

# 基于发射光谱法的螺旋波电推进器等离子体源 放电实验研究\*

段朋振<sup>1</sup>, 李益文<sup>2</sup>, 翟旭升<sup>1</sup>, 张圣武<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 航空机务士官学校, 河南 信阳 464000;  
2. 空军工程大学 等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038)

**摘要:** 为探究不同气体条件下螺旋波电推进器等离子体源的放电特征, 开展了氩气、氦气和氮气放电的光谱诊断实验研究。氩气和氦气为工质气体的放电条件下, 部分波长谱线相对强度随功率的增加而增强, 且斜率出现两次跳变, 考虑是螺旋波放电过程中的模式转换, 即容性向感性、感性向波模式的转换。三种工质气体, 在较低的压强下, 各谱线强度均随压强增大而迅速增强, 但氩气放电下压强继续增大达到1.0Pa以后, 谱线强度增强趋势变缓甚至达到“饱和”状态, 而氦气和氮气放电下压强增大到0.5~0.65Pa, 谱线强度出现降低趋势, 氦气和氮气放电强度对压强更为敏感。

**关键词:** 电推进器; 螺旋波等离子体; 放电实验; 工质气体; 发射光谱法

中图分类号: V439<sup>+</sup>.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 06-200083-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200083

## Experimental Research on Plasma Source Discharge of Helicon Wave Electric Thruster Based on Optical Emission Spectroscopy

DUAN Peng-zhen<sup>1</sup>, LI Yi-wen<sup>2</sup>, ZHAI Xu-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Sheng-wu<sup>2</sup>

(1. Aviation Maintenance NCO School, Air Force Engineering University, Xinyang 464000, China;  
2. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to explore the discharge characteristics of the plasma source of helicon wave electric thruster under different gas conditions, a spectral diagnostic experiment of argon, helium and nitrogen discharges was carried out. Under the discharge condition of argon and helium as working gas, the relative intensity of some wavelength lines increases with the increase of power, and the slope shows two jumps. Considering it is the mode transition in the helicon discharge process, that is, the transition of capacitive-to-inductive and inductive-to-wave modes. For the three working gas, at lower pressures, the relative intensity of each line increases rapidly with the increasing pressure. However, after the pressure continues to increase to 1.0Pa under argon discharge, the line intensity increases slowly or even reaches saturation. The pressure of helium and nitrogen discharge increases to 0.5~0.65Pa, the intensity of the line decreases. And the discharge intensity of helium and nitrogen is more sensitive to pressure.

\* 收稿日期: 2020-02-25; 修订日期: 2020-08-20。

基金项目: 国家自然科学基金 (51776222; 61627901)。

作者简介: 段朋振, 硕士, 讲师, 研究领域为航空及航天推进系统。

通讯作者: 李益文, 博士, 副教授, 研究领域为等离子体推进技术、磁流体放电等。

引用格式: 段朋振, 李益文, 翟旭升, 等. 基于发射光谱法的螺旋波电推进器等离子体源放电实验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(6):200083. (DUAN Peng-zhen, LI Yi-wen, ZHAI Xu-sheng, et al. Experimental Research on Plasma Source Discharge of Helicon Wave Electric Thruster Based on Optical Emission Spectroscopy[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(6):200083.)

**Key words:** Electric thruster; Helicon wave plasma; Discharge experiment; Working gas; Optical emission spectroscopy

## 1 引言

在相近的功率和工质气体压强下,螺旋波等离子体密度相对于其他射频放电模式(容性放电或感性放电)高近一个数量级<sup>[1-2]</sup>,螺旋波等离子体源借助其非同寻常的高电离效率,近年来逐渐受到航天电推进领域的青睐。目前,有多种空间电推进器采用螺旋波放电作为等离子体源,比如可变比冲等离子体火箭(Variable specific impulse magnetoplasma rocket, VASIMR)<sup>[3-4]</sup>、螺旋波双层推力器(Helicon double layer thrusters, HDLT)<sup>[5]</sup>和微型螺旋波推力器(Mini-Helicon plasma thruster, mHPT)<sup>[6]</sup>等。

螺旋波放电经历了由容性放电向感性放电以及由感性放电向螺旋波放电的模式转换<sup>[7-9]</sup>。在低磁场或者低功率条件下,天线以容性方式将功率耦合到等离子体中;随着功率的增加,等离子体密度跃升,但是并不足以维持波耦合模式,即不能满足螺旋波传播的色散关系,放电进入感性模式阶段;进一步增加功率导致密度再次跃升,使得放电模式转变为螺旋波放电。当放电进入螺旋波放电模式后,特定长度的天线激发出波长一定的螺旋波,此时等离子体密度与磁场强度成比例<sup>[9-11]</sup>。螺旋波传播的色散关系式为

$$k_{\omega}^2 \equiv \omega\omega_p^2/(\omega_c c^2) = \omega n_0 c \mu_0 / B_0 \quad (1)$$

式中 $k$ 为波矢, $\omega$ 为激发频率, $\omega_p$ 和 $\omega_c$ 分别为等离子体频率和电子回旋频率, $c$ 为光速, $\mu_0$ 为真空磁导率, $B_0$ 为磁场强度, $n_0$ 为等离子体密度。

在较低压强范围,无碰撞加热机制为主要功率耦合机制;而在高压强范围,电子-中性粒子碰撞频率更高,碰撞加热占据优势<sup>[9]</sup>。无碰撞电子加热通过

波的电磁场和等离子体电子之间直接或间接相互作用产生,无碰撞加热机制非常复杂,国际上已争论多年目前仍未达成一致见解<sup>[9,12-14]</sup>。对于放电特性以及放电过程的诊断与测量,是揭示螺旋波放电机理和功率耦合模式的重要途径。

目前的诊断手段主要是介入式,包括朗缪尔探针和磁探针等方法<sup>[15-17]</sup>,对于发射光谱法(Optical emission spectroscopy, OES)的研究较少且不深入。OES的测量过程,不干扰放电、灵敏度高、响应速度快,是对放电过程进行诊断和监测最常应用的方法之一<sup>[18-19]</sup>。本文采用OES诊断方式,研究功率和气压的变化对螺旋波等离子体放电特性的影响,放电工质气体为氩气、氦气和氮气。

## 2 实验系统

图1为螺旋波等离子体源放电实验系统,主要包括射频电源及阻抗匹配器、电磁铁、螺旋波天线、抽真空系统、工质气体供应系统、光谱诊断系统等。

SY型射频电源,最大输出功率10kW,频率固定为13.56MHz,阻抗匹配网络为L型。右手螺旋型天线材质为纯紫铜,内径10cm,长20cm。放电腔室为筒型石英管,内径9cm,厚0.5cm,长60cm。采用Avaspec-2048-M型四通道光谱仪采集等离子体放电腔室200~960nm内的谱线相对强度。光纤探头放置在放电区域以外,正对于天线中部。在中、高功率条件下,等离子体宏观温度高、电势强,对于朗缪尔探针这类介入式诊断设备有严重的烧蚀现象,不利于数据的准确采集,亦有可能损坏设备,OES方法克服了等离子体烧蚀等问题。

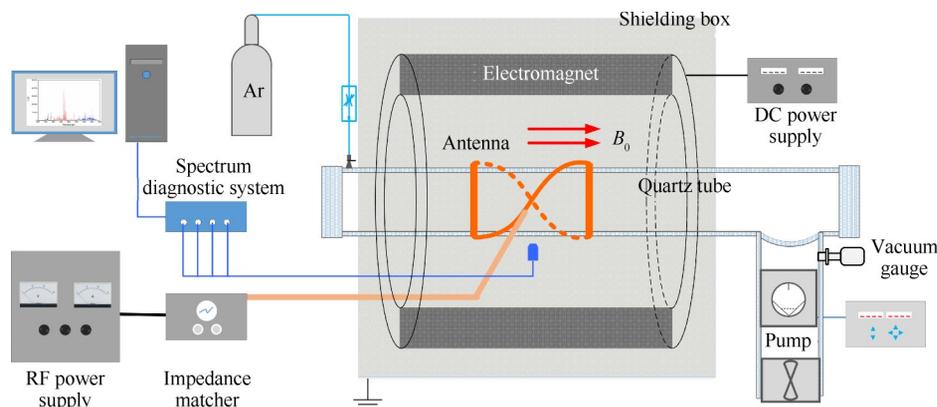


Fig. 1 Schematic diagram of helicon plasma source discharge experiment

### 3 实验结果

#### 3.1 氩气放电实验

##### 3.1.1 氩气放电的光谱特征

在 1060W 射频功率, 0.78Pa 气体压强、磁场强度 200G 条件下, 得到的螺旋波放电全谱线图如图 2 所示, 图中蓝色谱线范围(740~920nm)主要为氩原子发射谱线; 红色谱线范围(400~500nm)主要为氩离子发射谱线。由图可知, 氩原子 Ar I 的谱线强度远远高于氩离子 Ar II, 因为氩离子的激发能明显高于氩原子。当氩离子谱线强度相对较大时, 表明电子携带的能量多、电离能强, 此时放电强度较大<sup>[20]</sup>。

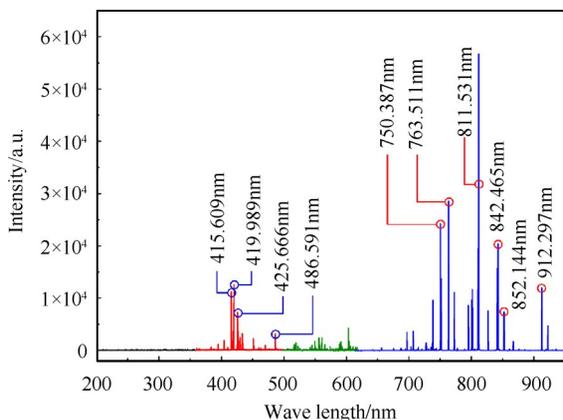


Fig. 2 Optical emission spectrum of helicon Ar discharge

##### 3.1.2 功率对氩气放电的影响

螺旋波放电的激发是经过两个放电模式的递进, 逐步形成的。最初, 功率或场强较低时, 天线的静电电位容性地耦合到近壁面气体, 并将气体击穿为弱电离等离子体; 随着功率和场强增加, 天线的波动磁场在管内部诱导出强电场, 等离子体密度向上跃升, 但此时密度依然没有足够高到满足色散关系式(1), 其为非共振感性耦合等离子体(ICP); 最后, 当等离子体密度满足式(1), 产生螺旋波, 密度发生第二次跳变, 即实现螺旋波放电。随着放电模式的转变, 电子数密度会在同一数量级甚至不同数量级之间发生跳变, 同时, 放电强度也会发生显著变化。图 3 是 Boswell 在其 WOMBAT (Waves on magnetized beams and turbulence) 装置中得到的随功率增加的放电模式转变<sup>[21]</sup>, 其中 E 为容性放电模式, H 为感性放电模式, W 为波耦合放电模式(即为螺旋波放电模式)。

在流量 15mL/min, 压强 0.73Pa, 磁场强度为 100G 放电条件下, 对波长为 415.608nm 和 486.591nm 的氩

离子 Ar II 谱线进行采集, 这两条谱线均由氩离子 5s-4p 能级跃迁激发, 相对强度随输入功率的变化特征如图 4 所示。从图中可以看出分别在 300W 和 1000W 处, 曲线斜率发生明显变化, 放电经历了两个模式转变, 即容性放电在 300W 左右向感性放电的转变, 感性放电在 1000W 左右向螺旋波放电的转变。

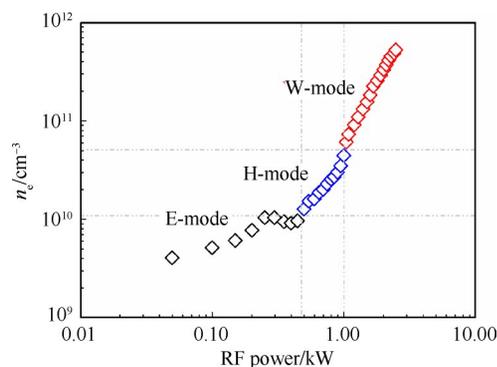


Fig. 3 E to H to W transition in WOMBAT

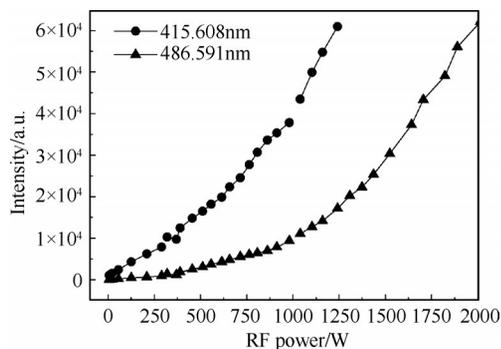


Fig. 4 Curve of intensity of Ar II spectral line vs RF power

可以看出, 在容性放电阶段, 基本上未能激发 486.591nm 谱线, 在感性模式下谱线强度依然较低, 而在螺旋波放电模式下相对强度迅速增大。由此可见, 通过部分特征谱线的光谱发射状态或光强值可以判断放电状态。415.608nm 谱线的上能级激发能相比于 486.591nm 谱线高 0.078eV, 但前者的跃迁概率为后者的 2.6 倍, 因此 415.608nm 谱线的相对光强变化率要高于 486.591nm 谱线。

##### 3.1.3 压强对氩气放电的影响

在 1500W 射频功率, 100G 磁场强度条件下, 改变工质气体压强, 对氩离子 Ar II 谱线强度(400~450nm) 进行采集分析, 图 5 为部分谱线的相对强度随气体压强的变化曲线。从图中可以看出, 氩离子谱线相对强度达到较高的量级, 在较低氩气压强范围(0.2Pa <  $p_{Ar}$  < 1.0Pa), 随着氩气压强的增大, 等离子体光强迅速增强, 当压强增大到 1.0Pa 以上, 增长趋势逐渐变缓, 425.666nm 谱线的相对强度达到“类饱和”状态, 停止

增长。

由于740~920nm区间内的氩原子谱线相对强度值大,在同等放电条件下,光谱仪对该区间内的部分谱线测量值已达到饱和,需适当调整放电条件和积分时间。在1000W射频功率,200G磁场强度条件下,增加氩气流量调节气体压强,测量氩原子谱线相对强度,观察到了与氩离子谱线强度相同的变化特征,即随压强增大谱线强度增加,当压强大于1.0Pa时达到“类饱和”状态。

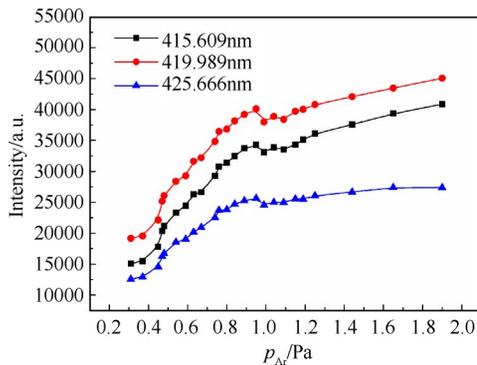


Fig. 5 Curve of intensity of Ar II spectral line vs gas pressure

### 3.2 氦气放电实验

氦气相对于氩气和氮气,具有较高的电离能,甚至激发能(19.8eV)都远高于氩气和氮气的一级电离能,并且氦气的分子量小。

#### 3.2.1 氦气放电的光谱特征

图6为0.2Pa气体压强,200G磁场强度和1430W射频功率条件下,氦气放电的全谱线图。氦原子及氦离子谱线主要集中在350~750nm内,具体谱线波长已在图中标注。从图中仅观察到1条一阶离子能级跃迁激发的谱线——He II 656.02nm谱线,且谱线相对强度较原子谱线非常弱。

He II谱线的上能级激发能 $E_k$ 为52.906eV,远高于He I的激发能(23eV量级),可见,在较高功率条件下,等离子体中存在较高能量的电子,高能电子的出现是朗道阻尼作用机理的具体体现。

#### 3.2.2 功率对氦气放电的影响

图7为两种压强条件下氦离子656.02nm谱线相对强度随功率的变化特征,磁场强度为200G。前文已经提到,该波长谱线激发能较高,当其谱线强度达到一定水平,可以认为放电强度较大。可以看出,随着功率的增加,谱线相对强度增长趋势出现两次跳变,对应于螺旋波放电过程中的两次模式转变。两种气压条件下,均是在300W和750W附近发生跳变。

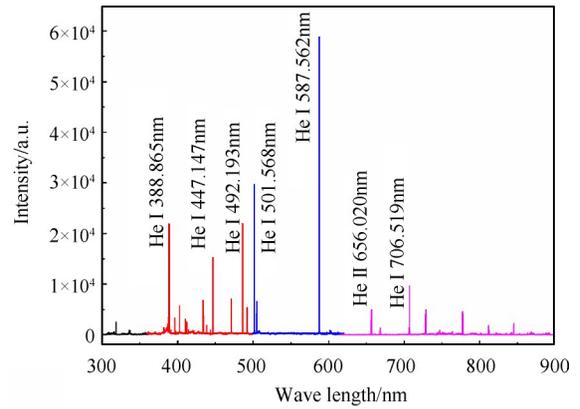


Fig. 6 Optical emission spectrum of helicon He discharge

螺旋波放电模式下,功率耦合效率更高,由朗道阻尼或其他无碰撞加热模式将功率输送到电子中,一部分高能电子的出现能够更有效地提高放电强度和等离子体密度。另外,0.8Pa气压放电条件下谱线相对强度随功率的增长斜率要略高于0.2Pa放电谱线的增长率,因为适当增大气体压强,能够提高放电效率、增加放电强度。

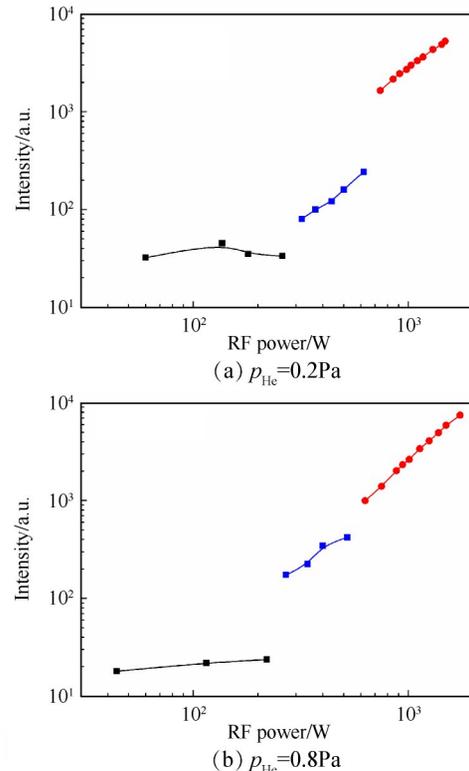


Fig. 7 Variation characteristics of relative intensity of He II 656.02nm line with power

同以上实验条件,得到如图8所示501.568nm和587.562nm波长谱线相对强度随功率的变化曲线。低功率下501.568nm谱线优势明显,但587.562nm谱线增长速率更快,与二者的激发能有关。从图中还

可以看出,低功率条件下谱线强度增长缓慢,中等功率下增长迅速,这为螺旋波放电所需要的密度条件打下基础,因为放电从感性模式转变为波耦合模式要求满足螺旋波的色散关系。

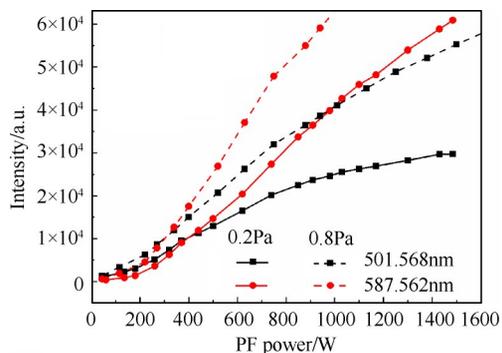
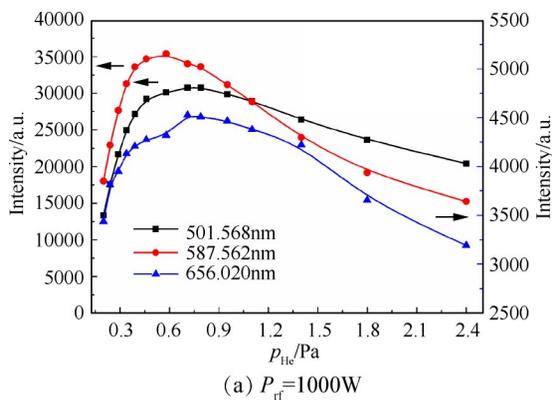


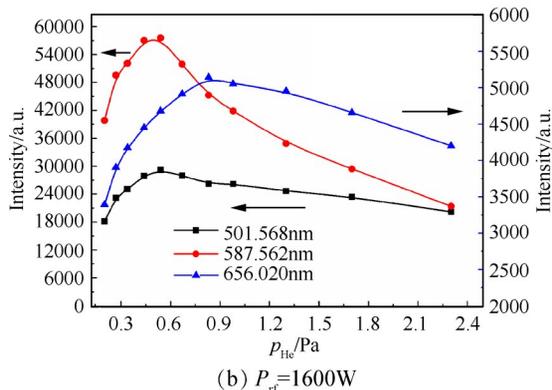
Fig. 8 Variation characteristics of relative intensity of He I line with power

### 3.2.3 压强对氦气放电的影响

气体压强一方面影响碰撞频率,另一方面还会影响天线功率的耦合效率,进而影响放电强度等。图 9 为 1000W 射频功率  $P_{rf}$  和 1600W 射频功率下,改变氦气压强得到的谱线相对强度变化趋势,磁场强度为 200G。图中蓝色点线为 656.020nm 波长谱线的变化曲线,对应于右侧蓝色纵坐标。



(a)  $P_{rf}=1000W$



(b)  $P_{rf}=1600W$

Fig. 9 Characteristics of line relative intensity changing with He pressure under different power conditions

相比于氩气放电,氦气放电强度对气压更为敏感,从图中可以看出,谱线相对强度在 0.5Pa 附近达到峰值,此处放电最强。在气压小于 0.5Pa 时,随着压强增大,放电强度迅速增强,在从 0.25~0.5Pa 压强变化范围内,部分谱线的强度增加了近 1.5~2.5 倍。当压强达到 0.5Pa 以后,放电强度开始随压强增大而降低,其中 501.568nm 谱线强度降低趋势较缓,氦离子 656.020nm 谱线的峰值较其他谱线有延后。气压增大导致碰撞频率增加,当碰撞频率增加到一定水平,将会抑制波的无碰撞加热效应,导致功率耦合降低。

## 3.3 氮气放电实验

### 3.3.1 氮气放电的光谱特征

图 10 为 1030W 射频功率,200G 磁场强度,0.5Pa 气体压强条件下的氮气放电全谱线图。氮气分子产生的发射光谱主要包括<sup>[22]</sup>:第一正带系(First positive systems, FPS)、第二正带系(Second positive systems, SPS)、Gaydon's green 带系和 Herman's IR 带系,另外还有氮原子谱线。第二正带系是由  $N_2(C^3\Pi_u)$  向  $N_2(B^3\Pi_g)$  跃迁产生,从图中可以看出,SPS 是全谱线中最强最清晰的谱线带,电子与分子直接碰撞激发产生  $C^3\Pi_u$ ,过程见式(2)。

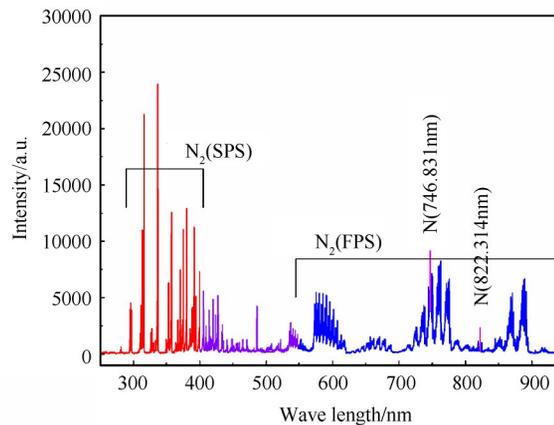
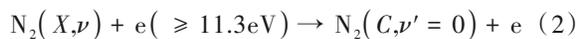


Fig. 10 Optical emission spectrum of helium  $N_2$  discharge



### 3.3.2 功率对氮气放电的影响

在 200G 磁场强度,0.5Pa 气体压强条件下,增加射频输入功率,得到如图 11 所示的谱线变化趋势。在 1kW 以下的射频输入功率下,氮原子激发谱线非常弱,当功率达到 1400W 以上时逐渐凸显,如图 10 中的 746.831nm 和 822.314nm 两条谱线。746.831nm 谱线的下能级激发能只有 11.996eV,而 822.314nm 谱线的下能级激发能也只有 11.837eV,应该可以说是很容易激发光谱的,在低功率条件下两条谱线较弱,一方面

原因是氮原子不稳定,易复合成氮气分子,另一方面可能是由于功率耦合效率低。

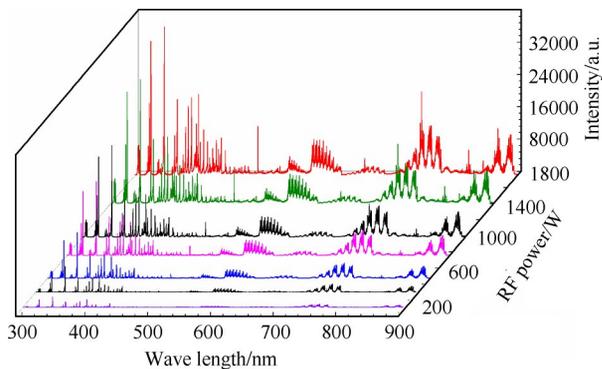


Fig. 11 Variation characteristics of spectral line graph with power

### 3.3.3 压强对氮气放电的影响

图12为氮气光谱SPS带系中337.1nm波长谱线,在1100W和1600W射频功率下随气体压强的变化特征,磁场强度为200G。该波长谱线在全谱线带中最为突出,相对谱线强度最强,因此对于放电强度的变化最为敏感。氮气放电的谱线相对强度同样是随压强的增大先迅速增强而后逐渐减弱。在1100W功率条件下,谱线峰值出现在0.65Pa附近,而1600W射频输入下的谱线峰值在0.8Pa左右,相对于前者略有滞后。当压强增大到对应的谱线峰值处时,气体压强不再是决定放电强度的因素之一,可以通过增大功率或者改变磁场强度等手段来提高放电强度。射频功率增大到1600W时,提高了压强阈值,使得峰值后移。

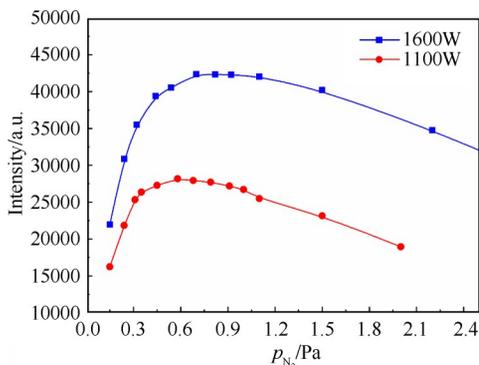


Fig. 12 Characteristics of 337.1nm line changing with  $N_2$  pressure under different power conditions

## 4 结论

通过本文研究,得到如下结论:

(1)氩气和氦气为工质气体的放电条件下,部分

波长谱线相对强度随功率的增加,斜率出现两次跳变,考虑是螺旋波放电过程中的模式转换,即容性向感性、感性向波模式的转换。

(2)三种工质气体,在较低的压强下,各谱线强度均随压强增大而迅速增强。但对于工质为氩气的放电条件,压强继续增大达到1.0Pa以后,谱线强度增加变缓甚至达到饱和状态,而工质为氦气和氮气的放电条件,压强增大到0.5~0.65Pa,谱线强度出现降低趋势,氦气和氮气的放电强度对气压更为敏感。

在较低的气压范围内,无碰撞加热机制占据功率沉积的主导地位;随着压强增大,电子-中性气体碰撞频率变大,高能电子将更多的功率耦合到等离子体中;随着压强进一步增大,电子碰撞频率较高,无碰撞加热的作用距离减小,导致功率耦合达到一种近似“饱和”的平衡状态;当压强进一步增大到几十帕甚至更高,由于碰撞频率过高,磁场作用不再有效,无法形成螺旋波,放电从波耦合模式再次进入感性模式。

(3)在电推进系统应用中,可适当提高放电气体压强,以增大粒子浓度;同等条件下,采用氩气作为工质,电离效率更高。

致谢:感谢国家自然科学基金的资助。

## 参考文献

- [1] Chen F F, Torreblanca H. Large-Area Helicon Plasma Source with Permanent Magnets[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2007, 49(5A): A81-A93.
- [2] Chen F F. Helicon Discharges and Sources: A Review [J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2015, 24(1).
- [3] Bering E A. Progress Toward the Development of a 50kW VASIMR Engine[C]. *Reno: 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2005.
- [4] Bering E A, Longmier B W, Glover T W, et al. VASIMR VX-200 High Power Electric Propulsion for Space Transportation Beyond LEO[C]. *USA: AIAA Space 2009 Conference and Exposition*, 2009.
- [5] Charles C. Helicon Double Layer Thrusters[C]. *Eindhoven: Talk Helicon Double Layer Thruster*, 2005.
- [6] Batishchev O V. Mini-Helicon Plasma Thruster Characterization[R]. *AIAA 2008-5293*.
- [7] Ellingboe A R, Boswell R W. Capacitive, Inductive and Helicon-Wave Modes of Operation of a Helicon Plasma Source [J]. *Physics of Plasmas*, 1996, 3(7): 2797-2804.
- [8] 赵高,熊玉卿,马超,等.短管螺旋波放电中等离子体参数测量和模式转化研究[J]. *物理学报*,

- 2014, 63(23).
- [ 9 ] Chen F F, Boswell R W. Helicons—The Past Decade[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1997, 25(6): 1245–1257.
- [ 10 ] Boswell R W, Chen F F. Helicons—the Early Years[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1997, 25(6): 1229–1244.
- [ 11 ] 成玉国, 程谋森, 王墨戈, 等. 磁场对螺旋波等离子体波和能量吸收影响的数值研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(3): 316–323.
- [ 12 ] Chen F F, Blackwell D D. Upper Limit to Landau Damping in Helicon Discharges[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(13): 2677–2680.
- [ 13 ] Shamrai K P, Taranov V B. Volume and Surface RF Power Absorption in a Helicon Plasma Source[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 1996, 5(3): 474–491.
- [ 14 ] Degeling A W, Jung C O, Boswell R W, et al. Plasma Production from Helicon Waves[J]. *Physics of Plasmas*, 1996, 3(7).
- [ 15 ] Chen F F. Langmuir Probe Measurements in the Intense RF Field of a Helicon Discharge[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2012, 21(5): 1020–1027.
- [ 16 ] Hamano T, Kinoshita R, Nakatsuka Y, et al. Studies on Plasma Production and Ion Heating by Using Only a Single Helical Antenna for a Simple Thruster[J]. *Plasma and Fusion Research*, 2015, 10: 1–4.
- [ 17 ] Siddiqui M U, McKee J S, McIlvain J, et al. Electron Heating and Density Production in Microwave-Assisted Helicon Plasmas[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2015, 24: 1–13.
- [ 18 ] 叶超, 宁兆元, 江美福, 等. 低气压低温等离子体诊断原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [ 19 ] 吴蓉, 李燕, 朱顺官, 等. 等离子体电子温度的发射光谱法诊断[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(4): 731–735.
- [ 20 ] 段朋振, 李益文, 张百灵, 等. 氩气压力对螺旋波放电影响的发射光谱诊断及仿真研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(8): 2341–2347.
- [ 21 ] Boswell R W. Helicon Sources: Why They Work[C]. *Florida: APS-DPP Meeting*, 2007.
- [ 22 ] 申丽华, 于春侠, 闫蓓, 等. 低电压下氮气放电的发射光谱分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(3): 791–795.

(编辑:朱立影)