

# 声光偏转玻璃

马英仁

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

## 一、引言

声和光是两类不同性质的波：声是机械振动所产生的波，而光是电磁波。但是，这两类波却可以相互作用。当光按一定的方向通过一个介质内的超声波场时，超声波能够使光发生衍射、反射、会聚或使光频移动。这种光被介质中超声波衍射或散射的现象称为声光效应，具有声光效应的玻璃材料叫做声光偏转玻璃，简称声光玻璃。

随着激光应用领域的扩展，光偏转技术越来越引起人们的注意。十多年来，声光偏转技术因具有器件结构简单、成本低廉、偏转点容量大，而且还可以随机存取，所以在激光存贮、显示技术、激光传真以及激光加工等方面很有发展前途。在实用应用上，寻求优质的声光偏转材料乃是声光偏转技术的关键问题。

从六十年代末到七十年代初，是研制声光材料最活跃的时期。当时美国贝尔实验室提出钼酸铅 ( $\text{PbMoO}_4$ ) 晶体<sup>[1]</sup>，日本电报电话公司也几乎同时发表了氧化碲 ( $\text{TeO}_2$ ) 晶体，不久松下电气公司又试制成碲玻璃等声光偏转材料。

声光品质因数和声吸收是衡量声光材料性能的两个主要指标。但从经验得知，这两个性能指标难以同时得到满足。由于这个缘故，应按使用目的，看哪个因素占主导地位而折衷选择。玻璃的声光性能通常比晶体差些，这是由于玻璃体内的无序结构所决定的。

当频率提高时，由于玻璃对超声波的吸收剧增，因而限制了它在高频段的使用。但在小于100兆赫的频段内，声光偏转玻璃很有实用价值<sup>[2,3]</sup>加之制造方便，形状尺寸不受限制，通过退火处理可达到光学均匀，因而声光玻璃已成为一种重要的声光材料<sup>[4,5]</sup>。

## 二、声光偏转基本原理

### 1. 超声波对光的偏转作用

超声波是弹性应变的传播，当超声波传入到对光呈透明的介质中时，在光的弹性效应作用下，以超声波波长  $\lambda$  为周期、折射率  $n$  随超声波频率  $\Omega$  发生周期性的变化。早在1922年，布里渊就已把入射光由于超声波的作用所引起的衍射现象从理论上推导出来。1932年，德拜和歇尔等人从实验中发现了这一现象。

存在超声场的声光介质相当于一个衍射光栅，其光栅常数就是超声波波长  $\lambda$ ，声光偏转正是利用光在通过光栅时能产生衍射现象来实现的。当介质厚度较窄(图1左L较小)或超声频率太低(即波长  $\lambda$  较大)时，光进入介质只通过若干个波面，这时的介质相当于一个平面光栅，衍射光分成很多级：除零级衍射光外，还有一级衍射光、二级衍射光……这叫做喇曼—纳斯衍射(图1左)。

当介质较宽(L较大)或超声频率较高( $\lambda$  较小)时，光进入介质后经过很多波面，这时的介质就相当于一个体光栅，除一级衍射光外，其它各级衍射光均消失<sup>[6]</sup>。当入射光满

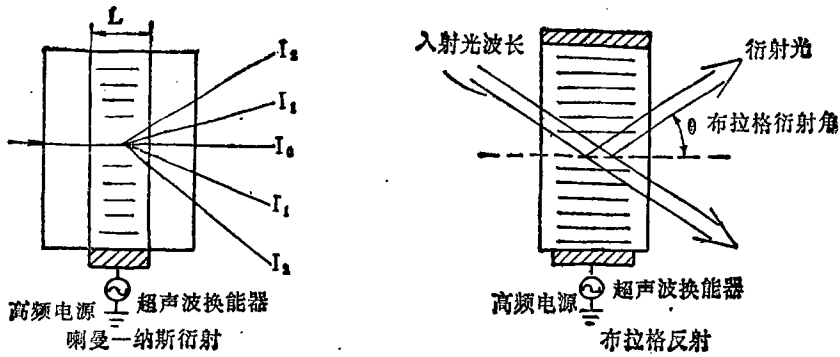


图1 声光衍射原理

足布拉格条件  $\sin\theta = \frac{\lambda}{2X}$  (式中  $\lambda$  为入射光波长), 将产生显著的衍射效应而使光束发生偏转(图1右)。此时发生布拉格衍射。

### 2. 声光偏转的基本表示式

当  $\theta$  角很小时, 布拉格条件式近似为  $\theta = \frac{\lambda}{2X} = \frac{\lambda f}{2v}$ , 式中  $f$  和  $v$  分别表示超声频率和传播速度。偏转角  $\alpha$  代表衍射光和入射光之间的夹角,  $\alpha = 2\theta = \frac{\lambda}{v} f$ , 因而通过超声频率  $f$  的改变, 就可使偏转角作相应的线性变化。

由于声光介质尺寸有限, 设介质高度为  $H$ , 可分辨点数  $N$  表示为  $N = \frac{H}{v} \cdot \Delta f$ 。令  $\frac{H}{v} = \tau$ , 则  $\tau$  反映了超声波渡越整个介质长度所需的时间, 即  $N = \Delta f \cdot \tau$ , 这时渡越时间  $\tau$  正是光束从一个位置偏转到另一个位置所需的时间(随机存取时间), 因而  $\frac{1}{\tau}$  反映了偏转速度。

### 3. 作为声光偏转材料的必要条件

入射光强度  $I_0$  和衍射光强度  $I_1$  分别表示为  $I_0 = \cos^2\beta$ ,  $I_1 = \sin^2\beta$ ,  $\beta$  被定义为  $\beta^2 = \frac{1}{2}$

$$\cdot \frac{\pi^2}{\lambda^2} \left( \frac{P^2 n^6}{\rho v^3} \right) \left( \frac{L}{H} \right) P_A$$

式中  $P$ ——光弹性常数  $\rho$ ——介质密度  
 $V_A$ ——超声波速度  $P_A$ ——超声波能量  
 由该式看出, 偏转光的强度有如下特征<sup>[1]</sup>:

(1) 随超声能量的增加而增加, (2) 随光波长的增加而显著降低; (3) 与超声波的断面形状  $\left( \frac{L}{H} \right)$  有关, (4) 与组合的物质常数

$\left( \frac{P^2 n^6}{\rho V_A^3} \right)$  成比例。该常数反映了声光偏转材

料的性能的优劣, 称为品质因数(常用  $M$  表示)。其物理意义是: 在一定能量的超声波传入介质时, 表示该介质对所通过的光产生偏转光强度的大小。 $M$  值越大, 衍射光栅的幅度  $\beta$  也越大, 衍射光就越强, 光调制的效果也越好。图2为典型声光偏转介质的品质因数和吸收系数。

因此, 欲设计高效率的声光器件, 首先要选择高品质因数的材料。从介质的物理特性来看, 必须要选择折射指数高的、光弹性常数大的以及声速低的材料。因为低声速有利于增大光偏转角度, 并使可分辨光点数增多。为实现稳定的偏转特性, 要求声速的温度系数小。

此外, 对介质还要求在使用的长光波区透过率要高, 光学均匀, 并具有良好的化学稳定性。

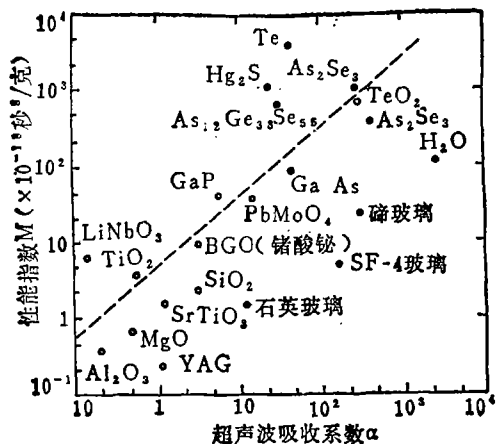


图2 典型物质的声光特性

### 三、声光偏转玻璃及其器件

#### 1. 石英玻璃

它是最早被考虑的声光介质材料，其主要性能如表1所示。它最大的优点是对超声

波的吸收特别小，现有的玻璃和晶体材料的吸收都比它大，但它的品质因数M值却是玻璃中最低的，故用它做成的偏转器的效率不高，偏转光强度弱，可分辨点极少。然而石英玻璃的光学质量良好，对超声波的衰减小，元件的尺寸可以做得很大，用作激光器的内腔调制仍然是很有用的。

再者，石英玻璃的膨胀系数极低，对超声波速度的温度系数小，适合作狄克逊和科恩提出的测量品质因数的标准材料<sup>[8]</sup>。

#### 2. 燧石玻璃

典型的燧石玻璃和重燧石玻璃在0.63微米光波长作用下的品质因数、光弹性常数以及吸收系数同时列于表1。德国西门子公司熔炼了28种重燧石玻璃<sup>[9]</sup>。通过热效应测试表明，其声光性能主要与热导、热膨胀和折射指数的温度系数有关。

#### 3. 硫系玻璃

表1 几种声光玻璃的性能

材 料	光 波 长 (微米)	密 度 (克/厘米 <sup>3</sup> )	折 射 率n (偏振方向)	声 速10 <sup>5</sup> (厘米/秒)	吸 收 系 数 (分贝/厘米)	光 弹 性 常 数 P <sub>11</sub> P <sub>12</sub>	品 质 因 数M (秒 <sup>3</sup> /克) × 10 <sup>-14</sup>
石英玻璃	0.633	2.20	1.457	5.95	3(500兆赫)	0.121 0.270	1.51
燧石玻璃	0.633	3.59	1.616	3.63	—	0.232 0.256	4.51
重燧石玻璃	0.633	6.17	1.96	3.26	3(40兆赫)	0.27 0.24	19
特重燧石玻璃	0.633	6.3	1.92	3.1	—	0.25	19
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> 玻璃	1.15	3.20	2.46	2.6	~10(150兆赫)	0.308 0.299	347
As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> 玻璃	1.15	4.64	2.89	2.25	3(80兆赫)	0.314 0.266	1090
Ge <sub>33</sub> As <sub>12</sub> Se <sub>55</sub>	1.06	4.40	2.70	2.52	7.1(100兆赫)	—	248

硫系玻璃包括硫化砷(As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)玻璃<sup>[10]</sup>、硒化砷(As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)玻璃<sup>[11]</sup>以及新近发展起来的砷-硫-锗玻璃和砷-硒-锗玻璃等<sup>[12,13]</sup>，它们具有良好的声光特性。由于其折射指数高，超声声速低，因而品质因数M值很大(表1)。

硫系玻璃透红外光而不透可见光，只有硫化砷玻璃对0.63微米的红光是透明的，它的声损耗较大，在频率150兆赫下的吸收为10分贝/厘米。

锗-砷-硫玻璃有特别低的声吸收，比石英玻璃还低。它用作红外声光器件具有很大的吸引力，同时它也是有希望的超声波延迟

材料。

声光偏转器件由声光介质、换能器、超声波吸收体以及吸热装置构成。换能器需要采用高效率、宽频带(即机电耦合系数大)的材料来制作，通常选用的是铌酸锂晶体材料。超声波吸收体的作用是把介质中的超声波变为行波，防止驻波的产生。吸声材料要和介质有良好的声阻抗匹配，且对超声吸收要大，常用的铅、铋和锡等金属材料是良好的吸声体。

图3是声光偏转器的示意图。一般情况下光束具有椭圆形截面。换能器尺寸H和L称

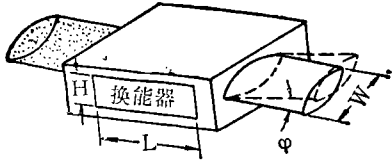


图3 简单的声光偏转器

在入射光通过超声场后,被偏转一个 $\phi$ 角,声波由换能器方向传播

为声速的腰部尺寸。

#### 四、碲玻璃及其声光器件

在透可见光的玻璃中,以碲玻璃为最佳,其品质因数 $M$ 值最高,并具有良好的光学质量和声光偏转性能。它对0.63微米红光的折射指数为2.09左右,其品质因数之所以高就是因折射指数大的缘故。由于碲玻璃的光谱带边缘趋于较长的波长区,故试样呈浅黄色。

##### 1. 碲玻璃的组成和制法<sup>[14]</sup>

碲玻璃是一种亚碲酸盐的氧化物玻璃,主要成分是二氧化碲,同时添加一些重金属氧化物如三氧化钨、氧化铅等,并添加适量的助熔物质(如氧化锂)。

用于声光偏转的碲玻璃,必须进行和一般的光学玻璃相同的熔融操作,即通过搅拌来消除气泡和条纹。

##### 2. 碲玻璃及其偏转器的声光性能<sup>[15]</sup>

碲玻璃的透光曲线如图4所示,对氩离子激光器发出的0.48微米的绿光和对氩-氟激光器发出的0.63微米的红光的透过率均超过70%。它对纵波的声吸收系数与频率的关系如图5所示,在超声频率100兆赫下的声损耗为3分贝/厘米,声吸收系数 $\alpha$ 与频率 $f$ 的关系为 $\alpha \propto f^r$ ,式中 $r=1.32$ 。用狄克逊-科恩标准测定法得知,碲玻璃在可见光区的品质因数是迄今商用声光玻璃中最大的(表2)。在1000兆赫下对纵波的声衰减比氧化碲晶体铅(001)传播方向大1.5分贝/厘米,但在150兆

赫下比硫化砷玻璃还小10分贝/厘米。

声光玻璃的品质因数几乎取决于折射率。就声吸收机理而言,玻璃存在特有的变形损耗。在低频高温区域,有一种背景吸收。与晶体一样,存在声子-声子相互作用的缓型和型吸收。碲玻璃或硫系玻璃的声损耗低,品质因数高,这是由于玻璃形成离子的极化度高而导致折射率升高的缘故。

实用的声光玻璃偏转器件AOT-5便是用碲玻璃做成的。如果提高调制的中心频率 $f_0$ ,频带宽度 $\Delta f$ 就可变大,这就要求介质材料的声吸收小和换能器的薄型化。如果要求调制元件的频带宽度增大(即加深调制度),这就要看换能器的变换效率以及声光玻璃与换能器在声学上的匹配是否良好。关于这点,碲玻璃与铌酸锂片宜用钢封接,因为这三种材料的声阻抗几乎接近,基本上可以得到理想的结果。其次,减小激光束口径,亦可加大

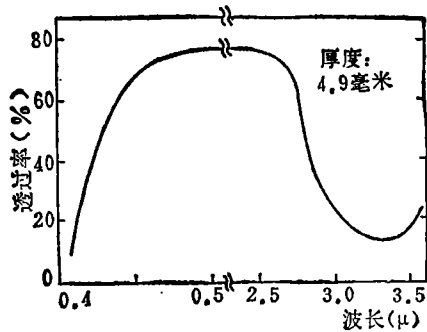


图4 碲玻璃的透光曲线

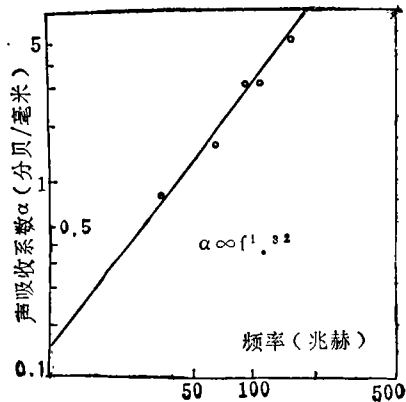


图5 碲玻璃的吸收系数与频率的关系

表2 碲玻璃的品质因数

声波偏振	折射指数 (0.63厘米)	密度 (克/厘米 <sup>3</sup> )	声速 10 <sup>3</sup> 厘米/秒	光波偏振	光弹常数	品质因数 $P_{11}^2 n^6 / \rho v^4$ (10 <sup>-16</sup> 秒 <sup>2</sup> /克)	超声衰减 (分贝/厘米)
纵向	2.089	5.87	3.40	平行	$P_{11}=0.257$	23.9	3.0(100兆赫)
纵向			3.40	垂直	$P_{12}=0.241$	20.9	3.0(100兆赫)
横向			1.96	平行或垂直	$P_{44}=0.0079$	0.12	1.5(45兆赫)

频带宽度，改善调制特性。

如果介质的品质因数较大，则达到衍射光饱和点所需的超声功率就可减低。在光与超声相互作用场合下，必须使超声衰减尽可能小。否则施加的超声功率过大，会引起换能器与介质发热，导致偏转光的位置改变。此外，由于热震也会引起介质破坏。AOT-5声光玻璃偏转器件的综合特性如表3所示。

表3 AOT-5玻璃元件的综合性能

特性	实测值
透过率	95~98%
消光比	10000:1
透光范围	0.47~2 $\mu$
$f_0$	120兆
超声带宽	-3dB(65兆赫)
布拉格反射带宽	-3dB(57兆赫)
调制频率的温度系数	-3.5 $\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$
偏转90%所需功率	1.2瓦

## 五、声光玻璃偏转器件的应用

国外曾用激光调制彩色信号进行光的传输试验。器件材料用重铽石玻璃，换能器材料是36°旋转切割的铌酸锂晶体，使用频率70兆赫，调制信号带宽为15.5兆赫，激光束口径 $\phi 40$ 微米，这种器件现已被实用化。调制材料如选用碲玻璃，则一级衍射光下的消光比可达1000以上。曾以中心频率为40兆赫、频带宽度为17兆赫的条件，用碲玻璃声光器件成功地传送了彩色电视信号。同时，用该装置可接收记录帧频为250千赫的报纸传真信号，得到的胶片的记录光密度达3.5以上，而且还用碲玻璃制作了120兆赫的宽频带调制

元件。

总之，声光玻璃偏转器件由于体积小、消光比高、驱动功率低、调制度深和工作稳定等特性而可能用于光开关、光扫描器、激光印刷机、光存储器、光通讯以及光信息处理等方面。其缺点是不能象电光调制那样在宽频带下工作，但在某些特定波段，可充分发挥它的长处。目前国外市售的声光器件中，不少声光介质选用了玻璃材料。因为玻璃可以制成各种规格的大型制品，成型和研磨容易、耗资小，实用性强。

在对可见光透明的玻璃中，碲玻璃的品质因数最大，超声波损耗较小，所以是在低频范围内实用性最大的声光偏转玻璃。随着换能器的制造和封接技术的提高，其用途将更为广泛。

## 参 考 文 献

- [1] «Appl. Phys. Lett» vis Aug 83~86(1969)
- [2] 金山«オプトロニクス» [8] 38 (1982)
- [3] 泉谷彻郎等«セラミックス»4.307-313 (1983)
- [4] 右畑芳男«セラミックス»4. 302-307(1984)
- [5] 泉谷彻郎«光学»2(6) 36—47(1973)
- [6] E. K. Sittig «Elasto-optic Light Modulation & Deflection in Progress in Optics vx 229(1972) N. Ochiai Acousto-optic deflection Material and Techniques, Proc IEEE 61. 1073 (1973)
- [7] 増田勲«セラミックス»9[7]441-446(1974)
- [8] 渡部昭典(应用物理)V40 N10 1140~4(1971)
- [9] R. W. Divon «Appl phys. Lett» 8. 205~207 (1966)
- [10] «J. Appl phys» [46]1 65~70(1975)
- [11] R. W. Dixor «J. Appl. Phys.»38 5149(1967)
- [12] «J. Appl. Phys» [42]4 1709-12(1972)
- [13] «研究实用化报告»21卷7号1371—7(1972)
- [14] J. T. Krause. «Appl phys. Lett»17[9] 3657~8 (1970)
- [15] «公开特许»昭50—38714 73—75