

铜蒸气激光器模型的计算方法和程序设计

赵裕兴 汤星里

(中国科学院上海光机所)

Computation method and program design of Cu-laser model

Zhao Yuxing, Tang Xingli

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

Abstract: The computation method of Cu-laser model is analyzed and described and a way that eliminates the unreasonable results in a normal program is suggested.

一、引言

描述铜蒸气激光过程的动力学模型,已有不少报道^[1~3]。由于铜蒸气激光器高重复率、短脉冲等特点,其模型的计算方法也就有着相应的特点。本文就计算方法和程序设计方面做了一些工作,并得出若干计算结果。

二、模型的简单描述及特点

在铜蒸气激光器中,各能级粒子数密度、离子、电子密度、电子温度、激光光强及外部电路中的宏观参数,随时间的变化,可以列出常微分方程组:

$$\frac{dy(1)}{dt} = f_1(y(1), \dots, y(n), t)$$

⋮

$$\frac{dy(n)}{dt} = f_n(y(1), \dots, y(n), t)$$

式中 $y(i)$ 表示第 i 个参量。由于要计算不同电子温度下各能级之间的激发速率,还需用已知的激发截面对麦克斯韦分布函数进行积分,故其中有 m 个积分:

$$R(i, T_e) = \int_{E_i}^{\infty} Q_i F(E) dE \cdot \left(\frac{\partial E}{m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

式中 Q_i 是 i 过程的碰撞截面, $F(E)$ 是麦克斯韦分

布函数, E_i 为激发阈值。

铜蒸气激光器工作的主要过程为:

1. 充电过程,把储能电容上的电压以谐振充电形式充到一定值;
2. 开关过程,通过闸流管把储能电容器上的能量转移到激光管中;
3. 激发过程,产生粒子数反转,并使激光输出 (~ 100 ns);
4. 余辉过程和外部电路的充电过程同时进行。在余辉过程中,亚稳态密度下降到一定值以下 ($\sim 100 \mu s$)。

从数学上把这些物理过程描述为对一系列常微分方程的迭代循环解法,即首先假定各参数的初始值 $y_0(i)$,经过时间 $t_0 = \frac{1}{f}$ 后,得到余辉结束时的参量值 $y_1(i)$,这里 f 为重复频率。再用 $y_1(i)$ 值作为第二个循环的 $y_0(i)$,以此往复,直到得到一个自治的结果,即 $(y_1(i) - y_0(i))/y_0(i)$ 小于设计值 δ_0 。这时得到的各参量值就是模型所描述的激光器的理论结果。

三、普通程序的困难和实用程序方框图

一般情况下,常微分方程组和积分方程的计算机程序都可以从书本上得到,但如果把它们直接用

在本模型里, 便会出现一些不符合实际情况的现象, 例如, 粒子密度、电子温度、光强等变为负值, 使计算不能继续下去。经过分析发现, 产生不正常情况的主要原因是步长的选择不合理。但如果步长太小, 又要增加计算量, 为了解决这一困难, 本文采用了如图 1 所示的程序执行方框图。

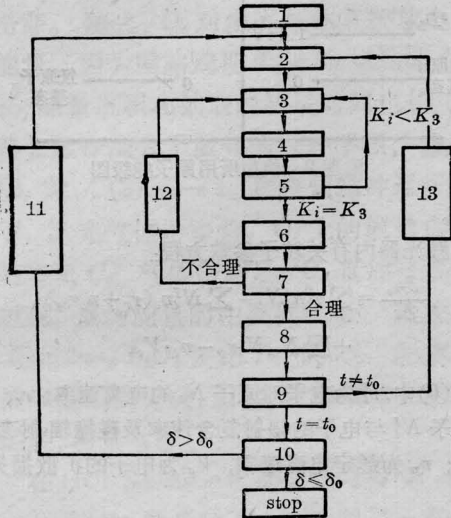


图 1 计算过程方框图

1—定初始条件; 2—定步长; 3—积分求 r_i ; 4—求函数 f_i ; 5—计算常数 K_i ; 6—求参量终值; 7—参数合理性判断; 8—记录和输出; 9—时间判断; 10—误差判断; 11—初始条件的迭代; 12—步长改变; 13—下点数值计算

主要措施是在原来程序中插入了判断语句, 一旦发现不正常情况, 马上停止执行下面命令, 并使已计算过的不合理数据作废, 使计算机改变步长重新进行计算。另外还可以根据不同阶段按要求变化步长, 以减少计算量, 实际证明这一措施是有效的。图 1 中 δ_0 为设计误差, t_0 是预定计算结束点, K_i 为四阶龙-库方法中所用常数。

四 各程序块的连接

本程序中所用各程序块的连接方法如图 2 所示, 说明如下:

1. 主程序: 主要是一个解微分方程组的程序, 以及一些和其它程序连接的命令和条件。
2. 主要存放初始条件, 以便于独立地进行编辑。
3. 由于各参量的单位不统一, 而计算结果却要用常用单位表示, 故在标准单位和实用单位之间存在换算关系, 另一方面, 所用常数之间的换算也通过

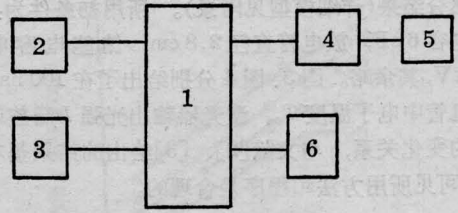


图 2 各程序块连接方框图

1—主程序; 2—初始条件数据程序; 3—各参量之间的换算; 4—积分程序; 5—函数程序; 6—计算结果存储程序

此程序完成(例: 温度和密度的关系)。

4. 主要是计算各种反应和碰撞速率, 主要为一个积分程序。
5. 存放各截面数据。
6. 按需要存放计算结果。

五、结果和讨论

这里给出了用本文所述方法自编程序计算出的

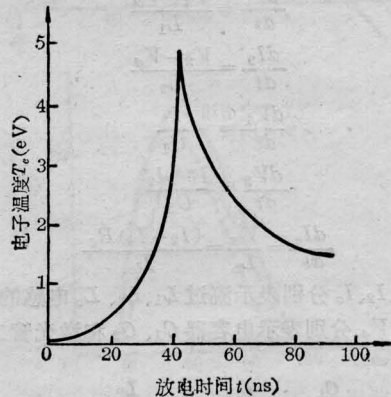


图 3 放电管中电子温度随放电时间的变化关系

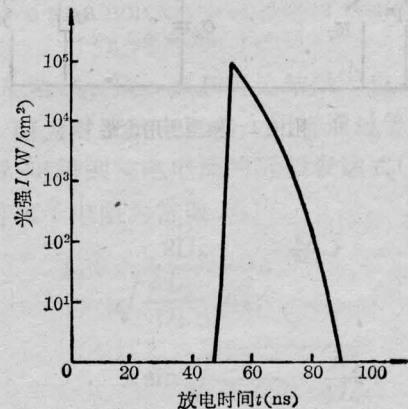


图 4 输出光强随放电时间的变化关系

一部分结果(详细模型见附录)。所用初条件为: 储能电容 6 nF, 放电管直径 2.8 cm, 储能电容电压 12 kV, 其余略。图 3、图 4 分别给出了在 100 ns 内, 放电管中电子温度 T_e 、激光器输出光强 I 随放电时间的变化关系, 与文献[2]、[3]给出的结果基本一致, 可见所用方法和程序是合理的。

参 考 文 献

- 1 Holmes C P. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1973; **18** (5): 797
- 2 Kushner M J. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981; **QE-17**(8): 1555
- 3 Kushner M J. *J. of Appl. Phys.*, 1983; **54**(6): 2970

附 录

铜蒸气激光器数学模型中所用电路和有关原子能级图如附图 1 和 2 所示。

电路方程

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{V_1 - V_2}{L_1} \quad (1)$$

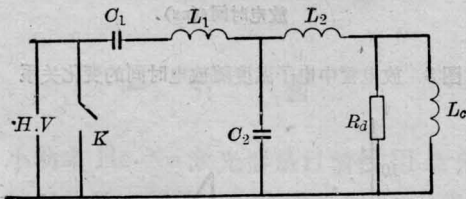
$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{V_2 - V_d}{L_2} \quad (2)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{I_1}{C_1} \quad (3)$$

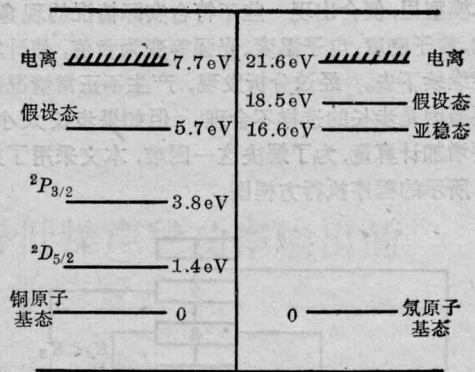
$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{I_1 - I_2}{C_2} \quad (4)$$

$$\frac{dI_c}{dt} = \frac{V_d}{L_c} = \frac{(I_2 - I_c)R_d}{L_c} \quad (5)$$

式中 I_1, I_2, I_c 分别表示流过 L_1, L_2, L_c 电感的电流, V_1, V_2, V_d 分别表示电容器 C_1, C_2 和激光管二端的



附图 1 模型所用电路



附图 2 模型所用原子能级图

电压。

激光器内有关粒子参数方程:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \sum_i r_i^2 n_e N_i - \sum_i N_i^2 n_e (r_r + n_e r_{or}) + \sum_i N_m N_i r_p - n_e \cdot V_e \quad (6)$$

方程(6)中, r_i^2 为电子对原子 N_i 的电离速率, r_r, r_{or} 为离子 N_i^2 与电子的辐射复合速率及碰撞辐射复合速率; r_p 为彭宁电离速率, V_e 为电子的扩散损失速率。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e k T_e \right) &= \frac{n_e e^2 E^2}{m \nu_m} - \sum_{ij} r_{ij} N_i n_e \varepsilon_{ij} \\ &+ \sum_{ij} r_{ij}^2 N_i n_e \varepsilon_{ij}^2 + \sum_i N_m N_i r_p \varepsilon_i^2 \\ &- \sum_i \frac{3}{2} n_e k \left(\frac{\partial m}{M_i} \right) \times (T_e - T_g) \nu_m^i \end{aligned} \quad (7)$$

式中 ν_m 为电子弹性碰撞频率, m 为电子质量, r_{ij} 为对应的碰撞速率, ε_{ij} 和 ε_{ij}^2 为能级间的能量差。

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial t} &= \sum_j (r_{ji}^2 N_j - r_{ij}^2 N_i) n_e + \sum_{jk} r_{Hj}^2 N_j N_k \\ &- \sum_{jk} r_{Hj}^2 N_i N_k \end{aligned} \quad (8)$$

这里 r_{Hj}^2 是重粒子之间的碰撞速率, N_i 为各种能级上的粒子数密度。

这一组常微分方程组构成了铜蒸气激光器的动力学模型, 解出就可以得到各参数随时间的变化。

(收稿日期: 1986年12月29日)