件的设计、性能测试和分析。

一、引 言

声光可调谐滤光器(AOTF)是工作在声光衍射原理之上的电调谐分光器件, 它是由声光相互作用介质和粘接在其上的换能器构成。换能器将高频电驱动信号转换为超声波, 传输到相互作用介质内的超声波对其折射率产生周期性的调制。所以AOTF就象一块位相移动的光栅, 起到分光作用。变化AOTF的驱动频率, 就能够在较宽的光谱范围内调谐滤光器的带通。AOTF与棱镜、光栅等常规的分光元件不同, 它的光谱扫描是由电调谐进行的, 而不是机械扫描, 所以它具有非常快的光谱扫描速度, 并且易于和计算机相联进行扫描控制。此外, AOTF还具有调谐范围宽、分辨率高、入射角孔径大和无二级光谱等优点。这些特点使AOTF在光谱测量技术中成为一种非常具有吸引力的分光元件。

Harris和Wallace首先报导了由各向异性介质制作的共向AOTF^[1]。其后, I.C.Chang将其扩展到非共向结构^[2]。许多文章报导各类声光滤光器的特点、研制和应用^{[3][4]}。由于非共向AOTF的入射角孔径大, 衍射光与零级光在空间位置上分开, 所以它更适宜光谱测量应用。本文报导的器件就是采用非共向结构。下文中, 我们将首先简要地给出AOTF的理论, 然后详细讨论红外AOTF设计和性能评价。

二、AOTF理论

AOTF的工作原理是反常布拉格衍射, 在相互作用介质内传输的超声波将满足动量匹配条件的入射偏振光耦合到垂直的偏振方向, 形成衍射光。为了获得大的入射角孔径, 应使入射光波矢的极角 θ_i 、方位角 ϕ_i 和声波矢的极角 θ_o 、方位角 ϕ_o 满足下式^[5],

$$\begin{aligned} \phi_i &= \phi_o \\ \text{tg}\theta_i \cdot \text{tg}(\theta_o - \theta_i) &= 2 \end{aligned} \quad (1)$$

在满足上式时, AOTF的调谐关系为:

$$\lambda_o = \frac{v_o(\theta_o) \cdot \Delta n}{f_o} (\sin^4\theta_i + \sin^2 2\theta_i)^{1/2} \quad (2)$$

式中 λ_o 为真空中的光波长; f_o 为超声波的频率; $v_o(\theta_o)$ 为超声波在极角 θ_o 下的速度; Δn 为互

作用介质的双折射率。AOTF光谱通带的半峰值宽度 $\Delta\lambda$ 为:

$$\Delta\lambda = \frac{1.8\pi\lambda_0^2}{bl\sin^2\theta_i} \quad (3)$$

式中 $b = 2\pi \left[\Delta n - \lambda \frac{\partial \Delta n}{\partial \lambda} \right]$ 为相互作用介质的色散常数, l 为声光相互作用长度。AOTF 的介质内角孔径为

$$\delta\theta_i = \frac{1}{\sin\theta_i} \left[\lambda_0 / (l \cdot \Delta n | 2\text{ctg}^2\theta_i - 1 |) \right]^{1/2} \quad (\text{极角})$$

$$\delta\phi_i = \frac{1}{\sin\theta_i} \left[\lambda_0 / (l \cdot \Delta n | \cos^2\theta_i + 1 |) \right]^{1/2} \quad (\text{方位角}) \quad (4)$$

衍射光与入射光之间的偏转角 $\Delta\theta$ 为:

$$\Delta\theta = \Delta n \cdot \sin 2\theta_i \quad (5)$$

三、AOTF设计

为了能够研制出高性能的滤光器,在设计器件时,必须细致地研究影响器件性能的各种因素,选择合适的性能参数。AOTF的主要性能参数有光谱调谐范围、互作用介质、光谱通带宽度、入射角孔径和偏转角等,下面将依次进行讨论。

光谱调谐范围: AOTF的光谱调谐范围应根据它的应用进行选择,可调谐的最大范围受到驱动源的输出频率范围、换能器与互作用介质之间的声学增透膜的透过范围的限制。综合考虑这几个因素,我们将器件的光谱调谐范围选为 $1.2\mu\text{m} \sim 3.0\mu\text{m}$ 。

声光互作用介质: 在选定器件的光谱调谐范围后,选择互作用介质时应首先考虑介质材料的光学透过范围。此外,还应该考虑到对AOTF应用最重要的材料特性—声光品质因数和声衰减,同时也应考虑到是否能获得大块、高质量的介质材料。在充分研究现有AOTF材料特性之后,我们认为 TeO_2 晶体是最合适的。

滤光器结构: 在光谱测量应用中,我们希望器件具有较大的人射角孔径和偏转角。而入射角孔径和偏转角是通过(1)、(4)、(5)式直接与声波离轴角相联系的。此外,在确定器件结构时,还应考虑到工艺上是否可以实现。权衡上述各种因素,将 θ_0 选为 105° ,由(1)式可知 $\theta_i = 72^\circ$ 。应该注意到,(1)式的推导过程采用了某些近似^[5],如果从动量匹配条件和切线平行条件出发,精确地计算出 $\theta_i = 72.8^\circ$ 。图1示出了精确计算结果与理论公式之间的差异。图2示出了根据精确计算设计的AOTF结构图。图中的入射面是与光线入射方向垂直的;出射面的选择使得不同波长的衍射光的出射角相同。

调谐关系: 当 $\theta_0 = 105^\circ$ 、 $\theta_i = 72.8^\circ$ 时,由(2)式可知该器件的调谐关系为 $\lambda_0(\mu\text{m}) \cdot f_s(\text{MHz}) = 865.7 \cdot \Delta n$ 。所以对应于 $1.2 \sim 3.0\mu\text{m}$ 的光谱调谐范围,驱动频率的变化范围为 $40\text{MHz} \sim 100\text{MHz}$ 。

通带宽度、角孔径、偏转角: 将该器件的换能器长度选为 15mm ,由几何关系计算得声光相互作用长度 $l = 8.1\text{mm}$ 。所以当入射光波长为 $2.1\mu\text{m}$ 时,光谱通带的半峰值宽度 $\Delta\lambda = 38\text{\AA}$;介质内入射角孔径 $\delta\theta_i = 2.8^\circ$ 、 $\delta\phi_i = 2.4^\circ$;偏转角 $\Delta\theta = 5.2^\circ$ 。

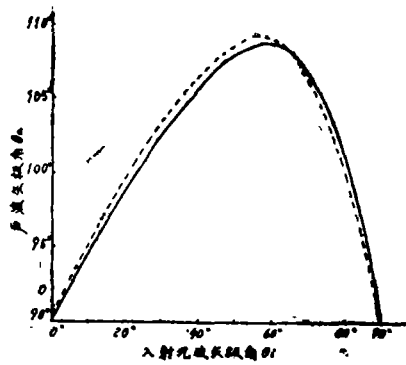


图1 精确计算与理论公式之间的比较

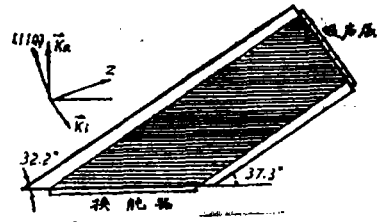


图2 AOTF结构图($\theta_i = 105^\circ$)

四、AOTF性能测试及分析

按照设计的结构和要求，加工了一个滤光器。然后采用图3所示的测试装置对其性能进行了测试。图中，透镜1将溴钨灯的出射光会聚成像到单色仪的入射狭缝上；单色仪出射的单色光经透镜2形成准平行光入射到AOTF上；探测器分别探测零级光和衍射光，其输出信号由锁相放大器放大并显示。当驱动频率在40~100MHz之间变化时，测得对应每一频

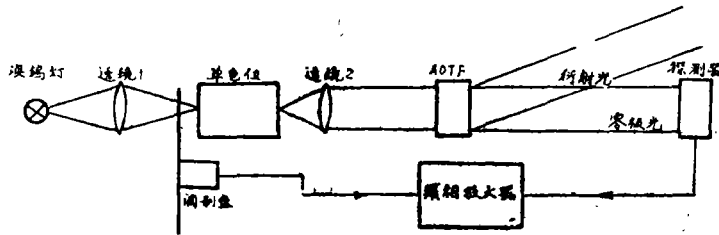


图3 AOTF性能测试装置原理图

率的衍射光波长，测得的调谐关系如图4所示。图中曲线为设计的调谐关系曲线，“·”代表测量数据。测试结果与设计基本吻合。

测量AOTF的透过特性时，固定入射光波长，变化AOTF的驱动频率。图5示出了实验

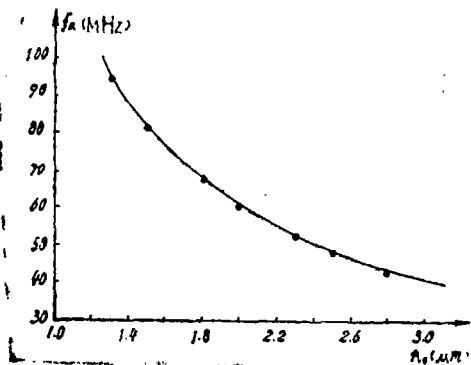


图4 AOTF调谐关系曲线

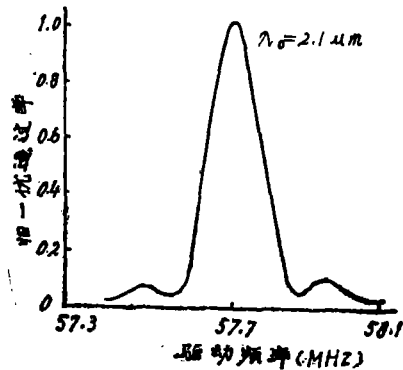


图5 AOTF透过特性曲线

测得的该器件在 $2.1\mu\text{m}$ 处的透过特性曲线。由图中曲线得到的半峰值宽度约为 52\AA ，大于设计指标。这是因为实验中的单色入射光是由单色仪获得的，它具有一定的宽度。此外，我们对该器件的偏转角和入射角孔径也进行了测试，结果与设计符合。

除上述性能参数外，衍射效率也是AOTF的重要性能参数之一。根据AOTF理论，衍射效率达到100%时所需声功率 $P_{a,100}$ 由下式给出^[6]，

$$P_{a,100} = \frac{\lambda_0^2}{2} \frac{H}{l' M_s} \left[\frac{v_s(\theta_s)}{v_s(0)} \right]^3 \left[\frac{\cos(\theta_r - \theta_i)}{\cos(\theta_r + \theta_s) \cdot \cos\theta_i} \right]^2 \quad (6)$$

式中 l' 为换能器的长度， H 为换能器的宽度， M_s 为互作用介质的品质因数， θ_r 为声能流的极角，其余参量与前面相同。将设计参数代入(6)式计算得，当 $\lambda_0 = 2.1\mu\text{m}$ 时， $P_{a,100} \approx 5\text{W}$ 。而在实际测试中，当驱动源的输出功率为 5W 时，衍射效率仅为25%。由此可推算出，驱动源的输出功率转换为声功率的效率约为10%。转换效率低的原因主要有以下几个方面，第一，AOTF的输入阻抗与驱动源的输出阻抗不相匹配，致使驱动源的输出功率不能有效地耦合到器件上；第二，换能器将电功率转换为声功率的效率不高；第三，声学增透层的增透效果不佳。虽然我们可以通过提高驱动功率的方法来获得高的衍射效率，但这不是一个好的解决办法，最终有效地解决这个问题的办法将是器件工艺的改善。

五、结束语

上文详述了一个红外AOTF的设计和性能测试。性能测试结果表明：该器件的调谐关系、带通特性、角孔径和偏转角等性能参数与设计一致；驱动源的输出功率转换为声功率的效率较低，文中已定性分析了原因，并提出可能的解决方法。

AOTF的优点使其具有广泛的应用领域，它不仅可用于化学反应光谱分析、快速光谱测量等领域，还可用作光谱凝视探测系统中的分光元件^[7]。所以研制高性能的AOTF是十分有价值的工作。

本文工作得到中国科学院成都光电研究所黎俊杰研究员、长春光机研究所唐九华研究员、崔敦杰、王汝勤、禹秉熙副研等同志的指导和帮助，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] S.E.Harris and R.W.Wallace, J.Opt.Soc. Am., 59, P744(1969)
- [2] I.C.Chang, IEEE/OSA, Conference on Laser Engineering and Application, Paper No.7.4 1973
- [3] J.J.Conroy, M.Gottlieb, J.D.Feichtner, SPIE 202, (1979)P33
- [4] P.Katzka, SPIE, 753, (1987)P22
- [5] 徐介平, 声光器件的原理、设计和应用, 科学出版社, (1982)
- [6] T.Yano and A.Watanabe, Appl.Opt., 15, No.9, (1976)P2250
- [7] Harold J.Babrov and Michael M.Jacobs, Appl.Opt., 18, No.23. (1979)P3901

An Infrared Acousto-optical Tunable Filter

Cui Yan

Abstract

The design and fabrication of an infrared Acousto Optical Tunable Filter (AOTF) are reported in this paper. The tuning range of the filter is about $1.2\sim 3.0\mu\text{m}$, the passband width at $2.1\mu\text{m}$ is 40\AA . The properties of the filter are measured and discussed.