

TEACO₂ 激光器被动锁模研究*

王 兵 傅恩生 张伟力

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海)

摘要——用涨落理论对 TEACO₂ 激光器被动锁模过程进行了数值模拟计算, 解释了被动锁模低锁模几率的成因, 并指出存在最佳增益及最佳初始透过率。实验结果证实了模拟计算的正确性, 得到了最佳充气气压比例, 获得了脉宽为 2 ns, 功率约 0.5 MW 的 TEACO₂ 激光超短脉冲列。

关键词——被动锁模, 非线性吸收, 饱和, 脉冲分辨。

1. 引 言

TEACO₂ 激光器单模输出脉冲的脉宽约为 100 ns, 要想得到脉宽为 ns 量级的超短脉冲必须采用锁模技术。现有锁模方法中, 被动锁模具有独特的优点。虽然由被动锁模得到的脉冲稳定性较差, 锁模几率也较低, 但其脉冲输出强度高, 脉宽窄, 尤其是其装置结构简单, 耗资少, 在某些场合应用尤为适宜。例如, 作为工作在 10 μm 波段的康普顿型自由电子激光放大器的振荡源就较为合适。为此, 我们开展了对 TEACO₂ 激光器被动锁模的研究。

2. 被动锁模的动力学过程

被动锁模的动力学过程可分为五个阶段来描述(参见图 1)。

2.1 初始脉冲形成阶段

初始激光脉冲强度很小, 多为自发辐射, 光强呈噪声分布。此时饱和吸收体处于线性吸收状态。此阶段末, 增益系数达到阈值 α_0 , 则

$$\alpha_0 = \gamma + \kappa_0 \quad (1)$$

式中, γ 为谐振腔的线性损耗, κ_0 为饱和吸收体的线性吸收系数。

2.2 多模脉冲序列放大阶段

此时吸收体仍处于线性吸收状态。增益继续增大, 并因受激, 带宽中心处增益较高而发生选模, 光谱宽度随之变窄。此阶段末, 因光强增大而使吸收体进入非线性吸收状态, 即进

本文 1988 年 12 月 5 日收到。

* 中国科学院上海分院青年科学基金资助课题。

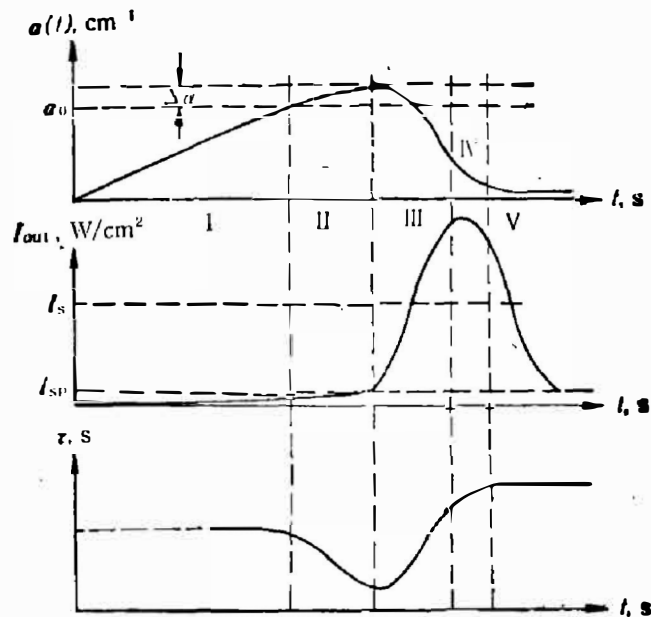


图 1 被动锁模激光器中增益、光强和谱宽的特性

Fig. 1 Behaviors of the gain, average intensity and the width of spectrum in a passive mode-locked laser.

入锁模过程。此刻增益系数为

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \Delta\alpha \quad (2)$$

2.3 多模脉冲选择分辨阶段

这是锁模的关键阶段。这时增益处于饱和状态，其吸收呈非线性，结果使较强的脉冲漂白了吸收体而被放大，脉宽被有效压缩，大量弱脉冲因吸收而被抑制，最后几个强脉冲占优势，同时光谱得到加宽，实现了有效的脉冲分辨与选择。

若取腔长为单位长度，则吸收系数 κ 为

$$\kappa = \kappa_0 / (1 + I); \quad (3)$$

式中， I 为脉冲光强。激光增益系数 α_k 和光脉冲光强分布 I_k 可表示为

$$\frac{dI_k}{dt} = I_k \left(\alpha_k - \gamma - \frac{\kappa_0}{1 + I_k} \right); \quad (4)$$

$$\frac{d\alpha_k}{dk} = -\alpha_k \left(\frac{2\sigma}{h\nu} \cdot I_s \cdot T \right) I_k; \quad (5)$$

式中， k 为渡越次数； σ 为激光介质的受激截面 (cm^2)； I_s 为吸收体的饱和光强 (W/cm^2)； ν 为激光频率 (Hz)； T 为腔的渡越时间 (s)； h 为普朗克常数。式(4)中忽略了自发辐射量。

考虑腔的线性损耗和饱和吸收体的非线性吸收，光脉冲在第 k 次往返过程中的净增益为

$$\alpha_{\text{net}} = \alpha_k - \gamma - \kappa_0 / (1 + I_k); \quad (6)$$

当 α_{net} 由正变负时，光强出现饱和现象。对应不同的 I_k ， $\alpha_{\text{net}} = 0$ 的时间不同。所以可以选定合适的 I_k ，使脉冲列中仅强度最大的脉冲光强 $I_1 > I_k$ ，其余均小于 I_k ，从而产生有效的脉冲分辨效果。

2.4 单模脉冲序列放大阶段

此时吸收呈完全饱和，增益也发生饱和，因此由上阶段选出的最大强度脉冲被非线性放

大并发生饱和, 形成高强度的脉冲序列。

2.5 锁模脉冲序列输出阶段

这时激活介质的能量以一系列超短脉冲的形式释放, 最终粒子数反转被倒空, 脉冲逐渐衰弱, 锁模脉冲得以输出。

3. 数值模拟计算及结果分析

由上所述, 第三阶段是获得理想锁模结果的关键, 为此我们对这一阶段作用过程进行数值模拟计算, 并分析各因素对锁模结果的影响。假定吸收池为无惯性漂白吸收, 各脉冲形状为矩形, 脉宽相等, 激光在增益饱和时输出。为计算方便起见, 将微分方程 (4), (5) 化成下列迭代方程组:

$$\begin{cases} \ln I_{k+1} = \ln I_k + \alpha_k - \gamma - \kappa_0 / (1 + I_k); \\ \alpha_{k+1} = \alpha_k - \left(\frac{2\sigma}{h\nu} I_k T \right) \bar{I}_k; \end{cases} \quad (7)$$

在模拟计算的情况下有多个脉冲列共存, 因此式 (8) 中以平均光强 \bar{I}_k 来代替式 (5) 中的 I_k , 这与文献 [1] 中以总光强 $\sum I_k$ 来代替 I_k 相比, 更为合理。由于此项的大小将影响到光强发生饱和的时间, 最终将影响脉冲分辨效果。

由于第三阶段开始时腔内脉冲分布仍具有噪声分布特性, 我们参考文献 [1] 中的最可几初始脉冲分布, 并考虑到实际光强与计算方便, 取脉冲初始分布为

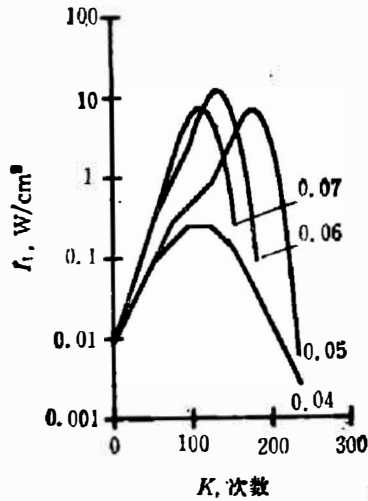
$$I_N = 2 \times 10^{-8} \ln \left(\frac{M}{N} \right); \quad (9)$$

式中, M 为存在的脉冲总数; N 为 M 个脉冲列中强度排列在第 N 位的脉冲。因为锁模效果取决于脉冲分辨的有效与否, 所以能否分辨脉冲强度最大 (I_1) 与次大 (I_2) 是表示锁模成败的关键, 故其光强比 $R = I_1/I_2$ 具有重要意义。由推导^[1]可知, 初始分布的 $R_0 = I_1/I_2 = 1.18$, 对应出现的几率为 51%, 而当 $R_0 = 1.02, 1.04, 1.10$ 时, 对应的几率分别为 93%, 86%, 69%。若脉冲分辨效应能使 $I_1 = RI_2$ 的两个脉冲分布有效分辨; 则从理论上可获得被动锁模成功的几率。

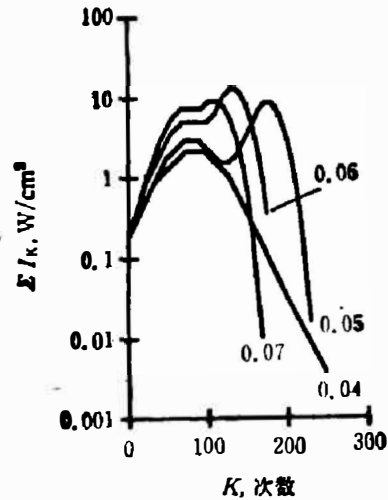
实验中选定的初始条件为: $T = 2L/C = 12 \text{ ns}$; $\gamma = 0.25$; $\sigma \approx 2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$; $I_s = 50 \text{ MW/cm}^2$; $\kappa_0 = 0.2$; $M = 100$ 。因 TEACO₂ 激光器增益较高, 故选 $\Delta\alpha = 0.04, 0.05, 0.06, 0.07$ (cm^{-1}) 分别进行计算和分析比较。另外, 对 R 的初始取值, 分别选取 1.02, 1.04, 1.10 和 1.18, 其余脉冲光强 ($I_N, N \neq 1, 2$) 仍按最可几分布取值, 以便获得更具普遍意义的描述, 同时从理论上估算锁模几率。

图 2(a) 为腔内最大脉冲强度随 $\Delta\alpha$ 值不同而变化的曲线。由图可知, 当 $\Delta\alpha$ 太小时, 则 I_1 也较小, 不能使饱和吸收体漂白, 从而使锁模失败。

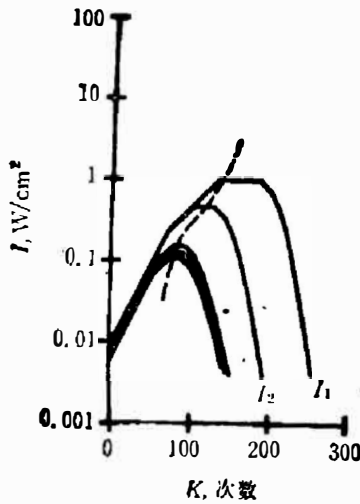
图 2(b) 为腔内总光强 $\sum I_k$ 与往返次数 k 的关系曲线。当 $\Delta\alpha$ 较小时, $\sum I_k$ 也较小, 这与 I_1 没有漂白吸收体对应。随着 $\Delta\alpha$ 的增大, 在 $k = 110$ 附近出现波谷。这是因为此时 I_1 增长缓慢, 其他脉冲因被吸收而急剧下降, 故 $\sum I_k$ 较其他脉冲下降前为小。当 I_1 漂白了饱和吸收体后便被迅速放大, 总光强 $\sum I_k$ 随 I_1 增大而上升, 最后超出前面的最大值, 从而形



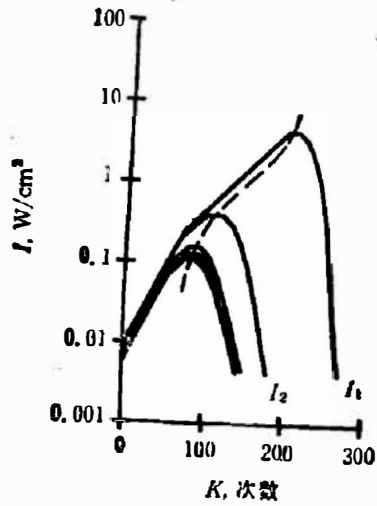
(a) 按最可几分布的腔内强度最大的脉冲分布图
条件: $\gamma=0.25, k_0=0.2, \Delta\alpha$ 为可变参数



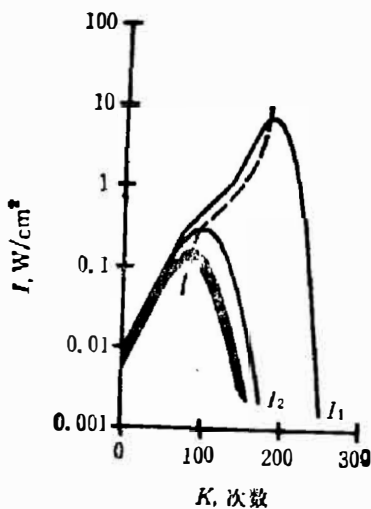
(b) 腔内各脉冲强度总和分布图
条件: 同(a)



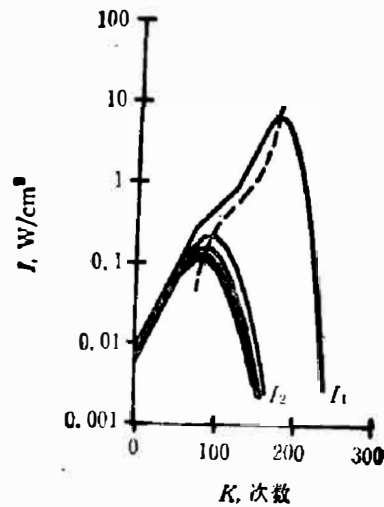
(c) 腔内前 5 个强度最大的脉冲分布图
条件: $\gamma=0.25, k_0=0.2, \Delta\alpha=0.05$, 初始比例 $R_0=I_{10}/I_{20}=1.02$, 峰值比例 $R_k=I_{1k}/I_{2k}=20.3, k=170, I_{1kMAX}=1.19$



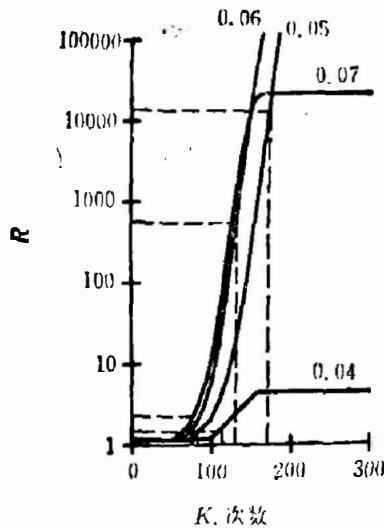
(d) 腔内前 5 个强度最大的脉冲分布图
条件: $R_0=1.04, R_k=23867, k=204, I_{1kMAX}=4.80$, 其余条件同(c)



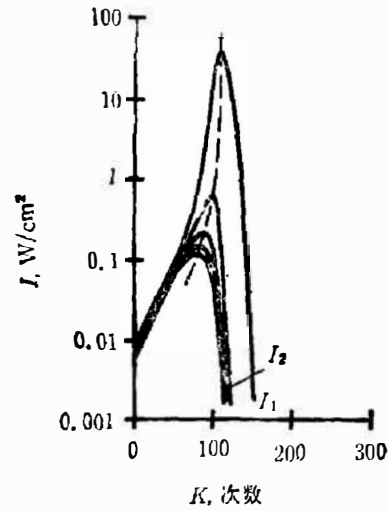
(e) 腔内前 5 个强度最大的脉冲分布图
条件: $R_0=1.10, R_k=24678, k=185, I_{1kMAX}=8.97$, 其余条件同(c)



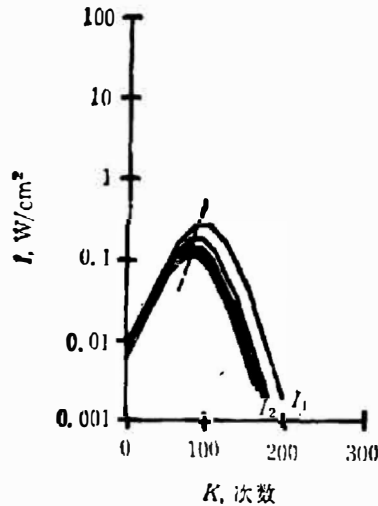
(f) 腔内前 5 个强度最大的脉冲分布图
条件: $R_0=1.18, R_k=30228, k=177, I_{1kMAX}=10.6$, 其余条件同(c)



(g) 比例值 R 与 $\Delta\alpha$ 的关系曲线
条件: $\gamma=0.25, k_0=0.2,$
 $R_0=1.18$



(h) 当 $k_0=0.3$ 时, 腔内前 5 个强度最大的脉冲分布图
条件: $R_0=188.9, k=109, I_{1KMAX}=52.7,$
其余条件同 (f)



(i) 当 $k_0=0.15$ 时, 腔内前 5 个强度最大的脉冲分布图
条件: $R_0=1.51, k=96, I_{1KMAX}=0.308,$ 其余条件同 (f)

图 2 模拟计算结果

Fig. 2 The results of numerical simulation.

成波谷. 在 $k \approx 130$ 以后, ΣI_k 具有图 2(a) 中 I_1 的形状, 这说明腔内仅剩 I_1 , 其余脉冲被抑制, 脉冲列被有效地选择分辨.

图 2(c)~(f) 为不同初始 R_0 值下, 前 5 个最大脉冲强度的特性曲线. 对比各图, I_{1k} 和 I_{2k} 间的差值随 R_0 值的增大而加大(图中虚线为 I_k 值变化趋势). 由前面对 I_k 的讨论可知, 当 $I_k < I_{1k}, I_k > I_{Nk} (N \neq 1)$ 时, 锁模效果最佳. 而从脉冲分辨的可靠性来说, I_{1k} 与 I_{2k} 的差值也愈大愈好, 因此 R_0 值越大越好. 但从 R 值代表的几率意义看, R 值大则锁模几率低. 另外, 从输出功率来看, 虽然 R_0 较小时, R_{max} 也可达到很大(如图 2(d)), 但此时 I_{1max} 不大, 这对获取高功率脉冲输出不利. 而 R_0 稍大些(如图 2(e)), 则 I_{1max} 将显著提高, 不过对应的锁模几率也将降低. 因被动锁模的特点是高输出功率, 这就决定了被动锁模的低锁模几率特性.

图 2(g) 表示 R 值随 $\Delta\alpha$ 的变化情况. 图中虚线所标出的点为各 $\Delta\alpha$ 下最强脉冲 I_1 的

峰值光强点。由图可知,增益太小(如 $\Delta\alpha=0.04$),光脉冲不足以使吸收体漂白,不能产生有效的脉冲分辨效果。而增益太大(如 $\Delta\alpha=0.07$),将使光强峰值点处的 R 值减小,从而使脉冲分辨率下降,导致锁模失败。因此对一定的初始条件,有个最佳初始增益值。由图可得,对我们模拟计算的系统, $\Delta\alpha=0.05$ 较为合适,而实验使用的激光器的增益值正好为 5% 左右。

图 2(h) 和图 2(i) 表示吸收池的线性吸收系数对锁模的影响。图 2(h) 中,由于 κ_0 的增大,即提高了饱和吸收体的漂白阈值,使 I_{1k} 得到明显增大,这对输出高强度锁模脉冲有利,但也应注意此时 $R_k=188.9$,比图 2(f) 中的 $R_k=30228$ 小得多,它将影响起关键作用的脉冲分辨过程。图 2(i) 中,因 κ_0 的减小,降低了饱和吸收体的漂白阈值,使脉冲分辨率下降,引起锁模失败。因此,对理想的锁模存在最佳吸收体初始吸收系数。

4. 实 验

4.1 实验方法

我们使用紫外预电离半外腔式的 TEACO₂ 激光器来进行被动锁模实验,其结构如图 3 所示。激光输出采用平凹稳腔。凹面全反镜 M_1 曲率半径为 5m,输出镜 M_2 为厚 4mm 的平行锗片。半外腔窗口为 NaCl 晶体。激光器工作气体由 CO₂、N₂ 和 He 组成。在 CO₂:N₂:He=1:1:6,总充气压为 360×133.32 Pa 和单级 Marx 发生器充电电压为 22 kV 工作条件下,输出的单模激光脉冲功率为 20 MW,脉宽约为 100 ns。

实验光路如图 4 所示。饱和吸收介质为 SF₆ 和 He 的混合气体。SF₆ 的吸收主峰在 10.6 μm 处,我们采用文献[2]所述方法,使激光输出的最大概率位于 10P(20) 支线上,即 10.6 μm 处。

实验中使用了厚度不同的两个吸收池,相应改变吸收池充气气压及气压比,以求获得吸收池厚度和充气压及充气比例与锁模效果的关系。其中厚 3.5cm 的吸收池两端窗口均为 NaCl 晶体;厚 2.5 mm 的吸收池一端为 NaCl 窗口,而另一端为 ZnSe 晶片。

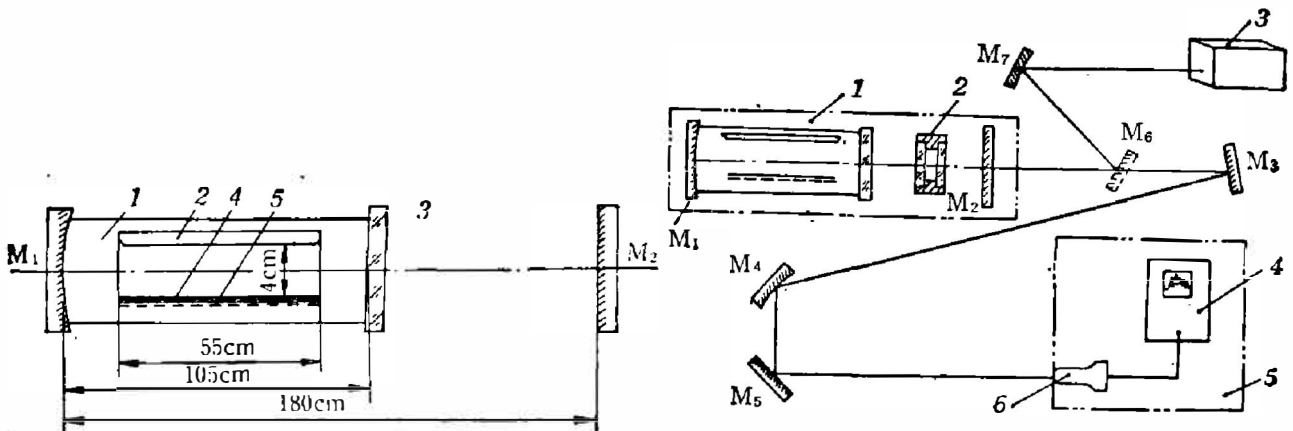


图 3 TEACO₂ 激光器结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of TEACO₂ laser construction.

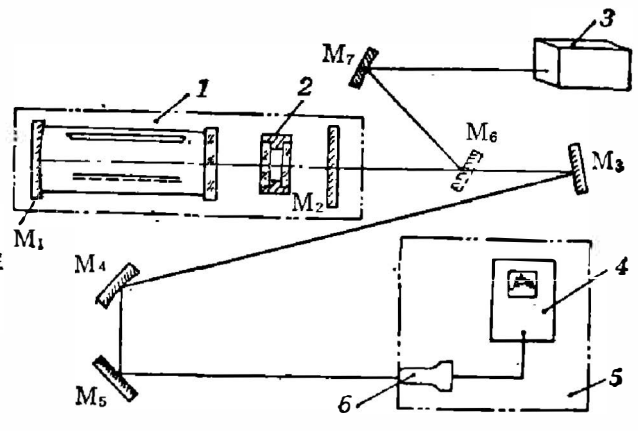
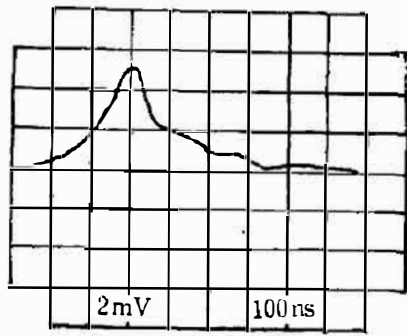
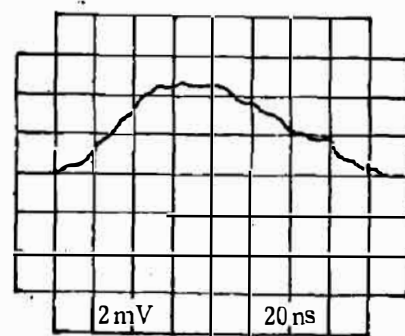


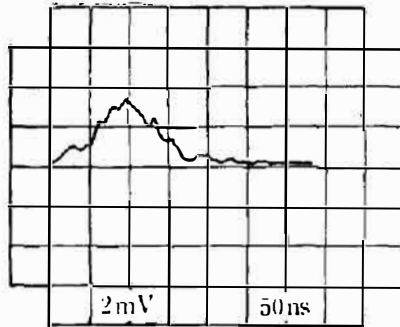
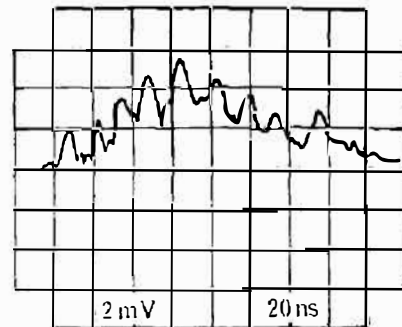
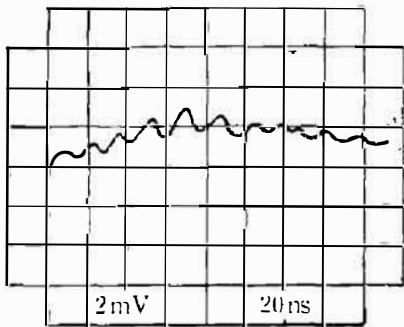
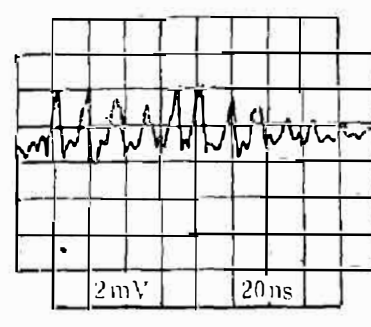
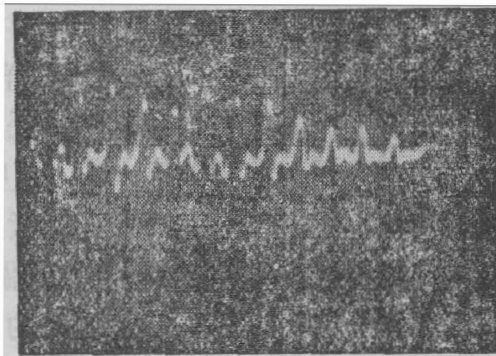
图 4 实验光路图
1—TEACO₂ 激光器 2—吸收池 3—CO₂ 谱线仪
4—7834 示波器 5—屏蔽房 6—光子牵引探测器
Fig. 4 Experiment scheme.



a(1) 自由振荡



b(1) 自由振荡

a(2) SF₆=133.32 Pa He=30×133.32 Pab(2) SF₆=133.32 Pa He=30×133.32 Paa(3) SF₆=133.32 Pa He=100×133.32 Pab(3) SF₆=133.32 Pa He=70×133.32 Pa

a 最佳脉冲照片[条件同 b(3)] 示波屏刻度为: 2 mV, 20 ns.

图 5 锁模结果

Fig. 5 The passive mode-locked results.

4.2 实验结果与讨论

图 5 a、b 两组分别是用厚度为 3.5 cm 和 2.5 mm 的吸收池做实验所得结果。锁模成功率约为 60%，其中最佳锁模脉冲占 50%，其脉宽约为 ns，功率约为 0.2~0.5 MW。

影响锁模的因素很多,结合实验结果讨论如下:

4.2.1 吸收池厚度对锁模的影响

虽然理论上不同厚度的吸收池均能得到理想锁模效果^[3],但对比图5中a、b两组的不同波形可见,中心厚度薄的吸收池容易得到好的锁模脉冲.设厚度为 L_0 的吸收池在锁模过程中吸收的总光子能量为 E_0 ,则有下式^[4]:

$$E_0 = \frac{N_0 \sigma_0 E S T L_0}{2\sigma_0 E + S T} + \frac{2N_0 (\sigma_0 E)^2 L_0}{(2\sigma_0 E + S T)^2} [1 - e^{-(2\sigma_0 E + S T)}]; \quad (10)$$

式中, N_0 为饱和吸收体的总分子数密度; L_0 为吸收池中心厚度; T 为光子在腔内单程渡越时间; E 为 T 时间内光脉冲所包含的能量; S 为自发辐射几率; σ_0 为基态分子的吸收截面.由于 $S T \ll 2\sigma_0 E$,所以式(10)可简化为:

$$E_0 = \frac{1}{2} N_0 S T L_0 + \frac{1}{2} N_0 L_0 (1 - e^{-2\sigma_0 E}). \quad (11)$$

由式(11)可得 $E_0 \propto L_0$,即吸收池厚度越大,则吸收体吸收的能量越多.实验证实了这个解释,图5中a组脉冲峰值明显低于b组.锁模脉冲宽度 τ 与吸收池充气压 P 关系为^[5]:

$$\tau \propto P^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

所以降低吸收气体气压会引起脉宽增大,影响锁模质量;若吸收池过薄会影响工作气体的寿命;所以实际使用时应选择最佳吸收池厚度.

4.2.2 饱和吸收体的气压与气压比对锁模的影响

要获得一个窄脉宽的激光脉冲,要求饱和吸收体驰豫时间 T' 小,吸收漂白为快响应过程,即吸收体的饱和光强 I'_s 远小于激光腔的饱和光强 I_s ^[6].因 T' 与 I'_s 有下列关系^[7]:

$$(2T')^{-1} = \sigma_0 I'_s / h\nu, \quad (13)$$

所以增大 SF_6 的充气压,减小驰豫时间 T' 的同时, I'_s 提高了.通过改变混合吸收体中He的压力来提高总气压使 T' 变小是可行的方法,但He气压过高会发生饱和效应^[7],因此需要选择最佳充气压和气压比.经反复实验我们得到最佳气压为 $71 \times 133.32 \text{ Pa}$,气压比为 $SF_6:\text{He}=1:70$.在此条件下获得了最佳锁模脉冲(如图5c所示).

4.2.3 吸收池在腔内位置对锁模的影响

从腔内驻波场角度考虑,吸收池应紧贴在输出端镜上,这样当吸收池被漂白后,各纵模起通过,腔内任何时候都只有一个光脉冲群存在,这样脉冲损耗小,输出功率较高,此时各纵模间隔在时域上应为 $2L/C$ ^[4].另外从脉冲分辨效果来看,因吸收体的驰豫时间比整个脉冲持续时间长^[6],若最大强度脉冲率先进入并漂白吸收池,则紧随其后的较小强度脉冲也会通过吸收池,使脉冲分辨率减小.实验中除非把吸收池与腔镜做成一体,否则即使将吸收池紧贴腔镜,其间隔仍比波长(μm 量级)大得多,进入吸收池时的脉冲电振幅仍不一定为零节点.为此,我们采用观察纵模间隔法来解决这个问题.首先将吸收池放在半外腔中靠近端镜处的任一位置,然后观察示波器上的锁模波形,微调吸收池位置,使锁模脉冲间隔为 $2L/C$,此时即认为吸收池处于正确位置.如图5(c)所示,其脉冲间隔约为 12 ns ,按理论计算 $\Delta t = 2 \times 1.8/3 \times 10^8 = 12 \text{ ns}$,故此时吸收池位置正确.

讨论中的第1、2两点与前面数值模拟计算中所得出的存在最佳吸收体初始吸收系数相吻合,这两个因素的改变最终都反映在 α_0 的变化上.由此可见,模拟计算正确地反映了锁

模过程中各量间的相互关系。

5. 结 语

我们对被动锁模过程中的关键阶段进行了数值模拟计算,得到了 TEACO₂ 激光器被动锁模过程的一幅清晰图象。它揭示了被动锁模的低几率成因,提出存在最佳初始透过率及最佳增益。这些均为实验所证实。若进一步改善实验用激光器的质量并将吸收池厚度减小到 1 mm 左右,有望获得具有实用价值的高功率 CO₂ 激光超短脉冲。

致谢——石培升、陈磊同志参加了部分实验工作;在模拟计算过程中得到了李颖峰同志的帮助;在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Glenn W. H. *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-11** (1975), 1: 8.
- [2] 邹海兴等, *激光*, **9** (1982), 6: 394.
- [3] Bradley D. J. et al., *Opt. Comm.*, **2** (1970), 1: 41.
- [4] Garmire ELSA M. et al., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-3** (1967), 6: 222.
- [5] Fortin R. et al., *Can. J. Phys.*, **51** (1973), 4: 414.
- [6] Kryukou P. G. et al., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-8** (1972), 10: 766.
- [7] Platonenko V. T. et al., *Sov. J. Quant. Electr.*, **11** (1981), 9: 1161.
- [8] Yariv A., *Quantum Electronics, Second Edition*, by John Wiley & Sons. Inc., 1975, pp. 279. (刘松豪等译, 量子电子学, 上海: 上海科学技术出版社, 1983, 287).
- [9] Haglund R. F. et al., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17** (1981), 9: 1799.
- [10] Yocom T. A. et al., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-16** (1980), 11: 1192.

STUDY OF PASSIVE MODE-LOCKING IN TEACO₂ LASER*

WANG BING, FU ENSHENG, ZHANG WEILI

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

ABSTRACT

The numerical simulative calculation of the passive mode-locking in TEACO₂ laser is made using the fluctuation model, and the reasons for the lower probability of passive mode-locking are given. The calculation is confirmed by the experimental results. A TEACO₂ ultrashort laser pulse produced by passive mode-locking with a 2-ns pulse width and a 0.5 MW power is obtained.

* Project supported by the Youth Science Fund of the Academy of Sciences of China, Shanghai Branch.