

文章编号: 0253-2239(2001)06-0716-04

同步触发对多电极对激光器输出特性的影响

叶莉华 李相银 贺安之

(南京理工大学应用物理系, 南京 210094)

摘要: 在研究多电极对激光器输出特性的实验中, 在气压、脉冲电压、放电区体积等其他放电参数保持不变的情况下, 多组电极对同步触发时, 激光器的输出有非线性的脉冲能量增强效应。在总结实验规律的基础上, 综合考虑腔内光子数密度和谐振腔效率的影响, 深入分析非线性能量增强效应的产生机制, 建立了理论模型。将理论计算值与实验测量值相比较, 理论分析与实验结果符合较好。

关键词: 多电极对激光器; 同步触发; 非线性能量增强; 输出特性

中图分类号: TN248.2⁺2 文献标识码: A

1 引 言

通过使用多组电极对均分同一激光谐振腔, 并顺序点火各组电极对, 可以产生脉冲间隔可调的光脉冲序列。这种时间间隔短的高强度激光脉冲序列在激光遥感、大气环境监测、双光子效应研究、光化学等领域具有广阔的应用前景^[1-3]。作为一种新型激光器, 多电极对激光器有其独特的输出特性, 例如其脉冲能量输出对点火时间间隔高度敏感的现象已引起重视。特别是当脉冲放电时间间隔 $\tau = 0$ 时, 多电极对激光器脉冲能量呈现非线性增长, 因此有必要研究能普遍适用于多电极对激光器的理论模型, 从而探求影响激光输出特性的本质因素。本文利用作者最近研制成功的三电极对 TEA CO₂ 激光器^[4], 设计了双电极对和三电极对的能量输出对比实验, 根据实验结果总结能量增强的规律, 并从理论角度研究了普遍适用于多电极对激光器的理论模型, 作出合理解释, 其结果与实验相符。该工作对于进一步提高多电极对 CO₂ 激光器的输出稳定性、拓展多电极对 CO₂ 激光器的应用具有一定的意义。

2 实验与数据处理

实验中所用的三电极对激光器, 其谐振腔长度 l 为 146 cm, 三电极对均分同一光学谐振腔。每组电极对有效放电区体积为 35 cm × 2 cm × 2 cm, 工作气体组分为 $P_{\text{CO}_2} : P_{\text{N}_2} = 1 : 1$, 总气压 $P_{\text{CO}_2} + P_{\text{N}_2} = 37.3$ kPa, 充电电压 18 kV, 储能电容为 0.1 μF ,

谐振腔透射率 $T_1 = 0.2$ 。三电极对激光器的具体结构作者在文献 [4] 中有专门阐述, 三电极对激光器在脉冲放电电路的控制下可产生不同的触发序列。实验分两部分进行。首先, 只让两组电极对 A 和 B 参与工作, 这时可看作是一个双电极对激光器在工作。分延时触发和同步触发两种情况, 输出能量用中国科学院物理研究所提供的 LEP-1 型盘形卡计测量, 记录于表 1。然后, 让三组电极对 A、B 和 C 都参与工作, 也分延时触发和同步触发两种情况, 同样将输出能量测量并记录下来, 见表 2。这样可保证在实验进行过程中, 激光器的放电参数保持一致。同步触发时脉冲能量的增强值为

$$K = (\epsilon_0 - \epsilon) / \epsilon, \quad (1)$$

其中 $\epsilon = \sum_{i=1}^m \epsilon_i$, m 表示参与工作的电极对组数, ϵ_i 是延时触发情况下激光器脉冲输出序列中第 i 组电极对放电输出脉冲的能量, ϵ_0 是同步触发时多电极对激光器的输出能量。将计算结果一并列表 1 和表 2 中。

由表 1、表 2 中的实验数据可见, 实验过程中多电极对激光器脉冲输出性能稳定。对双电极对激光器而言, 取多次实验的平均值来进行计算, A 组电极对单独触发时输出脉冲能量 ϵ_1 为 88 mJ, B 组电极对单独触发时输出脉冲能量 ϵ_2 为 112 mJ, 两者简单叠加之和 ϵ 为 200 mJ。而两组电极对同时触发时输出脉冲能量 ϵ_0 为 262 mJ, 比两组电极对分别触发的脉冲能量之和还多, 体现了双电极对激光器同步触发时的脉冲能量呈现非线性的增强效应, 其相对增加幅度 K 约为 30%。对三电极对激光器的

实验结果作类似的处理, A组电极对单独触发时输出脉冲能量 ϵ_1 为 84 mJ, B组电极对单独触发时输出脉冲能量 ϵ_2 为 103 mJ, C组电极对单独触发时输出脉冲能量 ϵ_3 为 124 mJ, 三者简单叠加之和 ϵ 为 311 mJ。而三组电极对同时触发时输出脉冲能量

Table 1. The pulse output energy of a double-electrode-pair laser

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	average
ϵ_1/mJ	85	92	93	83	89	86	92	87	90	83	88
ϵ_2/mJ	108	106	113	115	109	118	112	115	111	114	112
ϵ/mJ	193	198	206	198	198	204	204	202	201	197	200
ϵ_0/mJ	258	261	256	265	264	261	261	269	265	257	262
$K/\%$	33.7	31.8	24.3	33.8	33.3	27.9	27.9	33.2	31.8	30.5	31.0

Table 2. The pulse output energy of a triple-electrode-pair laser

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	average
ϵ_1/mJ	81	83	79	74	89	91	87	85	86	83	84
ϵ_2/mJ	101	106	103	100	108	107	104	102	100	102	103
ϵ_3/mJ	125	129	128	123	122	119	121	126	123	119	124
ϵ/mJ	307	318	310	297	319	317	312	313	309	304	311
ϵ_0/mJ	496	503	485	491	517	521	504	493	495	507	501
$K/\%$	61.6	58.2	56.5	65.3	62.1	64.4	61.5	57.5	60.2	66.8	61.1

3 理论分析

考虑在同一平-凹腔内放置三组电极对, 根据四能级速率方程组, 求解得到第一电极对在单位模体积内有用的激光输出能量为

$$\epsilon_1 = \int -h\nu q \Delta \eta dt, \quad (2)$$

积分在脉冲持续时间里进行, q 为腔内光子数密度, Δ 为腔内光子衰变率, 则

$$\Delta = \frac{1}{\tau_R} = -\frac{c \ln R}{2l}, \quad (3)$$

其中 τ_R 为光子在腔内的平均寿命, R 为输出镜反射率, l 为激光腔长, η 为谐振腔效率。当多电极对同步触发时, 积分式中的光子数密度 q 和谐振腔效率 η 相应地会发生改变。

在多电极对激光器中, $\tau = 0$ 时多电极对同步触发, 腔内同时存在多个激活区。这时对提高腔内光子数密度作贡献的激发过程多出了一些交互作用项, 即某一激活区产生的光子可能利用其他激光区产生的反转粒子数, 激发出更多的光子, 使腔内光子数密度呈非线性增加。以双电极对激光器为例, 当 A 组电极对单独触发时谐振腔中只有一个激活区 A, 对腔内总光子数作出贡献的是 A 激活区的光子与其所产生的反转粒子的相互作用。当 A、B 两组电极

ϵ_0 为 501 mJ, 比三组电极对分别触发的脉冲能量之和多得多, 可见三电极对激光器的脉冲能量在同步触发时也呈现了非线性的增强效应, 相对增加幅度 K 约为 61.1%。下面, 对多电极对激光器同步触发时的非线性增强现象的产生机制进行理论分析。

对同时触发时腔内存在两个激活区 A 和 B, 对腔内总光子数作出贡献的除 A、B 激活区内各自的光子与反转粒子间的激发作用外, 还存在着 A 激光区的光子与 B 激活区的反转粒子间的激发和 B 激活区的光子与 A 激活区的反转粒子间的激发, 这些相互作用项在一定程度上可以解释同步触发时腔内光子数密度的非线性增长现象。

将单电极对工作时粒子间相互作用记为

$$E^1 = E_{11}, \quad (4)$$

则双电极对同时触发时粒子间激发作用可表示为

$$E^2 = E_{11} + E_{22} + E_{12} + E_{21} = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 E_{ij} \quad (\tau = 0), \quad (5)$$

三电极对同时触发时粒子间激发作用为

$$E^3 = E_{11} + E_{22} + E_{33} + E_{12} + E_{21} + E_{23} + E_{32} + E_{13} + E_{31} = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 E_{ij} \quad (\tau = 0), \quad (6)$$

(4)式、(5)式、(6)式中的上标表示同时工作的电极对个数, 下标 ij 表示第 i 个激活区产生的光子与第 j 个激活区的反转粒子作用。于是, 多电极对激光器的粒子激发项可归纳为

$$E^m = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m E_{ij} \quad (\tau = 0), \quad (7)$$

其中 E^m 的上标表示共有 m 组电极对同时工作。由

于反转粒子数存在一定的弛豫时间,当某一激活区的光子到达另一激活区时,该激活区剩下的反转粒子正在按一定规律衰减,因此不同激活区的光子与粒子的交叉作用项 $E_{ij} (i \neq j)$ 比同一激活区的粒子间作用项 E_{ij} 弱,而非相邻激活区的光子与粒子的交叉作用项 $E_{ij} (i = j \pm 2)$ 又比相邻激活区的光子与粒子的交叉作用项 $E_{ij} (i = j \pm 1)$ 弱得多,这是由于非相邻激活区的光程比相邻激活区的光程长的缘故。于是,当 $\tau = 0$ 时,设腔内光子数密度为 q_0 , 则

$$q_0 = q(1 + m \ln m). \quad (8)$$

当 $m = 1$ 时, $q_0 = q$; 当 $m = 2$ 时, $q_0 = 2.386q$; 当 $m = 3$ 时, $q_0 = 4.296q$ 。

下面考虑多电极对激光器同步触发时谐振腔效率的计算。一般情况下,谐振腔效率由下式确定

$$\eta = \frac{L_1}{L_1 + L_2} = \frac{L_1}{Gl}, \quad (9)$$

其中 L_1 为谐振腔的透过损耗, L_2 为谐振腔往返净损耗。则

$$L_2 = \delta_{r_1} + \delta_{r_2} + 2\delta_g + 2\delta_d + 2\delta_i, \quad (10)$$

其中 δ_{r_1} 和 δ_{r_2} 分别是由两个腔镜反射不完全产生的吸收和散射损耗; δ_g 为谐振腔的几何损耗,由于平-凹腔属稳定球面腔,经过精确调整可使谐振腔的几何损耗近似忽略不计; δ_d 为衍射损耗, δ_i 是由激活介质的非激活吸收和散射引起的内损耗。根据衍射理论,一般稳定球面腔的等效菲涅耳数可由下式计算^[5]

$$N_{ief} = \frac{a_i^2}{\pi r_i^2} \quad (i = 1, 2), \quad (11)$$

其中 a_i 表示第 i 个反射镜的半径, r_i 表示第 i 个镜面上的光斑半径。根据上式可估算出三电极对激活器谐振腔的等效菲涅耳数为:

$$N_{1ef} = 0.4533, \quad N_{2ef} = 1.6809.$$

考虑低次模在腔内行进的情况(经模式选择后多电极对激光腔中激光模式为基模振荡),多电极对激光器内谐振腔基模的衍射损耗 δ_d 不会超出 0.04,而实际损耗低于按腔的菲涅耳数计算出的衍射损耗。因此,对多电极对激光器,综合考虑谐振腔往返净损耗的各个分量,可估算出 $L_2 \approx 0.1$ 。

单电极对激光器振荡阈值条件为

$$G^{(1)}l \geq \delta = L_1 + L_2^{(1)}. \quad (12)$$

当 $\tau = 0$ 时,多电极对同时工作,腔内存在多个激活区,内损耗的减小使谐振腔往返净损耗率有一

定程度降低,多电极对之间介质激活的条件得到改善,从而有利于改善放电的均匀性,提高了谐振腔的效率。于是(12)式修正为

$$G^{(m)}l \geq \delta = L_1 + L_2^{(1)}(1 + \ln m). \quad (13)$$

即多电极对同时触发状态下,腔内损耗表示为 $L_2^{(m)} = L_2^{(1)}(1 + \ln m)$,上式中 m 是同步触发的电极对个数(正整数),位于符号右上角括号内时仅起标识作用。同时(9)式可修正为

$$\eta_0 = \frac{L_1}{L_1 + L_2(1 + \ln m)}. \quad (14)$$

η_0 中的下标 0 表示 $\tau = 0$ 时的谐振腔效率。由上式可见,多电极对激光器同步触发时谐振腔的效率呈现出非线性增加。

由(8)式和(14)式可得到不同条件下的光子数密度和谐振腔效率,如表 3 所示。

Table 3. Resonator efficiency with different condition

η_0	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$
$L_1 = 0.20, L_2 = 0.10$	0.67	0.77	0.807
$L_1 = 0.40, L_2 = 0.10$	0.80	0.87	0.893
q_0	q	2.386 q	4.296 q

在其他条件不变的情况下,设两组电极对分别工作时 $\epsilon_1 \approx \epsilon_2$, 当 $L_1 = 0.20, L_2 = 0.10$ 时,有 $2\eta q = 1.34q, \eta_0 q_0 = 1.84q$, 则能量相对提高幅度为

$$K = \frac{\eta_0 q_0 - 2\eta q}{2\eta q} = 37.3\%;$$

当 $L_1 = 0.40, L_2 = 0.10$ 时,有 $3\eta q = 1.60q, \eta_0 q_0 = 2.08q$, 则

$$K = \frac{\eta_0 q_0 - 2\eta q}{3\eta q} = 72.6\%;$$

当 $L_1 = 0.40, L_2 = 0.10$ 时,有 $3\eta q = 2.40q, \eta_0 q_0 = 3.84q$, 则

$$K = \frac{\eta_0 q_0 - 3\eta q}{3\eta q} = 60.0\%.$$

4 讨 论

在本文给出的实验条件下,根据理论分析,同步触发时双电极对的脉冲能量相对提高了 37.3%,三电极对的脉冲能量相对提高了 72.6%。而实验记录的结果表明,同步触发时双电极对的脉冲能量相对提高了 31.0%,三电极对的脉冲能量相对提高了 61.1%。不管是双电极对工作还是三电极对工作,其理论分析均与实验结果基本相符。在 Fox 对平行平面腔型的双电极对激光器所作的实验研究中^[1],分别点火时两组电极对的能量为 $\epsilon_1 = 66 \text{ mJ}$

和 $\epsilon_2 = 71 \text{ mJ}$, 则 $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 = 137 \text{ mJ}$ 在两组电极对同时点火条件下 输出能量为 $\epsilon_0 = 180 \text{ mJ}$ 。可求出脉冲能量相对提高了 $K = (\epsilon_0 - \epsilon) / \epsilon = 31.4\%$ 。根据本文的理论模型 可计算出 $L_1 = 0.2$ 时相应的理论值是 37.3% , 这一结论与实验结果基本相符。将上述两例中的实验结果与理论值比较 发现实验值均比理论值略低 原因是激光器实际工作时放电不均匀 且因脉冲时间极短 腔内光子数不能完全参与作用。

在记录脉冲输出能量时还发现 第二电极对 B 的输出能量 ϵ_2 总是略大于第一电极对 A 的输出能量 ϵ_1 , 而第三电极对 C 的输出能量 ϵ_3 总是略大于第二电极对 B 的输出能量 ϵ_2 。估计是因为在延时触发情况下 后一组电极对工作 前一组电极对工作后腔内尚剩余少量光子数 这将导致后一组电极对

的增益阈值条件比前一组电极对略有改善 从而其输出能量也略有提高。

参 考 文 献

- [1] Fox J A. A double-electrode-pair-pulsed laser. *Appl. Phys. Lett.* , 1980 , **37** (7) 590~591
- [2] Li Xiangying , Shi Zhenbang , Sun Ning. Configuration analysis of the resonator in a double-pulse TEA CO₂ laser. *Opt. Commun.* , 1992 , **90** (6) 292~296
- [3] Ye Lihua , Li Xiangying , He Anzhi. Application of multiple-electrode-pair TEA CO₂ laser to remote sensing , High-Power Lasers in Manufacturing , AHPLA '99. *Proc. SPIE* , 1999 , **3888** 489~496
- [4] Ye Lihua , Li Xiangying , He Anzhi. A triple-electrode-pair TEA CO₂ laser. *Microwave and Opt. Technol. Lett.* , 2000 , **24** (5) 295~298
- [5] 范安辅 , 徐天华 编著. 激光技术物理. 成都 : 四川大学出版社 , 1992. 83~86

Effect of Synchronization Trigger on Output Characteristic of Multiple-Electrode-Pair Laser

Ye Lihua Li Xiangyin He Anzhi

(Department of Applied Physics , Nanjing University of Science and Technology , Nanjing 210094)

(Received 29 February 2000 ; revised 24 April 2000)

Abstract : In the experiments of the output characteristic from a multiple-electrode-pair laser , keeping the discharge parameters (such as pressure , voltage , discharge volume and so on) changeless , when several electrode-pairs are triggered in the same time , the laser pulse energy enhances nonlinearly. The experimental rules are summed up and the effects of the interaction of several discharge sections on the intracavity photon density and cavity efficiency are considered and the reasons of nonlinear energy enhancement are analyzed , and a theoretical model is set up. The theoretical analysis agrees with the experiments.

Key words : multiple-electrode-pair laser ; synchronization trigger ; nonlinear energy enhancement ; output characteristic