

周期自洽的充氢溴化亚铜激光 动力学模型

程 成

(杭州师范学院物理系, 杭州 310012)

孙 威

(浙江大学物理系, 杭州 310027)

(1994 年 8 月 8 日收到)

建立了一个比较完整的、周期性自洽的充氢溴化亚铜激光动力学模型, 获得了激光工作物质粒子数、激光光强、电子温度、电子密度等一系列参量的时空分布与变化, 并与实验值作了比较。

PACC: 4255

1 引 言

铜(溴化亚铜)蒸汽激光器是近年来引起人们注意的一种激光器^[1-3]。

目前, 在铜(溴化亚铜)激光器的研究中, 仍有许多重要问题尚未解决, 例如:

(1) 掺氢效应 实验发现, 掺氢可明显提高激光功率。尤其是对 CuBr 激光, 提高幅度可近一倍^[4,5]。但实验上掺入氢气的动态范围很窄, 其一致性与重复性也较差。目前, 对掺氢机制虽有一些定性的解释, 但尚缺少深入的分析 and 研究。实际上, 掺氢的作用远没有得到发挥。

(2) “黑心”现象 实验发现^[6], 随着激光功率增大或口径增大, 输出激光束径向分布出现边缘亮、中间暗的黑斑。“黑心”严重制约了激光功率的提高, 影响了激光束的质量。

上述这两个问题, 不但在铜(溴化亚铜)激光中存在, 在其它类型的金属蒸汽激光(例如金蒸汽激光^[7])中也普遍存在。研究其机制并解决之, 是目前发展金属蒸汽激光的一个关键。

对于铜激光, Kushner^[8] 等人在假定气体温度为稳态分布的条件下, 曾做过铜激光计算机模型的工作, 但尚未涉及充氢及“黑心”问题。对于溴化亚铜激光, Astadjov^[9] 对充氢后激光运行的参数作过研究, 但未涉及激光内部的动力学过程, 因而也无法解释充氢机制等问题。由于溴化亚铜激光的工作物质是铜的卤化物, 又存在溴等杂质粒子, 其激光动力学过程相当复杂。迄今为止, 尚未有对充氢/不充氢溴化亚铜激光动力学过程作出完整的时空描述。对其它类型的金属蒸汽激光亦是如此。因而, 诸如充氢机制及“黑心”成因等许多问题, 人们始终不清楚。

本文详细考察了充氢溴化亚铜激光的各种动力学过程, 建立了一个比较完整的、周期性自治的激光动力学模型。对该模型中所描述的各种粒子及能量的时空变化, 进行了详尽的数值计算, 获得了激光工作物质、杂质粒子、激光光子、等离子体电子温度、电子密度、气体温度等一系列参量的时空分布与变化, 并与实验测量作了比较。

2 物理模型

2.1 工作原理与电场描述

CuBr 激光器的工作方式为连续脉冲纵向放电, 放电的等效电路如图 1 所示。高压装置对充放电电容进行充电。当触发脉冲到来时, 充氢闸流管导通, 放电电容在激光管两电极之间形成瞬间高压, 击穿气体, 激光管内形成弱电离等离子体。电脉冲结束后, 充氢闸流管截止, 高压装置对充放电电容再次充电。同时, 激光管内的等离子体经历一较长的弛豫过程, 等待下一个电脉冲的到来。具体的电路等可参见文献[9,10]。

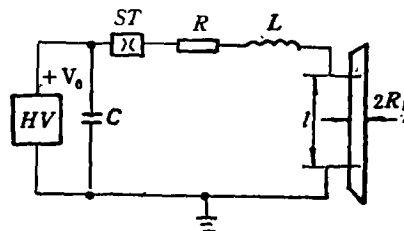


图1 CuBr 激光放电等效电路

对于稳定运行的 CuBr 激光器, 可以在连续放电脉冲中, 任意选择其中一个放电周期。放电管中建立的电场应当满足麦克斯韦方程:

$$\nabla^2 E - 4\pi \frac{\partial}{\partial t} (\sigma E) = 0, \quad (1)$$

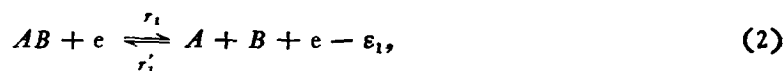
式中等离子体电导率 $\sigma = e^2 n_e / m_e \nu_e'$, n_e 为电子密度, ν_e' 为电子动量输运频率。

2.2 粒子的碰撞动力学过程

在放电电场驱动下, 放电管中的粒子发生一系列剧烈的反应, 有碰撞激发、电离、离解、受激辐射等。电脉冲结束后, 在弛豫过程中, 有复合、扩散、电子粘附等, 各种参量的变化趋于平缓, 并且缓慢回归到脉冲到来之前的初始状态。

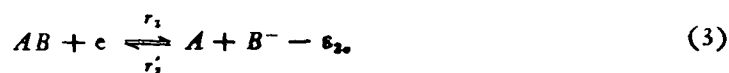
在放电管中, 本文考虑有如下一些粒子: 分子类: CuBr, HBr, H₂, Br₂; 原子类: Cu1 (铜基态), Cu2 (激光下能态), Cu3 (激光上能态), Br, Ne1 (氖基态), Ne2 (氖亚稳态), H; 正离子类: Cu⁺, Br⁺, Ne⁺, H⁺; 负离子类: Br⁻, H⁻; 电子; 激光光子, 总共 6 类 19 种粒子。在脉冲激励过程或在弛豫过程中, 它们参与了如下的动力学过程或反应:

(1) 分子电子碰撞离解与复合



式中 AB 为分子, ε 为电子能量得失, r, r' 为反应速率系数, 下同。

(2) 分子电子碰撞附着离解与复合

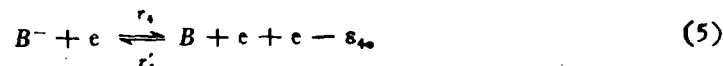


(3) 分子 Penning 碰撞离解与复合

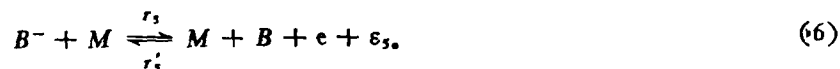


式中 M^*, M 为激发态和基态重粒子。

(4) 负离子电子碰撞去附着与附着



(5) 负离子重粒子碰撞去附着与附着



(6) 负离子光子去附着与附着



(7) 正负离子碰撞复合



(8) 正负离子碰撞电荷交换



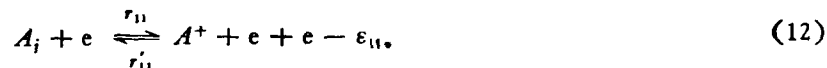
(9) 正负离子三体碰撞电荷交换



(10) 电子碰撞激发与退激发



(11) 电子碰撞电离与三体复合



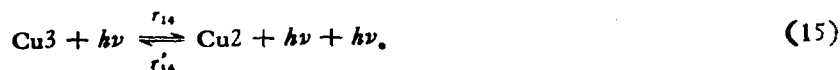
(12) 原子 Penning 电离与复合



(13) 离子电子碰撞复合



(14) 受激辐射与吸收



(15) 自发辐射



2.3 等离子体电子温度与电子密度

等离子体电子温度与电子密度是决定激光行为的两个重要因素。在上述的 15 种反应中,已标出电子及电子能量的得失。此外,电子的能量还与驱动电场、电子与各种气体粒子的碰撞能量交换、电子能量及电子温度的扩散有关,电子的能量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e k T_e \right) = & \frac{n_e e^2 E_r^2}{m_e \nu_e'} - \left[\sum_{i,s} r_i' n_{i,s}' n_{i,s}' \varepsilon_i' - \sum_{i,s} r_i' n_{i,s}' n_{i,s}' \varepsilon_i' \right] \\ & - \sum_i \frac{3}{2} n_e k \left(\frac{2m_e}{M_i} \right) (T_e - T_i) \nu_e' + \nabla \\ & \cdot \left(\frac{3}{2} n_e k T_e u_e \right) + \nabla \cdot (\lambda_e \nabla T_e), \end{aligned} \quad (17)$$

式中角标 i, s 表示不同的反应类型与不同的粒子种类,角标 a, b 表示碰撞伙伴, ε_i 为 s 类粒子第 i 个反应所引起的电子能量得失, u_e 为电子径向运动速度, λ_e 为电子热导率, ν_e' 为电子跟 s 类粒子弹性碰撞频率。方括号内的速率系数和正负号,对不同的反应有不同的含义,后面的方程亦是如此,不再另行注明。

电子密度方程为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \sum_{i,s} r_i' n_{i,s}' n_{i,s}' - \sum_{i,s} r_i' n_{i,s}' n_{i,s}' n_e - \nabla \cdot (n_e u_e), \quad (18)$$

式中电子径向运动速度为

$$u_e = -\mu_e E_r - D_e \nabla n_e / n_e, \quad (19)$$

式中电子迁移率 $\mu_e = e / m_e \nu_e$, 双极扩散系数 $D_e = (\mu_i D_i + \mu_e D_e) / (\mu_i + \mu_e)$ 。径向电场

$$E_r = \frac{\sum_i D_i^+ \nabla n_i^+ - \sum_i D_i^- \nabla n_i^-}{\sum_i \mu_i^+ n_i^+ + \sum_i \mu_i^- n_i^-}. \quad (20)$$

2.4 中性气体粒子(分子、原子)方程

除了上述的 15 种反应中相应的过程与逆过程之外,还应有气体粒子的宏观输运。需要指出:对于考虑了有激发能级的粒子,其中包含能级之间的激发与退激发,对铜粒子,还应有受激辐射、共振吸收等。第 s 类粒子 i 能态的数密度方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_i'}{\partial t} = & \sum_i (r_{ji}' n_j' - r_{ij}' n_i') n_e + \left(\sum_{j,k} r_{jk}' n_j' n_k' - \sum_j r_{ji}' n_j' n_i' \right) \\ & + \sum_{j>i} A_{ji} n_j' + \nabla \cdot (D_i \cdot \nabla n_i') - \nabla \cdot (n_i' u_i). \end{aligned} \quad (21)$$

对于中性气体粒子的运流速度 u_i , 由于缓冲气体缓缓流动,气体粒子数守恒,应有

$$\sum_i \nabla \cdot (n_i' u_i) = \sum_i \frac{n_i'}{T_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} - \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \sum_i \frac{n_i'}{T_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} \cdot 2\pi r dr, \quad (22)$$

式中 R 为放电管半径。

2.5 正负离子方程

参照上述的反应过程,有

$$\frac{\partial n_i^\pm}{\partial t} = \sum_{j,k} r_{jk}^\pm n_j^\pm n_k^\pm - \sum_i r_{ii}^\pm n_i^\pm n_i^\pm - \nabla \cdot (n_i u_i^\pm), \quad (23)$$

式中运流输运速度

$$u_i^\pm = \pm \mu_i E_r - D_i \nabla n_i / n_i. \quad (24)$$

2.6 气体能量方程

激光管内的气体能量,与电流的焦耳加热、气体原子与电子的碰撞热交换、气体的热扩散速率有关。其能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_a k T_g \right) = J_1 E_1 + \sum_i \frac{3}{2} n_i k \left(\frac{2m_e}{M_i} \right) (T_e - T_g) \nu_{ei} + \nabla \cdot (\lambda_g \nabla T_g), \quad (25)$$

式中 J_1, E_1 为纵向放电电流与电场, λ_g 为气体原子热导率。

2.7 激光光子方程

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho \left[r_{11} \left(\text{Cu } 3 - \frac{g_1}{g_2} \text{Cu } 2 \right) - c \left(\frac{1 - R_c}{l_c} + \theta \right) \right] + \delta A_{32} \text{Cu } 3, \quad (26)$$

式中 g 为能级统计权重, R_c 为谐振腔输出镜反射率, l_c 为谐振腔长, θ 为每单位长度衍射损失, δ 为自发辐射沿激光束方向所张的立体角, A_{32} 为激光能级的自发辐射跃迁几率。

在上述各过程中,有关的反应速率、反应截面或数据等,详见附录 A。其它的有关数据可参见文献为:中性粒子密度扩散系数见文献[11];气体原子热导率见文献[3,11];电子碰撞动量输运截面见文献[3,13,14];电子弹性碰撞频率见文献[12,13,14];电子热导率见文献[13];双极扩散系数见文献[13];光学谐振腔有关数据见文献[15]。

3 计算与结果

由前所述,对 19 种粒子各可列出一个方程,再加上驱动电场、电子温度和气体温度方程,总共 22 个方程,组成一非线性偏微分方程组,其中含有一些积分,包括对(22)式,对各有关的电子碰撞截面求麦克斯韦分布的平均而获得碰撞速率系数等。此外,它还含有有关的速率系数、迁移率、扩散系数、热导率等许多参量。这些参量一般为电子温度、电子密度、气体温度、气体粒子密度等的函数,或即为时间空间的函数,参量相互耦合,相互作用,相当复杂。

对每一个偏微分方程,都可用隐式差分法,将偏微分方程化成差分方程,并化成三角矩阵方程,然后,对方程组用“追赶法”,在计算机上作数值求解。

由于计算量相当大(仅在我们的前期工作中,折合成 486 微机的机时就达 800 小时以

上),为了减少计算量,较快地达到由连续脉冲放电形成的各参量周期性自治,对方程选择一个合适的初始条件是重要的。

初始条件确定的原则是:(1)空间电荷守恒, $\sum n_i^+ = \sum n_i^-$ 。(2)铜密度(主要是基态铜)等于溴密度。这是由于溴的各种成分($\text{Br}_2, \text{HBr}, \text{Br}$ 等)均来自于 CuBr 蒸汽分子的离解。确定初始条件的程序流程见图2。通过迭代循环,逼近上述这两条原则。经过一整个放电周期后,使弛豫末期的气体温度 $T_g(r)$ 与初始分布相符合。实践表明,这样确定初始条件,既是周期性自治的,又可使计算量大为减少。

对于边界条件,根据实验来确定。例如,气体的管壁温度 $T_w = 450^\circ\text{C}$ 。

计算在充氢 CuBr 激光典型的运行条件下进行。输入电功率 $P_{in} = 1200\text{W}$, 氖气压强 $P = 30\text{mmHg}$, 充入氢气压强 $P_{H_2} = 0.2\text{mmHg}$, 脉冲重复频率 $f = 16\text{kHz}$, 放电管半径 $R = 2\text{cm}$ 。计算结果示于图3至图10中。其中图3至图5为时间变化图,其余为时空变化图或径向分布图。

4 讨论与结论

计算结果中包含了极丰富的信息,限于篇幅,下面仅讨论其中的重要现象。

1. 电子温度与激光脉冲

作为激光能级激励的重要参量电子温度,其在放电脉冲及弛豫过程中的时间行为示于图3和图5。图7为时空分布。充氢前后激光能级粒子数、激光管中心区域的激光脉冲峰 P_0 , 以及沿径向平均的激光光强 P_r 随时间的变化示于图4中。由图可见,激光管中心最高电子温度 $T_{em} = 5.4\text{eV}$, 电子温度的时间行为与放电电场一致。当电子温度峰值较高时,激光能级粒子数反转也较深,激光脉冲峰以及平均光强均较大。在电脉冲前期,电子温度的径向分布基本均匀。在电脉冲后期,径向分布出现凹陷(见图7)。电脉冲结束后,电子温度渐渐回归到均匀分布的初始状态(图5)。

在电子能量方程(17)式中,电脉冲期间电子温度的变化主要由驱动电场、电子碰撞分子离解以及各能级之间的激发/退激发决定。电场驱动以及电子的碰撞退激发((11)式的逆过程)使电子温度升高。电子碰撞分子离解以及电子的碰撞激发((2)和(11)式的正过程)抑制了电子温度的升高。在弛豫过程中,电脉冲结束,电子能量的损耗主要由电子与

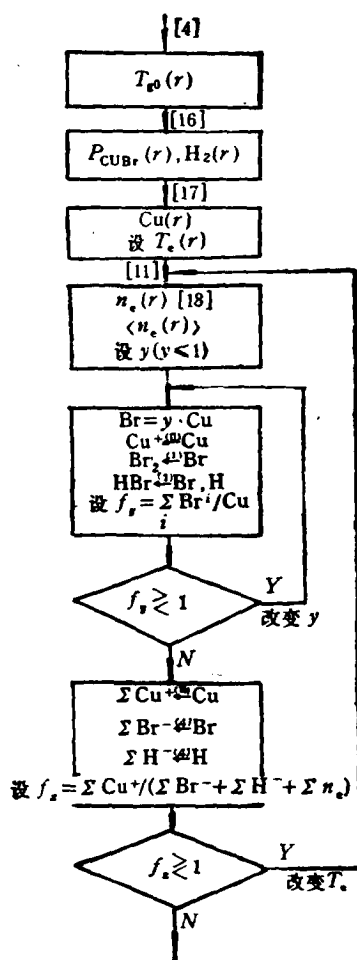


图2 确定初始条件的流程图 方括号内为参考文献; 圆括号内为附录A中的反应序号

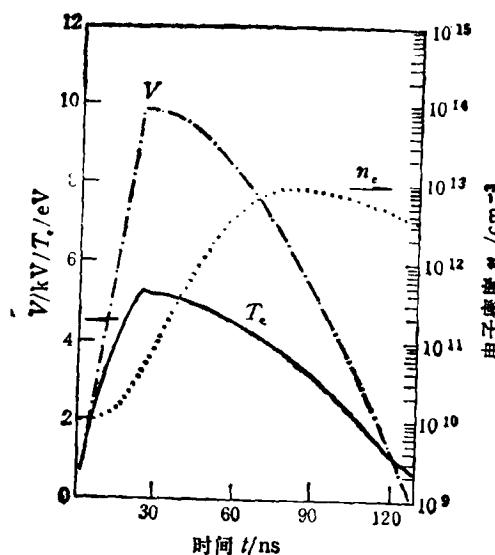


图3 脉冲期间放电电压 V 、激光管中心区域的电子温度 T_e 和电子密度 n_e 随时间 t 的变化

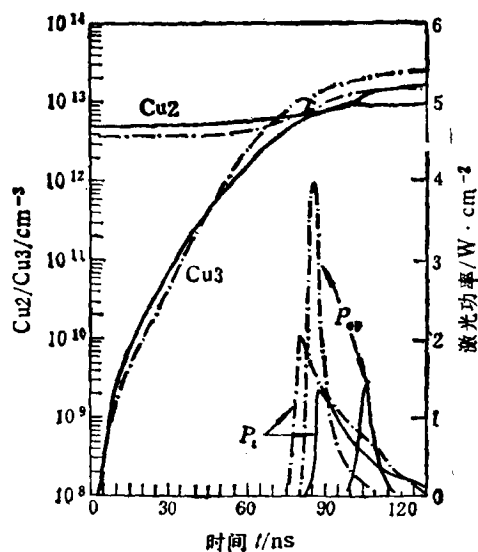


图4 脉冲期间激光能级粒子数、激光管中心区域激光强度 P_0 ，以及沿半径平均的激光强度 P_i ，虚点线、实线分别为充氢、不充氢的情况

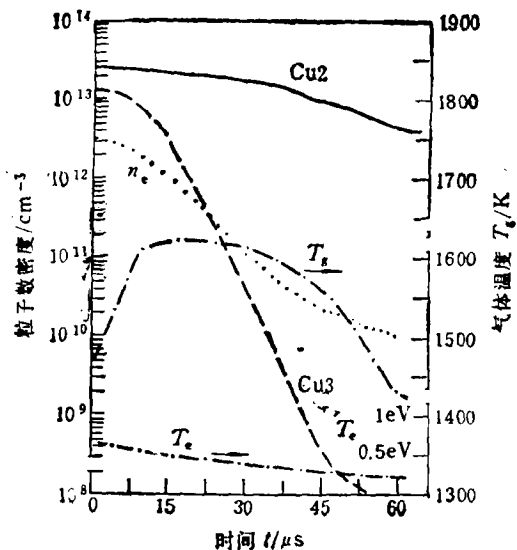


图5 弛豫期间激光管中心区域的电子温度 T_e 、电子密度 n_e 、激光能级 $Cu3$ 、 $Cu2$ 以及气体温度 T_g 随时间 t 的变化

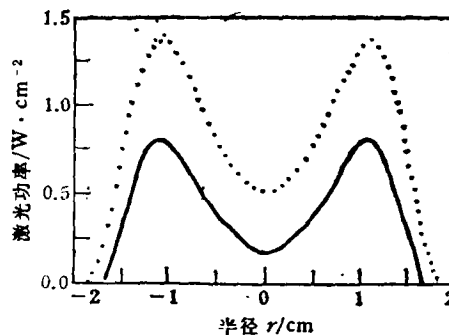


图6 激光的径向分布 曲线说明同图4

气体原子碰撞热交换和电子能量的热扩散决定。

不充氢时，计算的电子温度峰值为 4.96 eV，与我们已有的测量值 4.9 eV^[12] 相当接近。

2. 电子密度与激光的径向分布

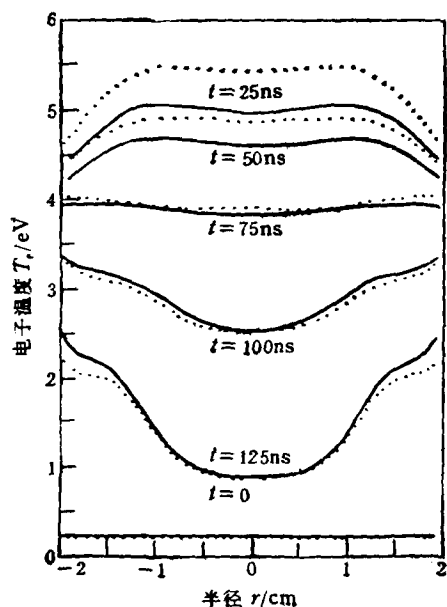


图7 脉冲期间电子温度的时空变化 每条曲线间隔时间为 25ns, 说明同图4

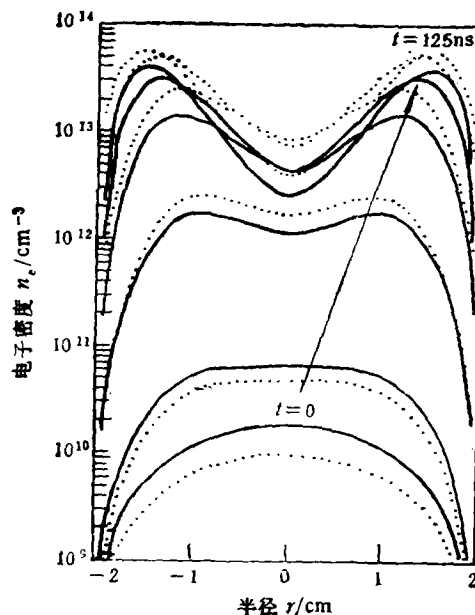


图8 脉冲期间电子密度的时空变化 每条曲线间隔时间为 25 ns, 说明同图4

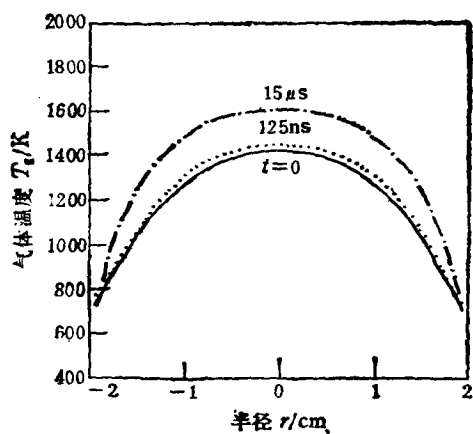


图9 充氢/不充氢时气体温度的时空变化 $t = 125\text{ns}$ 为脉冲结束时; $t = 15\mu\text{s}$ 为气体温度最高时刻

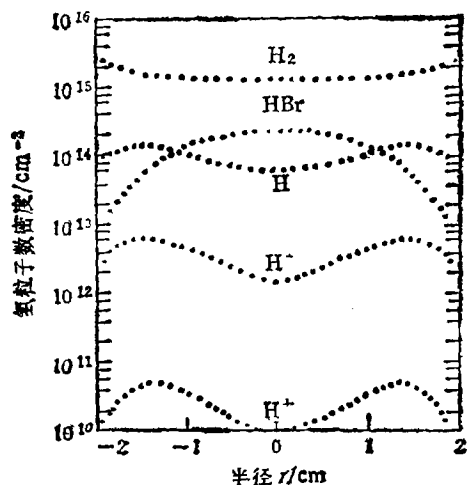


图10 放电脉冲结束时, 氢的各种成分的径向分布

电子密度的时间变化示于图3和图5。图8为时空分布。由图3可见, 在脉冲期间, 电子密度持续上升。在脉冲后期, 由于趋肤效应, 电子密度的径向分布出现凹陷。计算发现, 电子密度的径向分布与激光的径向分布密切相关。电子密度沿径向凹陷越深, 激光的“黑心”越明显。这一点, 对我们认识“黑心”的成因, 具有重要意义。

在前述的放电条件下, 计算的激光光强径向分布示于图6。图6中最亮处与中心的

光强之比 $m = 2.7$, 对应的亮环直径 $d \approx 2\text{cm}$, 如果将放电管半径减小为 1cm 或增大到 3cm , 保持其它条件不动, 则“黑心”明显减弱或增强, 即“黑心”与激光管口径有关。这与实验观测的结果相符合。

3. 激光总功率 $P = 9.31\text{W}$, 效率 $\eta = 0.78\%$, 激光峰出现的时刻为 80ns (见图 4)。如果不充氢, 激光功率下降至 5.2W , 激光峰出现的时刻后延至 90ns 。这些结果与变化趋势, 与实验结果(例如文献[6,10])相一致。

4. 激光管中心气体温度的变化示于图 5, 其径向轮廓为一单峰形状(见图 9)。在 $t = 15\mu\text{s}$ 时, 气体温度达到最高值。气体温度的上升, 主要来源于电流的焦耳加热与电子的碰撞热交换。电脉冲结束后, 与电子的碰撞热交换是引起温度升高的主要原因。在一个放电周期中, 中心气体温度的变化 $\Delta T_c \approx 200\text{K}$ 。

5. 氢的各种有关成分的径向分布见图 10(放电脉冲结束时)。其中 HBr , H_2 , H 随时间的变化很小。 H^+ 在脉冲期间增加较快, 但数量级很小, 可以忽略。 H^- 在脉冲及弛豫前期增加较明显。此外, Br^- 的数量级与 H^- 相当。

计算发现, 有关形成 $\text{H}^-(\text{Br}^-)$ 的几种机制中, 电子碰撞离解随着过程, 即反应式(3)是主要的。注意到 H^- 与电子密度数量级相当, 说明有相当一部分电子被吸附, 使有效的电子密度降低, 从而削弱了电子的激励作用。这是我们所不希望的。

5 结 语

本文建立的充氢溴化亚铜激光动力学模型是一个完整的、周期性自洽的计算机模型。由模型得到的计算结果, 与相关的实验结果相当接近。由模型揭示的激光动力学过程, 可深入分析研究充氢的影响以及“黑心”的成因等。有关工作正在进行之中。

本模型具有较强的“扩散”能力, 即只需变换工作物质与工作条件, 例如使溴为零, 即可成为纯铜激光模型。因而, 它可成为通用的金属蒸汽激光动力学模型, 对各种金属蒸汽(如金、铯等)激光的动力学过程进行广泛的研究。

附 录 A

反应速率系数或截面数据及参考文献

序号	反 应	正反应速率系数或截面	逆反应速率系数或截面
1	$A + e \xrightleftharpoons[r_1']{r_1} A + B + e - \varepsilon_1$	[20, 21] $1 \times 10^{-17} \frac{T_e}{\varepsilon_{AB}^2(6 + T_e/\varepsilon_{AB})} \exp\left(-\frac{\varepsilon_{AB}}{T_e}\right)^{[19]}$, cm ³ /s (ε_{AB} : 离解能)	细致平衡原则确定 ^[22] $r_1' = \frac{2g_{AB}}{g_A g_B} \frac{\sqrt{2\pi}^{1/2} h^3}{m_e^{1/2} T_e^{3/2}} \exp\left(\frac{\varepsilon_{AB}}{T_e}\right) \cdot r_1$, cm ³ /s (g : 统计权重; T_e 单位: eV)
2	$AB + e \xrightleftharpoons[r_2']{r_2} A + B - \varepsilon_1$	$\hbar^2 \left(\frac{2\pi}{m_e \lambda T_e} \right)^{3/2} \left\langle \Gamma(r) \exp\left(-\frac{E_p}{T_e} - \int \frac{\Gamma dr}{\hbar v} \right) \right\rangle^{[23]}$, cm ³ /s [24]	CuBr: $4 \times 10^{-10} (T_g/300)^{1/10}$, cm ³ /s HBr: $1.9 \times 10^{-10} (T_g/300)^{1/10}$, cm ³ /s H ₂ : $0.5 \times 10^{-10} (T_g/300)^{1/10}$, cm ³ /s Br ₂ : $4 \times 10^{-10} (T_g/300)^{1/10}$, cm ³ /s
3	$AB + M^* \xrightarrow[r_3]{r_3} A + B + M$ $AB + M \xrightarrow[r_3']{r_3'} A + B + M$	$\frac{7 \times 10^{-6}}{\sqrt{\varepsilon_{AB} T_e} \mu}^{[23]}$, cm ³ /s (μ : 分子质量(原子质量单位))	同 No. 1 逆反应速率系数式, r_1 换为 r_3
4	$B^- + e \xrightleftharpoons[r_4']{r_4} B + e + e - \varepsilon_4$	$1.76(0.045 E^{0.2} - E^{-1} \ln(0.12))^{[10]}$, Å ² (E : 电子能量 eV) [22]	同 No. 1, r_1 换为 r_4
5	$B^- + A \xrightleftharpoons[r_5']{r_5} A + B + e + \varepsilon_5$	$\sigma_5 = \pi r_{et}^2^{[23]}$ $H^-: r_{et} = 1.59 \text{ Å}^{[23]}$ $Br^-: r_{et} = 1.138 \text{ Å}^{[23]}$	同 No. 1, r_1 换为 r_5
6	$B^- + h\nu \xrightleftharpoons[r_6']{r_6} B + e + \varepsilon_6$	5782 Å 处: $\sigma = 3 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 5106 Å 处: $\sigma = 2.5 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ } [22]	细致平衡: $\frac{\sigma_6'}{\sigma_6} = \frac{g_1}{g_6} \left(\frac{K}{q} \right)^2$ (K : 光子波数; g : 电子波数; q : 统计权重)
7	$A^+ + B^- \xrightarrow[r_7]{r_7} AB + h\nu$	$4 \times 10^{-10} \left(\frac{T_g}{300} \right)^{1/10}$, cm ³ /s	
8	$A^+ + B^- \xrightarrow[r_8]{r_8} A + B$	$\frac{\hbar^2}{m_e} \frac{\sigma}{\sqrt{T_e} \mu}^{[23]}$, cm ³ /s (σ : 常量; μ : 折合质量 g)	

续表

序号	反 应	正反应速率系数或截面	逆反应速率系数或截面
9	$A^+ + B^- + M \xrightarrow{r_9} A + B + M$	$\frac{B\rho^{1/2}n_e e^7}{T_e^2} \left(\frac{1}{\sqrt{\mu_{13}}} + \frac{1}{\sqrt{\mu_{13}}} \right) = 4.15 \times 10^{-11} \frac{P}{T_e^2} \left(\frac{1}{\sqrt{\mu_{13}}} + \frac{1}{\sqrt{\mu_{13}}} \right)$ (ρ : 气体压强; μ : 折合质量)	
10	$A_i + e \xrightleftharpoons[r_{10}']{r_{10}} A_j + e - \varepsilon_{i0}$	[23, 26-28] $1.6 \times 10^{-10} \frac{f_{ji}}{E_{ji}} \frac{\bar{q}}{T_e^{1/2}} \exp\left(-\frac{E_{ji}}{T_e}\right)$, cm ³ /s (f_{ji} : 振子强度; $\bar{q}$: 平均简并因子)	$r_{10}' = \frac{g_i}{g_j} \exp\left(\frac{E_{ji}}{T_e}\right) r_{10}$, cm ³ /s
11	$A_j + e \xrightleftharpoons[r_{11}']{r_{11}} A^+ + e + e - \varepsilon_{11}$	$1.1 \times 10^{-10} \frac{(T_e/E_j)^{1/2}}{E_j^{3/2}(6 + T_e/E_j)} \exp\left(-\frac{E_j}{T_e}\right)$, cm ³ /s (E_j : 电离能)	$r_{11}' = \frac{g_i}{g_e} \frac{\sqrt{2} \pi^{3/2} h^3}{m_e^{3/2} (kT_e)^{3/2}} \exp\left(\frac{E_j}{T_e}\right) r_{11}$, cm ³ /s
12	$A_j + M^* \xrightleftharpoons[r_{12}']{r_{12}} A^+ + M + e + \varepsilon_{12}$ $A_j + M \xrightleftharpoons[r_{12}']{r_{12}} A^+ + M + e + \varepsilon_{12}$	$\frac{7 \times 10^{-10} \mu_{12}}{\sqrt{E_j T_e}}$, cm ³ /s (E_j : 原子电离能)	$r_{12}' = \frac{g_i}{g_A} \frac{\sqrt{2} \pi^{3/2} h^3}{(m_e k T_e)^{3/2}} \exp\left(\frac{E_{j2}}{T_e}\right) \cdot r_{12}$, cm ³ /s
13	$A^+ + e \xrightarrow{r_{13}} A_j + h\nu - \varepsilon_{13}$	$2.6 \times 10^{-14} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n} \sum_i (4i + 3 - M_{n,i}) \left(\frac{E_{n,i}}{E_H}\right)^{1/2} \cdot \beta_{n,i}^{1/2} \exp(\beta_{n,i}) \cdot E_i^{1/2}$, cm ³ /s ($E_{n,i}$: 复合后 (n, i) 壳层能量; M : 电子数) $\beta = E_{n,i}/T_e$; $E_i \equiv \int_{E_{n,i}}^{\infty} e^{-x}/x \cdot dx$	
14	$\text{Cu3} + h\nu \xrightleftharpoons[r_{14}']{r_{14}} \text{Cu2} + h\nu$	$\frac{e^4 A_{12}}{32 \pi^2 \nu^3} \sqrt{\frac{M}{kT_e}}$, cm ³ /s (e : 光速; ν : 激光频率; M : 铜质量; A : 跃迁几率)	$r_{14}' = \frac{g_2}{g_3} r_{14}$
15	$\text{Cu3} \xrightleftharpoons[A_{11}]{A_{11}} \text{Cu1, Cu2} + h\nu$	$A_{11}: 1.39 \times 10^4$ $A_{12}: 2 \times 10^6$ $K_0 = \frac{\lambda_0}{8\pi} \frac{g_2}{g_1} A_{11} \sqrt{\frac{M}{2\pi kT_e}} \cdot \text{Cu1}^{1/2}$, $A_{11} = F \cdot A_{12}$ 共振吸收因子 ^[13] ; $F = \frac{1.60}{K_0 R [\pi \ln(K_0 R)]^{1/2}}$	

- [1] H. W. Messenger, *Laser Focus World*, 26(1990), 87.
- [2] J. J. Kim, *Opt. Quantum Electronics*, 23(1991), s469.
- [3] D. N. Astadjov *et al.*, *IEEE. J. Quantum Electronics*, 24(1988), 1927.
- [4] M. J. Kushner, B. E. Warner, *J. Appl. Phys.*, 54(1983), 2970.
- [5] P. Blau, I. Smilanski, *J. Appl. Phys.*, 72(1992), 849.
- [6] D. N. Astadjov *et al.*, *Opt. Commun.*, 56(1985), 279.
- [7] 梁宝根、陶永祥、尹宪华等, 中国激光, 激光器件专集, (1990), 38.
- [8] V. N. Borisov, A. M. Gorokhov *et al.*, *Sov. J. Quantum Electronics*, 21(1991), 1071.
- [9] N. K. Vuchkov *et al.*, *Opt. Quantum Electronics*, 23(1991), s549.
- [10] 程成、孙威, 物理学报, 41(1992), 1605.
- [11] 童景山、李敬, 流体热物理性质的计算(清华大学出版社, 北京, 1982), p. 288
- [12] 程成、孙威、唐传舜, 物理学报, 37(1988), 1150.
- [13] 康寿万、陈雁萍, 等离子体物理学手册(科学出版社, 北京, 1981), p. 46—94.
- [14] H. S. W. Massey, *Electronic and Ionic Impact Phenomena*, Vol. 1(Clarendon, 1969), p. 86.
- [15] 程成、孙威、唐传舜, 中国激光, 19(1992), 721.
- [16] K. Srigouri *et al.*, *Current Science*, 55(1986), 974.
- [17] 程成、孙威, 杭州师范学院学报, (3)(1993), 33.
- [18] 程成、孙威, 物理学报, 42(1993), 1779.
- [19] C. De Michelis, M. Mattioli, *Nucl. Fusion*, 21(1981), 677.
- [20] M. J. Redmon *et al.*, *Phys. Rev.*, A32(1985), 3354.
- [21] I. I. Fabrikant *et al.*, *J. Chem. Phys.*, 95(1991), 4966.
- [22] B. M. Smirnov, *Negative Ions* (Mc Graw-Hill Company, New-York, 1982), p. 87—166.
- [23] A. Z. Msezane, *Phys. Rev.*, A37(1988), 988.
- [24] P. Schwerdtfeger *et al.*, *J. Chem. Phys.*, 87(1987), 510.
- [25] A. V. Eletskii, B. M. Smirnov, *Sov. Phys. Usp.*, 28(1985), 956.
- [26] A. Z. Msezane, R. J. W. Henry, *Phys. Rev.*, A33(1986), 1631.
- [27] K. F. Scheibner, A. U. Hazi, R. J. W. Henry, *Phys. Rev.*, A35(1987), 4869.
- [28] 程成, 杭州师范学院学报, (6)(1989), 33.
- [29] M. J. Kushner, F. E. C. Culick, *J. Appl. Phys.*, 51(1980), 3020.
- [30] R. C. Weast, M. J. Astle, *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (Florida, 1982), E-346.
- [31] K. Srigouri *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 61(1987), 859.

A SELF-CONSISTENT KINETICS MODEL OF CuBr LASER WITH HYDROGEN ADDITIVES

CHENG CHENG

(Department of Physics, Hangzhou Normal College, Hangzhou 310012)

SUN WEI

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 8 August 1994)

ABSTRACT

A comprehensive and self-consistent kinetics model of CuBr laser with hydrogen additives is presented. The radial distribution and time variation of population of the laser levels, laser power, gas temperature, electron temperature and density are described systematically. The results are compared with the experimental measurement.

PACC: 4255