

Ar-Kr-F₂ 气体稳态放电性质的讨论

郑 承 恩

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文计算并讨论了在稳态放电条件下, Ar-Kr-F₂ 激光气体等离子体的某些性质。

Properties of steady discharge in Ar-Kr-F₂ gas mixture

Zheng Chengen

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

Abstract: In this paper, some plasma properties of Ar-Kr-F₂ gas mixtures are calculated and discussed under the condition of steady discharge.

惰性气体卤化物激光器以其波长短、效率高、可重复脉冲运转、潜在输出能力大以及能宽带调频而引起人们注意。研究指出^[1~3], 在电子束维持放电以及X光预电离放电器件中, 可以存在一个准稳态的运转过程, 在此过程中, 放电电子的激发速率与放电能量的分配究竟以怎样的规律变化, 氟气含量与杂气(例如O₂)含量的大小对放电性质引起何种影响等, 都是很重要的问题。搞清这些问题有助于进一步了解这类放电等离子体过程的性质。本文以Ar-Kr-F₂激光放电气体为例, 对此作了某些计算机模拟与讨论。

1. 计算方法

本文限于考虑比场强 $E/P > 2500$ 伏/厘米大气压, 电离分数 $n_e/N < 10^{-5}$ 以及亚稳种类分数 $N^*/N < 10^{-5}$ 的范围。因此在求解玻尔兹曼微积分方程时, 可忽略 $e-e$ 相互作用项^[4] 以及电子-激发种类之间的超弹性碰撞相互作用项^[5]。这种条件相应于实际情况中的相当一部分准稳态放电过程。

根据这些简化, 可把玻尔兹曼方程写为

$$-\frac{dJ_f}{du} - \frac{dJ_{el}}{du} + \sum_a (u+u_a) f(u+u_a) N_a Q_a(u+u_a) - u f(u) N_a Q_a(u) = 0 \quad (1)$$

式中

$$J_f = \frac{-E^2}{3} \frac{u}{\sum_i N_i Q_m^i(u)} \cdot \frac{\partial f}{\partial u},$$

$$J_{el} = -u^2 \left(\sum_i \frac{2m}{M_i} N_i Q_m^i \right) \left(f + \frac{KT}{e} \frac{\partial f}{\partial u} \right),$$

电子能量分布函数 f 满足标准化条件

$$\int_0^\infty f \sqrt{u} du = 1, \quad (2)$$

其中 u 是电子动能,

$$u = \frac{1}{2} \frac{mV^2}{e};$$

m 是电子质量; E 是放电场强度; M_i 与 N_i 分别是第 i 种气体的分子(或原子)质量与数密

收稿日期: 1979年12月21日。

度, Q_m^i 是电子与这种气体碰撞的动量转移截面; Q_α 是电子对反应种类 α 的碰撞反应截面, u_α 是电子在此过程中失去的能量; N_α 则是反应种类 α 的数密度。

方程(1)中第1项是外电场与动量转移过程对于能量空间电子流的效应, 第2项则是动量转移过程对电子流引起的弹性碰撞效应; 求和项是电子同粒子之间的非弹性碰撞效应, 它包括电子对粒子的激发、电离、电子的粘附等过程。

根据式(1)求出的电子能量分布函数 $f(u)$, 可依次求得如下各物理量的数值:

平均电子能量

$$\bar{\varepsilon} = e\bar{u} = e \int_0^\infty du u^{3/2} f(u), \quad (3)$$

电子对中性粒子的碰撞激发或电离的速率常数

$$R_\alpha = \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_0^\infty du u f(u) Q_\alpha(u), \quad (4)$$

电子在外场 E 中的漂移速度

$$V_d = \frac{-1}{3} \sqrt{\frac{2e}{m}} E \int_0^\infty du u \times (\partial f / \partial u) / \sum_i N_i Q_m^i(u), \quad (5)$$

单位体积的放电功率

$$P = n_e W_e = en_e V_d E, \quad (6)$$

电子在与粒子碰撞反应过程 α 中所分摊的放电能量分数

$$\eta_\alpha = u_\alpha N_\alpha \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_0^\infty Q_\alpha u f du / EV_d, \quad (7)$$

电子粘附过程所消耗的放电能量分数

$$\eta_B = N_B \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_0^\infty Q_B u^2 f du / EV_d, \quad (8)$$

电子与中性粒子之间动量转移过程所占有的总的放电能量分数

$$\eta_m = \sum_i 2\sqrt{2me} \frac{N_i}{M_i} \int_0^\infty Q_m^i u^2 f du / EV_d. \quad (9)$$

在方程(1)的求和项中, 本文主要考虑如下反应过程: 电子与 Ar、Kr 的动量转移过程^[6]; 电子与 F_2 的分解粘附过程^[7]; 电子对

F_2 的振动激发过程^[7]; 电子对于 Ar 与 Kr 的亚稳态碰撞激发与电离过程; 电子对于 Ar 与 Kr 的 P 态激发过程^[8~11]; 电子对于 Ar^* 与 Kr^* 的 P 态原子的碰撞激发与电离过程^[12~13]; 电子对于 P 态原子的碰撞电离过程^[13]。

在方程(1)中作代换

$$f(u) \sqrt{u} \Delta u \rightarrow n(u),$$

$n(u)$ 是电子位于 $u \rightarrow u + \Delta u$ 的几率, 按照 Rockwood 的方式把方程化为差分格式^[14]。限于考虑 0~20 电子伏的电子能量范围, 并把此能量轴均匀分成 400 个格子。用稳态解法^[15]。整个计算是用 TQ-16 计算机完成的。

2. 电子能量分布与电子激发速率

图1给出电子位于能量 $\varepsilon \rightarrow \varepsilon + \Delta\varepsilon$ 的几率 $n(\varepsilon)$ 随电子能量的变化。计算条件为

$$Ar:Kr:F_2 = 0.915:0.08:0.005,$$

总气压 $P = 2$ 大气压, 亚稳种类密度分数

$$N^*/N = 5 \times 10^{-6},$$

P 态密度 $N^*(P) = 0.1 N^*$, 图中 $\varepsilon = eu$ 。计算指出, 在 ~ 10 电子伏以内, 在

$$E/P = (2500 - 6000) \text{ 伏/厘米} \cdot \text{大气压},$$

电子能量分布受 E/P 变化影响较小。图2给出了所计算的平均电子能量 $\bar{\varepsilon}$ 同 E/P 的变化关系, 显见平均电子能量一般在 5 电子伏上下, 这个数值比电子束控制放电 CO_2 激光器等离子体的电子能量平均值大约高一个数量级。

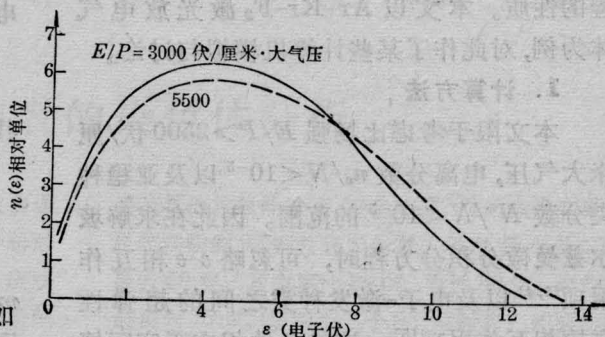


图1 电子能量分布函数 $n(\varepsilon)$ 同电子能量 ε 与比场强 E/P 的关系

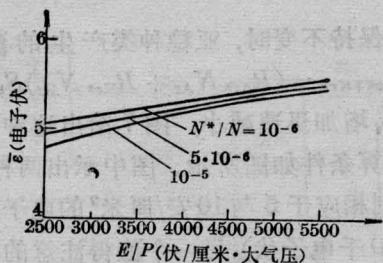


图2 平均电子能量 $\bar{\epsilon}$ 同亚稳种类分数 N^*/N 与比场强 E/P 的关系

气体比分 $Ar:Kr:F_2=0.915:0.08:0.005$;
总气压 $P=2$ 大气压

在电子分布函数 $n(\epsilon)$ 的高能区域, 比场强的变化对其显示出较大的影响。惰性气体基态原子的激发电离过程对 E/P 变化较敏感。已经表明^[1,3], 在放电 KrF^* 激光器中, 有效的泵浦过程是通过 Ar^* 与 Kr^* 参与完成的, 因此适当提高比场强对 Ar^* 与 Kr^* 的形成是有利的。图3给出了产生 Ar^* 与 Kr^* 的主要反应的速率常数随 E/P 的变化。另一方面 Kr^* 与 Ar^* 的电离能量比较低, 它们分别是 4.1 与 4.2 电子伏。因此其反应速率常数很大。

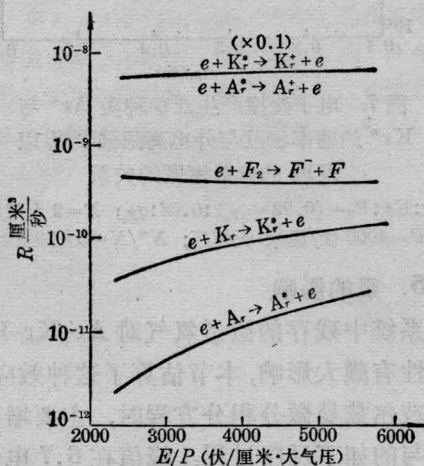


图3 Ar 与 Kr 的亚稳态产生与亚稳态电离的速率系数以及 F_2 的分解粘附速率系数同比场强 E/P 的关系

$Ar:Kr:F_2=0.916:0.08:0.004$;
 $P=2$ 大气压; $N^*/N=5 \times 10^{-6}$

3. 放电功率与放电能量分配

图4给出在 $Ar-Kr-F_2$ 放电中, 参与放

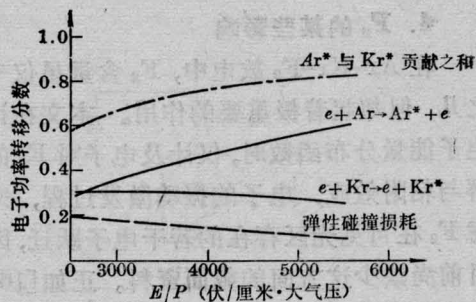


图4 在 $Ar-Kr-F_2$ 气体中, 电子与原子弹性碰撞损耗以及进入亚稳种类 Ar^* 与 Kr^* 的电子功率分数同比场强 E/P 的关系

$Ar:Kr:F_2=0.916:0.08:0.004$;
 $P=2$ 大气压; $N^*/N=5 \times 10^{-6}$

电功率分配的几个主要过程。可以看出, 弹性碰撞损耗所占的放电能量分数随 E/P 升高而有所降低, 而产生 Ar^* 与 Kr^* 的放电能量分数之和占有较大的比重, 并且随 E/P 的升高而升高。在本文讨论的 N^*/N 与 n_e/N 范围内, 约有 60% 以上的放电能量用于产生 Ar^* 与 Kr^* 。

图5给出放电功率 W_e 与电子漂移速度 V_D 随 E/P 的变化, 显见在此 E/P 范围两者随 E/P 几乎成线性增加。对于

$$n_e/N = 5 \times 10^{-6},$$

在 $E/P=3000$ 伏/厘米·大气压时, 放电功率达到 350 千瓦/厘米³。

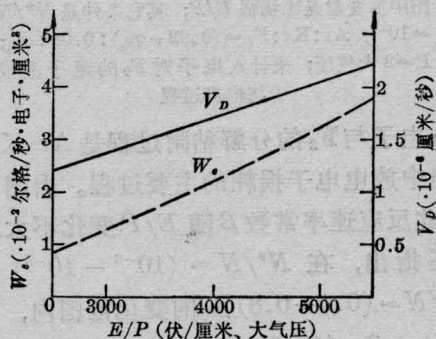


图5 放电电子的漂移速度(实线)以及每个电子的放电功率(虚线)和比场强 E/P 的关系

$Ar:Kr:F_2=0.916:0.08:0.004$;
 $P=2$ 大气压; $N^*/N=5 \times 10^{-6}$

4. F₂ 的某些影响

在 Ar-Kr-F₂ 放电中, F₂ 含量虽仅千分之几, 但却起着极重要的作用。本文在计算电子能量分布函数时, 仅计及电子对 F₂ 的分解与粘附效应, 电子的振动激发过程, 未考虑 F₂ 在可见光区存在的若干电子跃迁, 因为目前尚缺少这方面的截面资料。正如 [16] 指出, 这些过程有可能对电子能量有一定的冷却作用。计算指出, 振动激发对电子能量分布未起显著作用, 这类过程截面虽大到 Å² 的数量级, 但由于 F₂ 的浓度低, 同时这些跃迁量子小到 0.1 电子伏的数量级, 因此总体效应尚小, 消耗于 F₂ 振动激发的放电能量分数仅占约 1%。图 6 给出平均电子能量随着 F₂ 分数密度变化的关系, 计算条件 N*/N = 10⁻⁶, Ar:Kr:F₂ = (0.92 - q_{F₂}):0.08:q_{F₂}, P = 2 大气压。可以看出, 在文中 F₂ 含量变化范围内, 平均电子能量变化甚小。

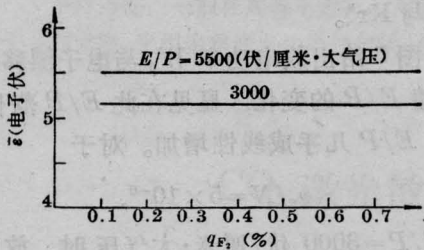


图 6 平均电子能量 $\bar{\epsilon}$ 同 F₂ 克分子分数 q_{F_2} 的关系

图中参变量是比场强 E/P ; 其它条件是 $N^*/N = 10^{-6}$; Ar:Kr:F₂ = (0.92 - q_{F_2}):0.08:q_{F₂}; P = 2 大气压; 未计入电子对 F₂ 的电子激发与电离过程

电子与 F₂ 的分解粘附过程是 Ar-Kr-F₂ 放电中放电电子损耗的主要过程。由图 3 可见, 此反应速率常数 β 随 E/P 变化不大。计算还指出, 在 $N^*/N = (10^{-6} - 10^{-5})$ 以及 $N_{F_2}/N = (0.1 - 0.8)\%$ 的变化范围内,

$$\beta \approx (4 - 5) \times 10^{-10} \text{ 厘米}^3/\text{秒}.$$

F₂ 含量的增加对稳定放电以及同亚稳种类反应最终形成 KrF* 有利, 但在稳态放电时电子密度 $n_e = S_e/\beta N_{F_2}$, 故过于高的 F₂ 含量会使电子密度大大降低。在外电离源强

度 S_e 保持不变时, 亚稳种类产生的速率密度 $R'_{Ar^*+Kr^*} = (R_{Ar^*} N_{Ar} + R_{Kr^*} N_{Kr}) S_e/\beta N_{F_2}$, 随 N_{F_2} 增加迅速减小, 图 7 给出这种变化情况, 计算条件如图所示。图中示出两种 S_e 数值分别相应于 5 与 10 安/厘米² 的电子束流密度 (300 千电子伏)。另一个值得注意的问题是 F₂ 对 KrF* 有很强的猝灭作用, 反应常数高达 7.8×10^{-10} 厘米³/秒; 同时 F₂ 对 249 毫微米波长有颇大的吸收作用, 根据 Steunenber 等人提供的吸收截面 [17], 其值约为 1.3×10^{-20} 厘米², 这几个因素对 KrF* 激光器中使用 F₂ 气密度的上限作了严格的限制。

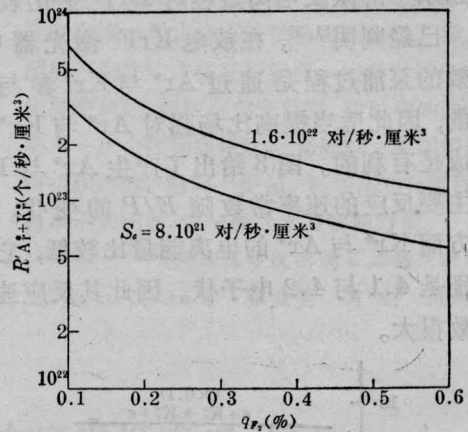


图 7 电子碰撞产生亚稳种类 Ar* 与 Kr* 的速率密度与外电离源强度 S_e 以及 F₂ 的分数密度的关系

Ar:Kr:F₂ = (0.92 - q_{F_2}):0.08:q_{F₂}; P = 2 大气压; $E/P = 4000$ 伏/厘米·大气压; $N^*/N = 5 \times 10^{-6}$

5. 氧的影响

系统中残存的微量氧气对 Ar-Kr-F₂ 放电特性有颇大影响, 本节估算了这种效应。在求解玻尔兹曼微分积分方程时, 主要增加了氧参与的如下反应过程: 峰值在 6.7 电子伏的电子与 O₂ 的分解粘附过程 [18, 19]; 电子对氧原子的 ³P-¹D 与 ³P-¹S 激发过程 [20], 这里设氧原子密度 $N_o = 0.1 N_{O_2}$; 电子与 O₂ 的电离过程 [11]; 电子对 O₂ 的激发过程, 它包含三个激发截面, 这是根据 Schultz 与 Dowell 的陷俘电子数据 [22], 经过运算获得的 [21]。这些截面中除电离截面数据外, 其余大部分是计

算结果或者由其它实验结果间接计算获得的。因此本节计算是很初步的。图8是平均电子能量, 标准化的 Ar^* 与 Kr^* 的生成速率常数以及用于激发氧的放电能量分数随氧分数密度 $q_{O_2} = N_{O_2}/N$ 的变化关系, 计算条件如图说明。显见, 随氧密度的增加, 平均电子能量与 Ar^* 以及 Kr^* 的产生速率常数都降低, 而用于 O_2 激发的放电能量却显著上升。鉴于有关氧激发的截面过程尚未完全掌握, 因此对 O_2 的上述效应的估算是粗略的。

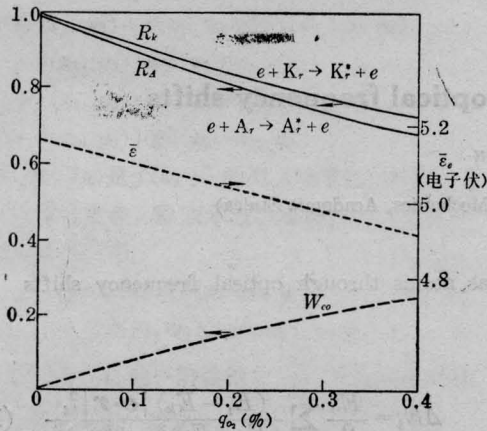


图8 平均电子能量 \bar{e}_e (点线), 标准化的 Ar^* 与 Kr^* 生成速率常数 R (实线) 以及用于激发氧的放电能量分数 W_{O_2} 随氧分子的分密度 q_{O_2} 的关系

$Ar:Kr:F_2=0.916:0.08:0.004$; $P=2$ 大气压;
 $N^*/N=5 \times 10^{-6}$; $E/P=3500$ 伏/厘米·大气压

参 考 文 献

[1] M. Rokni *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1978,

QE-14, 464.

[2] Shao-Chi Lin *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **34**, 505.
 [3] W. L. Nighan; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1978, QE-14, 714.
 [4] W. H. Long, Jr.; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **31**, 391.
 [5] O. Judd; *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**, 5297.
 [6] L. S. Frost *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1964, **136**, 1539.
 [7] R. J. Hall; *J. Chem. Phys.*, 1978, **68**, 1803.
 [8] J. H. Jacob *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **29**, 467.
 [9] M. Schaper *et al.*; *Beit. Plas. Phys.*, 1969, **9**, 45.
 [10] J. Olmsted III *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1965, **42**, 2341.
 [11] D. Rapp; *J. Chem. Phys.*, 1965, **43**, 1464.
 [12] H. A. Hyman; *Phys. Rev. A*, 1978, **18**, 441.
 [13] L. Vriens; *Phys. Lett.*, 1964, **8**, 260.
 [14] S. D. Rockwood; *Phys. Rev. A*, 1973, **8**, 2348.
 [15] K. Smith *et al.*; "Computer Modeling of Gas Lasers", Plenum Press, New York 1978.
 [16] A. E. Greene *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1978, QE-14, 951.
 [17] R. K. Steuneberg *et al.*; *J. Amer. Chem. Soc.*, 1956, **78**, 901.
 [18] G. J. Schulz; *Phys. Rev.*, 1962, **128**, 178.
 [19] J. D. Craggs *et al.*; *Proc. Roy. Soc. (London)*; 1957, **A-240**, 473.
 [20] R. J. W. Henry *et al.*; *Phys. Rev.*, 1969, **178**, 218.
 [21] H. S. W. Massey; *Electronic and Ionic Impact Phenomena*, **2**, Oxford at the Clarendon Press; 1969, 1017.
 [22] G. J. Schulz *et al.*; *Phys. Rev.*, 1962, **128**, 174.