

磁约束铜蒸气放电中基态铜原子密度的测量

李 军^a 陈清明^b

(^a武汉工业大学材料复合新技术国家重点实验室, 武汉, 430070)

(^b华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 利用吸收方法测量了磁约束铜蒸气放电中的基态铜原子密度, 近室温的气体放电条件下得到铜原子密度达 10^{14}cm^{-3} 量级。结果表明, 磁约束放电能够产生激光激励过程所需密度的铜原子蒸气, 这为磁约束放电铜蒸气激光器的可行性研究提供了一个重要结论。

关键词: 磁约束放电 铜蒸气激光 基态原子密度

Measurement of the ground state copper atom density in a magnetically confined discharge

Li Jun

(State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and
Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070)

Chen Qingming

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract Using absorption method, we measured the ground state copper atom density in a magnetically confined discharge, and found that the density of the atom was the degree of 10^{14}cm^{-3} , and was suited to copper vapor laser action. Comparing with conventional copper vapor lasers, the discharge gas temperature was quite lower. So the results show the feasibility of applying the magnetically confined discharge in copper vapor lasers.

Key words: magnetically confined discharge copper vapor laser ground state density

汽车缸套的表面硬度提高 3 倍~ 4 倍, 该涂料完全可满足激光热处理加工的需要。(2) 对于 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光, 滑石粉、碳黑的吸收率明显高于 SiO_2 , 前两者更适于做 CO_2 激光热处理涂料的骨料。(3) 在 $10.6 \mu\text{m}$ 波长处, 涂料的吸收率主要取决于骨料, 粘合剂对该波长处涂料的吸收率影响较小。(4) 在合适的激光热处理工艺参数范围内, 涂料种类对被处理区内的化学成分在处理前后的变化无明显影响。

参 考 文 献

- 1 关振中主编. 激光加工工艺手册. 北京: 中国计量出版社, 1998: 150
- 2 闫敏禾, 钟敏霖. 高功率激光加工及其应用. 天津: 天津科学技术出版社, 1994: 97
- 3 苏宝娉, 王哲恩, 罗乃草 *et al.* 激光, 1982; 9(8): 533~ 536

作者简介: 袁 斌, 男, 1960 年 8 月出生。副教授。现从事气体激光器件及激光应用技术的研究。

引 言

近年来提出的气体激光的磁约束放电激励方式已在 CO_2 激光器中得到应用, 其放电稳定性及激光输出性能等方面得到了相当好的实验结果^[1, 2]。

将磁约束效应应用于金属蒸气激光器, 可能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。

在金属蒸气激光器中, 金属蒸气的产生及其密度大小对于能否实现激光振荡至关重要。因此, 对于磁约束放电激励方式在金属蒸气激光器中的应用, 必须首先考察这种放电方式产生的金属蒸气密度是否满足金属蒸气激光激励过程的要求, 这是确定其是否适用于金属蒸气激光器的一个重要标准。我们利用吸收方法测量了磁约束铜蒸气放电中的基态铜原子密度, 考察了磁约束放电在铜蒸气激光器中应用的可行性。

1 测量方法

对金属蒸气密度的测量, 一般采用的是光谱分析中的吸收方法^[3]。这种方法的基本思想是, 通过测量探测光穿过待测区域后的强度变化, 计算出待测区域中的蒸气密度。对于基态铜原子, 测量其密度通常选用的探测光波长为 324.7nm。在铜蒸气激光器的研究中, 一般采用脉冲氙灯^[4]或染料激光器^[5]提供波长为 324.7nm 的探测光。由于条件有限, 我们利用图 1 所示的方法来测量基态铜原子密度。采用两组相同的磁约束放电电极(铜质平板电极, 放电表面: 200mm × 20mm), 两组电极位于同一轴线上, 都置于真空腔体内。两套相同的电源分别用于两组电极的放电, 单色仪(44W)的中心波长设置在 324.7nm 处, 这样, 就可用一组电极放电的辐射光作为探测光, 测量另一组电极放电产生的基态铜原子密度。我们在磁约束放电实验中采用的电源为开关电源, 目前该电源所提供的脉冲放电电流(上升时间: 500ns)还不能满足铜蒸气激光的快速激励要求, 因此, 我们主要利用其进行金属蒸气的产生等方面的研究。单色仪输出的光强信号经光电倍增管(R928)转换后输入到记录仪(IF4000)或数字万用表(DT 830)中, 通过数字万用表可以读取相对光强的数值。

通过测量探测光光强的吸收来计算基态铜原子密度。假设入射吸收体的探测光的光强为 I_i :

$$I_i = \int_{-\infty}^{\infty} I_d(\nu) d\nu \quad (1)$$

式中, ν 为波数, $I_d(\nu)$ 为光强谱密度。当探测光穿过长度为 L 的吸收介质后, 其强度为 I_0 ^[6]:

$$I_0 = \int_{-\infty}^{\infty} I_d(\nu) \exp[-k(\nu)L] d\nu \quad (2)$$

式中, $k(\nu)$ 为吸收介质的吸收系数。假设 $k(\nu)$ 不存在空间变化、且在测量时间范围内不随时间变化。另外, 忽略由于吸收跃迁导致的上能级原子的再辐射。

对铜原子谱线来说, 有四种重要的加宽机制: 多谱勒加宽、自然加宽、共振加宽和范德瓦尔斯加宽, 由于吸收原子的热运动导致的多谱勒加宽, 产生高斯线型, 线型的半宽度为^[7]:

$$\Delta\nu_D = 0.04572(T_g/273)^{1/2} \text{cm}^{-1} \quad (3)$$

式中, T_g 为气体温度。上面带常数的表达式是针对铜原子的 324.7nm 跃迁的。

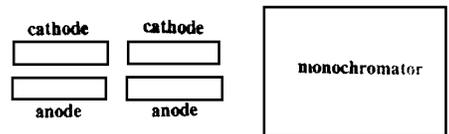


Fig. 1 Schematic diagram of the absorption measurement

谱线的自然加宽、共振加宽和范德瓦尔斯加宽, 三种加宽机制产生的都是洛仑兹型, 三种机制共同作用产生的洛仑兹线型的半宽度为^[7]:

$$\Delta\nu_L = [0.5509 + 0.9882(N_c/10^{15}) + 0.5319P(273/T_g)^{0.7}] \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1} \quad (4)$$

上式给出的常数也是针对铜原子的 324.7nm 跃迁的。括号内的三项分别对应于自然加宽机制、共振加宽机制和范德瓦尔斯加宽机制。式中的 N_c 为基态铜原子密度, P 为缓冲气体气压。

这四种加宽机制共同作用产生的线型为 Voigt 线型^[7]:

$$k(\nu) = (1.435 \times 10^{-13}) N_c (a/\pi) \int_{-\infty}^{+\infty} \{ \exp(-y^2) / [a^2 + (\omega - y)^2] \} dy \quad (5)$$

积分变量 y 是 ν 的函数,

$$a = (\ln 2)^{1/2} \Delta\nu_L / \Delta\nu_b \quad (6)$$

$$\omega = (4\ln 2)^{1/2} (\nu - \nu_c) / \Delta\nu_b \quad (7)$$

式中, ν_c 为中心波数。

(5) 式分别乘上精细结构中各谱线的相对强度及同位素组份权重因子, 最后相加得到总的吸收系数。在以下的叙述中, 我们用 $k(\nu)$ 表示总的吸收系数。

由(1)式和(2)式, 可以得到探测光在经过吸收介质后的透过率 T :

$$T = I_0/I_i = \int_{-\infty}^{\infty} I_d(\nu) \exp[-k(\nu)L] d\nu \bigg/ \int_{-\infty}^{\infty} I_d(\nu) d\nu \quad (8)$$

在实验中, 由于探测源与吸收体(由置于同一真空腔体内的两段电极放电构成)工作条件相同, 因此, 我们假设吸收线型与探测光的线型近似相同。即:

$$I_d(\nu) = I_{d0} g(\nu) \quad (9)$$

$$k(\nu) = k_0 g(\nu) \quad (10)$$

$g(\nu)$ 为线型因子, I_{d0} 和 k_0 分别为 $I_d(\nu)$ 和 $k(\nu)$ 在中心波数处的取值。于是, (8) 式变为:

$$\begin{aligned} T &= I_{d0} \int_{-\infty}^{\infty} g(\nu) \exp[-k(\nu)L] d\nu \bigg/ I_{d0} \int_{-\infty}^{\infty} g(\nu) d\nu \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} k(\nu) \exp[-k(\nu)L] d\nu \bigg/ \int_{-\infty}^{\infty} k(\nu) d\nu \end{aligned} \quad (11)$$

假设 I_1, I_2 分别是作为探测源和吸收体的两组电极单独放电时由单色仪测得的光强, I_{12} 是两组电极保持与单独放电时完全相同的条件、同时放电时记录的光强。相应的入射光强 I_i 和透射光强 I_0 为:

$$I_i = I_1 \quad (12)$$

$$I_0 = I_{12} - I_2 \quad (13)$$

则由实验测得的探测光的透过率为: $T_{\text{exp}} = I_0/I_i = (I_{12} - I_2)/I_1$ (14)

记(11)式中的透过率为 T_{cal} 。通过实验测量, 由(14)式可得到 T_{exp} ; 尝试假设一个适当的基态铜原子密度 N_c , 由(11)式可算出 T_{cal} 。比较 T_{exp} 与 T_{cal} 的大小: $S = T_{\text{exp}} - T_{\text{cal}}$ (15) 利用搜索法逐步调整 N_c 的数值, 使计算得到的 T_{cal} 与实验得到的 T_{exp} 逐渐逼近, 直到 S 的绝对值小到满足精度要求时, N_c 就是欲得到的基态铜原子密度。实验中对每一放电条件下的光强反复进行了多次测量。

2 测量结果

图 2 给出了在氩放电中不同缓冲气压和放电功率条件下测得的基态铜原子密度。从图中看到, 铜原子密度随放电功率的增大而增大, 但随缓冲气压的升高而减小。这说明, 气压升高

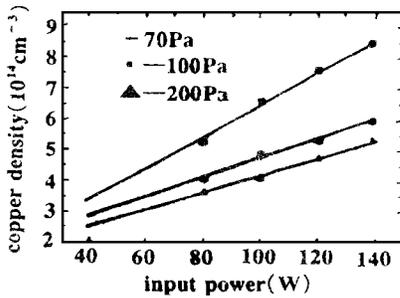


Fig. 2 Ground-state copper atom densities vs input power

铜原子密度, 需要加热温度达 1200 °C。由此我们看到, 在降低金属蒸气激光器的运转温度、实现激光器接近室温运转方面, 磁约束放电具有潜在优势。

3 结 论

借助光谱分析中的吸收方法, 测量到磁约束放电中溅射产生的基态铜原子密度可达 10^{14} cm^{-3} 量级。这表明, 磁约束放电在产生金属蒸气方面, 能够满足铜蒸气激光器的运转要求。此外, 磁约束放电的工作温度接近室温对于实现金属蒸气激光器的非高温运转是有利的。

参 考 文 献

- 1 Li J, Chen Q M. *J Phys D: Appl Phys*, 1993; 26: 1541
- 2 Chen Q M, Sun H, Zhou F Q *et al.* Two high power gas lasers excited by confined discharge. Proceedings of international conference on laser 's 1993, Nevada: Tahoe, Lake, 1993: 241
- 3 Nerheim N M. *J A P*, 1977; 48(8): 3244
- 4 Borovich B L, Vasiler L A, Gerts V E *et al.* *Sov J Q E*, 1981; 11(9): 1210
- 5 Astadjov D N, Isaev A A, Petrash G G *et al.* *IEEE J Q E*, 1992; QE-28(10): 1966
- 6 Mitchell A C G, Zemanski M W. *Radiation and Excited Atoms*. London: Cambridge University Press, 1961
- 7 Taylor L H, Feldman R B. *J A P*, 1979; 50(5): 3212
- 8 Honig R E. *RCA Rev*, 1963; 28: 567

作者简介: 李 军, 男, 1968 年出生。博士后。从事激光技术、材料复合新技术的研究工作。

收稿日期: 1998-09-26 收到修改稿日期: 1998-12-17

使得溅射作用减弱。值得注意的是, 测量得到的铜原子密度达到了 10^{14} cm^{-3} 量级, 这与普通的铜蒸气激光器中利用加热方式得到的铜原子密度相当^[4, 5]。因此, 磁约束放电在产生金属蒸气方面能够满足铜蒸气激光器的运转要求。可以推测, 对于其它金属蒸气激光器来说, 这种放电方式也能产生足够的金属蒸气密度。

在测量基态铜原子密度的同时, 还用温度计直接测量了放电区的气体温度。图 3 给出了缓冲气压为 70 Pa 时放电区的气体温度, 它接近室温(300 K)。而在普通的铜蒸气激光器中^[8], 要得到 10^{14} cm^{-3} 量级的

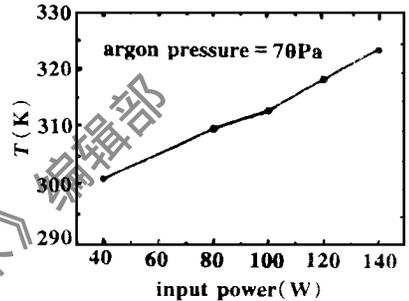


Fig. 3 The gas temperature in discharge area vs input power