

TEA CO₂ 激光器主动锁模的实验研究

蔡英时 伊景荣 牛万青

(中国科学院上海光机所)

提 要

利用一米长光预电离 TEA CO₂ 激光器,腔内置一布氏角声光调制器做损耗元件,进行锁模实验研究。叙述了设计考虑、实验装置及测试结果。

Experimental study of the active mode-locked TEA CO₂ laser

Chai Yinshi Ying Jinrong Niu Wanqing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

An experimental study was conducted of the active mode-locking laser utilizing a 1 meter long photopreionized TEA CO₂ device. A Brewster angle acoustooptic loss modulator was employed as the active mode locker within the cavity. Design consideration on experimental apparatus and the measured results are described.

一、引 言

自从 1965 年 He-Ne 激光器的主动锁模实验^[1]起,迄今已对许多激光器进行了主动锁模实验研究。TEA CO₂ 激光器问世不久,就开展了这方面的工作^[2]。锁模是产生短光脉冲手段之一,对激光核聚变、快过程研究具有现实的应用意义。

锁模最简化的理论是振幅相同、频率间隔为 $C/2L$ (L : 腔长; C : 光速), 位相固定的模相迭加。这时,其输出功率 P 有下述关系:

$$P \propto \frac{\sin^2 \pi \left(\frac{NC}{2L} \right) t}{\sin^2 \pi \left(\frac{C}{2L} \right) t} \quad (1)$$

式中 N 为模的数目, t 为时间。

由此可得锁模时峰值功率正比于 N^2 , 而脉宽 $\tau_P = 1/\Delta\nu_N$ ($\Delta\nu_N$ 为谱线宽度)。

这样的处理太粗糙,不能描述主动锁模时 τ_P 随 $\Delta\nu_N$ 、调制度及增益等的关系。实验测得的 τ_P 和 $1/\Delta\nu_N$ 显然不符。

[3]对均匀加宽增益介质损耗调制的情况在时谱的基础上,考虑到增益介质及调制

* 收稿日期: 1979年4月16日。

器的特性, 以随机高斯脉冲在腔内循环自洽的办法, 对均匀加宽主动锁模振荡器给出理论描述, 得出

$$\tau_P = \frac{(\sqrt{2} \ln 2)^{1/2}}{\pi} \left(\frac{g_0}{\delta^2} \right)^{1/4} \left(\frac{1}{\Delta\nu_N \nu_m} \right)^{1/2} \quad (2)$$

(2)式中, g_0 为腔内往返一周的小信号增益; δ 为调制深度; ν_m 为调制频率。

其结果大致和实验相符, 暂态时稍有偏离。

此外, [4]以多模相互作用方程为基础, 即从方程:

$$\begin{aligned} & E_{n+1} \exp(i\phi_{n+1}) + E_{n-1} \exp(i\phi_{n-1}) \\ &= \frac{1}{\delta} E_n \exp(i\phi_n) \left\{ -i \left(\frac{2L}{C\alpha_c} \dot{\phi} - \frac{2L}{C\alpha_c} n\Delta\omega \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \frac{\psi_n}{\alpha_c} \right) + \frac{G_n}{\alpha_c} - \frac{\gamma}{\alpha_c} - \frac{\alpha_a}{\alpha_c} \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

来研究主动锁模, 得出大致类似的结果。

(3)式中, E_n 为第 n 个模振幅; δ 为调制参数; γ 为单程功率损耗; $n\Delta\omega = \Omega_n - \omega_n$; Ω_n 为空腔模频率; ω_n 为实腔模频率; $\psi_n = \omega_n \chi'_n L / C$, 是单程位相变化; $G_n = -\omega_n \chi''_n L / C$, 是单程功率增益; α_a 为自耦合系数; α_c 为交叉耦合系数。

对 TEA CO_2 激光器来说, 其压力加宽的 $\Delta\nu_N$ 大约为 4~5 千兆赫, ν_m 为 20~40 兆赫的频率时, 可产生脉冲宽度为 1~2 毫微秒的脉冲系列。实验工作已证实 TEA CO_2 激光器主动锁模可以产生稳定的 1~2 毫微秒的脉冲系列, 是良好的毫微秒脉冲振荡源, 而且已用于大功率激光系统中。

二、设计考虑

由于输出耦合反射镜涂膜易被激光损坏, 因而用劈形锗片作耦合反射镜。用已研制的长一米的光预电离器(二级)来提高单程增益, 虽耦合反射只 37%, 亦能保证输出的稳定^[8]。

谐振腔腔长 L 必须和调制频率 ν_m 相匹

配。因驻波调制每周有二个极值, 所以模频率间隔和 ν_m 之间有二倍关系:

$$\nu_m = \frac{1}{2} \Delta\nu = \frac{C}{4L} \quad (4)$$

用(4)式选择 ν_m 和 L 。

用平凹腔工作。改变全反射球面镜曲率, 选择合适曲率的反射镜, 使输出稳定。

用小孔光阑使器件工作于 TEM₀₀ 模, 孔的大小根据下式确定:

$$\begin{aligned} 2a &\approx (3.5 \sim 4) \omega_0 \\ \omega_0 &= \sqrt{\frac{L\lambda}{\pi}} \left(\frac{g}{1-g} \right)^{1/4} \\ g &= 1 - \frac{L}{R} \end{aligned} \quad (5)$$

上式中, a 为光阑半径; ω 为光束腰部尺寸; R 为反射镜曲率半径。

为避免寄生振荡, 我们使 NaCl 窗口偏离自准方向 $\sim 3^\circ$ 。布氏角结构更好, 除减小反射损耗外, 尚可减小 NaCl 被激光损坏的现象。

声光调制器最好工作于 Bragg 衍射, 因为这时可以做到调制频率单一且只有一级衍射存在。这时, 需满足:

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{K}_s \pm \mathbf{K}_d \quad (6)$$

(6)式中 \mathbf{K}_i 为入射光波矢; \mathbf{K}_s 是声波波矢; \mathbf{K}_d 是衍射光波矢。即满足声光衍射的 Bragg 条件

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2n\Lambda} \quad (7)$$

式中 θ_B 为 Bragg 角; λ 为真空中光波长; n 为折射率; Λ 为声波长。

为防止产生高级次衍射, 须使声场宽度 W_s 满足下式:

$$W_s \gg \frac{n\Lambda^2}{\lambda} \quad (8)$$

声光 Bragg 衍射时入射光强 I_i 和衍射光强 I_d 的关系由下式表达^[7]:

$$\begin{aligned} \frac{I_d}{I_i} &= \sin^2 \left(\frac{\pi W}{\sqrt{2} \lambda} \sqrt{\frac{n^6 P^2}{\rho v_s^3} P_a} \right) \\ &= \sin^2 \left(\frac{\pi W}{\sqrt{2} \lambda} \sqrt{M_2 P_a} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中 P 为光弹系数; ρ 为比重; v_s 为声速; P_a 为声功率; $M_2 = \frac{n^6 P^2}{\rho v_s^2}$ 为衍射效率品质因数。

从材料特性表^[5]知 Ge 的 $L[111]$ 模式传播时 M_2 为 540, 对 10.6 微米的波长是很好的声光材料。Ge 在 10.6 微米时的折射率 $n=4$, 为避免反射损耗, 一方面可涂增透膜, 另一方面可使激光以布氏角入射。由于涂增透膜易损坏, 我们采用布氏角入射的方法。

换能器的选择要求主要是电-声转换系数尽可能大, 其声阻抗和 Ge 的声阻抗相匹配, 频率厚度常数尽可能大。从材料特性表^[5]可知 $Y36^\circ$ 切割 LiNbO_3 换能器的电声转换系数 $K=0.49$, $v_s=7.4 \times 10^5$ 厘米/秒, $Z=\rho V_s=34.8 \times 10^5$ 克/秒·厘米², 而 Ge 的 $\rho=5.33$ 克/厘米³, $V_s=5.5 \times 10^5$ 厘米/秒, $Z=29.3$ 克/秒·厘米², 是相当好的换能器材料。

换能器用环氧树脂胶合是比较方便的, 但其声阻抗 $Z=2.86$, 和上述材料相差过大。只能使胶合层尽量薄, 此时损耗较小, 对带宽影响不大。

射频电源的考虑分三个方面。一是频率稳定。因调制器处于驻波工作, 其声振动模式的频率间隔为 $v_s/2d$ (d 为声驻长度), $d=5$ 厘米时, 其值为 55 千周。由于换能器的 Q 值高, 电源的一部分功率从负载反射回电源, 这一反射功率可用来控制射频振荡器的频率稳定度, 一般可稳定在一个声模的范围内。其次, 由于激光器脉冲工作, 需对射频电源进行脉冲控制, 在我们所用的由 $1Y-50$ 电子管组成的 LC 振荡器中, 用大功率脉冲控制帘栅极的办法实现。最后是换能器加调谐回路使之与电源阻抗匹配, 最好用驻波比测量仪来完成。

三、实验装置

整个装置示于图 1 和图 2, 其中光预电离 TEA CO_2 器件参数为: 长 500 毫米 \times 2,

口径 40 \times 50 毫米, 充气比为 $\text{He}:\text{CO}_2:\text{N}_2=8:2:1$, 总气压为 660 托, 放电电压 60 千伏, 充电电容 0.063 微法 $\times 2$ 。

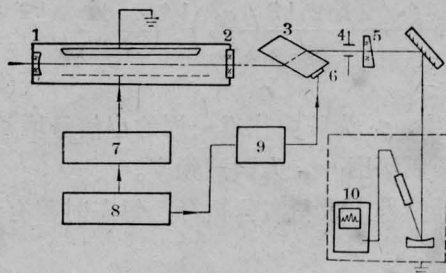


图 1 TEA CO_2 激光锁模实验装置示意图
1— $R=3.5$ 米全反射镜; 2—NaCl; 3—Ge 调制器; 4—光阑; 5—Ge 耦合镜; 6— LiNbO_3 换能器; 7—Marx 发生器; 8—触发器; 9—RF 电源; 10—屏蔽室

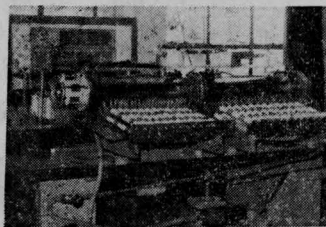


图 2 TEA CO_2 激光锁模实验装置照片

谐振腔由涂金全反射凹面镜和 Ge 尖劈 (劈角 45°) 组成, 凹面镜为 $R=3.5$ 米, Ge 不涂膜。

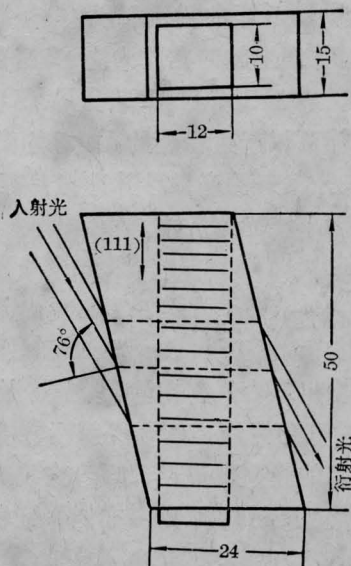


图 3 Brewster-Bragg 角声光调制器设计图示

由(5)式算出 W_0 , 选取小孔光阑直径为 $\phi 7$ 毫米。

声光介质的尺寸和形状示于图 3。其中角度有如下关系^[6]

$$\psi = 90^\circ + \phi_r + \theta_B \quad (10)$$

LiNbO_3 换能器片厚约 0.1 毫米, 设计的中心频率为 32 兆赫, 由(4)式算出腔长为 2344 毫米, 精确测量腔长使误差小于 5 毫米。用 E323A 型通用计数器测量频率, 使其工作于 32.176 兆赫的声模上。

由公式(7)和(10)得出

$$\psi \approx 104.04^\circ \pm \theta_B$$

算得 $\theta_B \approx 27'$, 因此 Ge 块加工: $\psi = 103^\circ 38'$, 厚 15 毫米, 长 50 毫米。实验所用的 Ge 为 n 型, 电阻率为 16 欧姆·厘米。

声光调制器尽量靠近输出腔片, 并置于一调整架上, 光路调整应满足上述各条件。

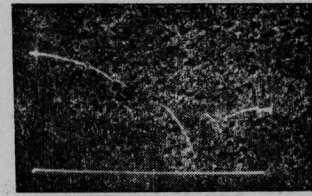
LiNbO_3 换能器经定向切割后光学加工成 0.1 毫米厚的薄片, 片大小为 10×12 毫米², 用环氧树脂胶在 Ge 块上。射频电源为两个 6Y-50 电子管组成的 LC 振荡器。由一个延时触发器控制 TEACO₂ 器件的放电并使声光换能器工作。声光换能器脉冲工作, 脉宽为 1 毫秒, 工作 0.5 毫秒后 TEACO₂ 器件开始放电。

四、测 量

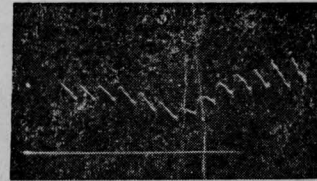
在调制器安装到激光器中之前, 用 BT-3 型频率特性测试仪测量它的共振响应曲线, 并观察声驻波各模式, 其结果示于图 4。调制器安装好后, 经光学调整后用频率计测量工作频率, 可明显看到一声模向另一声模跳变现象。调节电源使之工作于所需的声模上。

用炭斗测激光输出, 加调制时能量为 0.2 焦耳, 不加调制时能量为 0.5 焦耳。

高压火花隙开关造成严重的电磁干扰,



(a)



(b)

图 4

(a) LiNbO_3 超声换能器共振响应曲线照片, 共振峰为 32 兆赫; (b) LiNbO_3 超声换能器声驻波模式结构照片

且频率甚高, 曾用金属网屏蔽室排除示波器观测时的干扰信号, 但效果不好。现采用双层金属板屏蔽室, 可使干扰信号降至 50 毫伏以下。激光波形的测量装置如图 1 所示。将激光光束导入屏蔽室内, 用 $R=1$ 米的球面镜将光束会聚于光子牵引探测器上, 用 SS-6200 和 7904 示波器观察并拍摄激光波形。不加调制时为紊乱的自锁模脉冲, 加调制后为规则的锁模脉冲系列。曾用三种不同的方式拍摄了激光锁模脉冲波形, 均示于图 5。其中 (a) 为 TEA CO₂ 激光未锁模的波形, 系用 SS-6200 示波器和 27° 胶卷拍摄。(b) 为 SS-6200 示波器配 UG-12 示波照相机, 选用 410 型 Polaroid 底片得到的锁模脉冲系列。(c) 为用 7904 示波器和 410 型 Polaroid 底片所拍摄的锁模脉冲系列。从这些照片可以看出脉冲间隔约为 16 毫微秒, $\tau_p < 2$ 毫微秒。

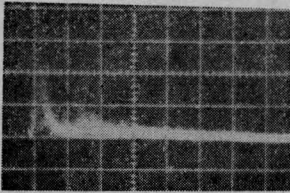
本器件可 10 秒钟一次稳定工作, 通过示波器观察得出工作是稳定的, 每次都有良好的锁模脉冲系列, 并且输出的偏差在 $\pm 10\%$ 以内。这可从 (b) 看出。(b) 是 8 次拍摄得到的示波照片, 达到良好的重合。

结 论

所研制的 TEA CO₂ 主动锁模器件其各项指标已达到用于大功率 CO₂ 激光系统的要求。从实验中得到这一器件能产生稳定的毫微秒脉冲系列。进一步有必要通过精确的测量深入研究 τ_p 、输出能量及锁模稳定性和器件各参数的关系。

参 考 文 献

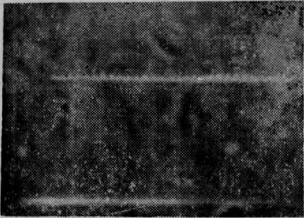
- [1] L. E. Hargrove, R. L. Fork, M. A. Pollack; *Appl. Phys. Lett.*, 1964, **5**, 4.
- [2] O. R. Wood *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **17**, 376.
- [3] D. L. Kuizenga, A. E. Siegmann; *IEEE J. Quant. Electr.*; 1970, **QE-6**, 694.
- [4] W. J. Wittmann; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1977, **QE-13**, 381~383.
- [5] I. C. Chang; *IEEE Trans. Sonics. Ultrason.*, 1976, **SU-23**, No. 1, 1.
- [6] W. H. Figueira *et al.*; *Rev. Sci. Instrum.*, 1973, **44**, No. 10, 1481.
- [7] Amnon Yariv; *Quantum Electronics*, Second Edition, p. 361.
- [8] 蔡英时等;《激光》1979, **7**, No. 2, 22.



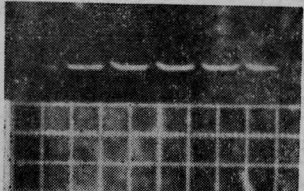
(a) 0.2 伏/厘米, 200 毫微秒/厘米



(b) 0.5 伏/厘米, 20 毫微秒/厘米, 曝光 8 次

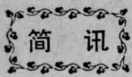


(c) 0.5 伏/厘米, 50 毫微秒/厘米



(d) 0.5 伏/厘米, 10 毫微秒/厘米

图 5 激光脉冲波形与锁模脉冲系列



DCJ 相位激光测距仪研制成功

山东省激光研究所最近研制成功一种高精度距离测量仪器——DCJ 相位激光测距仪。仪器采用固定频率相位测距法, 测程为 30 米至 5000 米, 精度为 $\pm(1.5 \text{ 厘米} + 1 \times 10^{-6} D)$ (D 为待测距离)。主机重 16 公斤, 分为光学、机械、电器三部分, 它安置在摇篮式底座上, 可水平转动 360° , 俯仰倾斜 $\pm 15^\circ$, 底座安置在三角架上。光学系统分为发射、接收、瞄准、零光路系统及反射器, 收、发、瞄各自独立, 以半内腔氦-氖激光器作光源, 采用 KDP 电光调制器, 还采用了与氦-氖激光光谱相适应的窄带干涉滤光片。电

路系统包括电源、高频及低频测相电路, 各单元分别屏蔽, 单独安装。

山东省科委委托山东省科学院主持的鉴定会议认为, 该仪器体积小、重量轻、精度高、操作方便, 性能比较稳定, 达到了目前国内同类仪器的水平, 它适用于三、四等大地测量, 高精度工程测量以及其他中等距离的高精度工程测量, 是一种比较适用的先进的测绘仪器。

(刘合勤)