

# 铜蒸气激光放大器的数值模拟

任虹 梁培辉 沈琪敏

(中国科学院上海光机所, 201800)

**摘要:** 本文建立了一个铜蒸气激光放大器的简化动力学模型, 数值计算了铜蒸气激光放大器的增益特性、同步特性、损耗对放大器输出功率的影响以及延时与输出光波形畸变量的关系等。计算结果与实验结果基本相符。

**关键词:** 铜蒸气激光, 放大器, 动力学模型

## Numerical simulation of copper vapor laser amplifiers

*Ren Hong, Liang Peihui, Shen Qimin*

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract:** A simplified kinetics model for copper vapor laser amplifiers is described. The gain property, time synchronized characteristics, output power dependence of loss coefficient and the influence of time-delay on pulse distortion values for the amplifier are obtained with numerical simulation. Calculated results are in approximate agreement with the experimental ones.

**Key words:** Copper vapor laser, amplifier, kinetics model

## 一、引言

对于铜蒸气激光(OVL)振荡器的动力学过程, Kushner等人已建立了一个自洽的模型<sup>[1,2]</sup>, 然而对OVL放大器动力学过程的研究至今还未见报道, 由于OVL的动力学过程是极其复杂的, 较完善的描述需要解十几个偏微分方程, 但由于某些反应速率以及初值的不确定性, 理论计算与实验结果也有一定的误差, 本文试图用一个高斯型的泵浦速率函数代替放电电路方程以及铜原子与氩原子的相互作用, 建立一个OVL放大器的简化动力学模型, 从而得到OVL放大器的一些基本变化规律。

## 二、简化动力学模型的建立

与一般脉冲激光放大器相比, OVL有两个特点: (1)OVL是一种典型的自终止激光器; (2)OVL的泵浦脉宽与激光脉宽之比约为4:1<sup>[1]</sup>, 因此在输入光脉冲作用期间泵浦对反转粒子数的影响不能忽略。

铜原子的简化能级如图 1 所示。我们在作了以下五点近似后建立了 OVL 510.6 nm 跃迁

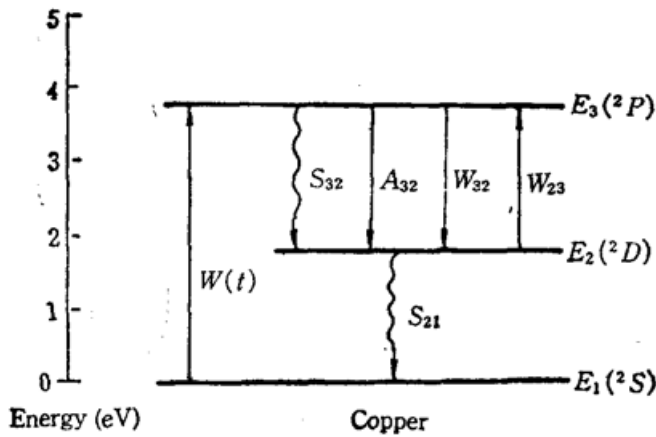


Fig. 1 Simplified diagram of copper energy level

的放大器简化动力学模型: (1) 近似认为工作物质横截面内反转粒子数是均匀分布的, 即一维模型; (2) 由于 OVL 是自终止激光器, 在激光脉冲作用期间可近似认为激光下能级粒子数无辐射回到基态的速率  $S_{21} \approx 0$ ; (3) 激光上、下能级简并度之比  $\delta_3/\delta_2 \approx 1$ , 实际为 3/2。 (4) 由于从基态泵浦到各能级的粒子数小于基态粒子数的 10%<sup>[1]</sup>, 因此可近似认为基态粒子数不变为常数  $n_0$ ; (5) 用高斯型泵浦速率函数等效放电电路方程及铜原子与氦原子的相互作用。

由此可将 OVL 放大器的速率方程在四元方程组的基础上简化为下列二元方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta n(z, t)}{\partial t} = n_0 W(t) - 2\sigma_{32} \Delta n(z, t) I(z, t) / h\nu - \frac{\Delta n(z, t)}{T_3} & (1) \\ \frac{\partial I(z, t)}{\partial z} - \frac{\partial I(z, t)}{c\partial t} = \sigma_{32} \Delta n(z, t) I(z, t) - \alpha I(z, t) & (2) \end{cases}$$

边界条件,

$$\begin{cases} I(0, t) = I_0(t) \\ \Delta n(z, 0) = n_3 - n_2 \approx -n_2 \end{cases}$$

Table 1 Parameter significance and its value

Symbol	Meaning	Typical value
$T_g(^{\circ}\text{C})$	Gas temperature	$1.45 \times 10^3$
$\tau_{32}(\text{s})$	Spontaneous emission lifetime of upper level	$7.84 \times 10^{-7}$
$n_0(\text{cm}^{-3})$	Cu atomic density of ground state	$2.34 \times 10^{16}$
$\Delta n_0(\text{cm}^{-3})$	Initial density of reversed population	$-2.52 \times 10^{11}$
$I_b(\text{W}/\text{cm}^2)$	Input laser peak intensity	$7.31 \times 10^2$
$T_3(\text{s})$	Equivalent lifetime of upper level	$9 \times 10^{-9}$
$\sigma_{32}(\text{cm}^2)$	Stimulated emission section	$4 \times 10^{-14}$
$\alpha(\text{cm}^{-1})$	Loss coefficient	$1.22 \times 10^{-3}$
$W_0(\text{s}^{-1})$	Maximum excitation rate	$2.5 \times 10^4$
$R(\text{cm})$	Radius of laser tube	1.3
$L(\text{cm})$	Length of laser tube	90
$f(\text{Hz})$	Pulse repetition rate	$6 \times 10^3$
$t_a(\text{s})$	Pumping pulse width	$8 \times 10^{-8}$
$t_b(\text{s})$	Pulse width of input laser	$3 \times 10^{-8}$

式中,  $\Delta n$  为反转粒子数密度;  $I$  为光强;  $T_s$  为上能级等效寿命;  $\sigma_{32}$  为发射截面, 由于 OVL 以非均匀加宽为主, 故<sup>[2]</sup>

$$\sigma_{32} = \frac{1}{32\sigma^{5/2} \nu^3 \tau_{32}} \left[ \frac{M_{Cu}}{K(T_g + 273)} \right]^{1/2};$$

$\alpha$  为损耗系数;  $n_0$  为基态粒子数密度, 其表达式为<sup>[1]</sup>:

$$n_0 = 1.23 \times 10^7 \exp(0.00124 \times T_g);$$

泵浦速率函数  $W(t)$  以及输入光脉冲强度分布都采用高斯型函数, 分别为

$$W(t) = W_0 \exp\left[-\frac{4 \ln 2 (t - t_{a0})^2}{t_a^2}\right]$$

$$I_0(t) = I_b \exp\left[-\frac{4 \ln 2 (t - t_{b0})^2}{t_b^2}\right]$$

这里  $t_{a0}$ 、 $t_{b0}$  分别表示泵浦峰值时刻以及输入光脉冲峰值进入放大器的时刻。上述各参量的意义以及它们的取值见表 1。对上述二元一次线性偏微分方程组, 通过网格法进行了数值计算。

### 三、计算结果与实验结果

为了将计算结果与实验结果进行比较, 我们测量了 OVL 放大器的一些输出特性。实验采用两台结构相同的 OVL 组成振放系统, 放电管内径为  $\phi 26$  mm, 电极间距为 90 mm, 充 26600 Pa 至 66500 Pa Ne 气作为缓冲气体, 放电重复率为 6 kHz, 每台 OVL 的电源都有信号发生器控制闸流管触发时间。振荡器采用  $M=10$  的望远镜式非稳腔。

通过对方程组(1), (2)的数值运算, 我们得到了以下五个主要结果:

(1) 增益特性曲线, 如图 2 所示。从图 2 中可知: 当输入光功率达到 1.0 W 时, 能从输出为 15 W 的放大器中提取约 80% 的输出功率。根据文献[3]提供的计算方法, 算出这种 OVL 的饱和功率密度为 260 mW/cm<sup>2</sup>, 小信号增益系数为 0.08 cm<sup>-1</sup>。图 3 是实验曲线, 从图 3 中可知: 当输入光功率达到 0.12 W 时, 能从 5 W 的放大器中提取约 80% 的输出功率, 对于这样的 OVL, 其饱和功率密度为 96 mW/cm<sup>2</sup>, 小信号增益系数为 0.11 cm<sup>-1</sup>。由此可见: 理论计算与实验测出的小信号增益系数是相近的, 这两种 OVL 输出光的总功率之比为 3.0, 而饱和功率密度之比为 2.7, 两者相近。

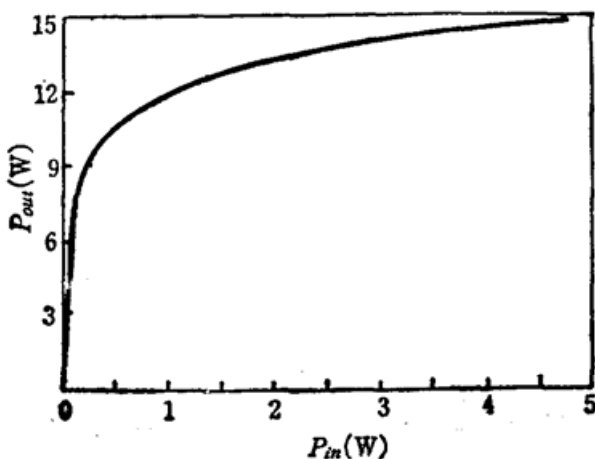


Fig. 2 Calculated curve of output with input power

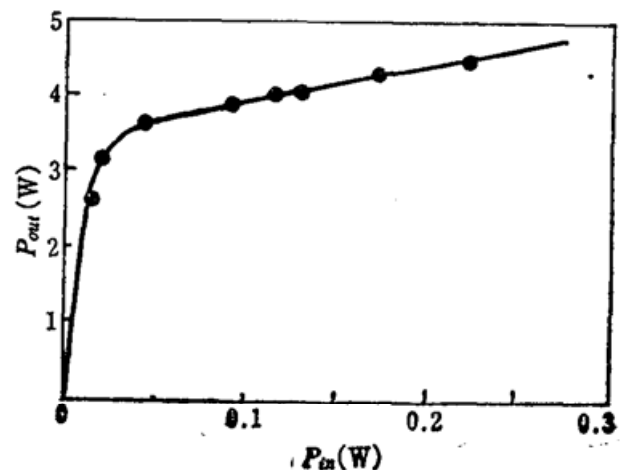


Fig. 3 Experimental curve of output with input power

(2) 同步特性曲线, 即延时  $t$  与相对输出功率  $P_o/P_{o\max}$  的关系曲线, 如图 4 所示, 当  $t=0$  时, 输出功率最大, 我们称之为最佳延时, 当  $t>0$  时, 即输入光到达放大器时, 放大器尚未达到最大激发状态, 我们称之为欠延时, 当  $t<0$  时, 即输入光到达放大器时, 放大器已经超过最大激发状态, 我们称之为过延时。图 4 中实线为计算曲线, 虚线为实验曲线, 由此可见理论计算与实验结果是基本一致的。具有放大功能的延时范围约为 160 ns; 在最佳延时  $\pm 5$  ns 的范围内, 输出光功率变化小于 5%, 偏离最佳延时 10 ns 以上, 两边的变化斜率在 10%/10 ns 到 15%/10 ns 之间。

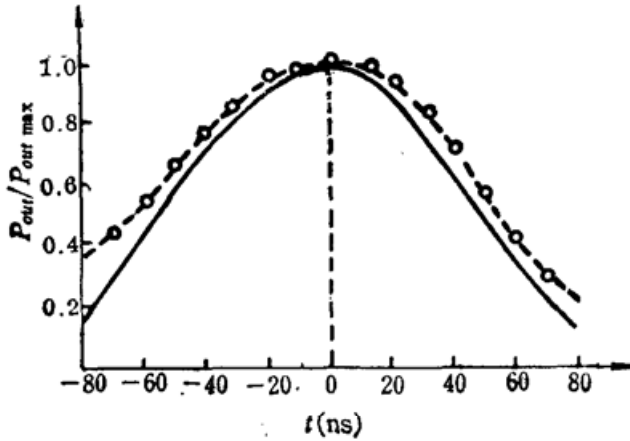


Fig. 4 Time-synchronized characteristic curves for experimental (dotted line) and calculated (solid line) results

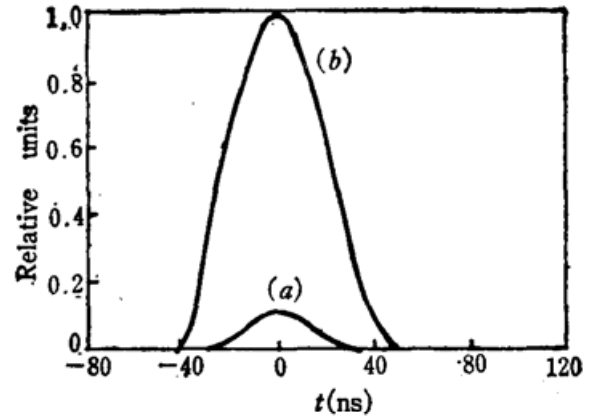


Fig. 5 Input (a) and output (b) pulse shapes for the optimum timing

(3) 在最佳延时情况下, 输出光与输入光波形如图 5 所示, 由图 5 可知: 当输入光脉宽为 30 ns 时, 放大后的激光脉宽增加到 50 ns, 而实验测出放大后的激光脉宽为 36 ns。作者认为两者相差较大的原因是: 模型中等效上能级寿命  $T_3$  取值偏大的缘故, 这正是忽略了各种碰撞作用所带来的偏差。

(4) 放大器输出光功率与损耗系数的关系曲线如图 6 所示。对于 OVL 放大器来说: 损耗主要为输入光发散引起的损耗以及窗片污染引起的损耗, 从图 6 可知: (a) 损耗越大, 从放大器中提取的功率越少; (b) 输入光功率越大, 损耗对输出光功率的影响也越大。因此可以预言: (a) 多台 OVL 串联放大时, 改善振荡器输出光的方向性以及减小每台放大器中每块窗片的污

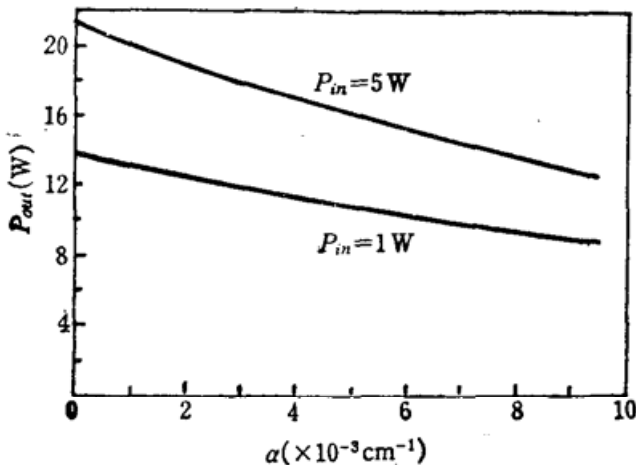


Fig. 6 Calculated curves of output power versus loss coefficient at different input powers

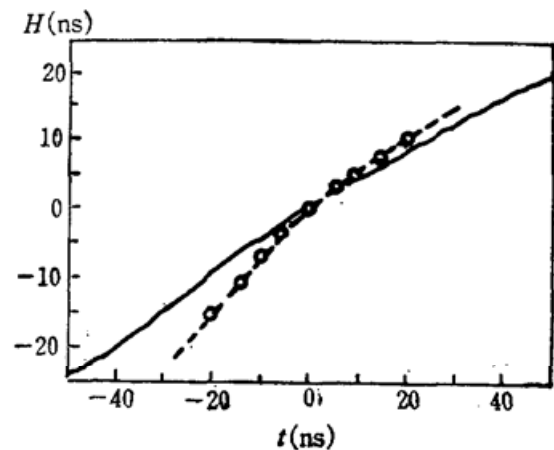


Fig. 7 Experimental (dotted line) and calculated (solid line) curves of  $H$  and  $t$

染, 定能有效地提高振放链的效率; (b) 使用结构相同的 OVL 组成振放链, 损耗系数确定后, 这一振放链能输出的最大功率也就随之确定了。这是因为当放大器台数增加时, 增益系数随输入光强的增加而减小, 最终趋于损耗系数, 这时输出光功率便不再有明显增加而趋于一定值。

(5) 延时  $t$  与波形畸变量  $H$  的关系曲线如图 7 所示。所谓波形畸变量是指放大器输出光波形的峰值时间与输入光波形峰值时间之差。图 7 中实线是理论计算曲线, 虚线为实验曲线, 两者较接近。由图 7 可知: (a) 当放大器处于欠延时 ( $t > 0$ ) 时,  $H > 0$  表示输出光脉冲峰值后移, 前沿变平, 后沿变陡; 当放大器处于过延时 ( $t < 0$ ) 时,  $H < 0$  表示峰值前移, 前沿变陡, 后沿变平。(b) 欠延时 ( $t > 0$ ) 时波形畸变量略小于过延时 ( $t < 0$ ) 时的波形畸变量。计算结果表明: 欠延时的变化斜率为 0.44, 过延时的变化斜率为 0.46。实验结果表明: 欠延时的变化斜率为 0.55, 过延时的变化斜率为 0.69。两边斜率不等是由于欠延时时输入光脉冲的前沿消耗了一定数量的反转粒子数, 因而输入光脉冲后沿得到的放大倍率比过延时时输入光脉冲前沿得到的放大倍率要小。

### 参 考 文 献

- 1 M. J. Kushner, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17**(8), 1555(1981)
- 2 M. J. Kushner *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **51**(6), 3020(1980)
- 3 尹亮华 *et al.*, *光学学报*, **8**(3), 257(1988)

(上接第 905 页)

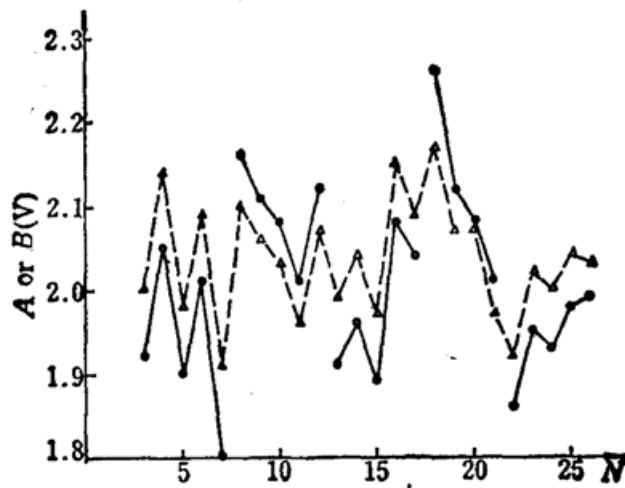


Fig. 5 Fluctuations of A and B

通道的一致性很好, 尽管涨落很大。

### 参 考 文 献

- 1 陈佳圭, *微弱信号检测*, 中央广播电视大学出版社, 1987 年 7 月, p. 127