

TeO₂ 慢切变波器件的一种新结构

李 宁*

(中国科学院光电技术研究所)

提要: 提出一种同时具有 TeO₂ 慢切变波离轴型和 [110] 型结构特点的新型偏转器结构——修正型, 推导出在该结构下 Dixon 方程普适性形式——修正的 Dixon 方程。用这组修正公式设计 TeO₂ 慢切变波器件将更加灵活。用于高频时适于瞬时宽带信号的实时处理。

A new construction of slow shear wave cells in TeO₂

Li Ning

(Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica)

Abstract: A new version is suggested in this paper which is possessed of both the off-axis and the [110] mode properties of slow shear wave in TeO₂, and modified Dixon formula having universality under this construction have been derived, which shows better trade-off between the off-axial and the [110] modes. It makes the designing for the slow shear wave cells in TeO₂ more flexible when the formula are used. The high frequency cells is appropriate for real time processing of the signals with instantaneous wide band.

一、问题的提出

随着声光技术日益成熟, 应用也愈来愈广泛。为满足系统小型化的需要, 偏转器应具有尽可能大的偏转角, 这就相当于器件应有足够大的带宽; 而对用于实时信号处理的偏转器, 特别是在雷达信号处理中, 存在大量瞬时宽带信号, 处理这些信号同样要求系统的宽带性。声光器件的工作频率与带宽满足一定的关系, 当带宽增大时, 工作频率就相应提高。因此, 需要研究出更多更好的高频声

光器件。

探索新的声光材料是高频器件研究的一个重要方面, 而充分利用现有材料是另一个重要方面。众所周知, TeO₂ 慢切变波由于其极小的声速和很高的声光优值而成为当今最佳超声工作模式。但这种模式由于声吸收较严重, 容易在较低频段工作。对用于大瞬时宽带信号处理的声光器件而言, 时间带宽积主要靠大带宽来提高, 较小的时间窗用于高频时声衰减并不很重要。因此, TeO₂ 慢切变

收稿日期: 1985年5月17日。

* 现在成都科技大学工程力学系工作。

波有可能在较高频段工作。实践表明^[1], 此工作模式中心频率在 300 MHz 时衍射效率可达 10% 以上, 在声光傅里叶变换信号处理机上也曾使用中心频率 150 MHz、带宽 100 MHz 的 TeO₂ 慢切变波 Bragg 盒^[2]。

当 TeO₂ 慢切变波器件采用离轴型结构时, 随频率的提高声速增加很快而声光优值下降, 从而失去该模式的优点。[110]型由于存在二次衍射而得不到较平滑的衍射。因此, 寻求一种新结构, 能够同时兼顾[110]型和离轴型的特点是很重要的, 本文所提出的 TeO₂ 慢切变波新结构(我们称之为修正型)较好地解决了这个问题。

二、修正型结构的波矢分布

为了便于比较, 我们分别给出[110]型和离轴型的波矢分布如图 1 和图 2。对[110]型, 通过引入相互作用面的旋转角 θ_{2r} 使工作频段满足要求, 对离轴型则是利用声的离轴角 θ_a 来达到同样目的。图中 \mathbf{K} 表示声波矢

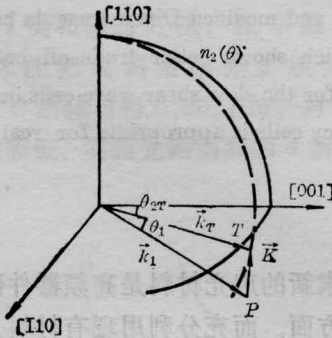


图 1 [110]型波矢分布

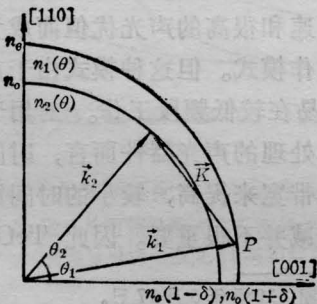


图 2 离轴型波矢分布

量, \mathbf{k} 表示光波矢量, θ_1 为入射角, θ_2 为衍射光偏转角。

修正型是建立在[110]型和离轴型基础之上的。在确立这种新的波矢关系时, 既要保留一定的声离轴角, 又让互作用面绕[110]轴旋转一个角度。这两部操作对工作频段均有影响, 而在这里保留声离轴角的目的是移动下陷频率; 互作用面的旋转则是用以满足工作频率的要求。因而, 采用修正型就有可能用较低的声速实现较高的频段, 同时在带宽内排除下陷频率, 即保留慢切变模式低声速和高声光优值的特点。图 3 给出了修正型的波矢分布。

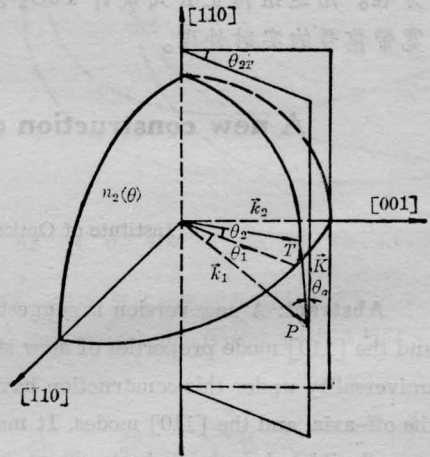


图 3 修正型波矢分布

三、Dixon 方程的修正

Dixon 方程的一般形式可以写成^[3]:

$$\begin{aligned} & \sin[\pm(\theta_a - \theta_1)] \\ &= \frac{\lambda_0}{2n_0V(\theta_a)} \left\{ f + \frac{n_0^2 V^3(\theta_a)}{\lambda_0^2 f} \right. \\ & \quad \left. \cdot \left[4\delta + \frac{n_e^2 - n_0^2}{n_e^2} \sin^2 \theta_1 \right] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \sin[\pm(\theta_2 - \theta_a)] \\ &= \frac{\lambda_0}{2n_0V(\theta_a)} \left\{ f - \frac{n_0^2 V^3(\theta_a)}{\lambda_0^2 f} \right. \\ & \quad \left. \cdot \left[4\delta + \frac{n_e^2 - n_0^2}{n_e^2} \sin^2 \theta_1 \right] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 n_o 、 n_e 分别为 o 光和 e 光的折射率, δ 为旋光度, λ_0 为空气中的光波长, f 为声频, θ_1 、 θ_2 为光入射角和衍射角, $V(\theta_a)$ 为沿 θ_a 方向的声速。上述方程适于相互作用面在 $[110]$ - $[001]$ 平面内的情况。对于修正型结构, 由于相互作用面的旋转使其偏离了 $[110]$ - $[001]$ 平面, 因此, 必须对上面的 Dixon 方程进行修正。

首先需要注意的是方程(1)、(2)左右两端各角量的意义是不同的。左端的 $(\theta_a - \theta_1)$ 及 $(\theta_2 - \theta_a)$ 是由简单的角度代换得出的, 故在修正型中将保持原有形式不变。而方程右端的 θ_1 是 $n_o^2(\theta_1)$ 作二项式展开后略去高次项后余项中的角量。在折射率椭球中, θ_1 为入射光波矢与光轴的夹角, 在离轴型情况下与入射角是一致的。但在修正型中, 入射角定义为入射光波矢与 $[001]$ 轴绕着 $[110]$ 轴旋转 θ_{2T} 角度后形成的新坐标轴的夹角, 沿入射方向的折射率应由该方向与 $[001]$ 轴的夹角来确定。因此, 需要做角度转换。按图 4 我们不难推出

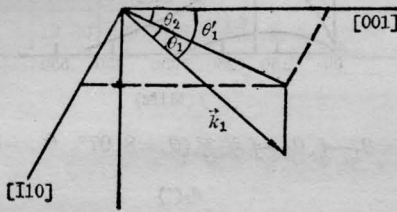


图 4 光入射角转换

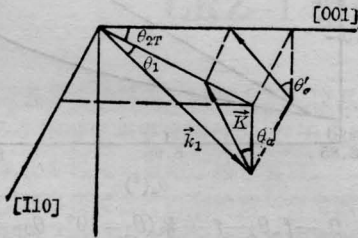


图 5 声离轴角转换

$$\theta'_1 = \sin^{-1} [(\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_{2T})^{\frac{1}{2}}] \quad (3)$$

另一个问题是声离轴角 θ_a 的转换。对 TeO_2 慢切变波, 其声波矢曲面在 $[110]$ - $[001]$ 平面内的截迹是已知的, 可写为

$$V^2(\theta_a) = V_t^2 \cos^2 \theta_a + V_z^2 \sin^2 \theta_a \quad (4)$$

式中 $V_t = 616 \text{ m/s}$, $V_z = 2104 \text{ m/s}$, θ_a 即为声波矢与 $[110]$ 轴的夹角。对于修正型结构, 由于相互作用面的旋转, 声波矢已不在 $[110]$ - $[001]$ 平面内。这将导致纯切变模式的变化, 但其慢切变分量占主要部分, 我们只需考虑这一部分。按图 5 所示, 把 θ_a 换算成在 $[110]$ - $[001]$ 平面内投影后的角度 θ'_a

$$\theta'_a = \text{tg}^{-1}(\text{tg} \theta_a \cos \theta_{2T}) \quad (5)$$

用方程(3)、(5)中的 θ'_1 和 θ'_a 分别代以方程(1)、(2)右端的 θ_1 和 θ_a , 于是

$$\begin{aligned} & \sin[\pm(\theta_a - \theta_1)] \\ &= \frac{\lambda_0}{2n_o V(\theta'_a)} \left\{ f + \frac{n_o^2 V^2(\theta'_a)}{\lambda_0^2 f} \right. \\ & \quad \left. \times \left[4\delta + \frac{n_e^2 - n_o^2}{n_e^2} \sin^2 \theta'_1 \right] \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sin[\pm(\theta_2 - \theta_a)] \\ &= \frac{\lambda_0}{2n_o V(\theta'_a)} \left\{ f - \frac{n_o^2 V^2(\theta'_a)}{\lambda_0^2 f} \right. \\ & \quad \left. \times \left[4\delta + \frac{n_e^2 - n_o^2}{n_e^2} \sin^2 \theta'_1 \right] \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

(6)、(7)两式可称为修正的 Dixon 方程。需要强调的是, 这组公式不仅解决了修正型的设计问题, 同时也适用于离轴型和 $[110]$ 型。当令 $\theta_{2T} = 0$ 时, 即退化为离轴型公式, 而令 $\theta_a = 0$ 时, 则成为 $[110]$ 型的设计公式。即是说, 离轴型和 $[110]$ 型都是修正型的特例。

表 1 为按上述修正公式设计的几组修正型参数计算结果。

表 1 中各符号意义如下:

$\delta\theta_a(^{\circ})$ ——声发散角; $f_H, f_L(\text{MHz})$ ——高、低端频率; $4f(\text{MHz})$ ——带宽; $\theta_{2H}, \theta_{2L}(^{\circ})$ ——高、低端衍射光偏转角; $\Delta\theta_2(^{\circ})$ ——动态偏转角; $\theta_{a_e}(^{\circ})$ ——极值声发散角; $V\theta_a(\text{m/s})$ ——对应 θ_a 方向的声速; $f_1, f_2(\text{MHz})$ ——对应 θ_a 方向的两个频率, 相互作用最强; f_e

表1 TeO₂修正型 θ_a-f, θ_2-f 曲线特征参数计算结果

θ_1	θ_{2T}	θ_a	$\delta\theta_a$	f_H	f_L	Δf	f_c	$\Delta\theta_2$	f_1	f_2	f_d	θ_{a_0}	$V\theta_{a_0}$	M_2
第一组解														
13.2	0	17.97	0.2	340	191	149	254	2.72	208	311	395	17.88	874	423
12	6.3	16.9	0.22	341	188	153	251	2.88	203	314	380	16.78	847	466
8	13	13.44	0.21	338	194	144	255	3.00	213	306	345	13.35	766	626
4	16.4	10	0.21	335	199	136	256	3.10	214	310	315	9.89	701	818
第二组解														
16.4	0	10.56	0.16	344	190	154	257	3.46	308	214	200	10.66	720	753
16.2	3	10.33	0.17	326	200	126	257	2.90	317	206	206	10.43	715	766
15	8	8.99	0.17	320	201	119	255	2.80	300	215	214	9.07	691	850
12	14	5.52	0.17	321	204	117	256	3.07	302	217	230	5.61	644	1049

——中心频率; f_d ——下陷频率; M_2 ——声光优值。

从以上导出的修正公式及表1的计算结果,我们可以归纳出修正型器件的设计程序如下:

1. 明确偏转器的使用要求,由此确定各设计参数,如中心频率 f_c 、工作带宽 Δf 、动态偏转角 $\Delta\theta_2$ 、衍射效率 η 、结构尺寸等;
2. 按照对器件尺寸的要求选择互作用面旋转角 θ_{2T} ,以得到相应的时间窗 τ 。
3. 按照对中心频率的要求用修正的 Dixon 方程设计计算,解出相应的光入射角 θ_1 、声离轴角 θ_a ,并验证带宽及动态偏转角等;
4. 当对衍射效率要求较高时,易选择较大的 θ_{2T} 值;
5. 对设计结果进行相应的声增透膜计算,并确定电极面积;
6. 验证是否进入 Bragg 区。

图6、图7为表1中的一组计算曲线。可以看出,修正型与离轴型有相似的性质,衍射角与频率之间有良好的线性关系。由表可见,修正型可以用比离轴型小得多的声速来获得同样的工作频段,完全证实了上面的分析。对某一中心频率确定的器件,修正型可以通过

适当组合参数在声速、带宽、动态偏转角及高低端频率特性等多方面综合考虑,以满足实用要求。

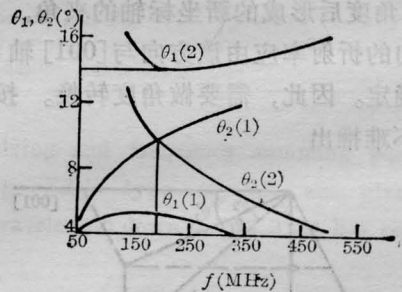


图6 θ_1-f, θ_2-f 关系 ($\theta_a=8.97^\circ, \theta_{2T}=8^\circ$)

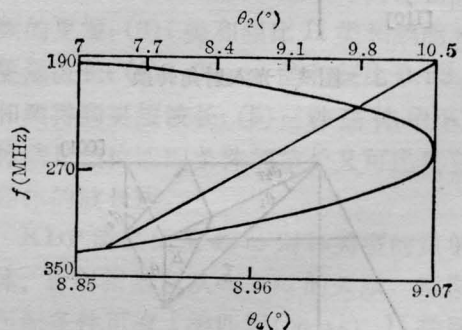


图7 θ_a-f, θ_2-f 关系 ($\theta_1=10^\circ, \theta_{2T}=8^\circ$)

四、器件的制作及其性能测试

器件的加工对离轴型和[110]型来说比

较简单,只要加工通光、通声两组平面,而修正型的加工比较复杂,三组平面都要加工,基面要改变。因此,要选择好加工的顺序。我们在晶体加工时先以[110]平面为基面,磨出 θ_{2T} 角,然后再以该平面为基面研磨[110]和[001]两个平面。其它的工序与一般器件加工相同。

修正型器件的性能测试与一般声光器件的测试方法相同,包括声场、换能器频率特性、器件衍射效率和带宽等几个方面。我们对设计加工的几个修正型器件采用暗场法和脉冲法测定其声场状态,得到定性的结果。换能器性能测试采用矢量电压表、高频信号发生器及频率计数器等测试仪器,其结果可以表示在史密斯圆图上或直接绘出匹配损耗与射频频率关系曲线。用上述方法测出的几个器件换能器带宽均大于100 MHz,最小匹配损耗小于0.2 dB。最后,我们对器件的衍

射效率和带宽进行了测试。对于中心频率250 MHz的器件其衍射效率大于30%。

修正型最大的特点就是具有尽可能低的声音和较高的声光优值。前者很容易用馈入器件一个短脉冲的方法得到验证。而对于后者,将体现在衍射效率的提高上,这个结论可以直接从衍射效率的关系式中得出。但由于衍射效率与器件加工中多种因素有关,因此不能就个别器件而论。

作者对黎俊杰导师的帮助表示感谢。实验中还得到王富元、梁月西等同志的协助,徐家仁、杨淑兰等同志为实验加工了器件,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 冯永全等;《压电与声光》,1983, No. 6, 51.
- [2] D. F. Hotz; *Appl. Opt.*, 1984, 23, No. 10, 1613.
- [3] 徐介平;《北京工业大学学报》,1978, No. 2, 79.

简 讯

高重复频率高平均功率板状 Nd:YAG 激光器获得成功

通常采用的棒状激光介质,在泵浦源的热影响下,将出现严重的光学畸变:如热聚焦、热应力感生的双折射和双轴聚焦等,直接影响激光器的输出特性,严重时还会导致激光熄灭。

为了在高重复率、高平均功率下激光器能保持优良的输出性能,我们采用了板状结构。将激光介质做成长方形截面的板,其上、下表面是平行平面,既是光泵面,又是全内反射光学面(下面简称全反射面)。两个通激光的面与上、下表面的夹角满足全内反射条件。与两全反射面垂直的两侧是热绝缘的,泵浦时在板内的热分布是一维的。光束的波前从一个全反射面以“之”字形传到另一个面的过程中,经

历了同样的温度梯度,由折射率温度变化引起的畸变便基本上得到补偿,相互抵消。这是提高固体激光器重复率和平均功率的关键所在。

我们以 $9 \times 30 \times 70$ mm的Nd:YAG板做成器件,这是国内的首次尝试。在重复率50Hz时,每个脉冲的输出能量是0.7J,平均功率35W(国际上1985年报道同类器件的水平是70W)。如提高电源的重复率,可得到更高的平均功率。

所用Nd:YAG材料由本所八室提供。

(中国科学院上海光机所 何慧娟 刘亚钢

1986年5月16日收稿)