

He-Ne 气体激光器放电条件的研究

滕一鸣*

北京大学物理学院 学号: 2000011380

(实验日期: 2023 年 2 月 23 日)

本实验通过配置 7.3 : 1 的 He-Ne 混合气体实现了气体放电并产生了激光。同时在此基础上测定了不同总气压下 He-Ne 激光器输出功率与工作电流的关系以及总气压 256 Pa 下毛细管光强与放电电流的关系, 确定了最佳工作电流与最佳工作压强的存在性, 探索了最优放电条件及其背后的原理, 为日后设置 He-Ne 激光设备提供了参考。

关键词: 激光, He-Ne 激光器, He-Ne 配气比, 最佳工作电流

I. 引言

Albert Einstein 在 1917 年提出的在唯象上描述原子对电磁辐射进行吸收、自发辐射与受激辐射的 A-B 系数模型不仅是人们将“场”作为物质本体进行量子化的首次尝试, 它还奠定了激光的理论基础。在 1928 年 Rudolf W. Ladenburgh 证实了受激辐射的存在性后, 理论家便在这一领域展开了各种探索, 其中最引人瞩目的是 1939 年 Valentin A. Fabrikant 预言如果能使原子或分子的数目分布能相对热平衡分布出现反转(布居数反转), 那么受激辐射便可能实现对辐射的放大。1950 年 Alfred Kastler 提出的光泵浦方法则提供了实现布居数反转的方法。至此, 激光的理论已几乎被完全建立。

1951 年, Joseph Weber 提出受激辐射可以用于制造微波放大器; 翌年, Charles H. Townes 等人实现了 Weber 的想法(脉泽)。1957 年, Townes 与 Arthur Leonard Schawlow 开始在 Bell 实验室研究如何实现对红外至可见光波段的辐射的受激放大。后来经过一众科学家的探索, 1960 年五月, Theodore H. Maiman 率先制造出了当今意义上的激光器, 不过这台红宝石激光器只能实现脉冲输出。同年十二月, Bell 实验室的 Ali Javan 等人使用 He-Ne 混合气体制造出了第一台能够实现连续输出的激光器。但是这台激光器工作在 1150 nm 的红外波段。1962 年, Bell 实验室才制造出了本实验使用的输出 623.8 nm 可见光的 He-Ne 激光器的原型。

激光良好的单色性、相干性、准直性以及极高的亮度和能量密度使得它已经成为了现代科学、工业以及我们的日常生活不可或缺的一部分并且势必会在未来发挥愈加重要的作用。He-Ne 激光器作为人类制造的第一种能够连续工作在可见光波段的激光器, 其在人类研究与应用激光的历史上必然具有突出的地位; 同时由于其组成和原理相对简单, 因而我们对其原理和性质的探究不仅具有抽象的“历史意义”, 它还能让我们对激光的物理机制拥有更深入且具体的认识。同时在实际生产生活中, 令 He-Ne 激光器工作在最佳输出条件对提高生产效率和能量利用率而言亦至关重要。

本实验需配置一定比例的 He-Ne 混合气体, 实现气体放电并产生激光以验证激光

* tengyiming@stu.pku.edu.cn; (86)13287560665

产生的基本原理；我们需要在此基础上探究在 He-Ne 气体比例不变时不同总压强下激光管输出功率与工作电流的关系，寻找最优放电条件并提出可能的机理。

II. 理论原理

我们考虑原子中的两个能级，记较低的能量为 E_1 、较高的能量为 E_2 。我们根据 A-B 系数理论可以导出同外界电磁场耦合时两能级上的净粒子数变化率：

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -\frac{\partial N_1}{\partial t} = -B_{21}\rho(\nu)(N_2 - N_1) = B_{21}\rho(\nu)\Delta N \quad (1)$$

其中 B_{21} 是一个常数， $\rho(\nu)$ 是辐射场在频率 ν 的能量密度。因此，如果出现了布居数反转 $N_2 > N_1$ ，那么我们的系统将会向电磁场释放一定的净能量。因此，如果一束频率合适的光穿过了介质，那么这束光中的光子要么会被低能态原子吸收使之跃迁至高能态，要么会激发高能态原子使之释放同频率同相位且同方向的光子；如果这个介质存在布居数反转，那么被吸收的光子数目将少于受激辐射出的光子数并使得辐射得到了放大。

在 He-Ne 激光器中，电子同 He 原子的非弹性碰撞会将基态 He 原子激发到 2^3S_1 或 2^3S_0 这两个长寿命亚稳态。由于这两个亚稳态能量分别与 Ne 的 $4S_2$ 和 $5S_2$ 两能级能量相当接近，因而亚稳态 He 原子和基态 Ne 原子间的碰撞会导致能量高效且有选择性地从 He 原子传递到 Ne 原子。这会导致处于 $4S_2$ 和 $5S_2$ 的 Ne 原子数目增加，最终导致处于这两个态的 Ne 原子数大于处于 $3P_4$ 的 Ne 原子数并带来布居数反转。根据图 1 可以看出，此时系统向 $3P_4$ 能级的跃迁可以增强波长在 $1.15\mu\text{m}$ 与 632.8nm 附近的光。由于 $3P_4$ 向 $3S$ 的跃迁相当迅速，从而 $3P_4$ 会被迅速抽空；而 $3S$ 态的 Ne 原子则会通过与毛细管壁的碰撞通过“管壁效应”释放能量回到基态。我们通过在激光管两侧设置反射镜实现了类似 Fabry-Pérot 干涉仪的结构并选择出了拥有特定空间模式与特定波长（对于实验设置的情况即为 632.8nm ）光线，提高了输出光线的单色性、光强与相干性。

III. 实验装置

图 2 展示了实验使用的系统的实拍图，同时图 3 给出了实验参考书 [2] 中绘制的实验真空系统示意图。我们必须指明，实际实验装置与图示存在如下出入之处：

- 排期阀 5 应位于机械泵上方阀门与扩散泵缓冲瓶之间。
- 阀门 4 与阀门 6 间存在一段形似杜瓦瓶的区域。

尽管如此，我们仍将沿用图 3 中对各个阀门的编号。

我们使用的其它仪器设备有：

- DL-5 型程控真空计
- FD-LPM-A 型激光功率计

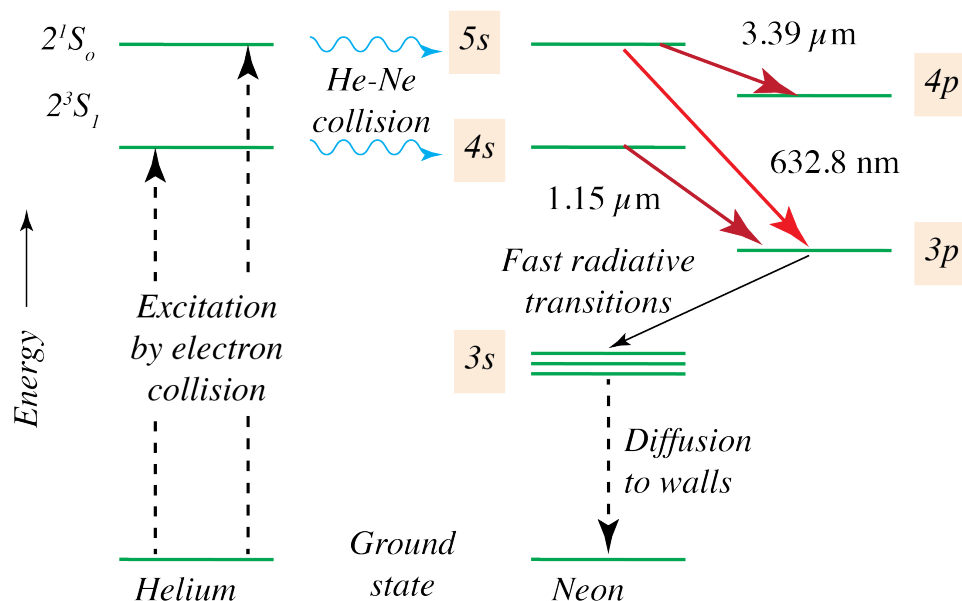


图 1. He-Ne 激光产生过程的能级图，图片引用自 [1].

- JD-2 型 He-Ne 激光电源
- 十只额定功率 5 W 的 27 k Ω 电阻串联而成的电阻箱

实验使用的 He-Ne 激光管如 图 4 所示。根据指导书 [2]，其中反射镜 R_2 的反射率为 97% ~ 98%， R_1 的反射率高于 99%；图中激光管内的毛细管直径为 1.25 mm，谐振腔长约为 23 cm。



图 2. 实验系统实拍图，图片来自北京大学基础物理实验教学中心网站.

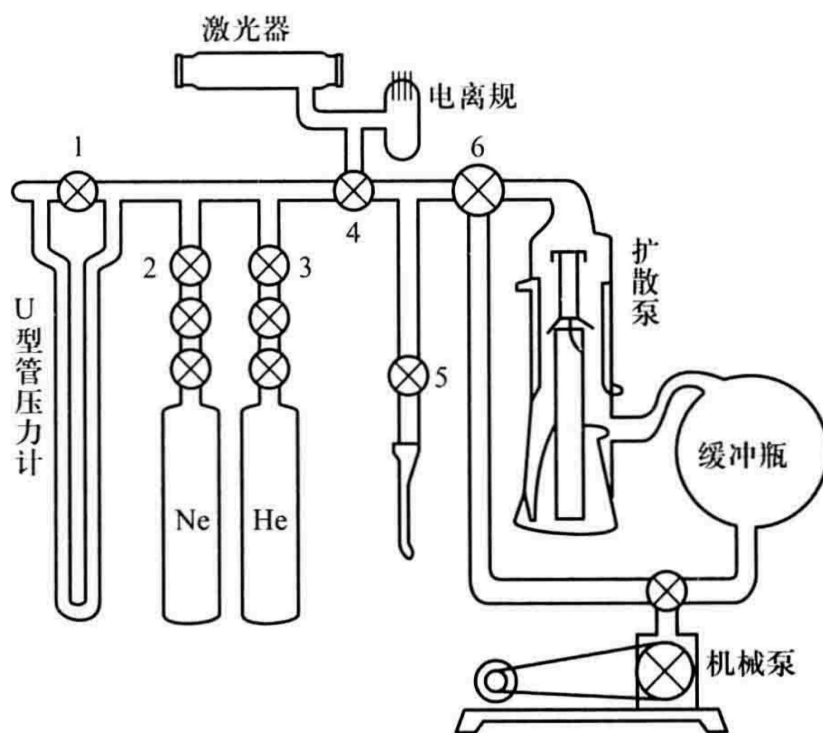


图 3. 实验真空系统示意图，图片引用自实验参考书 [2].

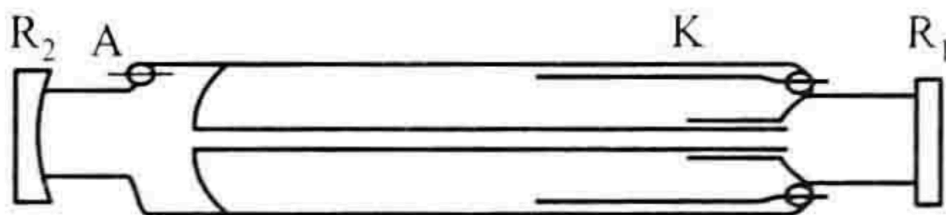


图 4. 实验使用的 He-Ne 激光管结构示意图，图片引用自实验参考书 [2].

IV. 结果及讨论

A. 抽真空

为了避免向 He-Ne 混合气体引入其它气体杂质，我们需要先将系统抽至较高的真空。首先，我们调节各个阀门使得除气瓶以外的各个玻璃腔体内部互相连通，然后使用机械泵抽气，运行约五分钟后打开 DL-5 型程控真空机以监视气压。待机械泵将系统抽至 $6.4 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 后，调节阀门 6 以仅使用扩散泵抽取 U 形管与真空规部分。

由于管壁以及各个阀门处的润滑油会吸附一些气体，因此在使用扩散泵抽取的过程中会出现压强久久不降低的情况，此时我们需要加热管道以促进这些气体的释放。同时在抽真空过程中多次出现了真空计显示的气压突然升高约 10^{-3} Pa 的情况，我们推测这可能是因为阀门处的润滑油包含了一些微小气泡，其中气体的瞬间释放会造成这种气压的突变。最终我们使用扩散泵将气压抽至 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 。

B. 配置 He-Ne 混合气体

对于 He-Ne 激光器放电条件的设定，我们参考了实验参考书 [2] 给出的建议：最佳充气压强在 300 Pa 左右，He-Ne 分压比为 7 : 1 ~ 5 : 1。由于此时气压已经远远超过了真空计的量程，因此我们在使用扩散泵达到所需真空度后应该旋转阀门 1 而断开 U 形管左右两侧的连接，进而其左侧在后续操作中可以被视为真空并且右侧气压可以由左右两侧液面高度差 Δh 、油液密度 $\rho = 1.09 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 以及重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 算出： $p = \rho g \Delta h$ 。

1. 测量 $V_1 : V_2$

我们在进行具体配气前需要先测出接有标识纯度 99.999% He、Ne 气瓶部分的体积 V_1 与接有激光器部分的体积 V_2 的比值，具体步骤如下：

1. 考虑到实验使用的 He 气较多，我们选用它来测量 $V_1 : V_2$ 。首先，转动阀门 4 使之切断 V_1 与 V_2 间的联系，接着通过逐次打开阀门 2 为 V_1 中注入 He。待液柱稳定后测得 U 形管左右两侧液面高度及其差异为：

$$h_L^0 = 33.50 \text{ cm}, \quad h_R^0 = 24.00 \text{ cm}, \quad \Delta h_0 = 9.50 \text{ cm}$$

计算可得此时气压为 $p_0 = 1014.79 \text{ Pa}$ 。

2. 转动 4 使得 V_1 中的 He 膨胀到 $V_1 + V_2$ 中，此时测得 U 形管液面稳定时的高度差为

$$h_L^1 = 30.10 \text{ cm}, \quad h_R^1 = 27.50 \text{ cm}, \quad \Delta h_1 = 2.60 \text{ cm}$$

进而此时气压为 $p_1 = 277.732 \text{ Pa}$

3. 由于 U 形管液面稳定所需的时间大约在 10 s 的量级，因此我们可以认为此时它与恒温的外界已经达到了热平衡。He（以及 Ne）作为单原子惰性气体也可以被相当好地近似为理想气体，因此我们根据理想气体状态方程

$$pV = nRT \tag{2}$$

可得 $p_0 V_1 = p_1 (V_1 + V_2) \Rightarrow V_1 : V_2 \approx 1 : 2.65$

2. 配置 He 气

鉴于我们需要在 200 Pa ~ 500 Pa 间选取至少五个总气压值进行实验，因此我们将初始配气的目标设定为 $p_{\text{He}} = 420 \text{ Pa}$ 、 $p_{\text{Ne}} = 60 \text{ Pa}$ 。显然，我们在测量完 $V_1 : V_2$ 后的 He 气气压仍然偏低。

为此，我们保持 V_1 与 V_2 连通而打开了阀门组 2 最上方的阀门，待 U 形管两侧液面稳定后测量得到

$$h_L = 30.85 \text{ cm}, \quad h_R = 26.85 \text{ cm}, \quad \Delta h = 4.00 \text{ cm}$$

进而 $p = 427.28 \text{ Pa}$ 。不过此时 He 气气压仍然偏低，因为我们在配 Ne 气时需要将 V_1 中的 He 气抽空，最终在 $V_1 + V_2$ 内获得 He-Ne 混合气体。既然我们希望最终 $p_{\text{He}} \sim 420 \text{ Pa}$ ，那么此时 He 气压强 p 便应该为 $p = p_{\text{He}} \left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) = 578.26 \text{ Pa}$ 。进而此时 U 形管左右两侧液面高度应该相差 $\Delta h = \frac{p}{\rho g} \approx 5.41 \text{ cm}$ 通过多次调节阀门组 2，我们最终实现的 U 形管读数为

$$h_L = 31.60 \text{ cm}, \quad h_R = 26.10 \text{ cm}, \quad \Delta h = 5.50 \text{ cm}$$

即此时 $V_1 + V_2$ 内的 He 气压强为 $p = 587.51 \text{ Pa}$ 。计算可得最终实验使用的 He-Ne 混合气里的 He 气压强为

$$p_{\text{He}} = \frac{V_2}{V_1 + V_2} p = 426.72 \text{ Pa}$$

在 $V_1 + V_2$ 中配置好 He 气后应当旋转阀门 4 切断 V_2 与其他部分的联系并用扩散泵抽除 V_1 内的 He，为下面配置 Ne 气做准备。

3. 配置 Ne 气

根据前述计算得到的 He 气分压，我们发现如果需要 7 : 1 的 He-Ne 配气比，那么在由 V_1 膨胀到 $V_1 + V_2$ 后 Ne 气气压应该为 $p_{\text{Ne}}^{\text{theory}} = \frac{1}{7} p_{\text{He}} = 60.96 \text{ Pa}$ 因此我们期待在未膨胀前 Ne 气气压为 $p_{0\text{Ne}}^{\text{theory}} = \frac{V_1 + V_2}{V_1} p_{\text{Ne}}^{\text{theory}} = 222.74 \text{ Pa}$ ，折合成 U 形管液面高度差也就是 $\Delta h^{\text{theory}} = 2.08 \text{ cm}$

由于此时 Ne 气所需分压较低，我们可以利用阀门组 3 进行多次膨胀，同时利用阀门 4 和阀门 6 见的区域进行膨胀以较为精细地调节气压。最终我们测得

$$h_L = 29.80 \text{ cm}, \quad h_R = 27.80 \text{ cm}, \quad \Delta h = 2.00 \text{ cm}$$

进而实测未膨胀前的 Ne 气气压为 $p = 213.64 \text{ Pa}$ 计算可得膨胀后的 Ne 气分压应该为 $p_{\text{Ne}} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} p = 58.47 \text{ Pa}$ 于是实验中 He-Ne 配气比实际为

$$p_{\text{He}} : p_{\text{Ne}} \approx 7.3 : 1$$

同时使用 U 形管可以测量得到此时 $V_1 + V_2$ 内的 He-Ne 混合气体总气压为

$$p_{\text{总}}^0 = 491.37 \text{ Pa}$$

至此我们便以合适的比例配置好了适当压强的 He-Ne 混合气体，接下来便可以使用激光功率计测定总气压与放电电流对激光输出功率的影响。

C. 测定放电条件对激光输出功率的影响

增大激光管电源的输出电压，实验发现在大约 8 kV 时激光管会被突然点亮。打开激光功率计电源后先在无激光照射的情况下调零，随后调整激光功率计探头位置使之实数尽量达到最大，此时激光功率计探头便正对激光束，其读数便是比较可靠的光功率值。实验观察到此时激光输出功率存在一定的起伏与中心值的漂移，如 图 5 所示，我

们将在附录中分析这一现象。这一波动现象促使我们选择如下读取激光功率的策略：设置好放电电流后注意其输出功率的第一个最大值和最小值，我们将输出功率取作了这两个值的均值。

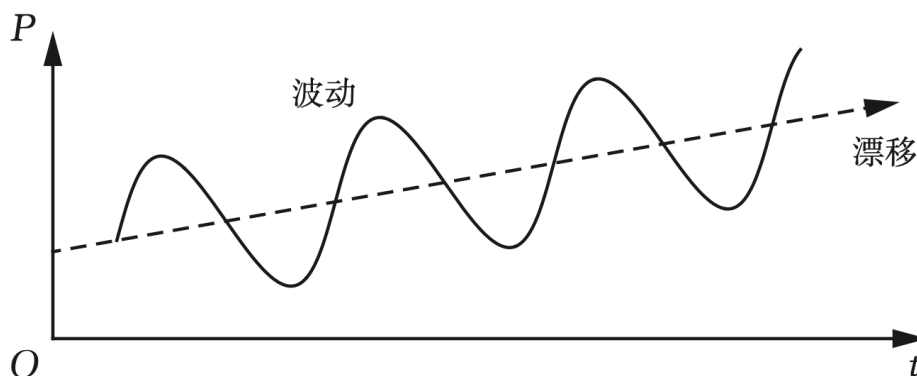


图 5. 放电条件一定时激光管输出功率随时间的变化示意图

我们下面应该逐步减小总压强并测量不同压强下激光管输出功率与放电电流的关系。我们可以利用 V_2 与阀门 4、6 间的空间进行多次膨胀以实现总气压的降低。最终测得的不同总气压下激光管输出功率 P 与放电电流 I 的关系如图 6 所示。

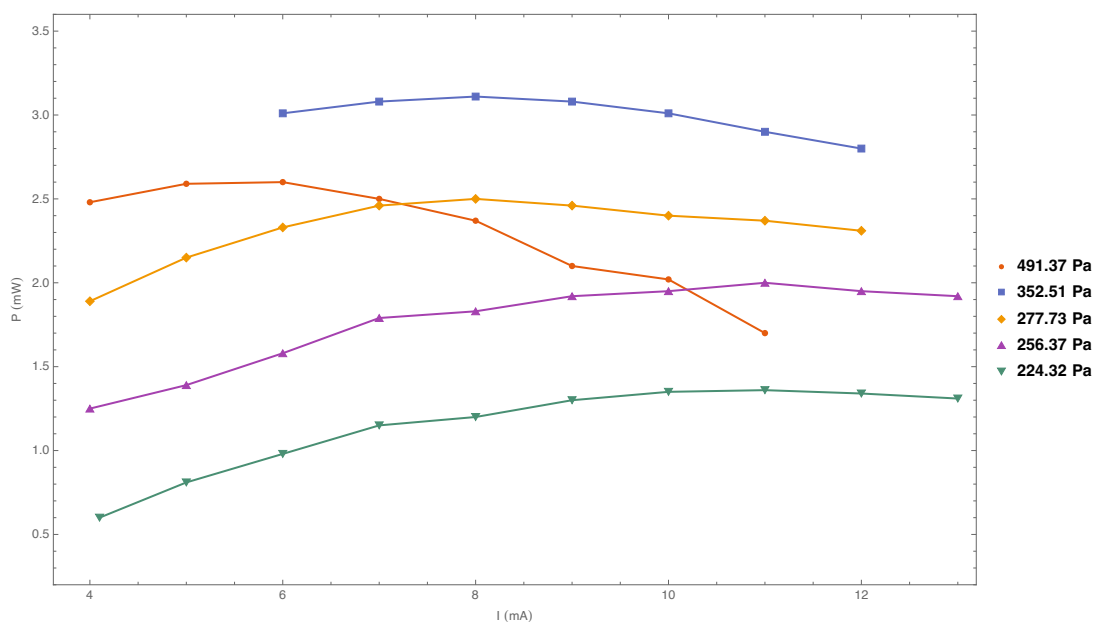


图 6. 不同气压下 He-Ne 激光器输出功率与放电电流的关系

可以看到，总气压一定时激光管输出功率存在一个峰值，对应于最佳放电电流。工作电流小于该最佳值时输出功率随着电流增大而增大，大于该最佳值时输出功率随着工作电流的增大而减小。这是因为亚稳态 2^1S_0 与 2^3S_1 上的 He 原子数目在小放电电流时会随电流的增强而增大，但是电流过大时 He 原子数目会达到饱和。由于 Ne 原子的激发来自 2^1S_0 与 2^3S_1 上的 He 原子与 Ne 原子的碰撞，因此 $4S_2$ 和 $5S_2$ 上的 Ne 原子数与放电电流也会表现出类似的关系。而如果电流继续增大，那么电子与亚稳态 He 原子

的碰撞会将 He 原子激发到更高的能级或者将之退激发到基态，总是会使得能用于激发 Ne 原子的 He 原子数减少，进而使得大于最佳放电电流时输出功率随着电流的增大而减小。

同时根据图 6 可以看出，输出功率随压强的变化规律也是先增大后减小。根据实验结果可以发现，最佳的压强值应该在 277.73 Pa ~ 491.37 Pa 之间，352.51 Pa 可以作为一个最佳压强的估计值。我们认为其背后的机理与前者类似：压强较大时电子的平均自由程会变小，进而电子与 He 原子碰撞频率会变大。在小于最佳压强时压强增加会增大 He 原子被激发到亚稳态的原子数并促进 Ne 原子的激发，但是大于最佳压强时 He 原子会和电子碰撞过度而不利于 Ne 原子激发。实验观察到最佳放电电流的值会随着压强的增大而减小可以佐证我们的推测，即增大压强与提高工作电流拥有类似的效果。

D. 关闭真空系统

我们在关闭真空系统时应先关闭扩散泵以避免泵油氧化及返油，扩散泵断电后继续使用机械泵保持真空状态，半小时后方可关机。

V. 结论

本实验通过配置 $p_{\text{He}} : p_{\text{Ne}} \approx 7.3 : 1$ 的 He-Ne 混合气体，实现了气体放电和激光输出，验证了激光的基本原理。在此基础上，我们测定了 He-Ne 激光器在不同工作气压下放电电流与输出功率的关系，确认了输出激光功率随气体总压强和放电电流先增大后减小的变化规律，探索了相关机制，并最终发现对于我们配置的气体最佳工作压强值应位于 277.73 Pa ~ 491.37 Pa 之间。

[1] Wikimedia Commons. File:hene laser levels.png — wikimedia commons, the free media repository, 2022. [Online; accessed 24-February-2023].

[2] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验. 高等教育出版社, 4 edition, 2015.

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（即相应的放电电流的大小）是如何变化的？如何理解？

我们在图 6 处即曾对这一现象进行分析，可以看到激光输出功率峰值对应的放电电流随总气压减小而增大。这是由于最佳电流对应 Ne 原子处于上能级 $3S_2$ 的粒子数接近饱和，而气体总压强越小，电子平均自由程越大，我们也就需要更大的电子流密度来实现足够多的碰撞来达到饱和。

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较小的起伏，原因何在？

我们认为导致这一现象的原因是多方面的：一方面，激光照射到功率计探头表面可能会使得探头温度升高并导致测量结果表现随时间逐渐增大的漂移。另一方面，产生激光的量子系统保持的是一个动态平衡，布居数反转也只是统计意义上的结果，因此统计涨落会导致系统的输出功率出现一定的波动。同时，激光腔的长度在工作时也会发生微小的变化吗，这会使得实际的谐振波长出现波动并外显为输出功率的变化。