

He-Ne 气体激光器放电条件的研究

姓名*

北京大学物理学院 学号: 2x000xxxx

(实验日期: 2025 年 3 月 13 日)

He-Ne 气体激光器 (He-Ne 激光器) 作为一种制造简单、单色性好、工作稳定的气体激光器, 在物理学研究和工程领域都有非常重要而广泛的应用, 其放电条件的相关机理值得研究. 本实验研究波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器, 通过配置一定比例的 He-Ne 混合气体, 实现粒子数反转并产生了激光, 通过控制气体配比不变测量在不同气体总压强下激光输出功率和放电电流的关系, 研究了放电条件对激光输出功率的影响, 归纳总结出了四条具体特点并进行了一定的分析与讨论, 验证了经验规律的正确性, 让我们进一步了解了 He-Ne 激光器的工作原理和放电条件对激光输出功率的影响.

关键词: He-Ne 气体激光器, 真空, 放电条件

I. 引言

1917 年前后, 爱因斯坦 (A. Einstein) 首先在旧量子论的框架内描述了原子的受激辐射, 人们猜想这一现象可用于加强光场, 奠定了激光的理论基础. 激光, 全称为“受激发射的辐射光放大” (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER or laser), 是指通过受激辐射而产生、放大的光, 即受激辐射的光放大, 激光具备单色性极好, 发散度极小, 亮度 (功率) 可以达到很高等优点. 自从 20 世纪 60 年代激光器问世以来, 为光学研究提供了方向性、单色性和相干性都很好而且亮度高的崭新光源 [1]. 随着激光科学的发展, 诞生了形形色色、丰富多彩的激光光源, 广泛应用于计量科学、通讯、化学、材料加工、军事、医学、农业等方面.

He-Ne 激光器是一种十分普遍, 应用广泛的激光器. 本实验中, 我们研究波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器, 通过控制气体配比不变, 探究在不同总压强下, 激光输出功率随激光器的放电电流变化而产生的变化, 找出了各总压强下的最佳放电电流并对于不同压强下的变化曲线进行了一定的对比和理论解释, 验证了经验规律的正确性, 让我们进一步了解了 He-Ne 激光器的工作原理和放电条件对激光输出功率的影响. 同时由于涉及到真空相关的实验操作, 我们也进一步熟悉了真空的获得、测量和充气技术.

II. 理论

A. 激光的形成

激光器的基本结构包括如 图 1 所示的三部分: 工作物质、光学谐振腔和激励能源.

* email@pku.edu.cn; (86)1*****

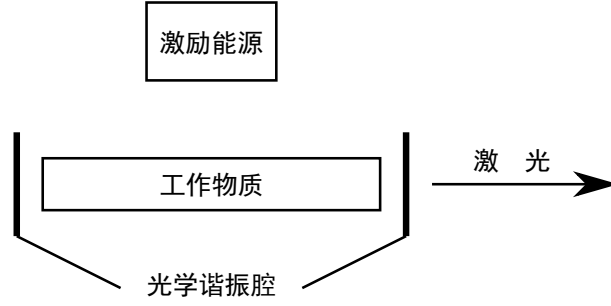


图 1. 激光器的基本组成部分

要形成激光, 首先必须利用激励能源使工作物质激活, 即使工作物质内部的电子在某些能级之间实现粒子数的反转分布. 粒子数反转分布的条件是

$$\frac{g_1 N_2}{g_2 N_1} > 1. \quad (1)$$

其中, N_1 为下能级的粒子数密度, N_2 为上能级的粒子数密度, g_1, g_2 为下能级和上能级的统计权重. 对于 He-Ne 激光器 632.8 nm 谱线来说 $g_1 = 5, g_2 = 3$. 在 He-Ne 激光器中粒子数反转是通过气体放电来实现的 [1].

其次, 必须满足产生激光的阈值条件, 即光在谐振腔中来回一次时在激活介质中获得的增益足以补偿各种因素导致的光的损耗. 在忽略介质内部损耗的情况下, 阈值条件为

$$r_1 r_2 e^{2Gl} \geq 1. \quad (2)$$

其中, r_1, r_2 为谐振腔两端反射镜的反射率, G 为激活介质的增益系数, 其定义为光在单位距离内光强增加的百分比 [2].

根据爱因斯坦受激辐射理论, 我们又可以得到增益系数满足

$$G(\nu) \propto \left(N_2 - N_1 \frac{g_2}{g_1} \right) B_{21} \cdot g(\nu). \quad (3)$$

其中 B_{21} 为受激辐射系数 [1]. 为了满足阈值条件 式 (2) 的要求, 在忽略介质内部损耗的情况下, 增益系数应当至少有

$$G_{\min} = \frac{1}{2l} \ln(r_1 r_2)^{-1} [1]. \quad (4)$$

B. He-Ne 激光器的激活介质

He-Ne 激光器 632.8 nm 谱线激光对应的上能级为 Ne 的 $3S_2$ 态, 下能级为 $2P_4$ 态, 对于要求获得 632.8 nm 的激光来说, 即要求在这两个能级之间实现粒子数反转分布状态.

在混合气体中, He 的激发态 2^1S_0 与 Ne 的激发态 $3S_2$ 之间的能量非常接近, 在合适的配气比的情况下, 由于 He 的 $1S_0$ 态是亚稳态, 它们可以与基态 Ne 原子碰撞而发生能量的共振转移, 把基态的 Ne 原子激发到 $3S_2$ 能级上去而自己回到 He 的基态. 由

于这两个能级的能量很接近，发生上述能量共振转移的截面很大，使上能级的粒子数密度较大。

另一方面，对于下能级 $2P_4$ 态来说，在偶极辐射近似下它与基态之间属于违禁跃迁，并且电子碰撞使得 Ne 由基态激发到 $2P_4$ 态的碰撞截面也很小，而这一态的寿命也很短，因此下能级的粒子数密度很小。因此很容易实现 Ne 的 3S_2 和 $2P_4$ 能级之间的粒子数反转分布。

此外，值得注意的是在 He-Ne 激光器中，还存在 Ne 原子的自吸收现象和 Ne 原子的 $2P$ 态与 $1S$ 态之间的共振俘获效应。这两个过程都不利于前述对下能级的抽空，对于实现粒子数反转分布是不利的。为了尽快使下能级抽空，应当加强“管壁效应”，即使用比较细的毛细管，增加 Ne 原子与管壁碰撞的频率，使 $1S$ 态上的 Ne 原子通过与器壁碰撞将能量交给管壁而回到基态。

C. He-Ne 激光器的经验规律

对于 He-Ne 激光器的放电条件，由大量实验总结出如下几个规律：

1. 一个激光器在一定的气体配比下，输出功率随总气压的变化有一个极大值。对于本实验中毛细管直径 d 为 1.25 mm 的 He-Ne 激光器，最佳充气总压强在 300 Pa 左右。
2. 对于毛细管直径为 $d = 1.25\text{ mm}$ 的激光管，He 与 Ne 的充气配比取 $7:1$ 较好，此时输出功率随气体配比的变化不明显。
3. 改变 He-Ne 激光器的放电电流，同时测量其输出功率，可以得到有个使得激光输出功率最大的放电电流，即最佳工作电流。并且总气压降低时最佳工作电流升高。

上述的经验规律和理论的相关预计都是吻合的 [1]。本实验将通过对于不同压强条件下 He-Ne 激光器的激光输出功率与放电电流的关系的测量，再次验证这一预计。

III. 实验装置

本实验的实验装置主要分为激光管结构及其测量系统和真空系统两部分组成。实验通过真空系统进行配气，控制 He-Ne 气体配比与激光管内气体压强，测量系统通过利用激光管中的电极进行放电，采集 He-Ne 激光电源的放电电流和利用光功率计测定的激光器输出光功率。

图 2 给出了内腔式 He-Ne 激光管结构，由放电管和谐振腔组成。谐振腔由反射镜 R_1 和 R_2 组成， R_1 为平面镜， R_2 为球面镜，曲率半径为 1 m 。 R_1 的反射率 r_1 为 $97\% \sim 98\%$ ， R_2 的反射率 r_2 在 99% 以上，激光从 R_1 输出至谐振腔外。放电管中央的细管为毛细管，毛细管直径 d 为 1.25 mm ，腔长约为 20 cm 。套在毛细管外面较粗的管子为储气管，电极分别为钨杆阳极和铝杆阴极。本实验激光测量系统使用 JD-2 型 He-Ne 激光电源，可以显示通过氦氖激光器的电流大小；使用 FD-LPM-A 激光功率器

测量激光器输出功率；使用的限流电阻为十支 $R = 27\text{ k}\Omega$ 电阻串联，电阻阻值范围为 $27 \sim 270\text{ k}\Omega$.

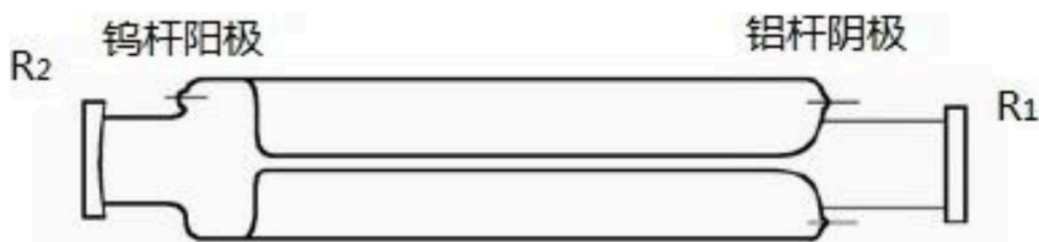


图 2. He-Ne 激光管结构

图 3 给出了实验真空系统，其中机械泵和扩散泵用来将系统抽真空，用 DL-5 电离真空计测量真空度；U 型管压力计中油的密度为 1.09 g/cm^3 ，通过其两侧液面高度差 Δh 可以测得气体压强 $p = \rho g \Delta h$ ；通过控制各活塞的开闭，可以进行配气和控制总压强等操作.

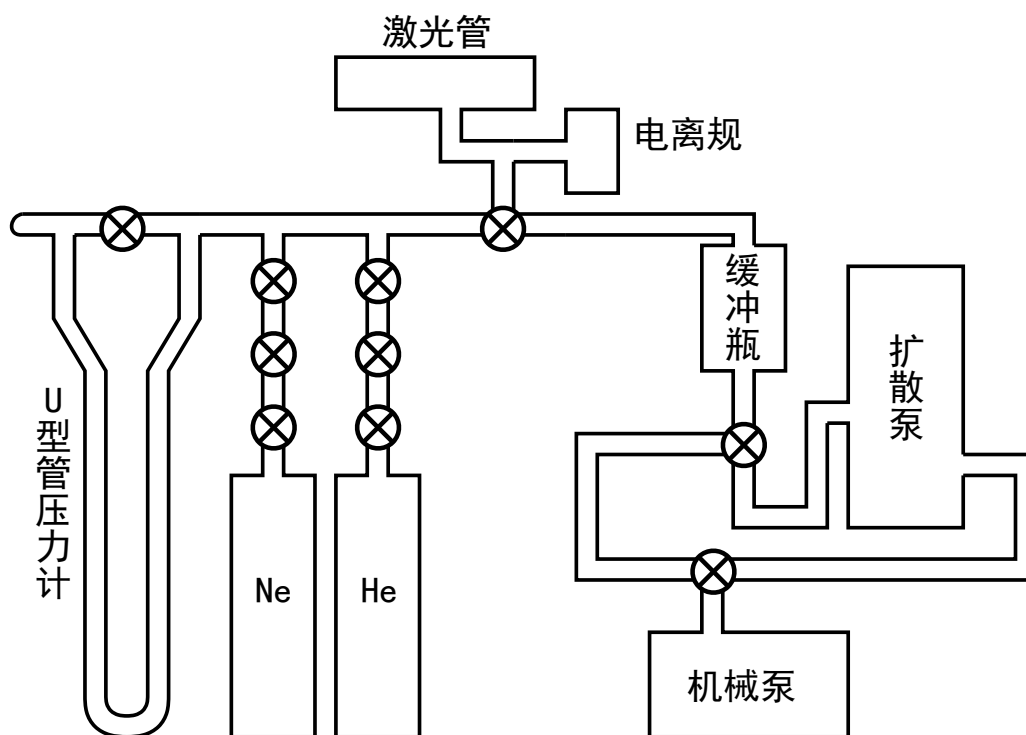


图 3. 实验真空系统

在实验过程中，我们首先要进行真空除气。先开启机械泵，等五分钟后再开启真空计测量压强为 $4.2 \times 10^{-1}\text{ Pa}$ ，然后开启扩散泵冷却水，确定水冷机在工作，再开启扩散泵使系统压强低于 $5 \sim 7 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 。然而，在本次实验中，15:00 前未将扩散泵与机械泵串联起来工作，系统未能正常工作，15:00 后将二者串联起来正常工作，到 15:12 把系统压强抽至 $6.0 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 。而在此后关闭阀门进行配气时，忘记关闭连接 He-Ne 气体的体积 V_1 和连接激光器部分的体积 V_2 间的阀门 4，导致需要重新抽真空，15:24 重新抽至 $6.0 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 。

其次，我们要进行配气。我们希望在进行配气的过程的第一步直接同步实现对于连接 He-Ne 气体的体积 V_1 和连接激光器部分的体积 V_2 的比值 V_1/V_2 的测量，以实现后续的配气过程：

1. 在 V_1 中充入适量的 He，测量高度差 $\Delta h_1 = 26.1 \text{ cm}$ ，计算得到 $p_1 = 2788.0 \text{ Pa}$ 。
2. 连接 V_1 和 V_2 ，测量高度差 $\Delta h_2 = 7.2 \text{ cm}$ ，计算得到 $p_2 = 769.104 \text{ Pa}$ 。进而可以根据理想气体状态方程

$$pV = \mu RT \quad (5)$$

计算 $\lambda = V_1/V_2 = p_2/(p_2 - p_1) \approx 0.38$ 。

3. 断开 V_1 和 V_2 ，将 V_1 抽真空， V_2 中的压强 $p'_{\text{He}} = p_2 \approx 769.1 \text{ Pa}$ 。
4. 再在 V_1 中充入适量的 Ne，测量高度差 $\Delta h'_1 = 2.7 \text{ cm}$ ，计算得到 $p'_{\text{Ne}} = 288.414 \text{ Pa}$ 。考虑混合后 $p_{\text{He}}/p_{\text{Ne}} = \eta$ ， $p_{\text{He}} + p_{\text{Ne}} = p_{\text{tot}}$ ，根据式 (5)，我们能够得到

$$\begin{cases} p'_{\text{He}} V_2 = p_{\text{He}} (V_1 + V_2), \\ p'_{\text{Ne}} V_1 = p_{\text{Ne}} (V_1 + V_2), \end{cases}$$

进而有

$$\begin{cases} p'_{\text{He}} = \frac{\eta}{\eta + 1} \frac{V_1 + V_2}{V_2} p_{\text{tot}}, \\ p'_{\text{Ne}} = \frac{1}{\eta + 1} \frac{V_1 + V_2}{V_1} p_{\text{tot}}. \end{cases}$$

所以，可以计算得到 $\eta = p_{\text{He}}/\lambda p'_{\text{Ne}} = 7.01 \approx 7 : 1$ 。

5. 连接 V_1 和 V_2 ，使两种气体充分混合，待 U 型管压力计中液面稳定，测量高度差 $\Delta h'_2 = 4.65 \text{ cm}$ ，计算得到 $p_{\text{tot}0} = 630.238 \text{ Pa}$ 。

最后，我们要测量放电条件对激光输出功率的影响，在第一次放气前对于气体混合后压力的测量等时间，均能够保证两种气体充分混合。通过断开 V_1 和 V_2 ，再将 V_1 部分和缓冲瓶连通放气，逐步减小 p_{tot} 的大小， p_{tot} 在 $200 \sim 500 \text{ Pa}$ 的压强区间下改变激光器的放电电流并测量激光输出功率变化，绘制出五条不同 p_{tot} 的激光输出功率随放电电流变化的曲线。激光器放电电流的变化是通过改变直流高压电源输出电压的大小或激光器与直流高压电源之间的限流电阻的大小来实现的。放电电流调整的范围至少从使得激光器稳定工作的放电电流开始，测量到曲线先增大后减少，有一个明显的使激光输出功率最大的放电电流。激光功率器的读数有一定程度的抖动，尽量在较短的时间内在其较为稳定后的变化的周期内取平均进行读数。

IV. 结果与讨论

图 4 展示了在 $p_{\text{He}} : p_{\text{Ne}} = 7 : 1$ 的配气比下，不同 p_{tot} 下激光器输出功率随放电电流变化的曲线。其中 $p_{\text{tot}1} = 496.7 \text{ Pa}$ ，限流电阻接入 $6R = 162 \text{ k}\Omega$ ； $p_{\text{tot}2} = 438.0 \text{ Pa}$ ，限流

电阻接入 $6R = 162\text{ k}\Omega$; $p_{\text{tot}3} = 331.1\text{ Pa}$, 限流电阻接入 $6R = 162\text{ k}\Omega$; $p_{\text{tot}4} = 267.1\text{ Pa}$, 限流电阻接入 $2R = 54\text{ k}\Omega$; $p_{\text{tot}5} = 208.3\text{ Pa}$, 限流电阻接入 $2R = 54\text{ k}\Omega$. 并且将图中展示的五条曲线中的最大输出功率和最佳工作电流的数据点整理到 表 I 中.

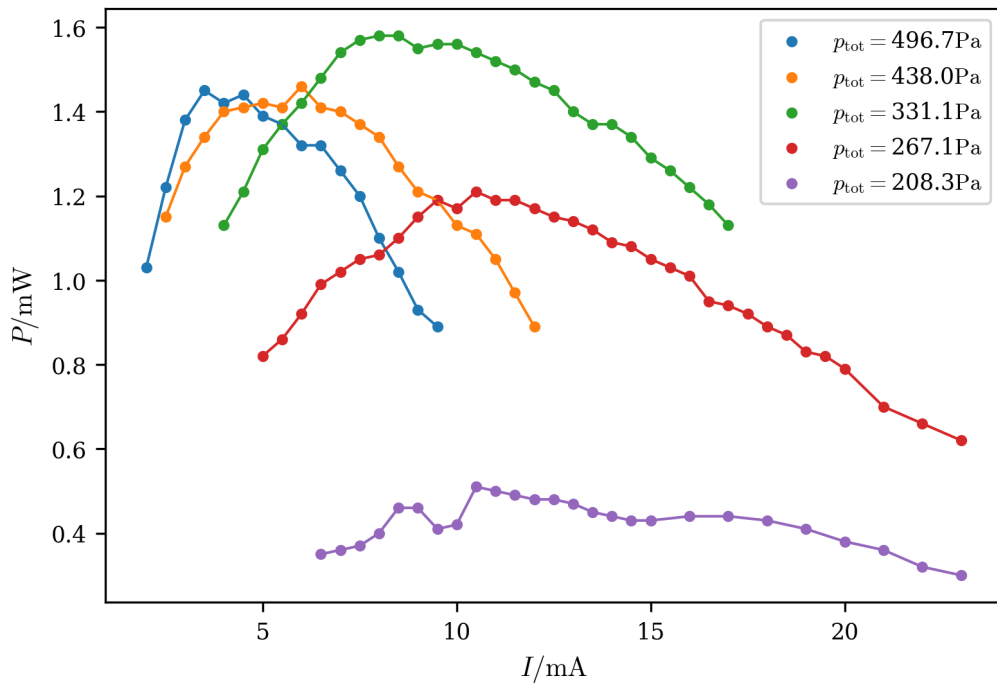


图 4. 不同 p_{tot} 下激光器输出功率随放电电流变化的曲线

表 I. 不同 p_{tot} 下激光器的最佳工作电流和最大输出功率

总压强 p_{tot}	496.7 Pa	438.0 Pa	331.1 Pa	267.1 Pa	208.3 Pa
最佳工作电流/mA	3.5	6.0	8.0	10.5	10.5
最大输出功率/mW	1.45	1.46	1.58	1.21	0.51

由 图 4 和 表 I 可以归纳出如下的一些特点:

1. 五条曲线中每条曲线均先增大后减小, 即气体总压强一定时, 随着放电电流的增大, 激光器输出功率先增大后减小, 存在一个使激光输出功率最大的最佳工作电流.
2. 随着气体总压强的减小, 最佳工作电流不断增大.
3. 随着气体总压强的减小, 激光器最大输出功率先增大后减小, 表明 He-Ne 混合气存在最佳充气总压强, 且该值位于 267.1 Pa 到 438.0 Pa 中间 331.1 Pa 左右, 与检验规律中的 300.0 Pa 较为相符.
4. 五条曲线的起始位置逐线向右移动, 开始有稳定的输出功率的工作电流随总压强的减小而增大.

对于以上现象产生的原因分析如下：

1. 放电电流的大小直接影响电子碰撞的强度，当放电电流较小时，亚稳态 2^1S_0 的 He 的原子密度随电流近似线性地增大；当放电电流进一步增大时，亚稳态 2^1S_0 的 He 的原子密度有饱和的趋势，而通过共振转移过程激发的上能级的 Ne 原子密度随放电电流的变化亦有相似的规律，促进粒子数的反转。另外，随放电电流的增加，电子与 Ne 亚稳态 1S 上原子碰撞并激发到下能级的概率也增加，使下能级原子密度成正比地增加，抑制粒子数的反转，使激光器功率下降。从而存在最佳工作电流和最大输出功率。
2. 对于 1 中的描述的两个过程的平衡点（相应于 Ne 上能级 $3S_2$ 上的粒子数接近饱和），在气体总压强减小时，气体中原子数减少，因此与电子发生碰撞的概率降低，需要更高的电子流密度才能达到，所以最佳工作电流不断增大。
3. 当气体总压强太高时，电子温度下降，使得只有少数电子具有足以将 He 原子由基态激发到 2^1S_0 的能量，不利于粒子数的反转；在气压减小时，电子温度升高，电子的平均动能增加，有利于 He 原子的激发，有利于粒子数的反转；但是当气压太小时，原子数太少又导致形成的粒子数反转密度不高，增益系数也就不大。所以存在这样一个最佳的气压 $p \approx 300 \text{ Pa}$ ，作为电子的平均自由程和气体原子数密度分别受压强影响这两个因素竞争的结果。
4. 电流较小时，增大电流使处于亚稳态的 He 原子数目增加，从而 Ne 原子 3S_2 能级的原子密度增大。产生输出功率要求处于 3S_2 的 Ne 原子数目满足能级反转，即满足 **式 (1)**。总压强越低这个条件就越难以实现，对应的工作电流增大。

V. 结论

本实验我们通过配置 $p_{\text{He}} : p_{\text{Ne}} \approx 7 : 1$ 的混合气体，使用电极放电，实现了 He-Ne 激光器 632.8 nm 谱线激光对应的上能级 Ne 的 $3S_2$ 态和下能级 $2P_4$ 态之间的粒子数反转分布状态，产生了相应的激光输出。本报告给出了在控制气体配比不变时，通过在 5 种不同气体总压强下改变激光器的放电电流并对激光器输出功率的测量研究了在不同 p_{tot} 下放电条件对激光器输出功率的影响，归纳总结出了四条具体特点并进行了一定的分析与讨论，验证了经验规律的正确性，让我们进一步了解了 He-Ne 激光器的工作原理和放电条件对激光输出功率的影响。但是，由于实验操作时对于真空技术的掌握有限，造成了一些时间上的耽误，未能够进一步改变 He 与 Ne 的分压比，观察它对激光输出功率的影响。将来的实验还可以更加深入地设计配气的方案，并研究在更大范围更多因素下放电条件对激光器输出功率的影响。

致谢

感谢梅振超同学协力完成了本实验，感谢冉广照老师在实验中的讲解和指导.

-
- [1] 吴思诚, 荀坤, 近代物理实验, 4th ed. (高等教育出版社, 北京, 2015).
 - [2] 赵凯华, 新概念物理教程光学 (高等教育出版社, 北京, 2004) p. 363.

附录 A: 思考题

1. 不同的总压强下，激光输出功率的峰值的位置是如何变化的？如何理解？

见上述 小节 IV 中归纳特点与原因分析中相应的第二条.

2. 实验中，当 He-Ne 气体压强和放电电流保持不变时，激光器光输出功率存在小的起伏，原因何在？

主要的原因大致有以下两点：首先，对于气体激光器，即使即使宏观电流稳定，气体放电过程中仍存在放电等离子体的微观涨落，如电子密度波动、原子碰撞导致的气体浓度分布不均匀和局部电场畸变等等，这会导致整个系统存在一定的统计随机性，即激光功率会随时间波动。同时，放电过程中产生的热量可能导致气体温度分布的微小变化，进而改变折射率分布（热致效应），这会影响激光腔模的匹配状态，导致功率波动。但是该热弛豫效应中存在温升梯度动态平衡，大致是一个弛豫平衡过程：放电焦耳热 → 腔体非均匀膨胀 → 谐振腔光程变化 → 模式失谐 → 功率调整 → 热传导重新平衡，所以也会表现为一定周期内的低频的功率起伏。