

低气压下 CuBr 激光的光谱结构*

陈 立 毛邦宁 王煜博 王丽敏 潘佰良†

(浙江大学物理系 杭州 310027)

(2006 年 11 月 28 日收到 2007 年 2 月 1 日收到修改稿)

综合考虑能级精细结构和同位素分裂等因素,计算了铜原子 511 nm 和 578 nm 自发跃迁谱线的光谱结构.设计制作了可周期更换缓冲气体封闭运转的 CuBr 激光器,测量了低气压下以氖气为缓冲气体的 CuBr 激光器的 511 nm 和 578 nm 激光谱线在不同工作温度和激励电压时的光谱结构.结果表明铜原子 511 nm 和 578 nm 谱线的自发辐射光谱和激光光谱具有类似的多峰结构,但 578 nm 激光光谱线形与工作温度和激励电压密切相关,对实验结果做了定性分析.

关键词: CuBr 激光, 光谱结构, 工作温度, 激励电压

PACC: 4255H, 3270, 3130G, 5280P

1. 引 言

研究 CuBr 激光器^[1,2]光谱结构对阐明其内在激光机理、优化工作特性和实际应用具有重要意义.文献[3]研究了纵向脉冲放电的铜蒸气 578/511 nm 激光光谱结构与工作温度和氖压间的关系,有关较高氖压下流动式 CuBr 激光的光谱结构已在文献[4—6]作了报道.流动式 CuBr 蒸气激光运转时不能长期维持稳定的氖压和工作温度,而且含有多种微量杂质气体,会影响 CuBr 激光光谱结构测量的精度和重复性.本文设计制作了一套适用于气体放电激光器的高真空掺气系统,将激光管抽真空到 10^{-2} — 10^{-3} Pa 后可周期改变氖压封闭运行,较系统地测量分析了较低氖压下 CuBr 黄、绿激光谱线随工作参量的变化关系.根据相似的实验条件,理论上给出了铜原子 578/511 nm 光谱线型,得到了与实验结果相似的多峰结构,并给予合理解释,为进一步深入认识 CuBr 激光机制和工作特性提供了理论和实验依据.

2. 511 nm 和 578 nm 的光谱精细结构

由于铜激光光谱结构和铜原子自发辐射跃迁能级之间的精细结构^[7]和同位素分裂有着密切关

系^[8—10],所以铜原子自发辐射的光谱精细结构在理论上对铜激光光谱结构有着参考价值.下面计算了温度在 938 K 时铜原子黄绿光自发辐射的光谱曲线,计算过程中考虑了⁶³Cu 和⁶⁵Cu 两种同位素、磁偶极子、电四极分裂、同位素频移和多普勒展宽.计算多普勒展宽时,近似放电管内的平均温度为多普勒展宽的气体温度,计算过程如下:

放电管内径向温度分布表达式为^[11]

$$T(r) = \left(T_w^{1+a} + \frac{1+a}{4B} q_v (R^2 - r^2) \right)^{1/(1+a)}, \quad (1)$$

其中缓冲气体为氖气时, $B = 9.7 \times 10^{-4}$, $a = 0.685$, q_v 为放电管内的功率密度, T_w 是管壁温度, R 是放电管半径.

当 $r = 0$ 时,得到放电管中心处的温度

$$T_0 = \left(T_w^{1+a} + \frac{1+a}{4B} q_v R^2 \right)^{1/(1+a)}. \quad (2)$$

由文献[11]得到放电管内平均温度

$$\bar{T} = \frac{4B}{2+a} (T_0^{2+a} - T_w^{2+a}) (q_v R^2), \quad (3)$$

把(2)式代入(3)式,取 $q_v = 1.03 \times 10^7$ W/m³, $T_w = 773$ K, $R = 0.36 \times 10^{-3}$ m,得到 $\bar{T} = 938$ K.铜原子自发辐射谱线的多普勒宽度 Δv_D 为^[13]

$$\Delta v_D = 7.16 \times 10^{-7} v_0 \left(\bar{T}/M \right)^{1/2}, \quad (4)$$

其中 v_0 为谱线的中心频率,铜原子量 $M = 63$ 或 $M = 65$.

511 nm 和 578 nm 的自发辐射光谱结构相对强

* 国家自然科学基金(批准号:30574111,10374081)资助的课题.

† E-mail: pbl66@zju.edu.cn

度分布计算公式^[14]如下：

$$I(v) = \sum_{i=1}^n I_i(v) \frac{2}{\Delta v_D} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \times \exp[-(v - v_i)^2 4 \ln 2 / \Delta v_D^2], \quad (5)$$

其中 $I_i(v)$ 是各精细能级跃迁谱线的光谱强度(以

相对强度最大值为 100), v_i 是 511 nm 和 578 nm 的精细能级谱线相对于 ^{63}Cu 中心频率的频移, $I_i(v)$, v_i 的值由文献 3 给出. 由 (3)–(5) 式计算得到铜原子 578 nm 和 511 nm 自发辐射的光谱线型如图 1 所示.

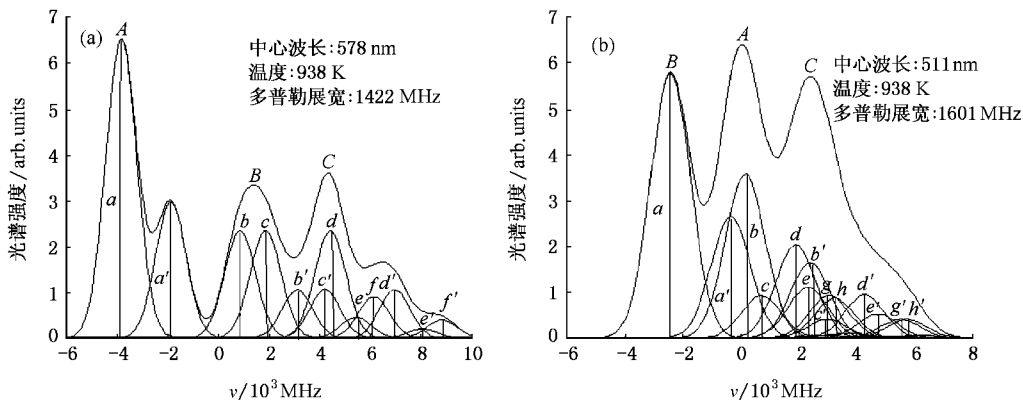


图 1 理论计算的铜原子 578 nm (a) 和 511 nm (b) 光谱结构图 (直线 a, a', b, b', \dots 的位置和高度分别表示 ^{65}Cu 和 ^{63}Cu 精细能级跃迁的位置和强度, A, B, C 为自发辐射包络光谱结构的峰)

3. 实验装置

实验装置如图 2 所示. 图中的黑心棱形代表真空阀. 整个试验装置有真空系统、激光器、光谱检测三大部分组成. 放电前激光管抽真空到 10^{-2} – 10^{-3} Pa, 液氮捕获装置的功能是冷却并捕获激光管扩散出来的微量杂质以提高激光管的真空度. 当系统在高真空条件下, 用油柱 U 形管测量氖气气压, 向系统充入 99.99% 高纯玻璃瓶氖气后封离激光管. 激光管内部插入了内径为 7.2 mm 的刚玉管, 电极间距为 1 m, 带

捕获装置的放电电极设计能够延长电极寿命和增加放电稳定性. 放电电路采用阳极接地和阴极接负高压的修饰 Blumlein 电路^[15], 电容 C1 和 C2 分别是 500 pF 和 300 pF. 输出的黄绿激光依次经棱镜、透镜、偏振片、滤波片组成的光路系统入射到气压扫描 F-P 分光光度计, F-P 分光光度计的标准具气压随步进电机的活塞移动而改变, 标准具产生的干涉图样光信号和气压信号分别通过光电倍增光管和气压传感器接入控制器最后转化为数字信号, 接入微机用 Zeemanlab 软件画出光谱结构曲线.

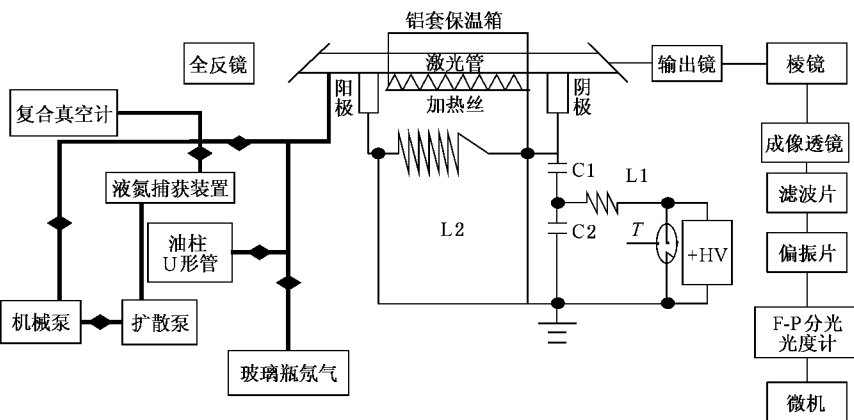


图 2 实验装置图

4. 实验结果和讨论

4.1. 光谱结构和激励电压的关系

在 1.44 kPa 氖气压强, 930 K 气体温度时, 测量了 578/511 nm 激光谱线结构随激励电压的变化关系如图 3 所示. 由图 3(a) 可知, 在激励电压 4.5—5.2 kV 之间, 578 nm 谱线的相对强度随电压增强而增强, 尤其第一、二个峰相对强度明显增加. 线宽无

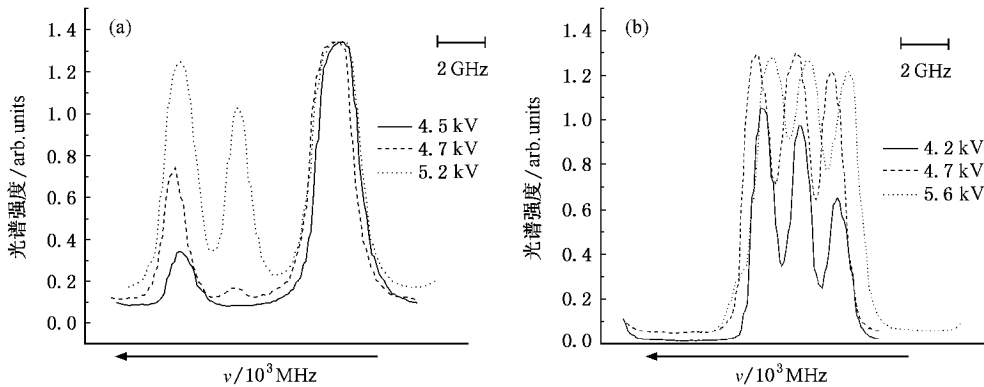


图 3 不同激励电压下 578 nm (a) 和 511 nm (b) 激光谱线结构的变化 (氖气压强 1.44 kPa, 气体温度 930 K)

4.2. 光谱结构和氖压的关系

图 4 显示了激励电压为 4.9 kV, 气体温度是 930 K 时, 578/511 nm 激光谱线结构随氖压的变化. 578 nm 的三峰结构随着氖压的升高而逐渐消失, 当氖压为 3.72 kPa 时, 578 nm 谱线变为单峰结构.

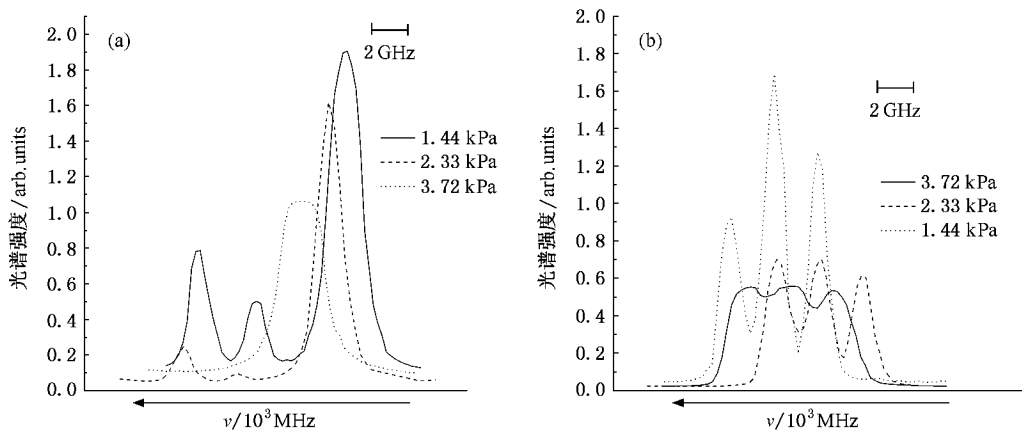


图 4 不同氖压下 578 nm (a) 和 511 nm (b) 激光谱线结构的变化 (激励电压 4.9 kV, 气体温度 930 K)

明显变化, 因为在低气压下, 线宽主要有多普勒展开决定, 均匀展宽可以不考虑. 在 4.7 kV 时对应第二个峰的原子精细能级间的受激辐射达到阈值开始振荡, 并随激励电压的增加而升高, 其原因在于激励电压升高, 提高了电子平均温度和基态粒子经电子碰撞激发到上能级的碰撞截面^[6,8], 使得对应图 1(a) 中 B 峰和 C 峰精细能级间的受激辐射强度增大. 图 3(b) 显示的 511 nm 激光谱线结构基本保持不变, 相对强度随激励电压的增大而增大, 线宽大小变化不大.

511 nm 谱线的峰值随着氖压增加而强度减弱, 其中 1.44 kPa 时三峰结构较为明显, 中间峰值大于两边峰值, 在 3.72 kPa 时三峰相对强度比较接近. 511 nm 谱线结构变化是由于氖压的增大降低了电子温度, 减小了激光上能级的抽运速率, 导致激光增益减小, 光强变弱.

4.3. 光谱结构随温度的变化关系

图 5 显示了当激励电压 4.9 kV, 气压是 1.53 kPa 时 578/511 nm 谱线随温度的变化. 由图 5(a) 知, 578 nm 激光谱线结构与温度密切相关, 在较低温度 T_1 时, 仅出现对应增益最强的单峰, 温度上升为 T_2 时, 出现相对强度与原子自发辐射光谱(图 1(a)) 类似的三峰结构, 温度上升增加到 T_3 时, 增益较小的二峰强度减小, 而第三峰强度基本保持不变. 可能的

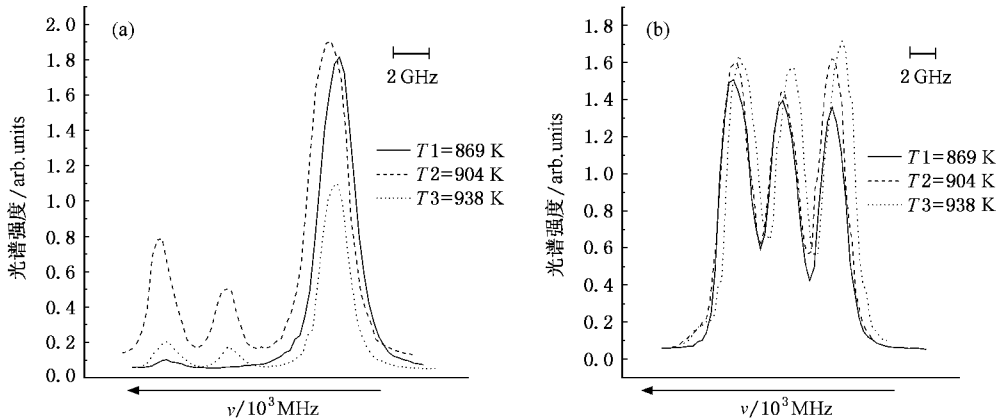


图 5 不同温度下 578 nm (a) 和 511 nm (b) 激光谱线结构的变化(激励电压 4.9 kV, 气压 1.53 kPa)

5. 结 论

设计了可周期更新缓冲气体封离运转的 CuBr 激光器, 较系统地测量和分析了 578/511 nm 激光光谱线型随宏观工作参量的变化关系. 结合实验条件,

原因在于温度从 T_1 上升到 T_2 , 激光管内铜原子密度增大, 而此时第三峰增益已饱和, 对应一、二峰的精细结构能级间的受激辐射逐渐增强. 当气体温度到达 T_3 时, 铜原子密度的进一步增大导致电子平均温度下降, 反而不利于基态粒子的激发. 图 5(b) 显示的 511 nm 激光光谱结构随温度变化不大, 均为三峰结构, 只是相对强度略有不同. 这说明对三峰有贡献的精细结构能级间的辐射跃迁具有类同的增益和辐射强度, 与 511 nm 原子谱线的理论曲线相符.

理论计算了这两条铜原子自发辐射光谱线型, 得到相似的多峰结构. 实验发现, 激励电压、气压和温度对 578 nm 激光谱线的结构影响较大, 在一定范围内改变这三个参量, 能够得到单色性较好的 578 nm 激光. 而这些参量对 511 nm 激光谱线结构的影响相对较小, 基本保持着三峰形状的结构.

- [1] Liu C M 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1818 [in Chinese] 刘才明 2003 物理学报 **52** 1818
- [2] Astadjov D N, Dimitrov K D 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 705
- [3] Tenenbaum J, Smilanski I, Gabay S, Levin L A, Erez G, Lavi S 1980 *Opt. Commun.* **32** 473
- [4] Wang Y J, Shen S P, Xia T J, Wu Z H 1988 *Appl. Phys. B* **46** 191
- [5] Chen C J 1978 *Phys. Rev. A* **18** 2193
- [6] Kushner M J, Warner B E 1983 *Appl. Phys.* **54** 2970
- [7] Wang Z W, Yang D, Hu M H, Han Q J, Li J Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 1559
- [8] Scheibner K F, Hazi A U 1987 *Phys. Rev. A* **35** 4871
- [9] Ma H L, Tang J Y 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 453 [in Chinese] 马洪良、汤家镛 2001 物理学报 **50** 453
- [10] Ma H L, Lu J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 566 [in Chinese] 马洪良、陆江 2003 物理学报 **52** 566
- [11] Yao Z X, Qian Y J 1995 *Chin. J. Laser* **22** 333 [in Chinese] 姚志欣、钱育军 1995 中国激光 **22** 333
- [12] Astadjov D N, Vuchkov N K, Sabotinov N V 1988 *IEEE J. Quantum Electron* **24** 1927
- [13] Mao B N, Chen G, Wang Y B, Chen L, Pan B L 2007 *Opt. Commun.* **273** 214
- [14] Wang Y J, Pan B L, Ding X D, Qian Y J, Shi S Y 1991 *SPIE* **1412** 60
- [15] Pan B L, Mao B N, Chen G 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3748 [in Chinese] 潘佰良、毛邦宁、陈钢 2004 物理学报 **53** 3748

Spectral structure of CuBr laser under lower pressures^{*}

Chen Li Mao Bang-Ning Wang Yu-Bo Wang Li-Min Pan Bai-Liang[†]

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

(Received 28 November 2006 ; revised manuscript received 1 February 2007)

Abstract

Under consideration of the basic factors such as the level hyperfine structure and isotope split etc. , the spectral structures of spontaneous emission of copper atom 578/511 nm lines are calculated. A sealed operation CuBr laser with periodical refreshment of the buffer gas are designed and constructed. The 578/511 nm spectral structures , produced by CuBr laser at lower Ne buffer gas pressure were measured under different working temperatures and exciting voltages. The spectral structure of spontaneous emission of copper atom 578/511 nm lines have multi-peaks similar to their laser spectral structure , but the 578 nm laser line is strongly dependent on the working temperature and the exciting voltage. Some possible reasons are suggested to qualitatively explain the experimental results.

Keywords : CuBr laser , spectral structure , working temperature , excitation voltage

PACC : 4255H , 3270 , 3130G , 5280P

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10574111 , 10374081).

[†] E-mail : pbl66@zju.edu.cn