

小型 RF 激励 CO₂ 激光器冷却设计与温度保护

郭振华 王又青 卢益民 孙奕

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 本文详细介绍了小型 RF 激励 CO₂ 激光器的冷却措施及温度保护系统, 对实际应用有较大的参考价值。

关键词: 冷却 温度保护

Cooling design and over-temperature for a portable RF excited CO₂ laser

Guo Zhenhua, Wang Youqing, Lu Yimin, Sun Yi

(National Lab. of Laser Tech, HUST)

Abstract: This paper introduces the cooling system and over-temperature protection, it is considerably useful for practice.

Key words: cooling over-temperature protection

一、引言

小型 RF 激励 CO₂ 激光器以其小巧的全金属结构, 优质的光束质量, 长寿命及简便稳定的功率调制等优点, 得到了越来越广泛的应用。由于小体积的特殊要求, 这种 RF CO₂ 激光器就采用了小体积大功率晶体管作为开关及功放器件。因此, 这些功率器件的散热及冷却就十分重要。何况小型 RF 激光腔体也得靠良好的冷却才能保证其激光输出的稳定性。本文讨论功率管的散热与过热保护。

二、小型 RF 激励电源

对于小型 RF CO₂ 激光器, 通常用大功率高频晶体管^[1]组成射频功放, 这些功率管耐压都较低(<60V), 要求有一个直流低压源(30V)供电, 为使其结构紧凑, 直流低压源用开关电路产生, 而调制管 Q₂ 则是用来调节输出激光功率的大小(图 1)。

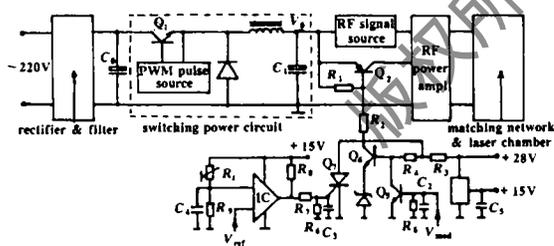


Fig. 1 The theoretically diagram of a portable RF excited CO₂ laser with over-temperature protection circuit

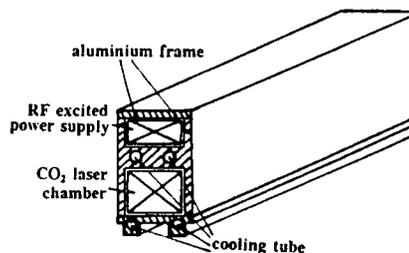


Fig. 2 The structure schema of the portable RF excited CO₂ laser

图中的开关管 Q₁, 调制管 Q₂ 及射频功放管都是大电流发热器件。在实际设计中, 为减小

体积,我们将开关管、调制管及 RF 功放管都安装在同一块散热器上。考虑到小型 RF 激光器要求耐冲击强度高,长寿命,良好的散热,重量轻及屏蔽好等,我们用全金属铝质结构,因此整个框体都可视为一个散热器(图 2)。为增大散热效果,除电气接触面外,将整个框体结构表面氧化为黑色,框体内设置了冷却水管,通水冷却。

三、功率管结温的计算方法

高频大功率晶体管在小面积上会产生较大的热量,引起功率管工作性能的恶化,所以必须考虑散热^[2]。

1. 结温

使用散热器时的结温 T_j 可表示为:

$$T_j = T_c + R_{th(f-c)} \cdot P_T \quad (1)$$

式中, T_c 为管壳温度, $R_{th(f-c)}$ 为从结到外壳的热阻 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$), P_T 为在结上消耗的平均功率 (W)。

使用细的热电偶,可以直接测量 T_c , 或者根据热阻 $R_{th(f-c)}$ 的额定值计算。假使 $R_{th(f-c)}$ 没有给出,可以根据规格表进行计算:

$$R_{th(f-c)} = \frac{T_{j\max} - 25^{\circ}\text{C}}{P_{T\max}} \quad (2)$$

式中, $P_{T\max}$ 为管壳温度 25°C 时容许的最大功耗。

在管壳温度未知的时候,可由空气的温度 T_a 推算出结温,即:

$$T_j = T_a + R_{th(f-a)} \cdot P_T \quad (3)$$

另外, $R_{th(f-a)}$ 可分为三项:

$$R_{th(f-a)} = R_{th(f-c)} + R_{th(c-s)} + R_{th(s-a)} \quad (4)$$

式中, $R_{th(f-c)}$ 为从结到管壳的热阻,按(2)式计算, $R_{th(c-s)}$ 为管壳到散热器间的接触热阻。 $R_{th(s-a)}$ 为从散热器到空气(以晶体管和散热器周围处于静止的温度为基准状态的空气)的热阻。

在 $R_{th(f-a)}$ 中,管壳外的热阻 $R_{th(c-a)}$ 相对来说占绝大部分,而结到管壳的热阻 $R_{th(f-c)}$ 只占较小部分(对 T0-5 型封装晶体管 $R_{th(f-c)}/R_{th(c-a)} \doteq 18\%$)。

管壳和散热器间的热阻 $R_{th(c-s)}$ 在 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{W} \sim 0.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 范围,它取决于晶体管散热器接触面的大小、光洁度,接触压力、接触面上导热性物质。若将螺栓拧紧, $R_{th(c-s)}$ 就减小,然而若超过了规定转矩,则螺栓就会发生结构上的时效变化或者损坏。因此在散热器上固定晶体管时,不能超过规定的转矩。

从表 1 中所列出的接触面光洁度与 $R_{th(c-s)}$ 之间的关系^[1],可看出光洁度的重要性。

当管壳与散热器之间隔以绝缘体或插入导热性物质时, $R_{th(c-s)}$ 则为:

$$R_{th(c-s)} = \rho \cdot t / A (^{\circ}\text{C}/\text{W})$$

式中, ρ 为中间垫衬物质的热阻率[其值如表 2 所示 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}/\text{W}$)^[1]], t 为中间插入物质的厚度 (mm), A 为接触面积 (mm^2)。

$R_{th(s-a)}$ 则由所使用的材料、表面处理、外形尺寸、通风(或水)情况等决定。若综合考虑散热能力与价格指标,铝是理想材料,表面涂成黑色后,可更有效地发挥其散热能力。接触面

若涂以硅油等物的混合剂,又可获得最高导热率。

Table 1 The maximum thermal resistances between shells of different power semiconductor device(PSD) and radiators (°C/W) (heat conductive materials being used)

shell model of PSD	thickness of assembly surfaces of PSD(mm)	pinching moment (cm - kg)	degree of finish for the assembly surface of radiator and PSD(mm/per mm)					
			0.0254	0.0504	0.0763	0.1015	0.127	0.152
			°C/W	°C/W	°C/W	°C/W	°C/W	°C/W
T0-3	4.6	-	0.045	0.09	0.13	0.17	0.21	0.24
T0-36	4.6	2.7	0.03	0.07	0.10	0.13	0.17	0.20
T0-8	4.6	-	0.05	0.11	0.16	0.21	0.27	0.32
T0-60	4.6	2.7	0.08	0.16	0.24	0.32	0.40	0.48
MT-10	4.6	5.4	0.05	0.10	0.14	0.19	0.24	0.29

自然冷却的 $R_{th(s-a)}$ 由散热器尺寸(轮廓所占的体积),可由图 3 求得其近似值^[1],例如我们的小型 RF 激光器体积 $V=2904\text{cm}^3$,从图 3 可查得 $R_{th(s-a)}=0.41\text{°C/W}$,那么在 50°C 温升时,所能扩散的功率为 122W 左右。

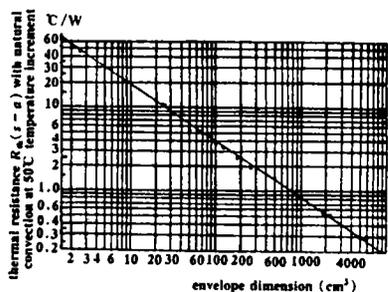


Fig.3 The relationship between envelope dimension of radiator and $R_{th(j-a)}$ at 50°C increment in temperature of radiator

Table 2 The thermal resistivities of variant cushion bases (50°C) $\rho(\text{°C} \cdot \text{mm/W})$

static air	47.3
siliceous oil	8.03
polyester film	9.3
laminated mica	2.6
acid-fast aluminium	0.22
aluminium	0.0075
copper	0.00394

2. 环境温度与容许功耗的关系

若已知晶体管的环境温度 T_a ,则该温度下的最大功率 P'_{Tmax} 可由(3)式求得:

$$\frac{\Delta T'_j}{\Delta T_{jmax}} = \frac{P'_{Tmax} \cdot R_{th(j-a)}}{P_{Tmax} \cdot R_{th(j-a)}} = \frac{T_{jmax} - T_a}{T_{jmax} - 25\text{°C}}$$

$$\therefore \frac{P'_{Tmax}}{P_{Tmax}} = \frac{T_{jmax} - T_a}{T_{jmax} - 25\text{°C}}$$

P_{Tmax} 与 T_{jmax} 之间的关系如图 4 所示^[1]。

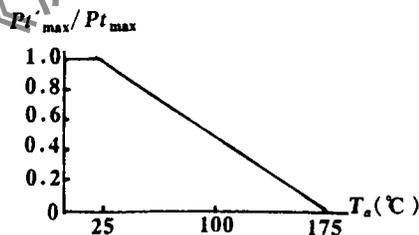


Fig.4 The relationship between P'_{Tmax}/P_{Tmax} and T_a

半导体功率器件的故障率随结温的升高,是按指数函数增加的。因此应尽量降低结温。对硅晶体管,最高结温通常为 150~200°C^[4],实际工作时结温控制在 120~130°C 以下。取 $T_{jmax}=125\text{°C}$, $T_a=40\text{°C}$,则有: $P'_{Tmax}/P_{Tmax}=0.85$,即 $T_a=40\text{°C}$ 时容许功耗减小为 $T_a=25\text{°C}$ 时最大功耗的 85%。

3. 水冷

在激光器中,总光电转换效率约为 6% 左右,当输出 15W 激光功率时,有 235W 的能量需

要散热器耗散掉。显然这超过了对流冷却时散热器所能扩散的功率(122W),连续工作约30min后($\frac{122}{235} \approx 0.52\text{h} \approx 31\text{min}$),散热器温升即达到50℃,所以我们另外在散热器内设置了四条水冷通道进行冷却(见图2)。

实验中,水的流量 $V \approx 136\text{kg/h}$,比热 $C = 1\text{kcal/kg}\cdot\text{℃}$,用下式可算得水的温升

$$\Delta t = \frac{Q}{C \cdot V} = \frac{202.1}{136 \times 1} = 1.5\text{℃}$$

式中,热负荷 $Q = 860 \times 0.235\text{kW} = 202.1\text{kcal/h}$ 。

显然这种小型 RF 激光器,用自来水冷却就能长时间工作。

四、温 度 保 护

由于将开关管,调制管与 RF 功放管安装于同一块散热器上,因此散热器的温度直接反映了功率管的平均温度。虽然实际应用中,散热器通水冷却,但若误操作或突然断水,就会因过热效应导致故障。或当过载时,电流太大使得结温升得过高,也会导致功率器件的损坏,而这些大功率器件通常都是较昂贵的,所以,设置温度保护是十分必要的。

选用线性良好的热敏电阻 R_t 作为温度传感器,将其埋入散热器内并用硅胶固定,那么热敏器件与散热器可视为同一温度,这样用图1所示电路即可达到保护目的。该保护是通过调制管进行锁定来实现的^[3]。

在正常温度范围内,调制信号 V_{mod} 经 Q_5, Q_6 三级管作用到 Q_2 调制管上,控制导通时间,实现对输出功率的调节。

散热器温度异常升高并超过保护所设定的最高温度50℃时,热敏电阻随温度线性变化,使温度取样电压 $V_t \geq V_{\text{ref}}$ (参考电平),比较器 IC 就输出高电平,使可控硅 Q_7 导通,从而使 Q_6 处于截止状态,调制管 Q_2 也因失去触发信号而截止。此后各功率管即处于不工作或小电流工作状态,这样就限制了温度的继续上升,实现对功率管的预先保护。当故障消除后,这一保护电路需关机后才能重新启动。

五、结 论

上述小型 RF CO_2 激光器的冷却结构已为实验证明是有效的。小的热阻,大的热容量及水冷是激光器长期稳定工作的保证,另外,可靠的温度保护也是不可少的,它能大大加强激光器的安全性。

参 考 文 献

- 1 入江俊昭著.高频大功率晶体管.北京:国防工业出版社,1976
- 2 康华光主编.电子技术基础.北京:高等教育出版社,1980
- 3 王又青,郭振华.激光技术,1994;18(4):240
- 4 陈 建,高 理.最新实用电子线路手册.北京:中国科学院希望高级电脑技术公司,1991