

磁约束铜蒸气放电中亚稳态 铜原子密度的测量*

李 军 陈清明 张 旺 谢明杰 李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室 武汉 430074)

提要 利用自吸收方法测量了磁约束铜蒸气放电余辉初期的铜 $^2D_{5/2}$ 亚稳态原子密度。对亚稳态原子的弛豫情况,同普通铜蒸气激光器进行了对比,分析了磁约束放电条件下亚稳态原子的弛豫机制。为建立重复频率运转的磁约束铜蒸气激光器提供了基础。

关键词 磁约束放电,铜蒸气激光,亚稳态原子密度,自吸收方法

1 引 言

近年来,我们将磁约束放电激励方式应用于 CO_2 气体激光器^[1,2],在放电稳定性及激光输出性能等方面都获得了非常好的实验结果^[3]。所谓磁约束放电激励,就是在普通的气体放电中引入与电场方向垂直的磁场,利用正交电磁场对电子的约束作用来影响放电激励过程。

最近,我们又将这种放电方式应用于金属激光器。我们设想利用磁约束效应,在低气压放电中获得高电离度,通过溅射作用获得金属蒸气,同时实现对金属原子的激励。目前,已在实验中获得了较好的溅射产生效果^[4],进一步的实验正在研究如何获得铜蒸气激光振荡。

铜蒸气激光器属自终止激光器,其激光下能级(亚稳态能级 $^2D_{3/2}$, $^2D_{5/2}$) 原子的堆积和弛豫对激光振荡能否形成起着决定性作用。因此,对随时间变化的铜原子亚稳态密度的测定分析,对于认识和细致研究铜蒸气激光动力学过程是非常重要的^[5,6]。本文利用自吸收方法测量了磁约束放电余辉初期的 $^2D_{5/2}$ 亚稳态铜原子密度,分析了亚稳态原子在这种低气压溅射放电中随时间的衰减变化机制。

2 自吸收方法测量亚稳态铜原子密度

自吸收方法是一种简单的直接测量方法,不需要专门的探测光源。为获得准确的测量结果,该方法要求被测吸收体的光学厚度尽可能小。实验装置如图 1 所示。磁约束放电电极为先前报道过^[4]的圆柱形电极,长 8 cm,放电区圆柱直径为 3 cm。放电产生的自发辐射光经放电腔一端的石英玻璃窗口入射到光栅单色仪(44 W)的入射狭缝上,单色仪的出射狭缝处设置有光电倍增管(R928)。光电倍增管的输出信号被送入存储示波器(Tektronics 2440)。实验中所用

* 国家自然科学基金资助项目。

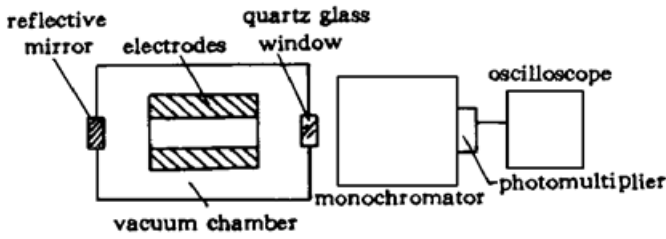


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

电源为一开关电源, 重复频率为 18~ 66 kHz。虽然该电源所提供的脉冲放电电流(上升时间 ≈ 500 ns)不能满足铜蒸气激光的快速激励要求, 但利用其进行放电余辉动力学研究是可行的。利用氩气作为放电缓冲气体, 通过测量铜 510.6 nm 跃迁线($^2P_{3/2} \rightarrow ^2D_{5/2}$) 的自吸收来确定 $^2D_{5/2}$ 亚稳态原子的密度。实验中, 单色仪的中心波长设置在 510.6 nm 处。

根据 Harrison 的自吸收方法^[7], 在有、无反射镜条件下(反射镜调正、调偏)单色仪接收的自发辐射光强 I_R 与 I_D 有如下关系

$$(I_R - I_D)/I_D = RG(k_0d) \tag{1}$$

其中
$$G(k_0d) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \{1 - \exp[-k_0d \exp(-\omega^2)]\} \exp[-k_0d \exp(-\omega^2)] d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \{1 - \exp[-k_0d \exp(-\omega^2)]\} d\omega} \tag{2}$$

$$\omega = (\ln 2)^{1/2} [2(\nu - \nu_0)/\Delta\nu_D] \tag{3}$$

R 为反射镜的反射率(98%), k_0 为频率 $\nu = \nu_0$ (中心频率) 处的吸收系数, d 为放电区长度(8 cm), $\Delta\nu_D$ 为多普勒线宽。(2) 式中已取谱线线型为多普勒线型, 这一近似在低气压放电条件下是适宜的。

在多普勒加宽条件下, 吸收常数^[7]

$$k_0 = (\ln 2)^{1/2} \lambda_0^2 g_u A_{ul} N_l / (4\pi^{3/2} g_l \Delta\nu_D) \tag{4}$$

λ_0 为中心波长, g_u 和 g_l 分别为上、下能级的统计权重, A_{ul} 为该谱线的自发辐射系数, N_l 为下能级粒子数密度。

通过测量 I_R 和 I_D , 由式(1) ~ (4) 可得到亚稳态原子密度 N_l 。图 2 给出了示波器记录的一组 I_R 、 I_D 随时间的变化关系。根据实验中的放电电流波形得到放电的余辉阶段从光强达到最大值时刻开始。

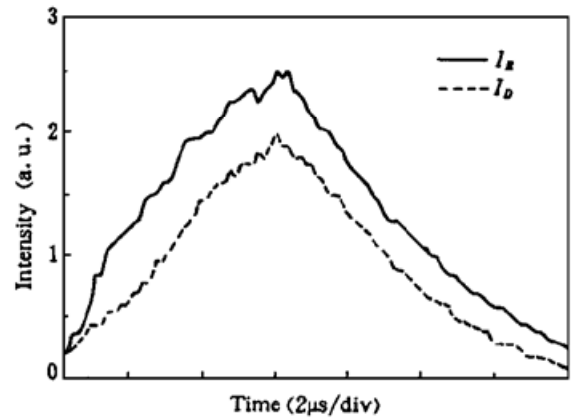


图 2 自发辐射光强随时间的变化

Fig. 2 Typical traces of the emission intensity

3 测量结果及分析

我们用温度计直接测量了放电区的气体温度, 得到平均温度为 400 K。利用公式^[7]

$$\Delta\nu_D = [2(2R \ln 2)^{1/2}/c](T/M)^{1/2} \nu_0 \tag{5}$$

得到多普勒线宽 $\Delta\nu_D$ 为 1.05×10^9 Hz。(5) 式中 R 为气体常数, c 为光速, T 为气体温度, M 为原子量。

图 3 给出了不同放电条件下 $^2D_{5/2}$ 亚稳态密度在余辉初期($< 10 \mu s$) 随时间的变化关系。从图中看到, 亚稳态密度最大值在 $10^{12} \sim 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 范围。由于基态密度至少比亚稳态密度高一个数量级^[8,9], 因此可以估计磁约束放电中溅射产生的基态铜原子密度达到 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。放电余辉存在的时间很短, 自吸收方法在测量时间上具有局限性, 只能测出余辉熄灭前

的原子密度。我们知道,铜蒸气激光器中亚稳态原子在这一阶段(余辉初期)的衰减是整个余辉阶段中最重要的过程^[5,6]。

三种情况下亚稳态原子密度的变化都很相似,呈现迅速衰减的趋势,这同普通铜蒸气激光器中的情况类似。这可能是由于放电结束导致的电子温度降低,使得电子与亚稳态原子的超弹性碰撞增加,从而使亚稳态原子的弛豫加快。图3中按指数衰减规律拟合所得曲线的衰减时间常数分别为 $3.9\ \mu\text{s}$ (曲线A), $3.5\ \mu\text{s}$ (曲线B)和 $4.7\ \mu\text{s}$ (曲线C)。这与文献[5,6]中的衰减时间常数接近。通过时间常数比较,我们看到,在相同的缓冲气体气压下,在较高的放电功率条件下的衰减要快一些。这可能是由于较高的放电功率产生的电子密度较高,导致亚稳态原子通过电子碰撞产生的弛豫较快。由此也进一步说明,电子碰撞弛豫是这一阶段亚稳态原子的主要弛豫方式。另外,我们从衰减时间常数的比较还得到,在相同的放电功率条件下,较高气压下亚稳态原子的衰减要缓慢一些。在磁约束放电中,放电气压相对较低($\leq 200\ \text{Pa}$),因此,亚稳态原子的扩散损失也是一个重要的弛豫机制。可以推测,在余辉后期,扩散弛豫成为主要的弛豫方式。

4 结 论

测量结果表明,所考察的磁约束放电在余辉阶段的亚稳态原子瞬时密度最大值在 $10^{12} \sim 2 \times 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$ 范围。由此推知,放电中溅射产生的基态铜原子密度达到 $10^{13} \sim 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ 。亚稳态原子在余辉初期呈现迅速弛豫,电子与亚稳态原子的超弹性碰撞是这一阶段的主要弛豫方式。由于工作气压较低,扩散弛豫可能是余辉后期的主要弛豫方式。

在铜蒸气激光器中,亚稳态原子在余辉阶段的主要弛豫过程发生在余辉初期,后期的缓慢弛豫通过与缓冲气体原子的碰撞及扩散损失过程来完成。从实验中看到,在磁约束放电中,亚稳态原子在余辉初期的弛豫机制及弛豫时间常数与一般的铜蒸气激光器中的情况类似,而扩散弛豫在这种低气压放电中,将在余辉后期起主要作用。因此,我们得到,采用重复快脉冲放电激励,在磁约束方式下将可能实现重复脉冲激光输出。

参 考 文 献

- 1 J. Li, Q. M. Chen. Electron energy distribution and transport coefficients in magnetically confined CO_2 lasers. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1993, **26**: 1541
- 2 Q. H. Xu, Q. M. Chen, J. Li. Monte Carlo simulation of electron transport coefficients in magnetically confined CO_2 gas laser discharges. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1994, **27**: 795
- 3 Q. M. Chen, H. Sun, F. Q. Zhou *et al.*. Two high power gas lasers excited by confined discharge. Pro-

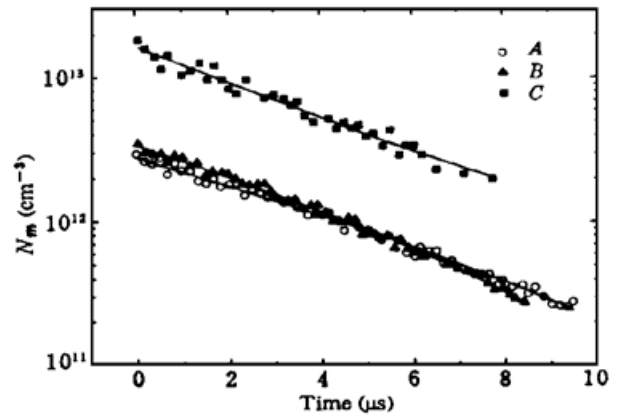


图3 亚稳态 $^2D_{5/2}$ 原子密度随时间的变化关系。放电条件分别为(缓冲气体气压和放电功率): (A) 100 Pa, 720 W; (B) 100 Pa, 1080 W; (C) 200 Pa, 1080 W

Fig. 3 Time dependence of the population density of the $^2D_{5/2}$ metastable state. The buffer gas (argon) pressure and the input power are: (A) 100 Pa, 720 W; (B) 100 Pa, 1080 W; and (C) 200 Pa, 1080 W

- ceedings of International Conference on Laser's 93, Lake Tahoe, Nevada, 1993, 241
- 4 J. Li, Q. M. Chen, W. Zhang *et al.*. Magnetically confined discharge for metal vapor lasers. Proceedings of 1995 International Conference on Optoelectronics and Lasers, Hangzhou, China, 1995, 283
 - 5 A. A. Isaev, G. G. Petrash, I. V. Ponomarev. Relaxation of metastable atoms during the afterglow in a copper vapor laser. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1986, **16**(11) : 1512
 - 6 A. Ya. Litvinenko, V. I. Kravchenko, A. N. Egorov. Measurement of the lifetimes of the lower active levels of a copper vapor laser. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1983, **13**(6) : 778
 - 7 J. A. Harrison. Self-absorption in an electrodeless discharge in hydrogen and helium. *Proc. Phys. Soc.*, 1959, **73**(474) : 841
 - 8 W. T. Walter, N. Solimene, M. Piltch *et al.*. Efficient pulsed gas discharge lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1966, **QE-2**(9) : 474
 - 9 A. K. Anders, R. C. Tobin. Atomic populations of copper and gold in a room-temperature metal vapor laser. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(7) : 2794

Measurements of the $^2D_{5/2}$ Metastable Level Population Densities in a Magnetically Confined Copper Vapor Discharge

Li Jun Chen Qingming Zhang Wang Xie Mingjie Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract The $^2D_{5/2}$ metastable level population densities in the early afterglow of a magnetically confined copper vapor discharge were measured with the self-absorption method. The relaxation of the metastable atoms was investigated in comparison with that in conventional copper vapor laser discharges. Analyses of the relaxation mechanism in the magnetically confined discharge were given.

Key words magnetically confined discharge, copper vapor laser, metastable atom density, self-absorption method