

小型 TEA CO₂ 激光器的复合腔注入锁定技术

詹玉书 过巴吉 文建国 黄文虎 谭胜斌

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

摘 要 提出了一种新的小型 TEA CO₂ 激光锁定技术——复合腔注入锁定技术, 并介绍了它的原理。从理论上分析了复合腔注入锁定激光器的频率特性。给出了复合腔注入锁定实验研究的初步结果。

关键词 小型 TEA CO₂ 激光器, 复合腔注入锁定技术。

1 引 言

在激光相干检测系统中, 如相干脉冲激光雷达等, 要求激光脉冲的光载波频率和相位锁定于稳定的低功率连续波激光, 使脉冲激光的频率和相位与 CW 激光保持一致。目前, 国外已报道的锁定 TEA CO₂ 激光器的方法有注入锁定^[1], 和混合式锁定^[2]。对于小型 TEA CO₂ 激光器, 注入锁定区很窄, 约几千赫。在目前的技术水平下, 要在非实验室条件下, 将主振激光和伺服激光都稳定到这种程度是非常困难的^[3, 4]。另一种锁定技术——混合式锁定技术, 则简单得多, 它是在高功率激光谐振腔内加入一个低功率的 CW 激光增益管而构成的。但是, 由于强烈的 TEA 放电使折射率产生变化^[5], 因而使脉冲激光频率产生变化, 即产生啁啾。对于小型 TEA CO₂ 激光器, 频率变化可达几兆赫(见附录)。本文提出了一种新的激光锁定技术——复合腔注入锁定技术, 进行了理论分析和初步的实验。本文将介绍理论分析和初步实验的结果。

2 复合腔注入锁定原理

复合腔注入锁定激光器如图 1(a) 所示, 从结构上看, 它是在混合式锁定激光器中加入一个半反射镜 M₂ 而构成的。从原理上看, 则与混合式激光器有根本差别, 已不再是简单的三镜复合腔器件了。复合腔是由 CW 子腔和 TEA 子腔经 M₂(有一定厚度的, 高质量锗片) 耦合而成的。CW 子腔产生稳定的低功率激光(毫瓦级), 经 M₂ 注入到 TEA 子腔中, 去控制 TEA 脉冲激光的频率和相位。因此整个器件称为复合腔注入锁定器件。由于复合腔的两个子腔谐振频率相同(见下一节), 故自然地解决了普通注入锁定器件容易失锁的问题。对结构和工作环境的要求也低得多。同时, 由于 M₂ 的加入, TEA 放电对 CW 振荡的影响远比混合式小(见

* 国防科技预研基金资助, 项目编号 92J2.09。

收稿日期: 1995 年 12 月 29 日

第四节), 因而其振荡的啁啾也弱得多。总之, 复合腔注入锁定技术, 具有注入锁定和混合式锁定的优点, 同时又避免了这两种锁定方法的缺点。



Fig. 1 (a) Schematic of composite cavity injection locking laser, (b) Its equivalent circuit

3 复合腔的谐振频率

激光器的谐振频率和其纵模特性密切相关。研究激光纵模特性, 往往采用平面波近似, 即将高斯光束当作平面电磁波来处理。在平面波近似的基础上, 可采用等效电路来研究激光器的外部特性^[1], 如输出激光的功率、频率等。也可求解平面波的麦克斯韦-布洛赫 (Maxwell-Bloch) 方程(类似速率方程), 来分析激光器的激射过程等^[3]。本文主要对频率和相位的锁定问题感兴趣, 所以采用等效电路方法进行分析。

复合腔等效电路如图 1(b) 所示, 为分析谐振频率, 可假设负载 $R_L = 0$ 。这相当于把 M_1 当作全反射镜片来处理。图 1(b) 中

$$\eta = \sqrt{\mu/\epsilon} \quad (1)$$

式中 η 为平面波的波阻抗, 也是等传输线(即分布参数电路)的特征阻抗。平面波的电场 E 和磁场 H 分别等效于电路的电压和电流。等效电路谐振即复合腔谐振。谐振时, 在任意截面(例如 $A - A'$ 截面) 向左、右两端看去, 输入阻抗的虚部大小相等, 符号相反。如令 $R_L = 0$, 则输入阻抗实部为零。因此上述谐振条件也就是左、右输入阻抗大小相等, 符号相反。

在 $A - A'$ 面上, 左、右输入阻抗分别为

$$Z_{in}^- = \eta_3 \frac{j\eta_2 \tan(\alpha_2 l_2) + j\eta_3 \tan(\alpha_3 l_3)}{\eta_3 - \eta_2 \tan(\alpha_2 l_2) \tan(\alpha_3 l_3)}, \quad Z_{in}^+ = j\eta_1 \tan(\alpha_1 l_1) \quad (2)$$

式中 η_1, η_2, η_3 分别为组成复合腔的三段传输线的特征阻抗, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, 分别为三段传输线的传输常数即: $\eta_1 = \eta_2 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi\Omega$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha = \omega/c$, $\eta_3 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0\epsilon_3} = 30\pi\Omega$, $\sqrt{\epsilon_3} = n_3$, n_3 为 M_2 的折射率, $\alpha_3 = n_3\alpha_0$ 。根据上述谐振条件: $Z_{in}^- = -Z_{in}^+$, 将(1)式, (2)式代入, 得

$$\eta_1 \tan \theta_1 = -\eta_3 \tan(\theta_2' + \theta_3) \quad (3)$$

式中 $\theta_1 = \alpha_1 l_1$, $\theta_3 = \alpha_3 l_3$, $\theta_2' = \arctg(\zeta \theta_2)$, $\theta_2 = \alpha_2 l_2$, $\zeta = \eta_2/\eta_3$ 。(3)式还可以化为

$$\tan(\theta_1') = -\tan(\theta_2' + \theta_3) \quad (4)$$

其中 $\theta_1' = \arctan(\zeta \tan \theta_1)$ 。从(4)式可得

$$\theta_1' + \theta_2' + \theta_3 = p\pi \quad (5)$$

式中 p 为正整数。这就是最后得出和谐振条件。

从其它任意截面(例如从 $B - B'$ 截面) 都可导出(4)式来, 所以(4)式既是 CW 子腔的谐振条件, 也是 TEA 子腔的谐振条件。 p 即为复合谐振腔的纵模指数。由此可见 CW 子腔和 TEA 子腔具有相同的谐振频率。这就保证复合腔注入锁定只需很小的 CW 功率即能实现, 因为注入激光频率始终对准锁定区中心。

当 $\zeta = 1$ (即 $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3$ 时), (4) 式即变成普通谐振腔的纵模谐振条件:

$$\alpha_1 l_1 + \alpha_2 l_2 + \alpha_3 l_3 = p\pi \quad (6)$$

(6) 式的意义为: 光在谐振腔内循环一周, 相位差为 2π 的整倍数。

4 复合腔注入锁定激光器啁啾频率

在分析复合腔中 TEA 放电的影响之前, 先来讨论混合式锁定激光器中 TEA 放电对谐振频率的影响。TEA 放电使气体的折射率产生微小的变化, 变化量 δn 的大小约为 10^{-8} 量级(见附录), 这时, 谐振条件(6)式变成

$$\alpha'(l_1 + l_2 + n_3 l_3) + \alpha' l_2 \delta n = p\pi \quad (7)$$

由(6)和(7)得:

$$\Delta\nu/\nu = \Delta\alpha/\alpha = -l_2 \delta n / (l_1 + l_2 + n_3 l_3) \quad (8)$$

式中 $\Delta\nu/\nu$ 为相对频率变化量, $\Delta\alpha = \alpha' - \alpha$, 由此可见, 对于混合式激光器, $\Delta\nu/\nu$ 和 δn 同数量级。由于 $10.6 \mu\text{m}$ CO_2 激光频率约 2.83×10^{13} Hz, 故混合式锁定激光脉冲的啁啾达几兆赫。

复合腔注入锁定激光器结构虽和混合式激光器相似, 但是, 只要设计合理, 则脉冲激光的啁啾可以很小。从传输线理论可知, 当 $n^3 l_3 = (2N + 1)\lambda/4$ 时, 则传输线 3 对两端的传输线 1 和 2 的隔离作用最大。这相当于 M_2 的厚度为 $\lambda/4$ 的奇倍数, 这时 M_2 的反射率 r 达最大值。当 $n_3 l_3 = (2N + 1)\lambda/4$ 时, 谐振条件变成:

$$\eta_1 \tan \alpha l_1 = \eta_3^2 / \eta_2 \tan \alpha l_2 \quad (9)$$

$$\text{或} \quad \zeta^2 \tan \alpha l_1 = 1 / \tan \alpha l_2 \quad (10)$$

其中, 已考虑到 $\zeta = \eta_1 / \eta_3$ 。TEA 放电后, 谐振条件(10)式变为:

$$\zeta^2 \tan \alpha' l_1 = 1 / \tan \alpha' (l_2 + l_2 \delta n) \quad (11)$$

从(10)式, (11)式可导出:

$$\Delta\nu/\nu = \delta\alpha/\alpha = -l_2 \delta n [\zeta^2 l_1 (\sin^2 \alpha l_2 / \cos^2 \alpha l_1) + l_2]^{-1} \quad (12)$$

从(12)式可见, 复合腔锁定的频率啁啾和混合腔[见(7)式]显著不同。对于复合腔只要将 M_1 固定在压电陶瓷上调整 l_1 的长度使 l_1 等于 $\lambda/4$ 的奇倍数, $\cos^2 \alpha l_1 \rightarrow 0$, 则可使啁啾频率幅度任意降低。这时, $\alpha l_1 + \alpha n_3 l_3 = N\lambda/2$, 因而在 $B - B'$ 截面 $Z_{in}^+ \rightarrow 0$ 。因此 TEA 子腔的微小变化, 不致对 CW 子腔产生影响。

以上讨论的前提是: $\sin^2 \alpha l_2 \neq 0$ 。在图 1(b) 所示等效电路中, 这个条件并不满足。满足这个条件的理想复合结构如图 2(a) 所示。相应的等效电路如图 2(b) 所示, 其中输出镜置于 TEA 子腔端, 全反射球面镜置于 CW 子腔端, 并固定在压电陶瓷 PZT 上。耦合镜片的厚度为 $\lambda/4$ 的奇倍数。输出镜 M_1 也固定在压电陶瓷上, 其内表面镀上厚度为 $\lambda/4$ 的磁性透光膜, 磁性膜的相对导磁率 $\mu_r \gg 1$, 这样, 输出镜片的波阻抗 η_3 经 $\lambda/4$ 磁性膜后变换成远远大于 η_1

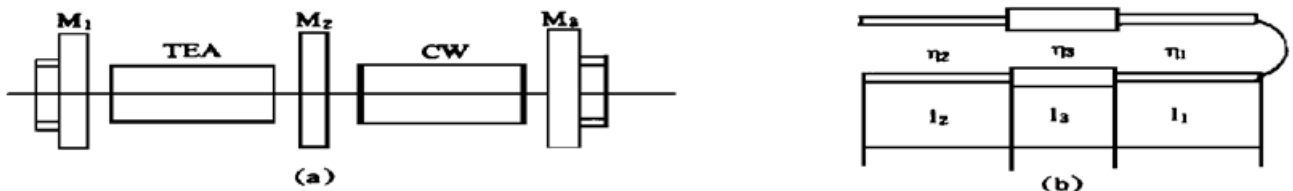


Fig. 2 (a) Schematic of an ideal composite cavity injection locking laser, (b) Its equivalent circuit

的高阻抗, 即可近似地用图 2(a) 的等效电路来等效了。当然图 2(b) 只是提出的一种理想设计, 具体如何实现, 还需要进一步深入研究。

5 复合腔注入锁定的初步实验

实验装置的框图如图 3(a) 所示。其中 TEA 激光器是本单位研制的产品, 其输出镜即为复合腔的耦合镜 M₂, CW 等离子体管是从兴平激光器厂定制的, 布儒斯特窗为硒化锌(ZnSe) (上海冶金所研制的)。

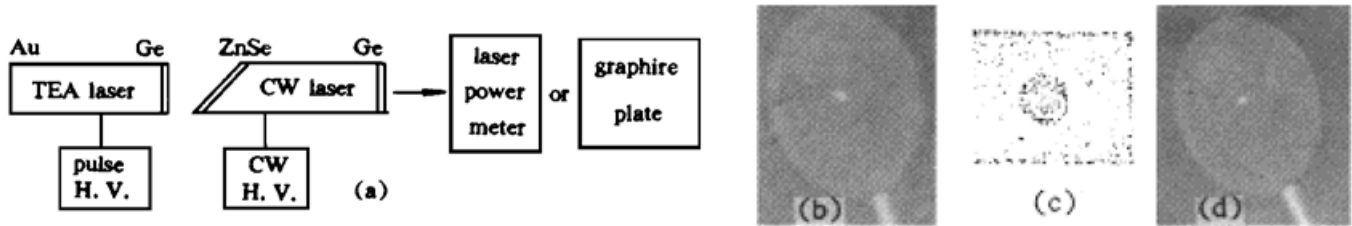


Fig. 3 Compound cavity injection mode-locking experiment

(a) Experimental setup, (b) Light spot of the unmode-locked TEA CO₂ laser, (c) Thermisensitive light spot of CW laser, (d) Light spot of the mode-locked TEA CO₂ laser

TEA CO₂ 激光器在未组成复合腔前, 输出为多模激光, 其输出激光在石墨靶上打出的光斑如图 3(b) 所示。构成复合腔后, CW 激光的热敏光斑如图 3(c) 所示, 是单横模工作。当 CW 放电管和 TEA 放电管同时工作, 输出激光脉冲功率密度增强若干倍, 在石墨靶上打出耀眼的光斑, 光斑呈圆形, 如图 3(d) 所示。可见 TEA 激光已从多模, 变成了单模, 证明复合腔锁定技术是成功的。实验中发现, 当 CW 输出功率为 1 mW 时, 即能实现锁定, 即输出 TEA CO₂ 激光从多模光斑变成耀眼的单模光斑。在 CW 输出功率为 1~40 mW 时, 锁定的 TEA CO₂ 激光脉冲能量从 7 mJ 至 10 mJ 范围内变化, CW 激光输出为零(CW 放电停止)时, TEA CO₂ 脉冲能量为 6.5 mJ 左右, 可见复合腔注入锁定要求的 CW 激光功率很小, 同时由于有 CW 激光注入到 TEA 子腔中去, 使 TEA CO₂ 激光脉冲能量增大。锁定后脉冲能量增大现象, 以前还未见报道过。这也许是复合腔注入锁定技术的固有优点, 值得深入进行研究。锁定以后, TEA 激光从多模变成单模, TEA 放电产生的增益全部为单一的模式利用, 且脉冲能量增加 10~30%, 这个模式又是基横模, 能量很集中(产生耀眼的光斑), 很容易将 TEA 的镀金反射片打出一小洞而损坏 TEA 激光管。由于时间和研究经费所限, 未能详细测定锁定的激光和相位特性, 故实验只能看作是定性验证了理论分析的结果。

小结 复合腔注入锁定技术具有普通注入锁定技术的优点, 即锁定频率稳定性高, 啁啾小。它同时又具有混合式锁定的优点, 即结构简单, 容易实现锁定, 对环境条件要求不高。复合腔注入锁定技术克服了普通注入锁定和混合式锁定的缺点。可以预料, 这种新型技术和新型器件必将在相干的 TEA CO₂ 激光雷达中获得广泛应用。本文从理论上证明了复合腔注入锁定技术的优点, 还提出了复合腔注入锁定器件的理想设计。

参 考 文 献

- [1] C. J. Buczek *et al.*, Laser injection locking. *Proc. IEEE*, 1973, **61**(10): 1411~1431

- [2] J. L. Lachambre, *et al.*, Frequency and amplitude characteristics of high repetition rate hybrid TEA laser. *IEEE, J. Quant. Electron.*, 1978, **QE-14**(3) : 170~ 177
- [3] R. Alvarez, *et al.*, A theoretical investigation of a CO₂ hybrid laser. *Opt. Comm.*, 1990, **80**(1) : 60~ 66
- [4] J. L. Lachambre, *et al.*, Simultaneous frequency stabilization and injection in a TEA-CO₂ oscillator. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(7) : 1015~ 1017
- [5] D. C. Sinclair, *et al.*, *Gas Laser Technology*. Rinehart & Winston Inc, 1969
- [6] 激光器件. 长沙, 湖南科技出版社, 1981

附录:

激光工作气体放电时, 其折射率 $n(\omega)$ 的变化为^[5]:

$$n(\omega) = 1 + \frac{cg_0\Delta\omega_l}{2\omega\sqrt{\pi}} \frac{\omega - \omega_l}{(\omega - \omega_l)^2 + \gamma_s^2} = 1 + \delta n \quad (13)$$

激光工作物的增益系数为

$$g = \frac{\Delta\omega_l g_0}{\sqrt{\pi}} \frac{\gamma'}{(\omega - \omega_l)^2 + \gamma_s^2} \quad (14)$$

高气压下, 增益线宽度加宽, 其宽度 $\Delta\nu$ 为

$$\Delta\nu = (59 + 622.6P) \text{ MHz} \quad (15)$$

其中压强 P 的单位为 Pa。由(15)式可算出大气压下, $\Delta\nu \approx 3608 \text{ MHz}$ 。

脉冲放电对激光谐振频率的影响和 $\Delta\omega$ 有关。当 $\Delta\omega = \omega - \omega_l$ 时, $\delta n = 0$, 即不产生影响, $\Delta\omega$ 越大, 影响越大。一般, 谐振频率 ω 和激光跃迁的中心频率 ω_l 之差, 即 $\Delta\omega$ 的最大值与增益谱线的半宽度相差无几。为估计放电产生的最大线性频移, 可设 $\omega - \omega_l = \gamma_s$, 在这个条件下, (13)式可化为

$$(\delta n)_{\max} = (cg_0/2\omega\sqrt{\pi})(\Delta\omega p/2\Delta\omega), \quad \text{或者} \quad (\delta n)_{\max} = (g_0\lambda/2\pi\sqrt{\pi})(\Delta\nu_l/\Delta\nu) \quad (16)$$

其中, $\lambda = 10.6 \times 10^{-6} \text{ m}$, 对于小型 TEA CO₂ 激光器, $g_0 \approx 2/\text{m}$ ^[2], 代入(13)可求得 $(\delta n)_{\max} = 3.1 \times 10^{-8}$ 。这虽然是一个很小的数值, 但由于激谐振频率很高, 故产生的谐振频率的频移却很大。谐振频率 ν 为

$$\nu = cp/2nL \quad (17)$$

从(17)式可求出最大的频移为

$$(\Delta\nu)_{\max} = |\nu' - \nu| = \nu\zeta\delta n \quad (18)$$

其中 $\nu = 2.83 \times 10^{13} \text{ Hz}$, ζ 为 TEA 放电等离子体管和激光谐振长度腔之比, 设为 0.7 则可计算出 $(\Delta\nu)_{\max} = 6.14 \text{ MHz}$ 。这和文献[2]给出的实验结果 [$g_0 = 2/\text{m}$, $(\Delta\nu)_{\max} = 6 \text{ MHz}$] 符合得很好。由此可见, 混合式锁定激光脉冲的光载波频率啁啾高达几兆赫, 这就限制了它在精密激光雷达中的应用。

Composite Cavity Injection Locking for Small-Sized TEA CO₂ Lasers

Zhan Yushu Guo Siji Wen Jianguo Huang Wenhui Tan Shenbin

(Department of Technical Physics, Xidian University, Xian 710071)

(Received 29 December 1995)

Abstract A new type of laser locking technique for small-sized TEA CO₂ lasers — composite cavity injection locking and its principle are presented. The frequency characteristics of a composite cavity injection laser are analyzed theoretically. The preliminary experimental results of the locking technique are given.

Key words small-sized TEA CO₂ lasers, composite cavity injection locking.