

铜蒸气激光器黄、绿光脉冲与管温关系的研究

应锡雄 夏铁君 姚志欣
(浙江大学物理学系)

提 要

本文完成了铜蒸气激光器黄、绿光脉冲在不同管温下相对于激励电流脉冲时间行为的研究, 确认最短泵浦时间与最大脉冲能量对管温要求的一致性。探讨了初始亚稳态布居对黄、绿光相对行为变化规律的影响。

一、引 言

铜蒸气激光器同时发射 578 nm 和 511 nm 的黄、绿色激光谱线, 它们分别起止于相同 LS 组合的不同 J 组态。图 1 为其能级和跃迁关系简图。

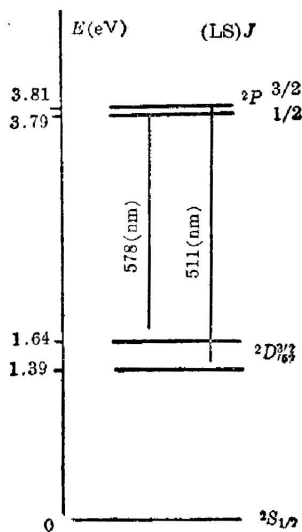


Fig. 1 Partial energy levels and laser transitions of copper atoms

铜蒸气激光器是脉冲放电激励的气体激光器, 根据总和定则, 在一般情况下, 属于同一个初态或终态的所有多重谱线的强度之和, 分别与初态或终态的统计权重 $(2J+1)$ 成正比^[1]。因此, 黄光跃迁 ($^2P_{1/2}^0 \rightarrow ^2D_{3/2}$) 和绿光跃迁 ($^2P_{3/2}^0 \rightarrow ^2D_{5/2}$) 的强度比应该是 5:9, 或者近似于 1:2。这正是在最佳运转条件下的强度比值, 已为实验所证实^[2]。

但是, 从图 1 可以看出, 黄光下能级 $^2D_{3/2}$ 为 1.64 eV, 而绿光下能级 $^2D_{5/2}$ 仅 1.39 eV, 两者相差 0.25 eV。亚稳态下能级的粒子数布居对铜蒸气激光起着限制和自终止的作用, 在一定条件下, 其热平衡布居必定影响强度的正常分布。文献 [3] 曾观察并分析了随着脉冲重复率的增加而黄光比份增加的现象, 认为这就是由于绿光下能级来不及充分排空的结果, 本文则观察和讨论了在管温发生变化时, 黄、绿光脉冲相对于放电激励脉冲之间的时间行为及其比份的变化规律。

二、实验装置

使用实验室自制的放电自加热铜蒸气激光器, 其放电管为高纯氧化铝陶瓷管, 内径

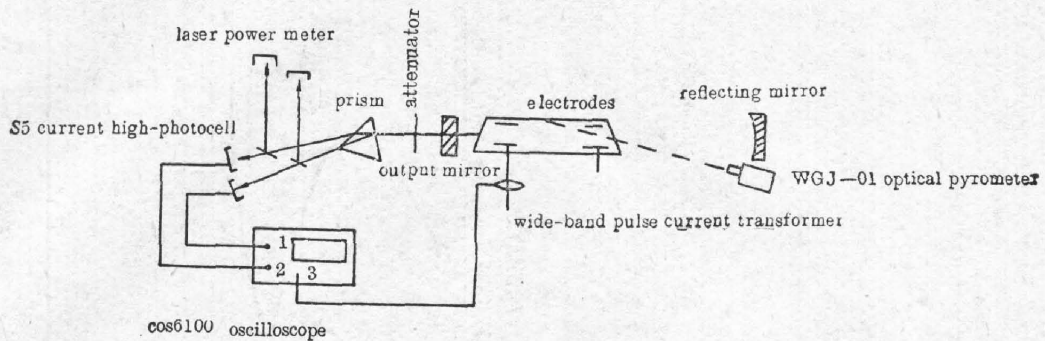


Fig. 2 Experimental arrangement

28 mm, 采用同轴钨筒电极, 电极间距 46 cm。储能电容器容量 3 nf, 跨接电极的峰化电容 1 nf。谐振充电的直流电源在 0~7000 V 范围内连续可调。谐振腔反射镜为 $R=5\text{m}$ 宽带介质膜镜片, 输出耦合镜为不镀膜玻璃平板, 镜片间距 2.5 m。

输出的激光经棱镜分束成黄、绿光后, 分别引入两个 S5 光电二极管, 并同时显示于 COS6100 型多通道示波器上。为了观察激光脉冲与放电激励脉冲之间的时间关系, 在激光放电管阴极处用 411 型儒可夫斯基线圈取样, 也同时在 COS6100 型多通道示波器上显示。在实验前仔细计算并校准了脉冲信号在电路和光路中的延迟。在示波器上同时显示的三个脉冲信号, 均以电流脉冲起始为时间零点。包括脉冲传递时间误差和仪器灵敏度在内, 总的时间误差不超过 5 ns。分光镜分光后由 JB-1 绝对功率计测定平均功率, 按脉冲重复率换算得到光脉冲能量。放电管的温度测量采用文献[4]的方法, 分别在高温和低温点用一台 WGJ-01 型精密光学高温计对准熔化了了的贴着陶瓷管壁的铜液液滴测量温度, 并根据铜液的单色辐射黑度系数进行了修正, 测量时放电瞬时停止, 这样可以避免氩气氛背景干扰。然后, 再按放电管的膨胀量估算在此范围内管壁的平均温度。实验装置的框图如图 2 所示。图 3 是显示在示波器上的黄、绿光脉冲和电流脉冲。图中宽的波形是电流脉冲, 其纵坐标 200A/div。

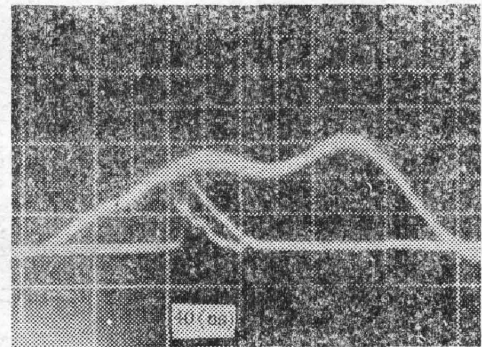


Fig. 3 Waveforms of light and current pulses

三、实验结果和讨论

实验中, 维持缓冲气体氩气压强 130 Torr, 脉冲重复率 8.3 kHz, 控制充电的直流电源的电压为 5 kV。通过放电自加热, 使放电管壁温从室温开始, 约经 50 min 后达 1850°C, 其变化速率远低于放电管内等离子体的热力学平衡速率。因此, 可以认为, 观察到的是激光行为与管温的关系, 而其它宏观参量恒定。

定义从电流脉冲起始至光脉冲出现的时间为泵浦时间(见图 3)。图 4 给出了由实验测得的黄、绿光泵浦时间 t_Y 、 t_G 与管温的关系曲线。可以看出, 对应于黄、绿光最短泵浦时间的

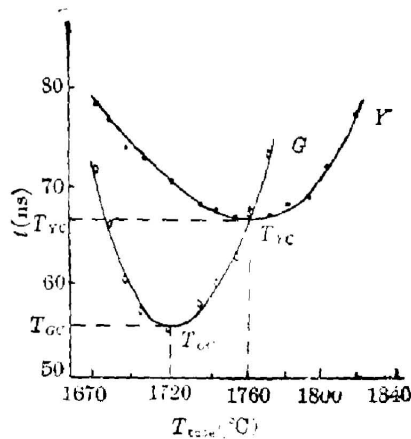


Fig. 4 Pumping time of yellow-green light as a function of tube temperature

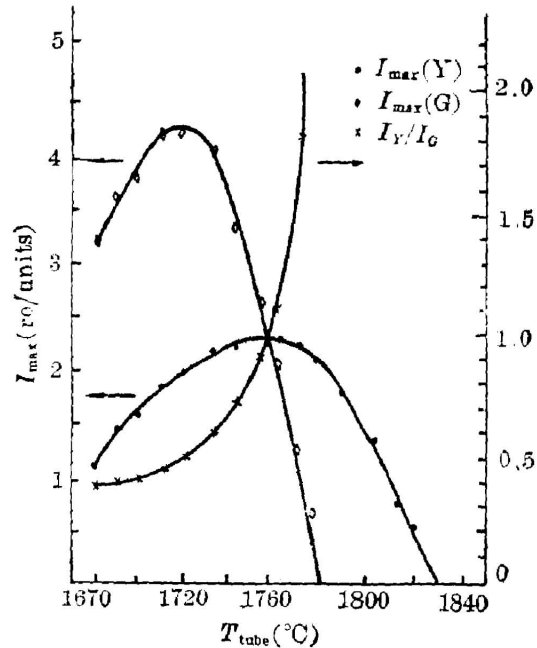


Fig. 5 Maximum output powers of yellow and green light pulses and their ratio as functions of tube temperature

管温分别是 1760°C 和 1720°C, 在温度较低时, 黄光滞后于绿光; 而在温度较高时, 黄光领先于绿光。

实验还表明, 泵浦时间对管温的变化规律, 正对应着激光脉冲能量与管温的关系。如图 5 所示, 在我们的实验条件下, 黄、绿光脉冲的最大输出能量所对应的最佳管温, 分别恰好是各自最短泵浦时间所对应的管温。

谐振腔光子数简化了的速率方程为:

$$\frac{dn}{dt} = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right) n \sigma c - \frac{n}{t_0} + N_2 A \beta,$$

其中 β 为几何因子, $t_0 = \{c[\alpha - (\ln R/2l)]\}^{-1}$ 为腔寿命, 考虑到不镀膜输出镜片反射率 $R \sim 0.08$, 分布损耗远低于输出份额 $\alpha \ll (\ln R/2l)$, 所以激光输出功率 $P \sim nh\nu V/t_0$ 正比于腔内光子数。在激光振荡时, 自发跃迁辐射是不重要的, 速率方程右边第三项可略去, 进而考虑受激跃迁截面 $\sigma \sim 10^{-14} \text{cm}^2$, 激光上下能级粒子数密度 N_1, N_2 及其反转量 $[N_2 - (g_2/g_1)N_1]$ 均为 10^{13}cm^{-3} 量级^[2], 在实验条件下 $t_0 \sim 10^{-9} \text{s}$, 为了讨论方便, 在初估时可略去右边第二项, 则可积分得:

$$n \propto \exp \left\{ \sigma \cdot c \int_{t_0}^t \left[N_2(t') - \frac{g_2}{g_1} N_1(t') \right] dt' \right\}.$$

积分起始点为粒子数反转值 $[N_2(t') - (g_2/g_1)N_1(t')]$ 开始大于零的时刻。值得注意的是, 由电子碰撞激励和超弹性弛豫, 无论是基态与激光能级, 或者在激光能级之间, 对能级粒子数的布居或猝灭都起着决定性的作用, 而相应于激光发射的激光能级之间跃迁所起的作用, 较之前者要小两个数量级^[6]。也就是说 $N_2(t), N_1(t)$ 的时间变化行为几乎不受激光跃迁

的影响,亚稳态粒子数 $N_1(t)$ 是缓变量,主要取决于其初始值,在积分区间内可视作常数,这样就可得出结论:早一步达到阈值条件、实现激光振荡,亦即泵浦时间的缩短,应该与脉冲能量的增加相一致。因此,最短泵浦时间所对应的管温也就是脉冲能量取最大值的最佳管温。

在温度低于最佳管温时,脉冲能量随温度的上升而增加的现象,通常认为是由于基态铜原子密度增加所致。但对于温度高于最佳管温时,脉冲能量随温度上升而降低的实验事实,一般认为是由于铜原子密度过高致使在激励期间电子峰值温度降低的结果^[6]。我们认为,在文献[6]中的缓冲气压较低($p_0=9$ Torr),上述机理确实是一个重要因素,这是由于铜原子较之于缓冲气体氖原子,电子在其上的动量转移微观截面要大一个数量级以上^[7]。在文献[6]情况下虽然铜原子蒸气压比缓冲气体压强要小一个数量级,但两者的动量转移宏观截面是相当的,所以铜原子密度的增加将明显导致电子温度的下降。但在本文的实验条件下,按温度计算得到的铜饱和蒸气压^[8]比缓冲气体压强 130 Torr 要小两个数量级,所以动量转移宏观截面,前者仍然要小一个数量级。因此,铜原子蒸气压随着管温上升的增加,不致于对电子峰值温度有大的影响。为此,我们安排了这样的实验,在激光器稳定运转时,用调压变压器迅速改变充电电压,其变化速率显然远大于放电管壁温的弛豫速率,又远小于放电管内等离子体热力学平衡速率,因而可以看作是在壁温不变条件下仅仅改变工作电压的实验。实验结果表明,当壁温低于最佳温度时,增加电压有助于提高激光输出功率;而当壁温高于最佳温度时,增加电压却使激光输出功率减小以至消失,若在此时降低电压,反使激光输出功率增加。鉴于此实验现象,我们认为,放电管壁温上升的结果,一方面固然由于铜原子密度的增加,将降低激励脉冲期间的电子峰值温度;另一方面,由于气体平衡温度对确定放电脉冲前亚稳态粒子数布居起着关键性的作用^[2]。它是放电余辉期间逐渐下降的电子温度的最终逼近值,已经确认在连续脉冲铜蒸气激光器中,每个放电激励脉冲初始时刻布居于激光下能级亚稳态的初始值,主要是受到电子温度的制约,其较低能级的布居 N_{1G} 与基态铜原子密度 N_0 的关系,遵循按电子温度 T_e 分布的玻尔兹曼关系^[9]:

$$N_{1G} = N_0 \exp(-E_{1G}/kT_e),$$

式中 $E_{1G}=1.39$ eV 是 $^2D_{3/2}$ 能级位势, k 是玻尔兹曼常数。

在连续脉冲铜蒸气激光器中,每个放电脉冲激励时刻的初始电子温度通常大于 0.3 eV^[2],因而指数因子的值约为 1% 量级。实验表明,在范围很大的不同放电激励条件下,从基态被泵浦到激光上能级的饱和布居份数还不到 1% 量级^[10],上下激光能级的粒子数反转,主要依赖于它们有利的统计权重比值^[11]。

据此,可以对实验现象作出解释,当低于最佳温度时,亚稳态的初始布居还不足以充分影响激光行为,因此,当基态铜原子密度随壁温上升时,泵浦时间缩短、激光脉冲功率增加,此时若提高电压,由于激励期间电子峰值温度的上升,将有助于增加激光脉冲能量。反之,在高于最佳温度时,由于余辉电子温度过高,亚稳态的布居已在很大程度上影响到激光行为,此时若增加电压,将最终导致下一个脉冲初始电子温度的进一步提高,从而限制并最后终止激光振荡。

还应进一步考虑到,由于与缓冲气体原子之间的碰撞亚稳态子能级 $^2D_{3/2}$ 和 $^2D_{5/2}$ 之间可以有效地交换能量。因此, $^2D_{3/2}$ 能级的热布居 N_{1V} 相对于 $^2D_{5/2}$ 能级的热布居 N_{1G} 而言,是以气体温度 T_g 为标志的^[12],

$$N_{1Y} = N_0 \exp(-E_{1G}/kT_e) \exp[-(E_{1Y} - E_{1G})/kT_e],$$

式中 $E_{1Y} = 1.64 \text{ eV}$ 是 $^3D_{3/2}$ 能级位势。

在管温为 1720°C 时,通过上式可推算出黄光下能级 $^3D_{3/2}$ 的初始布居数,仅为绿光下能级 $^2D_{5/2}$ 相应值的 22% 因此,当初始电子温度随同气体温度升高时,首先受到损害的将是绿色激光振荡。黄、绿光分别相应的泵浦时间及其强度比值随壁温变化的实验规律,则是其必然的结果。

四、小 结

实验结果表明,在缓冲气体压强比较高的条件下,当铜蒸气激光器的运转温度高于最佳温度时,输出功率随管温的增加而下降,主要不是放电激励期间电子温度的降低,而是余辉期间电子温度的提高而使初始亚稳态布居的增加所致,还影响了黄、绿光的泵浦时间和相对强度。

参 考 文 献

- [1] G. 赫兹堡;《原子光谱与原子结构》, (科学出版社, 1959), 132.
- [2] M. J. Kushner *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**, No. 6 (Jun), 2970.
- [3] I. Smilanski *et al.*; *Opt. Commun.*, 1979, **30**, No. 1 (Jul), 70.
- [4] I. Smilanski *et al.*; *Opt. Commun.*, 1978, **25**, No. 1 (Apr), 79.
- [5] C. J. Chen; *Phys. Rev. (A)*, 1978, **18**, No. 11 (Nov), 2193.
- [6] M. J. Kushner; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**, No. 8 (Aug), 1555.
- [7] S. Trajmar *et al.*; *J. Phys. (B)*, 1977, **10**, No. 16 (Aug), 3323.
- [8] C. J. Smithells; 《*Metal Reference Book*》, (Fifth Edition, London & Boston, 1976), 232.
- [9] P. A. Bokhan *et al.*; *Soviet J. Quant. Electron.*, 1978, **8**, No. 10 (Oct), 1220.
- [10] J. Terenbaum *et al.*; *Opt. Commun.*, 1981, **36**, No. 5 (Mar), 391.
- [11] Yao Zaixin *et al.*; 《*An Additional Collection of Efficient Pulsed Gas Discharge Lasers*》, CLEO '85 W/M 23 Baltimore, USA.
- [12] P. A. Bokhan *et al.*; *Soviet J. Quant. Electron.*, 1974, **3**, No. 6 (Jun), 481.

Investigation on temperature dependence of yellow-green light pulses of CVL

YING KEXIONG, XIA TIEJUN AND YAO ZHUXIN
(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 12 September 1985; revised 1 April 1986)

Abstract

An investigation on the temporal behavior of yellow-green light pulses as a function to the excitation current pulse of CVL at various discharge-tube temperatures has been made. It has been confirmed that the tube temperature corresponding to the minimum pumping time is consistent with that related to the maximum pulse energy. Influences of the initial metastable state population on the variations of relative behaviors of the yellow-green light are discussed.