

# 熔石英材料声光 Q 开关中附加声光衍射现象的分析

孙 宗 建

(同济大学物理系)

**提要:** 本文指出, 体波声光器件中的附加声光衍射现象是器件中的反射声波引起的, 并从反射声波(纵、横波)的分布、强度、衍射光角度以及声纵波与横波对平面偏振光呈现不同的声光衍射特性等方面解释了这些现象。分析与实验结果是符合的。利用这一现象, 可为检验吸声效果提供一个有效的方法。

## Analysis on additional a-o diffraction in fused silica a-o Q-switches

Sun Zongjian

(Department of Physics, Tongji University)

**Abstract:** It is pointed out that the additional a-o diffraction is caused by reflected acoustic waves, and this phenomenon is explained from the following aspects: the distribution of reflected acoustic waves (longitudinal and transverse waves), their intensities, the diffraction angles of light, and the difference of a-o diffraction characteristics between acoustic longitudinal waves and transverse waves for the plane-polarized light. The results of experiments are in accordance with the analytical ones. The author believes that using these phenomena, an effective method for checking sound absorption can be provided.

熔石英材料具有很好的光学与声学特性, 它对从近红外到近紫外范围内的光都具有很高的透过率, 光学均匀性好, 声衰减小。但由于声衰减小, 如果吸声搞得不好, 反射声波仍很强, 会产生明显的附加的声光衍射现象。

利用声波在界面上的反射、折射理论<sup>[1]</sup>, 可以画出器件中超声波多次反射形成的纵、横波的分布图, 并能计算出各个波声强的理

论值。从图 1 可以看出, 压电换能器产生的声纵波, 在吸声斜面上产生了反射的纵波与横波, 反射的纵、横波又在侧面产生反射声波……。为验证这一分析, 在图 1 中圆圈所示的七个部位, 以氩-氟激光(光束直径 1 毫米, 发散角 2 毫弧度)入射, 拍摄了衍射光光斑照片。在该七个部位上, 纵、横波的分布标示于放大的圆圈内。为使附加衍射现象明显, 实

收稿日期: 1981 年 3 月 9 日

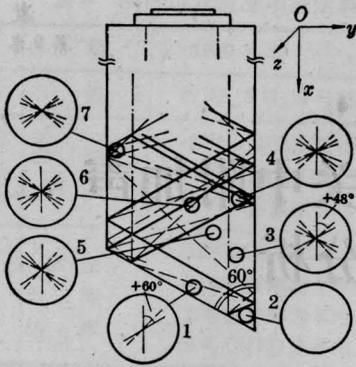


图1 熔石英声光Q开关中入射、反射声波分布示意图

$x$ 轴: 声传播方向;  $y$ 轴: 换能器厚度方向;  
 $z$ 轴: 光传播方向。——为纵波 ——为横波

验时吸声面不加吸声材料。拍摄的照片如图2所示。

以下从四个方面来分析:

1. 比较各部位纵、横波的分布与衍射光斑的分布

图2各张照片中,中央亮斑为入射光束,亮度较大,为防止曝光过度,用半透明材料遮挡,因而出现些遮挡物产生的边缘衍射。其次,吸声斜面用微米级细沙打毛,故产生些相对很弱的漫散射光圈。另外,为使某些方向上的衍射光斑较亮,器件与入射光间成不同的角度,有时也会出现些通光界面间的多次反射形成的光斑。尽管存在以上一些不利因素,但反射声波产生的附加声光衍射现象仍能在照片上清楚地显示出来。

在位置1:如图1所示,在该位置存在垂直方向的纵波、 $+60^\circ$ 方向的纵波(垂直向上方向为参考,顺时针为正,以下同)以及 $+48^\circ$ 方向的横波。照片1-1中,内圈是纵波产生的衍射光斑,方位与图1位置1中标示的方位一致。外圈是横波产生的衍射光斑,方位也与图1位置1中标示的方位相一致(由于吸声角及换能器倾角上的误差,略有几度的差异)。照片1-2是调整器件的方位,使衍射光斑从原来的 $+1$ 级较亮,变为 $-1$ 级较亮。照片1-1中右上方外圈横波

衍射光斑较亮( $+1$ 级),照片1-2中左下方外圈横波衍射光斑较亮( $-1$ 级)。

在位置2:基本上没有声波,因而无明显的衍射光斑。

在位置3:纵波方向为 $+180^\circ$ ,  $+60^\circ$ ,  $-60^\circ$ ,横波方向为 $+48^\circ$ ,  $-48^\circ$ ,  $-72^\circ$ ,缺少 $+72^\circ$ 方向上的横波。衍射图象如照片3~1所示。调整器件方位,使右下方横波衍射光斑较亮,如照片3-2所示;使左上方衍射光斑较亮,如照片3-3所示。 $+72^\circ$ 方向上没有横波的衍射光斑。

在位置4:与位置3的差别在于多了 $+72^\circ$ 方向上的横波,因而该方向上出现了衍射光斑。由于该方向上的横波是经过多次反射而产生的,因而较弱,为使该光斑较亮,其它方向上声波与光波的作用偏离布拉格衍射较远,所以衍射光斑较暗。照片4-1中, $+72^\circ$ 方向右上方衍射光斑较亮,在照片右下方,紧接 $-48^\circ$ 方向横波的 $-1$ 级衍射光斑,有一个通光面间反射产生的光斑,调器件倾角时,它的位置会移动,而其它光斑只是强度起变化。照片4-2中, $+72^\circ$ 方向左下方的横波衍射光斑较亮,在照片左下方与左上方,紧接 $+48^\circ$ 横波 $+1$ 级与 $-1$ 级衍射光斑,各有一个通光面间反射产生的光斑。

在位置5:与位置3的差别是 $+180^\circ$ 方向的纵波较强。

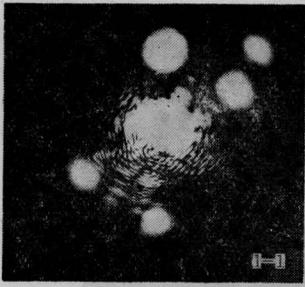
在位置6:与位置4的差别是 $+180^\circ$ 方向的纵波较强。

在位置7:与位置6的差别仅在于 $+180^\circ$ 方向纵波很弱,在照片上看不出该方向上有衍射光斑。

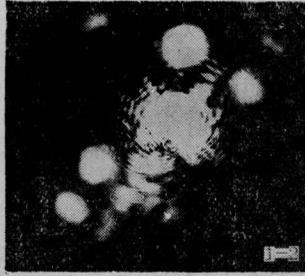
ZF<sub>6</sub>玻璃中,横波产生的衍射光极微弱,观察不到(照片是器件横放时拍摄的)。

2. 声纵、横波波速比与它们产生的一级衍射光光斑离中央的距离之比互成倒数关系

声纵、横波的波速分别为 $v_l$ 与 $v_T$ ,它们产生的一级衍射光光斑离中央的距离分别为 $d_l$ 与 $d_T$ ,存在关系式:



1-1



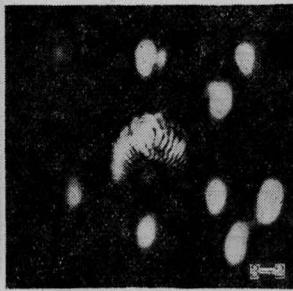
1-2



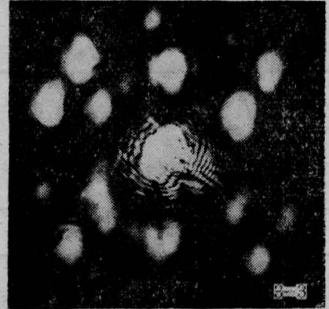
2



3-1



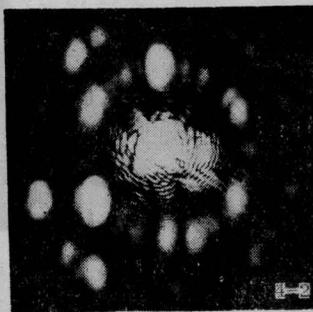
3-2



3-3



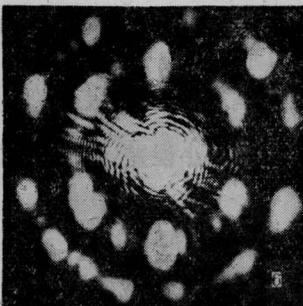
4~1



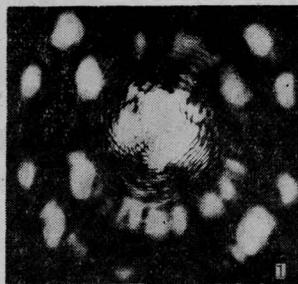
4~2



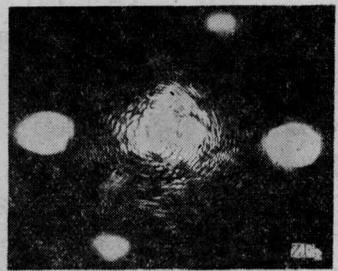
5



6



7



声光介质为  $ZF_6$  玻璃

图2 器件各部位上声波产生的衍射光光斑

$$\frac{d_T}{d_l} = \frac{v_l}{v_T} \quad (1)$$

式(1)表明, 外圈的衍射光斑是由反射的声横波与光波作用产生的, 内圈的衍射光斑是反射的声纵波产生的。熔石英材料:  $v_l=5.57 \times 10^3$  米/秒,  $v_T=3.52 \times 10^3$  米/秒<sup>[2]</sup>,  $\frac{d_T}{d_l} \approx 1.6$ 。  $d$  与  $f$  成正比关系, 从三个不同频率(40 兆赫、48 兆赫、60 兆赫)条件下拍摄的照片上量得的  $d_T$ 、 $d_l$  值见表 1。

表 1

$f$ (兆赫)	$d_T$ (毫米)	$d_l$ (毫米)	$d_T/d_l$
40	36/2	22/2	1.64
48	46/2	28.5/2	1.62
60	54.5/2	34.5/2	1.58

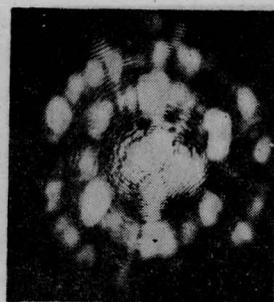
### 3. 界面上反射声波的强度

由界面上反射纵波产生的衍射光的强度, 推算出反射纵波的强度。按声波在界面上的反射理论算得, 图 1 位置 1 处,  $+60^\circ$  方向上的反射纵波的声强为  $+180^\circ$  方向上入射纵波声强的 0.27 倍。调整器件方位, 使入射光分别对  $+180^\circ$  方向与  $+60^\circ$  方向上的声波满足布拉格衍射条件, 并使得  $+180^\circ$  方向(第二次是  $+60^\circ$  方向)以外的衍射光最弱。从衍射光强之比可求得声强之比:

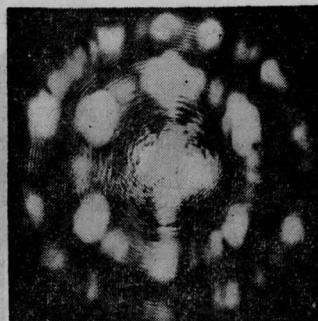
$$I_1/I_0 = \sin^2 \left\{ \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2}{\lambda_0^2}} M_2 l^2 i_1 \right\} \quad (2)$$

$$I_2/I_0 = \sin^2 \left\{ \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2}{\lambda_0^2}} M_2 l^2 i_2 \right\} \quad (3)$$

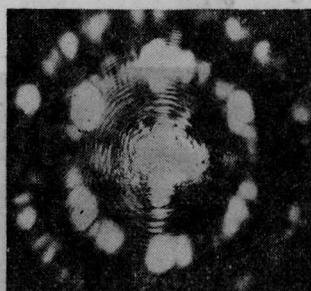
$I_0$ 、 $I_1$ 、 $I_2$  分别为零级光、垂直方向的一级衍射光、 $+60^\circ$  方向的一级衍射光光强。 $i_1$ 、 $i_2$  分别为入射纵波声强与反射纵波声强。实验装置如图 4 所示。在图 1 位置 1 处测得:  $\frac{I_1}{I_0} = \frac{2 \times 12 \times 10^3}{2 \times 75 \times 10^3}$ ,  $\frac{I_2}{I_0} = \frac{2 \times 31 \times 10^2}{2 \times 75 \times 10^3}$ 。由于以上比例值都很小, 因而  $\sin^2 \{ \} \approx \{ \}^2$ , 并且, 测量  $I_1$  时, 注意到使  $I_2$  等其它衍射光最弱; 同样, 测  $I_2$  时, 调整器件方位, 使  $I_1$  等



40 兆赫



48 兆赫



60 兆赫

图 3 三个不同频率下的衍射光斑照片

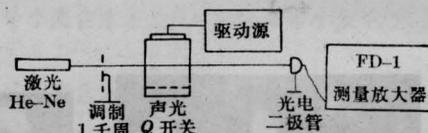


图 4 相对光强测量装置

其它衍射光最弱, 以减小误差。由(2)、(3)解得:

$$\frac{i_2}{i_1} \sim \frac{I_2/I_0}{I_1/I_0} = \frac{2 \times 31 \times 10^2}{2 \times 12 \times 10^3} \approx 0.26$$

这一数值与按声波反射理论算得的 0.27 很接近。

在图 1 位置 2 上方, 接近器件右侧界面

上, 有  $+60^\circ$  方向的入射(对侧面而言)纵波及  $-60^\circ$  方向的反射纵波, 在熔石英与黄铜界面上(两侧是黄铜支架), 该纵波以  $30^\circ$  角入射, 反射纵波声强与入射纵波声强之比为 0.1(理论值), 测量值为:

$$\frac{i_2'}{i_1'} = \frac{I_2'}{I_1'} = \frac{2 \times 40 \times 10}{2 \times 42 \times 10^2} \approx 0.096$$

$i_1'$ 、 $i_2'$  分别为右侧的入射与反射纵波声强;  $I_1'$ 、 $I_2'$  分别为该二个纵波产生的布拉格一级衍射光光强。

入射纵波产生的反射横波的声强, 同样可以通过测量反射横波产生的衍射光光强(记以  $I_T$ )来推算:

$$\begin{aligned} \frac{I_l}{I_0} &= \sin^2 \left\{ \frac{1}{2} k_0 \Delta n_1 L \right\} \\ &= \sin^2 \left\{ \frac{1}{4} k_0 n^3 P S_l L \right\} \\ &\approx \left( \frac{1}{4} k_0 n^3 P S_l L \right)^2 \\ &\approx \left( \frac{1}{4} k_0 n^3 L \right)^2 P^2 \frac{2i_l}{\rho v_T^3} \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{I_T}{I_0} &= \sin^2 \left\{ \frac{1}{2} k_0 \Delta n_T L \right\} \\ &= \sin^2 \left\{ \frac{1}{4} k_0 n^3 \left[ \frac{1}{2} (P_{11} - P_{12}) \right] S_T L \right\} \\ &\approx \left( \frac{1}{4} k_0 n^3 L \right)^2 \cdot \frac{1}{4} (P_{11} - P_{12})^2 \frac{2i_T}{\rho v_T^3} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\frac{I_T}{I_l} \approx \left[ \frac{1}{2} (P_{11} - P_{12}) \right]^2 \frac{i_T v_l^3 / P^2 i_l v_T^3}{i_l v_l^3 / P^2 i_l v_T^3} \quad (6)$$

熔石英材料:  $P_{11} = 0.12$ ,  $P_{12} = 0.27$ ,  $v_l =$

$5.57 \times 10^3$  米/秒,  $v_T = 3.52 \times 10^3$  米/秒。按声波在界面上的反射理论算得:  $i_T = 0.67 i_0$ 。

将这些数值代入(6)式算得:  $\frac{I_T}{I_l} \approx 0.30$ 。但实验值为:

$$\frac{I_T}{I_l} = \frac{2 \times 20 \times 10^2}{2 \times 12 \times 10^3} \approx 0.17.$$

其原因尚待进一步研究, 可能是由于器件斜端面的打毛所引起的漫散射, 使得反射纵、横波的声强减弱。可以把斜端面看为由许多辐射纵波与横波的点声源组成。纵波波长相对较大, 这些点声源阵排列的起伏程度相对较小, 漫散射能量也较小; 横波波长相对较小, 这些点声源阵排列的起伏程度相对较大, 漫散射的能量也较大, 因而测量值比理论值小得较多。

4. 纵波与横波对于入射的平面偏振光呈现不同的声光衍射特性

熔石英的两个光弹常数  $P_{11}$  与  $P_{12}$  差异较大, 因而平面偏振光对声纵波与横波呈现的不同的声光衍射特性较显著。这些差异, 不论是从入射光的偏振方向与衍射光光强的关系, 还是从入射光偏振方向与衍射光偏振方向间的关系, 都能用来鉴别各个衍射光斑是由纵波产生的还是横波产生的<sup>[3]</sup>。例如, 在器件位置 1 处, 测量  $+60^\circ$  方向反射纵波产生的衍射光斑的强度与入射光偏振方向的关系, 可以确认, 在  $+60^\circ$  方向存在的是纵

(下转第 68 页)

表 2

$\theta$	$I_0$	$I_1$	$\eta_{实验}$	$\eta_{理论}$
$0^\circ$	$2 \times 30 \times 10^3$	$2 \times 29 \times 10^2$	9.7%	10.4%
$15^\circ$	$2 \times 29 \times 10^3$	$2 \times 21 \times 10^2$	7.2%	7.8%
$45^\circ$	$2 \times 29 \times 10^3$	$2 \times 8 \times 10^2$	2.8%	3.3%
$60^\circ$	$2 \times 29 \times 10^3$	$2 \times 7 \times 10^2$	2.4%	2.5%
$-10^\circ$	$2 \times 31 \times 10^3$	$2 \times 34 \times 10^2$	11%	11.7%
$-20^\circ$	$2 \times 31.5 \times 10^3$	$2 \times 39 \times 10^2$	12.4%	12.6%
$-30^\circ$	$2 \times 31 \times 10^3$	$2 \times 43 \times 10^2$	13.8%	13%

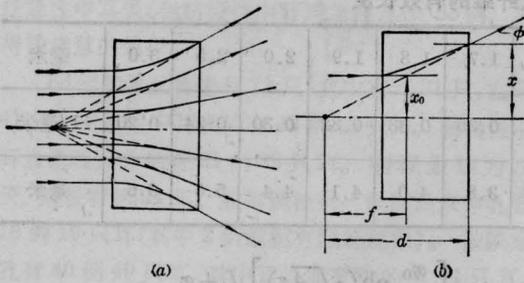


图 4

(a) 发散光学纤维的焦点  
(b) 发散光学纤维焦距的确定

$$d = \frac{x}{\tan \phi} = \frac{x_0 \operatorname{ch}(\sqrt{Az})}{n_0 \sqrt{A} x_0 \operatorname{sh}(\sqrt{Az})}$$

$$= \frac{1}{n_0 \sqrt{A}} \operatorname{cth}(\sqrt{Az}) \quad (15)$$

同样还可求得焦点与主点的距离  $f$ , 这就是焦距, 即为:

$$f = \frac{x_0}{\tan \phi} = \frac{1}{n_0 \sqrt{A} \operatorname{sh}(\sqrt{Az})} \quad (16)$$

由公式(15)和(16)可知, 焦点的位置不是一个定值, 而是随着纤维的长度和特性常数而变化的。

(上接第 73 页)

波, 而不是横波。实验数据见表 2。

以上四个方面的实验与分析, 可以证实, 声光  $Q$  开关中产生的复杂但有规律的衍射图案, 确是反射的纵、横波(声波)产生的。因而, 根据反射声波产生的声光衍射光斑的强弱, 可以检验所用吸声措施的实际效果。在图 1 位置 1 处测得,  $\frac{I_2}{I_1}$  在不加吸声措施时为 0.27, 涂以吸声橡胶后为 0.03。该比例越小, 说明吸声效果越好。

声光器件中的反射声波将使输出光信号产生畸变。对于调  $Q$  激光器中的声光  $Q$  开关来说, 反射声波将使声脉冲后沿拖长, 这是影响输出光脉冲峰功率与稳定性的一个因素。

本文得到魏墨鑫教授的指导以及上海激

光所吕建华、方正、陆世桢等同志的指导、帮助, 在此一并表示感谢。

如果把物距  $L_0$  和象距  $L$  都化成以主点为基准的表示式, 即  $L_0 \rightarrow L'_0, L \rightarrow L'$ :

$$L'_0 = \frac{n_0 \sqrt{A} L_0 \operatorname{sh}(\sqrt{Az}) - 1 + \operatorname{ch}(\sqrt{Az})}{n_0 \sqrt{A} \operatorname{sh}(\sqrt{Az})}$$

$$L' = \frac{-[n_0 \sqrt{A} L_0 \operatorname{sh}(\sqrt{Az}) - 1 + \operatorname{ch}(\sqrt{Az})]}{\left\{ \begin{array}{l} n_0 \sqrt{A} \operatorname{sh}(\sqrt{Az}) [n_0 \sqrt{A} \\ \times L_0 \operatorname{sh}(\sqrt{Az}) + \operatorname{ch}(\sqrt{Az})] \end{array} \right\}}$$

这样发散纤维同样具有透镜系统中的物象关系式:

$$\frac{1}{L'} - \frac{1}{L'_0} = \frac{1}{f} \quad (17)$$

可以预计, 这种发散纤维和聚焦纤维相配合, 在激光和应用光学等领域中发挥不小的作用。

### 参 考 文 献

- [1] A. D. Pearson et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1969, 15, No. 2, 76.
- [2] T. Uchida et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1969, QE-5, No. 6, 331.
- [3] F. P. Kapron; *JOSA*, 1970, 60, No. 11, 1433.
- [4] 殷宗敏, 祝颂来, 陈尧生; 《物理》, 1980, 9, No. 6, 549.

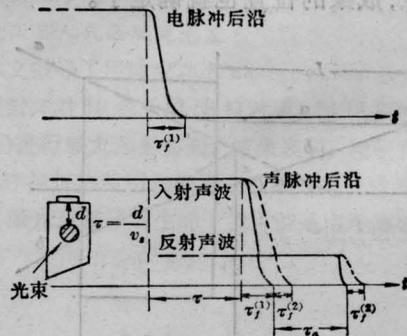


图 5 反射声波引起声脉冲后沿增加的示意图

### 参 考 文 献

- [1] H. Kolsky; *Stress waves in solids*, Oxford at the clarendon press 1953, pp 24~36.
- [2] 同济大学声学研究室; 《超声工业测量技术》, 上海人民出版社, 1977, p. 255.
- [3] 孙宗建; 《同济学报》, 1981, No. 2, 72~78.