

# 放电泵浦 F<sub>2</sub> 分子激光器的等离子体特性\*

庞加满 袁才来 王润文

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**摘要** 通过求解电子能量分布各向同性稳态玻尔兹曼方程,获得放电泵浦 F<sub>2</sub> 分子激光器的等离子体的电子能量分布、各种反应速率系数,有助于了解 F<sub>2</sub> 分子激光形成机制。

**关键词** F<sub>2</sub> 分子激光器,放电等离子体电子能量分布,玻尔兹曼方程,速率系数

## 1 引言

自 1977 年 James K. Rice 等首次发现 157 nm 的 F<sub>2</sub> 分子激光并获得 22 mJ 输出能量<sup>[1]</sup>以来,关于 F<sub>2</sub> 分子激光器的实验研究得到迅速发展,到目前为止,放电泵浦 F<sub>2</sub> 分子激光的输出能量已提高了一个数量级,达到了 237 mJ<sup>[2]</sup>。在此期间,虽然 Mieko Ohwa 和 Yong-Pyung Kim 等对 F<sub>2</sub> 分子激光的形成机制和动力学模型的理论进行了探讨<sup>[3,4]</sup>,但是由于 F<sub>2</sub> 分子激光放电等离子体中存在多种粒子之间复杂的相互作用,因而对其的了解远没有完善。

本文详细考虑了放电过程中电子与各种原子、分子和离子之间的碰撞反应以及电子与电子之间的碰撞,通过计算机求解电子能量分布各向同性的稳态玻尔兹曼方程,获得了有关 F<sub>2</sub>/He 混合气体放电等离子体特性的数据。

## 2 原理

采用紫外预电离技术的放电泵浦 F<sub>2</sub> 分子激光器的工作物质由 F<sub>2</sub>/He 组成,激光的形成与放电特性密切相关。在放电过程中,电子与其他粒子的相互作用主要有弹性碰撞和激发、电离、吸附等非弹性碰撞。我们假设:(1) 放电区域内各处电子温度相同;(2) 电子能量分布是各向同性的;(3) 外加电场是稳恒电场;(4) 不考虑粒子转动能量级激发和超弹性碰撞。

根据文献[6,7]推导而得到的电子能量分布各向同性的稳态玻尔兹曼方程可表示如下

$$\begin{aligned} u^{1/2} f(u) dn_e/dt + I_f(u) + I_a(u) + I_{ee}(u) = n_e (2e/m)^{1/2} \{ \delta(u) \sum_i N_i \int u f(u) Q_i(u) du + \\ \sum_k [(u + u_k) f(u + u_k) N_k Q_k(u + u_k) - u f(u) N_k Q_k(u)] + \\ \sum_n [(u + u_n) f(u + u_n) N_n^* Q_n^*(u + u_n) - u f(u) N_n^* Q_n^*(u)] - \sum_j u f(u) N_j Q_j(u) \} \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $u$  为电子能量;  $n_e$  为电子密度;  $e$  为电子电荷;  $m$  为电子质量;  $f(u)$  为电子能量分布函数,满

\* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-04-08; 收到修改稿日期: 1998-05-11

足归一化条件

$$\int_0^{\infty} u^{1/2} f(u) du = 1$$

$\delta(u)$  为 Delta 函数, 表示电离过程中的二次电子能量为零;  $N_{(i,j,k,s)}$  表示混合气体中各种组分的集居数密度;  $Q_{(i,j,k,s)}$  为各种碰撞反应截面。 $\sum_i$  代表对所有电离反应过程求和;  $\sum_k$  代表对各种不同激发能级求和;  $\sum_j$  代表对电子与所有处于激发态的原子和分子的碰撞反应求和, 并且考虑了正、负反应方向的细致平衡原理;  $\sum_f$  代表对所有损失电子反应过程求和, 例如电子吸附、重组等反应。 $I_f(u)$  为电子从外电场所获得的能量,

$$I_f(u) = - (1/3) E^2 n_e (2e/m) d/du \{ [u^{2/3}/v_m(u)] df(u)/du \}$$

其中  $v_m(u) = \sum_s N_s Q_{ms}(u) (2ue/m)^{1/2}$ 。

$I_d(u)$  为弹性碰撞引起的电子能量损失,

$$I_d(u) = - n_e (2e/m)^{1/2} d/du \{ u^2 [ \sum_s (2m/M_s) N_s Q_{ms}(u) ] [ f(u) + (kT/e) df(u)/du ] \}$$

其中  $M_s$  为  $s$  粒子质量,  $k$  为玻尔兹曼常数。

$I_{ee}(u)$  为电子 - 电子碰撞引起的能量变化,

$$I_{ee}(u) = - (2\pi/3) n_e^2 (2e/m)^{1/2} (q^4/e^2) \ln \Lambda d/du [ P(u) df(u)/du + F(u) f(u) ]$$

$$P(u) = 2 \int_0^u y^{3/2} f(y) dy + 2u^{3/2} \int_0^{\infty} f(y) dy$$

$$F(u) = 3 \int_0^u y^{1/2} f(y) dy$$

其中,  $q = 300e$ ,  $\Lambda = l_d/r_0$ ,  $l_d = [kT_e/(4\pi n_e e^2)]^{1/2}$ ,  $r_0 = 2q^2/(3kT_e)$ ,  $T_e$  为电子温度。

对(1)式积分, 可得

$$dn_e/dt = n_e(f(u)) \quad (2)$$

利用(1), (2)方程, 对每一个能量格子循环计算  $f_0(u) \rightarrow (dn_e/dt)_0 \rightarrow f_1(u) \dots$ , 直至对每个格子有  $|(dn_e/dt)_{n+1} - (dn_e/dt)_n| < \epsilon$ , 即可得  $f(u)$ 。

计算过程中所用的数值采用一般的  $F_2$  分子激光器参数, 即  $\text{He}/F_2 = 99.85\% : 0.15\%$ , 总气压  $P = 4 \text{ atm}$ , 气体温度  $T = 300 \text{ K}$ , 经预电离后激光器腔内电子密度  $n_e = 1.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , 外加高压  $V_e = 40 \text{ kV}$ , 放电间隙  $d = 2 \text{ cm}$ ,  $1Td = 1.0 \times 10^{17} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$ 。

### 3 结果与讨论

图 1 给出放电过程中电子能量分布函数随电子能量变化的曲线。与 S. D. Rockwood<sup>[6]</sup> 在计算 Hg 原子放电过程中所得的电子能量分布曲线相似, 并不呈纯麦克斯韦分布。这是合理的, 因为反应过程不只有电子-电子碰撞, 还考虑了电子与其他粒子在外场作用下的电离、激发、吸附等碰撞机制。从图 2 可以看出, 随着  $E/N$  的增加, 即外场输入能量增大, 电子平均能量也增加, 这有助于电子激发、电离。图 1 中, 纯 He 曲线 1 所示的电子平均能量为 6.154 eV, 而  $F_2/\text{He}$  曲线 3 分布的电子平均能量为 7.304 eV, 可见在纯 He 中掺入少量的  $F_2$  气体, 可以提高电子的平均能量。这和 Miekko Ohwa<sup>[3]</sup> 等分析所得结论是一致的。

碰撞反应速率可由下式计算

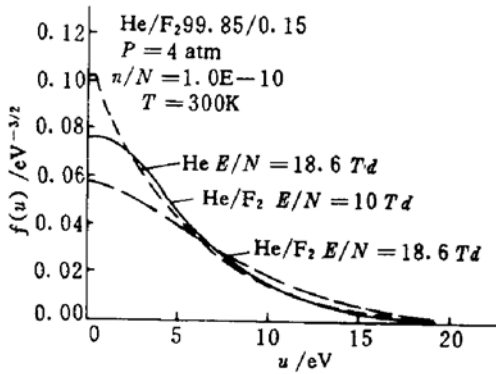


图 1 放电泵浦 F<sub>2</sub> 分子激光器中的电子能量分布  
Fig. 1 Electron energy distribution in the F<sub>2</sub> laser

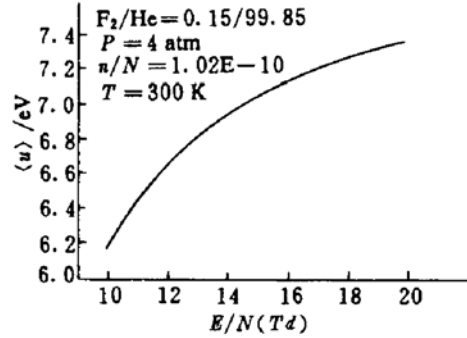


图 2 电子平均能量随 E/N 的变化曲线  
Fig. 2 Average electron energy as a function of E/N

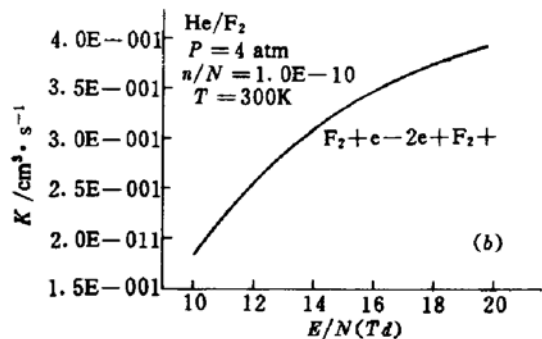
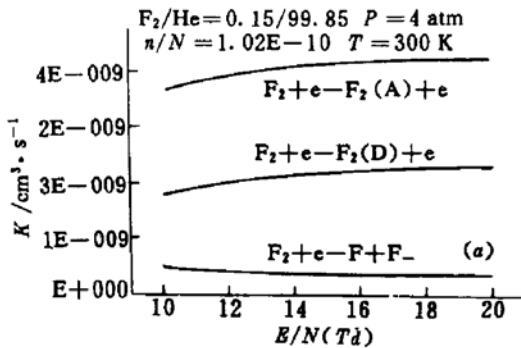


图 3 各种反应速率系数随 E/N 的变化曲线  
Fig. 3 Rate coefficient of different processes as a function of E/N

$$K_s = \int_0^{\infty} Q_s(u) f(u) du$$

图 3 为主要碰撞反应速率曲线。随着外加电场  $E$  增大,除了分子的吸附反应,其他反应速率普遍上升。虽然产生 F<sub>2</sub>(A) 的激发速率始终大于产生 F<sub>2</sub>(D) 的激发,但是随着电场强度  $E$  的增大,两者差距逐渐减少,这有利于激光的形成。另一方面,当电场强度  $E$  增大时,吸附反应速率降低,延缓了 F<sup>-</sup> 的产生,不利于激光输出,因为 F<sub>2</sub> 激光形成机制主要由 F<sup>+</sup>, F<sup>-</sup> 及 He 三体碰撞形成能级的粒子数反转,可见,在 F<sub>2</sub> 激光的产生过程中存在一最佳 E/N 的值。此外,由图 3(a) 看出,直接激发 F<sub>2</sub>(D) 的速率 ( $\approx 10^{-9}$  cm<sup>3</sup>/s) 远大于吸附反应 ( $\approx 10^{-10}$  cm<sup>3</sup>/s),因而,直接经电子碰撞激发产生 F<sub>2</sub> 激光可能构成激光脉冲上升期的主要机制。这与 Miho Takahashi 等<sup>[7]</sup> 的实验结果相符,实验表明在达到激光上能级粒子数密度同为 10<sup>13</sup>/cm<sup>3</sup> 时,直接激发比通过吸附反应再复合产生要提前 11 ns 左右。

**致谢** 本文的研究工作得到上官诚教授的悉心指导,在此深表感谢。另外,还要感谢蒋宝财老师等课题组成员在工作过程中的大力支持。

参 考 文 献

- 1 James K. Rice, A. Kay Hays, Joseph R. Woodworth. VUV emission from mixture of F<sub>2</sub> and the noble gases-A molecular F<sub>2</sub> laser at 157.5 nm. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, 31(1):31~33
- 2 S. M. Hooker, A. M. Haxell, C. E. Webb. Influence of cavity configuration on the pulse energy of a high-

- pressure molecular fluorine laser. *Appl. Phys.*, 1992, **B55**:54~59
- 3 Mieko Ohwa, Minoru Obara. Theoretical evaluation of high-efficiency operation of discharge-pumped vacuum-ultraviolet F<sub>2</sub> laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(13):958~960
  - 4 Yong-Pyung Kim, Minoru Obara, Tokio Susuki. Theoretical evaluation of electron-beam-excited vacuum-ultraviolet F<sub>2</sub> lasers. *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**(6):1815~1818
  - 5 S. D. Rockwood, J. E. Brau, W. A. Proctor *et al.*. TA9-time-dependent calculation of carbon monoxide laser kinetics. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **9**(1):120~129
  - 6 S. D. Rockwood. Elastic and inelastic cross sections for electron-Hg scattering from Hg transport data. *Phys. Rev. A*, 1973, **8**(5):2348~2358
  - 7 Miho Takahashi, Keisuke Maeda, Tahai Kitamura *et al.*. Experimental study of formation kinetics in a discharge-pumped F<sub>2</sub> laser. *Opt. Commun.*, 1995, **116**:269~278

## The Characteristics of Plasma of Discharge-pumped F<sub>2</sub> Laser

Pang Jiaman Yuan Cailai Wang Runwen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** Some data about plasma characteristics of F<sub>2</sub> laser such as the electron energy distribution and rate coefficient are obtained by solving the steady state Boltzmann equation for the isotropic part of the electron energy distribution function, which may help to understand the lasing mechanism of F<sub>2</sub> laser.

**Key words** F<sub>2</sub> laser, Boltzmann equation, electron energy distribution in plasma, rate coefficient