

# 高效 389.5MHz 声光调制器研究及应用

李玉斌

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 介绍了在国内首先用铌酸锂晶体代替氧化锌薄膜, 研制出高效 389.5MHz 脉冲声光调制器, 并在同步泵浦染料激光器腔倒空技术中获得应用。氧化锌的衍射效率仅接近 3%; 而铌酸锂的衍射效率可达 14% 以上, 倒空比为 50%。

**关键词:** 声光调制器; 染料激光器; 腔倒空; 衍射效率

## 1 引言

在超短脉冲范围内, 皮秒可调谐染料激光器, 由于它具有脉宽窄, 波长连续可调, 稳定性高等特点。所以它在研究物理、化学、生物学和工程技术中的超快微观过程显示出它的威力。它在高时间分辨率光谱学、非线性光学、光电子学等许多方面也都有着重要的应用。

腔倒空技术就是利用安置在染料激光器腔内的声光调制器件的衍射作用来进行激光的耦合输出。目的是使输出脉冲序列的重复频率可调 and 单脉冲能量增大; 从而使激光器的应用范围扩大。同理, 使声光调制器的衍射效率提高是拓宽应用范围的重要途径。

起初, 我们在皮秒染料激光器中使用的腔倒空器的换能器为氧化锌薄膜, 其衍射效率不到 3%。采用铌酸锂为换能器, 由于该材料机电耦合系数较高, 电 Q 值较低, 具有匹配网络简单等优点。理论计算其衍射效率要远远高于氧化锌薄膜的这个指标。但在 389.5MHz 这样高的频段上, 铌酸锂得须要减薄到 7.5 $\mu\text{m}$  的厚度, 其工艺复杂, 且国内无人做过, 难度相当大, 这是一项探索性的研制工作。

## 2 器件工作原理与设计

将调制器放在高反射镜组成的谐振腔内, 泵浦后, 因腔两端的高反射率, 使激光在腔内振荡而没有输出。当在调制器上加控制信号时, 以布喇格(Bragg)衍射<sup>[1]</sup>条件放置的声光调制器将光分成两束, 即 0 级光和 1 级光。由于光被偏转(相当于腔的一端的反射率从近似 100% 降到零)而从调制器输出, 从而实现腔倒空输出的目的。

我们研制的 389.5MHz 腔内脉冲声光调制器要求声光介质的光学损耗小, 性能稳定, 因此用熔石英为声光介质。并以能产生超声纵波的 36°Y 切铌酸锂为换能器。属于正常布喇格声

光衍射器件。器件的工作方式与结构见图 1:  
按布喇格超声衍射原理, 设声的行波方程为<sup>(1)</sup>

$$a(Z \cdot t) = A \cos(\omega_s t - k_s Z) \quad (1)$$

其中  $a$  为传声介质的质点的瞬时位移;  $A$  为介质质点位移的幅度;  $\omega_s$  为声波频率;  $k_s = \frac{2\pi}{\lambda_s}$  为声波的波常数。在一级近似下, 可以认为声光介质折射率的变化  $\Delta n$  正比于介质质点沿  $Z$  轴位移的变化率  $\frac{da}{dz}$ 。将(1)式对  $Z$  微分, 得

$$\Delta n(Z \cdot t) = \Delta n_0 \sin(\omega_s t - \frac{2\pi Z}{\lambda_s}) \quad (2)$$

若有一平面光波, 与  $Z$  轴成  $(\frac{\pi}{2} - \theta_i)$  角入射, 通过介质后将发生衍射, 如图 2(a) 所示即要求

$$X(\cos\theta_i - \cos\theta_r) = m\lambda \quad (3)$$

$m$  为整数, 欲使上式在  $m=0$  时对所有  $X$  值均成立, 则有  $\theta_i = \theta_r$ 。从各镜面衍射的光波之间位相要相同, 即要求图 2(b) 中的距离  $AO + BO = \lambda$ , 也即要求

$$2\lambda_s \sin\theta_B = \lambda \quad (4)$$

通常称(4)式为布喇格条件。由(4)式, 则

$$\theta_B = \sin^{-1} \frac{\lambda_0/n}{2\lambda_s} \quad (5)$$

其中  $n$  为石英对激光波长的折射率;  $\lambda_0$  为激光波长;  $\lambda_s$  为超声波长。

由于超声波在熔融石英中的传播速度  $V_s = 5.96 \times 10^5 \text{cm/s}$ , 当驱动频率为 389.5MHz, 可算得  $\lambda_s = 1.53 \times 10^{-3} \text{cm}$ ; 设入射光波长  $\lambda_0 = 5800 \times 10^{-8} \text{cm}$ , 石英的折射率  $n = 1.46$ 。将上面数值代入(5)式

$$\theta_B = \sin^{-1} \frac{5800 \times 10^{-8} \text{cm} / 1.46}{2 \times 1.53 \times 10^{-3} \text{cm}} = \sin^{-1} 0.01298 = 44' 36''$$

根据声光调制器设计最佳条件

$$a = \frac{4\lambda_s L}{\pi d_0 L_0} = 1.5 \quad (6)$$

$$t_r = 0.85\tau \quad (7)$$

其中  $a$  是激光束与超声束发散角之比;  $L_0 = \frac{\lambda_s^2}{\lambda_0/n}$  为声光器件的特征长度;  $t_r$  为声光调制器的上升时间;  $\tau = \frac{d_0}{v}$  为超声渡越时间;  $d_0$  是激光束的束腰;  $v$  是介质中的声速。

将前面已知数代入  $L_0 = \frac{\lambda_s^2}{\lambda_0/n}$  可求得声光器件的特征长度  $L_0 = 0.59 \text{mm}$ 。

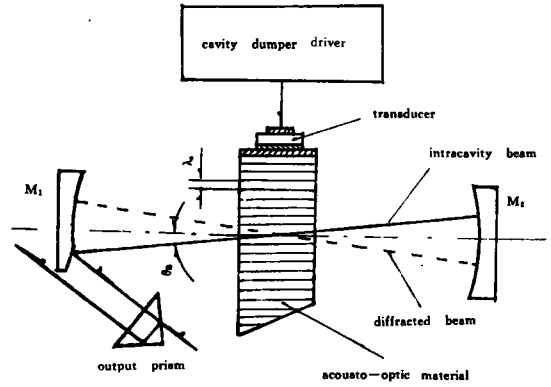


图 1 腔倒空器的构形

Fig. 1 Cavity configuration of a cavity-dumper

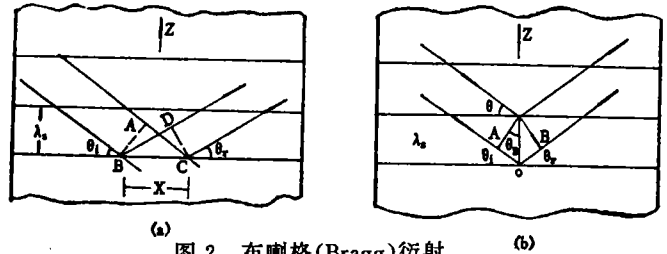


图 2 布喇格(Bragg)衍射

Fig. 2 Bragg diffraction

设计还应满足零级光和一级光的严格可分离条件<sup>(2)</sup>：

$$f_c \geq \frac{2.55}{\tau} \quad (8)$$

将  $\tau = \frac{d_0}{v}$  代入(8)式得：

$$d_0 \geq \frac{2.55v}{f_c} \quad (9)$$

这里取激光束的束腰  $d_0 = 40\mu\text{m}$ ；调制器的驱动频率  $f_c = 389.5\text{MHz}$ ；熔石英介质中的声速  $v = 5960\text{m/s}$ ；则

$$d_0 = 40\mu\text{m} \geq \frac{2.55v}{f_c} = 39.015\mu\text{m}$$

满足零级光和一级光的可分离条件。

依上述最佳条件<sup>(2-3)</sup>由公式(6)得出声光相互作用距离(也即换能器长度)

$$L = \frac{\pi a d_0}{4\lambda_s} L_0 = 3.08L_0 = 1.82\text{mm}$$

调制器的上升时间由公式(7),  $t_r = 0.85\tau = 5.7\text{ns}$ 。按所求得的声光相互作用距离选定换能器的背电极,长 1.82mm,宽 0.59mm,则电极面积约  $1.07\text{mm}^2$ 。

依文献[2]我们计算并给出了一些 TL-F 曲线的主要特征数据,见表 1:

Table 1 Main characteristic data of TL-F curve

$t_1$	$t_2 = t_4$	$t_3$	$TL_{\min}$ (dB)	$F_m$	$f_c/f_0$	1dB Bandwidth $\Delta f$ (MHz)
0.04	0.04	0.5	4.93	0.91	0.9	49
0.04	0.06	0.5	4.74	0.89	0.87	58
0.06	0.06	0.5	4.59	0.86	0.86	44
0.06	0.08	0.5	4.45	0.85	0.85	44
0.06	0.15	0.5	3.92	0.81	0.81	40
0.06	0.15	0.6	3.72	0.79	0.79	40
0.06	0.08	0.6	4.33	0.83	0.83	40
0.06	0.14	0.6	3.81	0.8	0.8	40
0.06	0.08	0.7	4.39	0.81	0.81	40
0.08	0.1	0.6	4.05	0.8	0.8	40

TL-F 曲线决定着换能器的带宽和  $f_0/f_c$ ,该曲线受各电极层、键合层的材料和厚度影响很大。表中  $t_1 = \frac{2f_0}{u_1} \cdot l_1$  代表背电极层的相对厚度,用金蒸镀,其声速  $u_1 = 3400\text{m/s}$ ,  $l_1$  为金层的厚度;  $t_2$  和  $t_4$  为两层底电极层的相对厚度,用银蒸镀,其声速  $u_2 = u_4 = 3960\text{m/s}$ ;  $t_3$  是键合层的相对厚度,用铜蒸镀,其声速  $u_3 = 2250\text{m/s}$ ;  $F_m$  代表最小 TL 值处的相对频率。考虑到使  $f_0/f_c$  值不太大,  $TL_{\min}$  值尽量小及工艺上的方便,我们选  $t_1 = 0.06$ ,  $t_2 = t_4 = 0.14$ ,  $t_3 = 0.6$ 。这时  $f_0/f_c = 1.25$ ,  $f_0 = 1.25f_c = 486.9\text{MHz}$ 。铌酸锂声速  $v = 7300\text{m/s}$ ,则求出铌酸锂的厚度  $l = \frac{v}{2f_0} = 7.5\mu\text{m}$ 。按上述设计并严格按文献<sup>(4-5)</sup>的换能器加工方法,(尽管成品率较低)终于将铌酸锂减

薄到 7.5μm 的厚度上。通过一系列严格的工艺过程,制成驱动频率为 389.5MHz 的声光调制器。

另外,用锡(锡对超声波的吸收远小于钢<sup>[6]</sup>)作为键合层的器件,可增加调制器的带宽,并提高了电声的转换效率。

用 He-Ne 光简易测量 389.5MHz 声光调制器的衍射效率,换能器材料:ZnO 的衍射效率在 1.2%左右;LiNbO<sub>3</sub> 的衍射效率在 3.89%左右。

### 3 腔倒空输出实验结果

皮秒腔倒空染料激光器由锁模 A<sup>+</sup> 激光器同步泵浦染料激光器加上腔倒空部分组成。整个工作系统见图 3。

其倒空输出光强为<sup>[7]</sup>

$$I(t) = I_0(t)2\eta(1-\eta)[\cos 2(\Omega t) + 1] \tag{10}$$

$I_0(t)$  为腔内光强; $\eta$  为声光调制器的衍射效率; $\Omega$  为超声的角频率。由于双程衍射的结果使得输出光脉冲的强度强弱相间见图 4。

要保证每次倒出来的脉冲都是强的一个,则需使倒空器的声光器件频率  $\Omega$  和 A<sup>+</sup> 激光锁模调制频率  $\omega$  满足如下关系:

$$\Omega = (m + \frac{1}{2})\omega \tag{11}$$

其中  $m$  是正整数,我们取  $m = 9$ ,  $\omega = 41\text{MHz}$  时  $\Omega = 389.5\text{MHz}$ 。此外,门控信号相位与锁模脉冲也要匹配,使锁脉冲有最大输出。

在驱动源(驱动功率 0.2~0.5 W)输出匹配,我们测得 A<sup>+</sup> 激光锁模同步泵浦染料激光输出平均功率 100mW,氧化锌为换能器的声光调制器腔倒空输出平均功率 10mW;铌酸锂为换能器的声光调制器腔倒空输出平均功率可达 50mW,实现的倒空比  $\eta'$  为 50%,是氧化锌材料的好几倍。由公式(10)

$$\eta' = \frac{I(t)}{I_0(t)} = 2\eta(1-\eta)[1 + \cos(2\Omega t)] \tag{12}$$

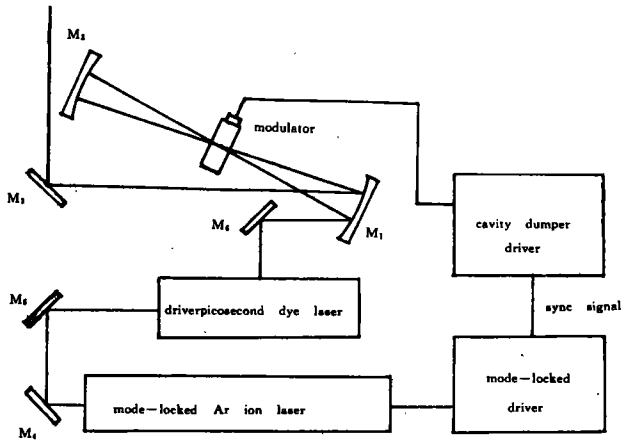
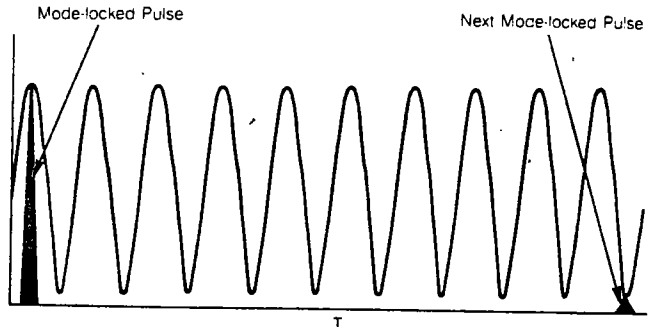


图 3 同步泵浦腔倒空染料激光器系统图  
Fig. 3 Sync-pumped cavity dumping dye laser system layout



Mode Locker Frequency = 41 MHz  
Cavity Dumper Frequency = 389.5 MHz  
389.5/41 = 9.5

图 4 由一个专有的“整数加一半”同步技术抑制交替锁模脉冲  
Fig. 4 Alternating mode-locked pulses are suppressed by a proprietary “integer plus one-half” timing technique

当  $\cos(2\Omega t) = 1$  时

$$\eta' = 4\eta(1-\eta) = 0.5$$

可求得  $\eta = 14.65\%$ , 即此时声光调制器的衍射效率。图 5 是用示波器(7904 型)监测出的腔倒空输出波形, 用自相关测量方法可计算出脉冲宽度在 18ps 左右。在脉冲宽度相同情况下, 显然腔倒空输出的平均功率越高, 则单脉冲的能量就越大。

## 4 结 语

作为腔倒空器——声光调制器与其驱动源之间的阻抗匹配网络, 就目前国内外有关文献报导均未得到非常理想的匹配结果。它直接影响到器件对驱动射频功率的利用率和器件衍射效率的提高。

本文的工作得到温忠义、荆宝全、魏政新、杜惊雷等大力支持和帮助, 在此谨表谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 徐荣甫, 刘敬海, 激光器件与技术教程. 北京: 北京工业学院出版社, 1986
- [2] 徐介平, 声光器件的原理、设计及应用. 北京: 科学出版社, 1982
- [3] Maydan, D., IEEE J., Quant. Electron., 1970, QE-6, 15
- [4] 帮德, W. L., 晶体工艺学. 北京: 国防工业出版社, 1981
- [5] Huang, H. C., Appl. Phys. Lett., 1974, 24, 109
- [6] 徐介平, 北京工业大学学报, 1986, 12, 43
- [7] Johnson, R. H., IEEE J. Quant. Electron. 1973, QE-9, 255

## Study and Application of High-efficiency 389.5MHz Acousto-optic Modulator

Li Yubin

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

### Abstract

This paper introduces to substitute  $ZnO$  film with  $LiNbO_3$  crystal, which is for the first time in China. The high-efficiency 389.5MHz pulse acousto-optic modulator was made and applied for the cavity dumping technology of sync-pumped dye laser. The  $ZnO$ 's diffraction efficiency is only 3%. The  $LiNbO_3$ 's diffraction efficiency is over 14%. Dumping ratio is 50%.

**Key words:** Acousto-optic modulator, Dye laser, Cavity dumping, Diffraction efficiency

**李玉斌** 男, 1951年11月出生, 工程师。1978年9月毕业于四川大学物理系光学专业, 毕业后一直从事激光技术方面工作。

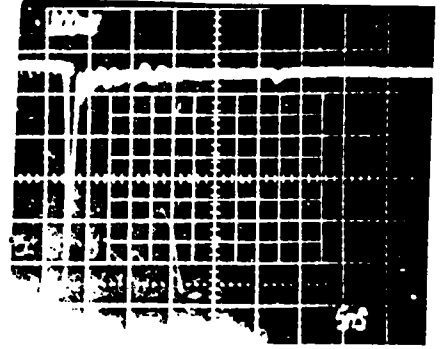


图 5 倒空输出脉冲波形  
Fig. 5 Dumping output pulse