

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0206-04

# CuBr 紫外激光动力学模型

陈 钢, 潘佰良, 姚志欣

(浙江大学物理系, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 分析了纳秒脉冲纵向放电的 Ne-CuBr 紫外激光的动力学过程, 建立了一个完整自洽的物理模型。计算了放电参量、主要能级的粒子数密度、电子温度、气体温度、光脉冲强度等的时间演化行为, 明确了激光上、下能级粒子数反转的形成过程和激光发射机制, 定量解释了放电管口径、放电参量等对激光输出特性的影响。

**关键词** 激光物理; Ne-CuBr; 紫外激光; 动力学过程; 纵向脉冲放电

**中图分类号** TN241; TN248.2<sup>+</sup>5 **文献标识码** A

## Dynamic Model for CuBr UV Laser

CHEN Gang, PAN Bai-liang, YAO Zhi-xin

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

**Abstract** The dynamic process of Ne-CuBr UV laser in nanosecond pulsed longitudinal discharge is analyzed, and a comprehensive self-consistent physical model is developed. The temporal evolutions of discharge parameters, main particle densities, electron and gas temperatures, and the laser pulse intensity are numerically calculated. The process of population inversion between the upper and the lower laser levels as well as the lasing mechanism are illustrated. The influences of the tube radius and discharge parameters on the laser output characteristic are also explained quantitatively.

**Key words** laser physics; Ne-CuBr; UV laser; kinetic process; pulsed longitudinal discharge

## 1 引 言

紫外激光无论在科研还是实际应用中都是比较短缺的激光光源, 纳秒脉冲纵向放电的 Ne-CuBr 铜离子紫外激光, 弥补了先前空心阴极放电的铜离子激光寿命短(数小时)、稳定性差等不足<sup>[1~4]</sup>, 其输出的紫外谱线有广阔的应用前景, 是近几年金属蒸气激光领域里的一个研究热点。直到 1999 年末, 才由 N. K. Vuchkov 等在纳秒脉冲放电的 Ne-CuBr 中首次实现了波长为 248.6 nm, 252.9 nm, 260.0 nm 和 270.3 nm 四条铜离子紫外谱线的激光振荡, 其激光输出功率仅为 3 mW<sup>[5]</sup>。该类铜离子紫外激光的技术线路和工作方式类似于较成熟的输出 511 nm/578 nm 波长的铜原子蒸气激光, 具有放电稳定和工作寿命长等特点, 得到了迅速发展。最大激光平均功率已经提高到目前的 1.3 W<sup>[6]</sup>, 在 300 mW 平均功率水平下获得了 100 h 寿命的实用结

果, 显示出良好的发展势头。

研究该类激光的动力学过程不仅可以获得许多实验上难以测量的微观参量的时间演化行为, 而且可以对进一步的实验工作进行指导。本文分析了 Ne-CuBr 放电等离子体中主要粒子的微观过程, 包括卤化物的放电分解和复合再生、等离子体之间的各种碰撞、电离、复合和电荷交换反应等以及相关激光跃迁和辐射衰减过程。通过理论估算获得了相关过程的截面和速率系数, 建立并求解了一个描述 Ne-CuBr 放电等离子体中紫外铜离子激光动力学过程的物理模型。

## 2 主要激光机制和模型描述

### 2.1 主要激光机理

图 1 是铜离子和氩原子部分能级示意图, 从图 1 可以看出激光上能级现氩离子基态的能级高度相

**基金项目:** 惯性约束聚变技术探索基金(2004AA84TS04)、国家自然科学基金(10374081, 10574111)和中国博士后科学基金(2004036482)资助课题。

**作者简介:** 陈 钢(1975—), 男, 陕西西安人, 浙江大学物理系博士后, 主要从事激光物理、金属蒸气激光、激光动力学模型研究。E-mail: phygc@zju.edu.cn

当,可通过基态氖离子和基态铜原子间的电荷交换

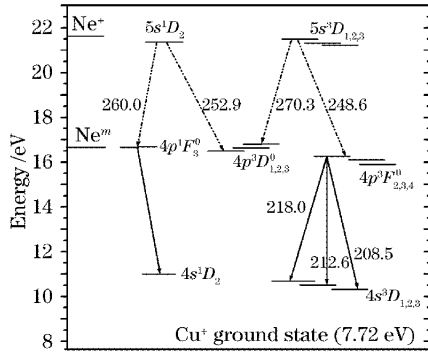
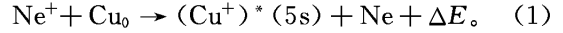


图1 铜离子紫外激光相关能级、激光跃迁和辐射过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of Cu<sup>+</sup> UV laser energy levels, laser transition, and radiation

反应得到有效激励



## 2.2 动力学模型描述

针对增益比较强的 248.6 nm 紫外激光建立一个完整自洽的模型,主要包括一个描述外部激励电路的模型<sup>[7]</sup>和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、溴离子等相关能级以及电子密度、电子温度、气体温度、腔内光强等粒子数密度的变化方程。

模型考虑了铜原子、氖原子能级粒子数密度速率方程<sup>[8]</sup>,并且给出了铜离子激光上、下能级以及铜离子亚稳态、基态的速率方程,分别用 Cu<sup>+u</sup>, Cu<sup>+l</sup>, Cu<sup>+m</sup>, Cu<sup>+</sup>表示, Ne<sup>m</sup> 和 Ne<sup>+</sup> 代表氖原子亚稳态和氖离子基态。

$$\begin{aligned} \frac{d\text{Cu}^{+u}}{dt} = & K_{\text{CT}} \cdot \text{Ne}^+ \cdot \text{Cu} + \sum_i k_i \cdot (\text{Cu}^+)_i \cdot n_e + \sum_k \gamma_k \cdot (\text{Cu}^+)_k \cdot n_e - \sum_i A_{3i} \cdot \text{Cu}^{+u} - \\ & \sum_k k_k \cdot \text{Cu}^{+u} \cdot n_e - \sum_i \gamma_i \cdot \text{Cu}^{+u} \cdot n_e - B \cdot I_p \cdot \Delta N - \nabla \cdot \bar{\Gamma}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\text{Cu}^{+l}}{dt} = & K_{p_2} \cdot \text{Ne}^m \cdot \text{Cu} + \sum_i k_i \cdot (\text{Cu}^+)_i \cdot n_e + \sum_k \gamma_k \cdot (\text{Cu}^+)_k \cdot n_e + \sum_k A_{k2} \cdot (\text{Cu}^+)_k - \\ & \sum_k k_k \cdot \text{Cu}^{+l} \cdot n_e - \sum_i \gamma_i \cdot \text{Cu}^{+l} \cdot n_e + B \cdot I_p \cdot \Delta N - \sum_i A_{2i} \cdot \text{Cu}^{+l} - \nabla \cdot \bar{\Gamma}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\text{Cu}^{+m}}{dt} = & \kappa \cdot \text{Cu}^+ \cdot n_e + \sum_k \gamma_k \cdot (\text{Cu}^+)_k \cdot n_e + \sum_k A_{k1} \cdot (\text{Cu}^+)_k + K_{p_1} \cdot \text{Ne}^m \cdot \text{Cu} - \\ & \sum_k k_k \cdot \text{Cu}^{+m} \cdot n_e - \gamma \cdot \text{Cu}^{+m} \cdot n_e - \nabla \cdot \bar{\Gamma}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{d\text{Cu}^+}{dt} = \kappa_i \cdot \text{Cu} \cdot n_e + \sum_i \kappa_i \cdot \text{Cu}^* \cdot n_e + \sum_k \gamma_k \cdot \text{Cu}^{+*} \cdot n_e - \alpha_i \cdot \text{Cu}^+ \cdot n_e^2 - \nabla \cdot \bar{\Gamma}, \quad (5)$$

脚标  $i$  和  $k$  分别对应所给的较低和较高能级,  $\kappa$  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几率,  $K_{p_1}$ ,  $K_{p_2}$  是 Penning 碰撞速率系数,  $K_{\text{CT}}$  是电荷交换反应速率系数,  $I_p$  是腔内光子密度,  $B$  是受激辐射系数,  $\alpha$  是复合系数。腔内光子流量  $I_p$  的变化方程和电子温度的变化方程参见文献<sup>[8]</sup>,根据等离子体中电中性的要求,电子密度等于所有正离子密度之和。

## 3 计算结果和讨论

结合文献<sup>[7]</sup>中电路模型和方程(2)~(5),以及电子温度、电子密度、腔内光强的变化方程,组成一维线性微分方程组。利用微分方程求解器 CVODE,根据实验中的激光管几何尺寸、放电参量

以及工作参量气压、温度等参量,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。从而可以探讨激光发射的规律,明确激光上下能级激励和消激励的主要途径,研究激光管尺寸及宏观实验条件对激光性能的影响,并和实验结果进行对比,为提高激光输出特性提供理论依据。

### 3.1 激光管电流和电子温度

图 2 是模型计算得到的电流和平均电子温度的时间演化行为,可以看出计算得到的电流脉冲波型和实验所测量的波形非常一致<sup>[9]</sup>,从而可以保证电子温度计算的准确性;从图 2 还可以看出,平均电子温度的最大值约 4 eV,这个数值符合一般金属蒸气激光中等离子体的参量<sup>[8]</sup>。

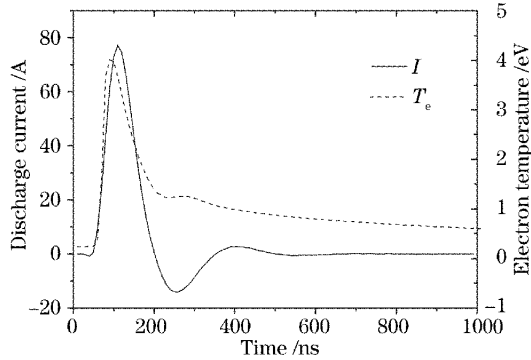


图 2 模拟的电流和电子温度波形

Fig. 2 Waveforms of simulated discharge current  $I$  and electron temperature  $T_e$ .

### 3.2 主要粒子数密度的时间演化行为

图 3 显示了铜原子、铜离子基态、亚稳态粒子数密度的时间演化行为,可以看出,在放电激励期间,铜原子被激发到各激发态,密度迅速下降,与此同时,铜离子密度快速上升。由于铜原子较低的电离能,约 90% 以上的铜原子被电离了,铜离子的亚稳态也在放电初期得到很强的布居,这和较高密度的铜离子基态有密切关系。铜离子基态在放电结束后,由于离子复合、电子碰撞消激发、中和、扩散等过程开始慢慢下降,铜原子密度开始上升。在放电余晖期约  $5 \mu\text{s}$  的时刻,铜原子密度恢复到超过铜离子密度,大约有 90% 的铜原子恢复到基态,这为铜离子激光上能级通过  $\text{Ne}^+$  和铜基态原子电荷交换反应实现布居提供了有利条件。这和实验上观测到的紫外激光在放电余晖期  $4 \sim 5 \mu\text{s}$  开始出现吻合得非常好<sup>[9]</sup>,从理论模拟上说明了激光出现时刻的微观机制。图 4 反应了不同激光管口径时,激光脉冲的相对大小和光脉冲出现时刻,可以看出管径减小,激光脉冲强度增大,同时激光提前出现<sup>[9]</sup>,这主要和激

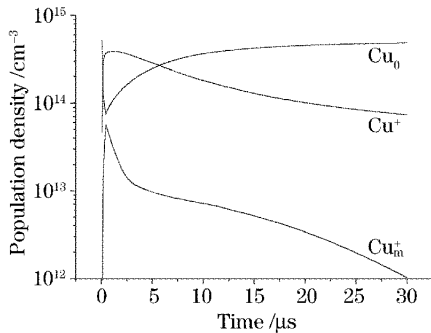


图 3 铜离子主要能级粒子数的时间行为

Fig. 3 Temporal behaviors of  $\text{Cu}^+$  main energy levels particles

光下能级的消激励过程密切相关<sup>[10]</sup>。

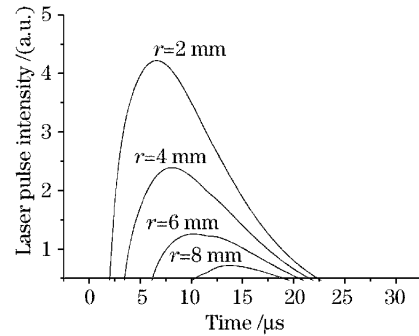


图 4 管径对激光输出特性的影响

Fig. 4 Influence of the tube radius on laser output

图 5 是在激光管半径为 2mm 的情况下计算得到的激光上下能级粒子数密度和激光脉冲波形的时间演化行为。在脉冲激发期间,激光上下能级由于电子碰撞激发也得到了一定布居密度,随着放电的结束,粒子数密度迅速下降。放电结束后  $\text{Ne}^+$  能维持较高的密度,随着铜原子密度的不断恢复,发生在  $\text{Ne}^+$  和铜原子之间的电荷交换反应使得激光上能级能够得到不断地布居。而激光下能级由于  $\text{Ne}$  原子亚稳态的 Penning 碰撞,也不断得到布居,由于电荷交换反应的速率和电子碰撞激发速率相比非常小,并且  $\text{Ne}^+$  的寿命较长,所以整个布居过程持续的时间将较长。图 5 反应出的激光脉冲持续时间大约有  $20 \mu\text{s}$ ,随着  $\text{Ne}^+$  密度的不断损耗,激光脉冲才渐渐消失,这和实验上得到的激光脉冲持续约  $20 \mu\text{s}$  的结果非常一致<sup>[6]</sup>。表明模型计算能够体现铜离子激光微观动力学过程,对激光上下能级的布居和消激励途径给出了明确的、定量的说明,对激光机理进行了深刻的阐述,对激光发射过程给出了非常直观的、准确的说明。

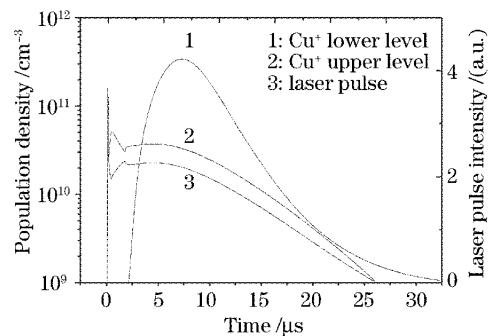


图 5 铜离子激光上下能级和激光脉冲

Fig. 5 Upper and lower levels and laser pulse of  $\text{Cu}^+$  laser

## 4 结 论

对纵向纳秒脉冲放电的 Ne-CuBr 中的铜离子紫外激光, 建立了一个完整的自洽的物理模型, 并进行了数值求解。数值计算和实验结果非常一致, 表明模型真实地反应了紫外铜离子激光的动力学过程。另外模型计算得到了实验上难以测量的各种微观粒子的时间演化行为, 有助于明确激光机理和阐明激光上、下能级布居和消激励途径, 并对激光发射过程给出了直观的表述, 对认识该类激光的动力学过程以及对实验中参量最佳化提供了理论依据。

### 参 考 文 献

- 1 J. R. McNeil, G. J. Collins, K. B. Persson *et al.*. Ultraviolet laser action from Cu II in the 2500-A region [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **28**(4): 207~209
- 2 K. G. Hernqvist. Continuous laser oscillation at 2703 Å in copper ion [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1977, **QE-13**(11): 929~934
- 3 R. Solanki, W. M. Fairbank Jr., G. J. Collins. Multiwatt operation of Cu II and Ag II hollow cathode lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**(12): 1292~1294
- 4 B. Auschwitz, H. J. Eichler, W. Wittwer. Extension of the operating period of an UV Cu II laser by admixture of argon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**(10): 804~805
- 5 N. K. Vuchkov, K. A. Temelkov, N. V. Sabotinov. UV lasing on Cu in Ne-CuBr pulse longitudinal discharge [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(12): 1799~1804
- 6 N. K. Vuchkov, K. A. Temelkov, P. V. Zaharier *et al.*. Influence of the active zone diameter on the UV-ion Ne-CuBr laser performance [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(12): 1538~1546
- 7 Chen Gang, Pan Bailiang, Chen Kun *et al.*. A novel excitation circuit used for CuBr laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(11): 1142~1145
- 8 陈 钢, 潘佰良, 陈 坤等. 用于 CuBr 激光器的一种新型激励电路 [J]. *光电子 • 激光*, 2003, **14**(11): 1142~1145
- 9 Jin Yi, Pan Bailiang, Chen Gang *et al.*. Numerical study on the terminating mechanisms of copper vapor laser pulse [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(6): 1799~1803
- 10 金 毅, 潘佰良, 陈 钢等. 铜蒸气激光脉冲终止机制的数值研究 [J]. *物理学报*, 2004, **53**(6): 1799~1803
- 9 N. K. Vuchkov, K. A. Temelkov, P. V. Zaharier *et al.*. Optimization of a UV Cu<sup>+</sup> laser excited by pulse-longitudinal Ne-CuBr discharge [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(4): 511~517
- 10 Chen Gang, Pan Bailiang, Mao Bangning *et al.*. Influence of the discharge tube aperture on the deexcitation of lower level in UV Cu<sup>+</sup> laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1): 197~201
- 11 陈 钢, 潘佰良, 毛邦宁等. 放电管口径对紫外铜离子激光下能级消激励的影响 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(1): 197~201