

海洋技术研究所声光技术研究近况

于连生

(国家海洋局海洋技术研究所)

(1989年2月3日收到)

本文简介我们所近五年来声光技术研究的近况。内容包括：声光相互作用理论研究；声光器件的制作工艺研究；声光器件的测试方法研究；部分声光器件及其应用研究。

国家海洋局海洋技术研究所从1974年开始作声光技术方面的研究工作，取得了一些进展，并为国内二十多所大专院校和科研单位提供了多种实用声光器件。本文简介近五年来的一些研究情况。内容包括：声光相互作用理论；声光器件的制作工艺；声光器件的测试方法；部分声光器件及其应用。

一、声光相互作用理论研究

已有的声光相互作用理论^[1-4]，已给出了R-N衍射和Bragg衍射的解析解，对“过渡区”情况，只有数值计算结果而没有解析解^[2]。最近，我们在已有理论的基础上，同时注意到声光相互作用过程是发生在载声介质内部，而观察到的衍射光是在介质外部这样一个事实，对声光衍射理论作了新的探讨。我们利用耦合波理论，对介质内的声光相互作用过程进行处理；利用Raman和Nath的相位积分理论处理光的传播过程。最后，得到了声光衍射的普遍解。从这一普遍解中，可以导出R-N衍射、正常和反常Bragg衍射、以及Bragg方程，Dixon方程等已有结果。并很好地解释了斜入射时，衍射光的不对称分布、衍射状态的判据等问题。

我们对声光衍射的物理过程作如下描述

1. 发生于载声介质内部的声光相互作用过程

超声波在介质中传播，激发介质产生极化，这种极化具有与超声波相同规律的时空分布。两相邻的具有相同极化的层之间的距离为超声

波长 Λ 。入射光以任意角度 θ_i 射入声光相互作用介质后与极化场相互作用，产生光散射。由于动量守恒条件的限制，散射光只出现于两个方向上。其一沿入射光方向即 \vec{k}_i 方向，形成透射光；其二沿 \vec{k}_d 方向，形成反射光。 \vec{k}_d 的方向由动量守恒条件

$$\vec{k}_d = \vec{k}_i \pm r\vec{K} \quad (r = 0, \pm 1, \pm 2 \dots) \quad (1)$$

决定。式中 r 的大小由图1中的 θ_i 和 θ_B 决定。

$$\theta_i / \theta_B = r + \delta \quad (2)$$

θ_B 是Bragg角。由于一般 $\theta_i / \theta_B \neq$ 整数，其余数用 δ 表示。考虑到光子和声子是不连续的，我们规定： $\delta < 1/2$ 取零； $\delta > 1/2$ 取1。

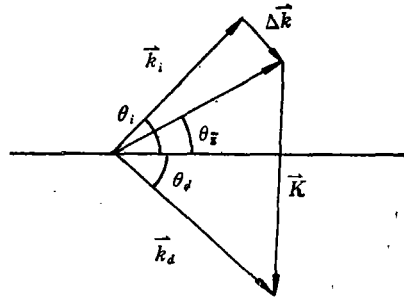


图1 声光相互作用动量图

2. 散射光的传播过程

这一过程分两步。首先，在介质内部，随着前一个散射过程的结束和后一个散射过程的继续，光波向前传播，透射部分和反射部分光波的等相位面将发生改变。

由于声光相互作用产生的光散射发生于一个

体积之内,因此,它是一个多次重复散射的过程.在第一次散射中出现于透射方向上的散射光,在第二次散射中将有一部分被散射到反射方向上去,反之亦然.依此类推,有所谓互相耦合.总的透射和反射是多次散射多次耦合的最后效果.这种过程的数学描述,事实上就是我们熟知的耦合波方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial^2 (\Delta \mathbf{P})}{\partial t^2} \quad (3)$$

在这里,对于方程中的 $\Delta \mathbf{P}$ 我们作了一点不同于以往的解释. [3] 认为, $\Delta \mathbf{P}$ 是声致极化强度改变,我们认为, $\Delta \mathbf{P}$ 是超声波与光波共同引起的极化强度改变.这种差别是因为以往的理论中用 \mathbf{E} 矢量近似地代替 \mathbf{D} 矢量.

对(3)式的求解,得结果如下^[3]:

$$R = |\eta_d L|^2 \left(\frac{\sin T L}{T L} \right)^2 \quad (4)$$

(4)式在已有理论中,认为描写的是动量矢配时一级光的衍射效率,在这里我们认为它是介质内部的反射系数.

对于出射面上反射和透射光波的等相位面,参照 R-N 理论^[4],通过光程计算,得到透射光和反射光的相位表达式.最后通过求解如下的相位积分

$$E_t = \int_{-q'/2}^{q'/2} \sqrt{T'} \exp \left\{ i \left[k_t (l - \sin \theta_i) y + \frac{\Delta \phi_t}{\cos \theta_i} \frac{\sin (K L \operatorname{tg} \theta_i / 2)}{(K L \operatorname{tg} \theta_i / 2)} \sin K y \right] \right\} dy \quad (5)$$

$$E_d = \int_{-L \operatorname{tg} \theta_i / 2}^{L \operatorname{tg} \theta_i / 2} \sqrt{R} \exp \left\{ i \left[A y + \frac{2 \Delta \phi_d}{K L \sin \theta_d} \sin \left(\frac{K L \operatorname{tg} \theta_d}{2} \right) \sin K D y \right] \right\} dy \\ \times \sum_{n=-N/2}^{N/2} e^{i k_n A l \sin (\theta_p - \theta_d) - n_s \sin \theta_i} \quad (6)$$

得到了透射部分和反射部分在远处空间一点 P 形成的衍射光:

$$E_t = \sqrt{T'} q' J_m(\nu_1) \\ \times \frac{\sin [k_t (l - \sin \theta_i) - m K] q' / 2}{[k_t (l - \sin \theta_i) - m K] q' / 2} \quad (7)$$

$$E_d = \sqrt{R} L \operatorname{tg} \theta_i J_p(\nu_2) \\ \times \frac{\sin (A - p D K) L \operatorname{tg} \theta_i / 2}{(A - p D K) L \operatorname{tg} \theta_i / 2} \\ \times \sin \left\{ \frac{A}{2} (N + 1) [k_d \sin (\theta_p - \theta_d) - k_t \sin \theta_i] \right\} / \sin \left\{ \frac{A}{2} [k_d \sin (\theta_p - \theta_d) - k_t \sin \theta_i] \right\} \quad (8)$$

其中, $N + 1 = q' / \Lambda$, $q' = q / \cos \theta_i$, q 是入射光束宽度; T' 和 R 分别为透射和反射参数. m, p 为整数,它们之间的关系为:

$$p = (m + r) / D.$$

$$l = \sin (\theta_m + \theta_i), \quad (9)$$

$$A = \frac{k_t}{\sin \theta_i} - k_t \sin \theta_i - \frac{\operatorname{ctg} \theta_i}{\cos \theta_d} k_d - k_d D \sin (\theta_p - \theta_d), \quad (10)$$

$$D = \operatorname{tg} \theta_d / \operatorname{tg} \theta_i, \quad (11)$$

$$\nu_1 = \frac{\Delta \phi_t}{\cos \theta_i} \frac{\sin (K L \operatorname{tg} \theta_i / 2)}{(K L \operatorname{tg} \theta_i / 2)}, \quad (12)$$

$$\nu_2 = \frac{\Delta \phi_d}{\cos \theta_d} \frac{\sin (K L \operatorname{tg} \theta_d / 2)}{(K L \operatorname{tg} \theta_d / 2)}. \quad (13)$$

P 点总的衍射光为:

$$E^2 = E_t^2 + E_d^2 + 2 E_t E_d \\ \times \cos \left[\frac{k L}{2} (\operatorname{tg} \theta_i + \operatorname{tg} \theta_d \sin (\theta_m + \theta_i)) \right] \\ = E_t^2 + E_d^2 + 2 E_t E_d \cos \\ \times \left[\frac{k L}{2} (\operatorname{tg} \theta_i + \operatorname{tg} \theta_d) \sin (\theta_p - \theta_d) \right] \quad (14)$$

本式就是我们得到的声光衍射的完整表达式.当满足下述关系时,(14)式取极大值:

$$l - \sin \theta_i = m \frac{K}{k_t}, \quad (15)$$

$$A - p D K = A - (m + r) K = 0, \quad (16)$$

$$k_d \sin (\theta_p - \theta_d) - k_t \sin \theta_i = (m + r) K, \quad (17)$$

$$\frac{1}{2} k L (\operatorname{tg} \theta_i + \operatorname{tg} \theta_d) \sin (\theta_m + \theta_i) \\ = 2 m \pi, \quad (18)$$

$$\text{或 } \frac{1}{2} kL(\text{tg}\theta_i + \text{tg}\theta_d) \sin(\theta_p - \theta_d) = 2(m+r)\pi. \quad (19)$$

由(7)~(19)式,我们得到如下结果.

(1) 远场衍射光的强度由介质内的透射和反射两部分光束形成,因此一般情况下,衍射光斑会出现不对称分布;出现于反射一侧的光斑数多,而另一侧少,这与实验结果相同.

(2) 当 $\theta_i = 0$, 由(7)(8)(14)(15)式得:

$$E_i = E_r = T'q'J_m(\Delta\phi),$$

$$\sin\theta_m = m \frac{K}{k_i}.$$

这就是 R-N 衍射的结果.

(3) 当 $\theta_p = 0$, 由(16)(17)式,分别令 $m+r=0$ 和 1, 可得到 Dixon 方程:

$$k_i \cos\theta_i - k_d \cos\theta_d = 0,$$

$$k_i \sin\theta_i + k_d \sin\theta_d = K.$$

考虑到 $\text{tg}\theta_i \approx \text{tg}\theta_d$ 且等于 Λ/L 时有

$$E_i = \sqrt{T'} q',$$

$$E_d = \sqrt{R} q' L \text{tg}\theta_i / \Lambda = \sqrt{R} q' \{K^2 L / 2k\} = Qq \sqrt{R}.$$

这就是反常 Bragg 衍射的结果. 当 $k_i = k_d = k$, 即得各向同性声光 Bragg 衍射的结果.

(4) 由上式可知, Klein 和 Cook 给出的声光衍射状态的判据: $Q = K^2 L / 2k \cos\theta_i$, 在物理上表示的是: 入射光在介质内部间隔为 Λ 的区域的那一部分, 其中能与该区间的边界相遇产生反射的部分即 $L \text{tg}\theta_i$, 与该区间总的入射光即 $\Lambda \cos\theta_i$ 之比. 当此比值大于 1, 才能出现 Bragg 衍射. 除此之外, 还必需满足动量匹配条件. 当此比值小于 1/2, 介质内只有透射部分, 这就是 R-N 衍射.

二、声光器件的制作工艺

制作体波器件的关键工艺, 主要是把压电换能器和声光互作用介质粘合在一起的键合工艺, 以及把已键合在互作用介质上的换能器进行减薄的工艺.

目前国内外经常采用的键合工艺有三种

1. 真空冷压工艺

这种工艺是将换能片和声光介质在镀膜机上同时蒸镀钢、锡等软金属材料, 然后在室温和高真空下立即压合, 真空冷压工艺要求在真空罩内装一套加压装置, 因此需要对镀膜机作比较复杂的改装. 由于真空罩内空间的限制, 每次只能压合一块器件, 工效低, 成本高.

2. 真空热压工艺

这种工艺是将换能片和声光介质的压合面先蒸镀金属膜, 从镀膜机内取出后, 用专门夹具将换能片和声光介质夹紧在一起, 然后再放进镀膜机的真空罩内, 在高真空条件下加热到接近金属膜的熔点, 靠热扩散键合. 这种焊接方法由于温度不易控制, 冷却后总有剩余应力, 在进一步减薄时容易导致换能片碎裂. 另外这种焊接需要两次真空操作, 因此工效也很低.

3. 超声焊接工艺

超声焊可用任意金属作焊层, 并可在大气条件下进行. 超声焊有纵焊法和横焊法两种. 纵焊是指超声振动方向与焊接面平行. 横焊是指超声振动方向与焊接面垂直. 焊接时要同时加一定的静压力, 这种工艺较前两种工艺具有设备简单, 大气中操作的优点, 但一般认为工艺条件不易掌握.

我们在上述三种工艺的基础上研究了一种在大气条件下进行压焊的新工艺. 这种焊接工艺操作简单, 工效高, 成本低, 已成功地制成了多种不同尺寸的声光器件. 工作频率在 100 MHz 以内的多种器件已成批向用户提供.

关于减薄工艺 国外报导, 用普通的机械研磨可成功地将换能片减薄到 $10\mu\text{m}$ 左右, 进一步减薄需要用射频溅射加工. 我们实验室用机械研磨已成功地将 LN 换能片减薄到 $30\mu\text{m}$ 以内, 石英晶片已减薄到 $10\mu\text{m}$ 左右.

三、声光器件的测试

1. 声光器件的电输入特性测量

测量框图如图 2 所示. 对于驻波器件. 由

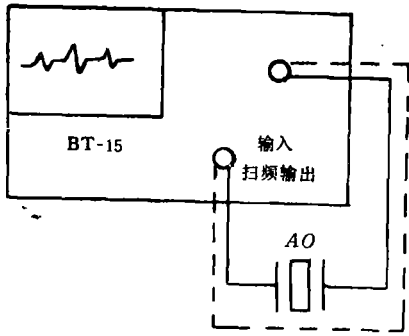


图2 电输入特性测量方框图

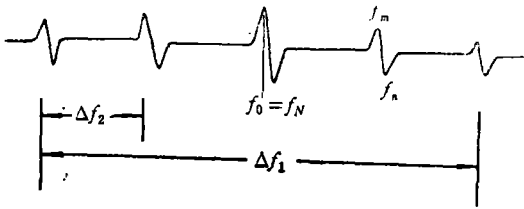


图3 驻波器件的幅频特性曲线

BT-15 扫频图示仪测到的幅频特性曲线如图 3 所示例。图 3 中 Δf_1 给出了驻波声光器件的换能器带宽。声光相互作用介质是压电换能器的声学负载， Δf_1 越大，表示换能器片与声光介质的键合质量越好，键合层的传输损耗小。测量 Δf_1 是检验键合质量的一种方便有效的方法。

$\Delta f_2 = V_s/2d$ ，其中 V_s 是声光相互作用介质中的声速， d 是声光相互作用介质在声传播方向上的厚度。测量 Δf_2 ，可以方便地得到介质中的声速值，同时也是检验介质厚度和平行度的有效方法。

f_m 和 f_n 是声光相互作用介质在共振频率 f_r

处的最大和最小导纳频率， $f_r = rv_2/2d$ ， r 为正整数。 $|f_m|$ 和 $|f_n|$ 最大处即换能器的中心频率 f_0 。利用 f_m 和 f_n 可由公式

$$K^2 = \frac{f_n^2 - f_m^2}{f_n^2}$$

求得相互作用介质的机电耦合系数 K 。

f_m 与 f_n 处导纳的绝对值之差就是导纳圆的直径 $1/R$ 。 $1/R$ 越大，介质内部的超声能量转换损耗越小。因此，由 f_m 和 f_n 处对应的幅度差可以方便地测定声光相互作用介质的机械能量损耗性质。

对于超声波器件，图 4 是幅频特性曲线例。图 4 表明，声光相互作用介质作为压电换能器的声学负载使换能器的品质因数下降。带宽展宽。曲线越平坦，表明声光相互作用介质吸收



图4 行波器件的幅频特性曲线

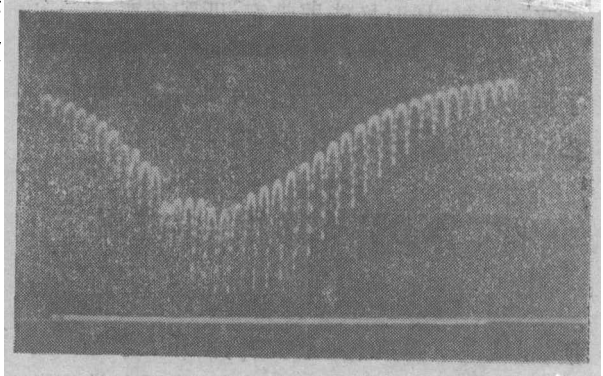


图5 接入匹配网络后的幅频特性

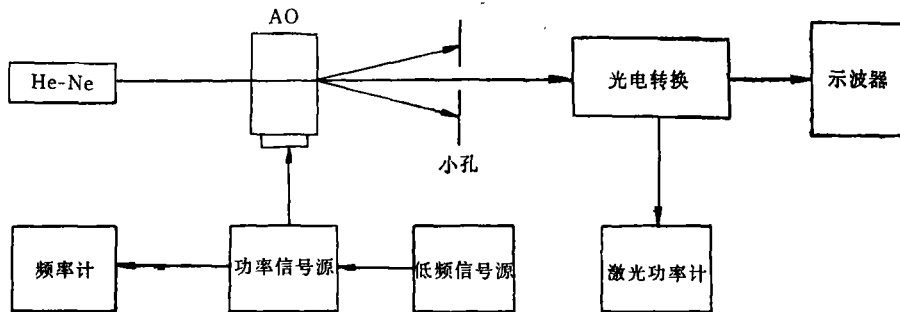


图6 光学测量框图

表1 声光器件性能对照表

| 生产厂家 | 型号 | 光波长 | 类型 | 衍射效率 | 驱动功率 | 中心频率 |
|------|----------|-----------------------|------|-------------|------|-------|
| 海洋所 | AOQ-40 | 1.06 μm | Q 开关 | 50% | 2W | 40MHz |
| 国外 | AQS-244A | 1.06 μm | Q 开关 | 40% | 10W | 24MHz |
| 海洋所 | AOM-50 | 1.06 μm | 锁模 | 50% | 1W | 50MHz |
| 国外 | ML-500 | 1.06 μm | 锁模 | 50% | 5W | 50MHz |
| 海洋所 | YZY3-1 | 0.4—0.7 μm | 调制 | ± 6 级衍射 | 2W | 10MHz |

的声功率越大。用点电极逐点测量,根据曲线峰值点的移动,可测出换能片的平行度。图5是接入匹配网络的情况。该曲线同时给出了匹配带宽和匹配效果。匹配处与零线之间的高度,反映了失配的大小。

2. 声光器件的光学测量

利用图6所示的装置,可以测量以下结果:衍射效率;衍射效率与驱动电功率的关系;衍射效率与入射角的关系;驻波器件的光强波形和调制度^[5-7];驻波器件的衍射带宽;声光相互作用介质中的声速;行波器件中有无驻波成分;调制带宽和渡越时间;换能器带宽;匹配带宽。

由电输入特性测量和光学测量,即可完全了解声光器件的各种性能、电学测量在整个工艺过程中都是一种有效的测量手段。

四、部分声光器件及其应用

我们实验室已先后为中国科学院上海光机所,机械电子委第十一研究所,南开大学等国内二十多家科研单位和大专院校提供了各类声光器件上百套。最近天津市经委技术改造投资服

务公司和海洋技术研究所联合投资九十万元,在我们实验室的基础上创办了“津海高技术开发服务有限公司”,建成了我国第一家专业化声光技术科研、生产、开发单位,计划年产值60万元。并可承办各种形式的学术交流活动。为从事声光学方面研究的技术人员提供实验条件。

下表是我们研制的部分器件的性能简表以及与目前国外同类产品的比较、所列器件已分别在国内外研制的激光划片机,微微秒脉冲激光系统中得到应用。YZY3-1型驻波器件,专为教学设计,配有详细的使用说明书。

参 考 文 献

- [1] 徐介平,声光器件的原理、设计和应用,科学出版社,1982,349—354.
- [2] Klein. W. R., Cook, B. D., *IEEE Trans. Sonics Ultrason*, SU-14, (1967), 123.
- [3] Chang. I. C., *IEEE Trans. Sonics Ultrason*, SU-23 (1976), 2.
- [4] Raman. C. V., Nath. N. S. N., *Proc. Ind. Acad. Sci. A*, 2 (1935), 406, 413; *ibid.*, 3 (1936), 75, 119, 459.
- [5] 于连生,激光,6-6(1979), 33.
- [6] 于连生,物理,10-5(1981), 291.
- [7] 于连生,激光,7-8(1980), 38.