

# 铜离子激光器的放电理论模型

余建华 龚志伟 丘军林

(华中工学院激光研究所)

**提要:** 本文详细分析了溅射型空心阴极放电 (SHCD) 铜离子激光器的放电、溅射特性和粒子的相互作用过程,建立了放电模型。该模型由实验得到了验证。

## A theoretical discharge model of SHCD copper ion lasers

Yu Jianhua, Gong Zhiwei, Qiu Junlin

(Laser Institute, Huazhong Institute of Technology)

**Abstract:** A discharge model on the sputtering hollow cathode discharge (SHCD) copper ion laser is established, its characteristics of discharge, sputtering and the particle interaction processes are analysed. The model has been verified experimentally.

### 一、引言

SHCD铜离子激光器是近几年发展起来的一种新型激光器,特别是其他激光器件所无法比拟的连续工作在真空紫外的独到特点,已经引起了人们的兴趣。尽管近几年来人们对该种激光器进行了一定的研究,但是,对于它的空心阴极放电(HCD)、溅射特性以及受激过程还没有得到一个较完备的理论模型。1979年 Warner<sup>[1]</sup>根据扩散理论,对粒子流建立了扩散方程,导出了粒子流密度的表达式。1982年, Koch<sup>[2]</sup>通过建立放电激活区内粒子数的平衡方程,导出了几个粒子数密度与放电电流的函数关系。但他们都没有涉及亚稳态惰性气体离子以及对铜原子的彭宁电离效应,同时认为溅射率为常数,没有考虑到溅射率与离子能量的关系,粒子数密

度与气压的关系,而且后者没有得到铜离子和惰性气体离子密度在小电流情况下的函数关系。我们详细地分析了粒子的相互作用、溅射和激光的受激过程,在前人工作的基础上,建立了铜离子激光器的放电理论模型。

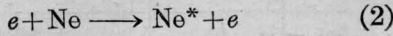
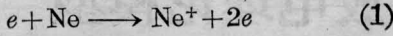
### 二、放电理论模型

铜离子激光器采用空心阴极放电激励,其放电仅包含两个区域,一个是阴极暗区,另一个是负辉区。激活介质铜由阴极溅射产生。在铜离子激光器的空心阴极放电中,主要存在六种粒子:(1)电子;(2)基态铜原子;(3)单正价铜离子;(4)单正价惰性气体离子;(5)惰性气体亚稳态原子;(6)基态惰性气体原子。忽略负离子、高价正离子的存在。粒子的损失过程主要是扩散,忽略

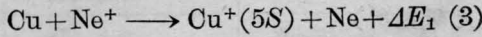
收稿日期:1984年3月6日。

电子-离子的复合过程<sup>[1]</sup>。粒子的相互作用和激光过程如图 1、2，其反应动力学过程为（以紫外铜离子激光为例）：

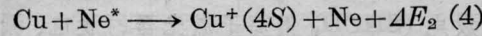
1) 电子对氖原子的碰撞电离和激发



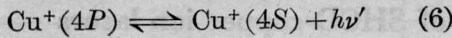
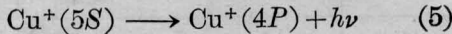
2) 电荷转移



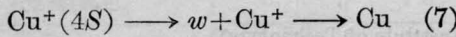
3) 彭宁电离



4) 辐射跃迁与共振俘获



5) 扩散与壁面复合



在(1)~(7)中,  $e$ 、 $\text{Ne}$ 、 $\text{Ne}^+$ 、 $\text{Ne}^*$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Cu}^+$ ——分别表示电子、氖原子、基态氖离子、亚稳态氖原子、基态铜原子和铜离子;  $\text{Cu}^+(4S)$ ——铜的亚稳态离子;  $h$ ——普朗克常数;  $\nu$ 、 $\nu'$ ——紫外激光和紫外自发辐射光频率;  $\Delta E_i$ ——相互作用粒子的能量差;  $w$ ——阴极壁面。

我们下面对粒子及它们的作用过程分别进行讨论。

1、电子 HCD 中的电子主要是由正离子、亚稳态原子、紫外光子轰击阴极面发射的二次电子, 它们在整个负辉区内保持均匀分布。阴极面上的电子流密度为

$$F_e = r_+ F_+ + r_m F_{me} + r_p F_p = r F_+ \quad (8)$$

$$r = r_+ + r_{me} \frac{F_{me}}{F_+} + r_p \frac{F_p}{F_+} \quad (9)$$

式中  $F_+$ 、 $F_{me}$ 、 $F_p$  为阴极面上的离子、亚稳态原子、紫外光子流密度;  $r_+$ 、 $r_{me}$ 、 $r_p$  为相应的二次电子发射系数;  $r$  为等效二次电子发射系数。阴极面上的电流密度  $j$  等于电子流密度与离子流密度之和。

$$j = e(F_e + F_+) \quad (10)$$

由(8)、(10)式得

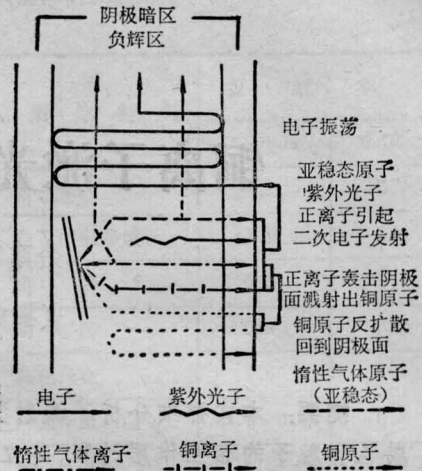


图1 空心阴极放电中粒子的相互作用过程

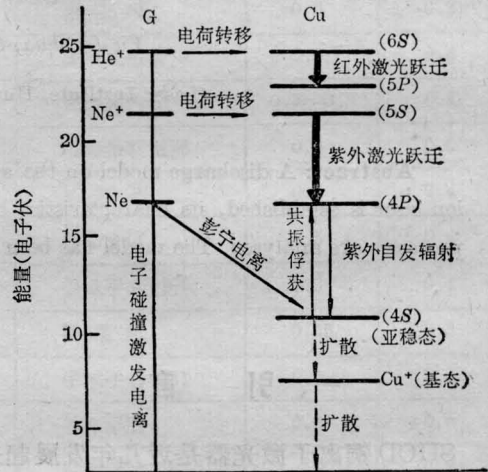


图2 铜离子激光器的激光能级系统

$$F_e = \frac{r}{(1+r)} j/e \quad (11)$$

$$[e] = \frac{\tau_e}{\alpha} F_e = \frac{\tau_e}{\alpha} \frac{rj}{e(1+r)} \quad (12)$$

式中  $\alpha$  为空心阴极槽的半宽,  $\tau_e$  为电子的扩散寿命,  $[e]$  为电子数密度。

2、铜原子 放电空间的铜原子由离子溅射产生, 它的损失过程有: 电荷转移如(3)式, 彭宁电离如(4)式, 以及向放电区外的扩散。如果不管这些细致过程, 而考察放电区边界(阴极面)上的铜粒子流的连续性: 由放电中心扩散回到阴极面上的铜原子流  $F_{\text{Cu}}$  与铜离子流  $F_{\text{Cu}^+}$  之和等于溅射产生而离开阴极

面的铜原子流  $F_{Cu^0}$ , 如图 3。建立阴极面上的铜粒子流的连续性方程。

$$F_{Cu^0} = F_{Cu} + F_{Cu^+} \quad (13)$$

溅射产生的铜原子流正比于轰击阴极面的离子流

$$F_{Cu^0} = \xi_{Cu^+} F_{Cu^+} + \xi_{b^+} F_{b^+} \quad (14)$$

式中:  $\xi_{Cu^+}$ 、 $\xi_{b^+}$  为铜离子、惰性气体离子的溅射率。 $F_{b^+}$  为阴极面上的惰性气体离子流密度。由(13)、(14)式得到

$$F_{Cu} = (\xi_{Cu^+} - 1) F_{Cu^+} + \xi_{b^+} F_{b^+} \quad (15)$$

通过下面方程, 定义一个有效溅射系数  $\xi_+$ , 且令

$$F_+ = F_{Cu^+} + F_{b^+} \quad (16)$$

$$F_{Cu} = \frac{\alpha [Cu]}{\tau_{Cu}} = \xi_+ F_+ \quad (17)$$

$$\xi_+ = (\xi_{Cu^+} - 1) \frac{F_{Cu^+}}{F_+} + \xi_{b^+} \frac{F_{b^+}}{F_+} \quad (18)$$

式中  $\tau_{Cu}$  为铜原子的扩散寿命,  $[Cu]$  为放电空间的铜原子数密度,  $F_+$  为轰击阴极面的总离子流密度。

$$F_+ = j/e(1+r) \quad (19)$$

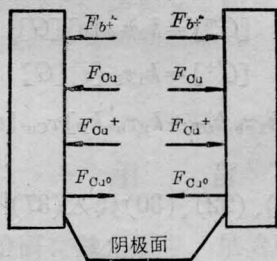


图3 阴极面上的粒子流

据 Sigund<sup>[3]</sup> 的低能离子溅射理论, 溅射系数与离子能量成线性关系, 在 SHCD 金属离子激光器中这种关系也成立。正离子由负辉区进入阴极暗区向阴极迁移, 轰击阴极面的离子所携带的能量反比于  $(pa)$  值, 即溅射率反比于  $(pa)$  值。

$$\xi_+(E) = \eta/pa \quad (20)$$

式中  $\eta$  为比例系数,  $p$  为气体气压。由(17)、(19)式铜原子数密度为

$$[Cu] = \frac{\tau_{Cu}}{\alpha} \xi_+ \frac{j}{e(1+r)} \quad (21)$$

将(20)式代入(21)式得到

$$[Cu] = \frac{\eta \tau_{Cu}}{ea(1+r)} \left( \frac{j}{pa} \right) \quad (22)$$

如果设一个因子  $\beta = F_{Cu^+}/F_{b^+}$ , 那么由(18)、(21)式, 对于小电流的情况,  $\beta \ll 1$  时,  $\xi_+ \approx \xi_{b^+}$ ,

$$[Cu] = \tau_{Cu} \xi_{b^+} j / ea(1+r) \quad (23)$$

大电流时,  $\beta \gg 1$ ,  $\xi_+ \approx (\xi_{Cu^+} - 1)$ , 则有

$$[Cu] = \frac{\tau_{Cu} (\xi_{Cu^+} - 1) j}{ea(1+r)} \quad (24)$$

前者, 溅射主要由惰性气体离子产生, 后者, 溅射主要由铜离子产生。这正是人们期待的结果<sup>[1]</sup>。

3、铜离子 由反应动力学过程, 铜离子主要由电荷转移和彭宁电离产生, 它们的过程速率与相互作用粒子数密度之积成正比。电荷转移速率为

$$R_{CT} = k_{CT} [Cu] [G^+] \quad (25)$$

彭宁电离速率  $R_P$  为

$$R_P = k_P [Cu] [G^m] \quad (26)$$

式中  $k_{CT}$ 、 $k_P$  为电荷转移和彭宁电离速率系数。 $[G^+]$ 、 $[G^m]$  为惰性气体离子和亚稳态原子数密度。人们曾对电荷转移截面和电子碰撞电离截面进行过估算, 前者比后者大两个量级<sup>[1]</sup>。因此可忽略铜的电子碰撞电离。铜离子的损失过程主要是扩散, 铜离子数密度的速率方程为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [Cu^+] &= k_{CT} [Cu] [G^+] + k_P [Cu] [G^m] - \frac{[Cu^+]}{\tau_{Cu^+}} \end{aligned} \quad (27)$$

式中:  $[Cu^+]$ 、 $\tau_{Cu^+}$  为铜离子的数密度和扩散寿命。

4、惰性气体离子 惰性气体离子由电子碰撞电离产生, 它与铜原子发生热能电荷转移反应以及向放电区外扩散而损失。因此速率方程为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [G^+] &= k_1 [e] [G] - k_{CT} [Cu] [G^+] - \frac{[G^+]}{\tau_{b^+}} \\ &= k_1 [e] [G] - k_{CT} [Cu] [G^+] - \frac{[G^+]}{\tau_{b^+}} \end{aligned} \quad (28)$$

式中:  $k_1$  为电子碰撞电离速率系数;  $\tau_{b^+}$  为惰性气体离子的扩散寿命;  $[G]$  为基态惰性气体原子密度。

5、惰性气体亚稳态原子 亚稳态原子的存在不利于激光能级的粒子数反转, 它与铜原子发生彭宁电离, 通过共振俘获而导致激光下能级的聚居如(4)、(6)式。设电子碰撞激发亚稳态粒子的速率为  $k_2$ , 亚稳态的扩散寿命为  $\tau_{b^m}$ , 则

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [G^m] &= k_2 [e] [G] - k_P [Cu] [G^m] - \frac{[G^m]}{\tau_{b^m}} \\ &= k_2 [e] [G] - k_P [Cu] [G^m] - \frac{[G^m]}{\tau_{b^m}} \end{aligned} \quad (29)$$

这里忽略了亚稳态粒子的再激发和电离, 电子超弹性碰撞以及亚稳态粒子之间的碰撞去激发。

6、基态惰性气体原子 根据气体原子分子运动理论, 气体温度为  $T_g$ , 气压为  $p$  的气体原子密度为

$$[G] = p/KT_g \quad (30)$$

式中  $K$  为玻尔兹曼常数。

上面详尽地分析了六种粒子的作用过程, 下面求解稳态情况下的粒子数速率方程。

在稳态情况下,

$$\frac{d}{dt} [Cu^+] = \frac{d}{dt} [G^+] = \frac{d}{dt} [G^m] = 0.$$

由方程(27)~(29)得到

$$\frac{[Cu^+]}{\tau_{Cu^+}} - k_{CT} [Cu] [G^+] - k_P [Cu] [G^m] = 0 \quad (31)$$

$$\frac{[G^+]}{\tau_{b^+}} + k_{CT} [Cu] [G^+] - k_1 [e] [G] = 0 \quad (32)$$

$$\frac{[G^m]}{\tau_{b^m}} + k_P [Cu] [G^m] - k_2 [e] [G] = 0 \quad (33)$$

对上述方程求解得

$$[G^m] = \frac{k_2 [e] [G]}{\frac{1}{\tau_{b^m}} + k_P [Cu]} \quad (34)$$

$$[G^+] = \frac{k_1 [e] [G]}{\frac{1}{\tau_{b^+}} + k_{CT} [Cu]} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} [Cu^+] &= \frac{k_1 [e] [G] \tau_{Cu^+}}{1 + \frac{1}{\tau_{b^+} k_{CT} [Cu]}} \\ &+ \frac{k_2 [e] [G] \tau_{Cu^+}}{1 + \frac{1}{\tau_{b^m} k_P [Cu]}} \end{aligned} \quad (36)$$

据前面对  $[e]$ 、 $[G]$ 、 $[Cu]$  的讨论和(34)~(36)式, 可以得到放电空间的粒子数密度与放电参量的关系。

我们分别就小电流密度和大电流密度两种极限情况进行讨论。对于 Ne-Cu 放电,  $\tau_{Ne^+} = 5 \times 10^{-5} s^{[4]}$ ,  $\tau_{Ne^m} = 2.4 \times 10^{-5} s^{[4]}$ ,  $k_{TC} = 2 \times 10^{-9} cm^3/s^{[4]}$ ,  $k_P \approx 1 \times 10^{-10} cm^3/s^{[6]}$

a. 小电流密度  $[Cu] < 10^{14}/cm^3$ , 所以  $1/\tau_{b^+} \gg k_{CT} [Cu]$ ,  $k_P [Cu] \ll 1/\tau_{b^m}$ , 方程(34)~(36)简化为

$$[G^m] = k_2 \tau_{b^m} [e] [G] \quad (37)$$

$$[G^+] = k_1 \tau_{b^+} [e] [G] \quad (38)$$

$$[Cu^+] = [k_1 \tau_{b^+} k_{CT} + k_2 \tau_{b^m} k_P] \tau_{Cu^+} [e] [G] [Cu] \quad (39)$$

将方程(12)、(22)、(30)代入(37)~(39)式中 得到

$$[G^m] = \frac{k_2 \tau_e \tau_{b^m} r}{KT_g e (1+r)} \left( \frac{j p}{a} \right) \quad (40)$$

$$[G^+] = \frac{k_1 \tau_e \tau_{b^+} r}{KT_g e (1+r)} \left( \frac{j p}{a} \right) \quad (41)$$

$$\begin{aligned} [Cu^+] &= \frac{\tau_e r}{e^2 (1+r)^2 KT_g} \\ &\times [k_1 \tau_{b^+} + k_{CT} + k_2 \tau_{b^m} k_P] \\ &\times \tau_e \tau_{Cu} \tau_{Cu^+} (j^2/a^2) \end{aligned} \quad (42)$$

b. 大电流密度  $[Cu] > 10^{14}/cm^3$ , 所以  $1/\tau_{b^+} \ll k_{CT} [Cu]$ ,  $1/\tau_{b^m} \ll k_P [Cu]$ , 方程(34)~(36)简化为

$$[G^m] = k_2 [e] [G] / k_P [Cu] \quad (43)$$

$$[G^+] = k_1 [e] [G] / k_{CT} [Cu] \quad (44)$$

$$[Cu^+] = (k_1 + k_2) [e] [G] \tau_{Cu^+} \quad (45)$$

将方程(12)、(22)、(30)代入上式得到

$$[G^m] = \frac{r}{KT'_g \eta} \left( \frac{\tau_e}{\tau_{Cu}} \right) \left( \frac{k_2}{k_P} \right) (p^3 a) \quad (46)$$

$$[G^+] = \frac{r}{KT'_g \eta} \left( \frac{\tau_e}{\tau_{Cu}} \right) \left( \frac{k_1}{k_{CT}} \right) (p^3 a) \quad (47)$$

$$[Cu^+] = (k_1 + k_2) \frac{\tau_e \tau_{Cu^+} r}{KT'_g e (1+r)} \left( \frac{jp}{a} \right) \quad (48)$$

### 三、放电理论模型的实验验证

由(22)式计算得到的铜原子密度与Collins<sup>[5]</sup>的实验测定值相符合,如图4、5。

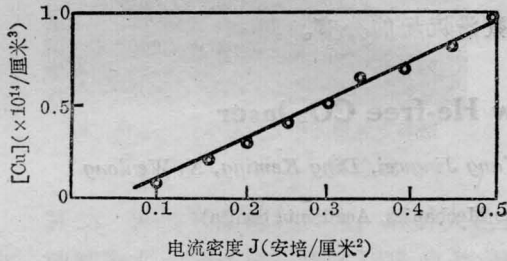


图4 铜原子数密度[Cu]与电流密度J的关系  
实线由(22)式计算得到; ○—Collins 的实验测定值

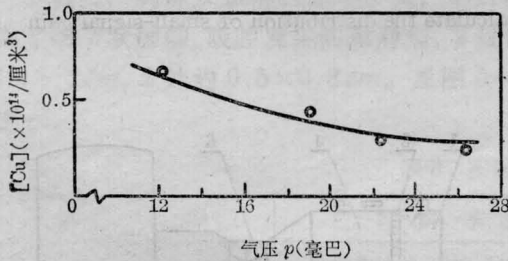


图5 铜原子数密度[Cu]与气压p的关系

由(39)~(42)式在小电流时,亚稳态惰性气体原子和离子密度与放电电流成线性关系,在较大电流时达到饱和。这与Collins<sup>[5]</sup>的实验和Koch<sup>[2]</sup>的计算相一致。但由于 $k_P < k_{CT}$ ,  $1/\tau_{bm} > 1/\tau_{b^+}$ ,所以,后者较前者更快地趋向饱和。(42)、(48)式和文献[5]中的实验结果表明,在小电流密度时,铜离子密度与电流成非线性关系,而大电流时成线性关系。

由图(2),激光上能级通过电荷转移过程激发,那么,激光功率正比于电荷转移速

率<sup>[2]</sup>,由前面关于[Cu]和[G<sup>+</sup>]的讨论得到:

$$\Phi \propto R_{CT} = \frac{r k_1 \tau_e \tau_{Cu} \tau_{b^+} \eta p j^2}{\left( KT'_g e a (1+r) [e(1+r) p a^2] + k_{CT} \tau_{b^+} + \tau_{Cu} \eta j \right)} \quad (49)$$

$$\propto \begin{cases} j^2 & (\text{小电流密度}) \\ j & (\text{大电流密度}) \end{cases}$$

因此,由建立的放电理论模型,得到了激光功率与放电参量的函数关系。对铜离子激光器的紫外( $\lambda = 2600 \text{ \AA}$ )激光功率与放电电流的关系如图6。由图6可见,当电流 $I < 30 \text{ A}$ 时,激光功率正比于电流的二次方,而当 $I > 30 \text{ A}$ 时,激光功率与电流成线性关系。由该模型,没能得到激光功率的电流饱和效应。

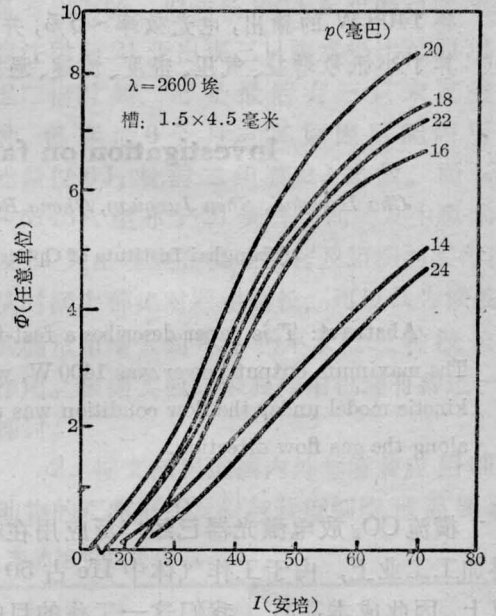


图6 激光功率与放电电流的关系  
(以气压为参量,掺Ar0.1%)

### 参 考 文 献

- [1] B. E. Warner *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**, 5694.
- [2] H. Koch; Ph. D. Thesis, Technical University, Belins, 1982.
- [3] P. Sigmund; *Phys. Rev.*, 1969, **184**, No. 2, 383.
- [4] H. S. W. Massey *et al.*; *Electronic and Ionic Impact Phenomena*, Oxford, 1971, **3**.
- [5] G. J. Collins *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1980, **QE-16**, 820.
- [6] F. J. de Hoog *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1977, **43**, 3701.