

新型电调谐分光元件——声光滤波器

黄庚辰 戴元超

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

声光学是本世纪六十年代开始后迅速发展起来的一门新型学科。它具有丰富的科学内容和广泛的应用前景,受到各国科学家的重视。人们竞相开展了声光效应、器件和应用方面的研究,并很快研制出一系列声光器件,如声光偏转器、调制器、相关器、延迟线和滤光器等。其中声光滤波器(Acousto-optic Filter, 简称为 AOF, 或 Acousto-optic Tunable Filter, 简称为 AOTF) 是最新的声光器件之一。它是一种基于各向异性介质中声光衍射原理工作的电调谐分光元件。只要改变高频超声信号的频率,就可以在宽的光谱范围内快速调谐输出光的波长。它与常规的分光元件(如光栅和棱镜等)相比,具有透过率高、角孔径大、结构简单、使用方便等优点。而最吸引人的还在于它的波长调谐具有快速、多模式和可变带宽的特点。根据需要,人们可以很方便地选取波长的线性扫描输出、随机输出和多波长混合输出的方式。1969年, Harris^[1] 首先报道了共线型 AOF。随后,在 1973年 Chang^[2,3] 又报道了更为吸引人的非共线型 AOF。此后,人们不断利用 AOF 开展了一系列应用研究。

一、AOF 的工作原理和性能

众所周知,当超声波在声光介质中传播时,将产生折射率周期变化的位相光栅,其光栅常数即为超声波波长 Λ 。它对于波长为 λ 的入射光将产生衍射作用(图 1)。其衍射角 θ_B 将由 Bragg 衍射定律所确定,即

$$\sin \theta_B = \lambda / 2\Lambda.$$

对于一定的 Λ , 将有相应的光波衍射出来。当

衍射发生在各向异性的单晶体中时,形成所谓反常 Bragg 衍射。其波长 λ 与频率 f 的调谐关系可由下式^[4]给出:

$$f = \frac{\Delta n_o(\lambda) \cdot v(\alpha)}{\lambda} \cdot \frac{\sin^2 \theta_i}{\sin(\theta_i - \alpha)},$$

其中 $v(\alpha)$ 为超声入射角 α 有关的声速, $\Delta n_o(\lambda)$ 为垂直光轴平面内传播的光的双折射, θ_i 为光

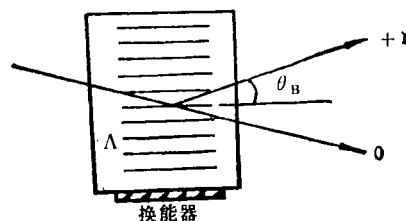


图 1 声光调制原理图

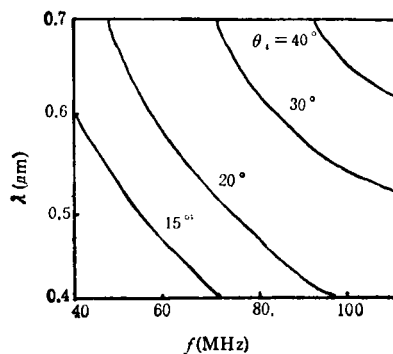


图 2 声光调谐曲线

入射角。可以看出,只要改变输入超声波的频率 f , 就可以达到调谐输出光波长 λ 的目的。典型的调谐曲线如图 2 所示。考虑到声波和光波都不是绝对的平面波,调谐波长将具有一定的线宽 $\Delta\lambda_\alpha$, 其表达式为

$$\Delta\lambda_\alpha = \frac{1}{D} \cdot \frac{\lambda}{\operatorname{tg}(\theta_i - \alpha)} \cdot \Delta\alpha,$$

其中 $\Delta\alpha$ 为声波的角扩展, D 为与波长和双折

射有关的常数。

声光滤波器 AOF 对于一个特定波长的衍射效率 η 由下式决定:

$$\eta = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \left(\frac{L \cdot M_c P_a}{2H} \right)^{1/2} \left(\frac{v(0)}{v(\alpha)} \right)^{3/2} \cdot \frac{\cos(\theta_s - \alpha) \cos \theta_i}{\cos(\theta_s - \theta_i)}$$

其中 M_c 为声光介质的品质因素, L, H 为器件换能器的几何尺寸, θ_s 为与声入射角 α 有关的声能源流方向与相速度方向的夹角, $v(0)$ 为声入射角 $\alpha=0^\circ$ 时的声速, P_a 为入射的声功率。可以看出,当器件设计参数确定后,只要适当增加入射角的声功率,即可提高器件的衍射效率。一般来说,器件的效率可达到 75% 以上。

目前, AOF 从作用模式上可分为共线和非共线两种类型。所谓共线与非共线是指超声波与光波是在同一方向还是在不同方向上进行相互作用。图 3 和图 4 分别表示这两种类型 AOF 的基本结构。很明显,非共线作用模式的 AOF 具有结构简单、使用方便的优点,因而发展较快。

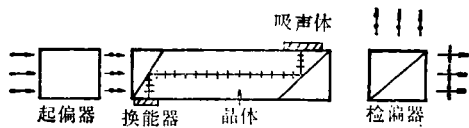


图 3 共线性 AOF

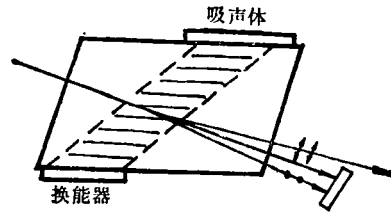


图 4 非共线性 AOF

从器件的分光光谱范围来说,目前除了可见光范围的 AOF 外,已发展了用水晶制作的紫外用 AOF, TeO_2 和 CaMoO_4 晶体制作的近红外器件,以及用 Ti_3AsS_3 等晶体研制成的远红外器件。目前一些典型的声光滤波器的结构和性能参数见表 1。可以看出,器件的谱分辨率在精心制作的情况下可达到数十埃,以至数埃的水平。当然,这与光栅分光元件相比起来还有些不足。但是, AOF 的随机快速和多谱及变谱宽的工作模式,以及大光通量和极易程序化的微机处理等特点为其应用开辟了广阔的前景。

表 1 列出的器件只是一些研究者根据自己的需要设计制作的,其性能参数仅供参考。实际上,器件的参数还可以适当改变。尤其是器件的波长调谐范围,还可以通过声和光的入射角,换能器的中心频率的改变而加以选择。当然,其变化的范围不能超出材料允许的范围。现将一些主要 AOF 声光相互作用单晶体材料的

表 1 声光滤波器的结构和性能参数^[1]

材料	结构	调谐范围 (μm)	测量波长 (μm)	带宽	角孔径	光孔径	效率
SiO_2 (Quartz)	共线型	0.23—0.7	0.325	1.5 Å	5°	7 × 7 mm ²	10%/W
SiO_2 (Quartz)	非共线型	0.23—0.7	0.325	10 Å	10°	4 × 30 mm ²	10%/W
TeO_2	非共线型	0.45—0.75	0.633	50 cm ⁻¹ 20 Å, 0.633 μm	10°	5 × 5 mm ²	95% max (0.5W 以下)
TeO_2	非共线型	0.45—0.75	0.633	7 cm ⁻¹ 3 Å, 0.633 μm	5°	3 × 8 mm ²	70% max (1.5W 以下)
TeO_2	非共线型	2.0—5.0	3.39	5 cm ⁻¹ 57 Å, 3.39 μm	10°	5 × 10 mm ²	7%/W
Ti_3AsS_3	共线型	7.0—11	10.6	0.7 cm ⁻¹ 78 Å, 10.6 μm	10°	3 × 3 mm ²	—
Ti_3AsS_3	非共线型	7.0—11	10.6	0.6 μm (10.6 μm)	35°	4 × 15 mm ²	6%/W

表2 声光滤波器材料参数^[6]

材料(点群)	透光范围 (μm)	折射率	双折射	光弹系数 (P_{41})	密度 (g/cm^3)	声速(cm/s)		品质因数 $M_2 = m^2 P^2 / \rho v^3$	
						v_L	v_s		
$\alpha\text{-SiO}_2$ (32)	0.2—2	1.52 ($2\mu\text{m}$)	0.01	0.041	2.65	5.75×10^3	3.36×10^3	1	5
CaMoO_4 (4/m)	0.4—4.5	1.95 ($2\mu\text{m}$)	0.1	0.1	4.26	6×10^3	2.95×10^3	14	118
LiNbO_3 (3M)	0.4—4.5	2.2 ($2\mu\text{m}$)	0.09	0.155	4.64	6.57×10^3	4×10^3	49	217
Tl_3AsS_3 (3M)	1.27—18	3.3 ($2\mu\text{m}$)	0.18	≥ 0.1	7.83	2.14×10^3	7500		
TeO_2 (422)	0.35—5	2.26 ($0.633\mu\text{m}$)	0.15	0.34 (P_{13})	6.0	4.2×10^3	0.616×10^3	34.5	795

基本物理参数列于表2,以供参考。

器件的性能主要取决于材料参数。可以看出, TeO_2 单晶体是一个不可多得的优良声光晶体。它不但具有高折射率,沿 [110] 方向有慢横波,而且还具有双折射和旋光特性,从而为人们提供了研制多种类型器件的可能性。

二、AOF 的应用情况

由于 AOF 具有快速电调谐的特点,因此它一问世就受到很大重视。并且很快在扫描光谱学、彩色信息处理、相干光源探测、扫描光信号发生器等方面得到应用,这里作些简单介绍。

1. 快速光谱扫描

AOF 可快速电调谐的优点是使人们第一次有可能与计算机联合起来,对诸如光源的光谱特征,光敏和光电材料的光谱响应,以及光学材料和其他样品的光透过吸收情况进行可编程序的控制和测试。图5是声光光谱仪的结构原理图^[7]。光源采用钨灯,发出的白光经样品吸收后射入 AOF。由 Z-80 计算机控制的频率合成器,输出一定频率范围内的射频振荡信号,该信号经射频功率放大后馈入声光源滤波器。随着频率的改变,通过样品吸收后的光源光谱将随时间展开。这样在光电倍增管探测器上将得到相应光谱的光电信号。通过计算机进行数据

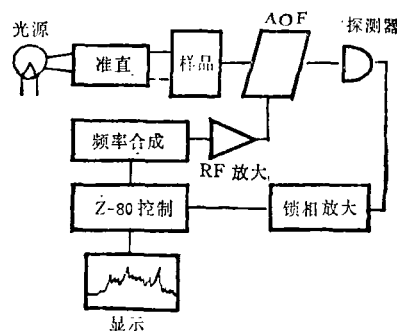


图5 AOF 结构原理图

处理,可以很容易地获得样品的光谱吸收曲线。由于其光谱扫描速率可达到毫秒量级,因此它特别适用于光吸收随时间变化的样品的测试,从而记录下样品的瞬态光谱特征。例如,Shipp^[8] 等人就利用 AOF 对一些快速化学反应和生物化学反应过程中的光谱吸收变化进行了快速测定,从而获得了化学反应动力学方面的信息。

当我们要测定的对象是光源或光电材料和器件,光敏材料和器件时,亦可采用类似的装置得到相应的光谱特征。T. Yano^[4] 和 J. D. Feichtner^[9] 等人分别对汞灯和汞弧灯的光源谱进行了测试。美国已利用 AOF 技术测定了高空模拟仓中试验火箭发动机的光谱信息^[9]。图6示出火箭排出的尾烟的光谱扫描曲线。整个扫描时间为 20 ms。这种在高速中获得大量光谱信息的工作特点是目前光栅和棱镜等常规机械扫描方式所无法比拟的。

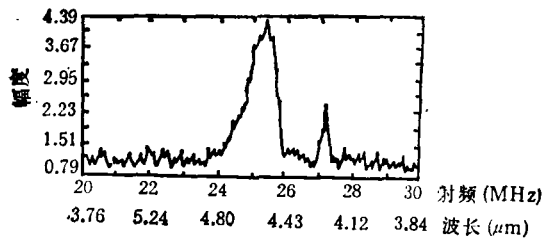


图6 火箭尾焰光谱

另外,北爱尔兰的 B. Bates^[10] 等人也用一个非共线 TeO₂ AOF 研制成一台用于天文观测的分光光度计。这台装置与英国皇家格林威治天文台的天文望远镜相连接,对 A 型星的光谱进行了观测。以此,可以很容易地提供星体的颜色和星等级等方面的数据。

2. 光谱成像技术

人们对光谱成像技术在天文学、气象学和环境利用方面的应用的兴趣在不断增加,而声光滤波方法为该技术的发展注入了新的活力。I. C. Chang^[11] 利用非共线 TeO₂ 的 AOF 进行了彩色滤光成像 (color filtered imaging) 的演示。通过滤波器在整个可见光区域的扫描已获得分辨率测试板的光谱象。被测量的象的分辨率,对于水平和垂直成像来说,分别约为 144 线/mm 和 72 线/mm。色彩的开关转换速度可达 5 μs。很明显,这种技术在彩色图象的编码数字处理、存贮和再现中将得到广泛的应用。另外, Wattson^[12] 等已用 AOF 成像分光仪进行了行星大气的研究。根据各个行星大气组分的波长特征,可得到行星的分幅光谱象,从而获得行星大气的化学和动力学等方面的信息。我们采用工作在近红外区的 CaMoO₄ 共线型 AOF 器件,组成了一台观测装置(见图 7)。

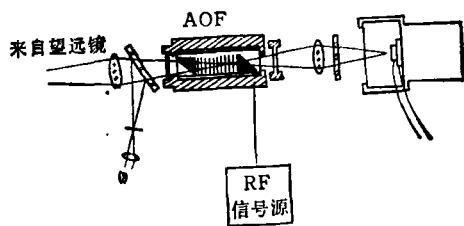


图7 近红外成像光谱仪

利用该装置,他们观测并拍摄了木星和土星的分幅象。由于电荷耦合器件 CCD 接收阵列的分辨率和其它方面的原因,该方法尚未达到实用的程度,但已成为天文界和其他领域的同行所认真考虑的一种新技术。

3. 相干源探测和识别

在大气光通讯和环境污染监测等方面应用中,有时需要检测和识别在高非相干背景下的光谱辐射。I. C. Chang^[13] 将一个工作在调频模式下的 AOF 用于高非相干辐射背景下的极微弱激光信号的探测中去。其装置如图 8 所

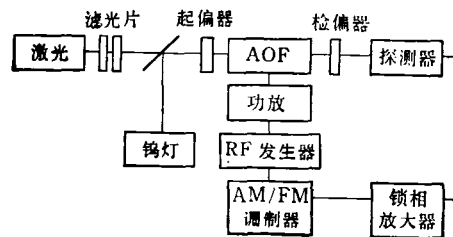


图 8

示。由于 AOF 的通带中心波长可依赖射频信号频率的变化而改变,在调频状态下,探测器所获得的不是光强而是其导数。此时,它可以抑制入射光谱中的低空频分量。这种光学导数探测 (optical derivative detection) 很容易将锐的激光线与非相干背景的相对平缓的辐射谱区分开来。这大大优于通常使用的激光强度探测和采用光学外差方法的探测技术。其探测的灵敏度可达到,在 3dB 信噪比下能发现光功率为 65×10^{-8} mW (即低于 1mW 72dB) 的微弱激光信号的水平。

4. 等光强扫描光信号发生器

AOF 调谐输出的透过效率与所馈入的高频超声信号的电功率近似成正比关系,因此,只要适当改变输入的某一频率信号的功率,即可得到相应波长的不同光强。对于一个具有连续谱的光源,采用适当的光电反馈措施后,在 AOF 的输出端便得到了不取决于光源谱分布的平坦的光强分布(图 9)。以此光信号发生器作为光

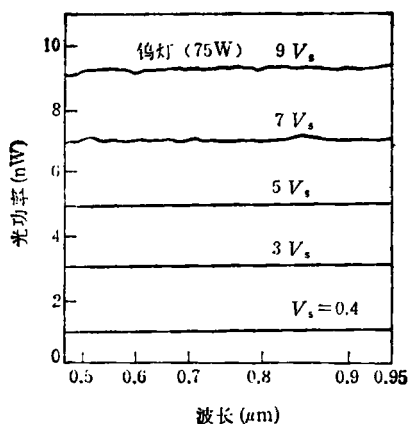


图9 AOF 输出的等光强源

源,便可很容易地测定待测样品的光谱特征。Masuda^[14]等人用此方法对光纤的光透过区和摄像管的光谱响应、余辉和响应速度等性能进行了测量。中国科学院电子学研究所和上海硅酸盐研究所也采用 TeO₂ 单晶非共线型 AOF, 共同研制成一台摄像管光谱特性测试仪, 并通过鉴定。该仪器大体可分为光源、分色器、控制和接收几部分。图 10 为仪器的原理方框图。

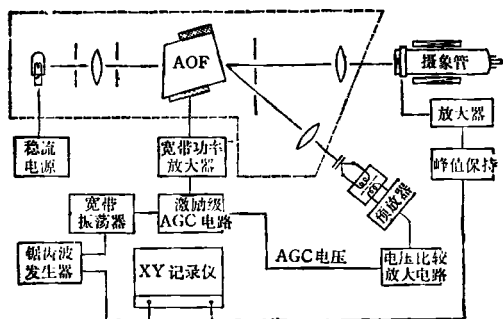


图 10 AOF 型摄像管光谱特性测定仪方框图

光源部分由卤钨灯、针孔、五透镜组、限孔光阑等组成,它提供了一束入射到 AOF 器件上的平行白光。由宽带功放电控衰减器、宽带扫频信号发生器、锯齿波发生器等组成高频激励电路。它提供了连续扫频的功率信号,以激励 AOF 的换能器。由光调制器、真空热电偶、放大器、电压比较器等组成监测反馈电路,对输出光进行测量,并根据其大小提供自动增益控制 (AGC)

电压。光信号增大时, AGC 电压减小, 高频功率信号下降, 使衍射效率降低。反之, 则使衍射效率增加。从而实现了光输出的自动调节, 维持光输出功率的恒定。利用这台仪器对多种型号的摄像管, 如飞利浦摄像管 XQ1085R, XQ1080B, 国产 PBO 和非晶硅靶面摄像管都进行了光谱特性的测试, 并获得了理想的测试结果。

AOF 是一种新型的声光器件, 目前已得到广泛的应用, 并正在大力开发更新的技术和方法, 如染料激光调谐, 法布里-珀罗光谱仪微弱信号分析, 喇曼散射测量以及用于光通信和环境污染监测系统等。人们也在探讨利用 AOF 的多波长调谐能力, 组成具有“与”、“否”、“或”等功能的滤光器二维列阵, 然后与 CCD 或 CID 光电探测列阵配合, 对获得的多重信号进行并行数字处理。现在 AOF 的研制和应用已从可见光范围扩展到紫外^[15]和红外^[16]光谱区。人们对 AOF 的研制正处在方兴未艾的发展阶段, 在这里能不断地发现新的科学研究内容并找到更广泛的应用。

- [1] S. E. Harris, *J. Opt. Soc. Am.*, 59(1969), 744.
- [2] I. C. Chang, *Appl. Phys. Lett.*, 25(1974), 370.
- [3] I. C. Chang, *Electronics Letters*, 11(1975), 617.
- [4] T. Yano, and A. Watanabe, *Appl. Opt.*, 15-9(1976), 2250.
- [5] J. Berg Norman and N. Lee John, *Acousto-optic Signal Processing*, (1983), 153.
- [6] J. D. Feichtner and Gtliel, *SPIE Unconventional Spectroscopy*, 82(1976), 106.
- [7] J. Jacob and I. C. Chang, *SPIE Active Optical Devices*, 202(1979), 40.
- [8] W. S. Shipp, *Rev Sci Instrum.*, 47(1976), 565.
- [9] J. D. Feichtner, *IEEE Optical Computing Conference, International*, (1978), 55-66.
- [10] B. Bates et al., *Appl. Opt.*, 23-2(1984), 257.
- [11] I. C. Chang, *IEEE Trans.*, SU-23(1976), 2.
- [12] R. B. Wattson et al., *Icarus*, 27(1976), 417.
- [13] I. C. Chang, *IEEE J.*, QE-14-2(1978), 108.
- [14] C. Masuda, *URSI Int. Symp on Measurements in Telecommunications*, J-5(1977).
- [15] P. Katzka and I. C. Chang, *SPIE Active Optical Devices*, 202(1979), 26-32.
- [16] I. C. Chang, *SPIE. Practical Infrared Optics*, 131 (1978), 2-10.