

## 铜蒸气激光器振荡——放大系统的实验研究(一)

梁培辉 任虹 王志英 沃敏政

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 铜蒸气激光的振荡-放大系统的同步实验结果表明,延时对放大器输出幅度的同步特性曲线是非对称的,绿光(510.6 nm)和黄光(578.2 nm)的同步特性也不相同。实验测出闸流管触发的抖动为 $\pm 4$  ns,对应系统的输出幅度起伏10~20%。在同步正确条件下,放大器的输出功率比作为振荡器提高15%以上。

### Experimental investigation on copper vapor laser oscillator-amplifier system (1)

Liang Peihui, Ren Hong, Wang Zhiying, Wo Minzheng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** The experimental results on the timing of a copper vapor laser oscillator-amplifier system show that the timing property curve (the amplitude of amplifier output versus delay) was not symmetric, and timing properties of green beam (510.6 nm) and yellow beam (578.2 nm) were not the same. The jitter of the thyratrons was  $\pm 4$  ns, which induced an output amplitude fluctuation of 10%~20%. The output power of the amplifier was 15% higher than that of an oscillator when the timing was correct.

## 一、引言

正象其它的脉冲状态的振荡-放大激光系统一样,振荡器与放大器之间的同步是一个重要的技术问题。所谓振放系统的同步工作,并非指两台器件的同时触发,而是指振荡器与放大器之间存在一个适当的延时,在此延时条件下,放大器给出最大的输出功率。不同延时对应的放大器的输出,我们称之为同步特性。

铜蒸气激光可以粗略地看成为三能级系

统,如下面所介绍的,同步不恰当,放大器不但增加输出功率,反而会变成吸收器。铜蒸气激光器的电源都使用高功率的闸流管,从输入脉冲触发信号到闸流管导通有一段很短的导通时间,但这段时间的数值存在一定的抖动或离散。对于振荡器来说,这种抖动并不影响输出功率的大小。作为放大器,抖动的影响就要考虑。

由于一般闸流管的生产单位很少给出导通时间的抖动大小,本文介绍用振动系统直接观察和测量抖动量的方法和结果。

收稿日期: 1985年10月9日。

## 二、同步特性的定性描述

铜蒸气激光的能级如图 1 所示。靠电子碰撞，中性的金属原子被激发到各个能级。电子温度的高低，直接影响到各能级的布居数。我们知道，在电激发脉冲的前沿，当电子温度低于 4 eV 时，下激光能级的激发占主要地位，若在此时输入激光，放大器只能产生共振吸收；同理，在电激发脉冲的末尾阶段，电子温度低，也同样呈吸收状态。因此能起放大作用的时间范围是在放大器的电激发脉冲宽度以内。目前的铜蒸气激光器均为重复率运转，重复率一般为 5~10 kHz，激光脉冲宽度约为 20~30 ns，占空比为  $10^4$ 。因此，延时不当，绝大多数的情况下出现放大器不起放大的作用。图 2 形象地描绘不同延时时所对应的透过、吸收和放大状态。

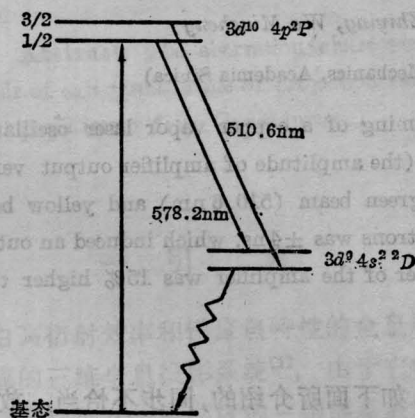


图 1 铜蒸气激光器的能级简图

为了以后的叙述方便，我们将以振荡器注入到放大器的时刻为参考点，如果此时放大器尚未激发，即图 2(a) 态，称之为导前，反之，如果此时放大器已经激发完毕，如图 2(e) 所示者，称之为落后。

## 三、实验条件

我们使用相同结构的激光器组成振放系统，激光器放电管内径  $\phi 25$  mm，电极间距离

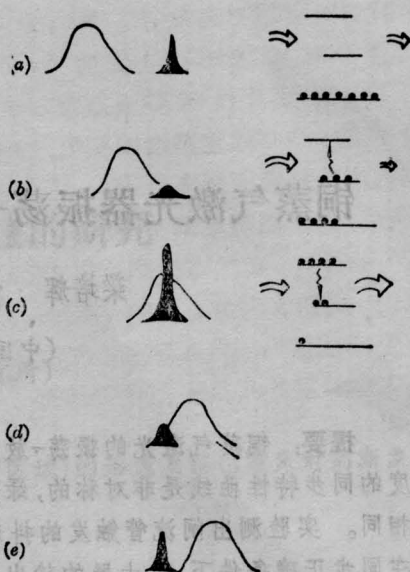


图 2 不同延时条件下放大器的工作状态

890 mm，充 Ne 气为缓冲气体，气压在 20 Torr 到 50 Torr 间。

采用转移式放电路激励，充电电容为 6000 pF，锐化电容为 1000 pF。重复率 6 kHz，工作电压范围 5~6 kV，相应的电流为 0.5~0.75 A。闸流管为国产 4050 A 型。

每台激光器有一独立的激发电源，并配有信号发生器控制闸流管的触发(见图 3)。信号发生器用 XC 46 脉冲信号发生器，为了准确读出延时的数值，我们用一只可读数的精密电位器代替原仪器上的延时细调电位器，并进行了标定。

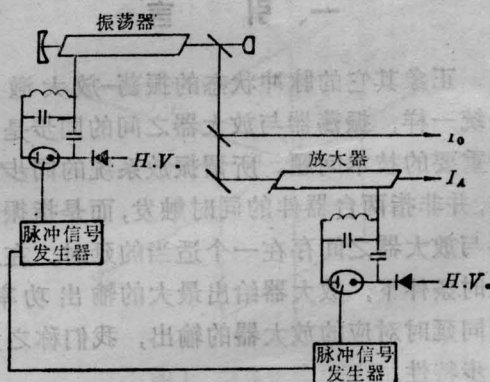


图 3 实验装置示意图

振荡器用望远镜式非稳腔,  $R_1 = -5000$  mm,  $R_2 = 500$  mm, 倍率  $M = 10$ 。斜孔板耦合输出。

使用功率计测量绝对输出功率数, 研究同步特性时用快响应光电二极管(PIN管)作接收器, 100 MC 通用示波器量出输出激光脉冲的形状和幅度。

#### 四、 闸流管导通时间的抖动

因空间的光学延时在振放系统安装后是一个不变量, 固定振荡器和放大器的输入电功率, 改变放大器电源脉冲信号发生器的延时, 我们便能看到图 2 所描写的现象, 用下述的方法则可以测出闸流管导通时间的抖动:

将振荡器和放大器的输出光束, 经适当的滤光片衰减后送到同一只 PIN 管上。适当调整两路激光的光程, 使之在接收器处有几米左右的程差。这样我们便可以在示波器上获得如图 4 那样的结果。

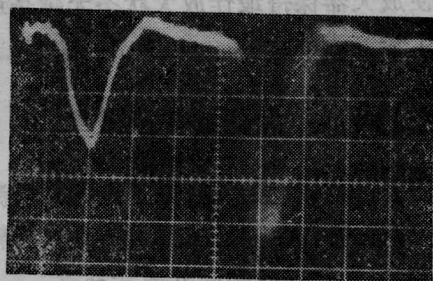


图 4 振荡器、放大器的脉冲波形示波器照相

首先到达光电二极管的光脉冲(图 4 中为振荡器)触发了示波器, 形成了第一个脉冲包迹, 而紧跟而来的另一个光脉冲也出现在其右侧。如果我们使用单次扫描, 则得到轨迹均清晰的振-放波形。但是, 使用正常的扫描方式, 则得到图 4 的形状。即头一个脉冲的迹很清楚, 而第二个脉冲的迹是模糊的。

该照片的曝光时间为  $\frac{1}{2}$  s, 故照片上的波形

是多次脉冲作用的结果。

头一个即振荡器脉冲波形清晰, 说明在短时间内激光脉冲的再现性是很好的, 但由于闸流管导通时间的离散性, 使得两个脉冲的距离有明显的抖动。表面上似乎只是放大器电源闸流管在晃动, 事实上, 振荡器的触发也有晃动, 只是由于示波器的触发方式使振荡器的脉冲被“固定”在开始的部位。因此, 放大器脉冲的抖动实际上是振荡器和放大器电源两只闸流管导通时间的抖动之和。

由图 4 的结果可以得出, 我们使用的 4050 A 闸流管的触发抖动时间为  $\pm 4$  ns。

由图 4 也可知道, 当振放系统相对延时错开 16 ns 时, 放大器输出脉冲幅度的相对变化约为 20%。此时振荡器脉冲的半宽为 20 ns。

#### 五、 同步特性

固定振荡器与放大器的工作条件(电压、电流和氖气压), 在振荡器输出稳定的情况下, 改变延时, 用示波器测量放大器输出脉冲的幅度, 我们可以得到振放系统的同步特性曲线。

图 5 是其中一个结果。此时非稳腔振荡器的输出功率为 1 W, 放大器输出 2 W。图 5 中的纵坐标是放大器输出幅度的相对值, 横坐标是延时, 左侧为放大器脉冲落后, 右侧为导前的方向。

由图 5 可以看出, 延时的影响并非十分临界, 具有放大功能的延时范围约 120 ns, 与器件电激励脉冲的宽度相仿。

同步特性大致是这样的: 在最佳延时处, 即放大倍率的极大值附近, 延时晃动对输出幅度的影响较小。离开峰值, 曲线的两侧是不对称的, 左侧的斜率为 10%/10 ns, 右侧为 15%/10 ns, 这就是说, 振荡器脉冲导前的情况下, 延时变化对输出的影响较大。如果相对晃动 16 ns, 幅度起伏量大于 20%, 这与图



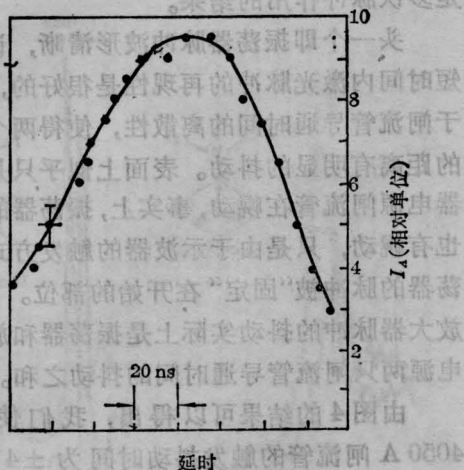


图5 振放系统的同步特性(黄绿光混合)

4 照片看到的情况是一致的。

同步特性曲线不对称的原因主要有两个,一是电激发脉冲的前沿较陡,二是激发态有不容忽略的寿命( $\sim 7.2$  ns),因此导前状态的变化较大是易于理解的。

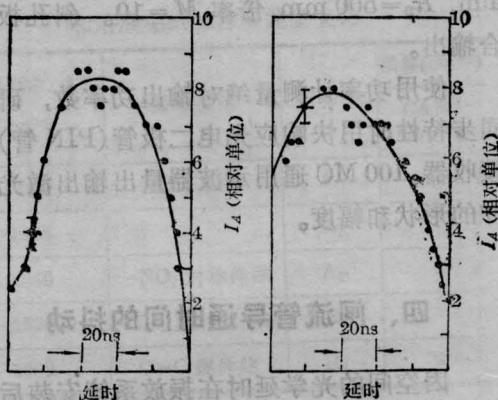
无论导前或落后都有一段延时时间放大器处于吸收状态,再往外延时便呈现透过状态(图中没有给出透过部分曲线)。

铜蒸气激光器经常是绿光、黄光同时振荡。图5所示的同步特性是对黄绿光总输出而言的。为了观察黄绿光的各自的同步特性,我们进行了下面的实验。

适当增加振荡器和放大器的输入电功率,振荡器输出1.7 W,放大器总输出5.0 W。将放大器输出光束用三棱镜分光,然后采用如上的方法测量两种波长的同步特性,结果分别见图6(a)和图6(b)。

显然,绿光的特性比起黄光较为尖锐,原因之一是:形成吸收黄光的基本条件是亚稳态能级 $^3D_{3/2}$ 有较大的布居数,在振荡器导前的状态下,通过电子碰撞由基态跃迁到 $^3D_{1/2}$ 者,大部分落在绿光跃迁的能级 $^3D_{1/2}$ ,因为两者的振子强度相差一倍<sup>[9]</sup>。换言之,当绿光处在吸收状态,黄光依然透过。这样会使黄光的同步特性显得不像绿光那样陡峭。

比较图6(a)和(b)还可以看到,黄光增



(a) 绿光 510.6 nm (b) 黄光 578.2 nm

图6 振放系统的同步特性

益出现峰值与绿光增益出现峰值的时刻略有不同,约落后5~6 ns。这主要是因为形成黄光受激发射需要较高的电子温度的缘故。

还应该指出,无论对绿光或是黄光,同步特性是随工作条件(主要是电激发脉冲的电压、电流、脉冲形状)而变的。因此,为了使振放系统获得最大输出,每次工作条件变更时,都应该调节延时的大小。设法采用光电自动控制使放大器保持最佳放大状态无疑是最理想的工作方式了。

## 六、放大器的转换效率

使用振荡-放大系统,除了进行测量激光系统的增益特性之外,主要目的是获得输出功率大、电光转换效率高的激光系统。

在我们的实验中,当放大器的工作参数为输入电压5.2 kV、平均电流0.62 A、氦气压为25 Torr时,输入光功率1 W,放大器可输出6.5 W,净增加输出5.5 W。此时将放大器改成平行平面型稳定腔,输出端为不镀膜的光学平板玻璃(反射率 $R \approx 8\%$ )的振荡器,则输出4.8 W。这表明采用振-放的形式,激光效率提高了15%。当然这是同步调到最佳,即延时调到放大器的增益最大的状态下获得的。

(下转第64页)

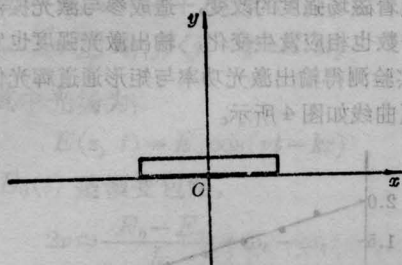


图 5

度, 根据双极性扩散规律, 可得<sup>[2]</sup>:

$$n_y v_y = D_0^x \frac{\partial n_y}{\partial y} \quad (3)$$

将上式微分, 并考虑到  $v_y$  不随  $y$  而变化, 最后可得:

$$\frac{\partial n_y}{\partial t} = D_0^x \frac{\partial^2 n_y}{\partial y^2} \quad (4)$$

求解(6)式偏微分方程可得:

$$n_y = n_0 e^{-\alpha y} \sin \beta y \quad (5)$$

式中  $\alpha, \beta$  为积分常数, 它们由起始条件及边界条件决定。  $n_0$  表示  $t=0$  时,  $y$  方向中心处的电荷浓度。 设  $y=0$  和  $y=l$ ,  $n_y=0$  ( $l$  为  $y$  方向上两平板间距), 可得  $\beta = \pi/l$ 。 令  $\alpha = \frac{1}{\Delta t}$  ( $\Delta t$  称消电离时间常数), 可得:

$$n_y = n_0 e^{-y/\Delta t} \sin \frac{\pi}{l} y \quad (6)$$

从(6)式可知, 在  $y$  方向上, 电荷浓度在管内随位置按正弦函数分布, 随时间改变按指数规律衰减, 其复合几率很高。

而在  $x$  轴方向, 由于无管壁限制, 情况就与  $y$  方向不同。 此时, 放电通道中心处温度最高, 从中心向外, 温度逐渐降低, 即此方向上等离子体中各类粒子不再分别处于等温态。 此时电荷浓度的空间分布单一地受体积复合作用的影响, 其几率随温度而变化。 因电子与离子间相对运动速度较快, 故电子-正离子的复合几率很小, 故只要考虑离子的复合情况。

(上接第 48 页)

迄今有关铜蒸气激光的振荡-放大系统的工作虽有一些报道<sup>[3,4]</sup>, 但对放大器的效率是否比振荡器高的结论还不一致, 可能是实验条件、工作参数相差较大的缘故。

感谢杨天立、江永禄、冯玉荣等同志在激光器电源上的协助和金庭臻同志在激光器安装上的帮助。

已知在放电空间中, 单位时间、单位体积内正离子和负离子复合的数目与碰撞次数成正比, 碰撞次数直接与正离子和负离子的浓度  $n^+, n^-$  成正比。 这样, 正、负离子的复合应与它们的乘积成正比。 由此我们可写出放电空间中由于复合引起的正、负离子随位置  $x$  变化的减少量为:

$$\frac{dn_x}{dx} = -\alpha_i n^+ n^- \quad (7)$$

式中  $\alpha_i$  为离子复合系数。 当  $n^+ = n^- = n$  时, 方程(7)可写成:

$$\frac{dn_x}{dx} = -\alpha_i n^2 \quad (8)$$

若  $x=0$  时,  $n_x = n_0$ , 对(8)式积分, 可得:

$$n_x = \frac{n_0}{1 + \alpha_i n_0 x} \quad (9)$$

可见, 在同一辉光放电正柱区中, 因受扁窄放电通道的限制, 在不同方向上带电粒子按不同的方式和量值进行消激发。 由于管壁复合较体积复合有效, 可以认为大量带电粒子的消激发主要通过管壁效应进行。 这就决定了在这种矩形通道内, 我们可得到一种准管壁稳定性的收缩正柱。

根据上述理论分析和一系列的实验, 使我们获得了一种磁调制 He-Ne 激光管。 目前因采用机械旋转磁铁进行调制, 故调制频率较低。 为了获得较高的调制信号, 应采用电调制法, 这有待于下一步改进。

### 参 考 文 献

- [1] В. Г. Левизу; "Курс теорет. физики", 1962, Том 1, ст. 538.
- [2] 王竹溪; "热力学简程", 人民教育出版社, 1984 年, p. 95.

(新天光学仪器研究所 程祖珍 王曙光  
1985 年 11 月 4 日收稿)

### 参 考 文 献

- [1] 美国洛伦兹·利弗莫尔国家实验室 1980 年度报告 (英文), 10~18.
- [2] Г. Г. Петрау; УФН, 1971, 105, No. 4, 645.
- [3] M. M. Kalugin et al.; Sov. J. Quant. Electr., 1981, 11, 644.
- [4] R. S. Hargrove et al.; IEEE J. Quant. Electr., 1979, QE-15, 1228.