

铅蒸气激光器计算机模拟

夏铁君 姚志欣 汪永江 孙 威
(浙江大学物理系)

提 要

本文建立了模拟铅蒸气激光器激励过程的计算机模型, 计算结果与实验结果一致。通过计算揭示出影响激光输出功率的主要因素是峰值电子温度, 而重复频率的限制主要取决于初始电子密度。

一、引 言

继铅蒸气激光器的研制工作^[1], 本文作者进行了对该激光器激励过程的计算机模拟。通过分析模拟结果并与实验结果进行比较, 对铅蒸气激光器的运转机制进行了探讨。自限型金属蒸气激光器的激励过程的时间尺度通常为 10^2 ns 量级, 各微观参量的量值在此期间变化剧烈, 通过实验进行测量难度较大。由于这些原因, 计算机模拟激光器的微观过程成为这一领域研究工作的重要手段^[2~8]。对铅激光器, 尚未见到有关建立计算模型进行研究的报道。

我们模拟的对象是一台纯铅激光器。主要特征如下: 放电管内径 1.8 cm, 放电区长 46.5 cm。谐振腔由曲率为 5 m 的全反镜和平板玻璃构成。储能电容 1000 p。该激光器输出波长为 723 nm 的激光, 平均功率约 400 mV^[1]。

二、模 型

计算模型以速率方程作基础, 同时考虑了放电电路和激光等离子体的耦合。模拟包括整个激励过程。余辉期间的作用反映在激励脉冲的初始条件上, 具体而言, 主要反映在初始电子温度, 电子密度和原子各能级布居初值上。模型中, 参考实验测量结果^[4]确定了初始电子温度的取值范围, 并由激励脉冲开始时局部热平衡成立的假设^[5], 由初始电子温度推算原子各能级的布居初值。对电子密度初值, 参考与铅蒸气激光器相类似的铜蒸气激光器模拟结果^[5]来确定取值范围。对于储能电容的充电电压, 缓冲气体的平均压强, 放电管管壁温度以及由此提供的铅原子蒸气密度等, 计算中的取值均与实验结果一致。

原子激发态的布居数是十分重要的微观参量。根据 W. T. Walter 等人对这类激光器的分析^[6], 我们选择铅原子中最接近基态的两个共振态和与这两个共振态有光学联系的亚稳态以及铅的电离态作为具体的研究对象。对作为缓冲气体的氙的原子能态, 研究了基态, 亚稳态, 等效激发态和电离态的行为(见图 1 和表 1)。由于金属原子中与激光无直接关系

的激发态在激励脉冲期间也会被强烈激发而耗散电子能量^[7]，所以在有关电子能量方程中引入了铅原子的能级折算因子，以反映这类损耗。氖原子的等效激发态代表了除亚稳态外氖原子各激发态的总和。

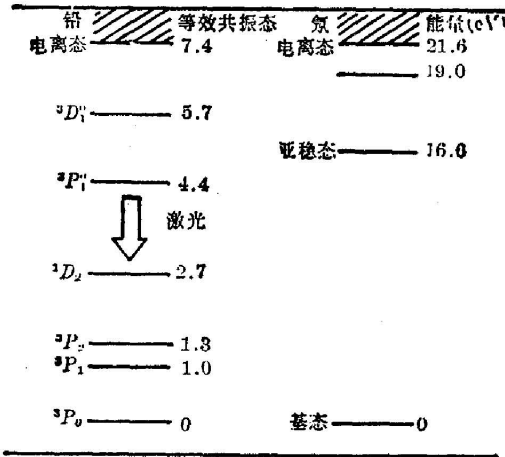


图 1 模型中有关的原子的能级图

Fig. 1 Energy level diagrams for atomic species included in the model

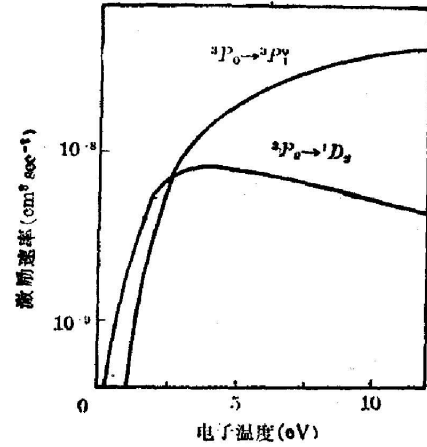


图 2 铅的电子碰撞激励速率

Fig. 2 Lead electron collision excitation rates

表 1 模型中的能级布居度符号

Table 1 Signs of population densities in the model

布居度符号	对应能级组态	能量 (电子伏)
N_1	$(6p^2) 3P_0$ of PbI	0.0
N_2	$(6p^2) 3P_1$ of PbI	1.0
N_3	$(6p^2) 3P_2$ of PbI	1.3
N_4	$(6p^2) 1D_2$ of PbI	2.7
N_5	$(7s) 3P_1^0$ of PbI	4.4
N_6	$(6d) 3D_1^0$ of PbI	5.7
N_7	$2P_{3/2}^0$ of PbII	7.4
N_8	$1S_0$ of NeI	0.0
N_9	$3P_2$ of NeI	16.6
N_{10}	EEL of NeI	19.0
N_{11}	$2P_{3/2}^0$ of NeII	21.6

在短脉冲放电激励的铅激光器中，电子和原子之间的非弹性碰撞是最重要的相互作用^[8]。在铅激光模型中，用经典碰撞理论^[9]计算了各原子能态的电子碰撞激发截面，并设电子能量呈 Maxwell 分布，求出了各能态的激发速率(见图 2)。对其它相互作用，通过比较其作用特征时间和激励脉冲特征时间而决定取舍。

模型由四类方程构成：

(1) 原子能级布居度速率方程

$$dN_i/dt = (\sum_j n_e K_{ji} N_j - \sum_j n_e K_{ij} N_i) + (\sum_{j>i} A'_{ji} N_j - \sum_{j<i} A'_{ij} N_i) + (\sum_{j>i} n_{ij} B_{ji} [N_j - g_j/g_i N_i] - \sum_{j<i} n_{ij} B_{ij} [N_i - g_i/g_j N_j]) - (\sum_k N_k K_{ki}^P N_i) \quad (1)$$

右边四项分别为激发与超弹、自发辐射、受激辐射和 Penning 过程, 其中 N_i 、 n_{ij} 和 n_e 分别代表原子能级布居数、光子密度和电子密度; N_k 为氖原子激发态; K_{ij} 表示电子碰撞激发速率; K_{ij}^P 表示 Penning 电动速率; A'_{ij} 和 B_{ij} 分别表示自发跃迁速率(考虑了可能存在的辐射俘获效应)和受激跃迁速率。

(2) 光子密度方程

$$dn_{ij}/dt = N_i A'_{ij} f_g F_r + n_{ij} B_{ij} (N_i - g_i/g_j N_j) F_r - n_{ij}/t_c \quad (2)$$

其中 $E_i > E_j$, 右边三项分别代表自发辐射, 受激辐射和腔损耗。 f_g 是几何偏振因子, F_r 是激活区长度与腔长之比, t_c 是腔寿命。

(3) 电子能量方程

$$d(n_e 3/2 KT_e)/dt = \sigma E^2 - n_e (2m_e/M_o) (KT_e - KT_g) \Sigma \langle \nu \rangle_{el} - n_e \sum_{i,j} N_i K_{ij} \Delta E_{ij} - n_e \sum_i N_i K_{ii} \Delta E_{ii} + \sum_{j,k} N_k K_{kj}^P N_j \Delta E_j^P \quad (3)$$

右边第一项为焦耳加热过程, 第二项为弹性碰撞过程, 第三项为激发与超弹过程, 第四项为碰撞电离过程, 第五项为 Penning 作用。式中, σ 是等离子体电导率, $\Sigma \langle \nu \rangle_{el}$ 代表电子与原子的弹性碰撞频率, ΔE 为电子的能量得失。

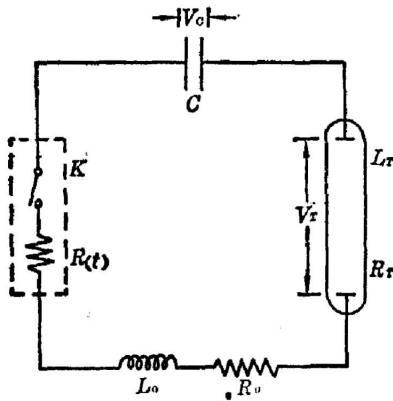


图 3 等效放电电路

Fig. 3 Equivalent discharge circuit

(4) 电路方程

$$dV_c/dt = I/C \quad (4)$$

$$dI/dt = -[V_c + (R(t) + R_T)I]/(L_0 + L_T) \quad (5)$$

其中 V_c 是电容器上的电压, I 是流经放电管的电流。 $R(t)$, L_0 和 R_T , L_T 分别代表回路和放电管的阻抗(见图 3), 其中 $R(t)$ 包括了 $R'(t)$ 和 R_0 , 电子密度满足下式:

$$n_e = [Pb^+] + [Ne^+] \quad (6)$$

激光输出功率由下式近似表示

$$P_L \approx nh\nu V/t_c \quad (7)$$

其中 V 为有效模体积。

上述诸方程构成了封闭的方程组, 由四阶 Runge-Kudar 法求解。

三、结果与讨论

模拟计算所需的初值和参数, 除上文已提及的以外, 典型的取值范围列于表 2。

表 2 计算初值和参数的取值范围
Table 2 Ranges of initial values and other parameters

初 值 或 参 数	符 号	取 值 范 围
铅原子密度 (厘米 ⁻³)	[Pb]	0.2~1.2E+16
氖原子密度 (厘米 ⁻³)	[Ne]	0.8~1.6E+17
初始电子密度 (厘米 ⁻³)	n_e^0	0.3~2.5E+13
初始电子温度 (电子伏)	T_e^0	0.11~0.21
储能电容 (微微法)	C_0	1000~3000
电压 (千伏)	V_0	7.0~12.0
气体温度 (°C)	T_g	850~1100

模拟结果基本上复现了具有相同条件的实验现象。图 4 给出了放电电压脉冲, 电流脉冲和 723 nm 激光脉冲波形的计算值(实线)和实验结果(虚线)。实验中, 电压信号由 DYM-1-1 分压器馈给, 电流信号由 Peason 411 型电流互感器(信号上升时间 20 ns)馈给。S1 型平面强流光电二极管(信号上升时间 0.2 ns)探测激光脉冲信号。三个信号调整时间零点后由电压信号触发, 于 COS 6100 型五通道示波器(100 MHz)屏上显示。由图 4 可知, 计算结果与实验结果符合得较好。计算不仅给出了宏观结果, 而且还能提供有关微观等离子体参量的信息。图 5 给出了从模型计算中得到的典型的电子温度和电子密度在激励脉冲内的变化曲线, 其中电子温度的最大值称为峰值电子温度。

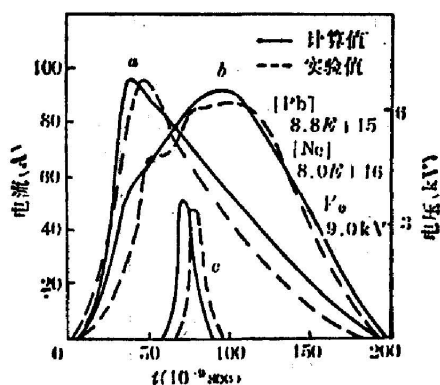


图 4 电压脉冲(a), 电流脉冲(b)和 723 nm 激光脉冲波形(c)

Fig. 4 Shapes of voltage (a), current (b) & laser (c) pulses

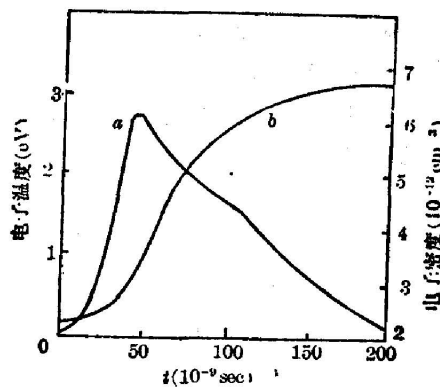


图 5 典型的电子温度(a)和电子密度(b)曲线

Fig. 5 Typical electron temperature (a) & density (b) curves

我们利用模型对实验结果进行了分析。

(1) 在实验中常可观察到, 在某一储能电容充电电压变化范围内, 当电压升高时, 激光输出功率的上升速率高于输入功率($\frac{1}{2} CV^2$)的提高速率^[3], 这一现象未见合适的解释。我们在计算中和实验中也分别得到了完全类似的结果(见图 6)。计算结果表明, 激光功率的提

高是峰值电子温度的提高所致。这是因为峰值电子温度决定了电子碰撞对激光上下能级激励的差异, 在一定的电子温度范围内, 这种差异对峰值电子温度的变化是相当敏感的(参见图 2)。因此, 随着电压升高, 峰值电子温度随之升高的幅度虽然不大, 激光功率却以较高的比例增长, 因为激光的产生正是建立在这种差异上的。

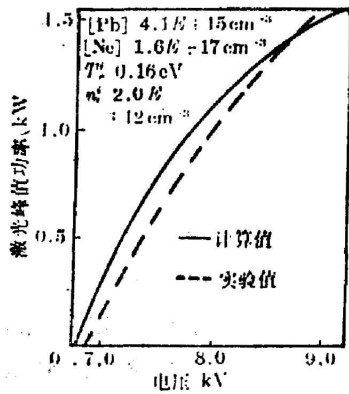


图 6 激光峰值功率对电压的关系

Fig. 6 Laser power as a function of voltage

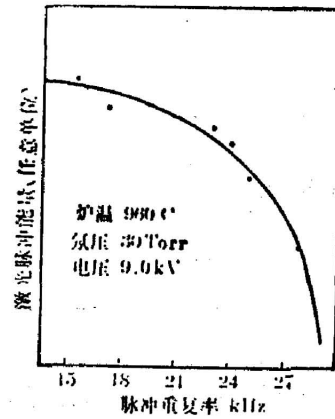


图 7 单个激光脉冲能量对重复率的实验关系

Fig. 7 Energy of single laser pulse as a function of repetition rate in experiments

(2) 铅激光器工作在连续脉冲状态, 提高平均输出功率的最自然的方法是提高脉冲重复频率。然而实验中发现, 提高脉冲重复频率往往使单个激光脉冲的能量下降(见图 7)。有两个因素与提高重复率的限制直接有关: (a) 随着重复率提高, 脉冲开始前激光下能级(亚稳态)残留的布居度提高, 产生“初始亚稳态”效应, 使随后的激励脉冲较难建立布居反转^[9]。(b) 随着重复率提高, 每个脉冲开始前的初始电子密度也会提高, 因为电子和离子不再有足够的用于复合。初始电子密度过高使电子加热速率下降, 从而也会引起激光功率下降^[10]。多数人认为限制铜激光器重复率的主要是前者。由于铅的激光下能级位势值比铜的

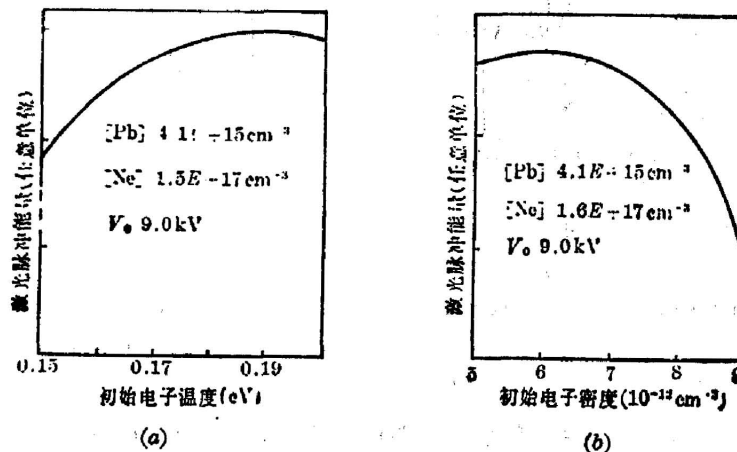


图 8 单个激光脉冲能量对初始电子温度(a)/初始电子密度的关系(b)(计算值)

Fig. 8 Energy of single laser pulse as a function of initial electron temperature (a)/ density (b) from calculations

激光下能级位势值高一倍左右,我们认为后一种因素对铅激光作用较之铜激光更为明显。我们分别模拟了提高初始亚稳态密度和提高初始电子密度的不同过程,结果见图8(其中初始亚稳态密度以初始平衡电子温度表征)。由图8(a)可知,在铅激光器的初始电子温度范围内^[4],激光功率并未因为提高初始电子温度(即提高初始亚稳态密度)而下降。图8(b)表明,激光功率会由于初始电子密度的提高而急剧下降。其中的原因是:对高重复率脉冲金属蒸气激光器,余辉期间电子与离子的复合主要有两种机制:管壁碰撞复合和有另一电子参与的三体体内碰撞复合。复合发生在整个余辉过程,而余辉的持续时间是和重复率成反比的。因此,当重复率提高后,用于复合的时间减少了,这导致了初始电子密度的上升。这一点已为相似管径的铜蒸气激光器的实验所证实^[10]。结论是:铅蒸气激光器重复率的限制主要取决于初始电子密度。

本文作者深切感谢中国科学院物理研究所张志三研究员的热情鼓励。并对完成本文工作给予大力协助的浙江大学中心实验室周丽娟、邱学敏、李亚钧等同志表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 夏铁君,董骥,姚志欣;《中国激光》,1983,10, No. 8~9 (Sep), 565.
- [2] B. E. Grove; *Laser Focus*, 1982, 18, No. 7 (Jul), 45.
- [3] M. J. Kushner; *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, QE-17, No. 8 (Aug), 1555.
- [4] V. V. Kazakov *et al.*; *Sov. J. Quantum Electron.*, 1983, 18, No. 4 (Apr), 488.
- [5] K. G. Harstad; *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, QE-16, No. 5 (May), 550.
- [6] W. T. Walter *et al.*; *ibid.*, 1966, QE-2, No. 9 (Sep), 474.
- [7] I. Smilanski; *«Laser-79»*, (V. J. Corcoran, SITS Press, McLean VA, 1980), 327.
- [8] C. Deutsch; *J. Appl. Phys.*, 1973, 44, No. 3 (Mar), 1142.
- [9] A. E. S. Green; *ALAA J.*, 1966, 4, No. 5 (May), 769.
- [10] P. A. Bokhan *et al.*; *Sov. J. Quantum Electron.*, 1980, 10, No. 6 (Jun), 724.

Computer modeling for a lead vapor laser

XIA TIEJUN YAO ZHIXIN WANG YONGJIANG AND SUN WEI
(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 12 April 1985; revised 22 May 1985)

Abstract

A computer model has been built to simulate the excitation process of a lead vapor laser results obtained from the model agree with experiments. The calculation indicates that the main parameter effecting laser output power is the peak electron temperature, while the limitation of repetition rates is related to the initial electron density.