

实验七 He-Ne 激光器的最佳放电条件

一、引言

He-Ne 激光器是以 He、Ne 混合气体为工作物质，采用放电激励方式工作的激光器。其激光输出功率与放电条件（气体总压强、气体的配比、放电电流等）有密切关系。研究它的放电条件对于制作和使用 He-Ne 激光器来说都是非常重要的。

本实验通过配制 He-Ne 激光器的工作气体，研究放电条件对激光输出功率的影响，从而进一步了解 He-Ne 激光器的工作原理和最佳放电条件，掌握真空与充气技术。

二、实验原理

1. 内腔式 He-Ne 激光器的结构

实验中采用内腔式 He-Ne 激光管，它是由谐振腔和放电管组成的，图 1 是其结构示意图。谐振腔由反射镜 R_1 和 R_2 组成。 R_1 的反射率为 97—98%， R_2 的反射率在 99% 以上。激光束通过反射率较低的腔镜耦合到腔外，该镜通常称为输出镜。

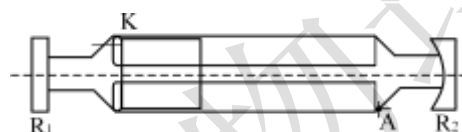


图 1 内腔式 He-Ne 激光管的结构示意图

放电管中央的细管为毛细管，套在毛细管外面较粗的管子为储气管，A 为阳极，K 为阴极。现分别介绍如下：

(1) 毛细管 毛细管中充有 He、Ne 混合气体，经气体放电变成激光增益介质，它是对激光产生放大的区域，毛细管的几何尺寸决定了激光的最大增益，光在其中传播一个单程的增益 $G(\nu) \cdot l$ 正比于毛细管的长度 l 。增益系数 $G(\nu)$ 还反比与毛细管直径。但是毛细管的直径不能做得太细，太细会增大光的衍射损耗、限制激光器的输出总功率（它正比与毛细管直径的平方）。太细了还会增加调节激光谐振腔的困难。制作毛细管时必须尽力做到毛细管准直，避免遮挡光路。

(2) 储气管 储气管的粗细要根据毛细管的尺寸而定，其直径通常在 2—5cm 范围内，储气管与毛细管的气路是相通的。储气管的作用主要是稳定毛细管内的工作气压、稳定激光器的输出功率和延长其寿命。内腔式 He-Ne 激光器的储气管把反射镜和毛细管固定连接在一起，防止放电时带电粒子对管壁的轰击导致毛细管变形，保证激光器能正常工作。

(3) 电极 电极的质量直接关系到激光器的寿命。He-Ne 激光器工作时，毛细管要进行辉光放电，虽然放电电流不大，但电压很高，受电场加速的正离子撞击阴极会引起阴极材料的溅射与蒸发。这些气化的阴极材料的金属原子，可能沉积在附近玻璃表面上及腔镜上，它会吸收与吸附一些工作气体，结果导致放电管内工作气体压强不断减少，以及污染谐振腔的反射镜，使腔镜的反射率降低很多。因此，通常选溅射较弱的 Al 作阴极，Al 表面的氧化层能较好地防止离子轰击造成的侵蚀。阴极通常制成圆筒形以降低溅射效应。小功率 He-Ne 激光器通常用钨杆制作阳极，和正离子相比，电子质量要小很多，所以电子轰击阳极造成的损害比阴极要小得多。

(4) 激光电源 He-Ne 激光器一般采用直流高压放电激励方式。激发电压、电流的范围视激光管的长短而定。小功率激光器（短管）的电压约为 4000—8000V。工作电流 7mA 左右。

2. He-Ne 激光器的工作原理

(1) 增益介质 图 2 给出了和 He-Ne 激光器的激光跃迁有关的 He、Ne 原子的能级图。要获得 632.8nm 的激光就要求在 Ne 的 $3S_2$ 和 $2P_4$ 能级之间实现粒子数反转分布，这时介质对 632.8nm 的光有放大作用，称之为增益介质或激活介质。He-Ne 激光器是通过 He 与 Ne 之间能量的共振转移碰撞过程来实现粒子数反转。

He-Ne 激光器通过气体放电的方式获得激励能量。充有 He、Ne 气体的放电管的两个电极之间加有几千伏的直流电压，在管内的发光区有均匀的电位降梯度。气体被高度电离后，

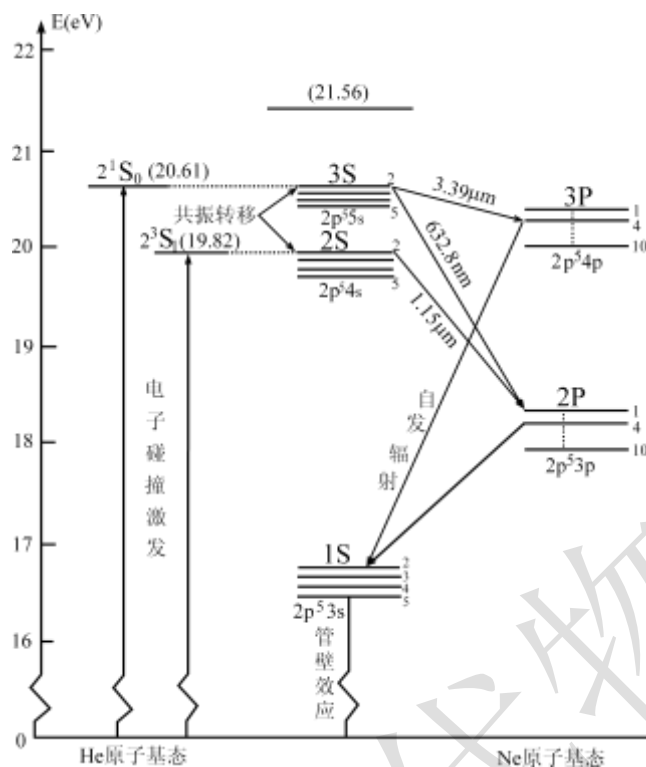


图2 与 He-Ne 激光器有关的能级结构及跃迁示意图

电子被电场加速获得动能，并通过第一类非弹性碰撞将能量转移给 He 原子，使它们跃迁至激发态。一般情况下，激发态的原子可以通过光辐射过渡到低能态或基态，因此，原子处于高能态的平均寿命非常短。但是，有一些激发态与所有低于它们的能级之间都不满足跃迁的选择定则，不能通过光辐射跃迁至低能态，这种激发态称为亚稳态。处于亚稳态的原子寿命比较长。He 的 2^1S_0 和 2^3S_1 就是这种亚稳态。 2^1S_0 态的 $S=L=J=0$ ，比它能量低的态只有基态 1^1S_0 ， $S=L=J=0$ ，它们之间的辐射跃迁不满足跃迁选择定则

$$\begin{aligned}\Delta S &= 0 \\ \Delta L &= \pm 1 \\ \Delta J &= 0, \pm 1\end{aligned}$$

同理， 2^3S_1 与 1^1S_0 之间的辐射跃迁也不能实现。这样，被激发到 2^1S_0 和 2^3S_1 态的 He 原子就不能经过辐射跃迁回到基态。另一方面，被激发到更高能态上去的 He 原子有相当一部分经跃迁后会落到这两个亚稳态上。所以放电一旦建立，就会有大量 He 原子处在 2^1S_0 和 2^3S_1 两个能级上。这两个亚稳态不能靠辐射光子回到基态，只能通过与其它粒子发生第二类非弹性碰撞把能量转移给其它粒子，再回到基态。尤其当两种粒子相应能级间的能量差 ΔE 很小时，这种过程特别容易发生，称为能量的共振转移过程。从图 2 中可以看到 Ne 的 $2S_2$ 能级(19.78eV)和 $3S_2$ 能级(20.66eV)正好分别与 He 的 2^3S_1 (19.82eV) 和 2^1S_0 (20.61eV) 能量相差很少，所以处于 2^3S_1 和 2^1S_0 态的 He 原子很容易通过同 Ne 原子碰撞把 Ne 原子激发到 $2S_2$ 和 $3S_2$ 能级上去。这就是 He—Ne 激光器充 He 的原因，通过 He 将 Ne 激发到激光上能级，实现粒子数的反转分布。Ne 原子的激光上能级寿命短，所以通过直接和电子发生第一类非弹性碰撞使 Ne 原子向激光上能级集居的贡献很小。

激光下能级 $2P_4$ 的寿命很短，处在该能级的原子通过自发辐射到 $1S$ 能级上，(在偶极辐射近似下， $2P_4$ 与基态之间是禁戒跃迁)。 $1S_{2,3,4,5}$ 中 $1S_{3,5}$ 是亚稳态，而 $1S_{2,4}$ 可以跃迁到基态产生共振辐射，它很容易被别的基态 Ne 原子吸收(自吸收)激发到 $1S_{2,4}$ 能级上，这相当于

延长了这两个能级的寿命，使之与亚稳态的寿命一样长。因此，处于 1S 能级上的 Ne 原子主要是通过毛细管壁碰撞将能量交给管壁而回到基态。这就是所谓的“管壁效应”。选用毛细管作放电通道有利于增强这种效应。

如果 1S 能级上积累了较多的 Ne 原子，会增加 Ne 的 2P 态与 1S 态之间的共振俘获效应（Ne 原子由 2P 态退激发至 1S 态时发射的光子，为另一个处于 1S 态的 Ne 原子吸收又回到 2P 态），同时电子碰撞使 Ne 原子由 1S 态激发到 2P 态的几率也会增加，这些都使 2P 态的粒子数密度增加，这对实现粒子数反转分布是极其不利的。实验测得：对 632.8nm 小信号，增益系数 $G(\nu)$ 与毛细管直径 d 成反比。

(2) 增益系数 激活介质对光有放大作用是由于原子的受激辐射过程。受激辐射发出的光子和入射光子的频率、偏振方向和传播方向都相同，显然受激辐射加强了入射光。按照爱因斯坦的原子辐射理论，频率为 ν 、辐射能量密度为 $\rho(\nu)$ （即辐射场中在单位体积、在频率 ν 附近单位频率间隔内的辐射能量）的准单色光投射介质时，单位体积、单位时间内受激辐射发出的光子数为 $N_2 B_{21} \rho(\nu) g(\nu)$ ， B_{21} 是爱因斯坦受激辐射系数；单位体积、单位时间内受激吸收的光子数为 $N_1 B_{12} \rho(\nu) g(\nu)$ ， B_{12} 是爱因斯坦受激吸收系数。如果忽略自发辐射，要想获得对光的放大，也就是说希望得到受激发射的光子数大于受激吸收的光子数，注意到 $B_{21}g_2=B_{12}g_1$ ，则要求

$$\left(N_2 - N_1 \frac{g_2}{g_1} \right) B_{21} \rho(\nu) g(\nu) > 0 \quad (1)$$

考虑到

$$I(\nu) = \frac{\rho(\nu)}{\mu} \cdot c \quad (\mu \text{ 为折射率})$$

则有

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

上式表明：

- ① 要求增益系数 $G(\nu) > 0$ ，必须 $\left(N_2 - N_1 \frac{g_2}{g_1} \right) > 0$ ，即粒子数必须反转分布。
- ② 增益系数 $G(\nu)$ 与粒子数差值 $\Delta N = N_2 - N_1 g_2/g_1$ 成正比。

(3) 放电条件对激光器输出功率的影响 激光器必须选择最佳放电条件才能获得最大的激光输出功率。对于 He-Ne 激光器来说，应当根据以下几条实验规律选择其最佳放电条件：

① 当气体配比保持一定时，改变充气总气压，一个激光器输出的激光功率存在一个极大值。充气总气压 $P_{\text{总}}$ 与毛细管直径 d 之乘积（ d 在 1—1.5mm 范围内）为 (3—5) Torr·mm 时输出的激光功率最大 (1Torr=133.322Pa)。该实验中使用的 He-Ne 激光器的毛细管直径 d 为 1.3mm，最佳充气总压强应该在 3Torr 左右。

② 激光器的毛细管直径 $d=1.30\text{mm}$ 时，He 与 Ne 的充气配比选择 7: 1 比较理想，因为在这个配比下，当配比发生偏离时激光器的输出功率变化得比较缓慢。

③ 改变 He-Ne 激光器的放电电流，同时

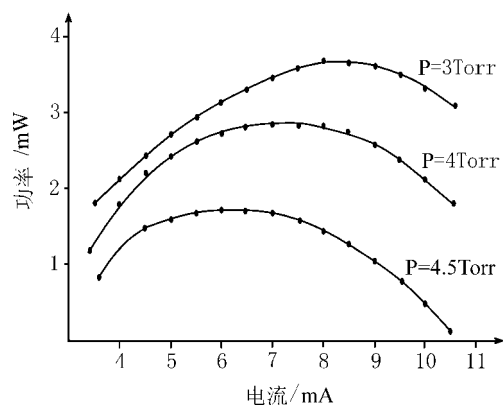


图3 输出功率随放电电流的变化

测量与放电电流对应的输出激光功率,得到图3所示的规律。该图表明有一个使激光器输出的激光功率达到最大值的放电电流,即最佳放电电流。当总气压降低时最佳放电电流值增大。

对于上述实验结果可作如下解释:

放电等离子体中电子运动的能量通常采用电子温度 T_e 来表示。电子在一个自由程内被电场 E 加速后所获得的能量决定了电子温度 T_e 的高低。因为自由程 λ 与总压强 P 成反比,故 E/P 的大小决定了电子温度 T_e 的高低。当总压强 P 降低时,电子温度 T_e 增加,即电子的平均动能增加,这有利于把 He 原子由基态激发到 2^1S_0 态,因此有利于加强粒子数的反转。如果总气压 P 太小,He 和 Ne 的原子数密度太小,这时形成的反转粒子数密度也太小,增益系数也太小。相反,如果总气压太高,电子温度 T_e 太低,因此只有少数电子具有较大的能量,足以把 He 原子激发到 2^1S_0 态上去,这显然不利于粒子数反转。所以总气压 P 有一个最佳值。

电子温度 T_e 除了取决于充气总气压之外,还取决于气体的种类。He 原子的电离能是 24.58eV,比 Ne 的电离能高。在 He 气中加入 Ne,电子密度会增加,场强 E 会下降,电子温度 T_e 会减小。如果 He、Ne 混合气体中 Ne 的比例减小,那么电子温度 T_e 就会升高,这有利于激发 He 原子。然而,如果 Ne 的比例太少,就产生不了足够的反转粒子数密度,得不到足够的增益。相反,如果 Ne 的比例太大,那么电子温度 T_e 就会减小,这不利于激发 He 原子。配气的最佳比例一般为

$$P_{\text{He}} : P_{\text{Ne}} = 7:1 \sim 5:1$$

输出激光功率与放电电流的关系:当放电电流较小时,处在亚稳态 2^1S_0 的 He 原子密度 N 随放电电流的增加而增加,近似地呈现为线性关系,当逐渐增加放电电流时,激发到亚稳态 2^1S_0 上的 He 原子密度趋于饱和。Ne 原子 $3S_2$ 能级上原子密度随放电电流的变化规律与此相似。导致饱和趋势的根源是:电流过大时,亚稳态 2^1S_0 上的 He 原子与电子碰撞将被激发到更高的能级上去,还可能将能量转移给电子而回到基态,这两个过程都导致亚稳态 2^1S_0 上的 He 原子密度减少,使亚稳态 2^1S_0 上的 He 原子数目随放电电流的增加趋于饱和。此外,当增加放电电流时,亚稳态 $1S$ 上的 Ne 原子和电子碰撞被激发到 $2P$ 态的概率会增加,这使激光 632.8nm 的下能级 $2P_4$ 上的原子密度线性地增加。使得反转粒子数密度随放电电流的变化存在一个最大值,即最佳放电电流。

三、实验装置

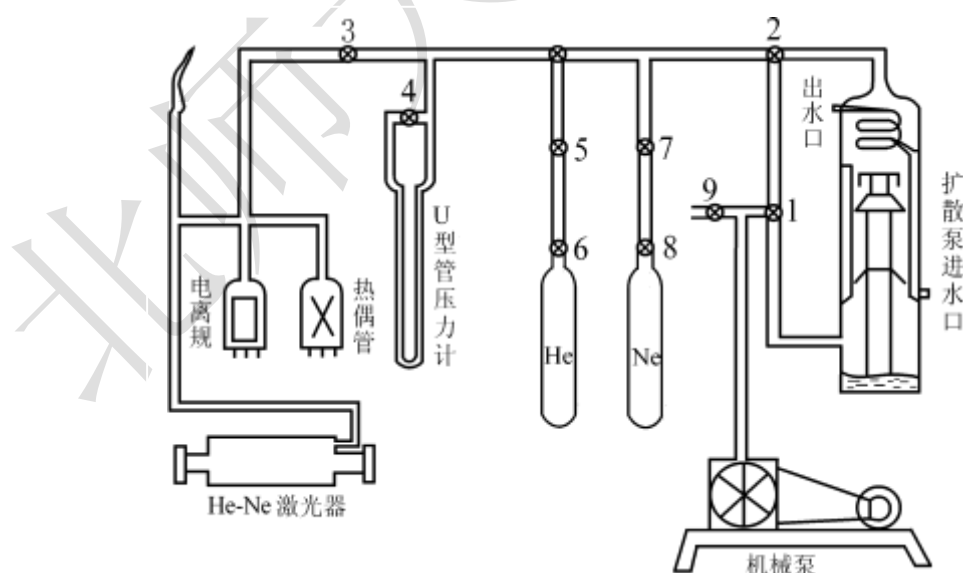


图4 真空系统示意图

本实验所用装置如图4,此外还有复合真空计、激光电源和数字激光功率计。有关这些

设备和仪器的工作原理和使用方法请阅读有关的说明书。真空系统的原理参阅《附录 真空技术》部分。

四、实验内容

1. 抽空除气

利用机械泵、扩散泵对系统抽气使压强低于 $4 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 。

2. 配气

选用的气体配比为 $P_{\text{He}} : P_{\text{Ne}} = 7:1$ 。根据毛细管直径 d 的大小，由公式 $pd = (4 \sim 6.7) \times 100 \text{Pa} \cdot \text{mm}$ 可求出最佳气体总压强在 400Pa (3Torr) 左右。配气时要特别注意不能让一个气瓶内的气体混入另一种气体。

设真空系统中连接 He、Ne 气瓶部分的体积为 V_2 (即活塞 2, 3 之间的部分)，连接激光管部分的体积为 V_1 ， V_1 和 V_2 之间用活塞 3 相连。配气过程大致如下：待整个真空系统的真空度达到 $3 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 时，①关闭活塞 2，向 $V_1 + V_2$ 充 He 至气压为 P'_{He} ；②关闭活塞 3，打开活塞 2，对体积 V_2 抽气，此时 V_1 中气压为 P'_{He} 不变；③关闭阀门 2，向 V_2 充气 Ne 至 P'_{Ne} ；④打开分隔阀 3，使两种气体混合 10 分钟即可。

3. 研究放电条件对激光输出功率的影响

(1) 固定 He、Ne 气体的配气比恒定，改变总气压 $P_{\text{总}}$ 的大小，测量对应的激光输出功率。想一想怎样操作才能让 $P_{\text{总}}$ 的改变量很小 (一般变化范围在 $2-5 \text{Torr}$ 之间)。对实验结果进行解释。

(2) 保持总气压 $P_{\text{总}}$ 的大小不变，改变激光器的工作电流，测量对应的激光输出功率。

(注意激光器的工作电流变化范围要小于 10mA)。对实验结果进行解释。

用光功率计测定激光功率的大小，光功率计的工作原理与使用方法请看仪器说明书。

4. 选作内容：改变 He 与 Ne 的配气比，观察它对激光输出功率的影响。

五、注意事项

请设计出完整的实验步骤；计算出实验中需要的气压值 (以油柱高度表示)。进行实际操作之前必须搞清楚如何正确操作每一个实验步骤，经教师同意后才能开始做实验。

六、思考题

1. 实验中当 He、Ne 气体压强和放电电流保持不变时，激光器的激光输出功率存在小的起伏，原因何在？
2. 在固定放电电流研究光功率与总气压的关系过程中，每改变气压，注意观察光功率随时间的变化规律，解释出现的现象。

参考文献

- [1] 朱如曾，封开印. 激光物理. 北京：国防工业出版社，1974
- [2] 杨福家. 原子物理学. 北京：高等教育出版社，1985
- [3] 《气体激光》编写组. 气体激光. 上海：上海人民出版社，(上册 1975，下册 1976)