

在双电极对激光器中激光感生介质扩散的影响

李相银 施振邦 鲍 戎

(南京理工大学应用物理系, 南京 210014)

摘 要 从理论上研究了在 CO_2 激光器中双电极对对激光感生介质扩散的影响, 讨论了激光感生介质的扩散系数、传播速率以及感生介质密度, 并采用复化 Simpson 公式进行了数值计算。所得结果在双电极对激光器设计中有重要意义。

关键词 激光感生介质、扩散, 双电极对激光器。

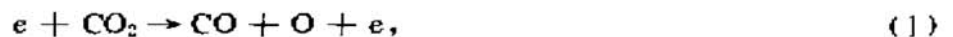
1 引 言

对于双电极对 CO_2 激光器, 不用高速气体流动便可获得脉冲时间间隔可调双光脉冲, 这在理论与实验上均得到了证实^[1~3]。但如何获得稳定的双光脉冲输出, 这是许多学者关注的问题。影响双光脉冲稳定输出的要害是放电中激光感生介质 N_2O 和 NO , 并且产生负离子 O^- 和 NO^- , 使放电区电子密度减少, 破坏了正常粒子数分布; 而且在各个放电区域中相互扩散, 加剧了后一组放电区介质的不均匀分布, 以及相位面发生畸变, 影响了双光脉冲输出的稳定性。

本文着重研究腔长为 100 cm、两放电区体积均为 $35 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ 的双电极对脉冲 CO_2 激光器。以脉冲放电后的激光感生介质 N_2O 和 NO 为基础, 从理论模型上讨论了这些介质的扩散系数、传播速率以及感生介质密度。并用计算机复化 Simpson 公式进行了数值计算。此项工作的开展, 为研究多电极对大功率激光器设计及应用奠定了理论和实验基础。

2 理论模型分析

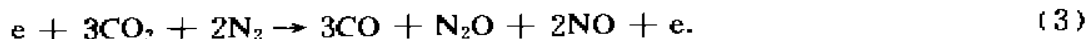
在同一光学谐振腔内设计双电极对置放时, 要考虑前一组电极对放电后, 激光感生介质 N_2O 和 NO 对后一组放电区的影响。根据 CO_2 的电子碰撞分解反应:



并考虑 O 和 N_2 气体的化合反应, 感生介质为:



由(1)和(2)式得到:



由上式可以看到反应后气体的总摩尔数将增加。增加的摩尔数为：

$$N'_{\text{CO-N}_2\text{O-NO}} = 6IN \quad (4)$$

设第一放电区和第二放电区激光感生介质摩尔数相同，则每次放电后产生介质为：

$$N_{\text{CO-N}_2\text{O-NO}} = N'_{\text{CO-N}_2\text{O-NO}}/2. \quad (5)$$

放电后瞬间感生介质只存在于放电区域内，则介质的平均密度为：

$$\bar{n} = N_{\text{CO-N}_2\text{O-NO}}/\Gamma. \quad (6)$$

第一放电区和第二放电区放电体积 Γ 相等。根据气体分子的扩散方程满足^[4]：

$$\partial n/\partial t = D\nabla^2 n. \quad (7)$$

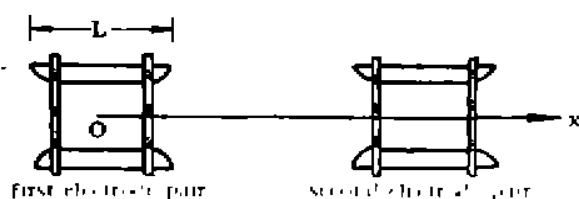


Fig. 1 Discharge domain of double-pair electrodes diagram

由于双电极对是横向放电，只考虑沿轴向的扩散，如图 1 所示。因此，(7)式写成：

$$\partial n/\partial t = D \partial^2 n/\partial x^2. \quad (8)$$

其中 D 是扩散系数，则：

$$D = \lambda\bar{v}/3, \quad (9)$$

其中 λ 和 \bar{v} 分别是混合气体的平均自由程和平均速度。它们分别为：

$$\lambda = [\sqrt{2} \pi (r_1 + r_2)^2 n_a]^{-1}, \quad \bar{v} = (8RT_1/\pi m)^{1/2}. \quad (10)$$

为了解方程(8)，设放电结束瞬间的感生介质沿 x 轴上分布。为了计算简便，设 $n(x, 0)$ 是如下连续函数：

$$n(x, 0) = \begin{cases} a(x - L/2)(x + L/2), & x \in [-L/2, L/2] \\ 0 & x \notin [-L/2, L/2] \end{cases} \quad (11)$$

其中 a 为待定系数，由下式确定：

$$\int_{-L/2}^{L/2} n(x, 0) dx/L = \bar{n}. \quad (12)$$

这样，使得 $n(x, 0)$ 沿 x 方向平均浓度与 \bar{n} 一致。

由(8)式和(11)式可得出 $n(x, t)$ 的积分形式的解：

$$n(x, t) = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp[-(x - \zeta)^2/4Dt] n(\zeta, 0) d\zeta, \quad (t > 0) \quad (13)$$

由此可解出第一放电区产生的感生杂质在任一时刻沿轴向的浓度分布函数 $n(x, t)$ 。对(13)式进行分部积分一次，得：

$$n(x, t) = \frac{a}{2\sqrt{\pi Dt}} [2Dt(2x - y) \exp(-y^2/4Dt)] \Big|_{x-L/2}^{x+L/2} + (2Dt + x^2 - L^2) \int_{x-L/2}^{x+L/2} \exp(-y^2/4Dt) dy \quad (14)$$

利用计算机，采用复化 Simpson 公式^[5]，对(14)式进行数值计算，得到了 $n(x, t)$ 的数值解，由表 1 给出。

Table 1. Density of foreign substances distribution table

$n (10^2 \text{ mol/m}^3)$ $t (\mu\text{s})$	$x (10^{-2} \text{ m})$ 0	7	14	28	42
2	8.012	6.730	2.885	9.140×10^{-5}	9.140×10^{-5}
8	4.023	3.379	1.448	1.828×10^{-4}	1.828×10^{-4}
9	3.806	3.197	1.370	1.939×10^{-4}	1.939×10^{-4}
11	3.480	2.923	1.253	2.143×10^{-4}	2.143×10^{-4}
31	2.534	2.129	0.912	3.598×10^{-4}	3.598×10^{-4}
51	2.287	1.921	0.824	4.165×10^{-4}	4.165×10^{-4}
71	2.148	1.805	0.774	5.445×10^{-4}	5.445×10^{-4}
91	2.071	1.737	0.746	6.164×10^{-4}	6.164×10^{-4}
111	2.036	1.710	0.731	6.808×10^{-4}	6.808×10^{-4}
131	2.027	1.704	0.730	7.395×10^{-4}	7.395×10^{-4}
151	2.026	1.707	0.732	7.940×10^{-4}	7.940×10^{-4}

根据表 1, 选择 $t = 8 \mu\text{s}$, $t = 11 \mu\text{s}$, $t = 71 \mu\text{s}$, $t = 151 \mu\text{s}$, 作出了感生介质浓度沿轴分布的曲线。如图 2。

设第一和第二放电区长度均为 $L = 35 \text{ cm}$ 。根据表 1, 从第一放电区中心 ($x_{01} = 17.5 \text{ cm}$) 感生介质沿轴向扩散到第二放电区中心 ($x_{02} = 35 \text{ cm}$) 处, 绘制介质浓度变化的曲线。如图 3 所示。

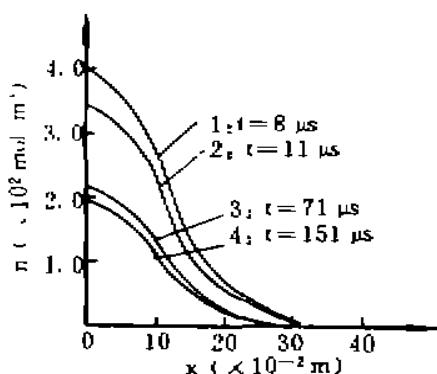


Fig. 2 Density of foreign substance along x-axis

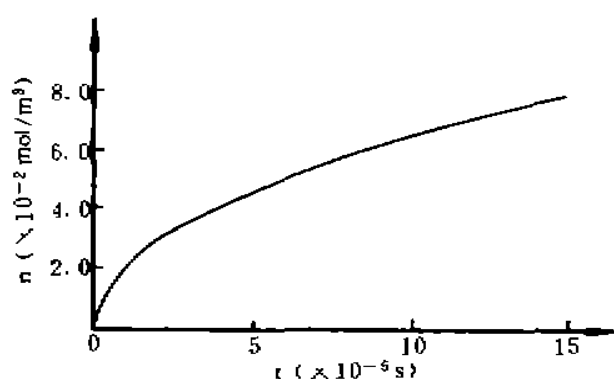


Fig. 3 Change curve of foreign substance density in the second discharge domain

3 结果与讨论

对于同一光学谐振腔内设置的双电极对或三电极对 TEA CO_2 激光器, 电极对之间间距的选择与基横模和输出能量的稳定性有密切关系。这是由于双电极对器件较之单电极对器件更容易产生感生介质的扰动。

根据上述分析, 从图 2 看到: 第一放电区中心感生介质 $n(x, t)$ 随轴向扩散变化曲线, 扩散随距离变化 $n(x, t)$ 减小。扩散系数和扩散速率分别由 (9) 式和 (10) 式给出: $D = 1.941 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $v = 415 \text{ m/s}$ 。在不同脉冲放电时间下, 所获得的 n 随 x 变化的曲线形状相似。在 $x = 7 \text{ cm}$ 处, 感生介质扩散密度开始迅速下降(即第一放电区沿轴向扩散到 42 cm 处)。也就是说, 要求两个放电区至少 7 cm, 才能避免由于感生介质扰动而影响激光输出稳定性。这一论断, 由实验已得到证实^[6]。在图 3 中, 得到了第二放电区中心感生介质密度随时间变化的曲

线。在脉冲放电时间间隔内(第一放电区和第二放电区脉冲放电时间间隔 Δt 约等于 $10 \mu\text{s}$), 其杂质密度 $n = 6.808 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^3$ 。

由实验证实, 在双放电预电离双电极对 TEA CO_2 激光器件中, 在脉冲放电时间间隔为 $1.54 \mu\text{s} \leq \Delta t \leq 10 \mu\text{s}$ 时, 获得稳定的双光脉冲输出。这个结论也与一般报道的对于双放电预电离结构、成弧特征时间大约为 $10 \mu\text{s}$ 是相符的。

根据表 1、图 2 和图 3, 又设计了双放电预电离结构的双电极对 TEA CO_2 激光器。其具体参数为: 腔长为 105 cm , 第一放电区和第二放电区放电体积均为 $35 \times 2.2 \times 2.2 \text{ cm}^3$, 两组电极对间隔为 12 cm , 气体组分为 $\text{CO}_2 : \text{N}_2 = 1 : 1$, 总气压为 37.34 kPa , 工作电压为 20 kV 。两组电极对脉冲放电时间间隔为 $\Delta t \leq 10 \mu\text{s}$ 时, 第一电极对输出能量为 506 mJ , 第二电极对输出能量为 528 mJ , 光脉冲宽度均为 60 ns 。当器件工作 10^6 个脉冲后, 没有明显发现因感生介质扩散而降低双光脉冲的输出能量。

在实验中发现第二个光脉冲输出能量稍大于第一个光脉冲能量, 这可能是第一个光脉冲输出后腔未倒空所致。

参 考 文 献

- [1] Jay. A. Fox, A double-pair-pulsed laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, 37(7): 190~592
- [2] 李相银, 施振邦, 孙 宁, 脉冲时间间隔可调的 TEA CO_2 激光器. *光学学报*, 1990, 10(2): 168~172
- [3] Li Xiang Ying, SHi Zheng Bang, Configuration analysis of the resonator in a double-pulse TEA CO_2 laser. *Opt. Commun.*, 1992, 90(6): 292~296
- [4] 杨津基, 气体放电. 北京, 科学出版社, 1983, 66~67
- [5] 李庆杨, 王能超, 易大义, 数值分析. 武汉, 华中理工大学出版社, 1982, 132~135
- [6] 李相银, 孙 宁, 装调方便的 2 cm 双放电双脉冲 TEA CO_2 激光器. *中国激光*, 1992, 10(7): 550~552

Effect of Laser Induced Medium Diffusion in a Double-Pair Electrodes Laser

Li Xiangying Shi Zhenbang Bao Rong

(Applied Physics Department, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210014)

(Received 21 October 1994; revised 26 December 1994)

Abstract The effect of laser induced medium diffusivity in a double-pair electrodes CO_2 laser is investigated. The diffusivity, velocity and density of the laser induced medium are discussed, and the results are calculated by using Simpson formular. The fundametal results are important in the double-pair electrodes laser design.

Key words laser induced medium, diffusion, double-pair electrodes laser.