

He-Ne 气体激光器放电条件

西瓜^{*}, 冉老师[†]

北京大学 物理学院, 北京 100871

【摘要】 本实验研究了 He-Ne 气体激光器在不同气体配比与总压强条件下的放电特性。通过测量激光输出功率随工作电流变化的关系, 发现功率随电流先增大后减小, 且峰值对应的电流随总压强增加而减小。同时, 氦氖配比对输出功率存在明显影响, 氖比例较高时功率较大。实验结果与粒子数反转及能量转移理论相一致, 为理解 He-Ne 激光器的工作条件及动力学机制提供了实验依据。

【关键词】 He-Ne 激光, 真空环境, 配气

Discharge conditions of He-Ne gas laser

Xisense, Prof. Ran

Physics Institute, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: This experiment investigated the discharge characteristics of a He-Ne gas laser under different gas ratios and total pressures. By measuring the relationship between laser output power and operating current, it was found that the power initially increases and then decreases with increasing current, and the current corresponding to the peak value decreases with increasing total pressure. Furthermore, the helium-neon ratio significantly affects the output power, with higher neon ratios resulting in higher power. The experimental results are consistent with population inversion and energy transfer theories, providing experimental evidence for understanding the operating conditions and dynamic mechanisms of He-Ne lasers.

Key Words: He-Ne laser, vacuum environment, gas mixing

1 引言

激光 (Laser) 是基于受激辐射原理实现光放大的相干光源, 其理论基础可以追溯到 20 世纪中期。1958 年, Schawlow 和 Townes 在经典论文《Infrared and Optical Masers》中提出将微波波段的 maser 原理推广到光学频段, 从而提出了光学激光器 (laser) 的基本概念^[1]。这一理论工作奠定了激光器发展的基础。

1960 年, Maiman 在 Hughes 实验室成功实现了世界上第一台激光器——红宝石激光器, 该装置通过闪光灯光学泵浦实现受激辐射并产生脉冲激光输出^[2]。这一成果标志着激光技术的诞生。然而, 红宝石激光器属于脉冲激光器, 其输出并非连续光束, 因此科学界很快开始探索能够产生连续激光输出的体系。

1960 年末, Ali Javan, William R. Bennett Jr. 和 Donald R. Herriott 在 Bell 实验室成功研制出氦氖气体激光器 (He-Ne Laser), 这是历史上第一台能够稳定产生连续波 (continuous-wave, CW) 激光输出的激光器^[3]。在该装置中, 氦和氖按一定比例混合并置于低压放电管中, 通过电放电激发氦原子形成亚稳态, 随后通过原子碰撞将能量转移给氖原子, 从而实现氖原子能级间的粒子数反转并产生受激辐射。最初实现的激光波长位于近红外约 1.15 μm 附近, 随后很快实现了 632.8 nm 红光的可见激光输出, 这也是最常见的 He-Ne 激光工作波长。

*email: xisense_wyx@stu.pku.edu.cn
tel: (+86)15003246977 ID: 2200011302

由于 He-Ne 激光器具有结构简单、输出稳定、相干性好以及光束质量高等优点，它在激光技术的发展过程中发挥了重要作用，并被广泛应用于精密测量、全息成像、光学实验教学、条码扫描以及干涉测量等领域。此外，He-Ne 激光器作为典型的四能级气体激光器，其能级结构清晰、工作机理典型，因此在教学实验中常被用于研究气体激光器的工作机理和输出特性。

在 He-Ne 激光器的实际运行中，激光输出特性与多种物理参数密切相关，其中包括气体混合比例、气体总压强以及放电电流等因素。不同的 He:Ne 配气比例会影响能量转移效率，而气体压强则决定了原子碰撞频率和放电条件，从而影响粒子数反转的建立和激光增益特性。因此，通过系统研究激光输出功率与放电电流之间的关系，并比较不同配气比例与不同气体压强条件下的变化规律，可以进一步理解 He-Ne 气体激光器的发光条件以及其工作机制。

本实验通过测量不同工作条件下 He-Ne 激光器的输出光功率，并研究其随放电电流变化的关系，分析气体配比与压强对激光发射效率的影响，从而加深对气体激光器工作原理及其动力学过程的理解。

2 实验原理

2.1 激光产生的基本原理

激光 (Laser) 是基于受激辐射实现光放大的相干光源，其理论基础来源于爱因斯坦在量子辐射理论中提出的受激辐射机制^[4-6]。当频率为 ν 、辐射能量密度为 $\rho(\nu)$ 的准单色光通过原子介质时，原子在辐射场作用下可以发生受激吸收和受激辐射过程。

设单位体积中处于上能级和下能级的粒子数密度分别为 N_2 与 N_1 ，根据爱因斯坦系数理论，单位时间单位体积内的受激辐射速率为

$$R_{21} = N_2 B_{21} \rho(\nu) g(\nu) \quad (2.1)$$

而受激吸收速率为

$$R_{12} = N_1 B_{12} \rho(\nu) g(\nu) \quad (2.2)$$

其中 B_{21} 与 B_{12} 分别为受激辐射系数与受激吸收系数， $g(\nu)$ 为谱线型函数^[5]。

为了实现光的放大，需要受激辐射产生的光子数多于受激吸收消耗的光子数，即

$$N_2 B_{21} \rho(\nu) g(\nu) > N_1 B_{12} \rho(\nu) g(\nu) \quad (2.3)$$

根据爱因斯坦系数之间的关系

$$B_{12} = \frac{g_2}{g_1} B_{21} \quad (2.4)$$

可以得到实现光放大的条件为

$$N_2 > \frac{g_2}{g_1} N_1 \quad (2.5)$$

即

$$\frac{g_1 N_2}{g_2 N_1} > 1 \quad (2.6)$$

这一条件称为**粒子数反转条件**。在热平衡条件下，粒子数总是满足玻尔兹曼分布，因此低能级粒子数多于高能级粒子数，无法实现粒子数反转。因此激光器必须通过外部激励（如电放电或光泵浦）建立非平衡分布^[6]。

此外, 激光振荡还必须满足谐振腔的增益条件。设激活介质长度为 l , 光在介质中的增益系数为 G , 两端反射镜反射率分别为 r_1 与 r_2 , 则激光振荡条件为

$$r_1 r_2 e^{2Gl} \geq 1 \quad (2.7)$$

其中

$$G(\nu) = \frac{1}{I_\nu(z)} \frac{dI_\nu(z)}{dz} \quad (2.8)$$

为激活介质的光学增益系数。当介质增益能够补偿腔内损耗时, 谐振腔中便可以形成稳定的激光振荡^[7]。

2.2 He-Ne 激光器中激活介质的形成

氦氖激光器是一种典型的气体激光器, 其工作介质为氦与氖按一定比例混合的气体。在放电管中施加高压直流电场后, 自由电子在电场作用下被加速, 并与气体原子发生碰撞, 从而激发氦原子进入亚稳态能级。

氦原子的 2^1S_0 与 2^3S_1 为寿命较长的亚稳态能级, 其能量与氖原子的 $3s$ 能级 (Paschen 记号中的 $3S_2$ 等) 非常接近, 两者能量差仅约 0.048 eV 。由于这种能级匹配关系, 当激发态氦原子与基态氖原子发生碰撞时, 可以发生高效率的共振能量转移^[5-6]



通过这一过程, 大量氖原子被激发到 $3s$ 能级, 从而在氖原子的 $3s$ 与 $2p$ 能级之间形成粒子数反转。

在常见的 He-Ne 激光器中, 波长为 632.8 nm 的红光激光对应于氖原子的

$$3s_2 \rightarrow 2p_4 \quad (2.10)$$

跃迁。由于该跃迁的下能级寿命较短, 可以迅速通过辐射或碰撞跃迁到更低能级, 从而有利于维持粒子数反转并实现连续激光输出^[6]。

此外, 在 He-Ne 激光器中还存在所谓的**管壁效应**。氖原子低能级 (如 $1s$ 态) 上的粒子可以通过与放电管壁碰撞而回到基态, 从而减少下能级粒子数密度。如果下能级粒子数过多, 则会通过电子碰撞被激发至 $2p$ 能级, 从而削弱粒子数反转。因此通常采用细长的毛细放电管, 以增强原子与管壁的碰撞概率, 从而提高激光增益^[7]。

2.3 放电条件对激光输出功率的影响

He-Ne 激光器的输出功率与气体压强和放电电流等放电条件密切相关。

首先考虑气体压强的影响。在气体放电等离子体中, 电子的平均动能通常用电子温度 T_e 表示。电子温度主要取决于电子在一个平均自由程中从电场获得的能量。由于电子平均自由程与气体压强 p 成反比, 因此电子温度主要取决于 E/p 的大小, 其中 E 为电场强度^[5]。

当气体压强减小时, 电子自由程增大, 电子能够获得更高能量, 从而更容易激发氦原子进入亚稳态, 这有利于粒子数反转的形成。然而, 当压强过低时, 气体原子密度降低, 氦原子与氖原子之间的碰撞概率减少, 从而降低能量转移效率。因此激光输出功率随气体压强的变化通常表现为先增大后减小的趋势。

其次考虑放电电流的影响。放电电流决定了单位时间内电子与气体原子碰撞的频率。当放电电流较小时, 亚稳态氦原子的密度随着电流近似线性增加, 通过碰撞不断激发氖原子到上能级, 使粒子数反转逐渐增强, 因此激光输出功率随电流增大而增加。

当放电电流进一步增大时,亚稳态氦原子密度逐渐趋于饱和,同时电子与氦原子低能级碰撞激发到 $2p$ 能级的概率增加,使得激光下能级粒子数密度增加,从而削弱粒子数反转。因此激光输出功率随放电电流变化通常存在一个极大值,即在某一最佳电流条件下可以获得最大的激光输出功率^[6-7]。

3 实验装置

本实验所使用的实验装置如图1所示。实验系统主要由真空系统、配气系统、氦氖激光放电管、电源系统以及激光功率测量系统组成。

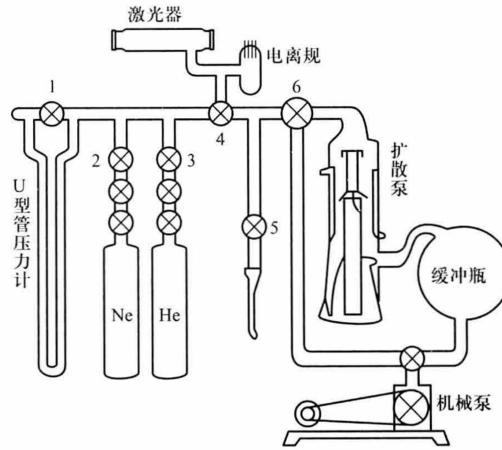


图1 氦氖激光实验装置示意图

整个实验过程主要包括抽真空、配气以及测量激光功率与放电电流关系等几个步骤。

首先进行抽真空操作。实验开始时先启动机械泵对系统进行粗抽,当系统压强降至约 0.1 Pa 以下时,再启动扩散泵进行进一步抽气。扩散泵能够将系统压强降低至 $(5 \sim 7) \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 的高真空状态,以保证系统内部残余气体对放电过程的影响尽可能小。

在完成抽真空后进行配气操作。为了获得所需的氦氖混合气体比例,需要首先测量系统中两部分体积之间的比例关系。设4号气阀左侧部分系统体积为 V_1 ,激光管部分体积为 V_2 。实验中可利用氦气作为测试气体,通过U型管压强计测量压强变化来确定体积比例。具体方法为:首先关闭4号气阀,仅向左侧系统充入一定压强的氦气,并测量U型管压强计的液面高度差;随后打开4号气阀,使左侧系统与激光管部分连通,再次测量压强计液面高度差。根据压强变化即可得到体积比例

$$\frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (3.1)$$

由该比例关系可以计算不同配气条件下各气体所需充入的压强,从而实现所需的氦氖混合气体比例。

完成配气后,通过调节放电电源以及限流电阻,使激光管处于稳定放电状态,并测量不同放电电流条件下的激光输出功率。本实验所使用的激光光源为JD-2型氦氖激光光源,电源限流电阻的调节范围为 $0 \sim 270 \text{ k}\Omega$,通过调节限流电阻可以改变激光管中的放电电流,从而研究放电电流对激光输出功率的影响。

3.1 激光器基本参数

实验所使用的是内腔式氦氖激光管,其主要结构为细长的毛细放电管以及两端的谐振腔反射镜。毛细管的直径约为 1.25 mm ,长度约为 23 cm 。较小的毛细管直径有助于提高放电电流密度,并增强管壁效应,从而有利于维持粒子数反转。

激光器两端分别安装有高反射镜和部分反射镜构成光学谐振腔。其中一端反射率约为 $97\% \sim 98\%$,作为输出镜;另一端反射率大于 99% ,作为高反射镜。由于谐振腔长度有限,腔内可能存在若干纵模振荡。在

本实验条件下,腔内通常存在约 2 ~ 3 个纵模参与激光振荡。

3.2 激光功率的测量

实验中激光输出功率的测量采用 FD-LPM-A 型激光功率计完成。在测量过程中发现功率计读数会随时间产生一定程度的波动,因此在实验中需要在放电电流稳定后再读取功率值。

具体操作为:在调节放电电流至所需值后,等待约 2s 使系统达到稳定状态,然后读取功率计显示的激光功率数值。通过改变限流电阻调节放电电流,并记录不同电流条件下对应的激光输出功率,从而获得激光功率与放电电流之间的关系曲线。

4 实验数据以讨论

4.1 配气过程

首先测量上述的 V_1 与 V_2 之比。测量可得

$$V_1 : l_1 = 21.40\text{cm} \quad l_2 = 35.85\text{cm} \quad \Delta l^{(1)} = 14.45\text{cm} \quad (4.1)$$

$$V_1 + V_2 : l_1 = 26.50\text{cm} \quad l_2 = 30.62\text{cm} \quad \Delta l^{(2)} = 4.12\text{cm} \quad (4.2)$$

于是根据理想气体状态方程可得

$$\frac{V_1}{V_1 + V_2} = \frac{412}{1445} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = 0.399 \quad (4.3)$$

在实验操作中,氦气充气时连通激光器。重启后关闭 4 号气阀,并将左侧的系统抽真空后在 4 号气阀关闭的条件下充氖气。计算需要配气的压强

$$p_{He} = p_0 \times \frac{7}{7+1} \frac{V_1 + V_2}{V_2} \approx 1038.14\text{Pa} \Rightarrow l_{He} = \frac{p_{He}}{\rho g} \approx 9.72\text{cm} \quad (4.4)$$

$$p_{Ne} = p_0 \times \frac{1}{7+1} \frac{V_1 + V_2}{V_1} \approx 381.36\text{Pa} \Rightarrow l_{Ne} = \frac{p_{Ne}}{\rho g} \approx 3.57\text{cm} \quad (4.5)$$

在实验中配气很难严格达到我们的理论要求值,实际上充的气体压强为

$$\Delta l_{He}^{exp} = 10.11\text{cm} \quad \Delta l_{Ne}^{exp} = 3.86\text{cm} \quad (4.6)$$

实际配气比为 6.74:1。同理可以计算在配气比为 5:1 的条件中, $l_{He} = 6.94\text{cm}$, $l_{Ne} = 3.57\text{cm}$ 。而实验中的值为 7.93cm 和 3.57cm。实际配气比为 5.71:1。

4.2 氦氖激光器的工作电流与激光功率的关系

实验测量了不同放电电流条件下氦氖激光器的输出功率,并在不同气体压强和不同氦氖配气比例条件下重复测量。实验数据如图所示。为了更清晰地展示功率随电流变化的趋势,对离散数据点进行了线性样条插值,从而得到平滑的功率—电流 (P-I) 曲线。首先给出实验数据如表1所示。

表 1 不同配气比与总压强下工作电流与激光功率对应关系汇总

配气比	总压强 (Pa)	工作电流 I / mA												
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6.74:1	651	2.86	2.73	2.40	1.96	1.52	1.12	0.67	0.32	0.13	—	—	—	—
6.74:1	470	3.16	3.43	3.52	3.40	3.12	2.77	2.54	2.28	1.86	1.72	1.34	1.22	—
6.74:1	350	—	—	2.71	2.99	3.04	3.02	2.94	2.81	2.83	2.64	2.51	2.40	2.18
6.74:1	286	—	—	—	2.04	2.20	2.26	2.23	2.30	2.22	2.16	2.18	2.10	2.03
6.74:1	203	—	—	—	—	0.18	0.31	0.35	0.44	0.48	0.52	0.57	0.51	0.46
5.71:1	502	3.00	3.19	2.82	2.47	2.13	1.44	0.81	0.29	0.03	—	—	—	—
5.71:1	353	—	—	4.36	4.55	4.46	4.26	3.95	3.86	3.77	3.21	2.84	2.38	—
5.71:1	251	—	—	—	—	3.46	3.81	3.83	3.76	3.91	3.72	3.68	3.56	3.50

将上述数据整理并绘图，如图2所示。

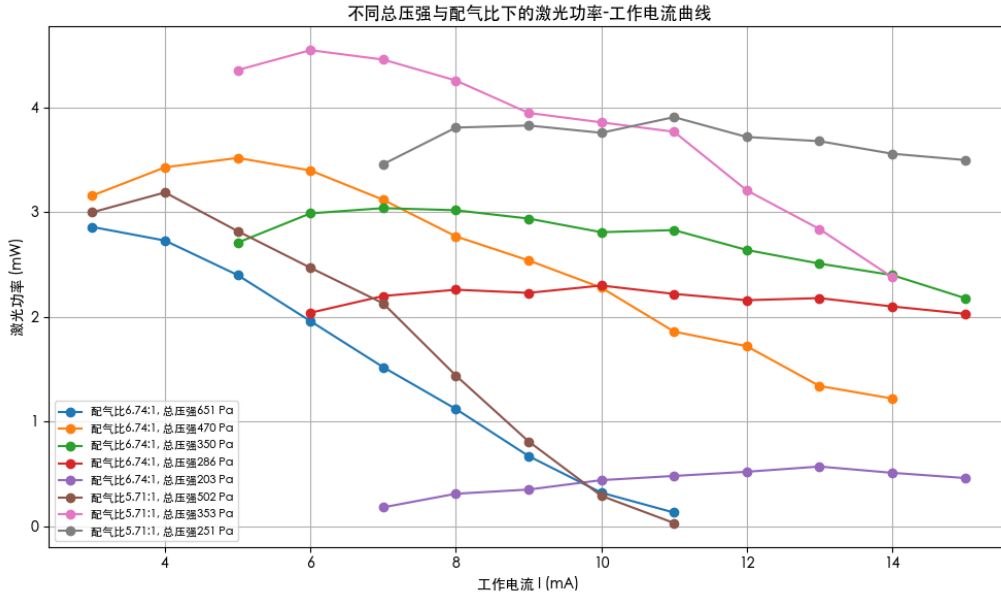


图2 氦氖激光器的工作电流与激光功率的关系

从图中可以看出，在相同的配气比和总压强条件下，激光功率随工作电流的变化呈现出“先升后降”的趋势。这一现象可以从激光器的能级动力学和激励机制理解：当工作电流较低时，电子通过放电激励氖原子跃迁，激光腔内的粒子数反转逐渐建立，受激辐射增强，使得输出功率随电流上升而增加。当工作电流继续增大时，气体温度升高、电子碰撞频率增加以及离子化率增大，会导致粒子反转受抑制、激光阈值升高，同时激光腔内出现功率饱和现象，从而使输出功率开始下降，这也是气体激光器常见的“饱和峰值”行为。

进一步观察不同压强下的曲线，可以发现峰值功率对应的工作电流随着总压强的增加而减小。这是由于总压强升高时，气体分子密度增加，单位体积内激发碰撞概率增大，使得较低的电流就能建立足够的粒子数反转，从而达到功率峰值。而高压条件下，过高的电子-原子碰撞也容易增加非辐射弛豫通道，导致功率随电流快速下降，使功率曲线呈现更明显的先升后降特征。

对于配气比的影响，可以看到在相同总压强下，氦氖配气比越低（即氖比例越高），激光功率越大。这是因为实际发光的是氖原子，而氦的作用主要是通过碰撞转移能量激发氖原子跃迁。因此，当氖比例较高时，有更多的激发氖原子参与受激辐射，输出功率自然较大；而氦比例增加时，虽然有利于激发效率，但总体参与受激辐射的氖原子减少，导致功率降低。这也符合 He-Ne 激光器的能级和碰撞激发理论。

综上所述，图中呈现的实验规律不仅体现了气体激光器的基本工作特性，也与理论预期高度一致：激光功率随电流先升后降、峰值电流随压强变化以及配气比对功率的影响，都可以通过粒子反转、碰撞激发以及非辐射弛豫的物理机制得到合理解释。同时，总压强越大时功率曲线的振荡更明显，说明在高压下非线性效应和能量耗散机制对输出功率影响更突出。

5 实验结论

实验结果表明，在相同配气比与总压强下，He-Ne 激光器的输出功率随工作电流呈现“先升后降”的趋势，存在最佳电流点获得峰值功率；峰值功率对应电流随总压强增加而减小。此外，配气比对激光输出具有明显影响，氖比例较高时激光功率较大。这些规律与粒子数反转、碰撞激发及非辐射弛豫机制一致，验证了 He-Ne 激光器的基本工作原理和放电力学特性。

致谢

感谢冉广照老师的悉心指导；
感谢黄艺翔同学对于本实验的帮助。

参考文献

- [1] SCHAWLOW A L, TOWNES C H. Infrared and optical masers[J/OL]. Physical Review, 1958, 112(6): 1940-1949. DOI: 10.1103/PhysRev.112.1940.
- [2] MAIMAN T H. Stimulated optical radiation in ruby[J/OL]. Nature, 1960, 187: 493-494. DOI: 10.1038/187493a0.
- [3] JAVAN A, BENNETT W R, HERRIOTT D R. Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a he-ne mixture[J/OL]. Physical Review Letters, 1961, 6(3): 106-110. DOI: 10.1103/PhysRevLett.6.106.
- [4] EINSTEIN A. Zur quantentheorie der strahlung[J]. Physikalische Zeitschrift, 1917, 18: 121-128.
- [5] SIEGMAN A E. Lasers[M]. University Science Books, 1986.
- [6] SILFVAST W T. Laser fundamentals[M]. 2nd ed. Cambridge University Press, 2004.
- [7] SVELTO O. Principles of lasers[M]. 5th ed. Springer, 2010.

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？

首先结合数据，我们分析出相同配气比下，不同总压强的峰值功率位置对于总压强的依赖图，如图3所示。

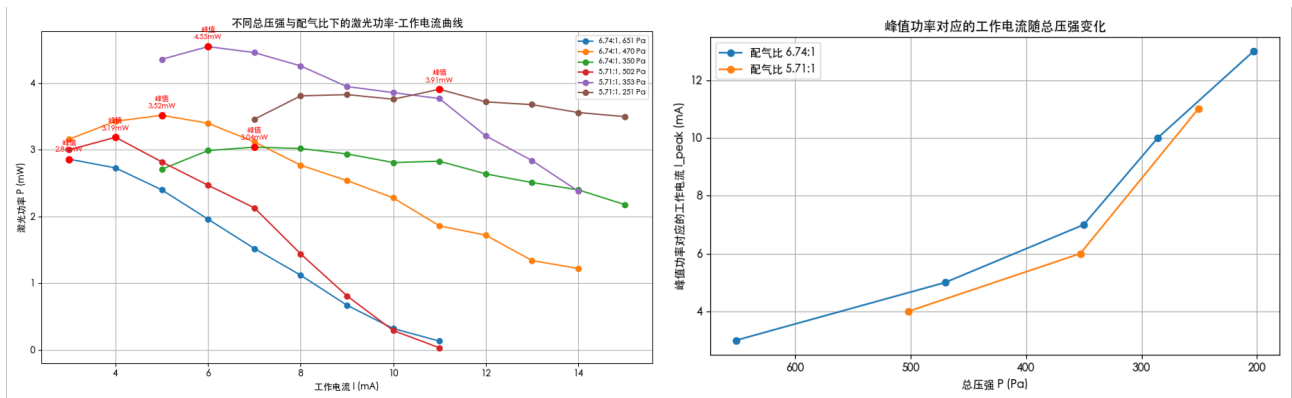


图 3 左图为 6.74:1 配气比下的峰值功率位置；右图直接绘制出了峰值功率位置对于总压强的依赖

从实验数据和图中可以看出，峰值功率对应的工作电流随着总压强的下降而逐渐上升。这一现象可以从氖原子上能级 $3S_2$ 的粒子数反转和饱和机制来理解。在较高压强下，气体分子密度大，单位体积内的 Ne 原子数量更多，电子碰撞激发效率较高，因此即使较低的电流也能使 $3S_2$ 粒子数接近饱和，达到功率峰值。而当总压强降低时，气体变得稀薄，单位体积内可激发的 Ne 原子数量减少，电子-原子碰撞概率下降，上能级激发效率降低，为了累积足够的粒子数反转以达到峰值功率，需要施加更高的工作电流。换句话说，低压条件下，系统需要更多的电流来建立足够的粒子反转，因此峰值功率对应的电流位置向右移动。这种规律与激光器能级动力学和饱和发射理论高度一致，也反映出总压强对激光输出特性的直接影响。

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？

即使在 He、Ne 气体压强和放电电流保持恒定的条件下，激光器输出功率仍可能出现小幅起伏。这种现象主要源自气体放电的不稳定性和激光腔内光场的自发波动。首先，气体放电是一种弱湍流放电，电子碰撞激发氖原子跃迁的概率 R_{exc} 受瞬时电子密度 $n_e(t)$ 和电子能量分布 $f(E, t)$ 的波动影响，可写为

$$R_{exc}(t) = \int_0^{\infty} \sigma_{exc}(E) v(E) f(E, t) dE \quad (5.1)$$

其中 $\sigma_{\text{exc}}(E)$ 为激发截面, $v(E)$ 为电子速率。即使平均电流恒定, 电子密度和能量分布的微小波动也会导致上能级 $3S_2$ 的粒子数 $N_2(t)$ 随时间轻微变化, 从而引起受激辐射功率 $P(t) \propto N_2(t) - N_1$ 的小幅起伏。

其次, 激光腔内的光反馈和干涉效应也可能引起输出功率的抖动。由于腔镜反射率和腔长度存在微小漂移, 腔模强度 $I_m(t)$ 会随腔内相位 $\phi(t)$ 波动而变化, 典型关系可近似为

$$I_m(t) \approx I_0 \frac{1}{1 + F \sin^2(\phi(t)/2)} \quad (5.2)$$

其中 F 为法布里-珀罗系数。这些腔模波动与粒子数反转的微扰叠加, 就导致在固定外部条件下仍观测到激光输出功率的微小起伏。总之, 这种波动是 He-Ne 激光器的固有噪声现象, 与气体放电统计波动和光腔模式耦合密切相关。

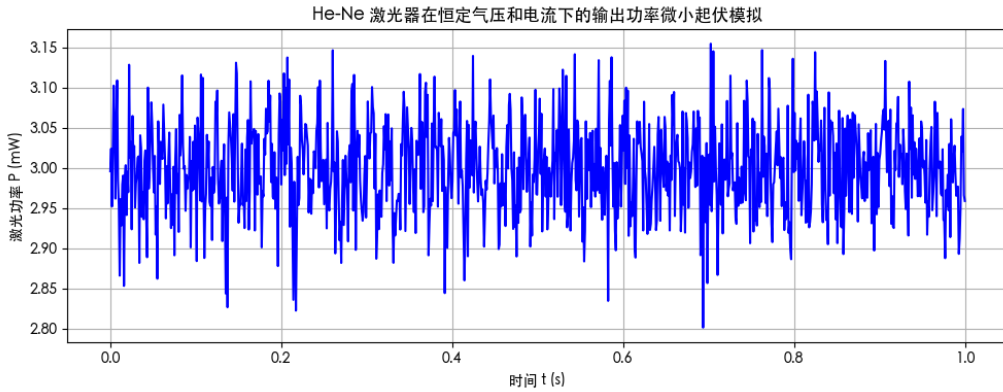


图 4 基于上述理论解释给出的 python 仿真结果

基于上述理论, 我们可以通过 python 代码仿真这样的干扰, 我设置对于 3mW 平均功率的扰动, 可以看出这样的扰动对于测量结果的影响最多只有 $\pm 0.2\text{mW}$ 。在实际测量中过, 气体状态基本稳定后, 示数跳动幅度和这样的计算结果是接近的。

附录 B: 上课提出的思考题

上课时, 老师提出了一个问题, 在固定总压强和配气比的情况下, 改变电流强度, 输出的光功率大小将会出现先增加后减小的现象, 但是直接肉眼观察氦氖激光管却是始终变亮的, 并不会出现后减小这样的过程, 请给出解释。

在 He-Ne 激光器中, 激光输出功率与谐振腔内光场和增益介质的粒子数密切相关。腔内光强 I_{cav} 与上能级 Ne 原子粒子数 N_2 通过受激辐射耦合, 其动力学可用以下方程近似描述:

$$\frac{dN_2}{dt} = R_{\text{exc}} - \frac{N_2 - N_1}{\tau_{\text{stim}}} I_{\text{cav}} - R_{\text{nr}}, \quad \frac{dI_{\text{cav}}}{dt} = \frac{N_2 - N_1}{\tau_{\text{stim}}} I_{\text{cav}} - \frac{I_{\text{cav}}}{\tau_{\text{cav}}} \quad (5.3)$$

其中 R_{exc} 为电流激发率, R_{nr} 为非辐射损耗, τ_{stim} 表示受激辐射时间尺度, τ_{cav} 为腔内光衰减时间。随着放电电流增加, R_{exc} 增大, 使上能级粒子数 N_2 提升, 腔内光强 I_{cav} 也随之增加, 因此肉眼观察管体时会感到亮度增强。然而, 当 I_{cav} 足够大时, 受激辐射耗尽的粒子数达到上限, 即增益介质出现饱和:

$$\frac{N_2 - N_1}{\tau_{\text{stim}}} I_{\text{cav}} \approx R_{\text{exc}} - R_{\text{nr}} \quad (5.4)$$

此时, 即使继续增加电流, 额外激发的粒子无法进一步提升腔内受激辐射速率, 导致从输出耦合镜打出的功率 $P_{\text{out}} \propto I_{\text{cav}}$ 停滞或下降。而管内光场仍在增加, 反映为管体持续变亮, 这就是实验测量的输出功率与视觉观察亮度之间出现差异的根本原因。简言之, 输出功率受限于增益介质饱和与腔内光场的能量耦合效率, 而管内光强反映的是累积能量, 因此仍会随电流增强而增加。

附录 C：数据分析中使用的 python 代码

1. 图2整理实验数据的代码：

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 from matplotlib import rcParams
4 rcParams['font.sans-serif'] = ['Heiti TC']
5 rcParams['axes.unicode_minus'] = False
6 data = {
7     '配气比 6.74:1, 总压强 651 Pa':
8     [2.86, 2.73, 2.40, 1.96, 1.52, 1.12, 0.67,
9     0.32, 0.13, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan],
10    '配气比 6.74:1, 总压强 470 Pa':
11    [3.16, 3.43, 3.52, 3.40, 3.12, 2.77, 2.54,
12    2.28, 1.86, 1.72, 1.34, 1.22, np.nan],
13    '配气比 6.74:1, 总压强 350 Pa':
14    [np.nan, np.nan, 2.71, 2.99, 3.04, 3.02,
15    2.94, 2.81, 2.83, 2.64, 2.51, 2.40, 2.18],
16    '配气比 6.74:1, 总压强 286 Pa':
17    [np.nan, np.nan, np.nan, 2.04, 2.20, 2.26,
18    2.23, 2.30, 2.22, 2.16, 2.18, 2.10, 2.03],
19    '配气比 6.74:1, 总压强 203 Pa':
20    [np.nan, np.nan, np.nan, np.nan, 0.18, 0.31,
21    0.35, 0.44, 0.48, 0.52, 0.57, 0.51, 0.46],
22    '配气比 5.71:1, 总压强 502 Pa':
23    [3.00, 3.19, 2.82, 2.47, 2.13, 1.44, 0.81,
24    0.29, 0.03, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan],
25    '配气比 5.71:1, 总压强 353 Pa':
26    [np.nan, np.nan, 4.36, 4.55, 4.46, 4.26,
27    3.95, 3.86, 3.77, 3.21, 2.84, 2.38, np.nan],
28    '配气比 5.71:1, 总压强 251 Pa':
29    [np.nan, np.nan, np.nan, np.nan, 3.46, 3.81,
30    3.83, 3.76, 3.91, 3.72, 3.68, 3.56, 3.50],
31 }
32 currents = np.arange(3, 16)
33 plt.figure(figsize=(10,6))
34 for label, powers in data.items():
35     powers = np.array(powers)
36     mask = ~np.isnan(powers)
37     plt.plot(currents[mask], powers[mask], marker='o', label=label)
38 plt.xlabel('工作电流  $I$  (mA)')
39 plt.ylabel('激光功率 (mW)')
40 plt.title('不同总压强与配气比下的激光功率-工作电流曲线')

```

```
41 plt.grid(True)
42 plt.legend(fontsize=8)
43 plt.tight_layout()
44 plt.show()
```

2. 仿真功率涨落的 python 代码

```
1 t = np.linspace(0, 1, 1000)
2 P0 = 3.0
3 sigma_exc = 0.05
4 sigma_cavity = 0.03
5 freq_cavity = 50
6 noise_exc = np.random.normal(0, sigma_exc, size=t.shape)
7 cavity_mod = sigma_cavity * np.sin(2 * np.pi * freq_cavity * t) + \
8             np.random.normal(0, sigma_cavity/2, size=t.shape)
9 P = P0 + noise_exc + cavity_mod
10 plt.figure(figsize=(10,4))
11 plt.plot(t, P, color='blue')
12 plt.xlabel('时间  $t$  (s)')
13 plt.ylabel('激光功率  $P$  (mW)')
14 plt.title('He-Ne 激光器在恒定气压和电流下的输出功率微小起伏模拟')
15 plt.grid(True)
16 plt.tight_layout()
17 plt.show()
```

图3使用的代码不再展示，可以访问我的 github 主页来找到这些代码。<https://github.com/xisenal>