

20W 铜蒸气激光器的数值模拟

尹宪华 梁宝根 陶永祥 崔健力 陈 林

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 本文采用自洽模型, 对 20W 铜蒸气激光器的放电动力学过程进行了数值模拟, 其结果与实验相符。

关键词: 铜蒸气激光器, 数值模拟

Numerical simulation of 20W copper vapor laser

Yin Xianhua, Liang Baogen, Tao Yongxiang, Cui Jianli, Chen Lin

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

Abstract: We have described the kinetics of 20W copper vapor laser with self-consistent model. The results of numerical calculation, which accord with experimental results are also presented.

Key words: copper vapor laser, numerical simulation

为了进一步了解铜蒸气激光器放电的各种参数对输出功率的影响, 本文根据 M. J. Kushner 提出的铜蒸气激光速率方程的自洽计算机模型^[1], 对平均输出功率为 20W 的铜蒸气激光器作计算机数值模拟, 理论与实验结果比较相符。

一、数值模型和计算方法

整个动力学模型可归结为六个方程组, 每个方程组又有若干个子方程组成; 它们分别描述各种动力学反应过程的速率系数、放电回路、电子密度、电子温度、各个激发态和电离态的原子密度和激光光强。在计算过程中我们作了以下几点近似: (1) 放电管内的气体温度 T_0 沿径向分布是平稳的 ($d \leq 4$ cm), 忽略了其它放电参数沿放电管径向和轴向的变化; (2) 把铜原子激光辐射态 $^2P \rightarrow ^2D$ 的两个跃迁简化为一个跃迁, 即只考虑 510.6 nm 波长跃迁; (3) 在铜原子和氩原子能级图中分别引入一个假设态, 该态代表原子在激发过程中所处其它可能态的总和 (除基态、共振态、亚稳态和电离态以外); (4) 放电电子能量分布函数是麦克斯韦分布。

1.1 各种反应过程的速率系数 K

在整个放电动力学过程中我们考虑了电子同原子发生的第一类和第二类非弹性碰撞、弹性碰撞、电离、辐射复合、碰撞辐射复合、原子间碰撞去激发、彭宁碰撞、扩散去激发、自发辐射

和受激发射过程。

铜原子或氦原子 Ni 的前四种碰撞速率系数 K 可以表示为

$$K_{ijl} = \int_{\varepsilon_0}^{\infty} \sqrt{\frac{2\varepsilon}{m}} Q_{ijl}(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1-1)$$

这里下标 i, j, l 分别表示原子的种类和激发的上、下能级。设电子能量分布为麦克斯韦分布, 即 $f(\varepsilon)d\varepsilon$ 表示在能量 $\varepsilon \rightarrow \varepsilon + d\varepsilon$ 范围内 n_e 的分数, 则

$$f(\varepsilon)d\varepsilon = \sqrt{\frac{4\varepsilon}{m}} (kT_e)^{-3/2} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT_e}\right) d\varepsilon \quad (1-1a)$$

这里 ε_0 为激发的阈值能量, ε 为电子能量, n_e 为电子浓度, k 为玻尔兹曼常数, T_e 为电子温度, m 为电子质量, Q_{ijl} 为原子 Ni 的激发截面。由细致平衡原理可知原子 Ni 的去激发截面 Q_{ij} 可表示为

$$Q_{ij} = \frac{g_j}{g_l} \frac{\varepsilon + \varepsilon_l}{\varepsilon_j} Q_{ijl}(\varepsilon + \varepsilon_l) \quad (1-2)$$

式中 g_l 与 g_j 分别对应能级 l 与 j 的统计权重。有关文献给出了铜原子和氦原子的碰撞截面或速率系数的解析式^[2]和数值曲线^[3,4], 但有差异, 并且不完全。我们对这二种结果进行比较, 在给定的解析式上进行了某些系数修正。公式如下, 铜原子的激发和电离截面为

$$Q_{ij} = L_{ij}(\varepsilon - \beta_{ij}) / \nu_{ij} / \varepsilon^{\mu_{ij}} \quad (1-3a)$$

$$\varepsilon > \beta_{ij}$$

参数 $L_{ij}, \beta_{ij}, \mu_{ij}$ 见表 1。

铜原子的弹性碰撞截面为

$$Q = \pi a_0^2 (\pi^2 46^2 R_y / \varepsilon)^{1/2} \cdot \varphi(z)$$

$$\varphi(z) = \int_z^{\infty} \sin^2 x^{-3/2} dx$$

$$z = \sqrt{5/2} \pi^{-2/3} (46 R_y)^{1/4} \quad (1-3b)$$

这里 a_0 为玻尔半径, R_y 为里德堡常数。

氦原子激发和电离截面为

$$Q_{ij} = \begin{cases} 0 & \varepsilon \leq \beta_{ij} \\ L_{ij}(\varepsilon - \beta_{ij}) & \varepsilon > \beta_{ij} \end{cases} \quad (1-4a)$$

参数 L_{ij}, β_{ij} 见表 2。

氦原子弹性碰撞截面为

$$Q = 1.6 \varepsilon^{-1/6} \quad (1-4b)$$

其它反应过程的速率系数 K 可参见表 3。

Table 1

Transition	β (eV)	$L(\text{\AA}^2)$	ν	μ
$S \rightarrow 2P$	3.8	120	1.17	1.87
$S \rightarrow PS$	5.7	40	0.93	1.69
$S \rightarrow \infty$	7.8	15	1	1.2
$S \rightarrow 2D$	1.4	90	1.35	2.06
$2D \rightarrow 2P$	2.4	100	1.05	1.77
$2D \rightarrow PS$	4.3	70	1.02	1.6
$2P \rightarrow PS$	1.9	140	1.2	1.5

Table 2

Transition	λ (eV)	L (\AA^2)
$0 \rightarrow M \text{ (Cu)}$	15.2	0.013
$0 \rightarrow \infty$	21.5	0.0156
$0 \rightarrow 1^1S$	18	0.014

Table 3

Name	Process	Rate coeff. K cross section Q	Reference	Modification factor
Radiative recombination	$e + M^+ \rightarrow M + h\nu$	$4.2 \times 10^{-12} \left(\frac{300}{T_e}\right)^{1.7} \text{ cm}^3/\text{s}$	[7]	1~2
Collision radiative recombination	$e + e + M^+ \rightarrow M + e + h\nu$	$7.1 \times 10^{-29} \left(\frac{300}{T_e}\right)^{4.5} \text{ cm}^3/\text{s}$	[7]	1~2
Atom and atom collision	$\begin{pmatrix} \text{Cu}_m \\ \text{Cu}^+ \\ \text{Cu}^{**} \end{pmatrix} + M \rightarrow \text{Cu} + M$	$2 \times 10^{-13} \left(\frac{T_g}{300}\right)^{1/2} \text{ cm}^3/\text{s}$	[7]	2~3
	$\begin{pmatrix} \text{Ne}_m \\ \text{Ne}^{**} \end{pmatrix} + M \rightarrow \text{Ne} + M$	$6 \times 10^{-15} \left(\frac{T_g}{300}\right)^{1/2} \text{ cm}^3/\text{s}$	[7]	2~3
Penning collision	$\text{Ne}_m + \text{Cu}_m \rightarrow \text{Ne} + \text{Cu}^+ + e$	$4 \times 10^{-15} \text{ cm}^3$	[7]	2~3
	$\text{Ne}_m + \text{Ne}_m \rightarrow \text{Ne}^+ + \text{Ne} + e$	$7.1 \times 10^{-8} T_g^{1/6} \text{ cm}^3/\text{s}$	[7]	2~3
Spontaneous emission	$\text{Cu}^+ \rightarrow \text{Cu}_m + h\nu$	$1/(784\text{ns})$		1
	$\text{Cu}^+ \rightarrow \text{Cu} + h\nu'$	$1/(12.3\text{ms})$		1
Stimulated emission	$h\nu + \text{Cu}^+ \rightarrow \text{Cu}_m + 2h\nu$	$(C^4 \cdot A / (33 \cdot \pi^{5/2} \cdot \nu^3)) \cdot (M\text{Cu} / (kT_g))^{1/2}$	[7]	1
Diffusion recombination	$\begin{pmatrix} M^+ \\ M^* \\ M \end{pmatrix} + \text{wall} \rightarrow M + \text{wall}$		[8]	
	$e^* + \text{wall} \rightarrow e + \text{wall}$		[8]	

1.2 放电回路方程

图 1(b) 是激光放电等效电路, 其全电路方程可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= (V_1 - V_2 + V_0 f(\tau_s)) / L_1 \\ \frac{dI_2}{dt} &= \frac{V_2 - V_d}{L_2} \\ \frac{dV_1}{dt} &= -\frac{I_1}{C_1} \\ \frac{dV_2}{dt} &= \frac{I_1 - I_2}{C_2} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中 I_1 和 I_2 分别为流过电感 L_{thy} 和 L_{laser} 的电流, V_1 和 V_2 为电容 C_1 和 C_2 上的电压, V_0 为储能电容 C_1 上的直流充电电压, $f(\tau_s)$ 是闸流管的开关函数, V_d 为放电时激光管等效电阻上的电压:

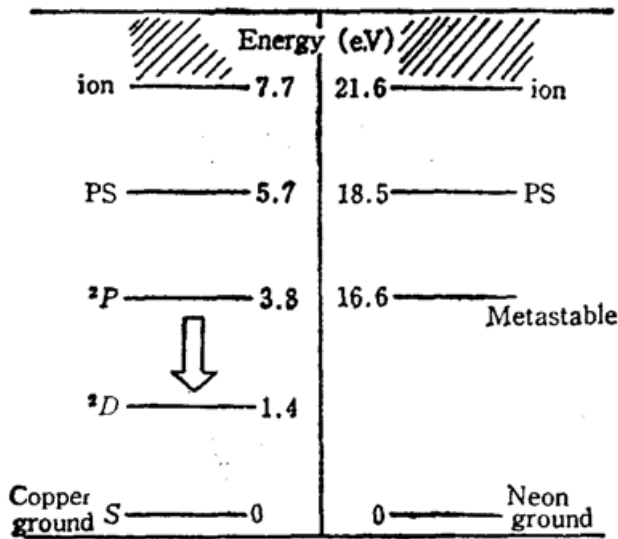
$$\left. \begin{aligned} V_d &= I_2 R_c R_d / (R_c + R_d) \\ R_d &= (l m_e v_m) / (n_e \cdot a \cdot e^2) \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

这里 R_c 为充电电阻, R_d 为放电管的等离子体电阻, l 为放电管长度, a 为放电管有效截面, m_e

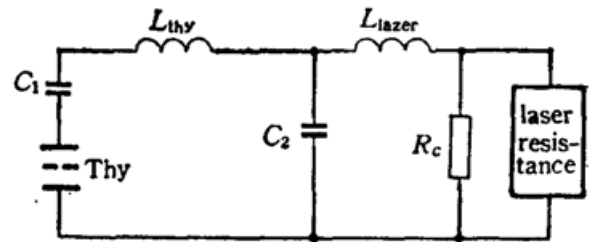
为电子质量, e 为电子电荷量, ν_m 为电子碰撞频率, n_e 为电子浓度。

1.3 电子密度方程

电子密度方程可以表示为



(a) Energy levels of copper and neon atoms



(b) Equivalent discharge circuit

Fig. 1

$$\frac{dn_e}{dt} = n_e \left(\sum_{ij} K_{ij}^I N_{ij} - \frac{D_a}{A^2} - \sum_i N_i^+ (K_{RR} + n_e K_{CRR}) \right) + N_{e_m} \cdot \sum_{ij} K_{ij}^P N_{ij} \quad (3)$$

在(3)式中, 第一项表示电子对原子 N_{ij} 碰撞电离引起的密度增加, 第二项表示电子扩散到管壁并复合引起的损耗, 第三项表示离子 N_i^+ 的辐射复合和碰撞辐射复合引起的电子密度减少, 第四项对彭宁碰撞引起的密度增加。

1.4 电子温度方程

电子温度方程可表示为

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} k \frac{dT_e}{dt} = & \frac{e^2 E^2}{m_e \nu_m} + \sum_{i,j} \frac{N_{em} N_{ij} K_{ij}^P \Delta \epsilon_{ij}^P}{n_e} + \sum_{i,j < l} N_{ij} \cdot K_{ijl}^s \cdot \Delta \epsilon_{ijl}^s \\ & - \sum_{i,j > l} N_{il} \cdot K_{ijl} \cdot \Delta \epsilon_{ijl} - \frac{3}{2} \cdot \frac{D_a}{A^2} kT_e - \sum_{i,j} N_{ij} \cdot K_{ij}^I \cdot \frac{3}{2} kT_e \\ & - \frac{3}{2} k(T_e - T_g) \sum_{i,j} N_{ij} K_{ij} \frac{2m_e}{M_i} \end{aligned} \quad (4)$$

在式(4)中, 前三项的作用是提高电子温度, 后四项的作用是降低电子温度。第一项为外电场的贡献; 第二项为原子 N_{ij} 彭宁电离的贡献, 其中 j 代表能级, K_{ij}^P 为彭宁电离系数, $\Delta \epsilon_{ij}^P$ 为能量贡献; 第三项为原子 N_i 在能级 j 和 l 之间发生第二类非弹性碰撞, 其中 K_{ijl}^s 为碰撞系数 $\Delta \epsilon_{ijl}^s$ 对应能量贡献; 第四项是由于电子对原子发生非弹性碰撞, 损耗能量 $\Delta \epsilon_{ijl}$; 第五项是由于电子扩散到管壁, 损耗能量 kT_e ; 第六项表示产生二次电子的能量损耗, 这里 K_{ij}^I 为原子 N_{ij} 的电离速率系数; 最后一项表示电子同质量为 M_i 的原子 N_{ij} 发生弹性碰撞, 损耗能量。

1.5 各个态的粒子密度

不同原子 N_i 在各个激发态和电离态的粒子密度方程可表示为

$$\frac{dN_{ij}}{dt} = \sum_i (K_{ij} N_{ii} - K_{ji} N_{ij}) n_e + \sum_{i,j} (K_{ij}^H N_{ij} N_{ii} - K_{ji}^H N_{ii} \cdot N_{ij}) - \frac{D}{\Lambda^2} N_{ij} \pm \sum_i (A N_{ij,i} + B \cdot I \cdot N_{ij,i}) \quad (5)$$

公式(5)的第一项表示在同电子碰撞过程中,各个态粒子 N_{ij} 的产生和消灭贡献,这一项包括激发和去激发、电离和复合过程;其速率系数 K_{ij} 和 K_{ji} 也不局限于表示激发和去激发。第二项代表各种原子 N_{ij} 互相之间发生碰撞,产生激发和去激发贡献,这一项包括彭宁碰撞过程;其速率系数 K_{ij}^H 和 K_{ji}^H 也可代表 K_{ij}^P 。第三项代表粒子 N_{ij} 的径向扩散引起的损耗, D 为扩散系数, Λ 为扩散长度;第四项代表了由于自发辐射或受激发射引起的粒子密度变化。这一项在铜原子的 2P 态和 2D 态显得特别重要,并分别在这项前面加“-”号或“+”号。方程(5)可由九个子方程组成,其中五个是描述铜原子各能级的;另外四个是描述氩原子能级的,如图1(a)所示。

1.6 光强方程

激光光强方程可以表示为

$$\frac{dI}{dt} = h\nu c B I \left(Cu^* - \frac{g_3}{g_2} Cu_m \right) \frac{l}{L_c} - cI((1-R)/l_c + \gamma) + h\nu c A Cu^* \alpha \quad (6)$$

式(6)中第一项代表受激辐射和吸收, l 是增益长度, L_c 是腔长, B 是受激发射系数, h 是普朗克常数, ν 是激光频率, c 是光速, Cu^* 和 Cu_m 分别对应铜原子的上、下激光能级的粒子浓度。第二项代表耦合输出损耗和内损耗, R 是腔镜反射率, γ 为分布损耗。第三项为自发辐射贡献, A 是自发辐射系数, α 是一个几何因子。

以上方程可以构成一个闭合的一阶微分方程组。

由于铜蒸气激光器是高重复频率放电的,计算结果必须满足物理条件:前一个放电脉冲的余辉终值应是下一个放电脉冲的初始值。我们采用迭代循环解法,事先假定各参数的初始值 $y(i)|_{t=0}$ 经过 $t=1/f$ 后得到余辉终值 $y(i)|_{t=1/f}$ 。再用这个终值作为第二个循环的初始值代入,以此循环,直至 $(y_n - y_{n-1})/y_{n-1} < \delta$ 。这里 f 是放电重复频率, n 是循环次数, δ 视精度而定。这时得到结果就满足自洽,也正是所需的结果。

计算中,常用的典型参数参照实用 20W 铜蒸气激光器,见表 4。

Table 4

Tube length	$l=110$ cm	Inductance	$L_{thy}=250$ nH
Tube diameter	$d=3.5$ cm		$L_{laser}=650$ nH
Tube temperature	$T_w=1500^\circ\text{C}$		
Charging voltage	$V_0=14$ kV	Capacitance	$C_1=7.1$ nF
Neon pressure	$P=30$ Torr		$C_2=2.1$ nF

二、理论值与实验结果

1. 图 2 给出了放电过程中一些主要参数随时间变化的关系。图 2(a) 是计算机描出的理论曲线,图 2(b) 上、中、下是实验中拍摄的电压、电流、激光照片。在本文,反映理论曲线幅值的纵座标都采用相对单位,反映时间特性的横座标为每格 40ns。可以看到流过激光管的电流

有两个峰,第二个峰是由于放电线路引入锐化电容 C_2 的结果。计算和实验都表明,随着 C_1/C_2 比值增大,第二峰的幅值上升。通常激光产生在第一个峰内,因此第二峰主要用于放电加热过程。

图 2(a) 中的 1, 2 曲线表明 2P 态粒子数没超过 2D 态的粒子数就产生激光了,即反转发生在 $Cu^* > \frac{g_3}{g_2} Cu_m$ 这段时间内。代表 2P 态浓度的曲线在激光发生时刻有一下跌过程,然后又迅速上升,直至渐近稳定。下跌过程说明在产生受激发射时刻,激光上能级粒子数迅速减少。

2. 图 3 给出了输出功率和脉宽与放电管内气体温度的关系。实验曲线是在放电停止瞬时光测高温计观测管壁温度得到的,实验与理论符合得较好。另外,以光脉宽变化曲线可知:当温度较低时,激发到 2P 态粒子数较少,发光时间短;当温度过高时, 2D 态易饱和,发光时间也短。

3. 图 4 给出了 C_2 与激光功率和脉宽的关系。从图 4(a) 可以看到随着 C_2 的增加,发光时间提前,激光功率有所增加;但当 C_2 增至 $3.5nF$ 时,发光就延迟了,激光功率继续增加。这现象可解释为:发光时间的提前是与电流第一峰的前半部面积成正比;激光功率与第一峰的整

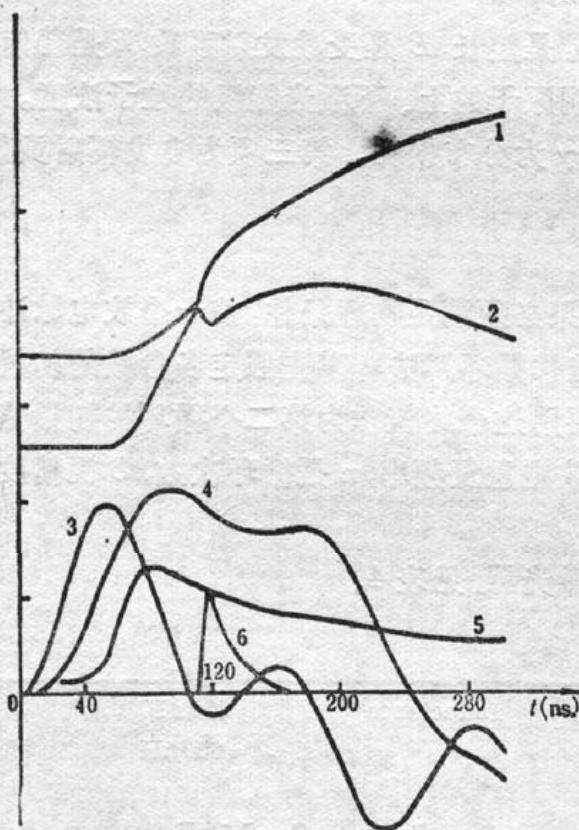
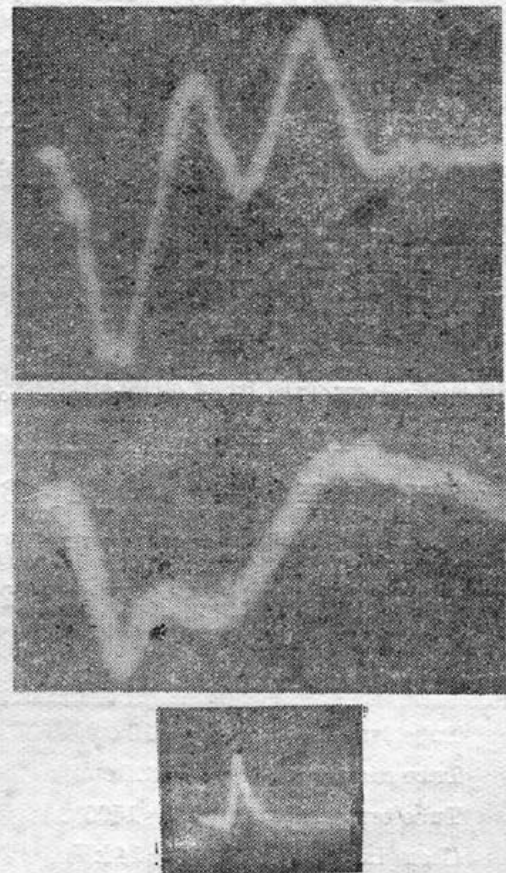


Fig. 2

(a) Main parameters as a function of time (theory)

- 1—The density of metastable state 2D , initial value $3 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$;
- 2—The density of state 2P , initial value $2 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$;
- 3—The discharge voltage across the tube;
- 4—The discharge current through the tube;
- 5—Electron temperature, initial value 0.3eV ;
- 6—Laser waveform



(b) The waveforms of discharge voltage, current, laser (experiment)

- (upper) discharge voltage across the tube (50ns/div);
- (middle) discharge current through the tube (50ns/div);
- (lower) laser waveform (20ns/div)

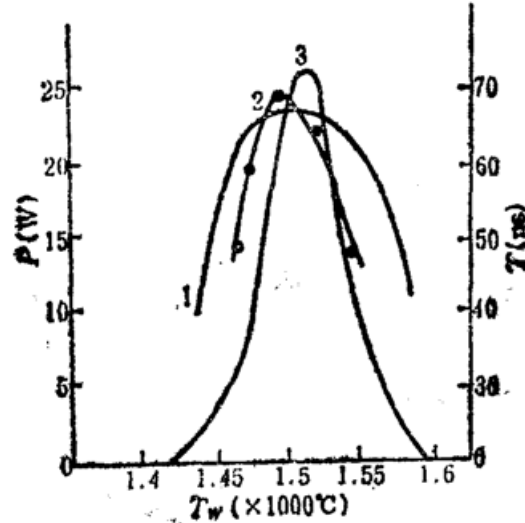


Fig. 3 The laser pulse width and the laser power as functions of gas temperature
1—laser pulse width (theory); 2—laser power (experiment); 3—laser power (theory)

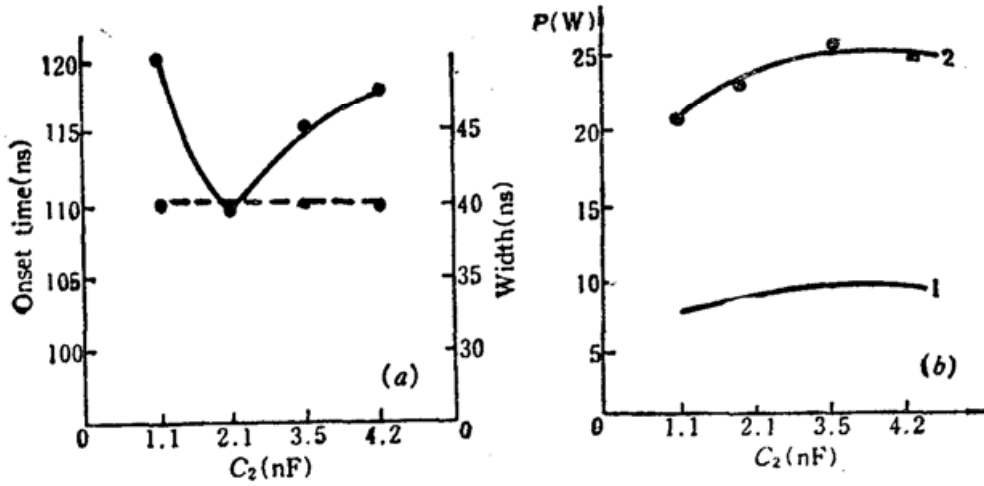


Fig. 4

- (a) The laser onset time and width as functions of sharp capacitance C_2 ($C_1 = 7.1 \text{ nF}$)
 —onset time; ----width
- (b) The laser power as a function of sharp capacitance C_2 ($C_1 = 7.1 \text{ nF}$)
 1—theory; 2—experiment

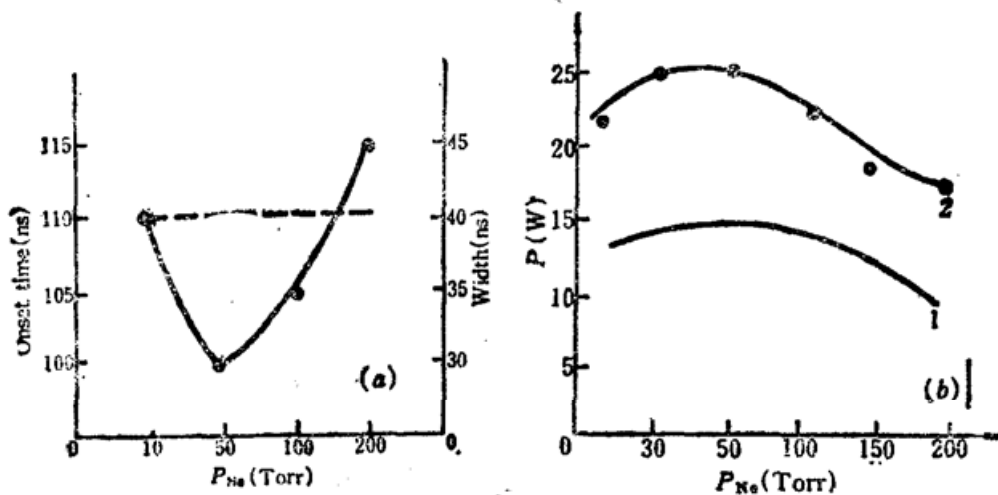


Fig. 5

- (a) The laser onset time and width as a function of neon pressure. —onset time; ----width
- (b) The output power as a function of neon pressure. 1—theory; 2—experiment

个面积成正比。当 O_2 过大, 失去锐化作用, 发光时间就会延迟。激光脉宽并不随 O_2 变化。

4. 图 5 给出了氖气压与激光功率和脉宽的关系。发光时间随气压变化较大, 激光脉宽无明显变化。理论和实验都表明最佳工作气压为 30~50 Torr。

5. 最佳重复频率

在自洽模型中, 改变放电重复频率也就改变初始电子浓度、初始亚稳态密度等。计算表明, 随着重复频率的下降, 初始电子浓度下降, 激光峰值强度增加。但平均功率为

$$\bar{P} = f \cdot \int_0^T I(t) dt \quad (7)$$

这里 $I(t)$ 为光强, T 为光脉宽, f 为放电重复频率, 因此对于获得最大功率输出, f 有一个最佳值。图 6 给出了输出功率、重复频率和初始电子浓度三者的关系。

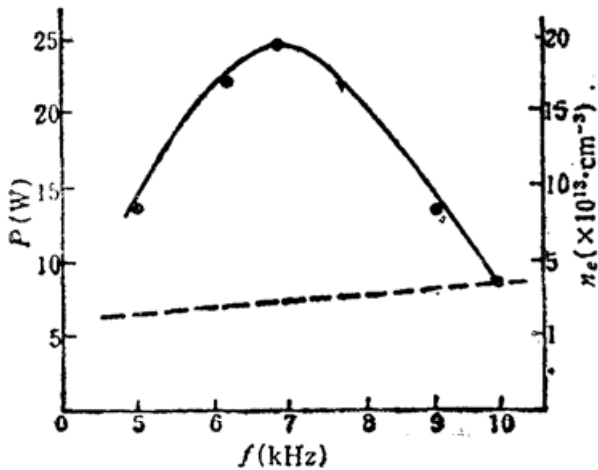


Fig. 6 The output power and initial electron density as a function of pulse repetition rate
—output power; ---electron density

6. 谐振腔反射率与输出功率的关系

图 7(a) 表明, 随反射率 $R = r_1 r_2$ 的增加, 激光脉宽增加, 但峰值下降。这是因为腔镜输出损耗随 R 的增大而减小, 腔内光子寿命随损耗减少而变大, 而激光脉宽正比于腔内光子寿命。另外, 随 R 的增大, 激光起振时间并没提前, 这也说明此类激光器增益很高, 即使在透射率很大的谐振腔内也易起振。在 20W 铜蒸气激光器中, 通常采

用的反射镜 $r_2 = 100\%$, 输出镜 $r_1 = 10\%$ 。从图 7(b) 看到, 当 $r_1 = 10 \sim 30\%$ 时, 理论和实验比较接近。

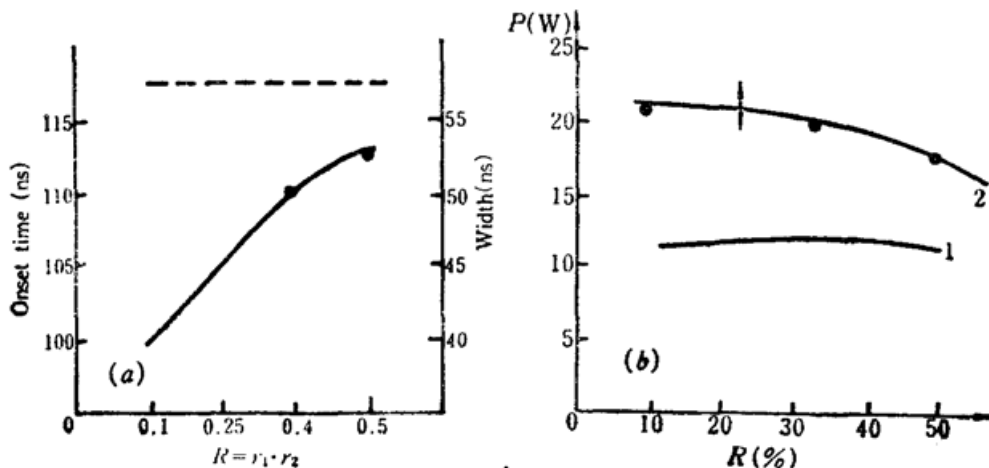


Fig. 7

(a) The laser onset time and width as functions of resonator's reflectance. —width; ---onset time
(b) The output power as a function of resonator's reflectance. 1—theory; 2—experiment

参 考 文 献

- 1 M. J. Kushner, *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-17 (8), 1555 (1981)
- 2 A. Kh. Mnatsakanyan, *Sov. J. Quant. Electr.*, 8 (3), 343 (1978)
- 3 M. J. Kushner, *J. Appl. Phys.*, 54 (6), 2970 (1983)
- 4 S. Trajmar, *J. Phys. B.*, 10 (6), 3323 (1977)
- 5 M. J. Kushner, *J. Appl. Phys.*, 51 (6), 3020 (1980)
- 6 E. Wasserstrom, *J. Appl. Phys.*, 53 (8), 5565 (1982)