

氦、氖、氩气体压力对氖光谱和能级填充的影响

谭明亮 叶安培 朱正和 苟清泉

(成都科技大学原子与分子物理研究所, 成都 610065)

金行星 孙颖

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都 610003)

摘 要 以 ^{238}Pu 为激发源, 测量了不同压力下 Ne、He-Ne、He-Ne-Ar 体系的氖光谱, 并以此为基础计算了 Ne 的 $2p^53p$ 的 10 个 $2P$ 能级的辐射率 I 、相对集居数 N 、填充率 W , 总结出相应的 Ne 压力、He 压力和 Ar 压力对 Ne 的 585.2 nm 谱线强度和 10 个 $2P$ 能级填充的影响规律。

关键词 ^{238}Pu 激励, 氖光谱, 氖能级填充。

1 引 言

在电激励 He-Ne 激光器中, 电子碰撞使 He、Ne 激发, 通常 $\text{He}^*(2^1S_0)$ 能级的电子激发截面比 $\text{Ne}^*(3S_2)$ 能级大一个数量级, $\text{He}^*(2^1S_0)$ 又是亚稳态, 因而容易积累起较多的粒子。由于 $\text{He}^*(2^1S_0)$ 和 $\text{Ne}^*(3S_2)$ 两能级高度很接近, 它们之间将发生能量共振转移, 实现了 Ne 的 $3S_2$ 与 $2P_1$ 能级间的粒子数反转。电激励下 He:Ne 大约为 5:1。 ^{238}Pu 激励 Ne 光谱的分析结果表明^[4], 由于大量 Ne 原子的电离, 极易形成比较稳定的 Ne_2^+ , Ne_2^+ 的复合离解是填充 Ne 的 $2P_1$ 能级的主要途径, 并由此提出了核泵浦 Ne 激光的复合离解反转机制。在核激励下, He 与 Ne 的能量共振转移的重要性、He 对 Ne 的 $2P_1$ 能级的填充有何影响, 这些问题的研究对探索核泵浦 He-Ne 激光器, 以实现核泵浦 585.2 nm 的激光输出具有重要的意义。

为建立激光介质上下能级间的粒子数反转, 在提高 Ne 上能级 $2P_1$ 粒子数的同时, 如何减小下能级 $1S_2$ 的粒子数也同样重要。由于 Ne 的 585.2 nm 激光下能级 $1S_2$ 能量为 16.85 eV, Ar 的第一电离能为 15.76 eV, 因此, 文献[1、2]指出可在 Ne 中加入 Ar, 通过 Penning 反应驰豫 Ne 的下能级 $1S_2$, 以实现粒子数反转。在 Ne 中加入 Ar 驰豫下能级 $1S_2$ 的同时, Ar 是否会对 Ne 的 10 个 $2P$ 能级, 特别是对 Ne 的激光上能级 $2P_1$ 的填充产生影响, 这对了解与之有关的原子分子过程和进一步实现核泵浦 He-Ne-Ar 激光器都具有重要的意义。

本文用文献[4]的实验装置, 对不同氖压力、氦压力、氩压力下的氖光谱进行了测量, 通过动力学微分方程组, 对氖的 10 个 $2P$ 能级的辐射率 I 、相对集居数 N 、填充率 W 进行计算,

得出氦压力、氦压力、氩压力对 Ne 的 585.2 nm 谱线和 $2P_1$ 能级填充的影响规律。

2 Ne 压力对 Ne $2P$ 能级填充的影响

在纯 Ne 压力为 4.67×10^3 Pa、 1.40×10^4 Pa、 2.80×10^4 Pa、 5.33×10^4 Pa、 7.53×10^4 Pa 条件下分别测量了氦谱线的强度,图 1(a)给出了 585.2 nm 谱线的强度随 Ne 压力的变化关系,表 1 列出了五种压力下,Ne 的 10 个 $2P_i$ 能级的辐射率 I_i 、相对集居数 N_i 、填充率 W_i 的实验结果。能级 $2P_i$ 的辐射率定义为由第 i 个能级 $2P_i$ 发射的谱线强度之和与所有 $2P$ 能级(从 $2P_1$ 至 $2P_{10}$) 发射的谱线强度总和之比。能级 $2P_i$ 的相对集居数 N_i 由谱线强度公式给出^[3]:

$$N_i = I_i/A_i \quad (1)$$

式中 I_i 为校正后的相对谱线强度,跃迁几率 A_i 引自文献[3]。 $2P_i$ 的填充率 W_i 由下式给出

$$d[\text{Ne}(2P_i)]/dt = W W_i + [\text{Ne}] \sum_{k=1}^{i-1} K_{ik} [\text{Ne}(2P_k)] - [\text{Ne}(2P_i)] \{1/\tau_i + [\text{Ne}] (K_i + \sum_{k=i+1}^{10} K_{ik})\} \quad (2)$$

对稳定状态

$$d[\text{Ne}(2P_i)]/dt = 0 \quad (3)$$

则有

$$W_i = [\text{Ne}(2P_i)] \{1/\tau_i + [\text{Ne}] (K_i + \sum_{k=i+1}^{10} K_{ik})\} / W - [\text{Ne}] \sum_{k=1}^{i-1} K_{ik} [\text{Ne}(2P_k)] / W \quad (4)$$

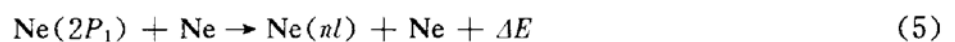
式中 W 为 ^{238}Pu 激励下所有 $2P_i$ 能级($2P_1$ 到 $2P_{10}$) 的填充量, $[\text{Ne}(2P_i)]$ 为粒子浓度。各能级寿命 τ_i , 总碰撞失活速率常数 K_i , 能级间的碰撞失活速率常数 K_{ik} 引自文献[3]。

Table 1. I_i , N_i , W_i at various pressure P_{Ne}

state	4.67×10^3 Pa			1.40×10^4 Pa			2.80×10^4 Pa			5.33×10^4 Pa			7.53×10^4 Pa		
	I_i	N_i	W_i	I_i	N_i	W_i	I_i	N_i	W_i	I_i	N_i	W_i	I_i	N_i	W_i
$2P_1$	50.6	83.8	22.9	50.7	116.1	22.2	51.3	159.7	21.7	41.5	258.8	16.9	37.3	318.8	17.0
$2P_2$	8.3	51.3	5.7	9.9	73.0	6.2	9.4	114.8	6.9	12.5	261.7	7.6	11.4	335.7	7.9
$2P_3$	5.3	6.0	20.4	6.3	10.8	28.2	4.8	13.1	24.4	5.2	29.9	26.7	3.9	30.2	22.0
$2P_4$	12.2	33.1	15.0	12.4	50.3	15.6	12.8	68.5	17.6	14.2	161.9	21.1	12.5	194.5	24.5
$2P_5$	5.7	15.7	10.3	5.3	14.5	7.3	6.0	22.5	8.0	6.7	51.8	8.9	6.0	69.1	9.7
$2P_6$	9.3	33.7	8.4	8.1	38.3	7.3	8.2	55.7	7.5	9.2	124.5	8.1	8.1	141.1	7.5
$2P_7$	4.7	6.6	2.9	4.2	8.5	2.9	4.5	12.0	2.9	8.1	26.3	3.0	17.2	28.2	2.6
$2P_8$	1.6	10.6	9.8	1.3	11.1	7.8	1.5	18.9	9.5	1.3	24.4	5.6	1.3	29.4	5.6
$2P_9$	2.4	5.4	4.5	1.6	4.9	2.6	1.4	6.2	1.4	1.3	11.1	2.1	1.3	15.4	2.7
$2P_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	59.9	0.3

Ne 的 $2P_1$ 能级的辐射率 I_1 、相对集居数 N_1 、填充率 W_1 随 P_{Ne} 的变化关系如图 1(b)、(c)、(d)所示。

由图 1(a)可知:随着 P_{Ne} 的增加, $I_{585.2}$ 增强,当压力 $P_{\text{Ne}} > 5.33 \times 10^4$ Pa 时, $I_{585.2}$ 虽仍随 P_{Ne} 的增加而增强,但增加的幅度却开始减小。这是由于随着 Ne 浓度的增加,Ne 的 $2P_1$ 能级碰撞失活(Deactivation)加剧所致。



由图 1(b)、(c)、(d)可知:1) 当 $P_{\text{Ne}} < 2.80 \times 10^4$ Pa 时, I_1 大于 50%, 即由 $2P_1$ 能级辐射的强度超过了另外 9 个 $2P_i$ (从 $2P_2$ 至 $2P_{10}$) 能级辐射强度之和,即使 $P_{\text{Ne}} = 7.53 \times 10^4$ Pa 时, I_1 仍为 37.3%, 这是由于 Ne_2^+ 的形成与复合离解,使 Ne 的 $2P_1$ 能级的辐射加强;2) 当氦压力

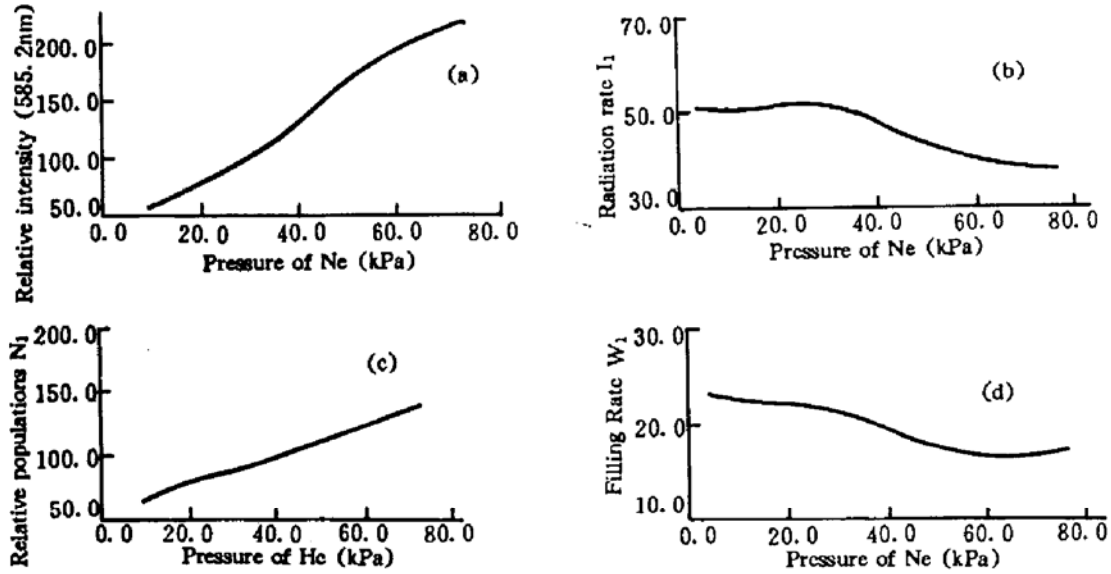


Fig. 1 Dependence of spectra and filling of 2P levels of Ne on the pressure P_{Ne}

$P_{Ne} > 2.80 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时, $2P_1$ 能级的辐射率 I_1 随压力 P_{Ne} 的增加而减小, 填充率 W_1 随压力 P_{Ne} 的增加而迅速减小, 当 $P_{Ne} > 5.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时, N_1 虽仍随 P_{Ne} 的增加而增大, 但增大的幅度减小。这是由于随着 Ne 浓度的增加, $2P_1$ 能级因碰撞向低能态(如 $2P$ 态、基态等)的转移加强所致。如果继续增加 P_{Ne} , 或许 $2P_1$ 能级的填充率 W_1 继续下降, 谱线强度 $I_{585.2}$ 会达到饱和。

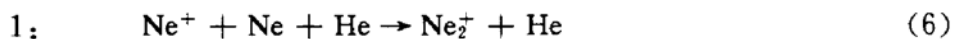
3 He 压力对 Ne 2P 能级填充的影响

在氖气压力 $P_{Ne} = 6.67 \times 10^3 \text{ Pa}$ 时, 分别加入压力为 $9.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ 、 $2.00 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、 $3.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、 $5.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、 $7.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ 的氦气, 对各种压力下 He-Ne 体系的光谱进行了测量, Ne 的 10 个 $2P_i$ 能级的辐射率 I_i 、相对集居数 N_i 、填充率 W_i 如表 2 所示, $I_{585.2}$ 、 I_1 、 N_1 、 W_1 随压力 P_{He} 的变化曲线如图 2 所示。

Table 2. I_i 、 N_i 、 W_i at various pressure P_{He}

state	$9.33 \times 10^3 \text{ Pa}$			$2.00 \times 10^4 \text{ Pa}$			$3.33 \times 10^4 \text{ Pa}$			$5.33 \times 10^4 \text{ Pa}$			$7.33 \times 10^4 \text{ Pa}$		
	I_i	N_i	W_i	I_i	N_i	W_i	I_i	N_i	W_i	I_i	N_i	W_i	I_i	N_i	W_i
$2P_1$	47.5	64.4	19.4	50.6	79.7	21.9	52.1	91.5	25.2	54.9	115.5	33.1	50.0	138.7	31.1
$2P_2$	10.1	41.7	5.6	11.5	58.3	7.1	9.8	59.1	7.2	10.7	58.2	7.4	7.8	57.4	5.7
$2P_3$	4.8	5.5	22.6	3.8	4.6	17.4	2.8	4.3	16.2	3.4	5.9	23.4	2.7	5.3	16.3
$2P_4$	11.0	25.4	12.1	10.2	34.3	24.7	9.6	26.5	16.1	7.4	23.7	6.8	7.2	33.1	17.1
$2P_5$	6.3	12.9	10.2	4.6	8.4	6.1	5.2	11.2	8.1	3.5	8.0	6.0	5.1	12.8	7.6
$2P_6$	8.3	22.3	6.7	7.1	22.7	6.2	5.8	19.9	5.4	4.9	18.8	5.4	4.5	19.1	4.3
$2P_7$	6.1	5.7	3.0	8.4	7.3	3.5	9.9	6.0	2.9	11.4	5.1	2.5	17.8	6.0	2.3
$2P_8$	1.7	8.9	9.9	0.8	5.0	4.6	1.3	8.9	9.1	1.8	7.8	8.3	1.8	9.4	7.9
$2P_9$	4.2	7.6	10.2	2.8	6.2	8.4	3.3	7.8	9.6	2.0	5.8	7.0	1.8	7.0	6.6
$2P_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.3	26.7	1.1

由图 2 可知, 当 $P_{He} < 5.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时, 随着 P_{He} 的增加, I_1 、 N_1 、 W_1 增大; 当 $P_{He} > 5.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时, 随着 P_{He} 的增加, N_1 增加, 但 I_1 、 W_1 却开始减小, 这是由于 He 的加入, 对 Ne 的 $2P_1$ 能级的填充可以产生以下两方面的影响: 一方面, He 的加入有利于 Ne 的 $2P_1$ 能级的填充



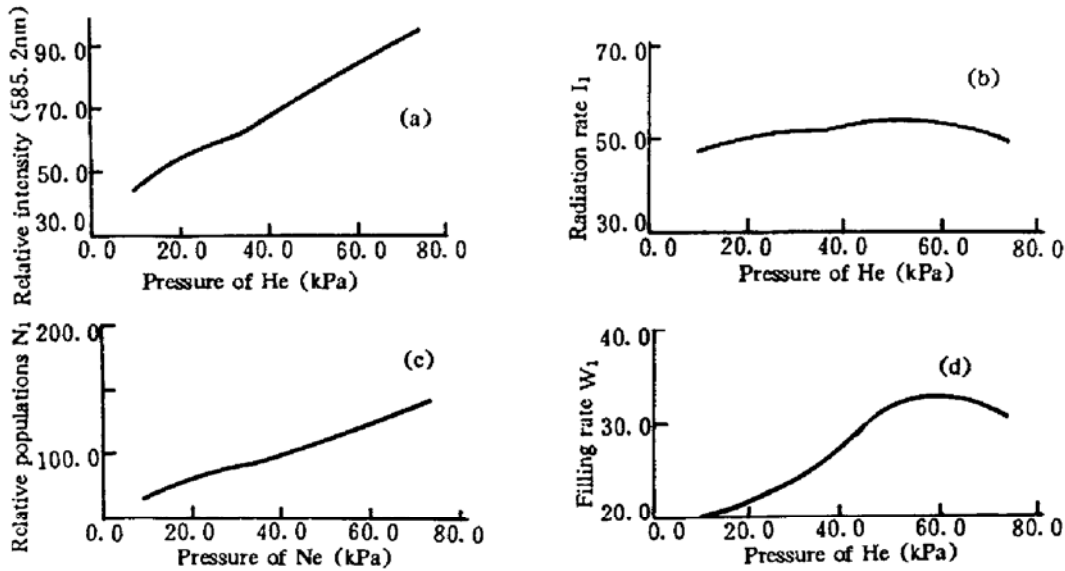
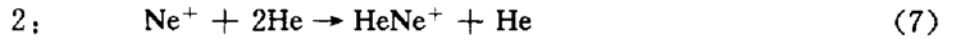
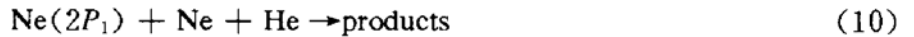


Fig. 2 Influence of P_{He} on the spectra and the filling of $2P$ levels of Ne



即 He 的加入, 产生了另外两个生成 Ne_2^+ 的途径, 由于 Ne_2^+ 的复合离解主要填充 $2P_1$ 能级, Ne_2^+ 的增加使 Ne 的 $2P_1$ 能级粒子数增加。另一方面, 由于 He 与 $Ne(2P_1)$ 的两体、三体碰撞, He 浓度的增加使 $Ne(2P_1)$ 能级粒子数减小



当 $P_{He} < 5.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时, I_1 、 N_1 、 W_1 随 P_{He} 的增加而增大, 在这种情况下, 上述第一方面的作用占主导地位, 即 He 的加入有利于 Ne 的 $2P_1$ 能级的填充。随着 P_{He} 逐渐增加, He 与 $Ne(2P_1)$ 的碰撞失活增强, 当 $P_{He} > 5.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时(此时 $He:Ne > 8:1$), I_1 、 W_1 随 P_{He} 的增加而减小, 此时 N_1 虽仍随 P_{He} 的增加而增大, 但 N_1 在 10 个 $2P_1$ 能级中的比例却开始减小, He 的第二方面的作用开始增强, 因此, 当 $P_{Ne} = 6.67 \times 10^3 \text{ Pa}$ 时, $He:Ne$ 约以 8:1 为宜。

^{238}Pu 激励 He-Ne 光谱的分析结果表明, 在 ^{238}Pu 激励下 Ne 632.8 nm 谱线强度很低, 如果在 Ne 中加入 He, Ne 632.8 nm 谱线强度变化也不大。在 ^{238}Pu 激励下, 带电的高能 α 粒子使 He、Ne 电离, 形成低温等离子体, 所以, He 与 Ne 的能量共振转移不再起主要作用。同时, He 的加入有利于 Ne_2^+ 的形成, Ne_2^+ 的形成与复合离解是填充 Ne 的 $2P_1$ 能级的主要途径, 因而在 Ne 中适当加入 He, 有利于实现 Ne 的 $2P_1 - 1S_1$ 能级间的粒子数反转。

4 Ar 压力对 Ne $2P$ 能级填充的影响

在 He 压力为 $5.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、Ne 压力的 $6.67 \times 10^3 \text{ Pa}$ 的混合气体中(此时 $He:Ne = 8:1$), 分别加入压力为 $5.33 \times 10^2 \text{ Pa}$ 、 $1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ 、 $2.40 \times 10^3 \text{ Pa}$ 、 $2.40 \times 10^4 \text{ Pa}$ 的 Ar, 对各种压力下的 He-Ne-Ar 体系的光谱进行了测量, Ne 的 10 个 $2P_1$ 能级的辐射率 I_1 、相对集居数 N_1 、填充率 W_1 如表 3 所示, $I_{585.2}$ 、 I_1 、 N_1 、 W_1 随压力 P_{Ar} 的变化曲线如图 3 所示。

Table 3. I_i, N_i, W_i at various pressure P_{Ar}

state	5.33×10^2 Pa			1.33×10^3 Pa			2.40×10^3 Pa			2.40×10^4 Pa		
	I_i	N_i	W_i	I_i	N_i	W_i	I_i	N_i	W_i	I_i	N_i	W_i
$2P_1$	46.2	56.7	22.9	36.6	29.2	20.6	24.8	27.4	18.9	3.9	3.9	5.9
$2P_2$	16.5	37.4	6.7	16.4	16.5	5.2	34.3	4.3	4.7	57.1	4.3	2.9
$2P_3$	4.2	3.3	18.4	3.9	1.8	17.6	1.4	0.8	20.3	0	0	0
$2P_4$	9.1	21.0	19.7	7.4	10.5	15.9	2.1	2.2	3.1	0.7	2.8	18.3
$2P_5$	6.3	8.8	9.4	10.1	6.4	11.9	12.7	7.2	17.2	7.8	4.8	19.0
$2P_6$	7.3	15.6	6.3	11.5	11.0	7.8	13.0	25.2	23.2	16.9	35.8	53.8
$2P_7$	6.7	4.7	3.4	9.2	3.2	3.9	9.2	3.5	5.5	13.4	0	0
$2P_8$	1.9	6.1	9.0	2.8	4.4	11.6	0.9	3.9	12.7	0	0	0
$2P_9$	1.9	3.1	4.1	2.1	2.3	5.5	1.3	1.9	5.6	0	0	0
$2P_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

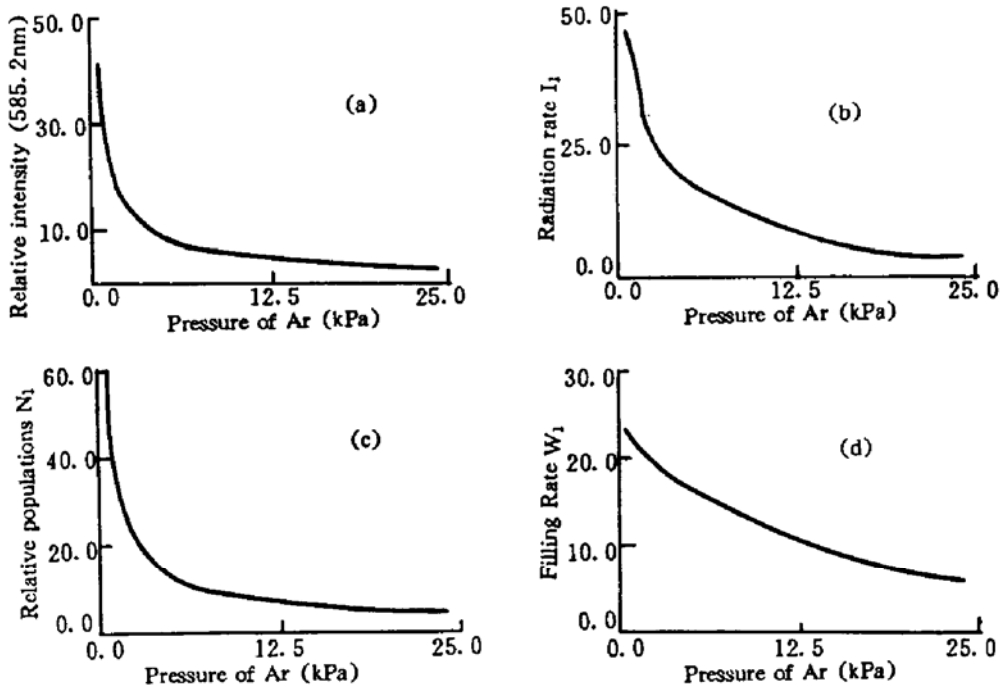
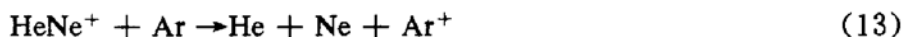


Fig. 3 Influence of P_{Ar} on the spectra and the filling of $2P$ levels of Ne

由图 3 可知，当 Ar 加入 He-Ne 体系时， $2P_1$ 能级的 I_1, N_1, W_1 都有所下降，而且，随着 P_{Ar} 的增加， I_1, N_1, W_1 减小。这是由于 Ar 与 $Ne(2P_1)$ 碰撞，使 Ne 的 $2P_1$ 能级粒子数减小



同时 Ar 可与 $Ne_2^+, HeNe^+$ 发生电荷转移，使 $Ne_2^+, HeNe^+$ 浓度减小，最终导致 $2P_1$ 能级粒子数减小



在 He-Ne 体系中加入 Ar，其目的是通过 Penning 反应弛豫激光下能级 $1S_2^{[1,2]}$ ，以实现粒子数反转。本文通过 ^{238}Pu 激励 He-Ne-Ar 体系光谱测定，分析了 Ar 对激光上能级粒子数填充的影响，结果表明，在 He-Ne 中加入 Ar 弛豫激光下能级 $1S_2$ 的同时，由于 Ar 与 $Ne_2^+, HeNe^+$ 发生电荷转移和 Ar 直接对 $Ne(2P_1)$ 能级的碰撞弛豫，Ar 也使激光上能级 $Ne(2P_1)$ 的粒子数减小。Ar 加到何种比例最有利于 $2P_1 - 1S_2$ 能级间的粒子数反转，有待于 He-Ne-Ar 体系增益

的测定。

5 结 论

1) 核激励条件下, $\text{He}(2^1S_0)$ 与 Ne 的能量共振转移不再起主要作用, 而 Ne^+ 的形成与复合离解则是重要的过程。

2) 核激励条件下, 在 Ne 中适量加入 He 有利于实现 Ne 的 $2P_1 - 1S_2$ 能级间的粒子数反转, 在本文实验条件下, He:Ne 约以 8:1 为宜, 而电激励下的 He:Ne 一般偏低。

3) 在 He-Ne 中加入 Ar 驰豫 Ne 下能级 $1S_2$ 的同时, Ar 也使上能级 $2P_1$ 的粒子数减少。Ar 加到何种比例最有利于 Ne $2P_1 - 1S_2$ 能级间的粒子数反转, 有待于 He-Ne-Ar 体系增益的测定。

参 考 文 献

- [1] G. A. Batyrbekov, E. G. Batyrbekov, V. A. Dantlyckev *et al.*, Influence of helium on the efficiency of filling of the $3p$ levels of neon atoms. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1990, 20(9): 1084~1088
- [2] V. I. Derzhiev, A. G. Zhidkov, A. V. Koval *et al.*, Kinetic model of a penning Ne laser utilizing a beam He-Ne-Ar and Ne- H_2 plasma. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1989, 19(8): 1016~1021
- [3] R. S. F. Chang, D. W. Setser, Radiative lifetimes and collisional deactivation rate constants of excited Ne ($2p^53p$) states. *J. Chem. Phys.*, 1980, 72(7): 4099~4110
- [4] 谭明亮, 胡 迅, 朱正和等, ^{238}Pu 激励下的 Ne 光谱和 Ne^+ 复合离解. *光学学报*, 1995, 15(1): 8~13

Influence of He, Ne and Ar Pressure on the Spectra and Filling of $2p^53p$ Level of Ne

Tan Mingliang Ye Anpei Zhu Zhenghe Gou Qinquan

(*Institute of Atomic and Molecular Physics, Chengdu University of Science and Technology, Chengdu 610065*)

Jin Xingxing Sun Ying

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003*)

(Received 30 November 1993; revised 4 November 1994)

Abstract The nuclear impaction spectra of neon, helium-neon and helium-neon-argon mixtures at different compositions and pressures are measured. Based on the measurement, the influence of pressure of neon, helium and argon on the intensity of Ne 585.2 nm and the efficiency of filling of ten $2P$ levels of Ne is summarized by calculating the radiation rate I , the relative populations N and the filling rate W of ten $2P$ levels of Ne.

Key words nuclear impaction, spectra of Ne, filling of Ne levels.