

工作于1.064微米的TeO₂声光偏转器

激光研究室 徐介平

提要:本文按文献[1]的思路计算离轴型氧化碲偏转器工作于1.064 μ时的布拉格带宽。结果表明:当离轴角 $\bar{\vartheta}_a=8^\circ$ 时,布拉格带宽可达到50MHz,因而可达到1000个可分辨点;又若改按Dixon方程的第二组解工作时,布拉格带宽虽基本不变,但相对带宽 $\frac{\Delta f}{f_c}$ 可下降至0.43,此时换能器用单层增透已足。

在文献[1]中曾提出,根据声光偏转器的实际工作情况,应在入射光方向 ϑ_1 保持不变的条件下求解反常布拉格绕射的基本方程,由此可精确决定声光偏转器的布拉格带宽和换能器长度等重要设计参数。但在[1]中仅就四种可见激光波长(6328、5145、4880和4416 Å)作了计算,而未计算工作于1.064 μ的情况。鉴于在不少实际应用中,需要有工作于1.064 μ激光的声光偏转器,而且要求相当大的可分辨点数 N 。本文将按[1]中思路对TeO₂声光偏转器工作于1.064 μ时的布拉格带宽作出补充计算,并对工作于1.064 μ TeO₂声光偏转器的性能作出评价。

一、计算结果

在[1]中已给出离轴型TeO₂声光偏转器的Dixon方程为([1]中(9)和(10)式)

$$\left\{ \begin{aligned} \sin \pm (\vartheta_a - \vartheta_1) &= \frac{\lambda}{2n_o v(\vartheta_a)} \left\{ f + \frac{n_o^2 v^2(\vartheta_a)}{\lambda^2 f^2} \left[4\delta + \frac{n_e^2 - n_o^2}{n_e^2} \sin^2 \vartheta_1 \right] \right\} & (1) \\ \sin \pm (\vartheta_a - \vartheta_a) &= \frac{\lambda}{2n_o v(\vartheta_a)} \left\{ f - \frac{n_o^2 v^2(\vartheta_a)}{\lambda^2 f^2} \left[4\delta + \frac{n_e^2 - n_o^2}{n_e^2} \sin^2 \vartheta_1 \right] \right\} & (2) \end{aligned} \right.$$

式中+号对应于第一组解,一号对应于第二组解,而 $v(\vartheta_a)$ 则由下式决定([1]中(11)式)

$$v^2(\vartheta_a) = v_{[110]}^2 \cos^2 \vartheta_a + v_{[001]}^2 \sin^2 \vartheta_a \quad (3)$$

其中 $v_{[110]} = 616 \mu\text{m}/\mu\text{s}$ 而 $v_{[001]} = 2104 \mu\text{m}/\mu\text{s}$ 。

TeO₂单晶对于1.064 μ激光的 n_o 、 n_e 和 ρ 已由[2]给出: $n_o = 2.20675$ 、 $n_e = 2.3507$ 和 $\rho = 25.60 \text{ deg/mm}$ 。并可由 $\delta = \frac{\lambda \rho}{360 \cdot n_o}$ ([1]中(7)式)计算 δ 。

声光偏转器的实际工作情况应为入射角 ϑ_1 保持不变,在选定 ϑ_1 后,由求解联立方程(1)和(3),可求出 $\vartheta_a \sim f$ 关系,代入(2)即可求出 $\vartheta_2 \sim f$ 关系。表I给出离轴角 $\bar{\vartheta}_a$ 取 6° 时第一组解和第二组解以及 $\bar{\vartheta} = 8^\circ$ 时第一组解的 $\vartheta_a \sim f$ 关系中五个特征频率的数据,

(ϑ_1 取五个不同的值, 同时给出极值频率 f_0 处的超声半发散角 $\delta\vartheta_{a_0}$) $\vartheta_a = 6^\circ$ 和 8° 时, 凹陷频率 f_a 的计算值见[2]。

表 I

工作状态	f_a (MHz)	ϑ_1 (deg)	$\delta\vartheta_{a_0}$ (deg)	f_L (MHz)	f_1 (MHz)	f_0 (MHz)	f_2 (MHz)	f_H (MHz)
$\vartheta_a = 6^\circ$ 第一组解	61	4°16'	0.120	22	26	38	56	65
		4°17'	0.096	24	27	38	54	62
		4°18'	0.075	25	28	38	52	59
		4°19'	0.053	27	30	39	50	55
		4°20'	0.030	29	32	39	47	51
$\vartheta_a = 6^\circ$ 第二组解	61	9°16'	0.01544	67	69	77	84	88
		9°17'	0.0275	64	67	77	87	92
		9°18'	0.03815	62	66	77	89	95
		9°19'	0.0488	60	65	77	91	98
		9°20'	0.0609	59	64	77	93	101
$\vartheta_a = 8^\circ$ 第一组解	83	5°45'	0.161	30	35	51	75.5	89
		5°46'	0.140	31	36	51	74	86
		5°47'	0.116	32	37	51	72	82
		5°48'	0.095	34	38	52	69	79
		5°49'	0.073	36	40	52	67	75

由表 I 可见: 对于上述三种情况, 入射角 ϑ_1 以分别取 4°18'、9°18' 和 5°47' 为最佳, 即

既保证 f_a 排除在频带 (f_L', f_H') 之外, 又使带宽 $\Delta f' = f_H' - f_L'$ 最大。图 1~3 分别给出上述三种情况, 并且 δ_1 取最佳值时 $\delta_a \sim f$ 关系和 $\delta_2 \sim f$ 关系, 可以看出 $\delta_2 \sim f$ 曲线同样具有良好的线性, 不需要作任何扫描非线性的补偿。

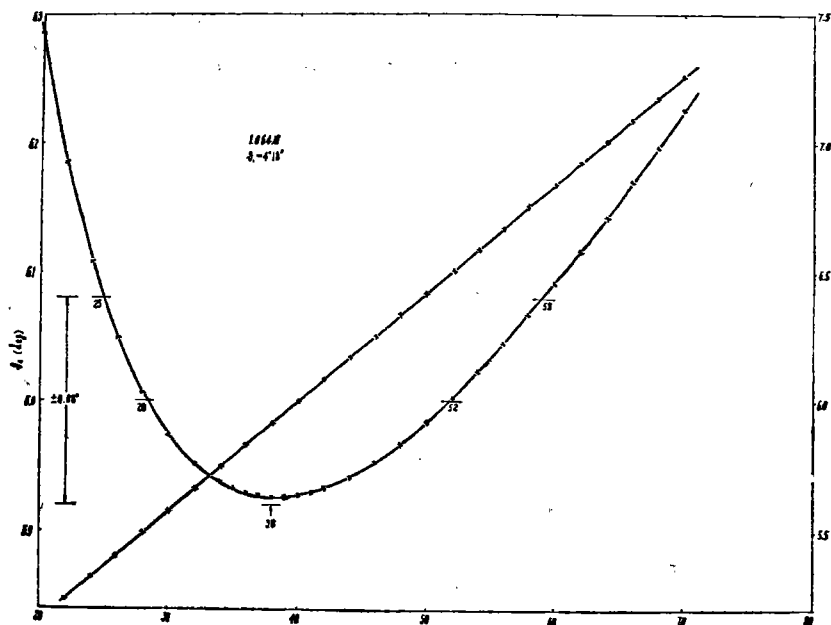


图 1

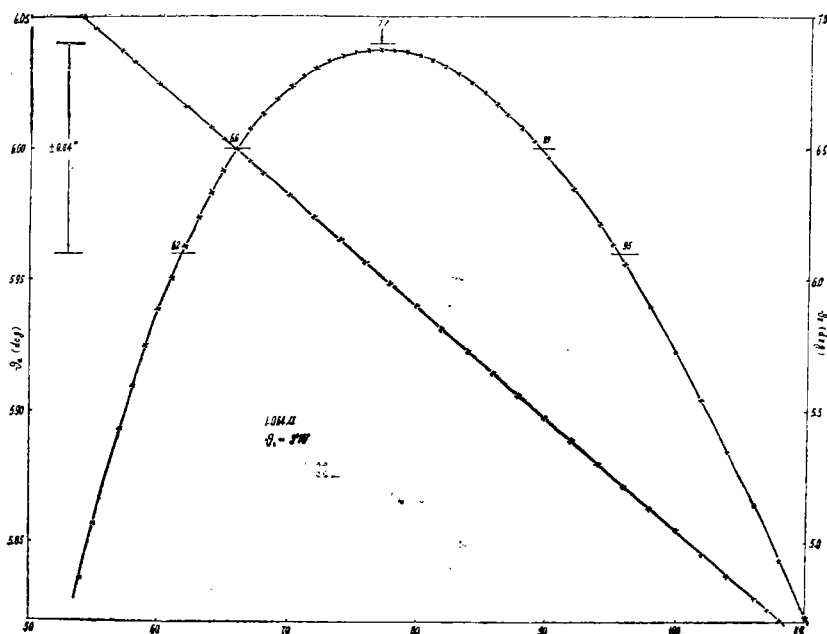


图 2

以上决定的通带 (f_L', f_H') 是按起作用超声方向 (即满足 *Dixon* 方程的超声方向) 限制在 $\vartheta_a \pm \delta\vartheta_a$ 内这一条件决定的, 但实际的声光器件其换能器长度 L 总是一定的, 由于低端和高端的超声波长不同, 从而超声的发射情况也不相同, 因此把 (f_L', f_H') 作为布拉格

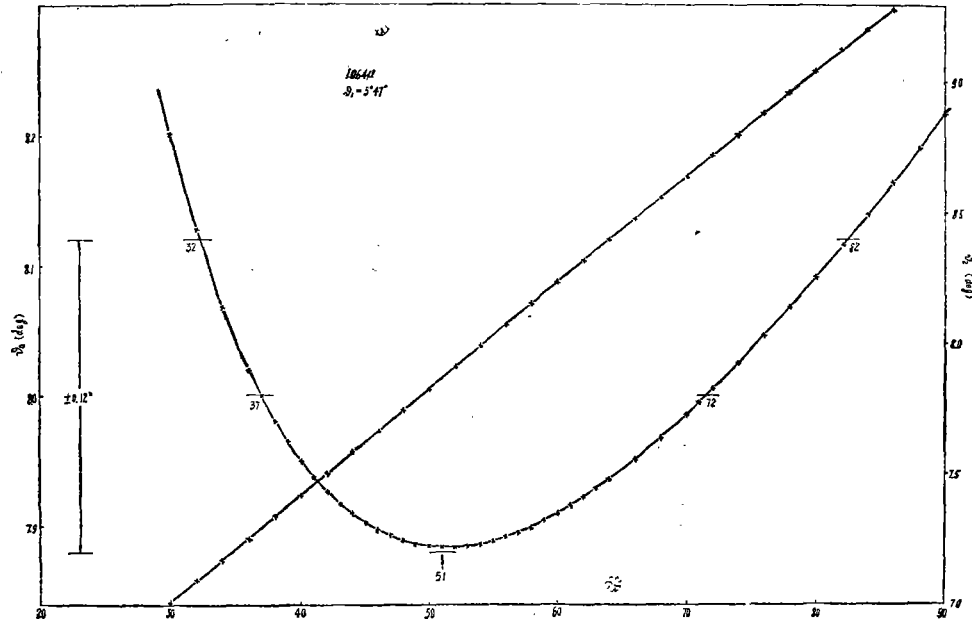


图 3

带宽是近似的。为了精确决定布拉格带宽, 应该计算在各种频率 f 时起作用超声的强度 $P(f)$ 然后根据所允许的不均匀性确定布拉格带宽。如 [1] 指出: 单片结构的 $4dB$ 布拉格带宽由下列条件 (它相当于 [1] 中 [14] 式) 决定

$$\frac{Lf}{v(\vartheta_a)} \cdot \delta\vartheta_a = \frac{1}{2} \quad (4)$$

和 [1] 中一样, 首先按极值频率 f_0 处所需半发散角 $\delta\vartheta_{a0}$ 来决定 L , 注意到对上述三种情况当取最佳 ϑ_1 角时, $\delta\vartheta_{a0, opt}$ 分别近似为 $0.08^\circ \approx 1.4mrad$ 、 $0.04^\circ \approx 0.7mrad$ 和 $0.12^\circ \approx 2.1mrad$, 又按 (3) 式 $v(6^\circ) = 651\mu m/\mu s$ 而 $v(8^\circ) = 677\mu m/\mu s$, 容易算出 L 的数值如表 I 所示。

在选定 L 后, $4dB$ 布拉格带宽的低端频率 f_L 和高端频率 f_H , 即下列方程 (它相当于 [1] 中 (15) 式) 的两个根

$$\frac{v(\vartheta_a)}{2 \cdot f(MHz)L(mm)} \times 0.0573 = \delta\vartheta_a \quad (5)$$

对于上述三种情况, 方程 (5) 的两个根, 即 f_L 和 f_H 亦列于表 I。表 I 同时列出 $4dB$ 布拉格带宽 $\Delta f = f_H - f_L$ 、通带中心频率 $f_0 = \frac{f_H + f_L}{2}$ 、相对带宽 $\frac{\Delta f}{f_0}$ 以及低端特征长度 $L_0^{(L)}$

和低端 Q 值 $Q^{(L)}$ 。

表 I

工作状态	f_o (MHz)	L (mm)	f_L (MHz)	f_H (MHz)	Δf (MHz)	f_c (MHz)	$\frac{\Delta f}{f_c}$	$L_o^{(L)}$ (mm)	$Q^{(L)}$
$\bar{\theta}_a = 6^\circ$ 第一组解	38	6.1	23	56	33	40	0.825	1.66	23
$\bar{\theta}_a = 6^\circ$ 第二组解	77	6.05	61	94	33	78	0.43	0.24	158
$\bar{\theta}_a = 8^\circ$ 第一组解	51	3.2	30	79	49	55	0.89	1.03	19.5

二、简短讨论

如 [1] 指出, 对于四种可见激光, 当取 $\bar{\theta}_a = 6^\circ$ 时, 布拉格带宽 Δf 都可达到 60MHz 以上, 因而当超声渡越时间 $\tau = 20\mu\text{s}$ (相当于取光孔径 $W = v(6^\circ)\tau = 13\text{mm}$) 时, 可分辨数点 $N = \tau \cdot \Delta f$ 即可达到 1000 以上。但对 1.064μ 激光, 当亦取 $\bar{\theta}_a = 6^\circ$ 时, Δf 只有 33MHz , 因而较难达到 1000 以上的可分辨点数。其主要原因是对于 1.064μ 激光, TeO_2 的旋光率 ρ 很小, 因而在光轴附近 e 光和 o 光的 k 曲面相差甚微, 导致工作频率很低, 特别极值频率仅为 38MHz 。

增大离轴角 $\bar{\theta}_a$ 可以得到较大的布拉格带宽, 由表 I 可见, 当 $\bar{\theta}_a$ 增大到 8° 时, 布拉格带宽为 $\Delta f = 49\text{MHz}$, 因而有可能达到 $N = 1000$ (光孔径 $W = v(8^\circ)\tau = 0.677 \times 20 = 13.5\text{mm}$ 时)。当然, 当 $\bar{\theta}_a = 8^\circ$ 时, 如 [1] 指出超声能量传播方向 θ_r 将增大至 58.6° (见图 4),

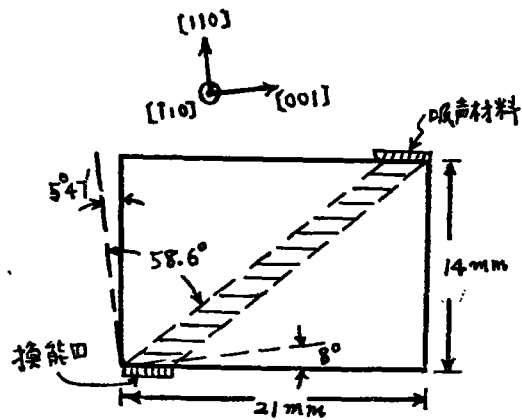


图 4

故沿 $[001]$ 方向 TeO_2 单晶的长度至少为 21mm (虽然换能器长度仅需 3.2mm); 此外,

当 $\bar{\theta}_a = 8^\circ$ 时, 相速 $v(8^\circ) = 677\mu\text{m}/\mu\text{s}$, 由于声光优值 $M_2 \propto v^3$, 故比起沿轴型 ($\bar{\theta} = 0^\circ$) 来优值 M_2 将下降 $\left[\frac{v(0^\circ)}{v(8^\circ)}\right]^3 = \left[\frac{616}{677}\right]^3 =$

0.75 倍; 但这些缺点还是可以容忍的, 因而工作于 1.064μ 的离轴型氧化碲声光偏转器, 其可分辨点可以达到 1000。

如 [2] 中指出, 对四种可见激光, 当 $\bar{\theta}_a = 6^\circ$ 时, 第二组解的极值频率 $f_c^{(2)}$ 都在

138MHz 以上, 此时 TeO_2 的超声吸收已很严重, 因此对于这四种可见激光来说, 器件只能工作于第一组解。对于 1.064μ 激光, 情况有所不同。事实上如表 I 指出, $\bar{\theta}_a = 6^\circ$ 时, 第二组解的极值频率 $f_c^{(2)} = 77\text{MHz}$, 而工作频带为 61 到 94MHz , 这样的工作频带对 TeO_2 来说是适宜的。可惜如表 I 指出, 由第一组解改为第二组解时, 不能得到更大的布拉

格带宽, $\bar{\theta}_a=6^\circ$ 时, Δf 均为 $33MHz$ 。但应注意, 当改为第二组解时, 相对带宽 $\frac{\Delta f}{f_c}$ 可由 0.825 下降为 0.43, 这可使换能器制作工艺大大简化。事实上对 X 切 LN/TeO_2 系统的换能器带宽的分析指出, 当中介层(电极层和键合层)均很薄时, 相对换能器带宽为 0.46; 当采用单层增透层时, 即键合层(钨层)为 $\frac{\lambda}{4}$ 而电极层(银或金)仍很薄时, 相对换能器带宽可提高到 0.715; 而当采用双层增透层时, 则可提高到 1.00^③。由 [1] 中表 I 和本文表 I 可见, 无论对哪个波长的激光, 当工作于第一组解时, 相对带宽都在 0.8 左右, 因而必须采用双层增透; 相反, 当工作于第二组解时 (1.064μ 而 $\bar{\theta}_a=6^\circ$ 时), 可仅用单层增透或根本不需增透层。此外由表 I 可见, 工作于第二组解的器件, 其 Q 值非常高, 即使在低端亦高达 158, 因而十分彻底地进入布拉格绕射区, 这对某些应用来讲是很可贵的。

参 考 文 献

- [1] 徐介平: “氧化碲声光偏转器的布拉格带宽和扫描线性问题” 北京工业大学学报, (1978年第1期)第1页; 或物理学报 27卷4期(1978年7月)
- [2] 徐介平: “声光器件的工作原理和设计方法 I. 反常布拉格绕射器件” 北京工业大学学报, 本期。
- [3] 徐介平: “声光器件的换能器带宽和镀层厚度的确定” 北京工业大学学报(1978年第3期)即将出版。