

# 纵向脉冲放电的 Ne-CuBr 紫外激光参量的数值研究 \*

毛邦宁 陈 钢 王煜博 陈 立 潘伯良<sup>†</sup>

(浙江大学物理系 杭州 310027)

(2006 年 7 月 10 日收到 2006 年 9 月 15 日收到修改稿)

建立了一个描述纵向脉冲放电的 Ne-CuBr 紫外激光的动力学模型, 数值计算了实验中主要参量对激光性能的影响, 给出了激光输出特性随缓冲气压、工作温度和激光管口径之间的变化关系, 定量解释了已有的实验结果, 为进一步提高激光输出性能提供了依据.

关键词: Ne-CuBr 紫外激光, 脉冲放电, 参量研究

PACC: 4255H, 5280P, 4260H

## 1. 引 言

纵向脉冲放电的 Ne-CuBr 铜离子紫外激光能提供瓦级功率的多谱线( 248.6 nm—270.3 nm )紫外激光, 在微电子技术、材料处理和基因工程等领域有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>. 该类激光的技术线路和工作方式类似于较成熟的输出 511/578 nm 波长的 CuBr 铜原子蒸气激光, 具有放电稳定和工作寿命长等特点, 不但弥补了先前空心阴极放电的铜离子激光寿命短(数小时)和稳定性差等不足<sup>[2-4]</sup>, 而且其中一条 248.6 nm 紫外激光谱线可应用在波长为 248.5 nm 的 KrF 准分子激光的注入锁模系统中, 并有望研制成稳定运转的实用化器件. 自 1999 年 Vuchkov 研究小组首次报道纵向脉冲放电的 Ne-CuBr 铜离子紫外激光以来<sup>[5]</sup>, 在短短的几年里, 该类激光得到了迅速发展, 最大激光平均功率已从开始的 3 mW 提高到目前的 1.3 W<sup>[6]</sup>, 在 300—500 mW 平均功率水平下获得了数百小时寿命的实用结果, 显示出良好的发展势头.

纵向脉冲放电的 Ne-CuBr 铜离子紫外激光的参量研究目前还主要在实验阶段, 有关从激光动力学过程进行参量优化的研究还未见报道. 由于实验研究具有一定的局限性, 不能全面直观地解释工作参量对激光输出特性的影响, 更不能揭示其内在激光机理, 故本文拟通过建立一个描述激光动力学过程

的物理模型, 对激光输出特性随工作参量的变化关系进行了全面的数值计算, 获得了与实验一致的计算结果并给出定量和定性的解释, 为进一步的实验工作提供了指导.

## 2. 模型描述

根据放电条件的不同, 在铜离子中可以实现 248.6 nm—270.3 nm 多条紫外激光谱线, 本文主要针对增益比较强的 248.6 nm 紫外激光建立动力学模型. 模型主要包括一个描述外部激励电路的模型和一个描述放电等离子体中各种微观粒子间相互作用的模型, 包含了铜原子、氖原子、铜离子和 Br 离子等相关能级以及电子密度、电子温度、气体温度和腔内光强等微观参量的变化方程.

### 2.1. 激励电路模型

不同的激光机理应选择不同类型的放电激励电路, 根据 Ne-CuBr 铜离子紫外激光上、下能级的抽运和排空机理以及已有的文献报道, 模型选用实验上采用的一种新型相互作用电路( interactive circuit, IC )如图 1 所示. 和以往的 IC 不同的是在连接激光管阴极和阳极的  $C_3$  和  $C_4$  电容之间增加了一个平衡电感  $L$ , 这种结构能在较细的激光管和低气压下实现稳定放电, 有关该电路的工作特性在文献 7 中已作了详细的描述.

\* 惯性约束聚变技术探索基金( 批准号 2004AA84TS04 )、国家自然科学基金( 批准号 :10374081,10574111 )和中国博士后科学基金( 批准号 : 2004036482 )资助的课题.

† E-mail: pbl66@zju.edu.cn

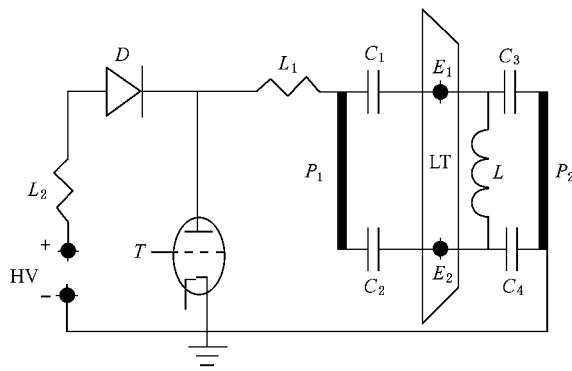


图 1 激励电路示意图

## 2.2. 铜离子能级速率方程

图 2 为模型考虑的铜离子部分能级示意图。模型中有关铜原子和氖原子能级的动力学过程及相关速率系数参见文献[8]的报道,这里只给出了铜离子激光上、下能级以及铜离子亚稳态和基态的速率方程,分别用  $\text{Cu}^{+u}$ 、 $\text{Cu}^{+l}$ 、 $\text{Cu}^{+m}$  和  $\text{Cu}^+$  表示,  $\text{Ne}^m$  和  $\text{Ne}^+$  代表氖原子亚稳态和氖离子基态。

$$\frac{d\text{Cu}^{+u}}{dt} = K_{\text{CT}} \cdot \text{Ne}^+ \cdot \text{Cu} + \sum_i k_i \cdot (\text{Cu}^+)_i \cdot n_e \\ + \sum_k \gamma_k \cdot (\text{Cu}^+)_k \cdot n_e - \sum_i A_{3i} \cdot \text{Cu}^{+u} \\ - \sum_k k_k \cdot \text{Cu}^{+u} \cdot n_e - \sum_i \gamma_i \cdot \text{Cu}^{+u} \cdot n_e \\ - I_p \cdot \gamma_0 (h \cdot \nu) - \nabla \cdot \bar{\Gamma}, \quad (1)$$

$$\frac{d\text{Cu}^{+l}}{dt} = K_{p_2} \cdot \text{Ne}^m \cdot \text{Cu} + \sum_i k_i \cdot (\text{Cu}^+)_i \cdot n_e \\ + \sum_k \gamma_k \cdot (\text{Cu}^+)_k \cdot n_e + \sum_k A_{k2} \cdot (\text{Cu}^+)_k \\ - \sum_k k_k \cdot \text{Cu}^{+l} \cdot n_e - \sum_i \gamma_i \cdot \text{Cu}^{+l} \cdot n_e \\ + I_p \cdot \gamma_0 (h \cdot \nu) - \sum_i A_{2i} \cdot \text{Cu}^{+l} \\ - \nabla \cdot \bar{\Gamma}, \quad (2)$$

$$\frac{d\text{Cu}^{+m}}{dt} = \kappa \cdot \text{Cu}^+ \cdot n_e + \sum_k \gamma_k \cdot (\text{Cu}^+)_k \cdot n_e \\ + \sum_k A_{k1} \cdot (\text{Cu}^+)_k + K_{p_1} \cdot \text{Ne}^m \cdot \text{Cu} \\ - \sum_k k_k \cdot \text{Cu}^{+m} \cdot n_e - \gamma \cdot \text{Cu}^{+m} \cdot n_e \\ - \nabla \cdot \bar{\Gamma}, \quad (3)$$

$$\frac{d\text{Cu}^+}{dt} = \kappa_i \cdot \text{Cu} \cdot n_e + \sum_i \kappa_i \cdot \text{Cu}^* \cdot n_e \\ + \sum_k \gamma_k \cdot (\text{Cu}^+)_k \cdot n_e - \alpha_i \cdot \text{Cu}^+ \cdot n_e^2$$

$$- \nabla \cdot \bar{\Gamma}. \quad (4)$$

方程(1)–(4)右边各项的脚标  $i$  和  $k$  分别对应所给能级的较低和较高能级,  $\kappa$  和  $\gamma$  分别是激励(电离)和消激励速率系数,  $A$  是相应的辐射衰减跃迁概率,  $K_{p1}, K_{p2}$  是 Penning 碰撞速率系数,  $K_{\text{CT}}$  是电荷交换反应速率系数,  $I_p$  是腔内光强,  $\gamma_0$  和  $\nu$  分别是增益系数和激光频率。

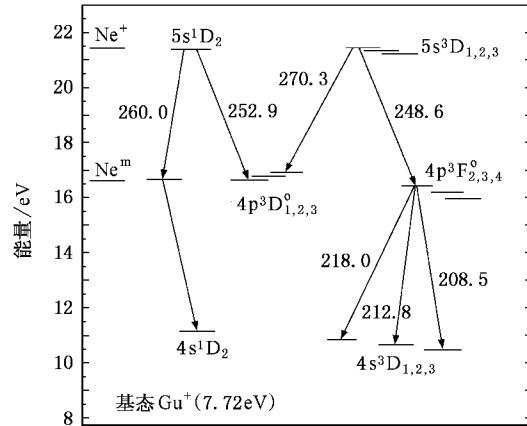


图 2 铜离子紫外激光能级、激光跃迁和辐射过程示意图

## 2.3. 腔内光强变化方程

$$\frac{dI_p}{dt} = (c I_p \gamma_0 L_0 / L_c) - I_p d([1/2 L_c] \ln [1/R_1 R_2]) \\ + (A_1 \text{Cu}^{+u} h \nu c d\Omega / 4\pi), \quad (5)$$

式中  $L_0$  和  $L_c$  分别表示激光介质和谐振腔长度,  $R_1$  和  $R_2$  为腔镜的反射率,  $c$  是光速,  $d\Omega/4\pi$  为立体角。右边第一项代表光通过增益系数为  $\gamma_0$  的介质引起的受激辐射, 第二项表示腔镜的反射损耗, 第三项为建立激光场所需的自发辐射。

## 2.4. 电子温度变化方程

$$\frac{d(1.5 n_e k_B T_e)}{dt} \\ = \frac{n_e e^2 E^2}{m_e \nu_t} + \sum_{ij} \gamma_{ij} n_e N_j \varepsilon_{ij} + \sum_j \eta_p C_u N_j \varepsilon_p \\ + \sum_{ij} \beta_m N_e^* N_e^* \varepsilon_m - 2 m_e \sum_j (\nu_j / m_j) \\ \cdot 1.5 n_e k_B (T_e - T_0) - \sum_{ij} \kappa_{ij} n_e \varepsilon_{ij}, \quad (6)$$

方程(6)考虑了各类粒子通过电子碰撞从能级  $\varepsilon_i$  跃迁到能级  $\varepsilon_j$  ( $\varepsilon_i < \varepsilon_j$ ,  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_j - \varepsilon_i$ )过程中对电子温度的影响,  $m_j$  表示重粒子  $N_j$  的质量,  $\nu_j$  为电子与重粒

子间的碰撞频率,  $k_B$  是玻尔兹曼常数. 右边第一项表示电子从纵向电场  $E$  获取能量, 第二和最后一项分别代表重粒子和电子通过超弹性碰撞和非弹性碰撞导致电子能量的增加和损耗, 第三和第四项各表示 Penning 碰撞和亚稳态氛原子间的电离碰撞引起的电子能量增加, 第五项代表电子与重粒子间的弹性碰撞导致的能量损耗.

### 3. 计算结果和讨论

利用文献 [7, 8] 中的电路模型、铜原子和氛原子能级的速率方程, 再结合本文中铜离子能级的速率方程(1)–(4), 以及电子温度、腔内光强和电子密度(等于所有正离子密度之和)的变化方程, 组成一维线性微分方程组, 用微分方程求解器 CVODE, 采用向后差分法(BDF)进行数值求解. 根据实验中的激光管几何尺寸、放电参量、氖气压强和运转温度等参数, 进行多周期运行, 得到各方程自洽的边界条件, 再进行数值计算分析, 获得各微观参量的时间演化行为, 研究激光管尺寸和宏观实验条件对激光性能的影响, 并和实验结果进行对比, 进一步分析其内在机理.

#### 3.1. 激光管电流

脉冲放电激励的气体激光器中, 平均电子温度  $T_e$  的变化行为最为重要, 由于  $T_e$  的实际测量比较困难, 所以模型中电子温度的模拟也最为关键. 从电子温度的表达式可以看出, 电子温度和电流变化行为密切相关, 电流脉冲的大小和前沿上升率主要决定了放电等离子体中电子温度的变化, 而电流脉冲可用 Person410 儒可夫斯基线圈准确测量. 图 3 是模型计算和实验测量得到的电流脉冲波形, 可以看出两者的前沿非常一致, 而后沿的差异主要是由电子温度下降后, 等效的等离子体电阻和实际放电管中的电阻存在一定差异导致的, 这对放电期间通过电子碰撞引起的铜和氛原子的激励和电离影响不大.

#### 3.2. 激光功率和缓冲气压的关系

缓冲气体在放电激励的气体激光器中起着能量载体和维持稳定放电的作用, 在许多金属蒸气激光中, 都存在着一个最佳的工作气压. 铜离子紫外激光的上能级主要通过放电余辉早期基态  $\text{Ne}^+$  和基态  $\text{Cu}$  的电荷交换反应得到有效布居, 为了产生足够的

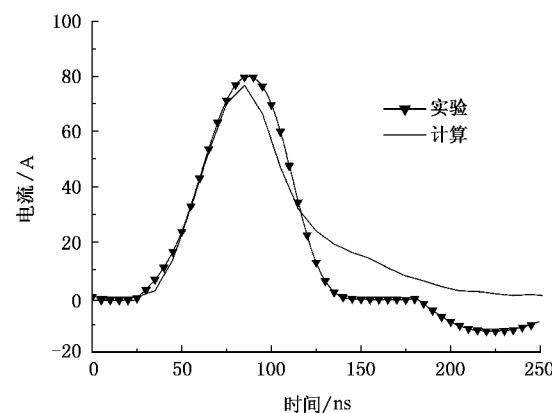


图 3 实验和模拟计算的放电管电流脉冲

基态  $\text{Ne}^+$  密度, 只能工作在较低的气压下. 图 4 给出了铜离子的 248.6 nm 紫外激光平均功率随缓冲气压变化的计算和实验曲线, 从图中看到, 虽然两条曲线的气压范围不同(理论从 0.5 kPa—2.7 kPa, 实验从 1.1 kPa—2.0 kPa), 但上升和下降的趋势基本一致并存在一个相同的最佳气压(1.7 kPa). 下面从微观动力学角度分析其内在原因: 在相同工作温度条件下, 放电等离子体的电子温度分布和缓冲气压对基态  $\text{Ne}^+$  和基态  $\text{Cu}$  的时间行为起到重要作用. 图 5 计算了气压从 0.5 kPa—2.7 kPa 变化范围内等离子体中电子温度  $T_e$  的时间演化过程. 由图知, 随着气压的增加,  $T_e$  的峰值不断减小, 从最低气压时的 7.2 eV 减小到 4.5 eV 附近, 这与电子温度表达式(6)中第一项的弹性碰撞频率  $\nu_e$  正比于缓冲气压  $P_{\text{Ne}}$  是一致的. 对  $\text{Ne}-\text{CuBr}$  铜离子紫外激光而言, 获得足够的基态  $\text{Ne}^+$  和基态  $\text{Cu}$  是产生激光的关键所在. 增加氖压和提高电子温度有利于基态  $\text{Ne}^+$  密度的增加, 但两者是相互制约的, 而放电余辉早期基态  $\text{Cu}$  密度的快速增加要求降低电子温度. 由此可知, 在一定放电条件下,  $\text{Ne}-\text{CuBr}$  铜离子紫外激光存在一个最佳缓冲气压.

#### 3.3. 激光输出功率和管径的关系

放电管几何尺寸对激光输出性能的影响比较大, 一般来说, 为了提高激光功率, 需增加激光管的口径和激活区体积, 但在铜离子紫外激光器中, 口径太大对激光输出性能反而不利, 这主要和该激光下能级的排空和激励机理有关. 铜离子激光下能级的排空主要是通过向较低的亚稳态能级的自发辐射, 由于亚稳态离子较长的辐射寿命和较高的粒子数密

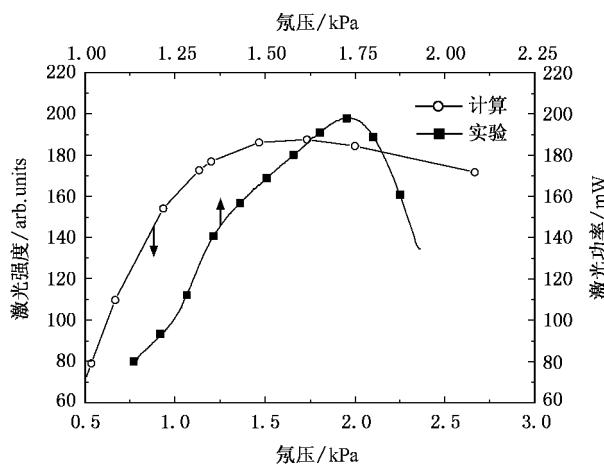


图 4 激光功率随缓冲气压的变化关系

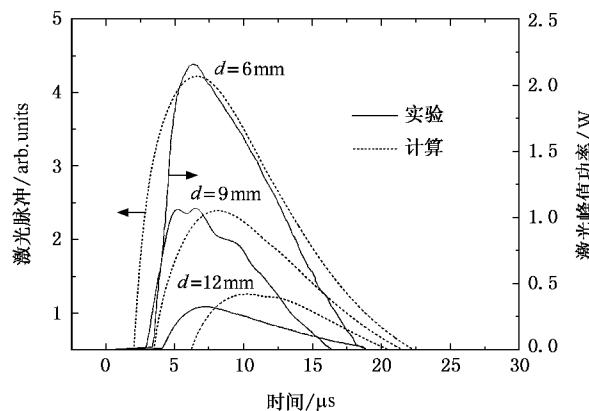


图 6 管径对激光输出特性的影响

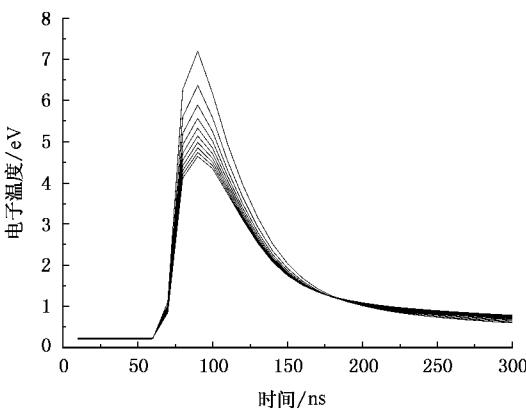


图 5 电子温度分布随缓冲气压的变化关系

度,在激光下能级与亚稳态之间产生显著的辐射俘获效应使激光下能级得到布居。文献[9]详细讨论了激光管口径对辐射俘获效应的影响,认为口径越小,越不易发生辐射俘获效应,从而有利于下能级的排空。图6比较了不同激光管口径时实验和计算得到的激光脉冲的相对大小和出现时刻,当激光管直径 $d$ 分别为12 mm、9 mm和6 mm时,实测峰值激光功率从0.26 W增加到了2.2 W<sup>[6]</sup>,提高了8.5倍。计算结果同样表明激光脉冲的相对强度从12 mm口径时的1.2增加到6 mm时的4.2,虽然增加的幅度和实验值存在一定差异,却很明显地反应出激光功率随管径减小而增加的规律,激光脉冲出现的时刻也随管径减小而提前,说明管径小有利于下能级的排空,从而很快形成粒子数反转,计算和实验结果基本一致。

### 3.4. 激光输出功率和工作温度的关系

这里所说的工作温度是指用来控制CuBr蒸气密度的电炉温度,可在所需范围内单独调节。图7中大图给出的是实验中3个温度值时激光输出强度的变化,温度从 $T_1$ 增加到 $T_3$ ,输出强度在 $T_2$ 时达到最大值,小图部分是模型计算得到的结果,在温度上升的过程中,激光输出强度先增加,随后减小,表明工作温度也存在一个最佳值,客观反映了实验参量变化对激光输出特性的影响。

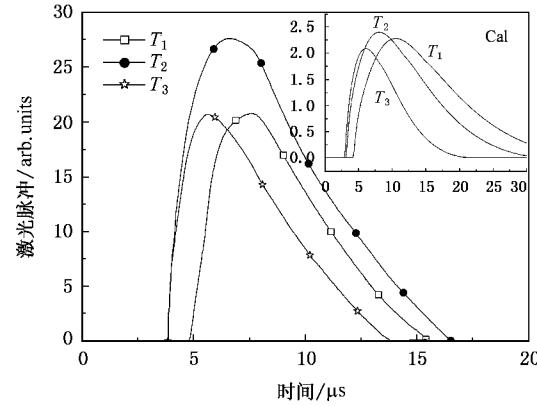


图 7 激光脉冲强度和工作温度的变化关系

## 4. 结 论

激光器的参量研究是进行最佳化设计的重要工作,对于脉冲放电激励的气体激光器,其缓冲气压、激光放电管尺寸、谐振腔参数、输入功率、脉冲重复频率和工作温度等都会对激光器的运转有影响。本文主要针对实验上很难直观解释的几个参量变化进

行了数值研究,计算结果和实验基本符合,同时从微观动力学角度定量和定性解释了主要参量对激光输出特性的影响,为认识内在激光机理提供了依据,也为实验上参量最佳化设计提供了可靠的理论指导.

- [1] Vuchkov N K, Temelkov K A, Zahariev P V, Sabotinov N V 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 511
- [2] McNeil J R, Collins G J, Persson K B, Franzen D L 1976 *Appl. Phys. Lett.* **28** 207
- [3] Hernqvist K G 1977 *IEEE J. Quantum Electron.* **13** 929
- [4] Auschwitz B, Eichler H J, Wittwer W 1980 *Appl. Phys. Lett.* **36** 804
- [5] Vuchkov N K, Temelkov K A, Sabotinov N V 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 1799
- [6] Vuchkov N K, Temelkov K A, Zahariev P V, Sabotinov N V 2001

- [7] Chen G, Pan B L, Chen K, Yao Z X 2003 *J. Optoelectron. + laser* **14** 1142 (in Chinese) [陈钢、潘佰良、陈坤、姚志欣 2003 光电子·激光 **14** 1142]
- [8] Jin Y, Pan B L, Chen G, Chen K, Yao Z X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1799 (in Chinese) [金毅、潘佰良、陈钢、陈坤、姚志欣 2004 物理学报 **53** 1799]
- [9] Chen G, Pan B L, Mao B N, Xia T T, Yao Z X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 197 (in Chinese) [陈钢、潘佰良、毛邦宁、夏婷婷、姚志欣 2006 物理学报 **55** 197]

## Numerical study on parameters for a longitudinal pulsed discharge Ne-CuBr UV laser<sup>\*</sup>

Mao Bang-Ning Chen Gang Wang Yu-Bo Chen Li Pan Bai-Liang<sup>†</sup>

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

(Received 10 July 2006; revised manuscript received 15 September 2006)

### Abstract

A kinetic model is developed to describe the Ne-CuBr UV laser action in a longitudinal pulsed discharge. The influence of main parameters on the laser output characteristics is numerically calculated. The dependence of laser intensity on the buffer gas pressure, the operation temperature and the tube radius is found out and the experimental results are explained quantitatively. The modelling results can provide a reference to improve the laser output characteristics.

**Keywords** : Ne-CuBr UV laser, pulsed discharge, parametric study

**PACC** : 4255H, 5280P, 4260H

<sup>\*</sup> Project supported by the Inertial Confinement Fusion Research Foundation (Grant No. 2004AA84TS04), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10374081, 10574111), and China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2004036482).

<sup>†</sup> E-mail: pbl66@zju.edu.cn