

氩气压力对螺旋波放电影响的发射光谱诊断及仿真研究

段朋振^{1,2}, 李益文^{1*}, 张百灵¹, 魏小龙¹, 苒磊³, 赵伟灼¹

1. 空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038

2. 空军工程大学航空机务士官学校, 河南 信阳 464000

3. 四川大学空天科学与工程学院, 四川 成都 610065

摘要 螺旋波等离子体源以其高电离效率与高密度优势受到多个领域的青睐。螺旋波放电高电离效率的机理或者功率耦合模式, 一直是困扰该领域学者的难点之一, 对于放电过程与特性的诊断则是揭示其物理机制的重要途径。光谱诊断能够克服介入式诊断手段对等离子体的干扰同时受等离子体烧蚀等弊端, 且响应速度快、操作灵活。为研究螺旋波等离子体的放电特性以及气体压力的影响, 开展了以氩气为工质气体的光谱实验研究, 并针对实验开展了 Helic 程序数值模拟。通过改变光纤探头焦距调整径向诊断位置, 得到谱线强度的径向分布。由氩原子 4p-4s 能级跃迁产生的谱线主要集中在 740~920 nm 区间, 谱线相对强度较离子激发谱线较强。实验研究发现, 在较低氩气压力范围(0.2 Pa < P_{Ar} < 1.0 Pa), 随着压力增加, 放电光强迅速增加, 但是当压力增加到大于 1.0 Pa 之后, 光强增长的趋势变缓, 甚至部分谱线的相对强度不再增长, 达到类饱和状态, 朗缪尔探针测量得到离子密度变化趋势与其相似。光强分布在靠近径向边界处($r \approx 4$ cm)存在凸起, 且随压力增加, 该凸起分布更为明显。通过对电子温度的计算发现, 压力增加到一定程度将影响放电均匀性。仿真结果显示, 增大压力, 功率沉积密度的径向分布逐渐向径向边界处积累, 与实验观察到的谱线强度径向凸起相一致, 螺旋波与 TG 波的耦合效率增加。随着气体压力的增加, E_r 的径向边界峰值降低, 原因是波所受阻尼增强, TG 波被有效地局限于径向较窄的边界处。电流密度轴向分量 J_z 在等离子体内部和边界处的峰值呈显著的减小趋势, 可见, 虽然压力增加一定程度上提高了等离子体密度, 但却相应的减小了电离率, 导致轴向电流密度受限。但是径向电流密度 J_r 却呈现先减小后增大的趋势, 且增长幅度明显, 综合来看, 放电效率有所提高。可见适当增加气体压力, 有助于提高放电的功率耦合效率和强度, 增加等离子体密度。光强比值法是针对线性谱线参数计算的典型方法, Helic 程序亦是专业领域内认可度很高的计算工具, 结果可靠, 分析方法具有可借鉴性。实验及仿真结果对于提高氩气工质下的螺旋波放电强度提供了一定的参考价值。

关键词 螺旋波放电; 发射光谱; Helic 数值仿真; 氩气压力

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)08-2341-07

引言

螺旋波等离子体源以其高电离效率和高密度等优势, 受到了电推进、材料处理和半导体制备等多个应用领域的青睐^[1-3]。螺旋波放电机理复杂, 能量耦合方式一直是领域内学者们研究的重点, 但至今未得到一致的结论, 其中最有力度的包括^[4-7]: 朗道阻尼作用、螺旋波-TG 波耦合机制、径

向局部螺旋波的本征模式等。

Arnush 和 Chen 对螺旋波在圆柱型等离子体内的传播展开了大量研究^[5-6]。低磁场条件下螺旋波与 TG 波构型相似, 耦合较强, 标准模态是 TG 波和螺旋波的混合态, 而在强磁场条件下波构型具有确切的差异。Arnush 提出 TG 波的作用可能仅对低直流电磁场和轴向波长有着重要影响。Chen 在永磁铁小型螺旋波装置中开展了大量实验^[8-9], 氩气压力范围为 0.5~60 mTorr, 等离子体密度最高达到 5×10^{12} cm⁻³,

收稿日期: 2018-07-04, 修订日期: 2018-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51776222, 11372352), 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61627901), 陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JM1022)资助

作者简介: 段朋振, 1993 年生, 空军工程大学等离子体动力学重点实验室硕士研究生 e-mail: lord_duan@163.com

* 通讯联系人 e-mail: lee_yiwen@163.com

实验中还观察到,随着压力的增加,出口处离子能量降低。

螺旋波放电高电离效率的机理或者功率耦合模式,一直是困扰该领域学者的难点之一,对于放电过程与特性的诊断则是揭示其物理机制的重要途径。目前的诊断手段主要集中在朗缪尔探针和磁探针这种介入式方法,利用发射光谱法的研究较少且不深入。OES是对等离子体过程进行监测与诊断最常应用的方法之一,采用非接触式测量,不干扰放电过程,响应速度快,灵敏度高^[10]。本文采用发射光谱法对螺旋波等离子体放电特性随气压的变化规律进行诊断研究,利用光强比值法对电子温度进行计算与分析,并通过改变光纤探头焦距,测量得到了径向参数特征。围绕磁场对螺旋波与TG波耦合效果的影响,已经开展了较多的研究,但关于气体压力对于二者的耦合作用的研究较少,本文利用Helic程序对等离子体内波场结构和功率沉积密度等进行了数值模拟,探究了气体压力对放电的影响,初步得到了压力对螺旋波和TG波耦合的影响作用。数值模拟的物理模型及边界条件与实验设置相同。

1 实验部分

1.1 装置

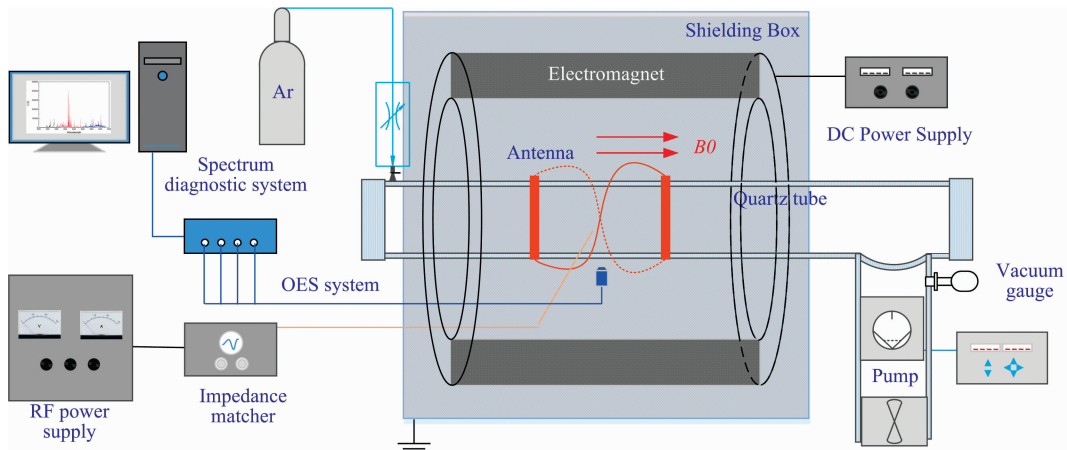


图 1 螺旋波放电实验系统图示

Fig. 1 Schematic diagram of helicon discharge experiment

1.2 光强比值法

等离子体光谱与等离子体中粒子的辐射跃迁过程有关^[10]。发射光谱诊断的依据是特定波长的谱线,由于光发射来源于特定能级之间的跃迁,特定波长的谱线成为表征等离子体内组分和能态的特征量。假设等离子体处于局部热力学平衡(LTE)状态,对应于同一种原子或离子,两条谱线相对光强的比值满足关系式如式(1)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\lambda_2 A_1 g_1}{\lambda_1 A_2 g_2} \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{kT_e}\right) \quad (1)$$

式(1)两边取对数,得到电子温度为

$$kT_e = (E_2 - E_1) \left[\ln\left(\frac{I_1 \lambda_1 A_2 g_2}{I_2 \lambda_2 A_1 g_1}\right) \right]^{-1} \quad (2)$$

以上各式中 I 表示各谱线的相对强度, A 为跃迁概率, g 为统计权重, E 为激发态能量。通过查询美国国家标准技术

螺旋波放电实验系统如图 1 所示,主要由射频电源及阻抗匹配器、螺旋波天线、磁场发生系统、工质供应系统、真空系统、参数诊断系统等组成。

频率为 13.56 MHz 的 SY 型射频电源,最高能够提供 10 kW 的功率输出,阻抗匹配采用 L 型网络,在 3 kW 以内的输出功率下可将反射功率降为 0。磁场发生系统由 SL39-1000 型电磁铁和直流电源组成,为实验提供稳定均匀的磁场环境。螺旋波天线为纯紫铜质右手螺旋型天线,内径 11 cm,长 20 cm。石英管放电腔室长 60 cm、内径 10 cm、厚 0.5 cm。放电图像的采集使用尼康 D7100 单反相机,在曝光时间 1/100 s、感光度 ISO-1000、光圈 $f/5$ 参数下拍摄,放电图像的采集位置为距天线中心 15~35 cm 的下游处。

采用四通道 Avaspec-2048-M 型光谱仪对放电腔室 200~960 nm 范围内谱线的相对强度进行采集。光纤探头水平置于石英管外侧,且位于天线中间位置。Impedans 公司生产的 ALP-150 型朗缪尔射频补偿双探针实现对离子密度的测量。由于实验系统结构限制,朗缪尔探针很难对参数径向特征进行诊断,而通过改变光纤探头的聚焦位置则能够轻易实现。另外,高功率下等离子体宏观温度高、等离子体电势强,对朗缪尔探针产生严重的烧蚀,影响数据准确性,甚至会损坏探针,光纤探头置于石英管外,不存在烧蚀现象。

研究院 NIST 提供的原子光谱数据库可以获得 A , g 和 E 等参数值^[11],这里取上能级激发能 E_k ,通过对应的上能级光谱支项 J 计算得到统计权重 g ($g = 2J + 1$),部分氩原子 Ar I 的光谱数据如表 1 所示。

表 1 氩原子部分谱线参数

Table 1 The spectral parameters of Ar I

λ/nm	E_k/eV	A/s^{-1}	g
763.51	13.172	2.45×10^7	5
842.47	13.095	2.15×10^7	5
852.14	13.283	1.39×10^7	3
912.30	12.907	1.89×10^7	3

1.3 数值仿真模型

对频域麦克斯韦方程做傅里叶变换及其他一系列转换，得到螺旋波等离子体的波场耦合微分方程组^[6, 12]

$$\frac{\partial E_{\varphi}}{\partial r} = \frac{im}{r}E_r - \frac{E_{\varphi}}{r} + i\omega B_z \quad (3)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = ikE_r - i\omega B_{\varphi} \quad (4)$$

$$i\frac{\partial B_{\varphi}}{\partial r} = \frac{m}{r}\frac{k}{\omega}E_{\varphi} - \frac{iB_{\varphi}}{r} + \left(P - \frac{m^2}{k_0^2 r^2}\right)\frac{\omega}{c^2}E_z \quad (5)$$

$$i\frac{\partial B_z}{\partial r} = -\frac{\omega}{c^2}iDE_r + (k^2 - k_0^2 S)\frac{E_{\varphi}}{\omega} + \frac{m}{r}\frac{k}{\omega}E_z \quad (6)$$

式中， B 和 E 分别为波磁场和波电场， ω 是天线驱动频率（即螺旋波频率）， k 为波矢， m 为角向模数。式(3)~式(6)组成了封闭集合，可以用标准方法数值求解。

用 Helic 程序对上述波场径向耦合微分方程组数值求解，结合边界条件，求得等离子体中波磁场、波电场、电流密度、相对功率沉积密度等特征参数。该 Helic 程序在领域内得到广泛认可，计算结果可靠，文献[12-13]中已有介绍，这里不再赘述。计算模型如图 2 所示，天线尺寸及类型、工质类型、驱动频率等均与实验相一致，设定中心轴处等离子体密度为 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ，沿径向服从典型抛物线型分布，电子温度为 4.5 eV，磁场强度为 200 G。

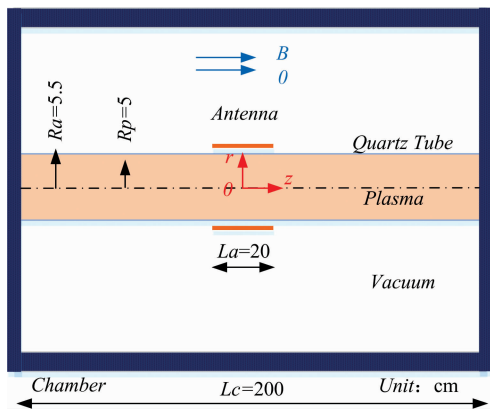


图 2 计算模型

Fig. 2 The modeled configuration

2 结果与讨论

2.1 螺旋波氩气放电特征

如图 3 所示为射频输入功率 1 060 W、气体压力 0.78 Pa、磁场强度 240 G 条件下的螺旋波放电全谱线图。氩原子发射谱线主要集中在 740~920 nm 区间，由氩原子 4p-4s 能级跃迁产生，如图 3 中蓝色谱线范围（红色字体标注具体波长）。氩离子发射谱线主要集中在 400~500 nm 范围，由氩离子 5s-4p 或 4f-3d 能级跃迁产生，如图 3 中红色谱线（蓝色字体标注具体波长）。氩离子的激发能明显高于氩原子，从图中也可以看出，氩原子的谱线强度远高于氩离子。当氩离子谱线强度相对较大时，电子的电离能强，电子携带的能量多，注入等离子体的功率较高，可以认为放电较强。如图 4 所示为 1 kW 以上和 4 kW 以上的放电图像，图像取自天线

下游 15~35 cm，天线正下方放电强度更高。图中黑色杆为光谱仪光纤通道支撑杆，位于石英管外。

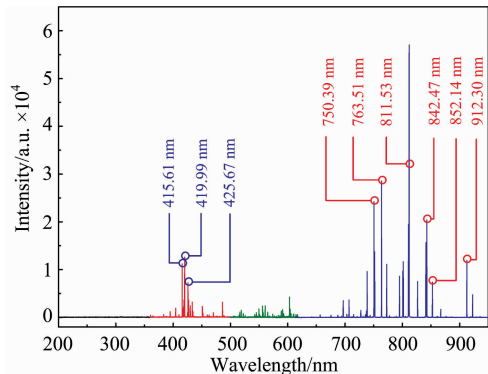


图 3 螺旋波放电全谱线图

Fig. 3 Optical emission spectrum of helicon discharge

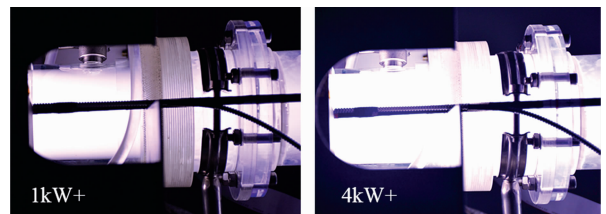


图 4 不同功率下的放电图像

Fig. 4 Discharge images at different powers

2.2 光谱诊断结果与分析

在输入功率为 940 W、磁场强度为 200 G 的条件下，改变气体压力，对氩原子 Ar I 谱线强度进行采集分析，部分谱线相对强度随气压变化曲线如图 5 所示。从图中可以看出，在较低氩气压力范围 ($0.2 \text{ Pa} < P_{\text{Ar}} < 1.0 \text{ Pa}$)，随着工质气体流量增加，即压力增加，放电光强迅速增加，但是当压力增加到大于 1.0 Pa 之后，光强增长的趋势变缓，甚至部分谱线的相对强度不再增长，达到类饱和状态。虽然谱线相对强度无法直接表示等离子体密度，但我们通过朗缪尔探针测量得到离子密度与其相似的变化趋势，如图 6 所示。

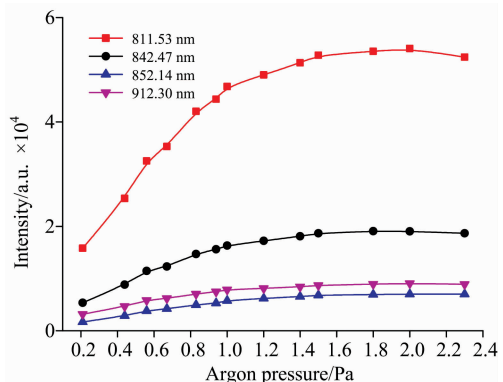


图 5 谱线强度随压力变化曲线

Fig. 5 The curve of spectral line intensity versus gas pressure

通过改变光纤探头焦距调整径向诊断位置，得到了谱线

强度径向特征随压力的变化特性,如图 7 所示为 912.30 nm 谱线分布特征,放电条件保持为 940 W 射频功率和 200 G 磁场强度。径向各个位置与图 5 变化相同,整体均随气压增加而增强,光强分布在靠近径向边界处($r \approx 4$ cm)存在凸起,且随压力增加,该凸起分布更为明显。猜测该凸起是由螺旋波与 TG 波耦合引起的,将结合数值模拟进行分析。可见,适当增加压力,能够在一定程度上提高放电耦合效率,增加放电强度,但是当压力增加到 1.0 Pa 以上时谱线强度增长趋势变缓,正如图 6 中观察到的离子密度变化趋势。继续增加气压会导致阻抗匹配失调,影响天线耦合效率,导致放电强度变弱甚至放电中断。

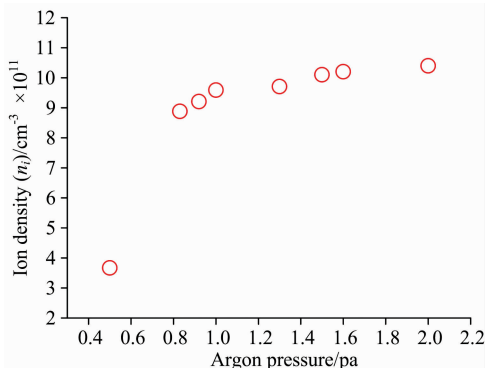


图 6 离子密度随气压变化特征

Fig. 6 The characteristics of ion density versus gas pressure

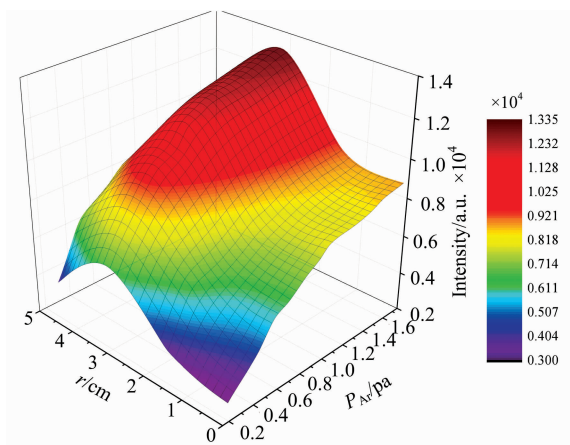


图 7 谱线强度径向特征随压力变化特性

Fig. 7 Radial characteristics of line intensity versus gas pressure

图 8 所示为光强比值法计算得到的电子温度的径向分布及随压力的变化特征。氩气压力的增加使得电子温度增大,且在径向中心处出现峰值。Chen 指出,螺旋波放电的典型电子温度为 2~4 eV。当压力高到一定程度,电子碰撞频率增加,功率向天线下游的输运受限,大部分能量沉积于天线附近,影响放电的均匀性,导致光纤探头测量位置电子温度进一步升高。Chen 在实验中观察到,随着氩气压力的增加,等离子体源出口处的离子能量降低^[8]。

从谱线强度及电子温度变化趋势来看,在一定范围内随

着气体压力增加,放电强度增强。螺旋波通过无碰撞加热将热运动状态的电子加速到波相速度附近,从而将能量输入到电子,为电子提供充足的电离能。高能电子通过与原子或分子的碰撞,实现放电的高电离率。在较低压力范围,无碰撞加热占据主导地位;适当增加气体压力,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,等离子体平均电子温度增加;随着氩气压力进一步增加,电子碰撞频率较高,导致功率耦合达到一种近似饱和的平衡状态;当气体压力进一步增加到几十帕时,由于电子碰撞频率太频繁,外部磁场将不再起作用,导致螺旋波无法在等离子体内传播,放电从波耦合模式进入感性放电模式。可见,适当的增加放电气体压力,可以提高功率耦合效率,增加电子温度,提高放电强度。螺旋波放电效率与其内部波场结构和螺旋波-TG 波耦合效率等因素有关,我们通过数值模拟方式再作具体分析。

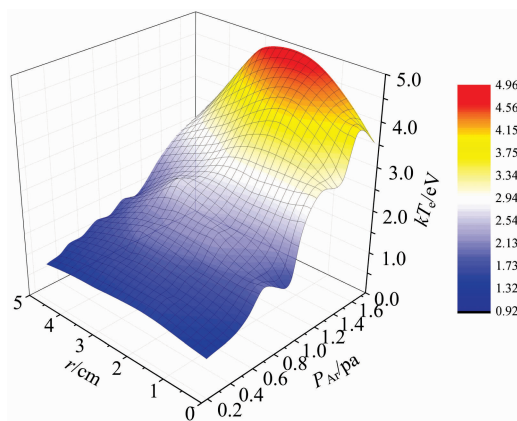


图 8 电子温度径向特征随氩气压力变化

Fig. 8 Radial characteristics of electron temperature versus argon pressure

2.3 仿真结果与分析

利用 Helic 程序对螺旋波等离子体内波磁场、波电场、电流密度以及功率沉积密度沿径向的分布特征进行了计算。如图 9 所示为功率沉积密度沿径向分布随气体压力的变化特征,从图中可以看出,功率密度在径向中心和边界处存在两个峰值,这是由螺旋波和 TG 波作用的效果。螺旋波所受阻尼较小,径向波长长,可沿径向和轴向传播较远距离,而 TG 波受强阻尼作用,径向波长短,很难向等离子体中心处传播,主要作用于径向边界处,且在实验中很难对其测量。

从图 9 中可以看出,随着气体压强的增加,径向中心处的功率密度先减小后增加,转折点出现在 0.532 Pa 附近,而径向边界处的功率密度却随压力持续增加,可见,气体压力对螺旋波和 TG 波的耦合有着显著的影响作用。在压力小于 0.532 Pa 时,随着压力增加,部分功率向 TG 波转移,在径向边界处耦合到等离子体的能量增加,而在径向中心处却减少。当气压达到 0.532 Pa 以上,随着压力进一步增加,功率耦合核心继续向 TG 波转移,径向边界处的功率耦合密度迅速增加,且集中在较窄的范围内,这是由于强烈的边界加热效应和小的趋肤深度($\delta = c/\omega_{pe} \propto 1/n_e^{1/2}$)^[12],另外,观察到径

向中心处的功率密度亦呈增加趋势,可见二者之间的耦合效率提高,功率沉积效率增加。

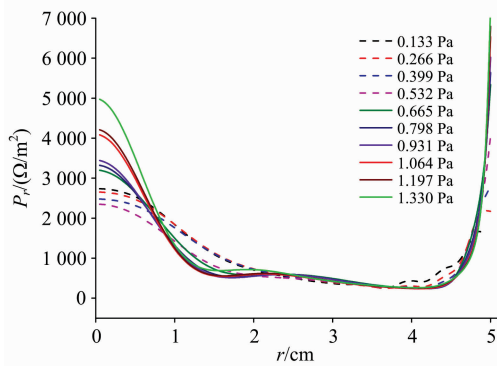


图 9 压力对功率沉积密度径向分布的影响
Fig. 9 Effect of argon pressure on radial profiles of power absorption

从光谱及探针诊断结果来看,适当增加气体压力,可有效提高放电强度和等离子体密度。但是当压力增加到一定程度,如前文提到的 1.0 Pa,放电进入一个饱和状态,这是由于 TG 波在更高压力下,所受阻尼更强,被局限于径向边界,

基本上是一种表面波,大部分功率通过 TG 波沉积于径向边界处,向等离子体内部的输运受限,进而影响了放电强度的进一步增强。从图 7 中亦可以看出,谱线强度在径向边界处的凸起随压力增加更为突出。

图 10 为波磁场 B 、波电场 E 和电流密度 J 径向和轴向分量沿 r 的特征随压力的变化,由于角向特征的变化趋势与径向相似,这里就不再枚举。波电场的径向分量 E_r 比轴向和角向分量更占据优势,从图 10(b)中可看出, E_r 比 E_z 高近 40 倍,且 E_r 由径向边界条件决定。随着气体压力的增加, E_r 的径向边界峰值降低,原因是压力的增加导致波所受阻尼增强, TG 波被有效地局限于径向较窄的边界处。

电流密度轴向分量 J_z 在等离子体内部和边界处的峰值呈显著的减小趋势,可见,虽然压力增加一定程度上提高了等离子体密度,但却相应的减小了电离率,导致轴向电流密度受限。但是径向电流密度 J_r 却呈现先减小后增大的趋势,且增长幅度明显,综合来看,放电效率有所提高。波磁场各分量的变化趋势与 J_z 相似,均在 0.532 Pa 处出现转折,总体上表现为,低压下气压的增加导致功率沉积向 TG 波模式的偏移,等离子体内部波场减弱,但是随着螺旋波与 TG 波耦合的增强,波磁场峰值增加,因为从天线耦合到等离子体的功率更多了。

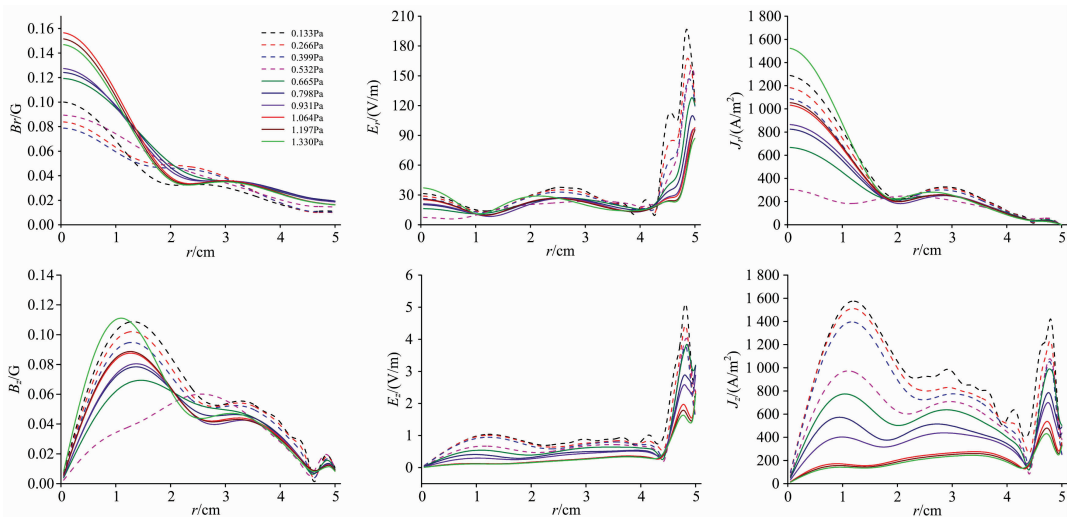


图 10 压力对波磁场、波电场和电流密度结构的影响
上: 径向分量; 下: 轴向分量

Fig. 10 Effect of argon pressure on electric wave field, magnetic wave field and current density
Top: Radial component; Bottom: Axial component

3 结论

为研究螺旋波等离子体的放电特性以及气体压力的影响,开展了以氩气为工质气体的光谱实验研究和数值模拟。实验结果显示,在较低氩气压力范围 ($0.2 \text{ Pa} < P_{Ar} < 1.0 \text{ Pa}$),随着压力增加,放电光强迅速增加,但是当压力增加到大于 1.0 Pa 之后,光强增长的趋势变缓,甚至部分谱线的相对强度不再增长,达到类饱和状态;光强分布在靠近径向边界处 ($r \approx 4 \text{ cm}$) 存在凸起,且随压力增加,该凸起分布更为明

显。通过数值计算,发现随着气体压强的增加,径向中心处的功率密度先减小后增加,而径向边界处的功率密度却随压力持续增加,气体压力对螺旋波和 TG 波的耦合有着显著的影响作用。功率沉积密度的径向分布逐渐向径向边界处积累,与实验观察到的谱线强度径向凸起相一致。适当增加放电气体压力,有助于提高功率耦合效率和放电强度。光强比值法是针对线性谱线参数计算的典型方法,Helic 程序亦是专业领域内认可度很高的计算工具,结果可靠,分析方法具有可借鉴性。实验及仿真结果对于提高氩气工质下的螺旋波放电强度提供了一定的参考价值。

References

- [1] Batishchev O V. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(8): 1563.
- [2] XIA Guang-qing, WANG Dong-xue, XUE Wei-hua, et al(夏广庆, 王冬雪, 薛伟华, 等). Journal of Propulsion Technology (推进技术), 2011, 32(6): 857.
- [3] Huang T Y, Jin C G, Yu J, et al. Science China, 2016, 59(4): 645201.
- [4] Tarey R D, Sahu B B, Ganguli A. Physics of Plasmas, 2012, 19(7): 073520.
- [5] Chen F F. Plasma Sources Science & Technology, 2015, 24(1): 014001.
- [6] Arnush D. Physics of Plasmas, 2000, 7(7): 3042.
- [7] Lee C A, Chen G Y, Arefiev A V, et al. Physics of Plasmas, 2006, 13(12): 123507.
- [8] Chen F F. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(1): 195.
- [9] Chen F F. Physics of Plasmas, 2014, 21(9): 093511.
- [10] YE Chao, NING Zhao-yuan, JIANG Mei-fu, et al(叶超, 宁兆元, 江美福, 等). Low Pressure and Temperature Plasma Diagnostic Principle and Technology(低气压低温等离子体诊断原理与技术). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2010. 143.
- [11] http://physics.nist.gov/PhysPefData/ASD/lines_form.html
- [12] Chang Lei, Li Qingchong, Zhang Huijie, et al. Plasma Science & Technology, 2016, 18(8): 848.
- [13] DUAN Peng-zhen, LI Yi-wen, ZHANG Bai-ling, et al(段朋振, 李益文, 张百灵, 等). Journal of Propulsion Technology(推进技术), 2018, 39(8): 1897.

Emission Spectroscopy Diagnosis and Simulation Study of Argon Pressure Effect on Helicon Wave Discharge

DUAN Peng-zhen^{1,2}, LI Yi-wen^{1*}, ZHANG Bai-ling¹, WEI Xiao-long¹, CHANG Lei³, ZHAO Wei-zhuo¹

1. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China

2. Aviation Maintenance NCO School, Air Force Engineering University, Xingyang 464000, China

3. School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract Helicon plasma sources have gradually been widely adopted in various research fields due to their high ionization efficiency and high density. Lacking in understanding of the mechanism for the high ionization efficiency and the power coupling mode of helicon discharge has been a great challenge for scholars to deal with in this field. To diagnose the discharge process and the characteristics is an important way to reveal its physical mechanism. Spectral diagnosis can avoid the interference of contact measurements on plasma and is free from plasma ablation. It responds quickly and is flexible to operate. In order to study the discharge characteristics of helicon plasma and the influence of gas pressure, researches on emission spectral diagnosis of argon discharge and numerical simulation of the Helic code for these experiments were conducted. The radial profiles of the line intensity were obtained by changing the focal length of the fiber optic probe to adjust the radial diagnostic position. Atomic emission lines of argon are mainly concentrated in the 740~920 nm region, which are generated by the transition of argon atoms between the 4p-4s energy levels and stronger than the relative intensity of ion lines. It can be found that at lower pressure ranges ($0.2 \text{ Pa} < P_{\text{Ar}} < 1.0 \text{ Pa}$), the discharge intensity increases rapidly with pressure, and tend to be nearly saturated when the pressure reaches 1.0 Pa or larger. Langmuir probe measurement shows a similar trend in ion density. A “bump-on-boundary” of the line intensity profile was observed near the radial boundary ($r \approx 4 \text{ cm}$), which was more obvious as the pressure increased. By calculating the electron temperature, it was found that the discharge uniformity will be influenced when the pressure is increased to a certain extent. The simulation results show that the radial profile of power absorption gradually increases toward the radial boundary, which is consistent with the experimentally observed “bump-on-boundary” of the line intensity. And the coupling efficiency of the helicon-TG waves increases. As the gas pressure increases, the radial boundary peak of E_r decreases because the TG wave is more damped and effectively confined to the narrower radial boundary. The current density J_z shows a significant decrease in the peaks inside and at the boundary of the plasma. It can be seen that although the pressure increase improves the plasma density to some extent, the ionization rate is correspondingly reduced, resulting in limited axial current density. However, the radial current density J_r firstly decreases and then increases, and the growth rate is obvious. Overall, the discharge efficiency has improved. Appropriately raising the gas pressure helps to improve power coupling efficiency and strength of the discharge,

as well as the plasma density. The light intensity ratio method is a typical method for the calculation of linear spectral line parameters. The Helic code is also a highly recognized tool in the professional field. Therefore, the results are reliable and the analytical methods have the value of reference. The experimental and simulation results provide a certain reference value for improving the helicon discharge intensity under argon working fluid.

Keywords Helicon discharge; Emission spectrum; Helic numerical simulation; Argon pressure

(Received Jul. 4, 2018; accepted Nov. 22, 2018)

* Corresponding author

(上接 2340 页)

报告形式

为充分利用会议学术交流的效率,会议仍采用“口头报告”和“墙报展示”两种方式进行学术交流。无论是口头报告还是墙报展示,均属大会同等学术交流。为尊重个人意见和便于组委会的安排,请大家在会议注册时,提交“口头报告”或“墙报”的题目。为了鼓励博士、硕士研究生积极参与学术交流活动,本次会议将继续设立“优秀青年论文奖”和“优秀墙报奖”,表彰那些研究水平高、能突出研究内容要点、条理清晰的“口头报告”和“墙报”,大会将给获奖作者颁发优秀论文证书和奖金。同时会议还将邀请国内外知名专家学者就光谱有关学术领域的前沿热点问题作大会报告和主题报告。

主要报告形式有:

1. 大会邀请报告:主要邀请国内外知名专家学者报告光谱分析的前沿技术在各个领域的最新研究进展。
2. 主题邀请报告:本次会议将选择光谱技术的热点应用领域,开设多个专题论坛,邀请在该领域的知名专家作论坛主题报告。
3. 青年论坛报告:为博士、硕士研究生开设交流平台,并评选“优秀青年论文奖”。
4. 口头报告和墙报展示:作为本次会议的主要交流和展示形式。会议统一安排墙报讲解时间,希望作者按时到位讲解。

重要时间

论文截稿日期:2019年12月30日

第二轮会议通知:2019年10月(开通会议注册系统)

第三轮会议通知:2020年4月

会议召开期:2020年5月15—18日

会议组织机构、注册费及缴纳方式、宾馆住宿介绍及住房预定等信息近期将在会议主页上发布,请您经常浏览光谱网上会议主页,了解会议筹备情况和会议具体安排。网址:<http://www.sinospectroscopy.org.cn>

产品展示

会议热忱邀请国内外仪器厂商前来展示分子光谱(红外、近红外、拉曼、荧光等)、原子光谱等各类光谱仪以及质谱、核磁等其它相关仪器设备。我们将在本次会议的网站和会议现场提供展出场所,希望各厂商充分利用这次机会展示自己的最新产品。

会务组联系方式

李成辉(会议稿件)

四川大学分析测试中心

电话:028-85410280; 18980877825

Email: atcpubs@scu.edu.cn

吴兰(会议咨询)

四川大学分析测试中心

电话:028-85412512; 13688385033

Email: wulan@scu.edu.cn

(下转 2359 页)

noise level is much larger than its frequency, it produces a slower frequency modulation than that in the high frequency region. The linewidth of the laser is an integration of the frequency noise in the Gaussian line shape region. The error in linewidth calculation is smaller over the entire cut-off frequency range. Finally, a set of measured frequency noise power spectral density of a RIO's laser was used to calculate the linewidth using the β algorithm. When the frequency noise spectral density is greater than the β separation line, the laser appears as a Gaussian line shape and the linewidth decrease with frequency bandwidth; on the contrary, the laser shows a Lorentzian line shape, and the linewidth is fixed. Meanwhile, a delayed self-heterodyne measurement system with delay fiber of 50 km and frequency shift of 60 MHz is constructed. The measured linewidth of a RIO's laser working under 110 mA inject current is about 1.8 kHz, which is consistent with the calculated result of the β algorithm, of which the frequency bandwidth is ~ 2.8 kHz. In conclusion, β algorithm is able to characterize the linewidth of any type of narrow linewidth laser, which is of great significance to the research on narrow linewidth lasers.

Keywords Laser linewidth; β algorithm; Laser shape; Frequency noise

(Received Jun. 29, 2018; accepted Oct. 25, 2018)

* Corresponding authors

(上接 2347 页)

王香凤(厂商联络)

北京师范大学分析测试中心

电话: 010-58807981; 13520034335

Email: xiangfeng@bnu.edu.cn

支持媒体:

会议官网: 光谱网 <http://www.sinospectroscopy.org.cn>(会议各类信息发布以光谱网信息为准)

支持媒体:

分析测试百科网 <http://www.antpedia.com/>

仪器信息网 <http://www.instrument.com.cn>

主办单位:

中国光学学会

中国光学学会光谱专业委员会

中国化学会

承办单位:

四川大学分析测试中心

第 21 届全国分子光谱学学术会议暨 2020 年光谱年会组委会
2019 年 6 月 18 日