

多电极对间距及放电脉冲时间选择研究

李相银 杨 庆

(华东工学院应用物理系, 南京 210014)

提要 本文研究在同一光学谐振腔内采用多电极对以获得多光脉冲稳定输出时电极对的间距及脉冲放电时间的最佳选择。

关键词 多光脉冲激光器, 多电极对, 脉冲放电

Study of the selection on intervals of multi-pair electrodes and pulsed discharge time

LI Xiangyin, YANG Qing

(Department of Applied Physics, East China Institute of Technology, Nanjing 210014)

Abstract The research of the selection on intervals of multi-pair electrodes and pulsed discharge time was described.

Key words multi-pulse laser, multi-pair electrodes, pulsed discharge

1 引 言

在同一光学谐振腔内通过设置多个电极对以获得多光脉冲输出,这在理论和实践上已得到解决^[1],但是如何保证这种器件获得稳定的输出已成为普遍关注的问题。造成器件输出不稳定的因素除了输入到器件的能量大部分使气体介质受热膨胀造成介质紊乱而引起分布不均匀外,还在于在多光脉冲器件中因前一组电极对的放电所产生的激光进入后一组电极对的放电区形成激光诱导介质扰动,加剧了后一放电区中介质的不均匀分布,从而使相位面发生畸变,致使激光束发生抖动和飘移。克服这种不稳定性一个途径是合理地设计电极对间距及脉冲放电时间间隔。本文对此进行分析研究。这对大功率多光脉冲输出的激光器的研制具有一定的理论和实践意义。

2 理论分析和实验结果

2.1 各电极对脉冲放电时间选择

在高气压工作情况下放电往往出现显著的不稳定性,局部放电区域内的气体温度急剧上升,各个放电区的气体介质的相互扩散形成湍流,从而使气体密度、温度及等离子体密度分布不均匀,这是形成激光不稳定的主要原因。在这过程中气体粒子间的相互碰撞导致上能级消激发速率迅速提高,这是建立能级粒子数反转极为有害的过程,尤其是多放电区置于同一光学谐振腔内产生多光脉冲输出的 TEA CO₂ 激光器更为显著。因此,必须合理选择各放电区脉冲放电时间是至关重要的。

对于 TEA CO₂ 激光器来说,光脉冲输出一般发生在增益的上升时间,因此在均匀介质中描述激光能级和激光下能级的频率相关的粒子数及强度方程为^[2]

$$\frac{\partial N(z,t)}{\partial t} = S(z,t) - S_0 I(z,t) N(z,t) - \frac{N(z,t)}{\tau_2} \tag{1}$$

$$\frac{\partial I(z,t)}{\partial t} + \frac{1}{V_g} \frac{\partial I(z,t)}{\partial t} = h\nu S_0 [I(z,t) + I_0] N(z,t) - \gamma_l(z,t) \tag{2}$$

式中, $N(z,t)$ 为粒子数反转密度, $I(z,t)$ 为光强度函数, $S(z,t)$ 为泵浦函数, V_g 为群速度, S_0 为饱和和增益参数, I_0 为输入噪声, γ 为分布损耗系数。

在增益不出现饱和的条件下,从方程(1)可得到瞬时非饱和增益系数为

$$g(t) = \frac{g_0}{\tau_3} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \int_0^t \exp\left(\frac{t'}{\tau_2} + \frac{t'}{\tau_3}\right) dt' \tag{3}$$

对方程(3)进行微分可得到增益峰值发生的时间 t_{max} 为

$$t_{max} = \ln(\tau_2/\tau_3)/(\tau_3^{-1} - \tau_2^{-1}) \tag{4}$$

其中相关的能级寿命 τ_2, τ_3 由下式决定^[3,4]

$$\tau_2 = (5.0 \times 10^{-15} N_{CO_2} + 1.6 \times 10^{-15} N_{N_2} + 1.1 \times 10^{-15} N_{He})^{-1} \tag{5}$$

$$\tau_3 = (6 \times 10^{-13} N_{N_2})^{-1} \tag{6}$$

在 TEA CO₂ 激光器中,如果混合气体的组分比 CO₂ : N₂ : He 为 0.5 : 0.5 : 9,则根据方程(5),(6)可得到 $\tau_2 = 28.2 \mu s$, $\tau_3 = 1.24 \mu s$ 。这时增益最大值发生在 $t_{max} = 4.05 \mu s$ 。在无 He 运转情况下气体组分比 CO₂ : N₂ 为 1 : 1,可得到 $\tau_2 = 11.2 \mu s$, $\tau_3 = 0.12 \mu s$, $t_{max} = 0.54 \mu s$ 。此计算结果与实验结果相一致。对于同一光学谐振腔内设置多电极对激光器,每一组独立放电区的脉冲放电时间必须要有一定的最佳延迟,否则会影响各个光脉冲输出的稳定性。根据泵浦激励后各能级粒子数变化的方程可得到增益系数和激光脉冲的波形,如图 1 所示^[5]。因此,激光脉冲输出与增益之间的这种时间分布特性与激光主动 Q 开关原理相类似。为了保证增益 Q 开关性能良好必须保证放电激发脉冲的激发时间比光场达到峰值功率的时间要短,亦即需要采用快速放电激励。

综上所述,对于多电极对置于同一光学谐振腔的 TEA CO₂ 激光器来说,一般预放电和主放电的时间差是 1~3 μs ,那么后一组放电区放电脉冲产生时间距前一组放电区放电脉冲的时间差为

$$\Delta t \geq \Delta t_0 + t_{max} \tag{7}$$

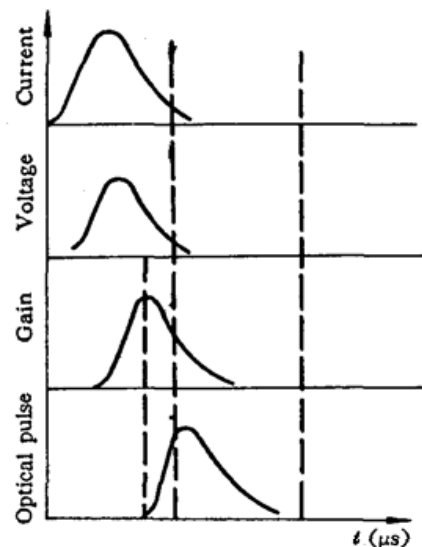


Fig. 1 The shape of the gain and optical pulse

其中 Δt_0 为预放电和主放电时间差, t_{\max} 为增益峰值产生的时间。例如, 对于 $\text{CO}_2 : \text{N}_2 = 1 : 1$ 混合气体的双电极对 TEA CO_2 激光器, 其中 $\tau_2 = 11.2 \mu\text{s}$, $\tau_3 = 0.12 \mu\text{s}$, $t_{\max} = 0.54 \mu\text{s}$, $\Delta t_0 = 1 \mu\text{s}$, 则根据方程(7)得到 $\Delta t_0 \geq 1.54 \mu\text{s}$, 即后一组放电区距前一组放电区放电脉冲时间差为 $1.54 \mu\text{s}$ 时才能获得稳定的双光脉冲输出。

根据上述原理, 以双电极对 TEA CO_2 激光器为例, 其实验结果是第二组电极对距第一组电极对放电脉冲时间差为 $\geq 2 \mu\text{s}$ 时, 获得了稳定的双光脉冲能量输出, 其实验值与理论值基本相符。这时, 增益和激光脉冲的相对关系如图 2 所示。

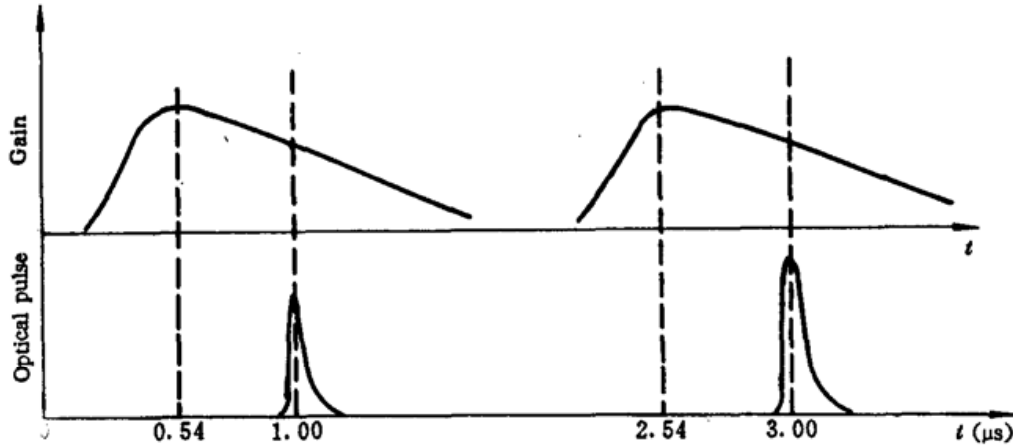


Fig. 2 The waveform of the gain and optical pulse in the double pulsed TEA CO_2 laser

2.2 多电极对间距选择

多电极对 TEA CO_2 激光器各组电极对之间距的选择与基横模和输出能量的稳定性有密切关系, 这是由于多电极对器件较之单电极对器件更容易产生介质气体的扰动, 在气体介质中形成因气体的绝热膨胀而产生冲击波, 并且以声速向外传播。因此, 在放电区域内的气体密度、等离子体密度、气体温度的分布不均匀, 这种不均匀性的消失有一定的弛豫时间。因此, 它不但影响着激光能量的输出, 而且也限制了大体积的均匀辉光放电。特别是在多电极对的情况下这种不均匀性极易引起弧光放电而严重影响器件工作的稳定性。为此, 在设计多电极对的置放时, 要考虑前一组电极对脉冲放电后, 在谐振腔中形成的以声速传播的气流扰动对后一组放电区的影响, 为此各组电极对间要有一定的间距, 间距大小由三个因素决定。在设计时首先要考虑由 CO_2 的电子碰撞分解反应, 即分解度的解析式为



在腔内气体达到 CO_2 分解平衡时, 分解度和放电区的分解度相同。并设放电区 CO_2 达到分解平衡的特征时间为 t_0 , 当 $t \leq t_0$ 时, 分解速率为常数 k , $t \geq t_0$ 时, 分解达到平衡, 净分解为零, 由此得到 CO_2 分解度 $f^{[6]}$ 为

$$f = \begin{cases} 1 - e^{-kt} & t \leq t_0 \\ f_0 (\text{常数}) & t > t_0 \end{cases} \quad (9)$$

以 $k = 1 \times 10^{-9} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$, $n_e = 5 \times 10^5 \text{cm}^{-3}$, 代入(9)式, 可求出放电区内 CO_2 达到分解平衡时的特征时间 t_0 为 ms 量级。

其次考虑各组电极对的脉冲放电时间间隔, 由于在气体放电过程中, CO_2 分子的分解是很严重的, CO_2 分子分解成 CO 和 O 。而 O 与 N_2 气体形成如下的化学反应



产生有害杂质 N_2O 和 NO , 并且产生负离子 O^- 和 NO^- 使放电区电子密度减少, 同时这些杂质气体的产生破坏了原来的正常分子分布, 而且在各个放电区互相扩散, 从而加剧了后一组放电区的扰动, 使后一组放电区容易产生弧光放电, 对于双放电预电离结构的形成弧光特征时间均为 $10 \mu s$ 。

最后考虑谐振腔中介质扰动传扩速度。根据物理学原理知道, 介质不均匀性的传扩速度为: $V = \sqrt{MRT/\mu}$, 其中 M 为气体定压摩尔比热与定容摩尔比热之比, R 为混合气体常数, T 为气体温度, μ 为气体的摩尔质量。由 V 的表示式可知, 介质扰动的传播速度与气体介质的温度、气体的摩尔质量有关, 而前者又取决于器件的输入能量, 后者取决于气体的特性和组分。因此, 要精确地计算 V 是复杂的。根据 Roper 等人的研究^[7], 在 CO_2 激光器中混合介质的传播速度约为 450 m/s 。据此, 我们设计了双电极对 TEA CO_2 激光器, 其具体参数为: 腔长 100 cm , 两组电极对的间距为 7 cm , 每组电极对的放电体积为 $35 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$, 气体组分 $CO_2 : N_2$ 为 $1 : 1$, 总气压为 37.24 kPa , 工作电压为 20 kV , 两组电极对脉冲放电时间差为 $2 \mu s$ 。这时, 前一组电极对输出激光能量为 458 mJ , 后一组电极对输出激光能量为 480 mJ , 光脉冲宽度均为 60 ns 。通过实验证实, 器件在工作 10^3 个脉冲之后, 没有发现两组电极对因放电扰动而降低输出能量, 其稳定性达到 92.5% 。

参 考 文 献

- 1 李相银 *et al.*, 中国激光, **19**(7), 550~553(1992)
- 2 L. W. Casperson, *J. Appl. Phys.*, **47**(10), 4555~4562(1976)
- 3 R. L. Taylor, *Rev. Mod. Phys.*, **41**, 26(1969)
- 4 K. R. Manes, *J. Appl. Phys.*, **43**, 5073(1972)
- 5 赫光生, 雷仕湛, 激光器设计基础, 上海科技出版社, 1979, 177~178
- 6 X. Jing, Y. Yu, *Chinese Phys. Laser*, **16**, 119(1989)
- 7 V. G. Reper *et al.*, *Opt. Commun.*, **25**(2), 235~240(1978)