

## 主动锁模脉冲序列稳定输出的两项必要措施

古平北

(国家地震局地震研究所)

### 一、前言

自1963年, R. C. Miller<sup>[1]</sup>首次在实验上实现 He-Ne 激光的主动锁模以来, 在氩离子激光器、固体激光器上先后实现了锁模, 并且产生了脉宽非常窄而峰值功率相当高的光脉冲。由于它具有高功率的特点, 引起世界各国科学工作者的极大兴趣, 从而形成了一门超短脉冲技术。它很快就被应用到等离子体物理学特别是受控热核反应的研究领域中; 应用到激光光谱学和脉冲编码传输信息等方面。

为了获得超短脉冲的激光, 一般需要对激光器件进行锁模(包括主动与被动锁模)。本

文讨论主动锁模氩离子激光器中两个关键问题——共振型声光调制器调制频率和激光器谐振腔长进行自动“全补偿”的技术措施(在温度为  $\pm 25^\circ\text{C}$  条件下), 以便得到稳定锁模脉冲序列的输出。

### 二、最佳补偿式共振型声光调制器的设计

锁模技术是对激光束进行特殊的调制, 使光束中有固定位相关系的不同振荡模式相干叠加, 从而得到超短脉冲。

要想得到锁模脉冲, 对于主动锁模激光器(如图1), 放在腔内的声光调制器的调制频率

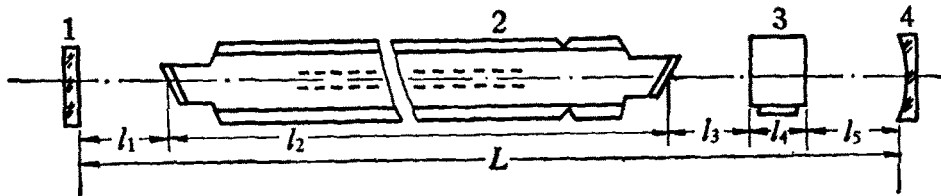


图1 用声光锁模的  $\text{Ar}^+$  离子激光器示意图  
1, 4 为多层介质反射膜; 2 为  $\text{Ar}^+$  放电管; 3 为声光调制器

$f$  必须严格等于  $\frac{c}{2L}$  ( $c$ ——真空中光速,  $L$ ——谐振腔的光学腔长), 即

$$f = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

由声学共振原理可知, 共振频率  $F$  可表示为

$$F = m(\nu/2h), \quad (2)$$

式中  $m$  为任一整数,  $\nu$  为纵向超声波速度,  $h$  代表共振器的长度。

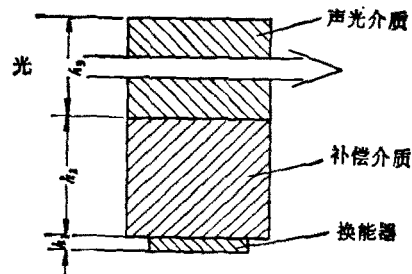


图2 补偿型声光调制器结构  
对于共振型声光调制器(图1中3), 我们

假定在换能器与声光介质之间加进一种补偿介质(图2),则经过相应的运算可得频率温度系数的关系式为<sup>[2]</sup>

$$\left(\frac{1}{F} \frac{dF}{dT}\right) = \frac{1}{\left(\frac{h_1}{v_1} + \frac{h_2}{v_2} + \frac{h_3}{v_3}\right)} \times \left[ \frac{h_1}{v_1} \left(\frac{1}{F_1} \frac{dF_1}{dT}\right) + \frac{h_2}{v_2} \left(\frac{1}{F_2} \frac{dF_2}{dT}\right) + \frac{h_3}{v_3} \left(\frac{1}{F_3} \frac{dF_3}{dT}\right) \right], \quad (3)$$

式中  $h_i, v_i, F_i$  分别代表相应物质的厚度、声波速度和共振频率,下标  $i = 1, 2, 3$  分别代表换能器,补偿介质和声光介质。

由(3)式可知,若要使调制器总的频率温度系数  $\left(\frac{1}{F} \frac{dF}{dT}\right) = 0$ ,就只有令(3)式右边方括号内等于零。实验上观察到各种材料固有频率温度系数取决于温度膨胀系数和弹性模量与温度的关系<sup>[3]</sup>。实验证实有些材料的频率温度系数的符号彼此相反。为此,可根据(3)式来选择恰当的材料和厚度  $h_i$ ,并进行相应的组合,就能达到自动进行补偿的目的。

补偿型声光调制器的加工并不难(见图2)。换能器与补偿介质之间的耦合层要求声波衰减小、易粘附和导电性能好。对低频声波,可采用以铬-金为底层的铟(在真空加压条件下用热扩散法或在常温下用超声波法进行粘附)作为耦合层(高于50MHz时宜采用金作为粘附层);补偿介质与声光介质间的胶合层,宜选用对声波衰减小的光学冷胶(胶层  $< 1\mu\text{m}$ )做成。这些介质的加工无特别要求,粘附层的厚度很薄 ( $\ll \frac{\lambda}{10}$ ),故对声波传播的影响在一般情况下均可忽略( $\lambda$ 代表声波长)。

假定氩离子激光器的谐振腔长  $L = 1.5\text{m}$ ,如上所述,为了锁模,声光调制器的调制频率应为  $f = \frac{c}{2L} = 100\text{MHz}$ 。又根据驻波调制的特点,  $f = 2F$ ,即调制频率  $f$  两倍于声光调制器的共振频率  $F$ (即馈电频率),故只须选取50MHz,利用表1的数值,可以根据(3)式来选择补偿介质  $h_2$  的大小,从而达到良好的补偿。

表1 部分材料的若干数据

材料名称	纵向声速 ( $\times 10^3 \text{cm/s}$ )	方 向	$\frac{1}{F} \frac{dF}{dT}$ ( $\times 10^4 / ^\circ\text{C}$ )	损耗 $\alpha/f^2$ [dB/cm · (GHz) <sup>2</sup> ]
x切石英	5.7	$\langle 100 \rangle$	-20	30
熔石英	5.95	/	+119	0.2 (100MHz)
LiNbO <sub>3</sub>	6.57	$\langle 001 \rangle$	-57	0.02
ZF-6	3.76	/	-30.5	/

表2 补偿前后声光调制器性能对比

类别 编号	换 能 器			声 光 介 质		补 偿 介 质		频 率 温 度 系 数	
	材料	频率 (MHz)	厚度 $h_1$ (mm)	材料	厚度 $h_3$ (mm)	材料	厚度 $h_2$ (mm)	补偿前 ( $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )	补偿后 ( $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )
1	x切石英	50	0.056	熔石英	6.0	x切石英	34.2	+118.8	-0.2
2	y 35° 旋转 LN*	50	0.074	熔石英	6.0	x切 LN	13.6	+118.4	+0.1
3	x切 LN	50	0.072	熔石英	8.0	x切 LN	13.7	+118.7	+0.04
4	x切 LN	50	0.072	ZF-6	6.0	熔石英	24.3	-304.4	-0.15

\* 国外有些文献常用 LN 代表 LiNbO<sub>3</sub>。

从表 2 可以清楚地看到,经补偿后,声光调制器的频率温度系数可降低 2—3 个数量级,从而使声光调制器的频率温度特性得到较大的改善,而不需要采用昂贵而又复杂的恒温设备.表 1 和表 2 清楚地表明,  $\text{LiNbO}_3$  晶体对声波的衰减较小,故选用它作补偿介质是较合适的.

### 三、激光器谐振腔腔长补偿条件的获得

主动式锁模要求调制频率  $f = \frac{c}{2L}$ , 这就必须精确地调整腔长和调制频率. 前面已经讲过,若要使调制频率的稳定度从  $10^{-4}/^\circ\text{C}$  提高到  $10^{-7}/^\circ\text{C}$ , 则要求谐振腔腔长变化率务必跟调制频率的变化率相适应,方能得到比较理想而又稳定的锁模脉冲序列. 由图 1 可知,谐振腔的机械腔长  $L$  可表达为

$$L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5, \quad (4)$$

而其光学腔长  $L_n$  为

$$L_n = (l_1 + l_3 + l_5)n_1 + l_2n_2 + l_4n_4, \quad (5)$$

式中  $n_1, n_2$  和  $n_4$  分别代表空气、氩气和调制器中声光介质的折射率. 第一项代表光在空气中走过的路程,而空气折射率随温度变化可归结为<sup>[4]</sup>

$$n_{1t} = \frac{n_0 - 1}{1 + at} \cdot \frac{p}{760} + 1, \quad (6)$$

式中  $n_{1t}$  为温度  $t$  时的空气折射率,  $n_0$  为零度时空气的折射率,  $a$  为空气的膨胀系数,  $p$  代表空气压强 (mmHg). 第二、三项分别代表光在氩气和声光介质中走过的路程. 实际上氩离子激光器中氩气压约 1 托,由 (6) 式可知  $\Delta n_{1t} \approx 0$ , 同时  $l_2$  的长度只代表石英管的长度,对光程有贡献的只是布儒斯特窗口,其影响可忽略.

为此,对 (5) 式求导数,注意到  $l_1 + l_3 + l_5 = L - l_2 - l_4$  的关系 (图 1), 并忽略更小的项可得

$$\begin{aligned} \left( \frac{1}{L_n} \frac{dL_n}{dT} \right) &\approx \frac{L}{L_n} \alpha + \frac{L - l_2 - l_4}{L_n} \\ &\times \left( 3.6 \times 10^{-7} \frac{dp}{dT} - 9.3 \times 10^{-7} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &- 6 \times 10^{-8} \frac{dH}{dT} \Big) + \frac{l_4}{L_n} \cdot \alpha_4 \cdot (n_4 - 1) \\ &+ \frac{l_4}{L_n} \cdot \frac{dn_4}{dT}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $\alpha, \alpha_4$  分别代表谐振腔支架、声光介质的线膨胀系数

$$(\alpha = 1.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}, \alpha_4 = 5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}).$$

(7) 式中第二项代表大气折射率的影响 (括弧内第一、二、三项分别代表大气压强、温度和湿度的影响). 设总腔长 1.5m, 石英管长  $l_2 = 1.2\text{m}$ , 由计算可知大气折射率对腔长的影响为  $10^{-7}$  数量级. (7) 式中第三项 (熔石英  $l_4 = 20\text{mm}$ ) 与第四项  $\left( \frac{dn_4}{dT} = 10^{-7}/^\circ\text{C} \right)$  的影响为  $10^{-9}$  数量级. 若用殷钢作  $\text{Ar}^+$  激光器谐振腔的支架, 则第一项的影响约为  $10^{-6}$  数量级. 由此可见,光学腔长的主要影响来自支架长度  $L$  的变化,故只要对谐振腔的机械长度加以补偿就可以了.

为了使锁模脉冲序列稳定,务必使腔长恒定不变. 为此,可以利用较易得到的正膨胀系数的金属材料,采取一端固定的“滑动式特殊补偿结构”(图 3 中的 2, 5),即是令两种或两种以上的材料向相反方向膨胀,从而达到良好补偿的目的 (见图 3).

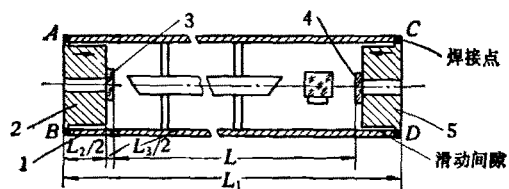


图 3 腔长的自动进行补偿结构示意图

1 为殷钢支架; 2, 5 为黄铜补偿头, 分别在 A, B 端, C, D 端与支架焊牢; 3, 4 为多层介质反射膜, 箭头方向为相对运动方向

由图 3 可得

$$L = L_1 - L_2 - L_3, \quad (8)$$

将 (8) 式对温度  $T$  微分, 即

$$\frac{dL}{dT} = \alpha'_1 L_1 - \alpha'_2 L_2 - \alpha'_3 L_3, \quad (9)$$

式中  $\alpha'_i$  代表材料的线膨胀系数, 下标  $i = 1, 2, 3$ , 分别代表支架、补偿头和反射镜.

欲想得到理想的补偿结果,可令  $\frac{dL}{dT} = 0$ ,

故得

$$L_2 = (\alpha'_1 L_1 - \alpha'_3 L_3) / \alpha'_2 \quad (10)$$

(10)式就是  $L_2$  的补偿关系式. 利用表 3 中的  $\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3$  和  $L_1, L_3$  的数值,由(10)式就可以求出补偿头的长度  $L_2$ . 例如由谐振腔长  $L = 1.5m$  结合(8),(10)式可求出  $L_1 = 1631.3mm, L_2 = 125.3mm$ . 这时谐振腔的等效膨胀系数  $\alpha'_{eq} \approx 8 \times 10^{-9}/^{\circ}C$ . 如果考虑加工精度和装备误差为  $\pm 0.1mm$ ,则  $\alpha'_{eq} \approx 8 \times 10^{-8}/^{\circ}C$ ,比未补偿前的  $1.5 \times 10^{-6}/^{\circ}C$  降低一个多数量级,而加工制造也不麻烦. 为了使补偿均匀和装备调整方便,把黄铜做的补偿头置于谐振腔的两侧

(每个长度为  $\frac{L_2}{2} = 62.7mm$ )

(见图 3). 此补偿头除担任自动补偿功能外,亦可作为反射镜的固定调整架,使用起来十分方便.

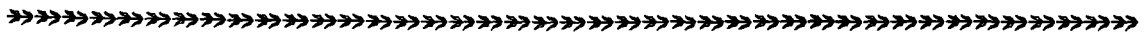
表 3 腔长补偿用部分材料数据

类别 序号	名称	材料种类	长度 (mm)	膨胀系数 ( $\times 10^{-9}/^{\circ}C$ )
1	支架	殷钢	$L_1$	$\alpha'_1 = 1.5$
2	反射镜	K <sub>9</sub>	$L_3 = 6$	$\alpha'_3 = 7.6$
3	补偿头	黄铜	$L_2$	$\alpha'_2 = 19$
4	腔长		$L = 1500$	

中山大学物理系副教授、光学教研室主任方心东等同志认真审阅了本文,并提出了许多宝贵意见,特表感谢.

### 参 考 文 献

- [1] R. C. Miller, *Phys. Rev.*, **131-1**(1963), 95.
- [2] 美国专利, U. S. P. 3730609.
- [3] L·别尔格曼著,曹大文等译,超声,国防工业出版社,(1964).
- [4] American Institute of Physics, *American Institute of Physics Handbook, Third Edition*, McGraw-Hill, Inc., (1972), 6.



(上接第 507 页)

- [2] 王先冲,清华大学学报, **1**(1955), 131.
- [3] J. Needham, *Science and Civilization in China*, vol. 4, pt 1(1962).
- [4] 李国栋,自然杂志, **2**(1979), 520.
- [5] P. F. Mottelay, *Bibliographical History of Electricity and Magnetism*, (1922).
- [6] H. C. Oersted, *Annals of Philosophy*, **16**(1820), 273.
- [7] A. M. Ampère, *Ann. Chim. Phys.*, **15**(1920), 59, 177.
- [8] J. B. Biot et F. Savart, *Ann. Chim. Phys.*, **15**(1820), 222.
- [9] A. M. Ampère, *Memoir. Acad. Roy. Sci.*, **6**(1823), 175.
- [10] M. Faraday, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, London, **122**(1832), 125.
- [11] M Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, (1914).
- [12] J. C. Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism*, (1873).
- [13] P. A. M. Dirac, *Proc. Roy. Soc.*, **A-133**(1931), 60.
- [14] R. L. Fleischer et al., *J. Appl. Phys.*, **41**(1970), 958.
- [15] P. B. Price et al., *Phys. Rev. Lett.*, **35**(1975), 487.
- [16] R. L. Fleischer et al., *Phys. Rev. Lett.*, **35**(1975), 1412.
- [17] P. Goddard et al., *Reports Progr. Phys.*, **41**(1978), 1357.
- [18] J. Schwinger, *Science*, **165**(1969), 757.
- [19] C. K Chang, *Phys. Rev. D*, **5**(1972), 950.
- [20] D. B. Cline et al., *Scientific American*, **231-6**(1974), 108.
- [21] G. 't Hooft, *Scientific American*, **242-6**(1980), 90.
- [22] J. Ellis et al., *Phys. Lett.*, **80B**(1979), 360.
- [23] D. Z. Freedman et al., *Scientific American*, **238-2**(1978), 126.