

超声驻波光强调制器

于连生

(国家海洋局海洋仪器研究所)

提 要

本文介绍工作于拉曼-乃斯范畴的超声驻波光强调制器的原理、设计与测试问题。围绕调制度问题,提出了设计方法,并通过实验获得了20兆赫光强调制波形及声光介质中的声场照片,同时用两种方法对调制度进行了测量,得到了基本一致的结果。

一、基本原理

由声光效应可知,当光束通过有超声传播的介质时,光束将被衍射,这种衍射的原因是由于声波是弹性波。在弹性波传播的介质中存在弹性应变,因而,介质的密度,以及介质的折射率或介电常数都发生了相应的变化。这一折射率周期变化分布的介质,就如同一衍射光栅。根据拉曼-乃斯的相位光栅假设,可以导出各序衍射光强的表达式以及各序衍射光之间的交角^[1]。

当介质中的声场为驻波声场,衍射光束的强度将按二倍声频的规律变化,我们取出衍射光中的任一序作为信号光,于是就得到了强度调制光束。其调制频率为 $2f_{声}$,这可由驻波方程得到:

$$a = 2A \cos kx \sin \omega t \quad (1)$$

式中: a ——介质的质点位移;

A ——质点位移振幅;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 称为波矢;

ω ——声波角频率;

t ——表示时间。

分析(1)式,当 $\omega t = m\pi$ ($m=0, 1, 2, \dots$), 则 $\sin \omega t = 0$, $a=0$, 或 $t = m \frac{T}{2}$ ($T = \frac{1}{f_{声}}$), 这表明,每隔半个周期介质质点的位移出现一次零。在这些时刻,介质的密度是常数,折射率 n 不随空间变化。在 $t = m \frac{T}{2}$ 到 $(m+1) \frac{T}{2}$ 时间内, a 从0变到 $2A \cos kx$ ($a = 2A \cos kx$, 对应于 $\sin \omega t = 1$, $\omega t = (m+1) \frac{\pi}{2}$), 又下降到0。当光束通过这样一个声场,就如同通过一个可变的相位光栅。对应于 $a=0$ 的各个瞬时,我们认为光栅不存在;在 $a \neq 0$ 的时间内,折射率的变化从0到最大又下降到0,对光的衍射将从无逐渐到最强,然后恢复到无。对于零序衍射光,在 $a=0$ 的各个瞬时,光强最强,在 $a \neq 0$ 的时间内,由于衍射作用,光强一部分转移到高序衍射中,因此,零序衍射是从强到弱然后再变强。高序衍射光的强度也发生这种变化,只不过在时间上相差 $T/2$,即零序光最强时高序光最弱,零序光最弱时高序光最强。由于上述变化每发生一次,是在 $T/2$ 时间内,所

收稿日期: 1978年6月26日。

以光强变化的频率是二倍声频 $2f_{声}$ 。超声驻波光强调制器外形如图 1 所示。

压电石英换能器辐射的超声波，通过粘结层进入声光介质，一般对固体材料其声阻抗远大于空气的声阻抗，因此，辐射的超声波在 A 面形成近似的全反射，使介质的厚度 $H = n \frac{\lambda}{2}$ (n 为大于 0 的正整数， λ 为超声波长)，则介质中的声场便为驻波声场。当波长为 λ 的激光束垂直声波传播方向通过调制器时，将出现多序衍射光。用光阑遮住高序衍射光，则零序光可看作光强调制频率为 $2f_{声}$ 的信号光。其调制度定义为：

$$M \equiv \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

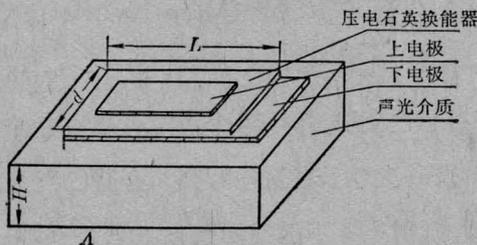


图 1 超声驻波光强调制器

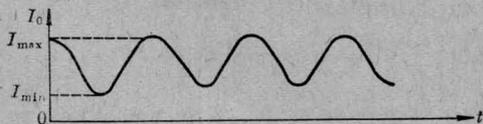


图 2 被调制的零序光强

在不考虑介质对声的衰减及对光的损耗的情况下，即介质中的声场是理想的驻波场，则在驻波振幅 $a=0$ 的各个瞬时，介质内无声场存在，介质相当于一块光学玻璃，此时，入射光 I_{λ} 通过介质不产生衍射，则零序光强的极大值 $I_{\max} = I_{\lambda}$ ，在 $a = 2A \cos kx$ 的各个瞬时，调制器对入射光的衍射最强，此时零序光的光强即为极小值 I_{\min} 。适当选取输入声功率，使得 $I_{\min} = 0$ ，调制度 M 可达 100% (参看图 2)。但如上所述，介质中的驻波是由辐射波与 A 面的反射波迭加而成，由于介质对

声波有吸收、反射损耗，因此辐射波振幅 A_{λ} 不等于反射波振幅 $A_{反}$ ，并且随空间而异。由此可知，此种调制器零序衍射光的调制度必小于 100%。

二、超声驻波光强调制器的设计

如果假定：(1) 入射光是单色平面光；(2) 声波是平面纵波；(3) 声强不大以致于声波引起的应变与折射率变化 Δn 的关系是线性的；(4) 介质对光与声的衰减忽略不计，可得到零序衍射光强与时间的关系式^[2]为：

$$I_0 = C J_0^2(\Delta\varphi_0 \cos \omega t) \quad (3)$$

式中： J_0 是零阶贝塞尔函数； C 是比例系数； $\Delta\varphi_0$ 表示由声波引起的光波相位差幅值。

$$\Delta\varphi_0 = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{2M_2 \frac{l}{d} W} \quad (4)$$

式中： M_2 ——声光介质的品质因数；

l ——压电换能器长度；

d ——压电换能器宽度；

W ——输入声功率。

当 $\Delta\varphi_0 = 2.405$ ， $\cos \omega t = 1$ ，在此情况下，恰好是零阶贝塞尔函数的第一个节点，因此， $I_0 = 0$ ，即 I_{\min} 为零；当 $\Delta\varphi_0 = 2.405$ ， $\cos \omega t = 0$ ，则 $I_0 = C$ ，于是得到最佳调制。由 (4) 式可求得获得最佳调制的输入声功率为：

$$W_a = 0.29 \frac{\lambda^2}{M_2} \frac{d}{l} \quad (5)$$

由于超声驻波光强调制器是工作于拉曼-乃斯范畴，在拉曼-乃斯衍射条件下要求^[1]：

$$2\pi l \lambda / A^2 \leq 1 \quad (6)$$

根据上面的讨论，我们来确定器件的外形尺寸。

(1) l 的选取

由 (6) 式，为了可靠起见，取 $2\pi l \lambda / A^2 = \frac{1}{2}$ ，给出 l 的上限尺寸：

$$l \leq \frac{1}{4\pi} \frac{A^2}{\lambda} \quad (7)$$

由(5)式得:

$$l = 0.29 \frac{\lambda^2}{M_2} \frac{d}{W_a} \quad (8)$$

这说明, 最佳输入声功率与 l 成反比。为了降低最佳输入声功率, 要求 l 越大越好。(8)式给出了 l 的下限尺寸。一般取:

$$l = \frac{1}{4\pi} \frac{A^2}{\lambda} \quad (9)$$

(2) d 的选取

首先要考虑光斑直径 D , d 必须大于 D 。为了不破坏光栅模型, 要求:

$$D \gg \frac{A}{2} \quad (10)$$

由(5)式得:

$$d = \frac{1}{0.29} \frac{M_2}{\lambda^2} l W_a \quad (11)$$

这说明 d 越小, W_a 越小, 因此, d 尽可能小些好。综合考虑, 一般取:

$$d = 1.2D = (5 \sim 10) \frac{\lambda}{2} \quad (12)$$

(3) H 的选取

为了形成驻波, 首先要满足:

$$H = n \frac{A}{2} \quad (n \text{ 为大于 } 0 \text{ 的正整数}) \quad (13)$$

考虑到介质对声的吸收, H 尽可能小些好, 同时要满足通光孔径的需要, 一般取:

$$H = d = n \frac{A}{2} \quad (14)$$

上述尺寸除 H 外, 均指换能器的长度和宽度, 即声场的长度和宽度, 为了减小介质的四壁对声的多次反射, 介质的长度和宽度应大于声场的长度和宽度。

(4) 介质的加工精度。

(a) 平行度 介质的 A 面与粘结面的平行度对相位均匀性有很大影响, 因此必须精细加工。实验表明, 一个工作于 10~15 兆赫的声光调制器, 其 A 面与粘结面的平行度差要小于 10 秒。

(b) 介质的进光面、出光面和粘结面都

要求有很高的平整度。因为好的声光介质一般折射率都比较大, 进光和出光面的光圈数稍大, 就会使出射光的波阵面严重畸变。特别当局部光圈不规则时, 衍射光无法分开。一般要求面形小于 1/2 光圈。

三、超声驻波光强调制器的测试

超声驻波光强调制器的测试工作主要是指对调制器的调制波形、调制度 M 及声场的测量。

(1) 调制波形观察 由前面的分析可知, 如果超声波的频率为 f_m , 则调制光强的变化频率就是 $2f_m$ 。如果 f_m 足够高, 则可得到高频调制光。对于这种高频调制光, 可以通过观察波形束看其是否为不失真的正弦调制。例如, 在一个超声频率为 10 兆赫的系统中, 为了观察到被此系统调制了的 20 兆赫的光信号, 采用了如图 3 所示的实验方框图。



图 3 调制波形观察方框图

此实验通过光电转换, 可直接在示波器上观察到 20 兆赫光信号波形。在实验中采用了 LC 回路作为光电倍增管的阳极负载。所用的光电倍增管为国产 GDB-23 型, 它的说明书中给出了如下的交流参数:

- ① 阳极与所有倍增极的电容 6 微微法
- ② 渡越时间分散 20 毫微秒

由上述参数可看出, 它们对于 20 兆赫的信号来说影响不大, 但是如果采用 RC 阳极负载, 却无法得到 20 兆赫的光信号波形。那么影响频率响应的因素到底是什么? 现在我们来分析一下光电倍增管的输出回路, 参看图 4。

图 4(a) 中的 R_L 是光电倍增管的阳极负载电阻, C_s 是阳极到地的分布电容, R_i, C_i 分别为后级放大器的输入电阻和电容。为了分

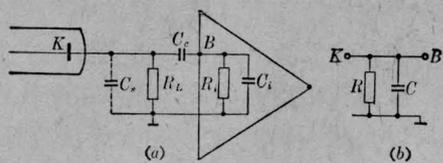


图4 光电倍增管的输出回路
(b)是(a)的等效电路

析方便,我们画出了图(a)的等效电路图(b),其中, $R=R_L \parallel R_i$, $C \approx C_s \parallel C_i$ 。当光电倍增管阳极 K 输出一个 20 兆赫的光电信号,经过这样一个 RC 回路,其波形失真与否主要决定于 RC 时间常数。当 $RC > T_0 = \frac{1}{f_0}$, 则 B 点波形失真。参看图 5(b)。当 $RC \leq T_0$ 时, B 点波形与 K 点波形是线性关系,参看图 5(c)。决定光电倍增管频率响应上限的主要因素是输出回路的 RC 时间常数,其频率响应上限可表示为:

$$f_{\max} = \frac{1}{RC} \quad (15)$$

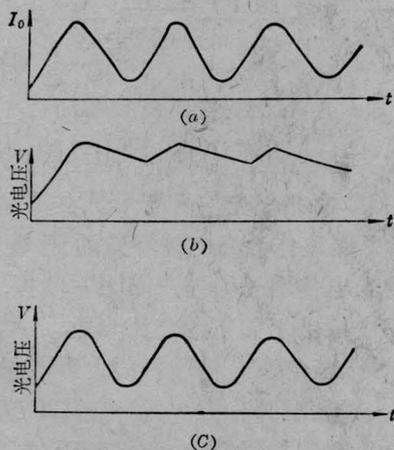


图5 光电倍增管输出波形与 RC 的关系

(15)式是在光电倍增管本身的交流参数对接收频率可略去不计的情况下才能成立,否则还要考虑交流参数的影响。为了增大 f_{\max} , 则必须减小 RC。为此,我们采用了如图 3 所示的 LC 回路。使得:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 20 \text{ 兆赫} \quad (16)$$

采用这样的阳极负载,有效地提高了光电倍增管的频率响应,很好地抑制了低频噪声。图 6 是所摄得的 20 兆赫光电信号的波形,(a)图中时标为 10^{-2} 微秒。

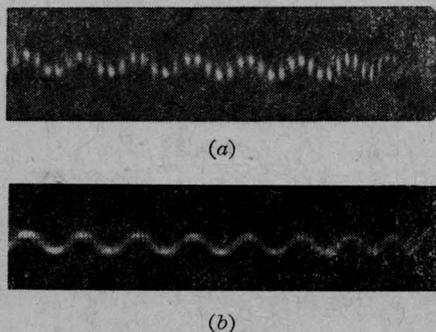


图6 20兆赫光电信号波形

(2) 调制度 M 的测量 由(2)式可知只要测出 I_{\max} 与 I_{\min} 就可计算出调制度 M。为了达此目的,我们采用图 7 所示的实验方框图。在图 7 中,被调制的零级光进入光电倍增管,在光电倍增管的阳极分别用高频电压表、直流电压表测出 $V_{\text{交}}$ 及 $V_{\text{直}}$, 则调制度 M 由下式给出:

$$M = \frac{RV_{\text{交}}}{2Q\rho V_{\text{直}} - V_{\text{交}}R} \quad (17)$$

$$Q = \frac{\rho}{r} = \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{\omega C r} \quad (18)$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (19)$$

r——回路的损耗电阻。

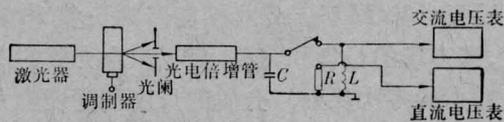


图7 调制度测量方框图

下面分析(17)式的推导过程。参看图 2。 I_{\max} 正比于光电流 i_{\max} ; I_{\min} 正比于光电流 i_{\min} 。光电流 $i_{\max} = \frac{V_{\max}}{z}$, 这里 V_{\max} 是阳极负载上的电压极大值,也即 $V_{\text{直}}$ 。这是因为,在测量直流电压时,阳极负载电阻 R 很大,因此, RC 时间常数很大。在高频交变电

压作用下, 电容 C 来不及放电, C 两端的电压一直维持峰值, 也即 R 两端的电压为 $V_{直} = V_{max}$, $Z \approx R$, 所以, $i_{max} = \frac{V_{max}}{Z} = \frac{V_{直}}{R}$ 。再看 i_{min} , $i_{min} = i_{max} - \frac{V_{交}}{Q\rho}$, 因为 $Q\rho$ 是谐振时 LC 回路的等效阻抗, 而 $\frac{V_{交}}{Q\rho} = i_{交}$, 所以 $i_{min} = i_{max} - \frac{V_{交}}{Q\rho}$ 。这样我们由 2 式得到:

$$M = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{i_{max} - i_{min}}{i_{max} + i_{min}} = \frac{RV_{交}}{2Q\rho V_{直} - V_{交}R} \quad (20)$$

下面介绍一种更为简便的测量方法, 可与上述方法进行比较。测试结果参看附表。其方框图如图 8。

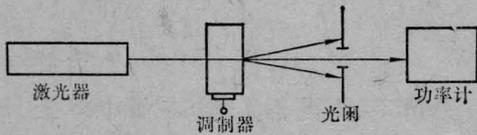


图 8 调制度测量方框图

图 8 中, 功率计测量零序光的时间平均光功率, 在调制器工作时, 零序光是被调制的交变光, 由于功率计只能测出平均光功率, 因此, 这时功率计的指示为 $\bar{I} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$ 。在声吸收不大的情况下, 压电换能器不工作时, 功率计的指示近似为 I_{max} , 代入 (2) 式得到调制度 M :

$$M = \frac{I_{max} - \bar{I}}{\bar{I}} \quad (21)$$

如果考虑声吸收, 应加一修正。(21) 式改为下述形式:

$$M = \frac{(I_{max} - \Delta I) - \bar{I}}{\bar{I}} \quad (22)$$

式中 ΔI 由实验给出。

序号	I_{min} (毫瓦)	I_{max} (毫瓦)	M	$V_{交}$ (毫伏)	$V_{直}/R$ (微安)	M	说 明
I	3.5	6.5	0.85	243	45	0.82	$Q\rho=6$ 千欧
II	11	14	0.27	180	80	0.23	强 光
	8	10	0.25	119	55	0.22	弱 光

注: I、II 分别代表 I 号调制器与 II 号调制器。

(3) 声场观察 根据别尔格曼的工作^[3], 当一束发散光通过声场, 穿过声场投于屏上的光就显示出声场的图象。我们采用高相干性的激光作光源, 获得了十分清晰的 ZF-6 玻璃中的驻波声场的照片。图 9(a) 是实验装置示意图, (b) 是 10 兆赫声驻波的照片。

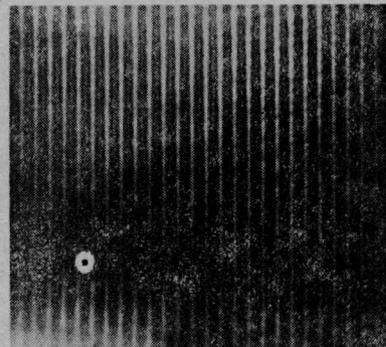
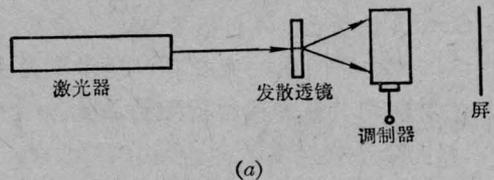


图 9 声场观察图

参 考 文 献

- [1] 李荫远, 杨顺华;《非线性光学》, 科学出版社, 1974 年第一版。
- [2] B. D. Cook, E. A. Hiedeman; *J. Acoust. Soc. Am.*, 1961. **33**, No. 7, 945~948.
- [3] L. 别尔格曼;《超声》, 国防工业出版社, 1964 年 9 月第一版, 第 177~187 页。