

气体激光管并联放电的稳定性

张新昌 孙孟嘉

(山西大学)

提要: 本文对气体激光管单管放电的稳定性做了进一步的分析; 推导了多管并联放电的稳定性条件, 为折迭式气体激光器中的电源设计提供了理论依据; 本文对于具有负阻特性的其他气体放电器件的并联放电也可做为参考。

Discharge stability of gas laser tubes connected in parallel

Zhang Xinchang Sun Mengjia

(Shaanxi University)

Abstract: The conditions for discharge stability in gas laser tubes electrically connected in parallel are discussed, and the coefficient of discharge stability is given. These may provide theoretical basis for designing power supplies of stable folded gas lasers, as well as a reference in designing power supplies for other discharge tubes electrically connected in parallel.

常用的原子和分子气体激光器(如 CO_2 激光管和 He-Ne 激光管), 一般都是采用气体放电方式进行激励的, 其激光功率输出的稳定性在很大程度上取决于激光管放电参数(放电电流)的稳定性。因此, 研究气体激光放电参数的稳定性问题, 对于设计激光器是十分重要的。

一、单支气体激光管放电的稳定性问题

在图 1 所示的电路中, 激光管的工作点应由两个方程来决定:

$$\begin{cases} V = f(I) & (1) \\ V = E - I(R+r) & (2) \end{cases}$$

式(1)即激光管的伏安特性曲线, 式(2)是激光管的直流负载线。直流负载线与伏安特性曲线必须相交, 激光管才可能放电。一般它

们有两个交点 A 和 B , 都能同时满足(1)式和(2)式。B. И. Гапонов^[1]指出: 两点中只有 B 点是稳定工作点。这可由放电的稳定性条件来判定, 亦即:

$$R_{\sim} + (R+r) > 0 \quad (3)$$

其中, $R_{\sim} = f'(I)$ 是伏安特性曲线的微商, 称为放电管的动态阻抗。大多数的气体激光管是工作在正常辉光放电区; 而正常辉光放电时, 激光管伏安特性曲线具有负阻特性, 即放电管的动态阻抗 $R_{\sim} < 0$ 。因此, 这就要求在工作点附近, 直流负载线的斜率绝对值须大于伏安特性曲线在该点切线斜率的绝对值。

设镇流电阻 R 固定。如图 2 所示, 改变电源电压, 直流负载线将向上(或向下)平移。这样, 激光放电管的工作点也将变动。即使在各工作点都能满足稳定性条件(3), 激光管在各工作点放电的稳定度也是各不相同的。

收稿日期: 1979年9月20日。

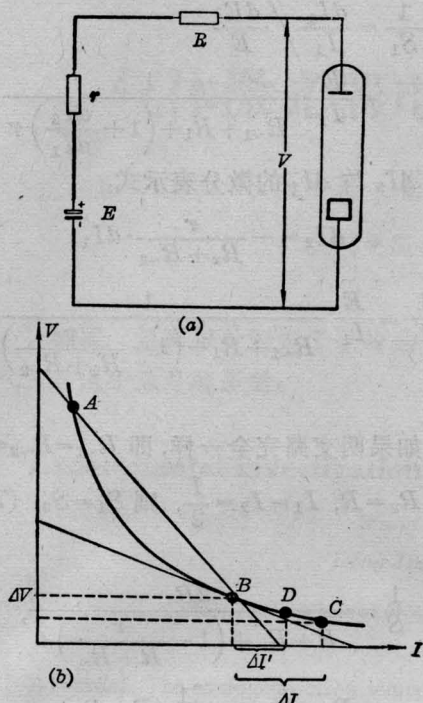


图 1

(a) 单支激光管的简单放电电路; (b) 激光管伏安特性曲线与直流负载线

E —电源电压; r —电源内阻; R —镇流电阻;
 I —放电电流; V —激光管端电压; R_0 —激光管直流阻抗; $R_~$ —激光管动态阻抗。在 B 点附近 $\Delta I' < \Delta I$, B 点是稳定工作点

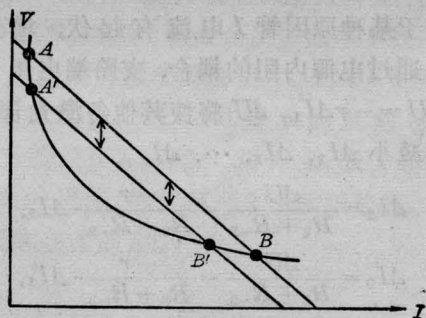


图 2 负载线的平移

只有从对于电源电压的改变 $\Delta E/E$ 来考虑放电电流的变化 $\Delta I/I$ 定义的稳定度概念才有实际的意义。由 (2) 式通过简单的微分得出:

$$\frac{dI}{I} = \frac{E}{I} \frac{1}{(R+r)+R_~} \frac{dE}{E}, \quad \text{令}$$

$$\frac{1}{S} = \frac{dI}{I} / \frac{dE}{E} = \frac{E}{I} \frac{1}{(R+r)+R_~} \quad (4)$$

S 定义为在该放电电流下的放电稳定度。式

中 $E/I = R_0 = R+r+R_~$ 是电路中的直流阻抗, 而 $R_~$ 是其中激光放电管的直流阻抗, 而 dE/dI 代表动态阻抗。所以,

$$S = \frac{(R+r)+R_~}{R_0} = \frac{(R+r)+R_~}{(R+r)+R_~} \quad (4)'$$

$R_~$ 与 R_0 不同, 它总是正值, 显然, 当 $R_0 > (R+r)+R_~$ 时, $S < 1$ 。即电压发生微小变化就会引起较大的电流变化。特别是在放电电流 I 比较小时, $R_~$ 的绝对值很大, $S \ll 1$, 情况尤为明显。

为了提高激光器输出功率的稳定度, 必须使 $S > 1$ 或 $S \gg 1$ 。这可以将固定阻值的镇流电阻 R (或其一部分) 换成可变阻抗元件来达到。该阻抗元件的直流阻抗为 \bar{R} , 动态阻抗为 \tilde{R} , 由 (4)' 可以得

$$S = \frac{(\tilde{R}+r)+R_~}{(\bar{R}+r)+R_~} \quad (4)''$$

当 $\tilde{R} \ll \bar{R}$, $S \gg 1$ 时, 可获得极高的稳定度。

二、多根气体激光管并联放电的稳定性问题

由单支激光管放电稳定性条件 (3) 看出, 电源的内阻仅等效于增加了外电路电阻。然而, 在多根气体激光管并联放电时, 电源内阻将在各支路之间起耦合作用, 即使各支路都能分别满足单管放电的稳定性条件, 也很难使各支激光管同时稳定地放电, 应当寻求多管并联放电的稳定性条件并讨论其对激光器电源设计的影响。

在两管并联放电的电路中 (图 3), 若其中一支激光管 (例如管 1) 支路的放电电流因某种原因有一增量 ΔI_1 , 则由于在电源内阻上的电压降增加, 支路端电压 U 将减小, $\Delta U = -r \Delta I_1$; 对管 2 支路来说, U 的减小相当于直流负载线向下平移 (图 2), 电流 I_2 减小, $\Delta I_2 = \frac{\Delta U}{R_2+R_{~2}} = -\frac{r}{R_2+R_{~2}} \cdot \Delta I_1$, I_2 减小了 ΔI_2 又会使内阻 r 上的电压降减小,

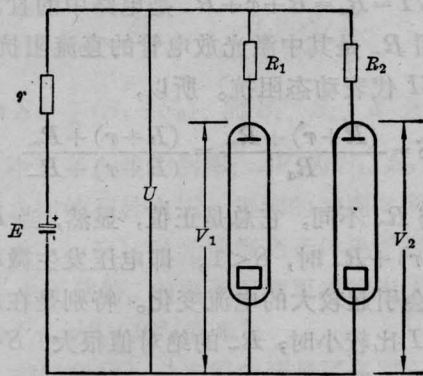


图3 一套电源供电的两支激光管
并联放电的简单电路

V_1, V_2 —激光管端电压; $R_{\sim 1}, R_{\sim 2}$ —激光管动态阻抗;
 R_{-1}, R_{-2} —激光管直流阻抗; R_1, R_2 —支路镇流电阻;
 U —支路端电压

电压 U 增加 $\Delta U' = -r\Delta I_2 = \frac{r^2}{R_2 + R_{\sim 2}} \Delta I_1$;
 $\Delta U'$ 又会使支路 1 产生电流增量:

$$\Delta I_1' = \frac{\Delta U'}{R_1 + R_{\sim 1}} = \frac{r^2}{(R_1 + R_{\sim 1})(R_2 + R_{\sim 2})} \cdot \Delta I_1$$

管 1 支路的直流负载线将向上平移。这种耦合过程将往复不断地进行下去。如果 $\Delta I_1' > \Delta I_1$, 则原来电流增大的激光管支路中的电流将继续增大, 而电流减小的支路中的电流将继续减小, 结果导致只有一支激光管放电, 而另一支激光管放电猝灭。如果 $\Delta I_1' < \Delta I_1$, 尽管电流有偶然的起伏, 两管放电电流都能很快地恢复平衡, 使各自回到原来的工作点。由此得出两管并联放电的稳定性条件:

$$\frac{r^2}{(R_1 + R_{\sim 1})(R_2 + R_{\sim 2})} < 1,$$

亦即:

$$(R_1 + R_{\sim 1})(R_2 + R_{\sim 2}) > r^2 \quad (5)$$

电源电压变化时各支路电流的稳定度可类似于单管放电那样讨论。先列出方程

$$\begin{cases} V_1 = f_1(I_1); \\ V_2 = f_2(I_2); \\ V_1 = E - (I_1 + I_2)r - I_1 R_1 \\ V_2 = E - (I_1 + I_2)r - I_2 R_2 \end{cases} \quad (6)$$

将上式微分得:

$$\begin{aligned} \frac{1}{S_1} &= \frac{dI_1}{I_1} / \frac{dE}{E} \\ &= \frac{E}{I_1} \cdot \frac{1}{R_{\sim 1} + R_1 + \left(1 + \frac{dI_2}{dI_1}\right)r}, \end{aligned}$$

代入 ΔI_2 与 ΔI_1 的微分表示式:

$$dI_2 = -\frac{r}{R_2 + R_{\sim 2}} \cdot dI_1$$

则

$$\frac{1}{S_1} = \frac{E}{I_1} \frac{1}{R_{\sim 1} + R_1 + \left(1 - \frac{r}{R_2 + R_{\sim 2}}\right)r} \quad (7)$$

如果两支路完全一样, 即 $R_{\sim 1} = R_{\sim 2} = R_{\sim}$,

$R_1 = R_2 = R$, $I_1 = I_2 = \frac{I}{2}$, 则 $S_1 = S_2$, (7) 式

变为:

$$\frac{1}{S} = \frac{2R_a}{R + R_{\sim} + \left(1 - \frac{r}{R + R_{\sim}}\right)r},$$

其中 $R_a = \frac{E}{I} = r + \frac{1}{2}(R + R_{\sim})$

或写成

$$S = \frac{R + R_{\sim} + (1 - r/R + R_{\sim})r}{R + R_{\sim} + 2r} \quad (7)'$$

n 根激光管并联放电时 (见图 4), 其中任一激光管放电的稳定性条件讨论如下: 设由于某种原因管 1 电流有起伏, 增量为 ΔI_1 , 通过电源内阻的耦合, 支路端电压 U 变化 $\Delta U = -r\Delta I_1$, ΔU 将使其他各激光管电流分别减小 $\Delta I_2, \Delta I_3, \dots, \Delta I_n$.

$$\Delta I_2 = \frac{\Delta U}{R_2 + R_{\sim 2}} = \frac{-r}{R_2 + R_{\sim 2}} \cdot \Delta I_1;$$

$$\Delta I_3 = \frac{\Delta U}{R_3 + R_{\sim 3}} = \frac{-r}{R_3 + R_{\sim 3}} \cdot \Delta I_1,$$

.....

$$\Delta I_n = \frac{\Delta U}{R_n + R_{\sim n}} = \frac{-r}{R_n + R_{\sim n}} \cdot \Delta I_1$$

这些电流的减小又会使电压 U 回升

$$\begin{aligned} \Delta U' &= -(\Delta I_2 + \Delta I_3 + \dots + \Delta I_n)r \\ &= \Delta I_1 \left(\frac{1}{R_2 + R_{\sim 2}} + \frac{1}{R_3 + R_{\sim 3}} + \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{R_n + R_{\sim n}} \right) r^2. \end{aligned}$$

$\Delta U'$ 反过来又会使 I_1 增加

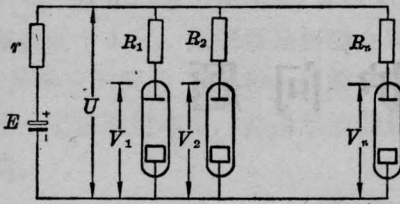


图4 n 支激光管并联放电的简单电路

E —电源电压; r —电源内阻; V_1, V_2, \dots, V_n —激光管端电压; R_1, R_2, \dots, R_n —各支路镇流电阻; $R_{~1}, R_{~2}, \dots, R_{~n}$ —各激光管动态阻抗; $R_{-1}, R_{-2}, \dots, R_{-n}$ —各激光管直流阻抗。

$$\Delta I'_1 = \frac{\Delta U'}{R_1 + R_{~1}} = \frac{\Delta I_1}{R_1 + R_{~1}} \left(\frac{1}{R_2 + R_{~2}} + \frac{1}{R_3 + R_{~3}} + \dots + \frac{1}{R_n + R_{~n}} \right) r^2。$$

如果 $\Delta I'_1 < \Delta I_1$, 管1的放电就是稳定的, 即稳定性条件为:

$$\frac{1}{R_1 + R_{~1}} \left(\frac{1}{R_2 + R_{~2}} + \frac{1}{R_3 + R_{~3}} + \dots + \frac{1}{R_n + R_{~n}} \right) r^2 < 1 \quad (8)$$

如果各支路情况完全相同: $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$, $R_{~1} = R_{~2} = \dots = R_{~n} = R_{~}$, 上式可写为:

$$R + R_{~} > (n-1)r^2 \quad (9)$$

讨论: A. 在采用固定镇流电阻时, 对于单管放电, 由(4)'看出, r 越大, S 越大; $r \rightarrow \infty$ 时 $S \rightarrow 1$ 。因此激光器电源原则上应是一个恒流源, 内阻越大越好。在两管并联放电时, 由(5)与(7)'看出, 内阻越小越好, 电压应是恒压源。当 $r \rightarrow 0$ 时, $S \rightarrow \frac{R + R_{~}}{R + R_{~}}$, S 值达到最大, 但仍小于1。例如每折迭长为2米的V型折迭激光器, 若各支路串接镇流电阻为 $R = 300$ 千欧; 在工作点单管的动态负阻估为 $R_{~} = -50$ 千欧, 直流阻抗约为 $R_{-} = 300$ 千欧, 则在 $r \rightarrow 0$ 时, $S = \frac{300 - 50}{300 + 300} \approx 0.42$ 。加大支路串接的镇流电阻 R , S 值要大一些, 但总小于1。可见要提高稳定性, 唯一的方法是把固定镇流电阻 R 换成有正动态阻抗的阻抗元件。如果该元件的动态阻抗 \tilde{R} 比其直流阻抗

\tilde{R} 大得多, 就可能使 $S \rightarrow \frac{\tilde{R} + R_{~}}{R + R_{~}} \gg 1$, 获得良好的稳定度。例如我们采用电子管阻抗调节器, 其 \tilde{R} 可达十兆欧以上, 其直流阻抗一般在几十至几百千欧, 对于上述的同样情况, S 值可达10以上。多管并联放电时, 由(9)式看出, 并联放电激光管的数目越多, 越要求 r 值小; 或者要求各支路串接的镇流电阻 R 值越大, 但这都不是解决问题的根本办法。情况与双管并联放电相同, 要提高放电电流的稳定度, 同样应将固定镇流电阻换为阻抗元件。

B. 气体放电是一个繁荣增长过程, 着火后放电电流迅速由小增大。单管放电时, 只需在工作点满足稳定性条件(3); 而多管并联放电时, 由于存在电源内阻的耦合作用, 不仅要求在各管的工作点而且要求在繁荣增长的过程中始终满足稳定性条件(5)式和(9)式。放电电流小时, 激光管动态负阻 $R_{~}$ 绝对值很大, 如各支路只用固定镇流电阻, 上述放电稳定性条件很可能被破坏, 极易形成只有一支激光管放电。故多管并联放电电源设计的着重点应放在小电流状态下能满足稳定性条件(5)或(9)式。实验证明, 采用辅助电源通过大阻值电阻使激光管预放电的办法是必要和有效的^[2]。

对于常用的折迭式 CO_2 激光器来说, 想简单地用一套直流高压电源分别通过固定的镇流电阻使各激光管稳定放电是困难的。为避免各支路通过电源内阻的相互影响, 也有采用多个独立电源分别给各激光支管供电的办法。但这不仅设备庞大, 而且由于各电源不能有共同的接地点, 给高压绝缘与安全操作带来困难。“功率连续可调的折迭式 CO_2 激光器电源”一文^[2]所介绍的则是较好的办法。

参考文献

- [1] В. И. Голанов; “Электроника”, Часть I. p. 453.
- [2] 张新昌, 孙孟嘉; 《激光》, 1979, 6, No. 4, 59.
- [3] Michael J. Posakony; *The Review of Scientific Instrument*, 1972, 43, No. 2, 270~273.