

氩氦射频容性放电发射光谱分析

张秩凡 高俊 雷鹏 周素素 王新兵 左都罗

Emission spectral diagnosis of argon-helium plasma produced by radio frequency capacitive discharge

Zhang Zhi-Fan Gao Jun Lei Peng Zhou Su-Su Wang Xin-Bing Zuo Du-Luo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 145202 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180274

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180274>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I14>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[液体电极上辉光放电丝的运动特性研究](#)

Rotating characteristics of glow discharge filament on liquid electrode surface

物理学报.2018, 67(7): 075201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172205>

[大气压介质阻挡辉光放电脉冲的阴极位降区特性及其影响因素的数值仿真](#)

Simulations of the cathode falling characteristics and its influence factors in atmospheric pressure dielectric barrier glow discharge pulse

物理学报.2017, 66(2): 025203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.025203>

[线-铝箔电极电晕放电激励器的推力理论与实验研究](#)

Theoretical and experimental study of thrust produced by corona discharge exciter in wire-aluminum foil electrode configuration

物理学报.2015, 64(10): 105204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.105204>

[雷云电场作用下长地线表面正极性辉光电晕放电的仿真研究](#)

Numerical simulation of positive glow corona discharge initiated from long ground wire under thundercloud field

物理学报.2015, 64(10): 105205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.105205>

[棒-板电极下缩比气隙辉光放电相似性的仿真研究](#)

Simulation on similarity law of glow discharge in scale-down gaps of rod-plane electrode configuration

物理学报.2014, 63(9): 095206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.095206>

## 氩氦射频容性放电发射光谱分析\*

张秩凡 高俊 雷鹏 周素素 王新兵 左都罗†

(华中科技大学武汉光电国家研究中心, 武汉 430074)

(2018年2月3日收到; 2018年4月18日收到修改稿)

光抽运亚稳态稀有气体激光器利用放电等离子体作为激光的增益介质. 为掌握容性射频放电的放电参数对等离子体各项参数的影响的基本规律, 利用等离子体发射光谱法研究了氩氦混合气体在不同装置、不同 Ar 组分、不同气压和不同射频注入功率下的等离子体参数. 利用残留水蒸气产生的 OH 自由基  $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$  的转动光谱分析获得气体温度; 利用电子态光谱的玻尔兹曼做图法获得电子激发温度, 利用 Ar 原子 696.5 nm 谱线的斯塔克展宽获得电子密度. 结果表明: 气体温度随气压增加略微上升, 在一个大气压下改变组分和放电功率, 气体温度变化不大; 电子激发温度随总气压的下降而上升, 且随着 Ar 组分的增加而略微下降; 目前放电条件下的电子密度均在  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  量级; 长时间放电监测表明, 残留的水蒸气会导致电子温度的下降, 从而降低 Ar 亚稳态的产率.

**关键词:** 光泵亚稳态氩气激光器, 射频放电, 发射光谱分析

**PACS:** 52.80.Hc, 51.50.+v

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180274

## 1 引言

光抽运亚稳态稀有气体激光器 (optically pumped metastable rare-gas lasers, OPRGLs) 量子效率高、具有获得高光束质量高功率激光输出的可能性, 并克服了 LD 抽运碱金属蒸气激光器 (diode-pumped alkali-vapor laser, DPAL) 中碱金属蒸气与缓冲气体反应, 污染腔体窗口的缺点, 近年来受到 Demyanov 等 [1], Rawlins 等 [2] 以及 Han 和 Heaven [3] 国外研究者的重视. 而在国内, Yang 等 [4] 和 Gao 等 [5] 也陆续跟进报道, 改进了模拟激光动力学过程的理论模型, 提出了新型的抽运方案. 在所有光抽运稀有气体激光体系中, 由于 Ar 的成本较低, 因此光泵氩气激光器成为此类研究的重点. 近年来 Rawlins 等 [2] 在流动氩氦混合气体中利用微等离子体阵列产生 Ar 亚稳态, 实现 22 mW 的激光输出, 光光转换效率达到 55%; Han 等 [6] 利

用 200 kHz 直流脉冲的放电方式在气压为 720 Torr (1 Torr  $\approx$  133.322 Pa) 流动条件下放电, 实现了 4.1 W 的激光输出. 国内该方向研究尚处于起步阶段, 高俊等 [7] 实现了静态射频放电的连续激光输出, 功率为 0.22 mW.

本文目的在于通过改变放电参数, 掌握等离子体各项参数变化的基本规律. 一般情况下通过放电激发氩气获得亚稳态. 射频放电与直流放电相比, 由于其较低的击穿电压和放电易自持等优点被广泛应用 [7-9]. 针对射频放电 Ar/He 气体等离子体展开研究, 重点分析与 OPRGL 相关的等离子体参数. 在研究中, 利用发射光谱计算得到等离子体的气体温度、电子激发温度和电子密度. 气体温度影响 He 和 Ar 各能级间的碰撞速率, 而电子激发温度 (近似与电子温度相等) 和电子密度是决定 Ar 亚稳态与其他粒子的电子碰撞激发速率以及能级间的弛豫速率的关键因素 [10].

\* 武汉光电国家实验室自主创新基金 (批准号: 0214187070) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zuoduluo@hust.edu.cn

## 2 实验装置

氦氩混合气体容性射频放电装置如图 1 所示. 实验装置主要由射频源、匹配网络、放电极板、真空腔、光谱仪组成. 实验使用了两套尺寸相同的放电极板, 其中一套为裸金属极板, 上极板为铝质, 下极板为铜质; 另外一套为介质阻挡放电 (DBD) 极板,

两个电极均为铝质, 表面镀氧化铝薄膜. 极板间的放电区体积为  $2\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 0.2\text{ cm}$ . 放电上电极接地, 下电极经匹配网络连接频率为  $13.56\text{ MHz}$  的射频源. 两电极放置于真空腔中, 放电前真空腔内气压由机械泵和分子泵抽至  $10^{-8}\text{ mbar}$  ( $1\text{ mbar} = 100\text{ Pa}$ ) 量级. 放电等离子体辉光经 19 芯光纤收集导入光谱仪 (SP2750, CCD PIXIS 100B, Princeton Instrument) 进行分析.

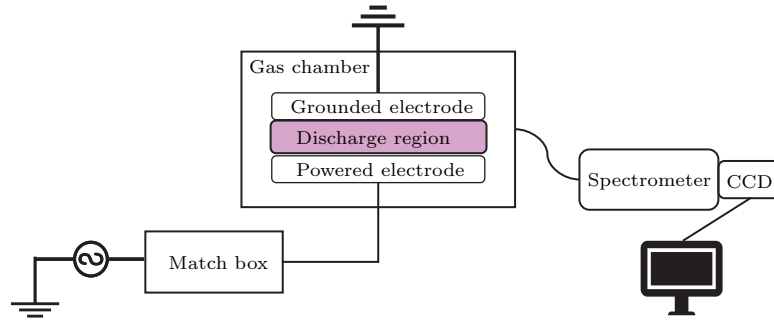


图 1 氦氩射频放电装置图

Fig. 1. Configuration diagram of He and Ar radio frequency discharge experimental step.

## 3 光谱分析方法

### 3.1 转动温度的计算

在低温等离子体中, 分子的转动能级差远小于平动能级差, 通过与重粒子的碰撞很容易达到热平衡, 该情况下可以认为转动温度近似于气体温度, 因此可用双原子分子的转动光谱来估算气体温度 [11]. 选用放电装置中残留水蒸气产生的 OH 自由基  $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$  能态间发射光谱的  $Q_1$  支 [12] 作为分析对象. OH 基从上能级  $J'$  跃迁到下能级  $J''$  发射谱强度  $I_{J'J''}$  为

$$I_{J'J''} = \frac{C_{em} \nu_{J'J''}^4}{Q_r} S_{J'J''} \exp\left(-\frac{F'_v(J'hc)}{kT_{rot}}\right), \quad (1)$$

其中  $C_{em}$  是发射系数,  $\nu_{J'J''}$  是跃迁波数,  $k$  是玻尔兹曼常数,  $S_{J'J''}$  是亨尔-伦敦系数,  $F'_v(J')$  是振动态  $\nu$  的转动项,  $h$  是普朗克常数,  $c$  是真空中光速,  $T_{rot}$  是转动温度. 对于 Q 支而言,  $S_{J'J''} = (2J' + 1)/4$ ,  $F'_v(J) = B_\nu J(J + 1)$ .  $B_\nu$  是振动态为  $\nu$  的转动常数, 这里取值为  $18.15\text{ cm}^{-1}$ , 因此 (1) 式可取对数得

$$\ln\left(\frac{I_{j'j''}}{2J' + 1}\right) = A - \frac{B_\nu J'(J' + 1)hc}{kT_{rot}}, \quad (2)$$

式中  $A$  为常数, 将  $\ln\left(\frac{I_{j'j''}}{2J' + 1}\right)$  作为纵坐标,  $J'(J' + 1)$  作为横坐标, 即可从斜率中算得转动温度, 得到的典型  $Q_1$  支谱图如图 2 所示.

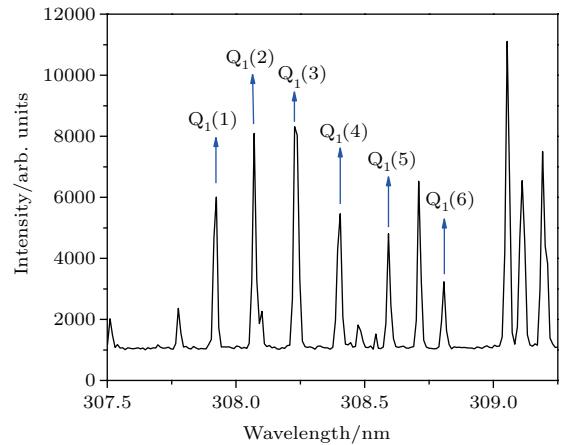


图 2 OH 基发射谱带 ( $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ )

Fig. 2. Spectrum of OH radical band ( $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ ).

### 3.2 电子激发温度的计算

在等离子体局域热平衡条件下, 获得电子激发温度的方法一般有双谱线法与玻尔兹曼做图法 [13]. 满足局域热平衡状态下的等离子体, 不同能级的粒子布居数的比值为

$$\frac{N_m}{N_{m'}} = \frac{g_m}{g_{m'}} \exp\left(-\frac{E_m - E_{m'}}{kT_e}\right), \quad (3)$$

式中  $N_m$  和  $N_{m'}$  分别代表  $m$  和  $m'$  能级的布居数,  $g_m$  和  $g_{m'}$  分别代表  $m$  能级和  $m'$  能级的统计权重,  $E_m$  和  $E_{m'}$  分别代表  $m$  能级和  $m'$  能级的能量,  $k$  代表玻尔兹曼常数,  $T_e$  代表电子激发温度. 当原子从  $J$  到  $J'$  能级跃迁发射出的谱线强度为

$$I_{JJ'} = N_J A_{JJ'} h \nu_{JJ'}, \quad (4)$$

式中  $A_{JJ'}$  是从  $J$  到  $J'$  能级的自发辐射概率,  $h$  是普朗克常数,  $\nu_{JJ'}$  是跃迁频率. 结合 (3) 式和 (4) 式, 两边取自然对数得

$$\ln \left( \frac{I_{JJ'}}{\nu_{JJ'} A_{JJ'} g_J} \right) = -\frac{E_J}{kT_e} + K, \quad (5)$$

式中  $K$  是谱线无关常数. 为了减少误差, 选择了能级差较大的 Ar 谱线, 以  $E_J$  为横坐标, 以  $\ln \left( \frac{I_{JJ'}}{\nu_{JJ'} A_{JJ'} g_J} \right)$  为纵坐标做图, 由斜率即可算出电子激发温度. 一般而言, 玻尔兹曼做图法较双谱线法应用了更多谱线的信息, 因此测温精度较高. 本文采用 420.07, 415.86, 419.83, 738.398, 763.5106, 794.8176, 800.6156, 810.3693, 811.5311, 826.4522, 842.4647, 840.821 nm 的谱线.

### 3.3 电子密度的计算

等离子体谱线的移动和展宽多年来已经被用作等离子体光谱诊断的重要技术. 在电子密度大于  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  情况下, 斯塔克展宽在原子谱线中具有重要影响, 因此利用斯塔克展宽可以对等离子体光谱进行诊断. 斯塔克展宽是由等离子体中的带电粒子和发射原子的库仑相互作用产生的<sup>[14]</sup>. 非氢类原子的斯塔克展宽与电子密度关系为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_s = & 2 \times [1 + 1.75 \times 10^{-4} n_e^{1/4} \alpha_i \\ & \times (1 - 0.068 n_e^{1/6} T_e^{-1/2})] \\ & \times 10^{-16} w_e n_e, \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $n_e$  为电子密度,  $\alpha_i$  为离子展宽系数,  $w_e$  为电子碰撞半高全宽.  $\alpha_i$  和  $w_e$  是与电子温度弱相关的系数, 根据文献<sup>[14]</sup>,  $\alpha_i$  和  $w_e$  取值如表 1 所列.

斯塔克展宽是由电子碰撞加宽和等离子体离子碰撞加宽决定的. 而实验中的等离子体的发射谱线受不同展宽机制影响, 比如多普勒展宽、自然展宽、仪器展宽和压力展宽. 压力展宽中又分为范德瓦耳斯展宽、共振展宽和斯塔克展宽. 在高压等离子体中, 谱线展宽主要是受到气体压强和粒子热运

表 1 电子密度计算的相关参数在不同电子温度下的取值  
Table 1. Related parameter value under different electron temperature for calculation of electron density.

$T_e/\text{K}$	$w_e/\text{nm}$	$\alpha_i$
5000	0.00409	0.040
10000	0.00537	0.032
40000	0.00873	0.023

动影响, 此情况下其他机制的展宽都表现得足够小<sup>[15]</sup>, 需要考虑到展宽主要为多普勒展宽、仪器展宽、范德瓦耳斯展宽和斯塔克展宽. 其中, 多普勒展宽是高斯线型, 范德瓦耳斯展宽和斯塔克展宽是洛伦兹线型, 仪器展宽需要具体分析. 范德瓦耳斯展宽与气体温度的关系为<sup>[16]</sup>  $\Delta\lambda_v = 1.52a/T_g^{0.7}$ , 其中  $a$  是放电总气压与大气压的比值,  $T_g$  是气体温度.

实际在实验中得到的谱线是沃特线型, 该线型由高斯线型和洛伦兹线型卷积得到. 因此先对实验得到的谱线去卷积得到总洛伦兹线宽, 进而求得斯塔克展宽, 再由 (6) 式得到电子密度.

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 转动温度

转动温度由 OH 自由基的发射谱 ( $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ ) 的  $Q_1$  带做玻尔兹曼图得到, 再利用 lifbase 软件模拟计算所得到的该温度下的光谱图, 并与实验测得的光谱对比. 图 3 展示了 65 W 放电功率下, Ar 含量为 1% 的氩氦混合气体, 在 1 atm ( $1 \text{ atm} = 1.01 \times 10^{15} \text{ Pa}$ ) 气压下的实验光谱图与模拟图, 玻尔兹曼做图计算得到温度为 415.97 K, lifbase 光谱模拟使用温度为 410 K. 实验中, 分别以放电功率、气压和 Ar 含量为变量测得光谱图, 再利用发射谱计算得到不同参数下的转动温度, 从而估计等离子体气体温度.

图 4 为裸金属极板放电在不同放电功率和不同气压下气体温度的变化, Ar 的含量均为 2%. 可以看出随着气压增加气体温度略有升高, 从 400 K 变为 450 K. 这是因为随着气压增加中性粒子数密度也随之增加, 电子与中性粒子间的碰撞更频繁, 更多能量转移给中性粒子, 使得气体温度增加. 实验中还发现, 维持稳定的辉光放电的临界功率都随着气压升高而增加, 这是由于在低压下腔内粒子较

少, 局部电离时更容易产生大电流, 从而由辉光放电转为弧光放电. 两种放电极板在一个大气压的不同组分下的气体温度变化不大, 均在 440 K 左右, 且随着功率变化, 其起伏相差不大, 这可能是因为氩气含量对中性粒子的能量影响较小.

点从 0.5% 到 6.5% Ar 组分下的电子温度, 发现电子温度随着组分上升而下降, 这可能是因为随着 Ar 含量的增加, 会有更多二次电子产生, 为了维持电离过程和离子逃逸损失的平衡, 主体区的电子温度会下降以防止多余的电离过程发生 [18]. 图 6 展

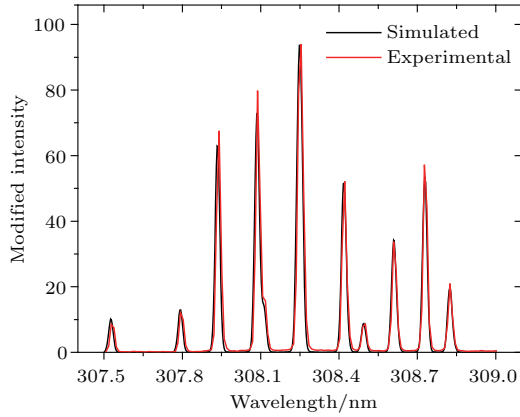


图 3 OH 自由基发射谱的实验光谱与模拟光谱  
Fig. 3. Experimental spectrum and simulated spectrum of OH radical.

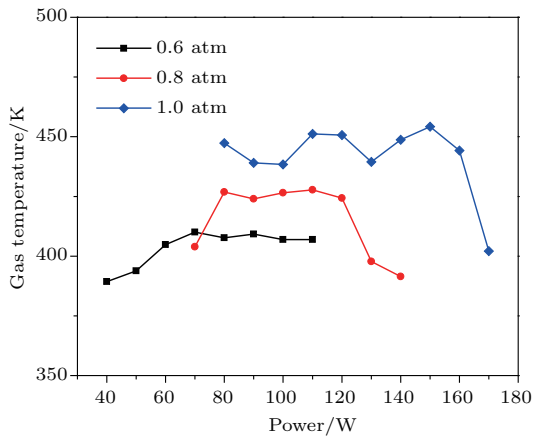


图 4 氦氩混合气体在不同气压和放电功率下的气体温度  
Fig. 4. Gas temperature of helium and argon mixture at different pressure and discharge power.

## 4.2 电子激发温度

不同组分下电子温度与放电功率的关系如图 5 所示. 图 5 (a) 展示了使用裸金属极板在一个大气压条件下改变 Ar 组分多次实验的结果, 发现不同组分下获得稳定辉光放电的放电功率临界值不同, 在 4% 组分下放电功率区间最小, 当 Ar 组分为 5% 时无法获得稳定的辉光放电, 这与 Niermann 等 [17] 在大气压下所做的 He-Ar 等离子体射频放电所得结果相同. 图 5 (b) 展示了使用 DBD 放电极板, 在一个大气压下测量 100 W 和 170 W 两个功率

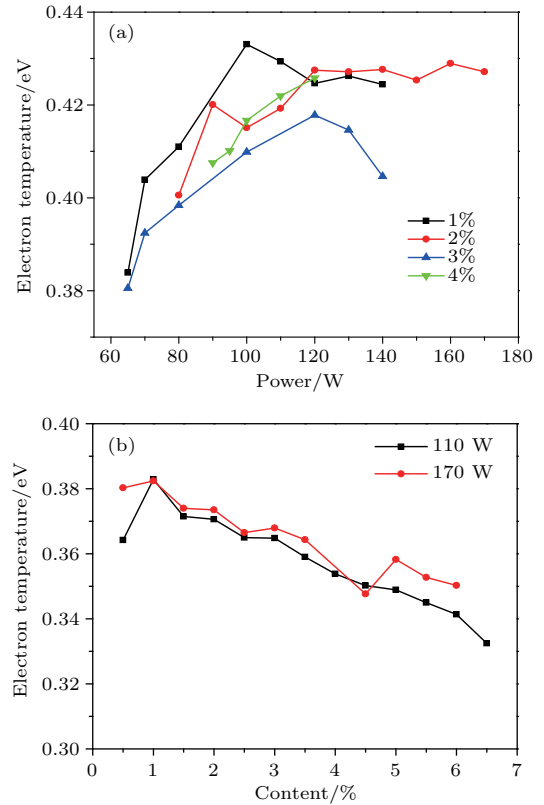


图 5 大气压在不同 Ar 组分以及不同放电功率下的电子温度 (a) 裸金属; (b) DBD  
Fig. 5. Electron temperature of helium and argon mixture at an atmosphere, different discharge power and different concentration of Ar: (a) Bare electrode; (b) DBD electrode.

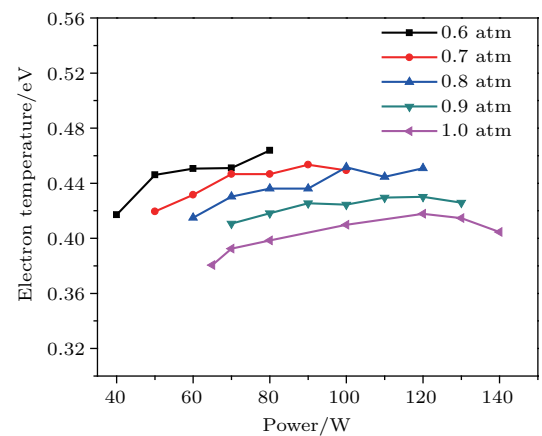


图 6 氦氩混合气体在不同气压和放电功率下的电子温度  
Fig. 6. Electron temperature of helium and argon mixture at different pressure and discharge power.

示了裸金属极板在3% Ar含量时不同气压和放电功率下的电子温度变化. 可以看出电子温度随气压增加而降低, 且注入的功率对其影响不大, 这与Wust<sup>[19]</sup>得到的实验结果一致, 相同情况在DBD极板中也能观察到.

### 4.3 电子密度

使用Ar光谱标定灯在696.54 nm处测仪器展宽, 谱线用沃特线型拟合, 去卷积后得到其洛伦兹展宽为0.00499 nm. 对测得的光谱展宽去卷积得到总洛伦兹展宽, 根据气体温度计算得到范德瓦耳斯展宽进而求得斯塔克展宽, 再由(6)式可得电子

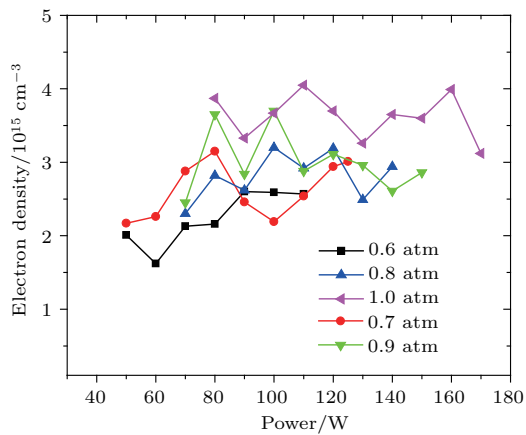


图7 氦氩混合气体在不同气压和放电功率下的电子温度  
Fig. 7. Electron temperature of helium and argon mixture at different pressure and discharge power.

密度. 图7展示了在2%组分Ar含量下使用裸金属极板在不同气压和放电功率下的电子密度情况, 可以看到电子密度范围为 $(1.5-5.0) \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 且随着功率增长电子密度变化不大, 相同情况在DBD放电极板下也能观察到, DBD极板的电子密度范围为 $(0.9-5.6) \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

### 4.4 长时间放电测试

为了研究长时间放电情况下不同粒子的发射光谱的变化, 实验中以6 min为间隔测试了共180 min的两套放电极板的长时间放电情况, 结果如图8所示. 选取OH自由基309.09 nm<sup>[12]</sup>, N<sub>2</sub>的第二正带337.1 nm<sup>[20]</sup>, O原子844.6 nm<sup>[21]</sup>, Ar原子811.53 nm (2p<sub>9</sub> → 1s<sub>5</sub>), 763.51 nm (2p<sub>6</sub> → 1s<sub>5</sub>), 418.18 nm (3p<sub>2</sub> → 1s<sub>3</sub>)的特征谱线对放电等离子体进行监测. 图8显示, 418.18 nm谱线的光谱强度随放电时间下降, 811.53 nm谱线的光谱强度随放电时间上升, 表明长时间放电的过程中电子激发温度略有下降. 同时309 nm谱线的光谱强度随时间明显上升, 表明OH自由基的粒子数密度随时间持续增长, 这可能是由于放电装置吸附的或者是放电气体代入的微量水蒸气的影响. 水蒸气的存在使得电子所激发的亚稳态Ar原子先将能量传给水分子的某一电子激发态振转能级, 使水分子处于一超电子激发态然后迅速离解为OH自由基. 因此, 水蒸气

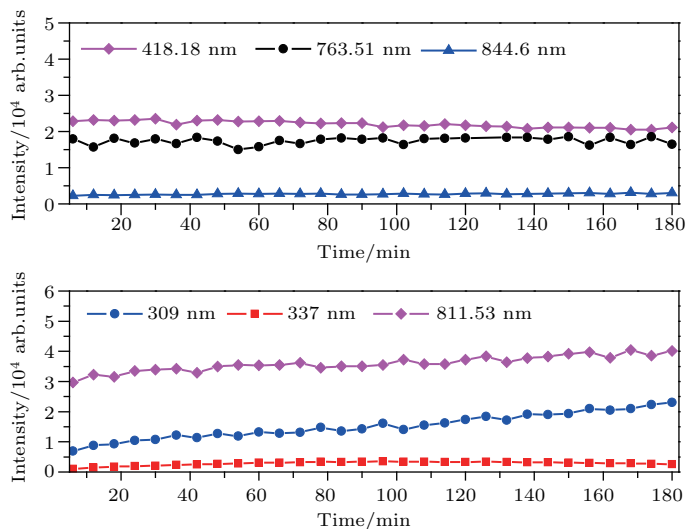


图8 裸金属极板放电装置的长时间放电测试中观测了OH自由基的309 nm, N<sub>2</sub>的337 nm, O原子的844 nm, Ar原子的811.53 nm (2p<sub>9</sub> → 1s<sub>5</sub>), 763.51 nm (2p<sub>6</sub> → 1s<sub>5</sub>), 418.18 nm (3p<sub>2</sub> → 1s<sub>3</sub>)的特征谱线  
Fig. 8. Characteristic spectral line of OH radical at 309 nm, N<sub>2</sub> at 337 nm, Oxygen atom at 844 nm, Argon atom at 811.53 nm (2p<sub>9</sub> → 1s<sub>5</sub>), 763.51 nm (2p<sub>6</sub> → 1s<sub>5</sub>) and 418.18 nm (3p<sub>2</sub> → 1s<sub>3</sub>) are observed in long time discharge test of bare electrode discharge device.

的存在一定程度上会降低亚稳态 Ar 原子的产率. 此外,  $N_2$  和 O 的光谱强度较弱且大致保持不变, 说明了实验所用的真空腔的气密性较好, 残留的  $N_2$  和  $O_2$  可能对放电的影响不大.

## 5 结 论

采用裸金属极板和 DBD 极板, 使用 13.56 MHz 射频放电方式对氦氩混合气体放电, 并利用发射光谱的方法对等离子体进行诊断, 得出等离子体的气体温度、电子温度和电子密度三个重要参数及其变化规律. 结果发现, 气体温度随气压增加而上升, 但在一个大气压下改变放电功率和组分对气体温度影响不大, 在本实验装置中约为 440 K; 对于电子激发温度, 降低气压能够有效提升电子温度, 但是综合考虑到更高的气体温度能够提高 He 和 Ar 各能级间的碰撞速率以及更高的电子温度能够提高 Ar 亚稳态的生成速率, 适当加热气体温度并降低总气压是一个折中的办法; 电子密度在不同气压、不同装置、不同组分和不同放电功率下都在  $10^{15}$  量级; 在长时间放电情况下水蒸气的存在会降低电子温度从而减少 Ar 亚稳态生成速率, 建议对充入的气体干燥处理以除去水蒸气.

## 参考文献

- [1] Demyanov A V, Kochetov I V, Mikheyev P A 2013 *J. Phys. D* **46** 375202
- [2] Rawlins W T, Galbally-Kinney K L, Davis S J, Hoskinson A R, Hopwood J A, Heaven M C 2015 *Opt. Express* **23** 4804
- [3] Han J, Heaven M C 2015 *Opt. Lett.* **40** 1310
- [4] Yang Z N, Yu G Q, Wang H Y, Lu Q S, Xu X J 2015 *Opt. Express* **23** 13823
- [5] Gao J, He Y Y, Sun P F, Zhang Z F, Wang X B, Zuo D L 2017 *J. Opt. Soc. Am. B* **34** 814
- [6] Han J, Heaven M C, Moran P J, Pitz G A, Guild E M, Sanderson C R, Hokr B 2017 *Opt. Lett.* **42** 4627
- [7] Gao J, Zhang Z F, Lei P, Wang X B, Zuo D L 2018 *High Power Laser and Particle Beams* **30** 010102 (in Chinese) [高俊, 张秩凡, 雷鹏, 王新兵, 左都罗 2018 强激光与粒子束 **30** 010102]
- [8] Niermann B, Reuter R, Kuschel T, Benedikt J, Boke M, Winter J 2012 *Plasma Sources Sci. Technol.* **21** 034002
- [9] Balcon N, Hagelaar G, Boeuf J P 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 2782
- [10] Eshel B, Perram G P 2018 *J. Opt. Soc. Am. B* **35** 164
- [11] Wu Q 2010 *M. S. Thesis* (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [武启 2010 硕士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [12] Li S Z, Huang W T, Wang D Z 2009 *Phys. Plasmas* **16** 093501
- [13] Wu R, Li Y, Zhu S G, Feng H Y, Zhang L, Wang J D 2008 *Spectrosc. Spect. Anal.* **28** 731 (in Chinese) [武蓉, 李燕, 朱顺官, 冯红艳, 张琳, 王俊德 2008 光谱学与光谱分析 **28** 731]
- [14] Dong L F, Ran J X, Mao Z G 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 161501
- [15] Dong L F, Qi Y Y, Liu W Y, Fan W L 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 013301
- [16] Dong L F, Liu W Y, Yang Y J, Wang S, Ji Y F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 045202 (in Chinese) [董丽芳, 刘为远, 杨玉杰, 王帅, 嵇亚飞 2011 物理学报 **60** 045202]
- [17] Niermann B, Boke M, Sadeghi N, Winter J 2010 *Eur. Phys. J. D* **60** 489
- [18] Lieberman M A, Lichtenberg A J (translated by Pu Y K) 2011 *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (Beijing: Science Press) pp325–326 (in Chinese) [迈克 A 力伯曼, 阿伦 J 里登伯格 著 (蒲以康译) 2011 等离子体放电原理与材料处理 (北京: 科学出版社) 第 325—326 页]
- [19] Wust K 1992 *Rev. Sci. Instrum.* **63** 2581
- [20] Zhai X D, Ding Y J, Peng Z M, Luo R 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 123301 (in Chinese) [翟晓东, 丁艳军, 彭志敏, 罗锐 2012 物理学报 **61** 123301]
- [21] Hibbert A, Biémont E, Godefroid M, Vaeck N 1991 *J. Phys. B* **24** 3943

# Emission spectral diagnosis of argon-helium plasma produced by radio frequency capacitive discharge\*

Zhang Zhi-Fan Gao Jun Lei Peng Zhou Su-Su Wang Xin-Bing Zuo Du-Luo<sup>†</sup>

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

( Received 3 February 2018; revised manuscript received 18 April 2018 )

## Abstract

Optically pumped metastable rare-gas laser (OPRGL) have been proposed to overcome the shortcomings of diode-pumped alkali-vapor laser in the recent years. The OPRGL promises to realize high-scale output. But how to achieve enough particle density of metastable atoms is still an open problem. Usually, plasma produced by discharge serves as a gain medium of the OPRGL. Here in this paper, we are to reveal the effects of different discharge parameters on the plasma properties, such as particle density of metastable argon atoms. Gas discharge at a radio frequency of 13.56 MHz is adopted to excite argon atoms. Emission spectrum is employed to study argon and helium radio frequency discharge of optically pumped argon laser at high pressure, different powers of discharge and various content of argon. Gas temperature is obtained by analyzing rotational spectrum ( $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ ) of OH radical generated by residual water vapor and comparing simulated spectrum with the measured spectrum. The electronic excitation temperature relating to electron temperature is obtained by the method of Boltzmann's plot. Stark broadening of the spectrum is used to determine the electron density. The results show that gas temperature rises slightly with the increase of pressure and varies little with content and discharge power changing. The electronic excitation temperature increases with the decrease of pressure evidently and decreases slightly with the increase of content. The electron density is on the order of  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  under various conditions controlled by us. Long time discharge test reveals that residual water vapor can lead to the decrease of electron temperature, and thus reducing the yield of argon metastable state. In conclusion, considering that the higher gas temperature can improve the collision relaxation rate of helium and argon, and the higher electron temperature can improve the rate of production of argon metastable state. Thus a proposal is put forward that appropriately heating gas and reducing gas pressure can obtain higher particle density of metastable argon. Furthermore, It can be found from these results that heating and cleaning the gas during discharge may be candidate methods to obtain and sustain the higher particle density in the plasma.

**Keywords:** optically pumped metastable argon laser, radio frequency discharge, emission spectroscopy analysis

**PACS:** 52.80.Hc, 51.50.+v

**DOI:** [10.7498/aps.67.20180274](https://doi.org/10.7498/aps.67.20180274)

\* Project supported by the Foundation for Innovation of Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, China (Grant No. 0214187070).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zuoduluo@hust.edu.cn](mailto:zuoduluo@hust.edu.cn)