

一级超声跟踪声光器件的优化设计

徐介平

(应用物理系)

摘 要

本文通过由富氏变换求超声波角谱的方法得到了计算一级超声跟踪声光器件声光相互作用频率响应的普遍公式,详尽分析了六个参数的数值变化对频响曲线形状的影响,提出了按对频响曲线形状的要求分别确定六个参数数值的完整方法,并用计算机作出了优化选择,从而对取平面结构和两种阶梯结构的体波和表面波声光器件完成了优化设计,所得结果远佳于以往文献上所发表的结果。文中还讨论了在工艺上实现设计参数时所应达到的精度。

The Optimum Design of Acoustooptic Devices Using the First Beam Steering

Xu Jie-ping

Abstract

Through the determination of the angular spectrum of the ultrasonic waves by Fourier transformation, a general formula for calculating the acoustooptic interaction frequency response of AO devices using the first beam steering has been derived. After a full analysis of the effect of the six parameters on the shape of the frequency response curve, a systematic method which determines the values of these six parameters according to the requirements on the shape of the frequency response curve has been proposed. The optimum values of these parameters have been determined for all interested cases on a computer. Thus we completed the optimum design of bulk and thin-film AO devices with planar configuration and two different kinds of step configurations. The results obtained are much better than those published in previous literatures. The accuracy which should be reached for these optimum values in manufacture is also discussed.

本文于1982年11月2日收到。

一、前言

一级超声跟踪是提高正常布拉格衍射器件的布拉格带宽并降低驱动功率的有效方法,该问题虽曾被作过许多探讨^[1-7],但都只就几个主要参数的一些数值作了尝试性计算,没有全面考虑六个参数对声光相互作用频响曲线形状的影响,更谈不上对这些参数作出优化选择。文献[8,9]虽就体波器件作了较为全面的考虑,但仍未作出优化选择,而且未涉及表面波器件(利用声表面波和导光波)的情况。此外,在以往所有的文献中,计算声光相互作用频率响应的公式一直套用光栅衍射的远场分布公式。由于在一般的声光器件中,声光相互作用区常不满足远场条件,因而曾有人提出过所得计算结果的适用性问题^[1]。由于布拉格方程是一个关于角度的方程,因而决定声光相互作用频率响应的是超声的角分布而不是超声的场分布(逐点分布)。本文将通过由富氏变换求超声波角谱的方法,导出确定声光相互作用频率响应的普遍公式,尽管并无新的结果,但消除了对计算结果适用性的怀疑。

二、基本公式的导出

实现超声跟踪的基本方法是把换能器分片并利用各换能片所发出超声波的相干叠加,由于相干加强方向(称为超声主方向)是随频率而变的,因而可在一定频率范围内自动跟踪布拉格角而实现超声跟踪。一级超声跟踪是指:相邻两换能片的周相差恒定,而且或者等于零(称为同相驱动),或者等于 π (称为反相驱动)。超声跟踪声光器件的基本结构如图1所示。在一般情况下,各换能片可转过一个角度 ψ ,称为阶梯结构;当 $\psi=0$ 时,称为平面结构。

由富氏光学理论可推知^[10]:超声波的角谱由超声瞳函数的富氏变换决定,超声瞳函数即 $Z=0$ 平面上超声的场分布。对于声光相互作用,仅需确定在 $X-Z$ 平面内超声波的角谱¹⁾,因而是一个一维问题;又因超声跟踪声光器件总是一个周期性结构,因而瞳函数 $p(x)$ 等于每个换能片的瞳函数 $t(x)$ 和阵列函数 $a(x)$ 的卷积,亦即

$$\begin{aligned}
 p(x) &= t(x) * a(x) \\
 t(x) &\propto \exp\left\{j \frac{2\pi}{\Lambda} \sin \psi \cdot x\right\} \operatorname{rect}\left(\frac{x}{L_e}\right) \\
 &\doteq \exp\left\{j 2\pi \frac{\psi}{\Lambda} \cdot x\right\} \operatorname{rect}\left(\frac{x}{L_e}\right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

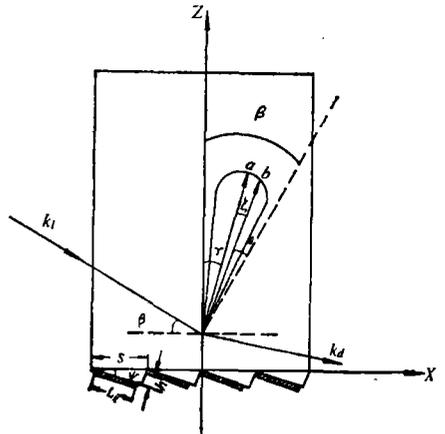


图1 一级超声跟踪声光器件的结构

1) 正因为此,下面得到的基本公式同时适用于体波和表面波声光器件,因为声表面波和声体波的分布仅在垂直于表面的方向上才有所不同。

$$a(x) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N_e-1} \delta(x-ns) & (\text{同相驱动}) \\ \sum_{n=0}^{N_e-1} (-1)^n \delta(x-ns) & (\text{反相驱动}) \end{cases}$$

其中: L_e 为每个换能片的长度; s 为相邻两换能片间的中心距 (周期长); A 为超声波波长; N_e 为换能片总数。注意到卷积的 FT 等于 FT 之积, 故角谱为

$$P(\xi) = T(\xi) \cdot A(\xi) \quad (2)$$

其中空频 ξ 和超声波与 Z 轴夹角 α 之间的关系为

$$\xi = \frac{\sin \alpha}{A} \doteq \frac{\alpha}{A} \quad (3)$$

利用富氏变换表, 稍加运算后不难得到

$$T(\xi) \propto \delta\left(\xi - \frac{\psi}{A}\right) * L_e \operatorname{sinc}(L_e \xi) = L_e \operatorname{sinc}\left[L_e \left(\xi - \frac{\psi}{A}\right)\right]$$

$$A(\xi) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N_e-1} e^{j2\pi ns\xi} = e^{j(N_e-1)\pi s\xi} \frac{\sin N_e \pi s\xi}{\sin \pi s\xi} & (\text{同相驱动}) \\ \sum_{n=0}^{N_e-1} e^{jn\pi} \cdot e^{j2\pi ns\xi} = e^{j(N_e-1)\left(\pi s\xi + \frac{\pi}{2}\right)} \frac{\sin N_e \left(\pi s\xi + \frac{\pi}{2}\right)}{\sin\left(\pi s\xi + \frac{\pi}{2}\right)} & (\text{反相驱动}) \end{cases}$$

利用式 (3), 上式可写成

$$T(\alpha) \propto L_e \operatorname{sinc}\left(\frac{x}{\pi}\right) \equiv L_e \frac{\sin x}{x}, \quad x = \frac{\pi L_e (\alpha - \psi)}{A}; \quad (4)$$

$$A(\alpha) = e^{j(N_e-1)y} \frac{\sin N_e y}{\sin y}, \quad y = \begin{cases} \frac{\pi s \alpha}{A} & (\text{同相驱动}) \\ \frac{\pi s \alpha}{A} + \frac{\pi}{2} & (\text{反相驱动}) \end{cases}$$

将式 (4) 代入式 (2), 即得超声波振幅的角谱 $P(\alpha)$ 。但下面我们只需要超声波强度的角谱 $P_a(\alpha)$, 注意到 $\left(\frac{\sin N_e y}{N_e \sin y}\right)^2$ 是 y 的周期函数, 周期等于 π , 易得¹⁾

$$P_a(\alpha) = |P(\alpha)|^2 = N_e^2 P_{a0} \left(\frac{\sin x}{x}\right)^2 \left(\frac{\sin N_e y}{N_e \sin y}\right)^2 \quad (5)$$

$$x = \frac{\pi L_e (\alpha - \psi)}{A} \quad (6)$$

1) 严格说来, 式(4)仅给出 $Z=0$ 处的角谱, 但按角谱的传播规律^[10], 任意 Z 处的角谱和 $Z=0$ 处的角谱只差一个位相因子, 因而式(5)实际上给出任意 Z 处超声波强度的角谱。

$$y = \begin{cases} \frac{\pi s \alpha}{A} - m\pi & (\text{同相驱动}) \\ \frac{\pi s \alpha}{A} - \left(m - \frac{1}{2}\right)\pi & (\text{反相驱动}) \end{cases} \quad (7)$$

其中: P_{a_0} 为一常数, 相当于每个换能片所提供的能量^[11]; m 为整数。式(7)还可进一步化简, 多束波相干叠加有许多个主方向(称为干涉级数), 这些主方向 α 可由角度 γ 来确定, 并有

$$s \cdot \sin \gamma \pm s \gamma = p \frac{\lambda}{2}, \quad p = \begin{cases} \text{偶数 (同相驱动)} \\ \text{奇数 (反相驱动)} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)可写成 $\frac{\pi s \gamma}{2} = \frac{p}{2} \pi$, 与式(7)比较, 易见无论是同相还是反相驱动, 均有

$$y = \frac{\pi s (\alpha - \gamma)}{A} \quad (7a)$$

为了满足布拉格方程, 只有沿方向 b 传播的超声波才能有效地引起布拉格衍射, 方向 b 与入射光波面间夹角 θ 应等于布拉格角(见图1)。

$$\theta = \frac{\lambda}{2A} \quad (9)$$

其中 λ 为光在介质中的波长。超声跟踪的目的就是使在尽量大的频率范围内主方向 α 尽量接近方向 b , 亦即跟踪误差

$$\xi \equiv (\beta - \theta) - \gamma \quad (10)$$

尽量小。其中 β 为入射光和声光器件间的相对角度(使用时的调整参数), 它与频率无关。显然, 声光互作用的频率特性由 $P_a(\beta - \theta)$ 完全确定。将 $\alpha = \beta - \theta$ 和式(10)代入式(5)、(6)和(7a), 即得计算声光互作用频率特性的公式为

$$x = \frac{\pi L_e (\beta - \theta - \psi)}{A}, \quad y = \frac{\pi s \xi}{A},$$

$$\frac{P_a(f)}{N_e^2 P_{a_0}} = \left(\frac{\sin x}{x}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin N_e y}{N_e \sin y}\right)^2 \quad (11)$$

$$BL \equiv -10 \log \frac{P_a(f)}{N_e^2 P_{a_0}}$$

BL 常称为布拉格损耗。据式(8)~(11)以及 $A = V/f$ (V 为声速), 在选定了设计参数 ψ 、 L_e 、 s 、 N_e 和调整参数 β 以及干涉级数 p 的数值后, 即可计算出声光互作用的频响曲线 $BL-f$ 。本文的目的则是反过来作出上述六个参数的优化选择, 使频响曲线达到最佳。

三、各参数对频响曲线的影响及其选取方法

1. 参数 s 和 β : 设声光器件工作频段的中心频率为 f_0 , 引入相对频率

$$F \equiv f/f_0 \quad (12)$$

即可把式(8)和(9)写成

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{pA_c}{2s} \cdot \frac{1}{F} \\ \theta &= \theta_c \cdot F \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $\theta_c \equiv \lambda/2A_c$ 为中心频率处的布拉格角。由式(13)可见,一级超声跟踪不可能在所有的频率都使方向 a 与方向 b 重合,但可以在两个频率 F_1 和 F_2 处使 $\xi=0$,如图2所示。而且,只要 F_1 和 F_2 选择得合适,可在相当大的频率范围内使 ξ 小于超声的 $3dB$ 发散角(图2中两虚曲线间区域)。将式(13)代入式(10),并令 $\xi=0$,易得两个完全跟踪频率 F_1 和 F_2 为下列二次方程的两个根:

$$F^2 - \frac{\beta}{\theta_c} F + \frac{pL_0^{(\psi)}}{s} = 0$$

其中 $L_0^{(\psi)} \equiv A_c^2/\lambda = A_c/2\theta_c$ 为中心频率处声光器件的特征长度^[12,18]。按根与系数关系,有

$$F_1 + F_2 = \beta/\theta_c, \quad F_1 F_2 = pL_0^{(\psi)}/s$$

或者反过来,有

$$\beta = (F_1 + F_2)\theta_c, \quad s = \frac{p}{F_1 F_2} L_0^{(\psi)} \quad (14)$$

由式(14)可见,确定参数 s 和 β 与确定参数 $F_1 + F_2$ 和 $1/F_1 F_2$ 完全相当。利用式(13)和(14),不难将式(11)中的 x 和 y 写成(引入 $r \equiv L_c/s$)

$$\begin{aligned} x &= \frac{\pi r p F (F_1 + F_2 - F)}{2 F_1 F_2} \cdot \frac{\pi r s \psi}{A} \\ y &= \frac{\pi p}{2} \left[\frac{F (F_1 + F_2 - F)}{F_1 F_2} - 1 \right] \end{aligned} \quad (15)$$

如文献[8]指出, $y-F$ 曲线和 $\psi=0$ 时的 $x-F$ 曲线均为抛物线,且对称轴均在 $F = (F_1 + F_2)/2$ 处,因而对于平面结构,如果选择 $F_1 + F_2 = 2$,即可使频响曲线 $BL-F$ 对中心频率 $F=1$ 对称。对于两种最重要的阶梯结构 $\psi = \gamma_c$ 和 $\psi = \theta_c$,由式(8)和(14)不难得到阶梯高度:

$$h = s\psi = \begin{cases} p \cdot \frac{A_c}{2} & (\psi = \gamma_c \text{ 时}) \\ \frac{p}{F_1 F_2} \cdot \frac{A_c}{2} & (\psi = \theta_c \text{ 时}) \end{cases} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15),即得

$$x = \begin{cases} \frac{\pi r p F (F_1 + F_2 - F_1 F_2 - F)}{2 F_1 F_2} & (\psi = \gamma_c \text{ 时}) \\ \frac{\pi r p F (F_1 + F_2 - 1 - F)}{2 F_1 F_2} & (\psi = \theta_c \text{ 时}) \end{cases} \quad (15a)$$

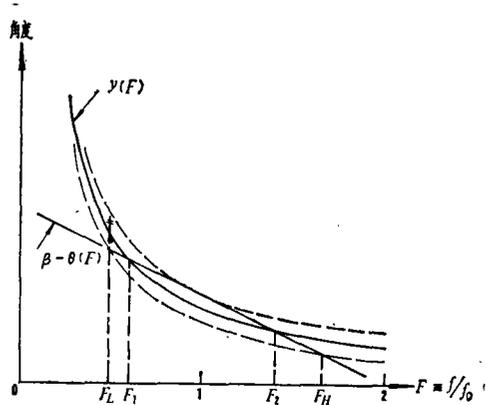


图2 利用一级超声跟踪来提高布拉格带宽

由式(15a)可见,对于阶梯结构, $x-F$ 关系虽仍为一抛物线,但对称轴位置远小于 $(F+F_2)/2$ 。然而,如文献[9]指出,如果选取 $F_1+F_2=2$,对于 $\psi=\gamma_0$ 情况有 $|x(F_1)|=|x(F_2)|$ 从而, $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ 在 F_1 和 F_2 处相等;对于 $\psi=\theta_0$ 情况有 $x(1)=0$,从而 $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ 在 $F=1$ 处为最大。图3画出当取 $F_1+F_2=2$ 时的 $x-F$ 和 $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2-F$ 曲线(ψ 分别

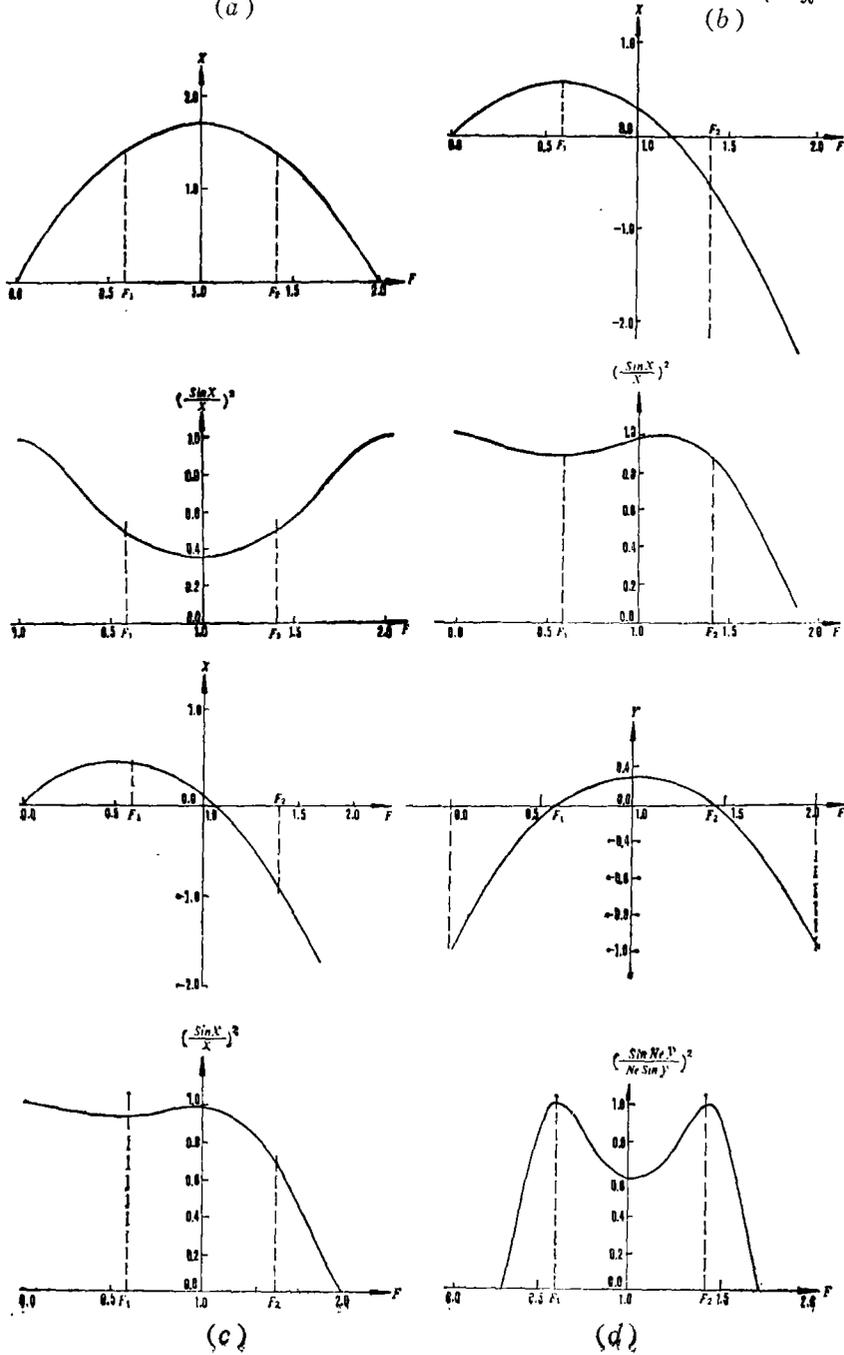


图3 选取 $F_1+F_2=2$ 时频响曲线的对称性。
 (a), (b), (c) 分别为 $\psi=0, \gamma_0, \theta_0$ 时的 $x-F$ 和 $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2-F$ 曲线, (d) 为 $y-F$ 和 $\left(\frac{\sin N_e y}{N_e \sin y}\right)^2-F$ 曲线。(其它参数为 $p=1, N_e=4, 1/F_1, F_2=1.20$ 和 $r=0.9$)

等于 0 、 γ_0 和 θ_0)以及 $y-F$ 和 $\left(\frac{\sin N_e y}{N_e \sin y}\right)^2 - F$ 曲线(其它参数的值为 $1/F_1 F_2 = 1.20$ 、 $r = 0.9$ 、 $p = 1$ 和 $N_e = 4$)。由上讨论可见,为使频响曲线尽量对中心频率对称,必须选择 $F_1 + F_2 = 2$ 或 $\beta = 2\theta_0$ 。

在加上约束条件 $F_1 + F_2 = 2$ 后, F_1 和 F_2 的位置完全由 $1/F_1 F_2$ 的值决定,容易解出(设 $F_1 < F_2$):

$$\begin{aligned} F_1 &= 1 - \left[1 - \frac{1}{1/F_1 F_2} \right]^{1/2} \\ F_2 &= 1 + \left[1 - \frac{1}{1/F_1 F_2} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (17)$$

由式(17)可见:当 $1/F_1 F_2 = 1$ 时, $F_1 = F_2 = 1$;当 $1/F_1 F_2$ 增大时, F_1 和 F_2 对称地向两侧移动。而由图2可见,当 F_1 和 F_2 向两侧移动时,在区间 (F_1, F_2) 内的跟踪误差 ζ (从而通带内的不均匀性)将愈来愈大,但同时布拉格带宽 $\Delta F \equiv F_H - F_L$ 也愈大,因为总有 $F_L < F_1$ 和 $F_H > F_2$ 。图4—6画出当 $1/F_1 F_2$ 的值增大时,频响曲线形状的变化(图4中 $\psi = 0$ 、 $p = 1$ 、 $N_e = 4$;图5中 $\psi = \gamma_0$ 、 $p = 1$ 、 $N_e = 14$;图6中 $\psi = \nu_0$ 、 $p = 5$ 、 $N_e = 8$ 。三种情况均为 $F_1 + F_2 = 2$ 和 $r = 0.9$)。显然,为了得到尽可能大的 $3dB$ 布拉格带宽(即 BL 的不均匀性为 $3dB$ 时的带宽), $1/F_1 F_2$ 的值应加以优化。优化的目标函数为中央凹深等于 $3dB$ 。在图4—6中,用实线画出的曲线均对应于优化结果。在确定了 $1/F_1 F_2$ 的值后,即可按式(14)和(16)确定最重要的设计参数 s 和 h 。

2. 参数 N_e :参数 N_e 对频响曲线的影响比较明显。如所周知,多束波干涉时,各级主最大的角宽度与 N_e 成反比,亦即当 N_e 增大时,图2中两虚曲线愈来愈靠近。为了使中央凹深仍 $\leq 3dB$,必须使 F_1 和 F_2 更为靠近(即 $(1/F_1 F_2)_{opt}$ 较小), $3dB$ 布拉格带宽 ΔF 也就减小。但在另一方面, N_e 增大时,声光互作用长度 $L = N_e s$ 也相应增大。从而驱动功率,特别是功率密度可以大大减小。事实上,超声跟踪问题的提出就是为了解决大带宽和纸驱动功率(达到一定的衍射效率)的矛盾,特别当用于声光讯号处理时,降低驱动功率尤其重

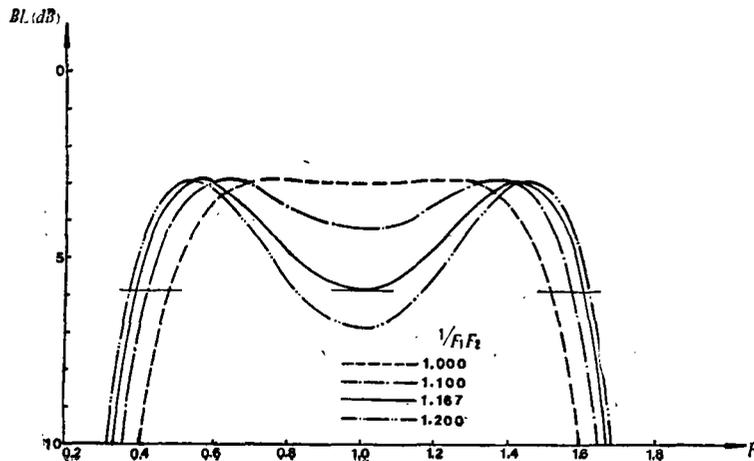


图4 $1/F_1 F_2$ 增大时,频响曲线的变化($\psi = 0$, $p = 1$, $N_e = 4$ 和 $F_1 F_2 = 2$, $r = 0.9$)

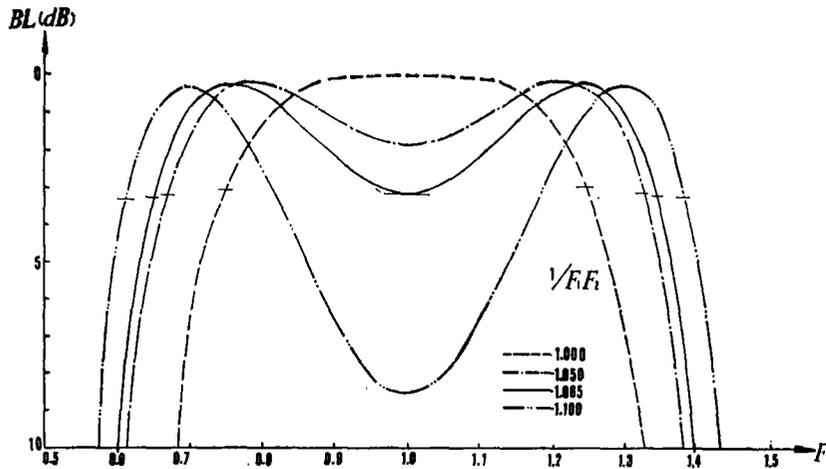


图5 $1/F_1F_2$ 增大时, 频响曲线的变化 ($\psi = \gamma_c$, $p=1$, $N_e=14$ 和 $F_1+F_2=2$, $r=0.9$).

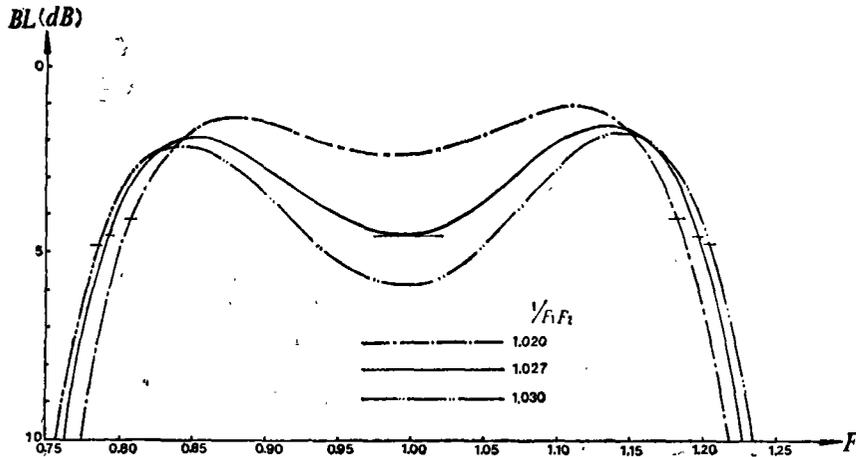


图6 $1/F_1F_2$ 增大时, 频响的曲线变化 ($\psi = \gamma_c$, $p=5$, $N_e=8$ 和 $F_1+F_2=2$, $r=0.9$).

要。因此, N_e 的优化选择应该是在保证一定的 $3dB$ 布拉格带宽 ΔF 的条件下使 N_e 尽量大; 但布拉格带宽应与换能器带宽相适应。对于表面波器件, 由于一般的等指间距离叉指换能器的相对换能器带宽 $\Delta F \leq 0.4$ [18], 故应按 $\Delta F = 0.4$ 来对 N_e 进行优化选择。对于体波器件, 则常按倍频程带宽 $\Delta F = 2/3 = 0.667$ 来进行优化。

3. 参数 ψ 和 p : 对于这两个参数, 并不存在一个单纯的目标函数来对它们进行优化。这里只指出它们取哪些数值是不合理的, 因而根本不必加以计算。至于这两个参数取不同数值时的优缺点, 将在下节结合计算结果来加以说明。在理论上, 只要 $\psi \neq 0$, 都可算是阶梯结构。但实际上, 只有 $\psi = \gamma_c$ 和 $\psi = \theta_c$ 这两种情况才有明显的物理意义: $\psi = \gamma_c$ 是把各换能片转到使其最强辐射方向沿中心频率处的 a 方向 (多束波干涉的主方向), 它和一般闪耀光栅的思想是一样的; 在条件 $F_1 + F_2 = 0$ (即 $\beta = 2\theta_c$) 下, $\psi = \theta_c$ 是把各换能片转到使其最强辐射方向沿中心频率处的 b 方向 (符合布拉格方程的方向)。显然, ψ 应取在 γ_c 或 θ_c 附近, 而由下节计算结果可见, $\psi = \gamma_c$ 和 θ_c 这两种情况的优化结果相差甚小。此外,

只有对这两种情况， $x-F$ 关系才能写成如式(15a)所示的简单形式。鉴于以上考虑，对于阶梯结构，仅需考虑 $\psi=\gamma_0$ 和 $\psi=\theta_0$ 两种情况。

对于平面结构，只能采用 $p=1$ 的情况。事实上，如下一小节指出， L_0 应尽量接近 s ，两者几乎相等，此时 $p=$ 偶数的主方向恰好在 $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ 的零点附近，因而非常弱。这是因为在同相驱动的平面结构中，零级占了绝大部分超声能量；而 $p=3, 5, 7, \dots$ 的主方向都在 $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ 的旁瓣处，因而也很弱(参阅下节表1的计算结果)。对于阶梯结构，由于把各换能片的最强幅射方向转到了主方向，表面上看来 p 可取任何数据，实际上并非如此。图7画出了当 p 增大时， $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ 在区间 (F_1, F_2) 内不均匀性增大的情况(其它参数的值为 $F_1+F_2=2, 1/F_1 F_2=1.03$ 和 $r=0.9$)。由图7可见，当 $p=7$ 时，在 F_1 和 F_2 处 $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ 已下降为0.35，这必然导致 $(BL)_{\min} > 3dB$ (参阅下节表2的计算结果)，从而失去了阶梯结构的优点。因此对于阶梯结构也不需要考虑 $p > 7$ 的情况。

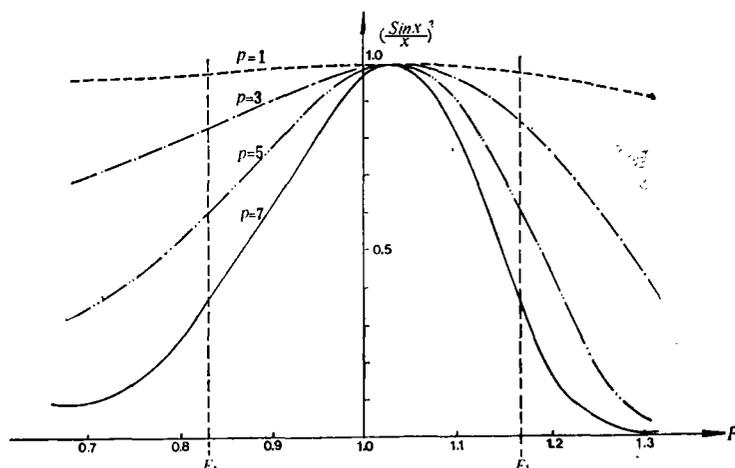


图7 p 增大时， $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ 在区间 (F_1, F_2) 内不均匀性的变大
($\psi=\gamma_0, F_1+F_2=2, 1/F_1 F_2=1.03$ 和 $r=0.9$)

4. 参数 r (即参数 L_0)：文献[1]曾把 L_0 作为一个选择参数，主要思想是：对于阶梯结构，在区间 (F_1, F_2) 内， $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ 和 $\left(\frac{\sin N_0 y}{N_0 \sin y}\right)^2$ 这两个因子一凸一凹，改变 L_0 可改变第一因子在 (F_1, F_2) 内的不均匀度，使两个因子的不均匀性互相抵消，以达到改善通带内不均匀性，从而提高带宽的目的。但此法只适用于阶梯结构，而且此法的改善程度无法简单地加以预料，很难成为一种系统的设计方法。更重要的是，减小功率密度一直是设计声光器件时的一个极为重要的方面。选取 L_0 明显地小于 s ，必将引起换能器上功率密度的增大，而且如下节计算结果可见，通过其它参数的选择(特别是 $1/F_1, F_2$ 和 N_0 的优化选

择), 所得到的布拉格带宽已完全可满足需要。因此, L_e 应在工艺许可的条件下尽量接近 s , 亦即 r 尽量接近于 1。从实际工艺条件考虑, 无论对平面结构还是阶梯结构, 选取 $r=0.9$ 是适当的。此外, 由式 (15) 和 (15a) 可见, r 的变化只影响因子 $\left(-\frac{\sin x}{x}\right)^2$, 它随频率的变化常远小于 $\left(\frac{\sin N_e y}{N_e \sin y}\right)^2$, 因此 r 稍有变化时几乎不影响结果。

四、一级超声跟踪声光器件的优化设计和结论

根据上节的讨论, 在六个参数中, 两个参数应取确定的值: $F_1 + F_2 = 2$ 和 $r = 0.9$, 两个参数只需考虑有限的几个值: $\psi = 0$ 、 γ_e 和 θ_e 。对于平面结构, $p = 1$; 对于阶梯结构, $p \geq 7$ 。另外两个参数则需加以优化选择。首先, $1/F_1 F_2$ 按中央凹深 $= 3dB$ 来进行优化。随后, 对于体波器件, N_e 按 $\Delta F = 0.667$ 来进行优化; 对于表面波器件, N_e 按 $\Delta F = 0.40$ 来进行优化。优化结果分别列于表 1 和表 2 内。应该指出, 在对 N_e 进行优化前, 必须先对 $1/F_1 F_2$ 进行优化, 保证中央凹深都是 $3dB$, 否则在 N_e 和 ΔF 之间没有确定的联系, 不可能进行优化。由于 N_e 只能取整数, 因而对应于优化值 $(N_e)_{opt}$ 的带宽 ΔF 有时可能偏离优化标准值 0.667 或 0.40 较大。碰到这种情况, 将同时给出 $N_e = (N_e)_{opt} + 1$ 时的结果以资比较, 如表 1 中 $p = 3$ 的情况。对于平面结构, 由表 1 可见: 当 $p = 2$ 时, $(BL)_{min} \approx 17dB$; 当 $p = 3$ 时, $(BL)_{min} \approx 13.5dB$ 。显然, 它们在实用上是毫无价值的。平面结构只能采用 $p = 1$ 的情况。对于表面波阶梯结构, 由表 2 可见, 当 $p = 7$ 时, $(BL)_{min} > 3dB$, 已失去了阶梯结构的优点; $p = 7$ 的情况是不必考虑的。出现这两种情况的原因已在上节作了说明。对于体波阶梯结构, 当 $p \geq 4$ 时, 为了保证 $\Delta F \geq 0.667$ 必需有 $(N_e)_{opt} \leq 2$, 因而也是不必考虑的。由此可见, 表 1 和表 2 实际上已穷尽了一切在实际感兴趣的情况, 而且 $(N_e)_{opt}$ 大于以往文献上发表的结果^[3, 3', 7], 因而可得到更好的结果。由表 1 和表 2 还可见, 对于阶梯结构, 当带宽 $\Delta F \approx 0.667$ 时, 乘积 $p(N_e)_{opt} \approx 14$ 仅在 $p < 3$ 时成立; 当带宽 $\Delta F \approx 0.40$ 时, 乘积 $p(N_e)_{opt} \approx 42$ 仅在 $p < 4$ 时成立; 当 $p > 3$ 或 4 后, 乘积 $p(N_e)_{opt}$ 将开始下降。因而以往认为阶梯结构超声跟踪器件的长度增益 pN_e 与 p 值无关的结论^[8]是有局限性的(按式 (14), $L = N_e s = \frac{pN_e}{F_1 F_2} L_0^{(c)}$, 由于 $(1/F_1 F_2)_{opt}$ 只稍大于 1, 故 pN_e 即 $L/L_0^{(c)}$)。造成这种情况的原因是: 当 p 较小时, 在 $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin N_e y}{N_e \sin y}\right)^2$ 中只有 $\sin N_e y$ 随 F 的变化最为显著并决定了频率响应 $BL - F$; 而按式 (15), $N_e y$ 决定于 pN_e , 但当 p 增大后, 如上节指出, $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ 随 F 的变化也愈来愈显著, 并使带宽变小, 因而为了保证仍有一定的带宽, 乘积 $p(N_e)_{opt}$ 只能变小。

表 1 和 2 给出的 $(N_e)_{opt}$ 一般相当大, 而当工作频率较低(例如 $f_e = 100MHz$) 时, 特征长度 $L_0^{(c)} = A_0^2/\lambda = V^2/\lambda f^2$ 又较大, 此时声光互作用长度 $L = N_e s = \frac{pN_e}{F_1 F_2} \cdot L_0^{(c)}$

有可能太大，受到材料尺寸和工艺条件的限制而无法实现。因此在表3中给出了一级超声跟踪声光器件的局部优化设计，即 $1/F_1 F_2$ 仍按中央凹深=3dB进行优化。但 N_e 则不优化，并取小于 $(N_e)_{opt}$ 的若干典型值。此时 ΔF 当然大于表1和2中的相应值（对于同样的 ψ 和 p ）。

从表1—3还可得到下列结论：对于同样的 p 和 N_e 值，总有 $(\Delta F)_{\psi=0} > (\Delta F)_{\psi=\gamma_c} > (\Delta F)_{\psi=\theta_c}$ ，即阶梯结构的带宽小。这一点过去常被误解。事实上，由图3可见，在区间 (F_1, F_2) 内平面结构的两个因子都是凹的，为了保持中央凹深=3dB， $(1/F_1 F_2)_{opt}$ 将较小（如表1—3的数据所证实），因而很容易被误解为平面结构的带宽 ΔF 也较小。但

表1 体波声光器件的优化设计

[($1/F_1 F_2$) $_{opt}$ 为按中央凹深=3dB的优化值， $(N_e)_{opt}$ 为按 $\Delta F \approx 0.667$ 的优化值]

| ψ | p | $(N_e)_{opt}$ 或 [(N_e) $_{opt}+1$] | $(1/F_1 F_2)_{opt}$ | $(BL)_{min}$ [dB] | 中央凹深(dB) | ΔF |
|------------|-----|--|---------------------|-------------------|----------|------------|
| 0 | 1 | 14 | 1.059 | 3.10 | 3.000 | 0.68 |
| | 2 | 6 | 1.008 | 16.99 | 3.000 | 0.68 |
| | 3 | 4 | 1.078 | 13.51 | 3.000 | 0.72 |
| | 3 | [5] | 1.062 | 13.52 | 3.000 | 0.64 |
| γ_c | 1 | 14 | 1.065 | 0.17 | 3.000 | 0.68 |
| | 2 | 7 | 1.069 | 0.67 | 3.000 | 0.67 |
| | 3 | 4 | 1.089 | 1.53 | 3.000 | 0.70 |
| | 3 | [5] | 1.070 | 1.33 | 3.000 | 0.64 |
| θ_c | 1 | 14 | 1.064 | 0.12 | 3.000 | 0.67 |
| | 2 | 6 | 1.080 | 0.53 | 3.000 | 0.70 |
| | 2 | [7] | 1.068 | 0.47 | 3.000 | 0.65 |
| | 3 | 3 | 1.125 | 1.64 | 3.000 | 0.70 |
| | 3 | [4] | 1.089 | 1.28 | 3.000 | 0.65 |

表2 表面波声光器件的优化设计

[($1/F_1 F_2$) $_{opt}$ 为按中央凹深=3dB的优化值， $(N_e)_{opt}$ 为按 $\Delta F \approx 0.40$ 的优化值]

| ψ | p | $(N_e)_{opt}$ | $(1/F_1 F_2)_{opt}$ | $(BL)_{min}$ [dB] | 中央凹深[dB] | ΔF |
|------------|-----|---------------|---------------------|-------------------|----------|------------|
| γ_c | 1 | 42 | 1.021 | 0.066 | 3.000 | 0.40 |
| | 2 | 21 | 1.022 | 0.24 | 3.000 | 0.40 |
| | 3 | 14 | 1.023 | 0.54 | 3.000 | 0.40 |
| | 4 | 10 | 1.025 | 1.01 | 3.000 | 0.40 |
| | 5 | 8 | 1.027 | 1.58 | 3.000 | 0.39 |
| | 6 | 6 | 1.032 | 2.41 | 3.000 | 0.40 |
| | 7 | 4 | 1.044 | 3.53 | 3.000 | 0.39 |
| θ_c | 1 | 42 | 1.021 | 0.053 | 3.000 | 0.40 |
| | 2 | 21 | 1.022 | 0.19 | 3.000 | 0.40 |
| | 3 | 14 | 1.023 | 0.44 | 3.000 | 0.39 |
| | 4 | 10 | 1.025 | 0.82 | 3.000 | 0.39 |
| | 5 | 8 | 1.026 | 1.33 | 3.000 | 0.39 |
| | 6 | 6 | 1.032 | 2.23 | 3.000 | 0.39 |
| | 7 | 4 | 1.047 | 4.13 | 3.008 | 0.39 |

表3 一级超声跟踪声光器件的局部优化设计

 $[(1/F_1 F_2)_{opt}]$ 为按中央凹深=3dB的优化值, $N_e < (N_e)_{opt}$

| ψ | p | N_e | $[(1/F_1 F_2)_{opt}]$ | $(BL)_{min}[dB]$ | 中央凹深[dB] | ΔF |
|------------|------------|-------|-----------------------|------------------|----------|------------|
| 0 | 1 | 4 | 1.167 | 2.92 | 3.000 | 1.22 |
| | 1 | 6 | 1.124 | 3.03 | 3.000 | 1.02 |
| | 1 | 8 | 1.097 | 3.07 | 3.000 | 0.88 |
| | 1 | 10 | 1.080 | 3.08 | 3.000 | 0.80 |
| | 1 | 12 | 1.068 | 3.10 | 3.000 | 0.74 |
| | 1 | 13 | 1.063 | 3.10 | 3.000 | 0.70 |
| | γ_0 | 1 | 4 | 1.237 | 0.46 | 3.000 |
| 1 | | 6 | 1.155 | 0.35 | 3.000 | 1.00 |
| 1 | | 8 | 1.115 | 0.28 | 3.000 | 0.88 |
| 1 | | 10 | 1.092 | 0.23 | 3.000 | 0.79 |
| 1 | | 12 | 1.076 | 0.20 | 3.000 | 0.73 |
| 1 | | 30 | 1.030 | 0.084 | 3.000 | 0.46 |
| 2 | | 4 | 1.126 | 1.00 | 3.000 | 0.86 |
| 2 | | 6 | 1.082 | 0.75 | 3.000 | 0.72 |
| 2 | | 15 | 1.031 | 0.34 | 3.000 | 0.47 |
| 3 | | 3 | 1.129 | 1.72 | 3.000 | 0.77 |
| 3 | | 10 | 1.031 | 0.75 | 3.000 | 0.47 |
| 4 | | 7 | 1.038 | 1.39 | 3.000 | 0.47 |
| 5 | | 5 | 1.045 | 2.26 | 3.000 | 0.48 |
| 6 | | 4 | 1.050 | 3.05 | 3.003 | 0.44 |
| θ_0 | 1 | 4 | 1.236 | 0.27 | 3.000 | 1.12 |
| | 1 | 6 | 1.154 | 0.21 | 3.000 | 0.97 |
| | 1 | 8 | 1.114 | 0.17 | 3.000 | 0.86 |
| | 1 | 10 | 1.091 | 0.15 | 3.000 | 0.79 |
| | 1 | 12 | 1.075 | 0.13 | 3.000 | 0.73 |
| | 1 | 30 | 1.030 | 0.061 | 3.000 | 0.46 |
| | 2 | 4 | 1.125 | 0.73 | 3.000 | 0.80 |
| | 2 | 15 | 1.031 | 0.25 | 3.000 | 0.47 |
| | 3 | 10 | 1.032 | 0.58 | 3.000 | 0.46 |
| | 4 | 7 | 1.037 | 1.14 | 3.000 | 0.46 |
| | 5 | 5 | 1.046 | 2.10 | 3.000 | 0.46 |
| | 6 | 4 | 1.052 | 3.34 | 2.999 | 0.44 |

实际上由图3可见,在区间 (F_1, F_2) 外平面结构的两个因子反而有相反的变化趋势,从而 $BL-F$ 曲线的下降要慢得多,导致 $(\Delta F)_{\psi=0}$ 较大。由此可见,阶梯结构的唯一优点是能把超声利用率提高一倍(平面结构即使在 $p=1$ 时 $(BL)_{min} \approx 3dB$,阶梯结构当 p 较小时 $(BL)_{min} \approx 0$),在增大带宽方面毫无用处。随着大 M_2 值声光材料和大 k 值电压材料的开发,体波器件完全只需要采用平面结构。过去文献中把阶梯结构提得太高,这是不公正的。至于 $(\Delta F)_{\psi=0} < (\Delta F)_{\psi=\gamma_0}$ 的原因是:在 $\psi=\theta_0$ 情况总有 $|x(F_2)| > |x(F_1)|$,

这就使 $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2 - F$ 从而 $BL-F$ 曲线的右峰下塌,故 $\psi = \theta$ 。情况中 $BL-F$ 曲线对 $F = 1$ 的对称性差于 $\psi = \gamma$ 情况,而且 F_H 也较小,导致 $(\Delta F)_{\psi=0}$ 较小。

最后讨论一下在工艺上实现设计参数 r 、 ψ 和 s 的精度要求问题。

(1) r (或 L_e) 的精度: 由式 (15) 和 (15a) 可见, 参数 r 仅和 p 一起出现在 $x-F$ 表达式内。在上节中, 我们已讨论过 p 的变化对 $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2 - F$ 曲线的影响。对于阶梯结构, 当 p 从 1 变到 7 时, $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2 - F$ 曲线才有明显变化; 对于平面结构, 由于因子 $\frac{F(F_1+F_2-F)}{2F_1F_2}$ 的值较大, 当 p 从 1 变到 2 时就有明显变化; 但都需要有成倍的变化。

因此 r 的精度问题实际上不需考虑。

(2) ψ (或 h) 的精度: 如上指出, $\psi = \gamma$ 和 $\psi = \theta$ 。这两种情况的结果实际上没有什么区别, 而由式 (16), 这两种情况的阶梯高度 h 相差 $1/F_1F_2$ 倍。由表 1—3 可见, 对于体波器件 ($pN_e \leq 14$) 有 $(1/F_1F_2)_{\psi=0} > 1.05$, 故 ψ 或 h 的精度只需达到 5%; 对于表面波器件 ($pN_e > 14$) 有 $(1/F_1F_2)_{\psi=0} > 1.02$, 故应达到 2% 的精度。

(3) s 的精度: 按式 (14), s 由 $1/F_1F_2$ 完全确定, 而由图 4—6 (以及相应的计算数据) 可见: 当 $pN_e = 4$ 时, $1/F_1F_2$ 变化 3% 就可使 $BL-F$ 曲线的中央凹深变化 1dB; 当 $pN_e = 14$ 时, $1/F_1F_2$ 变化 1% 就可使中央凹深变化 1dB; 而当 $pN_e = 40$ 时, $1/F_1F_2$ 变化 3% 凹深即变化 1dB。因此, 对于体波器件, s 应有 1% 的精度; 而对于表面波器件, 则应有 3% 的精度。

程元达和杨大志同志曾参加本文的部分计算工作, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] D. A. Pinnow: "Acoustooptic Light Deflector; Design Consideration for First Order Beam Steering" IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, SU-18 (1971) 209.
- [2] E. K. Sittig: "Elastooptic Light Modulation and Deflection", Progress in Optics, Vol. IX, E. Wolf ed., (North Holland, 1972) 229.
- [3] S. K. Yao & E. H. Young: "Two-Hundred (200) MHz Bandwidth Step-Array Acousto-Optic Beam Deflector" Proc. SPIE, Vol. 90, Acousto-Optics(1976) 23.
- [4] G. A. Alphonse: "Broad-Band Acousto-Optic Deflectors Using Sonic Grating for First-Order Beam Steering", RCA Rev., 33(1972) 543.
- [5] G. A. Alphonse: "Broad-Band Acousto-Optic Deflectors; New Results", Appl. Opt., 14 (1975) 201.
- [6] Le T. Nguyen & C. S. Tsai: "Efficient Wideband Guided-Wave Acoustooptic

- Bragg Diffraction Using Phased-Surface Acoustic Wave Array in LiNbO₃ Waveguides", *Appl. Opt.* 16 (1977) 1297.
- [7] C. S. Tsai, Le T. Nguyen, M. A. Alhaider, P. Seunier, B. Kim & I. W. Yao: "Thin-Film Elastooptic and Acoustooptic Devices for Wideband Fiber and Integrated Optic Systems", *Proc. of the Technical Program, EOSD Conference (1975)* 444.
- [8] 赵启大, 徐介平: "平面结构一级超声跟踪时的布拉格带宽和声光器件的最佳设计", *北京工业大学学报*, 6卷4期(1980) 25页。
- [9] 俞宽新, 徐介平: "阶梯结构一级超声跟踪时的布拉格带宽和声光器件的最佳设计", *北京工业大学学报*, 6卷4期(1980) 32页。
- [10] J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics*, (Mc Graw-Hill, 1968) Ch. 3.
- [11] M. Born & E. Wolf: *Principles of Optics*, 5th ed., (Pergamon, 1975) Ch. 8.
- [12] I. C. Chang: "Acoustooptic Devices and Applications", *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*, SU-23 (1976) 2.
- [13] 徐介平: "表面波声光器件(二)" *北京工业大学学报*, 7卷2期(1981年6月) 63页。