

高压氯化氙准分子激光 放电的稳定性

楼 祺 洪

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

1986 年 5 月 12 日收到

提 要

高压氯化氙准分子激光放电的稳定性与 HCl 的浓度有关。本文分析了放电等离子体的电子连续性方程,指出均匀放电的持续时间与 HCl 浓度平方根成反比。该结果与 X 射线预电离脉冲形成网络泵浦氯化氙激光的实验能很好地符合。

一、引 言

激光放电等离子体一般是偏离平衡态的,它的性质表明这种等离子体存在多种不稳定性。这些不稳定性与等离子体中中性和带电粒子的碰撞过程、能量转移过程以及输运过程有关。对于高压准分子激光放电等离子体,引起不稳定性的碰撞过程主要涉及到带电粒子的产生以及吸附过程。

在实验过程中发现,高压氯化氙准分子激光放电的稳定性与 HCl 的浓度有关。HCl 的浓度愈高,维持稳定场强的放电时间愈短,并导致相应的激光脉冲持续时间愈短。对于这种不稳定性的机理, Daugherty^[1]等人首先进行了理论分析,并给出了不稳定性判据

$$2[n_i]k_i > [n_a]k_a.$$

这里 n_i 为等离子体中主要被离化的粒子, k_i 为它的离化速率,而 n_a 为等离子体中主要吸附电子的粒子, k_a 为它的吸附速率。上述判据物理上可表达为:当离化大于吸附时,等离子体会不稳定。对于氯化氙准分子激光放电等离子体, n_i 为 Xe, n_a 为 HCl。判据可具体表达为

$$2[\text{Xe}]k_i > [\text{HCl}]K_a.$$

但是,上述判据是在准稳态时作出的,没有作含时间动态过程的分析。从定性来看,当 [HCl] 浓度增大时会有利于放电的稳定,这与我们实验上的结果是不一致的。事实上,当 [HCl] = 0 时,放电显得很稳定。为此,本文试图对上述不稳定性过程作一个动态的分析,从而解释我们实验中的一些结果。

二、电子连续性方程及其近似解

产生放电不稳定性的原因来自放电区域中局部地区电子产生和损失过程的不平衡。

实验结果表明, 放电不稳定性宏观上表现为等离子体收缩到一个或几个小的柱状放电或流光, 这些小的柱状放电区的轴一般与电场平行. 放电区的收缩一般引起激光中止, 并限制了放电注入能量.

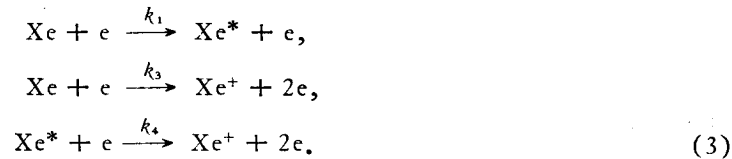
准分子激光一般工作在一个大气压以上, 放电等离子体的离化度为 10^{-5} — 10^{-6} , 平均电子能量一般为几个电子伏. Hass^[2] 分析了这类等离子体的非平衡性质, 指出主要的不稳定性是离化不稳定性. 虽然准分子激光放电时间为微秒级, 但这段时间已远大于等离子体中动力学碰撞时间. 等离子体电子密度 n_e 满足连续性方程

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = n_e \nu_i - n_e \alpha, \quad (1)$$

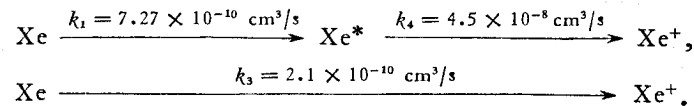
式中 α 为电子损失系数; ν_i 为电子与其它粒子碰撞产生离化的碰撞频率

$$\nu_i = \sum_{j=0}^n n_j(n_e, T_e) k_{ji}(T_e). \quad (2)$$

这里 n_j 为第 j 种粒子的密度, 它是电子密度 n_e 和电子温度 T_e 的函数. $k_{ji}(T_e)$ 是第 j 种粒子的离化速率常数, 它是电子温度 T_e 的函数. 对于氯化氙准分子激光, 我们曾用简化的动力学模型计算激光特性, 根据这个简化模型^[3], (2) 式的 n_j 主要是 Xe 和 Xe*,

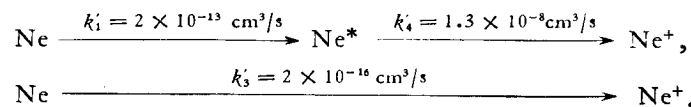


(3) 式中 k_1 , k_2 和 k_3 是与电子能量分布函数有关的速率常数, 它与放电时的场强有关. 对于典型的氯化氙准分子激光放电, $E/n \sim 5 \times 10^{-17} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$, 此时, 典型的速率常数为



可见, k_4 要比 k_1 和 k_3 大两个数量级左右, 因此可以认为, 一旦形成 Xe*, 每一个 Xe* 都很快地转化为 Xe⁺.

对于激光工作中另一种气体 Ne, 它的典型速率常数亦可从电子能量分布函数计算得到^[3]

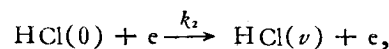


可见 Ne 对离化的贡献比 Xe 要小两至三个数量级, 在我们的分析中可略去不计. 根据以上分析可得

$$\nu_i = (k_1 + k_3)[\text{Xe}]_0 = k'[\text{Xe}]_0. \quad (4)$$

(4) 式中 $[\text{Xe}]_0$ 表示激光混合气体中 Xe 的含量, 在典型的混合比, Xe 的含量一般在 1% 左右, 对于 10^{-5} — 10^{-6} 电离度, 可以近似地假定在整个放电过程中 $[\text{Xe}]_0$ 为常数.

对于电子损失系数 α , 主要来源于 HCl 对电子的吸附过程和 HCl 的振动态激发



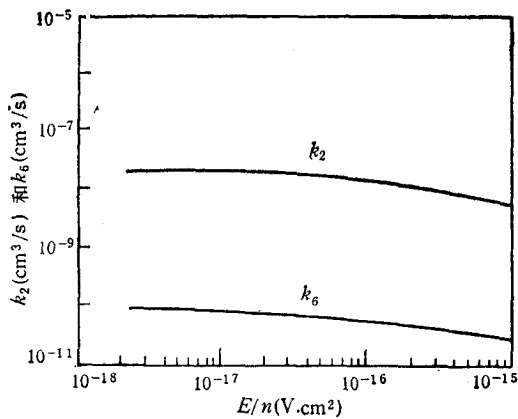


图 1

随时间的变化

$$[\text{HCl}(\nu)]_t = \frac{k_2}{k_3} [\text{HCl}]_0 [1 - \exp(k_3 n_e^0 t)]$$

$$\cong [\text{HCl}]_0 [1 - \exp(k_3 n_e^0 t)], \quad (8)$$

式中 $[\text{HCl}]_0$ 为充气时 HCl 的密度, n_e^0 为稳态放电开始时的电子密度. 当 $k_3 n_e^0 t \ll 1$ 时,

$$[\text{HCl}(\nu)]_t \approx [\text{HCl}]_0 (1 - k_3 n_e^0 t). \quad (9)$$

由 ν_i 和 α 的表达式, 电子的连续性方程可表示为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = n_e k' [\text{Xe}]_0 - k_3 n_e [\text{HCl}]_0 (1 - k_3 n_e^0 t). \quad (10)$$

(10) 式中 $k' = k_1 + k_3$ 与场强有关, 根据文献[3]的近似表达式

$$k' = 1.7 \times 10^{-11} \left(\frac{E}{P}\right)^{3/2} [\text{Xe}]_0^{-3/4} + 5.94 \times 10^{-13} \left(\frac{E}{P}\right)^{7/3} [\text{Xe}]^{-7/6}, \quad (11)$$

式中符号单位可参阅文献[3]. 在一级近似下, 由于 k_1 比 k_3 大三至四倍, 仅取 k_1 作近似计算. 将 k' 代入(10)式, 取初始条件 $t = 0$ 时, $n_e = n_e^0$, $\frac{\partial n_e}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0$. (10) 式可表达为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = k_3^2 n_e [\text{HCl}]_0 n_e^0 t - (n_e - n_e^0) [\text{Xe}]_0^{1/4} \times 1.7 \times 10^{-11} (E/P)^{3/2}. \quad (12)$$

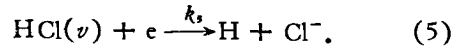
在放电不稳定时, n_e 偏离 n_e^0 一般不会太大, 故可认为 $(n_e - n_e^0)$ 较小, (12) 式有近似解

$$n_e(t) = n_e^0 \left(1 + \frac{1}{2} k_3^2 n_e^0 [\text{HCl}]_0 t^2 + \dots \right). \quad (13)$$

根据放电稳定性的分析, 一般认为电子密度超过 n_e^0 二倍时, 放电会很快向弧光和流光发展, 使 n_e 急剧增长. 因此, 定义 $n_e = 2n_e^0$ 的时间为稳态放电时间 τ , 即

$$\frac{1}{2} k_3^2 n_e^0 [\text{HCl}]_0 \tau^2 = 1, \quad (14)$$

$$\tau = \frac{1}{k_3} \sqrt{\frac{2}{n_e^0 [\text{HCl}]_0}}. \quad (15)$$



当然, 亦存在电子对 $\text{HCl}(0)$ 的直接吸附

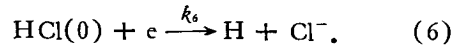


图 1 给出用电子能量分布函数计算的 k_2 和 k_6 值随场强 E/n 的变化. 首先, $k_6 \ll k_2$ 在整个分析中可忽略不计, 其次可以认为 k_2 随 E/n 的变化很小, 可近似为常数. 而 $k_2 \approx k_5$, 因此可令

$$\alpha = k_5 [\text{HCl}(\nu)]_t. \quad (7)$$

在文献[4]中, 我们研究了 X 射线预电离动力学, 推导了处于振动态的 $\text{HCl}(\nu)$ 密度

(15)式从定性上可以看出稳态放电时间与 $[\text{HCl}]_0$ 平方根成反比。

三、与实验结果的比较

实验采用一台 X 射线预电离高气压准分子激光器, 放电泵浦用脉冲形成网络。图 2 给出不同 HCl 浓度下的电压波形。从这些波形可见: 在低浓度 HCl 时, 稳态放电区是很平坦的, 随着 HCl 浓度的增加, 放电后期电压会下降。伴随着这种电压下降, 放电区会观察到局部弧光和流光。与此对应的荧光波形测量表明, 荧光脉冲宽度亦随着 HCl 浓度的增加而减小。图 3 给出两种不同气体混合比下荧光脉冲宽度与激光工作气体总气压之间的关系, 从中还可以看到随着总气压的升高, 荧光脉冲宽度亦随之下降。

激光器的放电长度为 70 cm, 由于准分子激光的高增益特性, 在这样长的增益长度下, 激光场建立的时间很快。因此可以认为激光脉冲的持续时间与稳定放电的时间相对应。采用放电长度为 200 ns, 特征阻抗为 0.6Ω 的脉冲形成网络供电, 在总气压为 2 atm, Xe 的含量为 3%, 氦气含量为 97% 左右时, 改变 HCl 的浓度。当 HCl 含量分别为 0.06, 0.1, 0.2 和 0.35 Torr 时, 相应的激光脉冲宽度 τ 分别为 200, 170, 135 和 105 ns。将 $1/\tau^2$

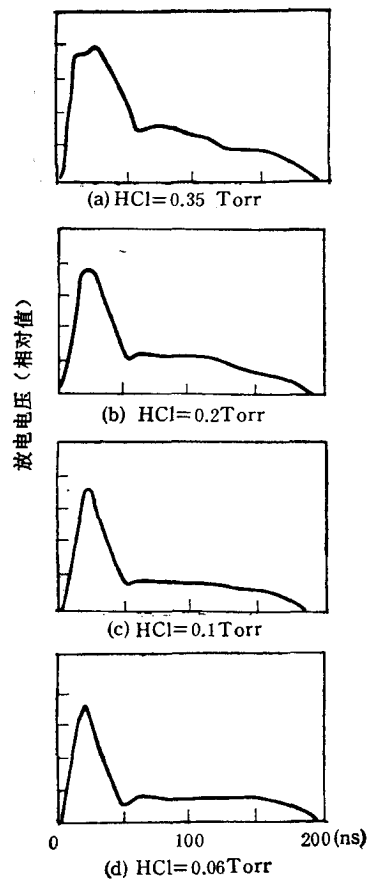


图 2

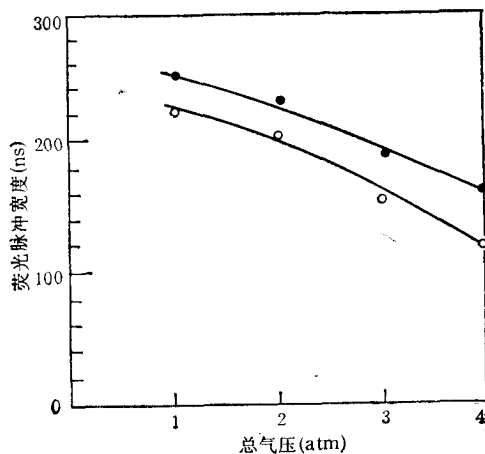


图 3

Ne: Xe: HCl

989: 10: 1 —●— 978: 20: 2 —○—

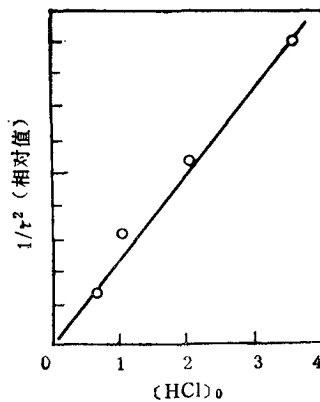


图 4

与[HCl]浓度作曲线(图4)表明,二者之间呈现线性关系,从实验上验证了(14)式的关系.

四、讨 论

我们从准分子激光放电等离子体中电子连续性方程出发,分析了电子密度随时间变化的近似解,从而解释了高气压氯化氙准分子激光放电稳定性与HCl浓度的定量关系.这种含时间的动态分析比以往的准稳态分析更能与实验结果符合.

以上结果有一定的适用范围,当HCl浓度过份低时,其稳态放电时间受到供电脉冲形成网络放电时间限制.我们曾使用400 ns的脉冲形成网络,则稳态放电时间随HCl浓度的下降会进一步扩展.

对于一台长脉冲放电准分子激光器,一旦测定了图4所示的特性曲线,可以用该曲线来监测激光器中HCl含量的值.众所周知,氯化氙准分子激光的寿命很大程度上依赖于器件中HCl的含量随时间的变化,由于HCl很易被激光器器壁材料的吸附,随之使器件内的HCl含量下降,它在激光脉冲波形检测中呈现激光脉冲宽度的展宽和峰值功率的下降.

参 考 文 献

- [1] J. D. Daugherty *et al.*, Principles of Laser Plasma, Ed. by G. Beketi, Wiley, New York, (1979), Ch. 9, p. 369.
- [2] R. A. Hass, Applied Atomic Collision Physics, Vol. 3, Gas Laser, Ed. by E. W. McDaniel and W. L. Nighan, Academic Press, (1982), Ch. 14, p. 423.
- [3] 楼祺洪、何麒生、朱声白, 光学学报, 3(1983), 709.
- [4] 楼祺洪、郑承恩、成序三、王润文, 光学学报, 4(1984), 894.

RESEARCH ON THE STABILITY OF THE HIGH PRESSURE DISCHARGE EXCITED XeCl EXCIMER LASER

LOU QI-HONG

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

ABSTRACT

The stability of the high pressure discharge excited XeCl excimer laser are related to the concentration of halogen donor HCl. In this paper, a theoretical analysis of the equation for continuity of the electrons in the discharge plasma predicate that the duration of the uniform phase should vary as the inverse square root of the HCl concentration. This prediction is in good agreement with experimental results obtained from a X-ray pre-ionized PFN pumped XeCl excimer laser.