

# 高重复率脉冲放电金属蒸气激光中电泳 对金属蒸气分布的影响\*

夏婷婷 钟建伟 毛邦宁 陈 钢 姚志欣 潘佰良†

(浙江大学物理系 杭州 310027)

(2005 年 1 月 6 日收到 2005 年 6 月 27 日收到修改稿)

建立了一个理论模型描述了高重复率脉冲放电金属蒸气激光中的电泳动力学过程. 得到了稳态和瞬态时金属蒸气密度扩散方程的解析表达式. 分别计算了高重复率脉冲放电的 He-Sr<sup>+</sup> 和 He-Cd<sup>+</sup> 激光在不同时刻金属蒸气密度的轴向分布过程. 结果表明, 在放电开始后约 2s 内即可在阴极区建立起相当均匀的轴向金属蒸气密度分布, 从而确保了电泳式金属蒸气激光的稳定输出特性.

关键词: 电泳, 高重复率脉冲放电, 轴向金属蒸气分布, 金属蒸气激光

PACC: 4255H, 5280P, 5280H

## 1. 引 言

众所周知, 在由缓冲气体(氦气或氖气)和少量金属蒸气组成的混合气体中进行直流放电, 金属蒸气会被选择性地输运到阴极端. 这种现象就是电泳, 已被成功应用在混合气体的分离、气体净化等方面<sup>[1,2]</sup>. 在直流放电的连续波金属蒸气激光器中, 已经得到广泛应用的输出波长为 441.6/325nm 的 He-Cd<sup>+</sup> 激光器是典型的电泳式激光器件<sup>[3,4]</sup>, 通常把镉源放置在靠近阳极的侧管中, 由外加热控制镉蒸气密度, 利用直流放电的电泳作用在阴、阳极的有效激活区实现均匀分布的镉蒸气密度, 从而保证了该类激光器稳定可靠的工作特性.

已有的研究表明, 在纵向高重复率脉冲放电的金属和金属卤化物蒸气激光中, 也存在电泳现象<sup>[5,6]</sup>. 以封离型 CuBr 激光为例, 在工作近百小时后, 放电分解的铜和复合的 CuBr 会集聚在阴极附近, 导致激光输出功率和效率的下降. 此时, 若对换激光管的阴极和阳极, 就能恢复激光输出特性. 显然, 这种激光器中的电泳现象并不利于激光器的稳定运转. 因此, 传统的脉冲放电金属蒸气激光器通常把金属介质均匀放置在放电管内壁上或与放电管连通的侧管内<sup>[7-9]</sup>, 通过放电自加热或外加热获得相

对均匀的轴向蒸气分布, 以获得稳定的激光输出. 那么, 能否在小孔径放电管的脉冲放电金属蒸气激光中利用电泳作用实现均匀的轴向金属蒸气密度分布, 从而获得高效稳定的激光工作特性呢? 回答是肯定的. 文献<sup>[10]</sup>报道了电泳式周期脉冲的铯、镉离子激光, 在激活区长为 26cm、内径为 3mm 的放电管中, 实现了周期脉冲放电的 He-Sr<sup>+</sup> 复合激光(430.5nm)的高效运转, 得到了创记录的 277mW/cm<sup>3</sup> 的激光输出功率密度.

本文在分析了纵向高重复率脉冲放电等离子体中离子和中性粒子运动过程的基础上, 建立了金属蒸气密度轴向分布的瞬态扩散方程, 分别得到了该方程的稳态和瞬态解的表达式. 进一步结合实验参量, 计算了脉冲放电的 He-Sr<sup>+</sup> 和 He-Cd<sup>+</sup> 激光轴向金属蒸气分布的时空行为, 给出了建立轴向金属蒸气均匀分布所需的条件.

## 2. 理论分析

为了体现电泳对阴、阳极区域的金属蒸气密度分布的影响, 对中心为金属蒸气源(放置在中心侧管里, 由外加热控制), 两端为电极的放电管中的电泳动力学过程作了分析. 取放电管轴向为  $z$  轴, 中心处  $z = 0$ , 阴、阳极分别在  $z = L$  和  $z = -L$  处. 当无电场

\* 国家自然科学基金(批准号: 10374081, 10574111)和惯性约束聚变技术探索基金(批准号: 2004AA84TS04)资助的课题.

† E-mail: pb166@zju.edu.cn

作用时,放电管内的轴向金属蒸气密度  $n$  由一般扩散运动决定,即

$$n = n_0(1 - |z|/L), \quad (1)$$

式中  $n$  和  $n_0$  分别代表  $z$  和  $z = 0$  处的金属蒸气密度。(1)式表明不放电时,轴向金属蒸气密度分布是中心最大,电极两端( $z = \pm L$ )为 0 的对称线性递减分布.当脉冲放电开始后,由于电泳作用,使得轴向金属蒸气的分布变得很不对称.为简化分析,对以氩或氙为缓冲气体的纵向脉冲放电金属蒸气激光器,只考虑由电子碰撞引起的一价均匀电离过程.在放电管的径向,电子具有比金属离子更快的速度,率先到达管壁复合而使管心呈正电性,导致金属离子在径向梯度和电场作用下进行双极扩散运动.由此,可分别给出金属离子密度  $n_i$  和中性粒子  $n_a$  在放电时的瞬态扩散方程

$$\begin{aligned} \partial n_i / \partial t = & D_i (\partial^2 n_i / \partial z^2) \\ & - D_a (1/r) [\partial / \partial r] [r (\partial n_i / \partial r)] \\ & + \mu E f \tau_i (\partial n_i / \partial z) + R_i, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \partial n_a / \partial t = & D (\partial^2 n_a / \partial z^2) \\ & + D (1/r) [\partial / \partial r] [r (\partial n_a / \partial r)] - R_i \end{aligned} \quad (3)$$

两方程中右边第一项表示由离子和中性粒子密度的轴向梯度引起的一般扩散过程,第二项代表离子径向扩散到管壁复合引起的损耗和原子由管壁向轴心的径向扩散.(2)式中右边第三项表示离子在周期脉冲电场作用下的强迫扩散,最后一项表示由金属蒸气的均匀电离引起的离子密度的增加和中性粒子密度的减小. $D_i$ ,  $D_a$  和  $D$  分别是离子扩散系数、双极扩散系数和中性粒子扩散系数, $\mu$  为离子的迁移率, $E$  是放电时的平均电场, $f$  和  $\tau_i$  分别为脉冲放电重复率和放电电流脉冲宽度.将方程(2)和(3)两边同时乘  $r$  并从中心到管壁( $r = R$ )积分得

$$\begin{aligned} \partial n_i / \partial t = & D_i (\partial^2 n_i / \partial z^2) \\ & - D_a R (\partial n_i / \partial r)_{r=R} \\ & + \mu E f \tau_i (\partial n_i / \partial z) + R_i, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \partial n_a / \partial t = & D (\partial^2 n_a / \partial z^2) \\ & + DR (\partial n_a / \partial r)_{r=R} - R_i, \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\bar{\phantom{x}}$  表示对离子和中性粒子蒸气密度取径向平均,如

$$\bar{n}_a = \int_0^R n_a dr, \quad (6)$$

动态平衡时,管壁处( $r = R$ )离子的径向扩散速率应等于原子向轴心的扩散速率,也就是

$$D_a R (\partial n_i / \partial r)_{r=R} = DR (\partial n_a / \partial r)_{r=R}. \quad (7)$$

考虑到均匀电离,认为金属蒸气的电离度  $\theta = n_i / n$  和纵向电场  $E$  及位置  $z$  无关,其中  $n = n_i + n_a$ , 并假设  $D = D_i$ .为了简化,引入无量纲参量

$$\tau = tD/L^2, \quad x = z/L,$$

$$\beta = \frac{\mu \theta EL f \tau_i}{D} = \frac{\theta e V f \tau_i}{kT}, \quad n_r = n/n_0.$$

其中,参量  $\tau$  反映了金属蒸气从放电开始到稳态分布所需的相对时间, $\beta$  可理解为金属蒸气在电场中的强迫扩散和一般扩散系数的比值,随放电条件而变.把上述参量代入方程(4)和(5),对两式求和化简后得到描述纵向相对金属蒸气密度  $n_r$  分布的方程

$$\partial n_r / \partial \tau = (\partial^2 n_r / \partial x^2) + \beta x (\partial n_r / \partial x), \quad (8)$$

稳态时( $\partial n_r / \partial \tau = 0$ ),方程(8)在边界条件  $n_r|_{x=0} = 1$ ,  $n_r|_{x=\pm 1} = 0$  的解为

$$n_r(x) = \frac{1 - \exp[-\beta(1-x)]}{1 - \exp(-\beta)} \quad 0 < x < 1 \quad (9)$$

$$n_r(x) = \frac{1 - \exp[\beta(1+x)]}{1 - \exp(\beta)} \quad -1 < x < 0. \quad (10)$$

方程(8)的瞬态解析解为

$$\begin{aligned} n_r(x, \tau) = & e^{-(\beta/2)^2 \tau} e^{\beta x/2} \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-(\pi n)^2 \tau} \\ & \times \sin(\pi n x) + n_r(x), \end{aligned} \quad (11)$$

$$C_n = \pm \left( \frac{2}{\pi n} \right) [1 + (\beta/2\pi n)^2]^{-1}. \quad (12)$$

当  $-1 < x < 0$  (阳极至金属蒸气源区)时(12)式取“+”号,当  $0 < x < 1$  (蒸气源至阴极区)时(12)式取“-”号.

### 3. 计算结果和讨论

图 1 给出了稳态时相对金属蒸气密度  $n_r$  在不

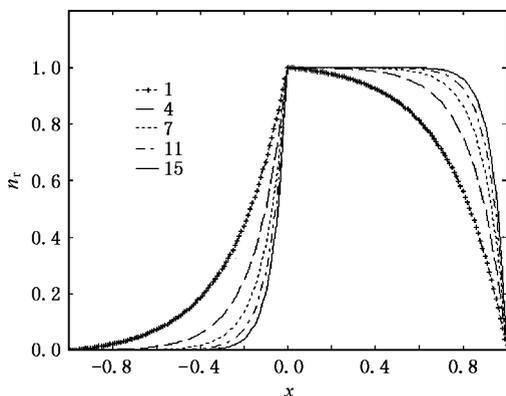


图 1 相对金属蒸气密度  $n_r$  在不同  $\beta$  值时的轴向分布曲线

同  $\beta$  值时的轴向分布曲线. 由图可以看出, 由于电泳作用, 轴向金属蒸气密度在阴极区 ( $0 < x < 1$ ) 和阳极区 ( $-1 < x < 0$ ) 的分布完全不同, 并随参量  $\beta$  值的大小而变. 当  $\beta \geq 11$  时, 在阴极区金属蒸气密度的分布相当均匀, 而在阳极区金属蒸气密度分布快速下降, 在离中心相对位置 20% 外, 基本上没有金

属蒸气. 以高重复率脉冲放电的 He-Sr<sup>+</sup> 和 He-Cd<sup>+</sup> 激光为例, 它们典型的实验参量如表 1 所示. 根据表 1 有关数据, 经计算得到 He-Sr<sup>+</sup> 和 He-Cd<sup>+</sup> 激光的参量  $\beta$  值分别是 39—78 和 19.3, 完全满足电泳作用时在源与阴极间实现金属蒸气均匀分布的条件 ( $\beta > 11$ ).

表 1 He-Sr<sup>+</sup> 和 He-Cd<sup>+</sup> 激光的工作参量和相关数据

激光	$\lambda/\text{nm}$	$P_{\text{He}}/\text{kPa}$	$D/\text{cm}^2\text{s}^{-1}$	$f/\text{kHz}$	$\tau_i/\text{ns}$	$\theta$	$L/\text{cm}$	$d/\text{mm}$	$E/\text{Vcm}^{-1}$	$T/\text{K}$
He-Sr <sup>+</sup>	430.5	25	11.5	5—10	100	0.5	30	3—6	400	900
He-Cd <sup>+</sup>	441.6	0.3	185	10	200	0.1	50	3	100	600

图 2 是当参量  $\beta$  分别取 11(虚线)和 30(实线)时, 由(11)式计算得到的相对金属蒸气密度在不同  $\tau$  值时的轴向分布曲线. 由图可知, 在中心和阳极之间, 只要存在电泳作用, 金属蒸气主要集中在蒸气源附近, 而在阴极区, 金属蒸气分布的均匀程度与参量  $\beta$  和  $\tau$  的大小有关, 较大  $\beta$  值实现金属蒸气均匀分布所需的相对时间较小. 根据(11)式给出的金属蒸气分布的瞬态解析式, 进一步计算了高重复率脉冲放电的 He-Sr<sup>+</sup> ( $\beta = 50$ ) 和 He-Cd<sup>+</sup> ( $\beta = 20$ ) 激光的电泳动力学过程, 得到了图 3 和图 4 所示的相对蒸气密度在中心至阴极间的 3 维时空分布过程. 从两图可以看出, 虽然高重复率脉冲放电 He-Sr<sup>+</sup> 和 He-Cd<sup>+</sup> 的激光机理和工作参量有较大差异, 但在电泳作用下, 在蒸气源至阴极间建立起金属蒸气均匀分布的动力学过程是类似的, 总蒸气达到轴向均匀分布时的  $\tau = 0.03$  (对应  $t = 2.35\text{s}$ ), 而镉蒸气达到均匀分布的相对时刻为  $\tau = 0.1$  (对应  $t = 1.35\text{s}$ ). 因此, 在设计这类激光管时可将放置金属源的侧管布置在阳

极端附近, 通过外加热得到所需金属蒸气密度, 当高重复率脉冲放电开始后, 由电泳效应实现金属蒸气在整个有效激活区间的均匀分布, 其特点是既可避免传统脉冲金属离子激光有时出现的放电不稳定现象(由对放电管内壁上的金属片直接放电引起的)和挡住光路的缺点, 又能实现高效稳定的激光运转.

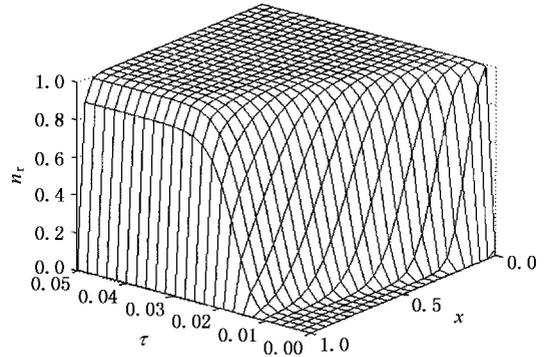


图 3 He-Sr<sup>+</sup> 激光中相对镱蒸气密度轴向分布的时空曲线

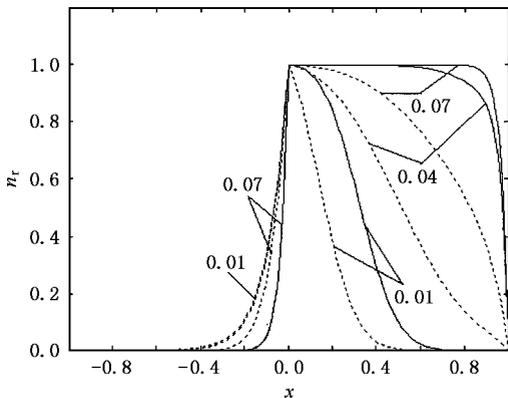


图 2  $\beta$  为 11(虚线)和 30(实线)时相对金属蒸气密度  $n_r$  在不同  $\tau$  值的轴向分布曲线

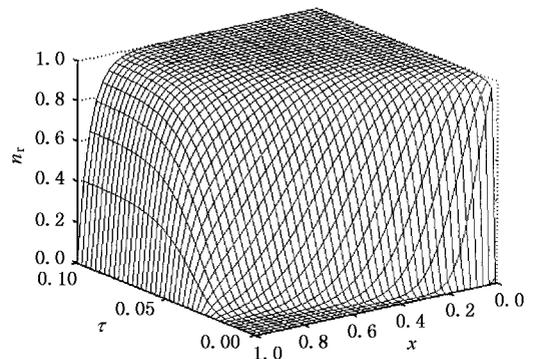


图 4 He-Cd<sup>+</sup> 激光中相对镉蒸气密度轴向分布的时空曲线

## 4. 结 论

本文详细分析了高重复率脉冲放电金属蒸气激光的电泳动力学过程,建立了金属蒸气中离子和中性粒子在脉冲电场作用下的瞬态扩散方程.得到了

金属蒸气沿放电管分布的稳态和瞬态解析表达式,计算了高重复率脉冲放电的 He-Sr<sup>+</sup> 和 He-Cd<sup>+</sup> 激光相对金属蒸气密度轴向分布的时空过程,给出了建立轴向金属蒸气均匀分布所需的条件( $\beta \geq 11$  和约 2s 时间),为设计电泳式高重复率脉冲放电金属蒸气激光提供了理论依据.

- 
- [ 1 ] Freudenthal J 1967 *J. Appl. Phys.* **38** 4818
- [ 2 ] Fredrick H S , Donald S R 1968 *J. Appl. Phys.* **39** 5762
- [ 3 ] Sosnowski T P 1969 *J. Appl. Phys.* **40** 5138
- [ 4 ] Anderson S G 1997 *Laser Focus World* **33** 72
- [ 5 ] Cross L A , Willis R K , Funk L L , Gokay M C 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 2395
- [ 6 ] Liu C S , Feidman D W , Pack J L , Weaver L A 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 194
- [ 7 ] Pan B L , Chen K , Chen G , Yao Z X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 445 ( in Chinese ) [ 潘佰良、陈 坤、陈 钢、姚志欣 2004 物理学报 **53** 445 ]
- [ 8 ] Pan B L , Chen G , Fang B M *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 2071
- [ 9 ] Vuchkov N K , Temelkov K A , Zahariev P V , Sabotinov N V 2004 *Opt. Laser Tech.* **36** 19
- [ 10 ] Latush E L , Chebotarev G D , Vasilchenko A V 1998 *SPIE* **3403** 141

## Influence of cataphoresis on metal vapor distribution in high repetition rate pulsed discharge metal vapor lasers<sup>\*</sup>

Xia Ting-Ting Zhong Jian-Wei Mao Bang-Ning Chen Gang Yao Zhi-Xin Pan Bai-Liang

( Department of Physics , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China )

( Received 6 January 2005 ; revised manuscript received 27 June 2005 )

### Abstract

A theoretic model has been established to describe the cataphoresis dynamics in high repetition rate ( HRR ) pulsed discharge metal vapor lasers ( MVLs ). The analytic solutions for transient and steady-state diffusion equations of metal vapor concentration are obtained. The axial distribution processes of metal vapors in HRR pulsed discharge He-Sr<sup>+</sup> and He-Cd<sup>+</sup> lasers have been calculated. It shows that the axial metal vapor distribution between the metal source and the cathode reaches sufficient homogeneity in about 2s , thus ensuring the stable output characteristics of cataphoresis MVLs.

**Keywords** : cataphoresis , high repetition rate pulsed discharge , axial metal vapor distribution , metal vapor lasers

**PACC** : 4255H , 5280P , 5280H

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10374081 , 10574111 ) and the Inertial Confinement Fusion Research Foundation ( Grant No. 2004AA84TS04 ).