



# 双频带二氧化碲 声光偏转器

许炳活 储海群 金建辉 彭国生

(中科院上海硅酸盐所)

1991年9月30日收到

本文提出利用  $\text{TeO}_2$  晶体的双折射性能,在一块  $\text{TeO}_2$  晶体上实现满足 Dixon 方程正、负解的二个偏转区。在器件设计中,第一组高端频率正好与第二组低端频率相接,实现展宽频带的作用。我们研制的第二组频率范围为 40—80MHz,第一组频率范围为 80—140MHz。所以该偏转器带宽为 100MHz。

本文还提出新型声光换能器电极结构,从而改善了由于声切变波在  $\text{TeO}_2$  晶体中传播过程中声场发散而引起的声衰减。

## 一、引言

自从二氧化碲单晶问世以来<sup>[1]</sup>,显示出极好的声光特性。特别是由于沿[110]轴方向传播,沿[110]轴方向振动的切变波具有很慢的声速,因此可以缩短声光互作用长度,同时可以实现大偏转角,高分辨点数等优点,R. W. Dixon<sup>[2]</sup>和 E. G. H. Lean<sup>[3]</sup>等人最先利用正切相位匹配研制了“在轴型” $\text{TeO}_2$  声光偏转器。但这种器件由于中心频率处模式简并,出现“dip”效应<sup>[4]</sup>。1975年 Yano 等人提出非对称切向  $\text{TeO}_2$  偏转器<sup>[5]</sup>,即适当选择切变波波矢传播方向和[110]轴的夹角,把“dip”区域移出偏转器工作带宽范围,从而实现比较平坦的频响。这种类型器件通称为“离轴型”偏转器,它的中心频率与  $\text{TeO}_2$  晶体切向有密切关系。当增加声波矢传播方向与[110]轴偏角  $\theta_a$  时,偏转器的中心频率随着提高,从而其相对带宽变宽。但  $\theta_a$  不能取得过大。如果  $\theta_a$  取得过大,切变波声速增加,声光优值  $M_2$  下降以及由于声波相速方向和能流方向夹角增加,晶体的几何尺寸必须加大等不利因素。

我们曾研制  $\theta_a = 8^\circ$  的偏转器,其带宽可

达 60MHz。但目前某些信号处理系统,要求更宽带的声光偏转器。再增加  $\theta_a$  是不可取的,为此我们研制了双频带  $\text{TeO}_2$  偏转器,它的频宽可达 100MHz。

## 二、器件工作原理

晶体的声学性质可以由  $k$  曲面或  $\frac{k}{Q}$  曲面完全确定 ( $\frac{k}{Q} = \frac{1}{\Lambda f} = \frac{1}{v}$ ),  $\frac{k}{Q}$  曲面类似于晶体光学中的折射率曲面。一般来讲,声波既非纵波,又非切变波,其振动方向和相速方向的夹角可以任意的。对单轴晶体,不考虑旋光性时折射率曲面常为椭球,而  $\frac{k}{Q}$  曲面可以很复杂。但对  $\text{TeO}_2$  偏转器,因为只考虑[001]轴和[110]轴组成的平面, $\frac{k}{Q}$  曲面仍然是椭球,其方程为

$$\frac{\left[\frac{1}{V_{\theta a}}\right]^2 \cdot \cos^2 \theta_a}{\left[\frac{1}{V_{[110]}}\right]^2} + \frac{\left[\frac{1}{V_{\theta a}}\right]^2 \cdot \sin^2 \theta_a}{\left[\frac{1}{V_{[001]}}\right]^2} = 1 \quad (1)$$

由此不难得

$$V_{(\theta_a)}^2 = V_{[110]}^2 \cos^2 \theta_a + V_{[001]}^2 \sin^2 \theta_a \quad (2)$$

其中  $\theta_a$  为声波矢偏离 [110] 轴的角度。在  $\text{TeO}_2$  晶体中，声波相速方向和能流方向是不同的，其夹角  $\theta_B$  为：

$$\text{tg} \theta_B = \frac{V_{[001]}^2 - V_{[110]}^2 \sin^2 \theta_a}{2V_{(\theta_a)}^2} \quad (3)$$

由原始数据  $V_{[110]} = 616 \mu\text{m}/\mu\text{s}$ ， $V_{[001]} = 2104 \mu\text{m}/\mu\text{s}$ ，可以计算各种偏离轴  $\theta_a$  时超声相速  $V_{(\theta_a)}$  和相速方向和能流方向的夹角  $\theta_B$ ，其结果列在表 1。

对声光偏转器，其主要参数仍然是带宽，分辨率及衍射效率。但不同的应用，对这三个参数的要求是不一样的。如高分辨率射电频谱仪，要求尽可能高的频率分辨率，雷达信号处理系统，需要宽的衍射带宽；跳频电台侦察仪既要高的分辨率（10—20kHz），又要宽的带宽。目前国际上通用的  $\text{TeO}_2$  横波器件带宽一般为 40—50 MHz。表 2 为我们研制的三种类型器件的主要性能指标。由表可见，随着  $\theta_a$  增加，带宽也增宽，但进一步增加  $\theta_a$  是不现实的。这是因为随着  $\theta_a$  的增加， $V_{(\theta_a)}$  增加，从而导致分辨率（相等的孔径）和  $M_2$  值下降。如  $\theta_a = 6^\circ$  时  $M_2$  下降 16%， $\theta_a = 8^\circ$  时下降 25%（相对于  $\theta_a = 0$ ）。另一方面，随着  $\theta_a$  增加，超声能流方向和相速方向夹角增大，所以晶体尺寸需要加大。

分析以上情况，为了进一步提高偏转器带

表 1 不同  $\theta_a$  时  $v_{\theta_a}$  和  $\theta_B$

$\theta_a$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$v_{\theta_a} (\mu\text{m}/\mu\text{s})$	616	617	620	625	632	640	651	663	677
$\theta_B (^\circ)$	0	10.6	20.5	28.5	35.2	40.6	44.8	48.1	50.6

表 2 三种类型器件主要性能

$\theta_a (^\circ)$	6	7	8
中心频率 (MHz)	67	78	93
衍射效率 (%)	80	70	60
带宽 (3dB)(MHz)	40	50	60

应用声学

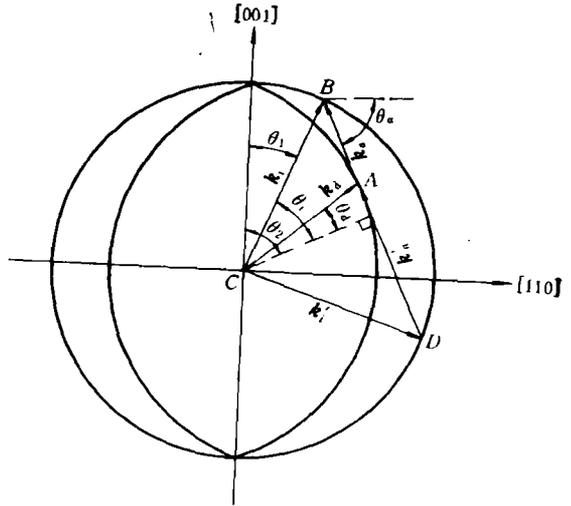


图 1  $\text{TeO}_2$  晶体的波矢图

宽，我们设计了双频带  $\text{TeO}_2$  声光偏转器。其设计思想是把 Dixon 方程的二个偏转区，设法在同一块  $\text{TeO}_2$  晶体上实现。

图 1 是正单轴晶体  $\text{TeO}_2$  的声光相互作用波矢图。其中  $k_1, k_2$  分别表示两个不同方向入射的入射光波矢， $k_1', k_2'$  为衍射光波矢， $k_s, k_s'$  分别表示声波波矢。为了实现较宽的相位匹配，采用“正切相位匹配”。由波矢图可见，在同一个声波传播方向，有二个闭合三角形  $\Delta ABC$  和  $\Delta ADC$ ，它们均满足“正切相位匹配”。换句话说，在同一个声波传播方向，由二个不同方向入射的光束，产生中心频率不同的两个声光相互作用区域。由图可得

$$\begin{cases} k_i = k_s \pm k_s \\ V_i = V_s \pm f_s \end{cases} \quad (4)$$

其中  $V_i$  为入射光光频， $V_s$  为衍射光光频， $f_s$  是声频。“±”是由入射光和声传播方向之间相对位置确定，利用余弦定理可得<sup>[6]</sup>

$$\begin{aligned} \sin \pm(\theta_a - \theta_1) &= \frac{\lambda}{2n_0 V_{(\theta_a)}} \left\{ f + \frac{n_0^2 V_{(\theta_a)}^2}{\lambda^2 f} \right. \\ &\times \left[ 4\delta + \frac{n_c^2 - n_0^2}{n_c^2} \sin^2 \theta_1 \right] \left. \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin \pm(\theta_2 - \theta_a) &= \frac{\lambda}{2n_0 V_{(\theta_a)}} \left\{ f - \frac{n_0^2 V_{(\theta_a)}^2}{\lambda^2 f} \right. \\ &\times \left[ 4\delta + \frac{n_c^2 - n_0^2}{n_c^2} \sin^2 \theta_1 \right] \left. \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

表3  $\theta_a$  与  $f_0, \theta_i$  及  $\theta_d$  关系

$\theta_a(^{\circ})$		0	1	2	3	4	5	6	7	8
sin +	$\theta_i(^{\circ})$	-1.01	0.06	0.99	1.86	2.68	3.47	4.24	5.01	5.78
	$f_0(\text{MHz})$	38.06	38.04	40.55	41.54	52.25	61.19	71.25	82.12	93.87
sin -	$\theta_i(^{\circ})$	1.01	2.22	3.56	4.98	6.44	7.92	9.41	10.91	12.01
	$f_0(\text{MHz})$	38.63	46.96	60.33	77.04	95.94	116.3	138.3	161.5	185.9

$$\begin{cases} \theta_i = \pm(\theta_a - \theta_1) \\ \theta_d = \pm(\theta_2 - \theta_a) \end{cases} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{\lambda}{360n_0} \rho \quad (8)$$

其中  $n_0$  为寻常光折射率,  $n_e$  为非寻常光折射率,  $\theta_i, \theta_d$  分别为入射角和衍射角,  $\rho$  为旋光率,  $\theta_1, \theta_2$  为  $k_i$  和  $k_d$  与光轴间的夹角. 由方程(6)的极值条件  $\frac{d\theta}{df} = 0$  求得极值频率  $f_0$

$$f_0 = \frac{n_0 V(\theta_a)}{\lambda} \left[ 4\delta + \frac{n_e^2 - n_0^2}{n_e^2} \sin^2 \theta_1 \right]^{1/2} \quad (9)$$

求方程(5)、(6)、(9)的数字解, 可得对应用于闭合三角形  $\triangle ABC$  和  $\triangle ADC$  的二组解, 其结果列在表 3.

### 三、双频带偏转器结构和测试结果

由表 3 可见, 某个  $\theta_a$  角, 对应于二组入射

角和中心频率. 利用这个现象可以设计双频带偏转器. 在设计中考虑到  $\text{TeO}_2$  晶体对切变波的高频声衰减很严重, 偏转器的高端频率不能取得太高, 一般不超过 160MHz. 另一方面, 当  $\theta_a$  值增加时, 入射角也随着增加, 则需要加大光传播方向的晶体尺寸, 因此我们  $\theta_a$  取  $5^{\circ}$ . 这时对应的  $f_0$  和  $\theta_i$  分别为  $f_0 = 61\text{MHz}$ ,  $f_0' = 116\text{MHz}$ ;  $\theta_i = 3.5^{\circ}$ ,  $\theta_i' = 7.9^{\circ}$ . 我们通过分束方法, 把激光束分成两束, 其中一束顺着声波传播方向入射, 并与  $[001]$  轴成  $7.9^{\circ}$  角度. 另一束逆着声波传播方向入射, 并与  $[001]$  轴成  $3.5^{\circ}$  角度.  $\theta_a = 5^{\circ}$  时声波波矢传播方向和能流传播方向成  $40.6^{\circ}$  角度. 图 2 表示双频带  $\text{TeO}_2$  声光偏转器示意图. 图中实线表示  $\text{TeO}_2$  晶体的实际取向, 虚线表示 Dixon 方程正解时应取的晶体取向, 点划线表示 Dixon 方程负解时的晶体取向. 实际上, 在晶体加工时, 使入射面与  $[001]$  轴垂直, 而在调试时, 令人射光束与

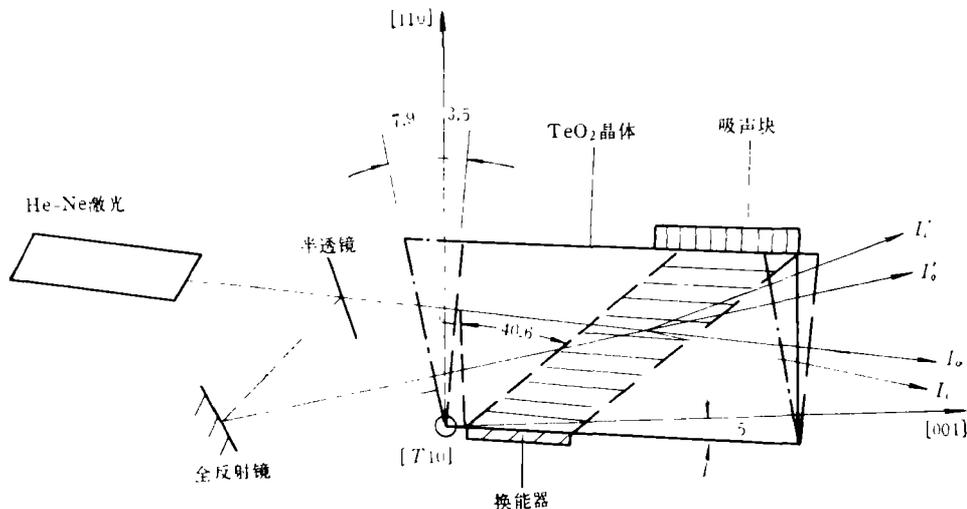


图 2 双频带  $\text{TeO}_2$  声光偏转器示意图实线为晶体的实际取向; ---线为 Dixon 方程正解时晶体取向; -.-线为 Dixon 方程负解时晶体取向.

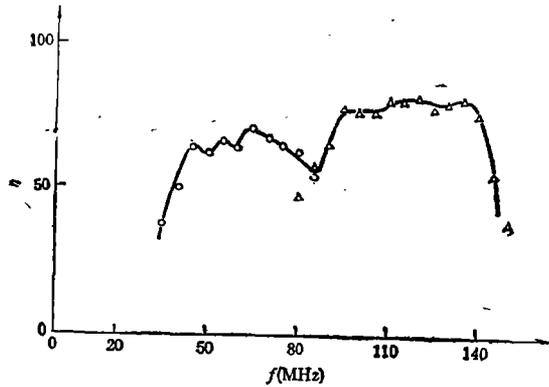


图3 双频带 TeO<sub>2</sub> 声光偏转器频率响应  
○表示 Dixon 方程正解 △表示 Dixon 方程负解

[001]轴成 3.5° 和 7.9°。这时有一些表面反射损失。

在双频带 TeO<sub>2</sub> 偏转器中，一片 X-切 LiNbO<sub>3</sub> 换能器工作在两个工作带宽。我们考虑到切变波的高频衰减，把换能器中心频率选在 95MHz，结果高频端效率比低频端高。图 3 为器件频率响应测试结果。由图可见，第一组 3dB 带宽为 40—80MHz，峰值效率接近 70%。第二组 3dB 工作带宽范围为 80—140MHz，其峰值效率为 80%。这二组衍射效率差是由于我们把 X-切割 LiNbO<sub>3</sub> 换能器谐振频率取得过高而引起的。经多次实际实验，适当选择换能器的谐振频率，可以做到这二组衍射效率达到接近。

#### 四、超声换能器结构

声光器件的声发散严重影响器件在很多领域中的应用。特别是切变波的声束发散限制声光器件的通光孔径。Cook 等人<sup>[7]</sup>提出选择适当的电极形状，使得衍射光产生积分效应，同时明显改善了声场发散。

图 4 为声光器件示意图。图中 P 点的声压由  $P(x, y, z)$  所确定。当光沿 y 轴传播时，其衍射由下式所确定

$$V(x, z) = k \int p(x, y, z) dy \quad (10)$$

(10)式表示衍射光的积分效应，其中 k 为常数。

应用声学

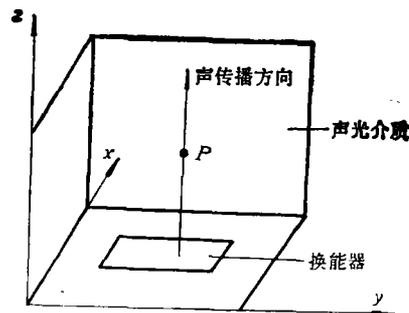


图4 声光器件示意图

当 z 为零时，换能器下部声场由电极形状确定。当 z 不等于零时，通过二维 Fourier 变换得<sup>[8]</sup>

$$p(k_x, k_y, z) = \iint p(x, y, z) e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} dx dy \quad (11)$$

其中  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。当  $k_y = 0$  时得一维 Fourier 变换，即

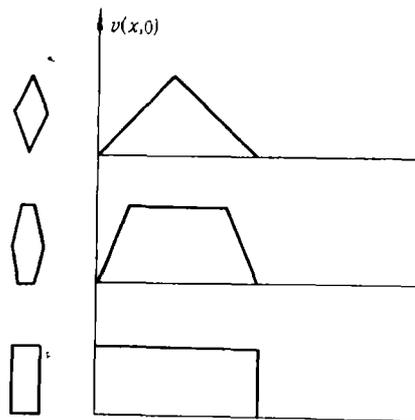


图5 电极形状与  $V(x, z)$  关系

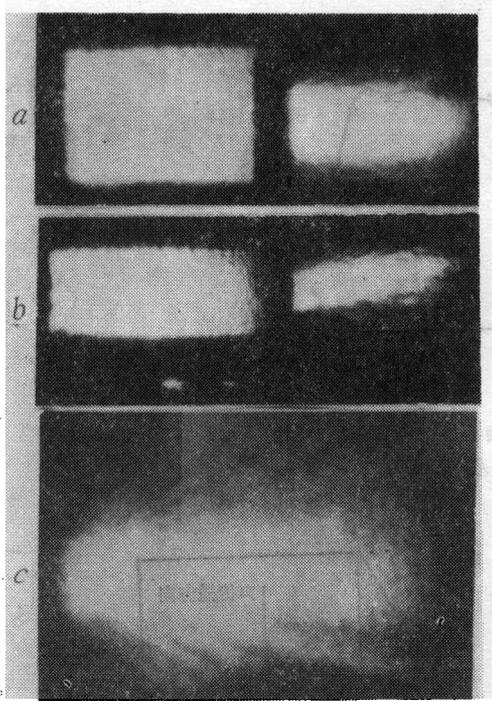


图6 声光器件横截面上声场分布  
a. 菱形电极; b. 六边形电极; c. 长方形电极. 图a和b中, 左边图为  $\text{TeO}_2$  晶体横截面.

$$p(k_x, z) = \int [\int p(x, y, z) dy] e^{-ik_x z} dx \quad (12)$$

上式中被积函数为  $V(x, z)$ . 其声压  $V(x, z)$  可以由  $z = 0$  时换能器形状所确定. 所以离换能器任意距离  $z_p$  的积分效应由  $p(k_x, 0) \exp(ik_x z_0)$  的逆变换中求得, 即

$$V(x, z_0) = \int p(x, y, z_0) dy \\ = \int e^{ik_x z_0} p(k_x, 0) e^{ik_x x} dk_x \quad (13)$$

图5为各种电极形状的  $V(x, 0)$  函数. 对

各向异性声光相互作用, 需要在声波长乘系数  $(1-2b)$ , 其中  $b$  为纯模轴附近慢曲线的二次系数<sup>[9]</sup>. 同时我们利用阴影法测量长方形电极、菱形电极以及六边形电极的声场图(图6).

图a和b中, 左边图表示  $\text{TeO}_2$  晶体的横截面, 右边图表示声场分布. 由图可见, 菱形电极可以改善声场发散.

## 五、结 论

在双频带  $\text{TeO}_2$  声光偏转器的实际应用中采用二组光电二极管阵列接收系统, 切换接收二个频带的衍射光, 比采用单频带偏转器, 其带宽扩展1—1.5倍. 另外, 本文提出的菱形电极不仅用于声光偏转器, 而且也可以用于声光调制器和多通道声光器件, 以便降低衍射光旁瓣电平.

## 参 考 文 献

- [1] G. Arlt, H. Schweppe.: *Solid State Comm.*, 6 (1968), 783.
- [2] R. W. Dixon, *IEEE J. Quantum. Electron.*, QE-3 (1967), 85.
- [3] E. G. H. Lean, C. F. Quate, H. T. Shaw, *Appl. Phys. Lett.* 10(1967), 48.
- [4] A. W. Warner, D. L. White, W. A. Bonner, *J. Appl. Phys.*, 48(1972), 4489.
- [5] J. Yano, A. Watanabe, *J. Appl. Phys.*, 45(1974), 1243.
- [6] 徐介平, 声光器件的原理, 设计和应用, 科学出版社, 1982.
- [7] B. D. Cook, E. Cavanagh, H. O. Dardy, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, SU-27-4(1980), 674.
- [8] Goodman, "Introduction to Fourier Optics" McGraw-Hill, San Francisco, 1968.
- [9] M. G. Cohen, *J. Appl. Phys.*, 38-10(1967), 1243.