

重复频率染料调 Q 红宝石激光器

陶丽君 孙景群

(中国科学院大气物理研究所)

应用于大气探测的巨脉冲固体激光雷达,常采用重复频率调 Q 红宝石激光器,以适应各种快速变化及微弱信号的大气探测,例如激光相关测风、激光研究烟羽扩散规律、激光遥测大气污染成分和浓度等。为此,开展了重复频率染料调 Q 红宝石激光器实验,对影响激光大气探测的激光能量稳定性等因子进行了分析研究。

一、实验条件

图 1 为重复频率染料调 Q 红宝石激光器实验装置示意图。

激光器全长 40 厘米。采用介质膜全反射镜,反射率约 98%。用平板玻璃作部分反射镜,反射率 8%。染料盒容积 1.4 厘米³,其通光部分

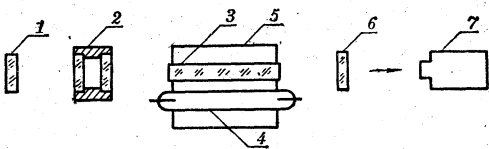


图 1 实验装置示意图

1—全反射镜; 2—染料盒; 3—红宝石; 4—氙灯;
5—聚光器; 6—部分反射镜; 7—鼠笼能量计

由平板玻璃构成,平板间距 5 毫米,其他部分则用黄铜制成。染料盒盛放隐花菁乙醇溶液,隐花菁染料的吸收峰值在 7040 埃附近^[1],与激光波长相近。我们以激光波长 6943 埃处染料盒中隐花菁乙醇溶液的透过率来表征染料浓度。红宝石直径 7 毫米,长 8.5 厘米,C 轴取向 72°。光泵采用

CMX 12-80 型直管氙灯。聚光器为椭圆柱状,椭圆柱内壁及挡板内侧紧贴一层抛光银皮。根据实际情况及资料 [2] 设计椭圆柱状聚光器,其长轴为 4 厘米,短轴为 3.5 厘米,椭圆率为 0.5。激光器中的红宝石、氙灯、聚光器和染料盒分别用循环水冷却。激光输出能量用鼠笼能量计测量,测量时间间隔不小于 15 秒。氙灯放电回路由储能电容 2000 微法和放电电感 100 微亨组成,实测放电时间 1.2 毫秒。

激光器重复频率为 1 次/秒,总效率约 0.1%,激光波长 6943 埃,光束发散角 8 毫弧度。隐花菁乙醇溶液取两种浓度,当染料透过率为 70% 时,激光输出能量约 0.7 焦耳,脉冲功率约 45 兆瓦;当染料透过率为 75% 时,激光输出能量约 0.4 焦耳,脉冲功率约 25 兆瓦。

二、实验结果

在 1 次/秒重复频率条件下,激光光束发散角较为稳定,并与单次发射激光时的情况相近^[3],因此着重对影响激光输出能量稳定性、红宝石升温、氙灯寿命和聚光器效率的问题进行实验研究。

1. 染料对激光能量的影响

隐花菁乙醇溶液是影响激光能量输出稳定性的主要因素。染料在激光照射下一方面被“漂白”，起着调 Q 开关的作用^[4]，同时因受重复频率激光照射，使染料分子破坏，染料浓度逐渐下降，以至激光输出能量也随之下降。染料对 1 次/秒重复频率激光输出的影响示于图 2。图中曲线 1 表明，染料透过率为 70% 时，激光初始输出能量为 0.72 焦耳，然后随时间线性下降，经 15 分钟左右能量下降 20%，30 分钟后能量约下降 50%。曲线 2 表明，染料透过率为 75% 时，激光初始能量为 0.41 焦耳，然后随时间线性下降，下降趋势则比曲线 1 更为缓慢，经过 25 分钟左右，能量下降 20%。由此可见，重复频率红宝石激光器采用隐花菁乙醇溶液作调 Q 开关时，激光输出能量平缓下降，下降速度与激光输出能量呈正相关。

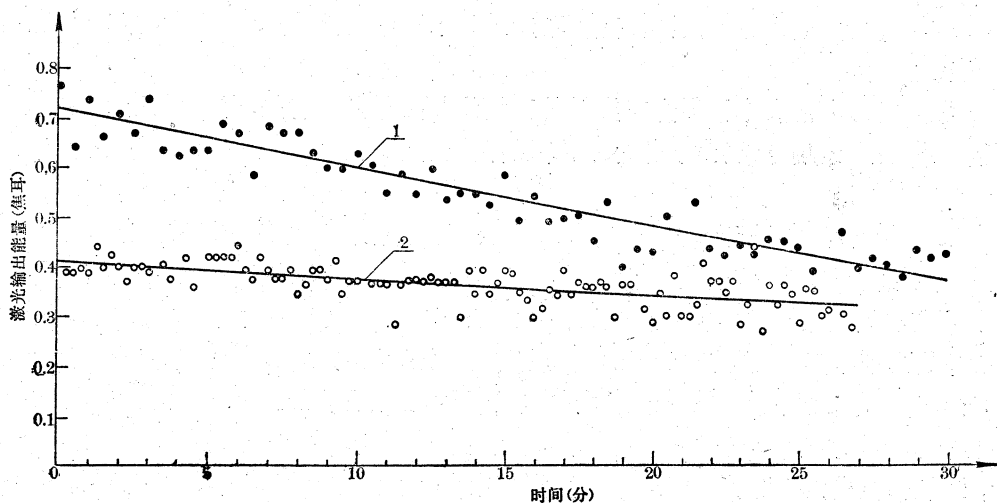


图 2 隐花菁乙醇溶液对激光输出能量的影响

重复频率为 1 次/秒。曲线 1—染料透过率为 70%，激光能量起伏的均方差小于 10%；曲线 2—染料透过率为 75%，前 20 分钟激光能量起伏的均方差小于 10%，20 分钟后均方差略大于 10%

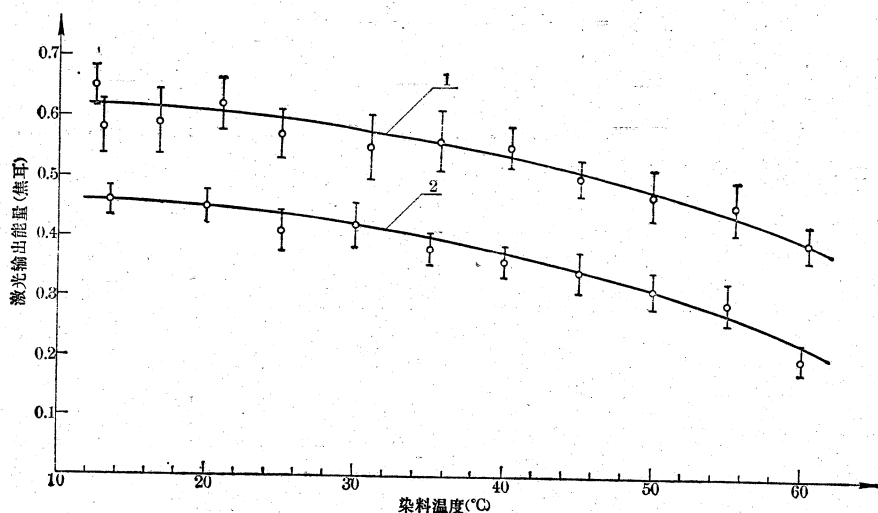


图 3 激光输出能量与隐花菁乙醇溶液温度的关系

曲线 1—染料透过率为 70%；曲线 2—染料透过率为 75%，通过实验点的竖线表示均方差

激光对染料的破坏作用还与染料温度有关,温度较高时,激光对染料的破坏作用加强。例如重复频率为1次/秒,激光输出能量为0.72焦耳,染料盒未进行循环水冷时,由于激光照射使染料升温^[5],染料的破坏增强。实验表明,激光发射30分钟后染料盒未水冷时的激光输出能量,比染料盒循环水冷时激光输出能量约低10%。显然,如果激光输出能量增大,这一影响也将更为显著。

此外,激光输出能量还与染料温度有关,但能够恢复。随着染料温度升高,激光输出能量下降,一旦染料冷却降温,激光输出能量复又回升。这可能由于温度影响染料分子的吸收截面和荧光寿命,致使染料饱和吸收功率阈值随温度变化之故^[4]。图3即为激光输出能量与染料温度的关系。图3表明,染料浓度不同时,激光输出能量随温度的变化规律是一致的;当染料温度低于30°C时,激光输出能量随温度变化不超过10%;染料温度高于30°C时,激光输出能量随温度的变化增大。

由于激光输出能量大小及激光对染料的破坏均与染料温度有关,为避免环境温度及激光照射对染料温度的影响,染料盒须循环水冷,以保持恒定温度。

2. 红宝石升温

在重复频率情况下,由于红宝石升温,使 R_1 线展宽,荧光寿命缩短及荧光效率下降,因而与激光单次发射相比,阈值有所上升^[6]。此外,重复频率情况下,因红宝石轴线处升温比边缘高,致使红宝石轴线附近的振荡阈值也比边缘高,这就使起振范围扩大,再加上反转粒子数增大等原因,从而使激光输出能量比单次激光输出时增大^[7]。例如1次/秒重复频率时,激光能量为0.72焦耳,比单次激光发射约提高15%。在热平衡条件下,红宝石这种升温并不影响激光输出能量的稳定性。但因红宝石温度影响激光发射波长,有可能使激光波长位于水汽吸收光谱带^[8],这就使激光大气探测的信号幅度受大气中水汽含量的强烈影响。因此,对红宝石升温进行分析,避免激光波长落于水汽吸收光谱带中,对于各种激光大气定量探测是十分必要的。

由于测量上的困难,我们利用高重复频率激励棒达到热平衡时的温度分布,来近似估算1次/秒重复频率时红宝石的温度 $T(r)$,并有表式^[9]

$$T(r) = T_0 + \frac{P_a}{2\pi L} \left[\frac{1}{r_1 h} + \frac{(r_1^2 - r^2)}{2K r_1^2 L} \right] \quad (1)$$

式中 r ——半径变量, T_0 ——冷却水温, P_a ——红宝石散热率, L ——红宝石有效长度, h ——冷却水的冷却系数, K ——红宝石导热率, r_1 ——红宝石半径。由(1)式可得红宝石径向平均温度 T 与冷却水温 T_0 之差:

$$T - T_0 = \frac{P_a}{2\pi L} \left(\frac{1}{r_1 h} + \frac{1}{3K} \right) \quad (2)$$

在忽略冷却水进出口处的弯管影响,可引入直管内受迫运动时的冷却系数^[10]

$$h = \frac{K_0}{2(r_2 - r_1)} \text{Nu} \quad (3)$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0.15 \text{Re}^{0.33} \text{Pr}^{0.43} (T_0) \text{Gr}^{0.1} \left[\frac{\text{Pr}(T_0)}{\text{Pr}(T_r)} \right]^{0.25} \varepsilon & (\text{层流状态, } \text{Re} < 2.2 \times 10^3) & (4a) \\ F(\text{Re}) \text{Pr}^{0.43} (T_0) \left[\frac{\text{Pr}(T_0)}{\text{Pr}(T_r)} \right]^{0.25} \varepsilon & (\text{过渡状态, } 2.2 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^4) & (4b) \\ 0.021 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.43} (T_0) \left[\frac{\text{Pr}(T_0)}{\text{Pr}(T_r)} \right]^{0.25} \varepsilon & (\text{旺盛湍流状态, } \text{Re} > 10^4) & (4c) \end{cases}$$

式中 K_0 ——水的导热率, r_2 ——水冷玻璃套管的内半径, Nu ——努谢尔特准则, Re ——雷诺准则, Pr ——普朗特准则, Gr ——葛拉晓夫准则, ε ——管长订正系数, T_r ——红宝石表面温度, $F(Re)$ ——以雷诺数为函数的经验系数。各相似准则定义为

$$Re = \frac{2v(r_2 - r_1)}{\nu} = \frac{2W}{\pi\nu(r_2 + r_1)} \quad (5)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (6)$$

$$Gr = \frac{8\beta g(T_r - T_0)(r_2 - r_1)^3}{\nu^2} \quad (7)$$

式中 v ——冷却水平均流速, W ——水流量, ν ——水的动粘滞系数, a ——水的导热系数, β ——水的体膨胀系数, g ——重力加速度。

当流量 W 取 35~70 厘米³/秒, $r_1=3.5$ 毫米, $r_2=5.5$ 毫米, $\nu(20^\circ\text{C})=10^{-2}$ 厘米²/秒, 由 (5) 求得 Re 在 2.5×10^3 至 5.0×10^3 之间, 这表明冷却水处于过渡状态。此外, 式 (4b) 中的因子 $\left[\frac{Pr(20^\circ\text{C})}{Pr(50^\circ\text{C})}\right]^{0.25} = 1.2$, 变化不大, 因此在计算冷却系数时可略去。冷却管长 12 厘米, 在上述雷诺数范围内 $\varepsilon \approx 1$ 。 $Pr(20^\circ\text{C})=7.02$, $K_0(20^\circ\text{C})=5.9 \times 10^{-3}$ 瓦/厘米 $\cdot^\circ\text{C}$, $K(20^\circ\text{C})=3.87 \times 10^{-1}$ 瓦/厘米 $\cdot^\circ\text{C}$ 。在玻璃水管内氙灯光照均匀分布等假设下, 由输出激光时以及抽去红宝石时冷却水的升温, 测定了红宝石吸收氙灯光能的功率占红宝石和冷却水吸收氙灯光能总功率的 75%, 由此测得染料透过率为 70% 时, 红宝石的散热率 $P_a=120$ 瓦。水温约 20 $^\circ\text{C}$ 时, 红宝石平均升温与冷却水流量的关系示于图 4。实验中冷却水流量为 45 厘米³/秒, 求得红宝石升温约 14 $^\circ\text{C}$ 。根据计算结果, 可初步确定冷却水温及水流量, 使激光波长偏离水汽吸收带。当然在激光大气探测中, 还需通过其他方法作进一步校正。

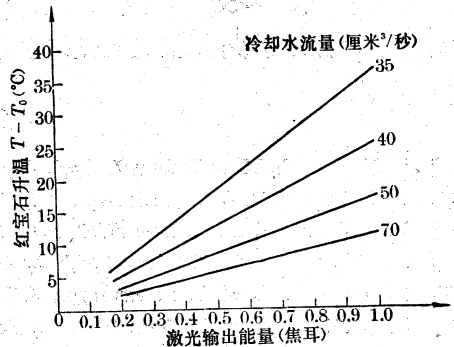


图 4 重复频率为 1 次/秒、染料透过率为 70% 时, 红宝石平均升温与冷却水流量的关系

3. 氙灯寿命

氙灯寿命是影响重复频率激光器持续运转的因素之一。氙灯寿命不仅与能承受的最大负载功率有关, 而且还与电极的粒子溅射和管壁蒸发有关。有效地冷却氙灯管壁和电极, 可减缓氙灯效率的下降, 延长氙灯寿命。

实验中冷却氙灯管壁的玻璃水套管内径 1.6 厘米, 管长 11 厘米, 循环水流量为 130 厘米³/秒, 其冷却系数亦可由式 (3) 和 (4) 估算; 冷却氙灯电极的水流量为 5 厘米³/秒。当激光泵浦能量约 700 焦耳时, 氙灯工作上万次后破坏, 此时氙灯效率约下降 25%。

4. 聚光器效率

聚光器反射率下降使其效率降低, 影响重复频率激光器的持续工作。

常温下聚光器有较高反射率, 但在重复频率氙灯照射下, 抛光银皮升温较高, 与空气中的氧起反应 (约 200 $^\circ\text{C}$ 时), 形成褐色氧化银 (Ag_2O) 薄膜^[11], 使聚光器效率降低。此外, 空气在波长短于 2400 埃的氙灯光照下, 产生臭氧, 它与银起反应生成灰黑色氧化高银 (AgO), 通常温度愈高, 这一反应愈剧烈。氧化高银在温度超过 100 $^\circ\text{C}$ 左右时, 又可分解为氧化银^[12]。实验

中氙灯发射的紫外光大多被水冷玻璃套管所吸收,因此生成臭氧并使银氧化的过程大为减弱。

由于银的氧化作用与温度有关,因此加强聚光器的循环水冷,可使聚光器反射率下降缓慢,保证重复频率激光器的持续工作。实验表明,重复频率为1次/秒,激光泵浦能量约700焦耳,聚光器冷却水流量为40厘米³/秒时,激光器工作80分钟后,聚光器抛光银皮才出现局部褐色氧化银膜,聚光器效率变化不显著。若聚光器冷却水流量减为20厘米³/秒,则激光器工作30分钟后,聚光器效率就下降10%以上。

三、结 束 语

1次/秒重复频率染料调Q红宝石激光器,在红宝石、氙灯、聚光器和染料盒分别水冷条件下,稳定输出能量可维持较长时间;适当控制红宝石冷却水的温度和流量,可使激光器波长偏离水汽吸收带,因而能适用于激光大气探测。

如要求1次/秒重复频率,输出能量1焦耳,能量起伏均方差小于10%,持续工作1小时左右,而平均能量下降不超过20%,则只须将染料盒容积扩大至10厘米³左右,通光部分位于染料盒下端,靠自由热对流使染料均匀混合;红宝石冷却水流量为45厘米³/秒时,水温控制在8~20°C或35~55°C附近^[8];用温度较低的水冷却氙灯管和电极,流量分别大于130厘米³/秒和5厘米³/秒;用温度较低的水冷却聚光器,流量大于50厘米³/秒即可。

参 考 资 料

- [1] T. F. Deutsch, M. J. Weber; *J. Appl. Phys.*, 1966, **37**, No. 9, 3629.
- [2] S. B. Schuldt, R. L. Aagard; *Appl. Opt.*, 1963, **2**, No. 5, 509~513.
- [3] В. А. Иванов, В. И. Лебедев; *ЖПС*, 1970, **13**, № 1, 40~45.
- [4] F. Gires; *IEEE J. Quant. Elect.*, **QE-2**, No. 9, 624~626.
- [5] А. П. Ведута, А. М. Леонтович и др.; *ЖПС*, 1967, **6**, № 3, 401~404.
- [6] J. P. Wittke; *J. Appl. Phys.*, 1962, **33**, No. 7, 2333~2335.
- [7] В. А. Андреичев, Л. С. Корочкин и др.; *ЖПС*, 1974, **21**, № 3, 451~455.
- [8] 孙景群,“激光气象雷达”,《气象》, 1975, No. 3, 18~21.
- [9] W. Koeschner; *Appl. Opt.*, 1970, **9**, No. 6, 1429~1434.
- [10] “传热学”第七章,同济大学热工教研组编,中国工业出版社,1961年。
- [11] “无机化学大纲”第二卷,第一章,上海科学技术出版社,1963。