

放电泵浦 XeCl 激光的理论模型

楼 祺 洪

(中国科学院上海光机所激光技术开放研究实验室, 201800)

Sunbai Zhu, Jianbai Zhu

(德克萨斯技术大学皮秒和量子辐射实验室)

摘要: 本文对传输线作电源的自持放电 XeCl 激光进行动力学分析, 给出电子能量分布玻尔兹曼方程、能量平衡方程、电子线路方程及激光振荡方程的数值解, 并与实验结果作了比较。

关键词: 准分子激光, 布鲁姆林线路, 玻尔兹曼方程

Theoretical modeling of discharge pumped XeCl lasers

Lou Qihong

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

Sunbai Zhu, Jianbai Zhu

(Picosecond and Quantum Radiation Lab., Texas Technology University, Lubbock, TEXAS 79409)

Abstract: The kinetics of XeCl excimer lasers pumped by distributed circuits of both the transmission line and Blumlein line are analysed. By solving the Boltzmann equation, energy balance equation, electric circuit equation and laser oscillator equation, numerical results are obtained and are compared with the experimental results.

Key words: excimer laser, Blumlein line, Boltzmann equation

一、引 言

在过去十几年中,对于稀有气体卤化物准分子激光动力学已作了很多研究,其中包括准分子的发射谱、准分子的形成及猝灭速率、激光介质在激光波长处的吸收等等。这些动力学研究可以给出准分子激光的主要特性。文献[1, 2]报道了电子束泵浦 XeCl 激光器的理论模型,放电泵浦电容转移型 XeCl 激光的理论模型由文献[3, 4]给出。本文主要对传输线驱动的自持放电 XeCl 激光进行动力学分析。

在动力学分析中,首先根据玻尔兹曼方程计算了激光放电中的电子能量分布函数,并求得电子碰撞、离化、吸附和分解系数。通过求解能量平衡方程、电子线路方程及激光振荡方程,计算了不同条件下的激光输出特性,并与实验结果进行了详细的比较。

二、理论模型

2.1 动力学过程

在气体放电过程中, 电子、原子和分子之间会产生碰撞过程, 令 W_i 为第 i 种原子或分子 (以下简称粒子), μ_i^j 和 ν_i^j 分别表示反应粒子和产物粒子的反应常数绝对值; 碰撞过程可表达为

$$\sum_{i=1}^M \mu_i^j W_i = \sum_{i=1}^M \nu_i^j W_i \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中 M 为反应粒子的总数, N 为化学反应的总数, 反应的速率方程可表达为

表 1 在 Ne/Xe/HCl 混合气体中与电子有关的动力学过程

序号	动力学过程	速率常数或截面	参考文献
(a)	电子-中性粒子弹性碰撞		
1	$e + \text{Ne} \rightarrow \text{Ne} + e$	—	5
2	$e + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe} + e$	—	6
3	$e + \text{HCl} \rightarrow \text{HCl} + e$	—	7
(b)	电子碰撞激发		
4	$e + \text{Ne} \rightarrow \text{Ne} + e - 16.671 \text{ eV}$	—	8
5	$e + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe} + e - 8.315 \text{ eV}$	—	9
6	$e + \text{HCl}(v=0) \rightarrow \text{HCl}(v=1) + e - 0.542 \text{ eV}$	—	10
7	$e + \text{HCl}(v=0) \rightarrow \text{HCl}(v=2) + e - 0.887 \text{ eV}$	—	10
(c)	电子碰撞离化		
8	$e + \text{Ne} \rightarrow \text{Ne}^+ + 2e - 21.559 \text{ eV}$	—	11
9	$e + \text{Ne}^* \rightarrow \text{Ne}^+ + 2e - 4.940 \text{ eV}$	—	12
10	$e + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^+ + 2e - 12.127 \text{ eV}$	—	11
11	$e + \text{Xe}^* \rightarrow \text{Xe}^+ + 2e - 3.812 \text{ eV}$	—	12
12	$e + \text{Xe}_2^* \rightarrow \text{Xe}_2^+ + 2e - 3.7 \text{ eV}$	15.5 \AA^2	
(d)	电子吸附		
13	$e + \text{HCl} \rightarrow \text{H}^- + \text{Cl}$	0.0052 \AA^2	
14	$e + \text{HCl}(v=0) \rightarrow \text{H} + \text{Cl}^-$	—	13
15	$e + \text{HCl}(v=1) \rightarrow \text{H} + \text{Cl}^-$	$\sim 38k_{14}$	
16	$e + \text{HCl}(v=2) \rightarrow \text{H} + \text{Cl}^-$	$\sim 880k_{14}$	
(e)	电子去吸附		
17	$e + \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl} + 2e - 3.613 \text{ eV}$	—	14
(f)	电子猝灭		
18	$e + \text{XeCl} \rightarrow \text{Xe} + \text{Cl} + e$	$1.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$	
19	$e + \text{XeCl} \rightarrow \text{Xe} + \text{Cl} + e$	$7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$	
(g)	电子离子复合		
20	$e + \text{Ne}_2^+ \rightarrow \text{Ne}^* + \text{Ne}$	$2.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$	
21	$e + \text{Xe}_2^+ \rightarrow \text{Xe}^* + \text{Xe}$	$1.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$	
22	$2e + \text{Xe}^+ \rightarrow \text{Xe} + e$	$2.17 \times 10^{-25}/e^{-5.5} \text{ cm}^6/\text{s}$	
(h)	彭宁离化		
23	$\text{Ne}^* + \text{Ne}^* \rightarrow \text{Ne}^+ + \text{Ne} + e$	$1.0 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$	
24	$\text{Ne}^* + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^+ + \text{Ne} + e$	$9.8 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$	
25	$\text{Xe}^* + \text{Xe}^* \rightarrow \text{Xe}^+ + \text{Xe} + e$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$	
26	$\text{Xe}_2^* + \text{Xe}_2^* \rightarrow \text{Xe}_2^+ + 2\text{Xe} + e$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$	
(i)	电子-电子弹性碰撞		
27	$e + e' \rightarrow e' + e''$	240 \AA^2	
(j)	电子-离子弹性碰撞		
28	$e + \text{M}^+ \rightarrow \text{M}^+ + e$	240 \AA^2	

$$\frac{dn_i}{dt} = \sum_{j=1}^N (v_j^i - \mu_j^i) \left\{ K_j \prod_{\alpha=1}^M n_{\alpha}(t) \mu_{\alpha}^i - K_{-j} \prod_{\alpha=1}^M n_{\alpha}(t) \nu_{\alpha}^i \right\} \quad (2)$$

其中 K_j 和 K_{-j} 表示向前和向后的化学反应速率常数, n_i 为第 i 种粒子的数密度。

表 2 Ne/Xe/HCl 混合气体中分子或原子间的动力学过程

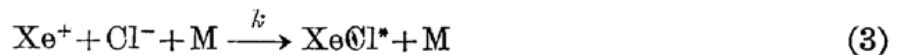
序号	动力学过程	速率常数或截面	参考文献
(k)	准分子的形成		
29	$Xe^+ + Cl^- + Ne \rightarrow XeCl^* + Ne$	—	15
30	$Xe^+ + Cl^- + Xe \rightarrow XeCl^* + Xe$	—	15
31a	$Xe^* + HCl(v=1) \rightarrow XeCl^* + H$	$6.0 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{s}$	
32	$Xe^* + HCl(v=2) \rightarrow XeCl^* + H$	$5.6 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$	
33	$Xe^* + Xe + Ne \rightarrow Xe_3^+ + Ne$	$1.19 \times 10^{-32} \text{cm}^6/\text{s}$	
34	$Xe^* + 2Xe \rightarrow Xe_3^+ + Xe$	$8.0 \times 10^{-32} \text{cm}^6/\text{s}$	
(l)	准分子猝灭		
35	$XeCl^* + Ne \rightarrow Xe + Cl + Ne$	$1.0 \times 10^{-12} \text{cm}^3/\text{s}$	
36	$XeCl^* + Xe \rightarrow 2Xe + Cl$	$3.2 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{s}$	
37	$XeCl^* + HCl \rightarrow Xe + Cl + HCl$	$1.4 \times 10^{-9} \text{cm}^3/\text{s}$	
38	$XeCl^* + Cl \rightarrow Xe + 2Cl$	$1.4 \times 10^{-9} \text{cm}^3/\text{s}$	
39a	$XeCl^* + Xe + Ne \rightarrow Xe_2Cl + Ne$	$2 \times 10^{-31} \text{cm}^6/\text{s}$	
39b	$XeCl^* + 2Xe \rightarrow Xe_2Cl^* + Xe$	$7.3 \times 10^{-31} \text{cm}^6/\text{s}$	
18	$XeCl^* + e \rightarrow Xe + Cl + e$	$1.0 \times 10^{-7} \text{cm}^3/\text{s}$	
40	$Xe_2^+ + M \rightarrow Xe^* + Xe + M$	$3.0 \times 10^{-12} \text{cm}^3/\text{s}$	
(m)	下激光能级的分解		
41	$XeCl + Ne \rightarrow Xe + Cl + Ne$	$2.4 \times 10^{-12} \text{cm}^3/\text{s}$	
42	$XeCl + Xe \rightarrow 2Xe + Cl$	$5.6 \times 10^{-12} \text{cm}^3/\text{s}$	
43	$XeCl + HCl \rightarrow Xe + Cl + HCl$	$2.2 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{s}$	
44	$XeCl + Cl \rightarrow Xe + 2Cl$	$2.2 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{s}$	
19	$XeCl + e \rightarrow Xe + Cl + e$	$7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^3/\text{s}$	
(n)	三元准分子的形成		
39a	$XeCl^* + Xe + Ne \rightarrow Xe_2Cl^* + Ne$	$2.0 \times 10^{-31} \text{cm}^6/\text{s}$	
39b	$XeCl^* + Xe + Xe \rightarrow Xe_2Cl^* + Xe$	$7.3 \times 10^{-31} \text{cm}^6/\text{s}$	
(o)	三元准分子的猝灭		
45	$Xe_2Cl^* + Ne \rightarrow 2Xe + Cl + Ne$	$3.0 \times 10^{-14} \text{cm}^3/\text{s}$	
46	$Xe_2Cl^* + Xe \rightarrow 3Xe + Cl$	$5.0 \times 10^{-13} \text{cm}^3/\text{s}$	
47	$Xe_2Cl^* + HCl \rightarrow 2Xe + Cl + HCl$	$4.3 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$	
48	$Xe_2Cl^* + e \rightarrow 2Xe + Cl + e$	$9 \times 10^{-9} \text{cm}^3/\text{s}$	
(p)	其它		
49	$Xe^+ + Xe + Ne \rightarrow Xe_2^+ + Ne$	$1.5 \times 10^{-31} \text{cm}^6/\text{s}$	
50	$Xe^+ + Xe + Xe \rightarrow Xe_3^+ + Xe$	$2.0 \times 10^{-31} \text{cm}^6/\text{s}$	
51	$Xe^* + HCl(0) \rightarrow Xe + H + Cl$	$5.6 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$	
31b	$Xe^* + HCl(1) \rightarrow Xe + H + Cl$	$5.0 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$	
52	$Cl^- + H \rightarrow HCl(0) + e$	$9.6 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$	
53	$H + Cl + M \rightarrow HCl + M$	$5.51 \times 10^{-32} \text{cm}^6/\text{s}$	
54	$H + HCl(1) \rightarrow HCl(0) + H$	$2.79 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{s}$	
55	$Cl + HCl(1) \rightarrow HCl(0) + Cl$	$1.03 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{s}$	
56	$HCl(1) + HCl(1) \rightarrow HCl(0) + HCl(2)$	$4.43 \times 10^{-12} \text{cm}^3/\text{s}$	
57	$H + H^- \rightarrow H_2 + e$	$1.8 \times 10^{-9} \text{cm}^3/\text{s}$	
58	$H + H + M \rightarrow H_2 + M$	$7.58 \times 10^{33} \text{cm}^6/\text{s}$	

表 3 与光子有关的基本动力学过程

序号	动力学过程	速率常数或截面
(q)	自发辐射	
59a	$\text{XeCl}^*(B) \rightarrow \text{XeCl}(X) + h\nu$	11ns
59b	$\text{XeCl}^*(C) \rightarrow \text{Xe} + \text{Cl} + h\nu$	120ns
60	$\text{Xe}_2^* \rightarrow 2\text{Xe} + h\nu$	99ns
61	$\text{Xe}_2\text{Cl}^* \uparrow 2\text{Xe} + \text{Cl} + h\nu$	135ns
(r)	受激辐射	
62a	$\text{XeCl}^* + h\nu \rightarrow \text{XeCl} + 2h\nu(307.9\text{nm})$	6.58\AA^2
62b	$\text{XeCl}^* + h\nu \rightarrow \text{XeCl} + 2h\nu(308.2\text{nm})$	5.45\AA^2
(s)	光学吸收	
63	$h\nu + \text{Xe}^* \rightarrow \text{Xe}^+ + e$	$6.3 \times 10^{-4}\text{\AA}^2$
64	$h\nu + \text{Xe}_2^* \rightarrow \text{Xe}_2^+ + e$	0.14\AA^2
65	$h\nu + \text{Xe}_2 \rightarrow \text{Xe}^+ + \text{Xe}$	0.42\AA^2
66	$h\nu + \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl} + e$	0.21\AA^2
67	$h\nu + \text{H}^- \rightarrow \text{H} + e$	0.16\AA^2
68	$h\nu + \text{XeCl}^* \rightarrow \text{XeCl}^{**}$	0.34\AA^2
69	$h\nu + \text{Xe}_2\text{Cl}^* \rightarrow \text{Products}$	0.15\AA^2

公式(1)表示的动力学过程可分为三类: (1)与电子碰撞有关的过程以及通过电场使粒子内能或动能变化的过程(见表1,未给数据的情况,其速率常数由相应参考文献中给出); (2)与分子或原子有关的动力学过程,重粒子之间的碰撞,其中占重要地位的是准分子的形成与猝灭,下能级的分解(见表2); (3)与光子有关的动力学过程,包括激光介质的光化学过程,如自发辐射过程、受激辐射过程以及光子吸收过程等(见表3)。

准分子态主要通过三体离子-离子复合过程来产生,其中Xe离子主要来源于Xe基态和Xe亚稳态的电子碰撞离化(包括多重离化)过程产生的;另一方面,由HCl(v)振动态的电子分解吸附过程会产生氯离子,第一振动态和第二振动态的HCl分解吸附速率系数比基态HCl的速率系数分别大38和880倍。



上式的速率系数根据 Hoffman 和 Tisne^[5]的计算曲线,可近似表达为

$$k = 10^{-26} (A_2 P^2 + A_1 P + A_0) \quad (4)$$

其中 $A_2 = 0.095$; $A_1 = -0.867$; $A_0 = 3.917$, $P \leq 4 \text{ atm}$; $A_2 = 0.008$; $A_1 = -0.265$; $A_0 = 2.901$, $4 < P < 6 \text{ atm}$; $A_2 = 0.001$; $A_1 = -0.170$; $A_0 = 2.583$, $6 < P < 8 \text{ atm}$; $A_2 = 0.007$; $A_1 = -0.279$; $A_0 = 3.071$, $P \geq 8 \text{ atm}$ 。

受激辐射截面 $\sigma_s = K_{50} / 8\pi L(\lambda)$ 是激光工作的主要参量之一,光谱函数 $L(\lambda)$ 是 $B(v' = 0)$ 到 $X(v'')$ 跃迁归一化的光谱强度分布。这些数值与 Brau 和 Ewing^[6]估计值

$$\sigma_s \tau \approx 50 \text{\AA}^2 \text{ ns} \quad (5)$$

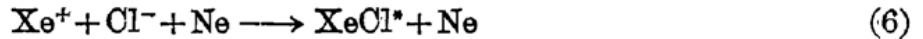
相一致。

虽然有一些工作已研究了准分子激发态的自吸收^[7],但详细的数据并不完备,在文献[8]中,我们报道了 $\lambda = 308.0 \text{ nm}$ 附近的小信号吸收系数和非饱和吸收系数,发现 $\text{XeCl}(B)$ 态是激光作用过程中最主要的吸收体。Tisone^[9]的实验中,当光子场在 $1 \sim 8 \text{ MW/cm}^2$ 情况下,波长为

314 nm 的吸收也未见明显的变化, 计算中近似认为 XeCl 激发态的自吸收仅仅出现于 308 nm 附近较窄的光谱区域内, 也就是认为这种自吸收发生于 XeCl(B) 态和高的自电离态之间。从下面计算结果来看, 这一近似基本上是合理的。

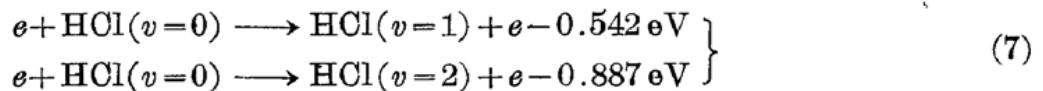
在本文的动力学分析中, 也包含三元准分子, 这样这个分析模型就可以适用于高压条件。当 Ne 气作为缓冲气体时, 三元准分子的形成速率常数以及 Xe₂Cl 猝灭速率常数都是从类似的过程中估计而得到的。

计算结果表明, 三体复合过程



会使 XeCl* 处于高的振动激发态, 处于激发态的准分子通过碰撞会很快弛豫到 $v'=0$ 能级。准分子 B 与 O 组态之间的混合以及振动态之间的弛豫是通过稳态模型来处理的。Ne 气中电子态转移的特征时间和振动弛豫时间是由 Dreiling 和 Sefser^[10] 估算值获得的。我们的数字计算表明, $v=0$ 的能级分布与热平衡分布有较大的偏离, 甚至在较高的气压下亦存在这种偏离。其原因是通过三体复合形成的准分子 XeCl(B) 处于较高的振动态。

计算结果还表明 HCl($v=0$) 分子在放电过程中其密度呈单调下降的趋势, 而 H 和 Cl 原子密度呈上升趋势。HCl($v=0$) 的减少会使



过程变慢, 这样 HCl($v=1$) 和 HCl($v=2$) 的密度会随之减小。当放电电流愈大时, HCl($v=0$) 的减小速度加快, 从而会使自持放电中止, 这一现象可以解释激光脉冲宽度随放电电流密度的增大而减小的现象。

2.2 玻尔兹曼方程

在脉冲放电下, 电子能量分布会偏离麦克斯韦分布, 在气压较高而电子密度较低的情况下碰撞过程很快, 玻尔兹曼方程仍旧可以用于求解快脉冲下电子能量分布函数

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m_e} \nabla_v \right) f(\mathbf{r}, \mathbf{V}, t) = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{coll}} \quad (8)$$

其中碰撞项 $(\partial f / \partial t)_{\text{coll}}$ 包括弹性碰撞、激发离化、彭宁离化和复合、电子-电子和电子-离子碰撞过程。

为了将上述方程简化, 作如下假定: 1) 混合气体和电场在空间上是均匀的; 2) 电场对电子能量分布函数的影响可以用微扰方法处理; 3) 在一个平均碰撞时间内, 电场的变化率及电子数密度的变化都很小, 在能量空间, 电子能量分布函数可以分解为各向同性项 $F_0(\epsilon)$ 和一阶微扰项 $F_1(\epsilon)$ 。 $F_0(\epsilon)$ 和 $F_1(\epsilon)$ 分别满足方程:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{3} (eE)^2 \epsilon^{\frac{1}{2}} \lambda + 10 \left(\frac{m_e}{2} \right)^{\frac{1}{2}} A \epsilon \right] \left(\frac{dF_0}{d\epsilon} - \frac{F_0}{2\epsilon} \right) = - \left[2m_e \epsilon^{\frac{3}{2}} \Sigma \left(\frac{n_i}{M_i} \sigma_i^m + \frac{n_i^+}{M_i} \sigma_i \right) \right. \\ & + 10 \left(\frac{m_e}{2} \right)^{\frac{1}{2}} B \epsilon \left. \right] F_0 + \Sigma_{i,k} n_i \left\{ \int_{\epsilon}^{\epsilon+\epsilon_{ik}^*} \epsilon^{\frac{1}{2}} \sigma_{i,k}^* F_0 d\epsilon + \int_{\epsilon}^{\infty} \epsilon^{\frac{1}{2}} \sigma_i^a F_0 d\epsilon + \int_{\epsilon}^{\infty} \epsilon^{\frac{1}{2}} \sigma_i^r F_0 d\epsilon \right\} \\ & - \Sigma_{i,k} n_i \int_{\epsilon}^{\infty} \left\{ \int_{\epsilon+\epsilon_{ij}^*}^{\infty} \xi^{\frac{1}{2}} \left[\frac{d}{d\epsilon} \sigma_{i,k}^+ (\xi, \epsilon) \right] F_0(\xi) d\xi - \epsilon \sigma_{ik}^+ F_0 \right\} d\epsilon \\ & - \frac{1}{n_e} \left(\frac{m_e}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \Sigma_{i,j} h_{i,j}^{pen} n_i n_j \int_{\epsilon}^{\infty} P(\epsilon) d\epsilon + \frac{1}{n_e} \left(\frac{m_e}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{dn_e}{dt} \int_{\epsilon}^{\infty} F_0 d\epsilon \quad (9) \end{aligned}$$

$$F_1(\epsilon) = -\left(\frac{m_e}{2\epsilon}\right)^{\frac{1}{2}} eE\lambda(\epsilon) \left(\frac{dF_0}{d\epsilon} - \frac{F_0}{2\epsilon}\right) \quad (10)$$

其中 A 和 B 分别定义为

$$A = \frac{2}{15} \left(\frac{2}{m_e}\right)^{1/2} \bar{\epsilon}^{-2} n_e \sigma_c \int_0^\infty \epsilon^{-1/2} F_0(\epsilon) d\epsilon; \quad B = -A \frac{\int_0^\infty \left(\epsilon \frac{dF_0}{d\epsilon} - \frac{F_0}{2}\right) d\epsilon}{\bar{\epsilon}} \quad (11)$$

而 $\lambda(\epsilon) = 1/\sum_{i,j} n_i \sigma_{i,j}^j(\epsilon)$ 是电子的平均自由程。 $\bar{\epsilon} = \int_0^\infty \epsilon F_0(\epsilon) d\epsilon$ 为电子平均能量。库仑截面 σ_c 可表达为

$$\sigma_c = \frac{\pi e^4}{\epsilon^2} \ln \left(\frac{\bar{\epsilon}^{3/2}}{e^3 \sqrt{12\pi n_e}} \right) \quad (12)$$

上面公式中角标 m 、 $*$ 、 $+$ 、 α 、 r 和 P_{en} 分别用于描述下述动力学过程——动量转移(m)、激发($*$)、离化($+$)、吸附(α)、复合(r)和彭宁离化(P_{en})过程, $F(\epsilon)$ 是彭宁离化中归一化二次电子能量分布函数。

当电子能量为其平均值 $\bar{\epsilon}$ 时, 电子在电场中的漂移速度 u_D 可表达为

$$u_D = -\frac{eE}{3} \left(\frac{2}{m_e}\right)^{1/2} \int_0^\infty \epsilon^{1/2} \lambda(\epsilon) \left(\frac{dF_0}{d\epsilon} - \frac{F_0}{2\epsilon}\right) d\epsilon \quad (13)$$

相应的速率系数 k 为

$$k = \int_0^\infty \left(\frac{2\epsilon}{m_e}\right)^{1/2} \sigma(\epsilon) F_0(\epsilon) d\epsilon \quad (14)$$

2.3 能量平衡方程

对于分子动力学过程中的振动、旋转分布平衡过程, 混合气体的温度是一个重要参数。在整个气体放电过程中, 电子从外加电场中得到动能, 与其它粒子碰撞而失去能量。这个过程伴随着产生或者湮灭某些化学成份, 并且会使气体温度升高。对于短脉冲放电, 准分子激光系统的能量平衡方程可以表达为

$$\frac{dT'}{dt} = \frac{2}{3K_n} \left\{ n_e (eEu_D - \sum_{i,j} k_i^j n_i \epsilon_i^j) + k_{fRH} \cdot n_{R^+} \cdot n_H \cdot n_{\epsilon_{di}} \right\} - \frac{2}{3K_n} \{ n_{RH} \cdot k_{qf} n_j \epsilon_{dm} + k_{fR_1} \cdot n_R \cdot n_R \cdot n_{\epsilon_d} \} \quad (15)$$

其中 u_D 是电子漂移速度, ϵ_i^j 表示第 i 种粒子的激发、离化、亚稳态离化和吸收能量, K_i^j 分别表示相应的速率常数。 K_f 是准分子的形成速率, K_q 是准分子的猝灭速率。 ϵ_{di} 为 $\text{XeCl}^* \rightarrow \text{Xe}^+(^2P_{3/2}) + \text{Cl}^-(S_0)$ 的离化能; ϵ_{dm} 为 $\text{XeCl}^* \rightarrow \text{Xe}(^3P_2) + \text{Cl}(^2P_{3/2})$ 的离化能。 ϵ_d 则为稀有气体双原子准分子的分解能。

2.4 电子线路方程

高功率脉冲放电经常使用脉冲形成网络, 包括传输线或布鲁姆林线路。这二种线路都存在分布电感。令单位长度的电容为 C' , 分布电感为 L' , 电磁波在其中的传播速度由 $1/\sqrt{L'C'}$ 决定。激光放电室可以等价于一个等效电感和一个随时间变化的电阻相串联的等效电路。

图 1 和图 2 分别表示无损耗传输线和布鲁姆林电路的等效线路, 传输线的特征阻抗为

$$Z_0 = \sqrt{L'/C'} \quad (16)$$

初始充电电压为 V_0 , $V_e(t)$ 是开关上的瞬态电压, 在击穿导通前, 其电压为 V_0 , 导通后按指数衰减:

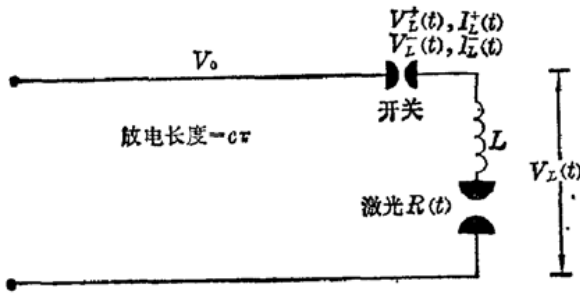


图 1 无损传输线驱动稀有气体卤化物准分子激光等效线路

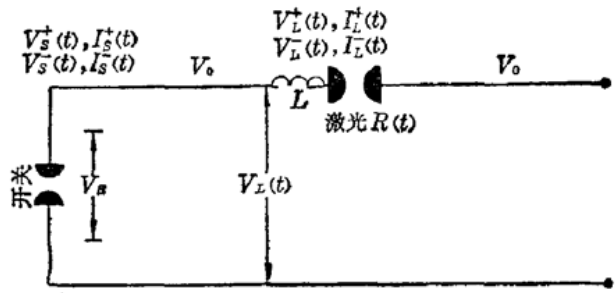


图 2 布鲁姆林电路驱动稀有气体卤化物准分子激光等效线路

$$V_g(t) = \begin{cases} V_0 & t < 0 \\ V_0 \exp\{-at(1 - e^{-vt})\} & t \geq 0 \end{cases} \quad (17)$$

初始条件为 $dV_g(t)/dt|_{t=0} = 0$, 其中常数 a 及 v 由实验电压波形与上述表达式吻合来确定。

根据 Kirchhoff 理论, 基本电路方程可表达为

$$[R(t) + Z]I_c(t) + L \frac{dI_L(t)}{dt} = V(t) \quad (18)$$

其中

$$Z = \begin{cases} Z_0 & \text{传输线} \\ 2Z_0 & \text{布鲁姆林线路} \end{cases}$$

而 $V(t)$ 分别为

$$V(t) = \begin{cases} V_0 - V_g(t) - ZI_L(t-2r)H(t-2r) & \text{传输线} \\ 2V_0 + ZI_L(t-2r)H(t-2r) - 2V_g(t-r) \\ \quad + 2[V_g(t-3r) - V_0]H(t-2r) & \text{布鲁姆林线路} \end{cases} \quad (19)$$

$H(t)$ 是 Heaviside 单位阶跃函数。

2.5 激光振荡方程

在未饱和情况下的均匀放电系统, 激光光子传输方程可表达为

$$\frac{\partial n_v^\pm(x, t)}{\partial t} \pm c \frac{\partial n_v^\pm(x, t)}{\partial x} = c\sigma_v n_v^\pm(x, t) \Delta n(x, t) - cn_v^\pm(x, t) \sum_i \sigma_i n_i(x, t) \quad (20)$$

令 L_c 为激光腔长, L_p 为激光放电区长度, 对激光放电区进行空间平均, 平均光子数满足

$$\frac{dn_v}{dt} = c \frac{O_p}{L_c} (g - k)n_v - \frac{n_v}{\tau_e} \quad (21)$$

其中 c 为谐振腔中的光速, g 为小信号光学增益系数, k 为介质对激光波长处光的吸收系数, $\tau_e = -L_c/c \ln \sqrt{R_a R_b}$ 是激光腔的衰减常数, R_a 与 R_b 分别为二块激光腔片的反射率。激光输出功率 P_{out} 可近似表达为

$$P_{out} = -ch\nu AT_{w_1} T_{w_2} n_v \frac{\ln \sqrt{R_a R_b}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_b}{R_a}}\right) (1 - \sqrt{R_a R_b})} \quad (22)$$

上式中 A 为激光输出光斑截面积, $T_{w_1} = 1 - R_b$, $T_{w_2} = 1 - R_a$ 。必须注意, 上式是在稳态条件下的近似解, 没有很好地反映激光建立的初始阶段。

三、数字计算结果和讨论

要求解激光输出的瞬态特性,必须求解一组耦合的非线性方程组,其中包括速率方程、电子电路方程、能量平衡方程、光学谐振腔方程以及玻尔兹曼方程。

我们采用劳伦兹、贝克莱实验室 CDC7600 型计算机进行了计算,并与实验结果进行比较。实验用的激光器放电体积为 $3 \times 3 \times 110 \text{ cm}^3$, 放电脉冲时间为 200 ns, 激光腔由 $R_a=0.99$ 和 $R_b=0.17$ 两块反射镜组成, 气体混合比为 $\text{Ne}:\text{Xe}:\text{HCl}=989:10:1$, 总气压为 $1 \sim 2.6 \text{ atm}$, 传输线特征阻抗为 0.45Ω , 初始充电电压 V_0 为 50 kV。X 光预电离初始电子密度为 10^{10} cm^{-3} 。

图 3 和图 4 表示激光放电电压和激光脉冲波形的理论和实验比较曲线, 此时总气压为 2.6 atm 。对于布鲁姆林线路的情况, 实验值取自文献[8], 其放电脉冲宽度为 100 ns, $Z_0=0.5 \Omega$, $V_0=30 \text{ kV}$, $R_a \geq 0.99$, $R_b=0.8$, 总气压为 5.53 atm , 气体混合比为 $\text{Ne}:\text{Xe}:\text{HCl}=98.48:1.43:0.9$, 激光放电体积为 $50 \times 1.8 \times 3.6 \text{ cm}^3$ 。激光放电电压和激光脉冲波形的理论和实验比较由图 5 及图 6 给出。从这些图中可见, 本文采用的理论模型能很好地解释传输线及布鲁姆林趋动的放电泵浦准分子激光特性。

为了进一步验证本模型的适用范围, 我们还计算了不同泵浦电流密度 (500 A/cm^2 到 2000 A/cm^2), 不同混合气体比份下, 荧光峰值强度随总气压的变化, 并与实验结果加以比较,

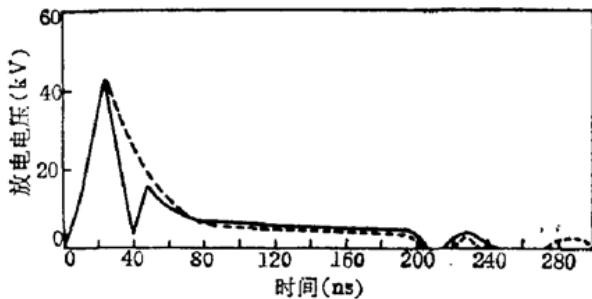


图 3 传输线驱动 XeCl 准分子激光的电压波形
实线为实验值; 虚线为理论计算值, $\text{Ne}:\text{Xe}:\text{HCl}=989:10:1$, 总气压 = 2.6 atm , 传输线光电电压 50 kV, 阻抗 $Z_0=0.45 \Omega$

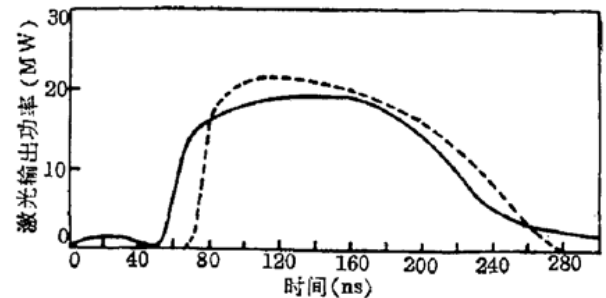


图 4 传输线驱动 XeCl 准分子激光的波形
实线为实验值; 虚线为理论计算值。其它参量见图 3

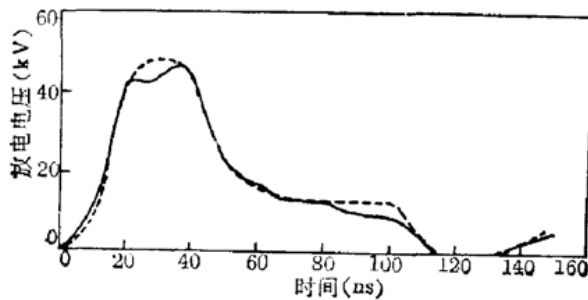


图 5 布鲁姆林电路驱动 XeCl 激光的放电电压波形
实线为实验值; 虚线为理论计算值。 $\text{Ne}:\text{Xe}:\text{HCl}=98.48:1.43:0.9$, 总气压 = 5.53 atm , 布鲁姆林电路充电电压 50 kV, 阻抗 $Z_0=0.5 \Omega$

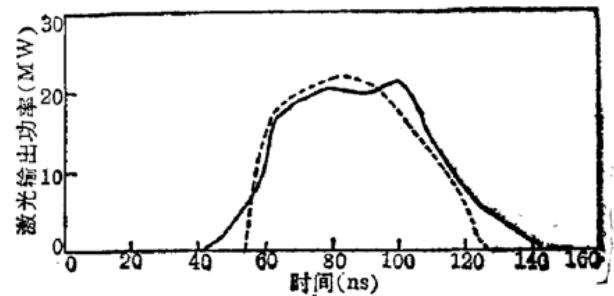


图 6 布鲁姆林电路驱动 XeCl 激光的脉冲波形
实线为实验值; 虚线为理论计算值。
其它参量见图 5

其结果由图 7(a)-(c) 给出, 其中曲线表示计算结果, 其相对强度与实验值有一致的变化趋势。值得指出的是, 上述计算中所用的各种速率常数是一致的, 表明我们的计算模型能很好地反映 XeCl 激光放电的动力学过程。

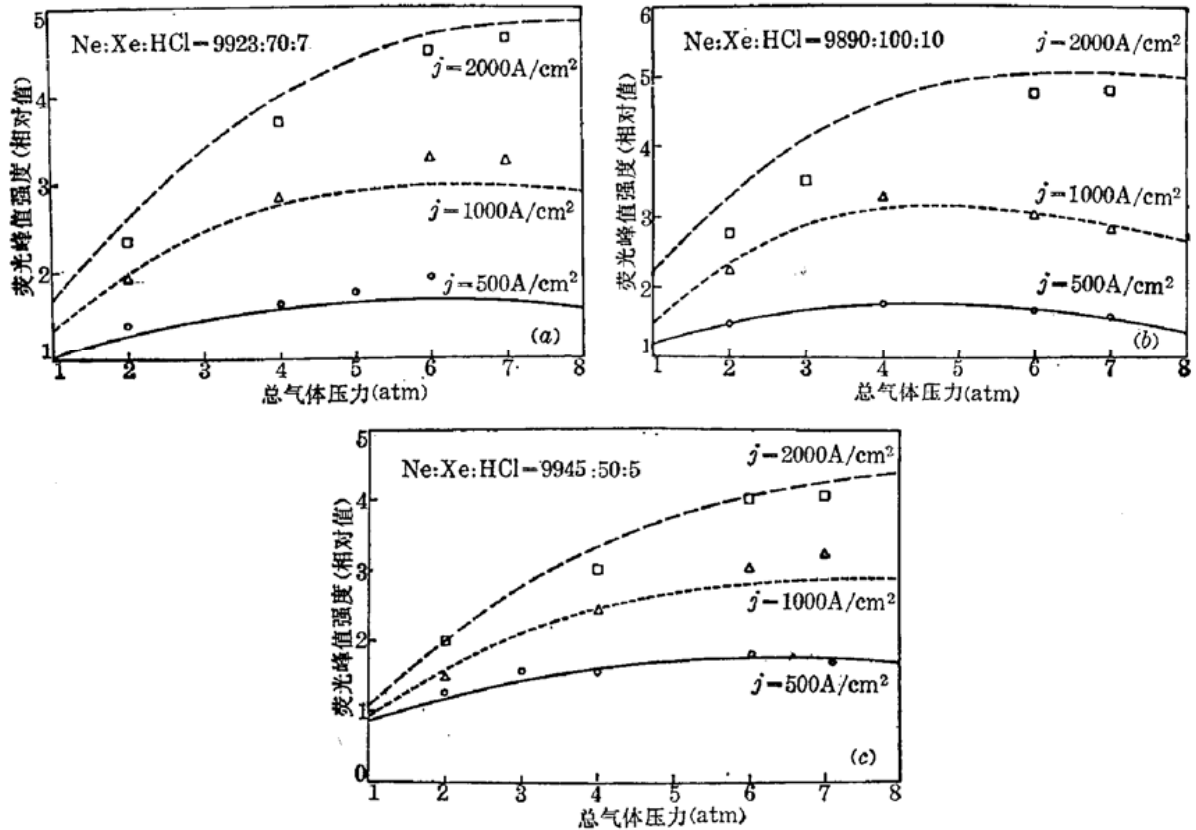


图 7 XeCl B-X 自发辐射荧光总强度峰值随放电条件的变化
曲线表示理论计算结果, \square 、 \triangle 和 \circ 分别代表不同电流密度下的实验值, (a)、(b) 和 (c) 分别对应于不同的气体混合比

本工作得到美国加州大学林绍基教授的支持和指导, 谨此致谢。

参 考 文 献

- 1 L. A. Levin *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17**, 2282 (1981)
- 2 F. Kannari *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**, 1587 (1983)
- 3 M. Meada *et al.*, *Japan. J. Appl. Phys.*, **21**, 1161 (1982)
- 4 H. Hokazono *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **56**, 680 (1984)
- 5 J. M. Hoffman *et al.*, SNL Report No. SAND 80-1468; UC-34a, Sandia National Laboratory, New Mexico (1980)
- 6 C. A. Brau *et al.*, *J. Chem. Phys.*, **63**, 4640 (1975)
- 7 C. A. Brau, in *Excimer Lasers*, ed. by C. K. Rhodes, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1979)
- 8 S. C. Lin, Q. H. Lou, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **31**, 499 (1984)
- 9 G. C. Tison *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-15**, 1008 (1982)
- 10 T. D. Dreiling *et al.*, *J. Chem. Phys.*, **75**, 4360 (1981)