

# 小型化高密度可调控电感耦合等离子体发生器性能研究



袁野<sup>1</sup>, 张岩<sup>2</sup>, 郭成<sup>1</sup>, 刘玉献<sup>1</sup>, 薄勇<sup>1</sup>, 赵青<sup>1\*</sup>

(1. 电子科技大学资源与环境学院 成都 610054; 2. 上海空间推进研究所 上海 闵行区 201112)

**【摘要】**根据理论分析和磁场仿真结果设计并加工了一款用于黑障通信实验的电感耦合等离子体发生器, 该装置能产生具有形状为半球形、厚度小于5 cm、等离子体密度为 $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 量级等黑障典型等离子体鞘层特征的等离子体薄层。采用等离子体发射光谱诊断的方法, 研究了等离子体发生器产生等离子体的电子激发温度和电子数密度, 并分析了线圈功率对等离子体特性的影响规律, 对等离子体发生器乃至对电小天线辐射调控系统的进一步优化有参考作用。

**关键词** 黑障; 电感耦合等离子体; 等离子体发生器; 光谱诊断

中图分类号 TN136 文献标志码 A doi:10.12178/1001-0548.2021356

## Study on Performance of a Miniaturized High Density Inductively Coupled Plasma Generator

YUAN Ye<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, GUO Cheng<sup>1</sup>, LIU Yuxian<sup>1</sup>, BO Yong<sup>1</sup>, and ZHAO Qing<sup>1\*</sup>

(1. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Shanghai Institute of Space Propulsion Minhang Shanghai 201112)

**Abstract** According to the theoretical analysis and magnetic field simulation results, an inductively coupled plasma generator for black barrier communication experiment is designed and fabricated. The device can produce a plasma thin layer with the typical characteristics of black barrier plasma sheath with a hemispherical shape, thickness less than 5 cm and plasma density of  $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ . Using the method of plasma emission spectrum diagnosis, the electron excitation temperature and electron number density of the plasma produced by the plasma generator are studied, the influence law of coil power on the plasma characteristics is analyzed, and the mechanism is explored, which has a certain reference for the further optimization of the plasma generator and even the radiation control system of electrically small antenna.

**Key words** blackout; inductively coupled plasma; plasma generator; spectrum diagnosis

黑障问题主要是由于等离子体的产生并包裹在飞行器周围, 导致电磁波吸收, 使飞行器通信信号衰减甚至通讯中断。如何在实验室模拟高空环境等离子体, 产生高密度、均匀、可调控的等离子体, 是一个世界性难题。

国内外研究者对模拟黑障的等离子体源进行了广泛研究。在实验室模拟黑障等离子体主要分为热等离子体源和冷等离子体源。其中, 热等离子体源包括激波风洞、电弧等离子体源和感应耦合等离子体源; 冷等离子体源包括辉光放电等离子体源和螺

旋波等离子体源等<sup>[1]</sup>。激波风洞主要是依靠激波管, 在激波管内插入膜片, 膜片两边充入不同压力的气体, 膜片破裂的瞬间在膜片处产生激波, 从而产生等离子高温气体<sup>[2-4]</sup>。但激波风洞产生的等离子体几乎是瞬时的, 维持时间在毫秒量级, 不能满足需要长时间测量的实验。电弧放电等离子体源利用阴阳极之间的直流通电, 能产生稳定放电、高能量、高电子密度的等离子体射流, 但由于高温烧蚀阴阳极, 会有电极粉尘的污染问题<sup>[5-7]</sup>。辉光放电等离子体源能产生大面积、长时间稳定放电的等离子

收稿日期: 2021-11-21; 修回日期: 2022-03-31

基金项目: 四川省国际科技创新合作项目(2021YFH0057); 四川省科技厅重点研发项目(2021YFG0369)

作者简介: 袁野(1983-), 女, 博士生, 主要从事等离子体物理方面的研究。

\*通信作者: 赵青, E-mail: zhaqq@uestc.edu.cn

体,但它所产生的等离子体密度最高只能达到 $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 量级,制约了它的应用范围<sup>[8-9]</sup>。螺旋波等离子体源是一种新型等离子体源,利用等离子体中的螺旋波,能产生大面积、高密度的等离子体,但它引入了静磁场的问题<sup>[10]</sup>。感应耦合等离子体源天线产生的磁场随时间变化,从而引起感应电场,利用此电场来加速电子,能产生大面积、高密度的等离子体<sup>[11]</sup>。

在上述研究中,很少见到等离子体密度、鞘层形状和鞘层厚度等参数满足黑障中的实际问题,并设计制造出实物、且进行了实验验证的研究。本文针对高超声速飞行器的黑障通信中断问题,研制出一套用于电小天线辐射调控的电感耦合等离子体发生器,它能在实验室再现高空环境下的等离子体鞘层,并且具有参数调控功能。用光学研究方法<sup>[12-14]</sup>对发生器产生的等离子体进行了诊断实验验证。本文用设计的等离子体发生装置在实验室产生等离子体鞘套,在此基础上进行包覆小型化天线的黑障通讯实验。本文研制出的等离子体发生器对于在实验室研究高超声速飞行器的电小天线黑障通信具有重要的实用意义。

## 1 等离子体发生器的物理模型

在实验室环境下产生高超声速飞行环境下的等离子体鞘层,需要设计具备高超声速飞行环境下的等离子体参数(如等离子体密度、鞘层形状、鞘层厚度等)特征的等离子体发生器。一般高超声速飞行器典型等离子体鞘层的等离子体密度为 $1 \times 10^{18} / \text{m}^3$ 量级左右,鞘层类似半球形,厚度小于 $5 \text{ cm}$ <sup>[15]</sup>。在本文的等离子体发生器的研制中,目标确定为具有上述特征的等离子体。使其拥有能符合等离子体流场仿真结果的外形特征,达到目标等离子体密度条件 $1 \times 10^{18} / \text{m}^3$ 且密度在较大范围内方便可调,等离子体发生装置对天线工作特性和空间辐射特性产生的影响较小。

本文设计的等离子体发生器利用感应耦合放电方式产生高密度、可调控的等离子体。当在线圈中通入直流电流时,线圈中产生磁场;当线圈中通入的电流随时间变化时,变化的磁场感应出感应电场;在圆周方向的感应电场使电子加速,形成圆周方向的涡电流。如果没有碰撞,电子被电场加速的比例和被减速的比例相当,平均的作用是等离子体从外部吸收的能量为0,功率无法耦合进等离子

体,所以必须要有碰撞,有一定电阻的等离子体消耗的能量,即焦耳加热,是等离子体吸收的能量。感应耦合等离子体源的等效电路图见文献[16]。电流 $I_{\text{RF}}$ 流过天线线圈,通过互感 $M$ 将能量耦合到次级线圈。天线线圈相当于变压器的初级线圈,它的电感为 $L_a$ 、电阻为 $R_a$ ,而等离子体相当于变压器的次级线圈,由等离子体形状产生的电感为 $L_g$ ,电子的惯性引起的电感为 $L_p$ ,等离子体的电阻为 $R_p$ 。等离子体吸收的功率可以表示为<sup>[16]</sup>:

$$P_{\text{abs}} = \frac{\omega^2 M^2 R_p}{\omega^2 (L_g + L_p)^2 + R_p^2} I_{\text{RF}}^2 \quad (1)$$

式中, $\omega$ 为天线线圈电流角频率。在低压工作情况下,等离子体电阻减小。磁场的趋肤深度也减小,这时,按常理能量将无法进入等离子体,放电无法继续进行,但此时电子的反常趋肤效应使电子在近无碰撞状态下仍能继续高效地加热获取能量。

为了确定需要加多大的磁场才能得到符合要求的等离子体,进行了如下估算。为了产生等离子体,气体需要被电离,也就是电子在一个自由程从电场获得的能量必须大于电离能,因此得到能产生放电所必须的最小磁感应强度 $B_0$ 满足<sup>[17]</sup>:

$$\frac{v_{e0}^2 + (\omega \lambda_1)^2}{\omega \lambda_1} = \frac{ebB_0}{m} \quad (2)$$

式中, $\lambda_1$ 为 $t$ 时间内电子的运动距离; $v_{e0}$ 为电子加速后的最小速度; $e$ 为电子电量; $m$ 为电子质量; $b$ 为等离子体区域半径。当气体压强很大时,有 $\omega \lambda_1 < v_{e0}$ ,因此由式(2)可得 $B_0 = \frac{mv_{e0}^2}{\omega \lambda_1 eb}$ ,气压与 $\lambda_1$ 成反比, $B_0$ 与气压成正比。当气压很小时,类似的推导可得 $B_0 = \frac{m\omega \lambda_1}{eb}$ , $B_0$ 与气压成反比。因此,气压变高或变低时, $B_0$ 都增大,所以,当 $\omega \lambda_1 = v_{e0}$ 时, $B_0$ 取得最小值 $B_{0\text{min}} = \frac{2mv_{e0}}{eb}$ 。由于电子热运动平均速度 $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ ,其中 $k$ 为玻尔兹曼常数, $T$ 为电子温度。假设 $T = 10\,000 \text{ K}$ , $\langle v \rangle = v_{e0}$ ,计算得 $B_{0\text{min}}$ 为 $3.29 \times 10^{-4} \text{ T}$ 。

为了得到 $B_{0\text{min}} > 3.29 \times 10^{-4} \text{ T}$ 的磁场,设计了电感耦合等离子体源,其几何模型为二维轴对称图,对称截面如图1所示。同时,对其磁感应强度分布进行了仿真,仿真结果如图2所示。在等离子体区域, $B_{0\text{min}}$ 为 $2.35 \times 10^{-3} \text{ T}$ ,达到磁场设计要求。

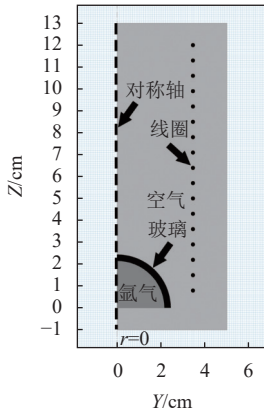


图 1 几何模型截面图

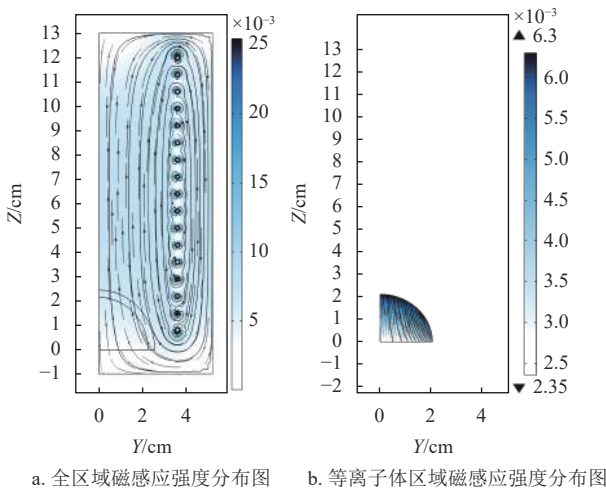


图 2 等离子体源磁场仿真结果

## 2 等离子体发生器的研制和实验平台搭建

本文设计并制造了电感耦合等离子体激励器以模拟黑障等离子体。等离子体激励器结构如图 3 所示, 实验平台搭建示意图如图 4 所示。等离子体激励器在玻璃罩内产生出半球形的等离子体层。半球形玻璃罩内部连接真空室, 内、外层玻璃球壳半径分别为 1.2 cm 和 2.3 cm, 厚度为 6 mm, 玻璃球壳固定在金属法兰盘上, 法兰上开有小孔, 中心的孔里固定着电小天线, 连接电小天线的馈电线穿过小孔。法兰上的另外几个小孔连接铜管, 铜管连接真空室。当真空室内为真空状态时, 玻璃球壳内也能保持较高的真空度。用 16 匝、匝间距 1 cm 的铜线圈放置在玻璃罩外部, 以产生感应耦合等离子体。玻璃罩的结构实现了对电小天线的全方位包裹, 玻璃的材质对电磁波传播的影响也较小。整个等离子体激励器是轴对称结构, 使产生的等离子体在空间

分布上大致也拥有这样的对称性质。真空室抽真空后气压最低可以达到  $10^{-4}$  Pa, 氩气为工质。氩气经流量计控制后流入玻璃罩, 玻璃罩内气压可达  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  Pa。等离子体激励器由频率 15.56 MHz 的射频电源供电, 电源输出功率 0~1 000 W。用射频匹配器连接电源和线圈, 使电源能量能较好地耦合到线圈。使用光纤光谱仪进行光谱诊断, 测量波长范围为 300~1 100 nm。

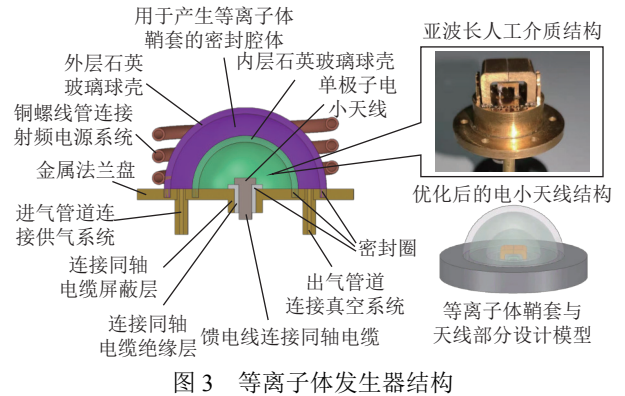


图 3 等离子体发生器结构

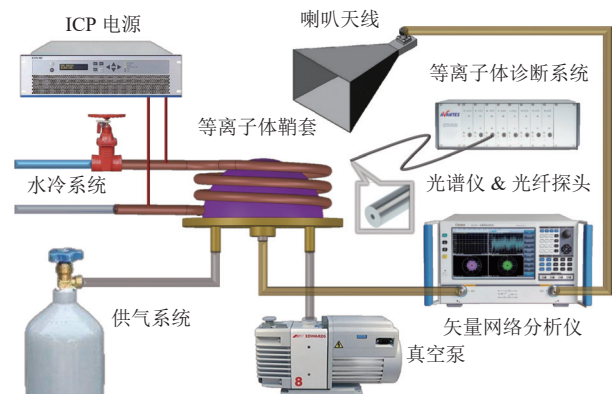


图 4 实验平台搭建示意图

## 3 诊断实验方法及诊断结果分析

### 3.1 等离子体诊断方法

利用玻尔兹曼作图法计算电子激发温度。在局部热力学平衡 (local thermodynamic equilibrium, LTE) 的情况下, 根据玻尔兹曼定律, 某种粒子从高能级  $m$  跃迁到低能级  $n$  时的谱线强度  $I_{mn}$  为:

$$I_{mn} = \frac{hcN(T)g_m A_{mn}}{4\pi\lambda U(T)} \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) \quad (3)$$

式中,  $\lambda$ 、 $A_{mn}$  和  $g_m$  分别为波长、跃迁概率和上能级的统计权值;  $E_m$  是激发能级的能量;  $h$  为普朗克常数;  $c$  为光速;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $N(T)$  是上层原

子的总密度； $U(T)$ 是温度 $T$ 时的配分函数。两边求对数，得到<sup>[18]</sup>：

$$\ln\left(\frac{I_{mn}\lambda_{mn}}{g_m A_{mn}}\right) = -\frac{E_m}{kT} + C \quad (4)$$

式中， $C$ 为常数选取同种离子或原子的多条谱线，查询对应的参数，以 $E_m$ 为横坐标，以 $\ln\left(\frac{I_{mn}\lambda_{mn}}{g_m A_{mn}}\right)$ 为纵坐标描出各点，用最小二乘法拟合，拟合出直线的斜率为 $-\frac{1}{kT}$ ，进而由斜率求出温度 $T$ 。在选取谱线时，应注意尽量使谱线激发态的能量分布范围尽量宽，同时选取波长尽量靠近的谱线，且所选谱线的强度差异不宜太大<sup>[19]</sup>。若未达到 LTE，可采用费米狄拉克模型求解，但往往两种方法结果相差不大，因此一般利用玻尔兹曼曲线法计算。

利用同元素原子和一价离子两条分立谱线的强度比例法计算等离子体电子密度。假设局部热力学平衡，Saha 方程为：

$$\frac{N_i N_e}{N_a} = \frac{(2\pi m k T_e)^{1.5} 2 U_i}{h^3 U_a} \exp\left(-\frac{V_i}{kT_e}\right) \quad (5)$$

式中， $N_i$ 、 $N_e$ 、 $N_a$ 分别为离子数密度、电子数密度、原子数密度； $V_i$ 为电离能； $m$ 为电子质量； $U_i$ 、 $U_a$ 分别为离子和原子配分函数； $T_e$ 为电子温度。原子和离子的辐射强度分别为：

$$I_a = \frac{N_a g_a A_a h \gamma_a}{U_a} \exp\left(-\frac{E_a}{kT_e}\right) \quad (6)$$

$$I_i = \frac{N_i g_i A_i h \gamma_i}{U_i} \exp\left(-\frac{E_i}{kT_e}\right) \quad (7)$$

式中， $\gamma$ 为波数。联立式(5)~式(7)得到<sup>[20]</sup>：

$$N_e = \frac{I_a g_i A_i \lambda_a 2 (2\pi m k T_e)^{1.5}}{I_i g_a A_a \lambda_i h^3} \exp\left(\frac{E_a - E_i - V_i}{kT_e}\right) \quad (8)$$

因此，电子密度能根据之前计算出的电子温度和此两条谱线的强度比值及在数据库查出的其他参数值计算确定。

### 3.2 诊断结果及分析

诊断实验测得线圈功率为 200~800 W 时电感耦合等离子体发生器产生的等离子体薄层的发射光谱，其中，800 W 时得到的 300~500 nm 波段的发射光谱图如图 5 所示。从图中可以看出，不同功率下等离子体发射光谱均出现了一些较尖锐的谱线，谱线主要是 Ar+离子和 Ar 原子谱线，不同功率下出现谱线的波长位置基本相同，只是谱线强度有所

不同。具体分析化学成分，主要出现谱线的归属见表 1。

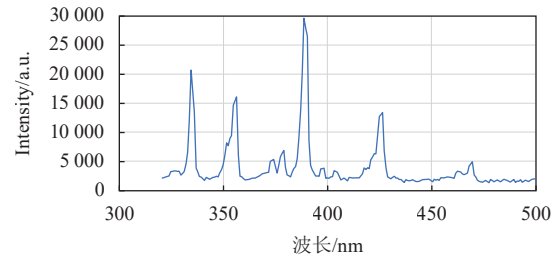


图 5 800 W 时等离子体发射光谱图

表 1 等离子体光谱归属

波长/nm	粒子种类	跃迁形式
355.951	Ar+离子	$3s^2 3p^4(^3P)4d \rightarrow 3s^2 3p^4(^3P)4p$
373.789	Ar+离子	$3s^2 3p^4(^1D)4d \rightarrow 3s^2 3p^4(^1D)4p$
378.084	Ar+离子	$3s^2 3p^4(^3P)4d \rightarrow 3s^2 3p^4(^3P)4p$
397.936	Ar+离子	$3s^2 3p^4(^3P)4d \rightarrow 3s^2 3p^4(^3P)4p$
403.546	Ar+离子	$3s^2 3p^4(^1D)4p \rightarrow 3s^2 3p^4(^1D)4s$
425.936	Ar原子	$3s^2 3p^3(^2P^{\circ}_{1/2})5p \rightarrow 3s^2 3p^3(^2P^{\circ}_{1/2})4s$

为了得到等离子体电子激发温度，根据文献[20]，选取 355.951、373.789、378.084、397.936、403.546 nm 这 5 条 Ar+离子谱线作为计算激发电子温度的光谱谱线，上述谱线的光谱学参数见表 2。

表 2 Ar+离子谱线的光谱学参数

波长/nm	$g_m$	$A_{mn}/S^{-1}$	$E_m/eV$
355.951	8	$2.88 \times 10^8$	23.160
373.789	8	$2.30 \times 10^8$	24.810
378.084	8	$7.70 \times 10^7$	22.770
397.936	2	$9.80 \times 10^7$	23.082
403.546	6	$4.40 \times 10^6$	21.498

按照 3.1 所述的玻尔兹曼作图法，以 $E_m$ 为横坐标、 $\ln\left(\frac{I_{mn}\lambda_{mn}}{g_m A_{mn}}\right)$ 为纵坐标进行描点，并做直线拟合，计算了 200~800 W 线圈功率下的电子激发温度。其中，在线圈功率为 800 W 时得到的玻尔兹曼图如图 6 所示，从图中可以看出，数据点均匀分布在拟合直线附近，基本呈玻尔兹曼直线分布，拟合直线为 $y = -1.1314x + 20.866$ ，直线的斜率的值为 $-\frac{1}{kT}$ ，从而得到电子激发温度 $T$ 为 10 247.66 K。200~700 W 的电子温度的计算和 800 W 时的类似，可以得到类似的玻尔兹曼直线。

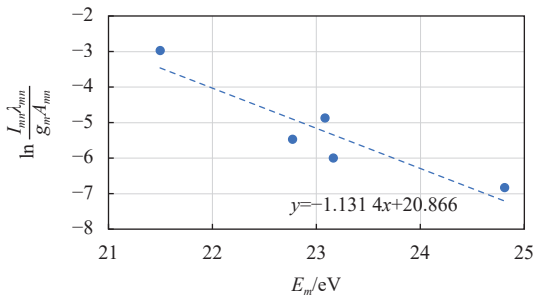


图 6 线圈功率 800 W 时玻尔兹曼作图法计算电子激发温度

计算得到的 200~800 W 线圈功率下的电子激发温度随功率变化如图 7 所示。电子激发温度最小值为 9 569.33 K, 最大值为 10 305.04 K。由于存在实验误差, 图中的曲线趋势基本可以概括为: 在 300 W 小功率以下, 随功率增大电子激发温度改变不大; 在 300~600 W 中功率时, 随功率增大电子激发温度增大; 在 600 W 高功率以上, 随功率增大电子激发温度改变不大。在 300 W 小功率以下, 电子激发温度改变不大, 是因为此时的高频放电处于电场型放电, 是由线圈耦合的高频电压引起的放电, 是电容耦合类型的放电, 当功率超过 300 W 后, 出现电场型放电向磁场型放电的转变, 此时等离子体发光变得很明亮, 等离子体耦合的能量大大增加, 电子温度增大, 在符合玻尔兹曼分布近似下, 电子激发温度近似等于电子温度, 因此电子激发温度增大。在 300~600 W 中功率时, 随功率增大电子激发温度增大, 这是因为, 随线圈功率增大, 耦合到工质气体内的功率增大, 电子在电场中加速从而从电场获得的能量增大, 因此电子温度增大。但是电子温度不会随功率增大而无限增大, 在 600 W 高功率以上, 随功率增大电子激发温度改变不大。这是因为, 随 RF 功率增大, 自由电子从电场中获得的能量增大, 气体电离率增大, 但是对于一定气压的气体, 电离率的增大不是无限制的, 当达到一定饱和值后, 就不再增加了, 此时耦合进工质气体的功率不再增加, 电子激发温度几乎不再变化。

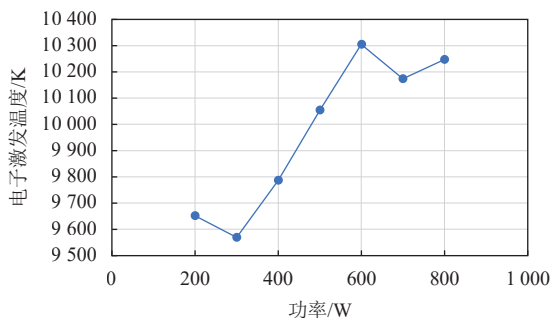


图 7 电子激发温度随功率变化图

采用 3.1 节所述的分立谱线强度比例法, 选取 425.9 nm 的 Ar 原子谱线和 355.95 nm 的 Ar<sup>+</sup>离子谱线的强度比值来计算等离子体电子密度。所得 200~800 W 线圈功率下的电子密度随功率变化如图 8 所示。电子密度最小值为  $2.84 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ , 最大值为  $3.86 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 。得到的等离子体密度在  $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  量级, 符合在前文中的预期。从图中可以看出, 随功率增大, 电子密度基本呈上升趋势, 在 300 W 以下和 600 W 功率以上, 电子密度基本不再变化。这是因为, 和前面的讨论类似, 在 300~600 W 功率时, 随功率增大, 耦合进工质气体的能量增大, 电子从电场获能增加, 而要发生电离, 需要电子在电场中加速获得的能量超过电离能。因此, 在一定气压下, 电子获能越多, 电离概率越大, 所以电子密度随功率增大基本呈上升趋势。而在 300 W 以下, 电场放电类型的等离子体发光微弱, 等离子体很稀薄, 增大功率会使其等离子体密度稍有增加, 超过 300 W 后即发生从电场放电到磁场放电模式的跳变, 等离子体密度增大速度加快。在较大的 600 W 功率以上, 对于这样的气压, 电离率已升至最大, 继续加大功率, 已对电离没有贡献了, 因此在此后, 更大的功率不能获得更大的电子密度。

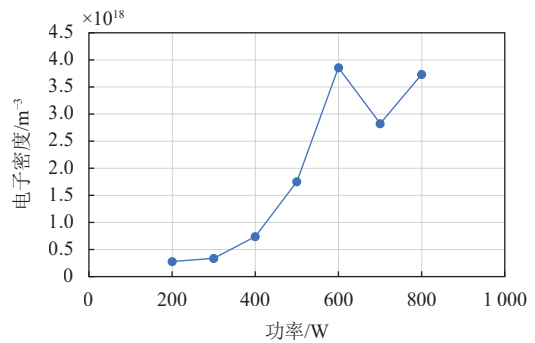


图 8 电子密度随功率变化图

## 4 结束语

本文根据理论分析和磁场仿真结果设计并加工了一款用于电子天线辐射调控的等离子体发生装置, 该装置能产生适用于此应用背景的等离子体薄层, 即半球形、厚度小于 5 cm 的等离子体密度为  $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  量级左右的高超声速飞行器典型等离子体鞘层。并用等离子体发射光谱的诊断方法对该等离子体鞘层的电子激发温度和等离子体密度进行了诊断测量, 诊断结果为: 电子激发温度最小值为

9 569.33 K, 最大值为 10 305.04 K; 电子密度最小值为  $2.84 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ , 最大值为  $3.86 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 。在此等离子体发生装置配置下, 放电由电场型放电转变为磁场型放电的跳变点约在功率 300 W 处, 等离子体电离率约在 600 W 时达到此气压下的饱和极值; 在 300~600 W 范围外, 功率对等离子体参数的影响很小, 在此范围内, 电子激发温度与电子密度均与功率呈正向单调变化关系, 这与此时电子从电场中加速时获得的能量增加相关。

### 参 考 文 献

- [1] 龚旻, 谭杰, 李大伟, 等. 临近空间高超声速飞行器黑障问题研究综述[J]. *宇航学报*, 2018, 39(10): 1059-1070.  
GONG M, TAN J, LI D W, et al. Review of blackout problems of near space hypersonic vehicles[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(10): 1059-1070.
- [2] 马平, 曾学军, 石安华, 等. 电磁波在等离子体高温气体中传输特性实验研究[J]. *实验流体力学*, 2010, 24(5): 51-56.  
MA P, ZENG X J, SHI A H, et al. Experimental investigation on electromagnetic wave transmission characteristic in the plasma high temperature gas[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2010, 24(5): 51-56.
- [3] CHADWICK K M, BOYER D W, ANDRE S N. Plasma and flow field induced effects on hypervelocity re-entry vehicles for L-band irradiation at near broadside aspect angles[C]//The 27th Plasma Dynamics and Lasers Conference. New Orleans: AIAA, 1996: 17-20.
- [4] 孙权, 李应红, 程邦勤, 等. 高压脉冲直流等离子体电源的研制及其放电特性[J]. *高电压技术*, 2012, 38(7): 1742-1748.  
SUN Q, LI Y H, CHENG B Q, et al. Development of high voltage pulsed DC plasma source and its discharging characteristics[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(7): 1742-1748.
- [5] 郭恒, 苏运波, 李和平, 等. 亚大气压六相交流电弧等离子体射流特性研究: 实验测量[J]. *物理学报*, 2018, 67(4): 138-147.  
GUO H, SU Y B, LI H P, et al. Characteristics of meso-pressure six-phase alternative current arc discharge plasma jet: Experiments[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(4): 138-147.
- [6] WANG Z, WU G Q, GE N, et al. Volt-Ampere and thermal features of a direct-current dual-jet plasma generator with a cold gas injection[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(10): 2906-2913.
- [7] 朱超, 姚峰, 陈德江, 等. 电弧风洞真空空气起弧技术研究[J]. *实验流体力学*, 2014, 28(2): 69-72.  
ZHU C, YAO F, CHEN D J, et al. Auto-Ignition investigation with low-pressure argon stream for arc heated wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(2): 69-72.
- [8] 谢楷, 李小平, 杨敏, 等. L、S 频段电磁波在等离子体中衰减实验研究[J]. *宇航学报*, 2013, 34(8): 1166-1171.  
XIE K, LI X P, YANG M, et al. Experimental study on attenuation characteristics of L and S band electromagnetic wave in plasma[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(8): 1166-1171.
- [9] XIE K, LI X P, LIU D L. Reproducing continuous radio blackout using glow discharge plasma[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(10): 1047011-1047016.
- [10] LEMMER K L, GALLIMORE A D, SMITH T B. Using a helicon source to simulate atmospheric re-entry plasma densities band temperatures in a laboratory setting[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2009, 18(2): 0250191-0250198.
- [11] 马昊军, 王国林, 罗杰, 等. S-Ka 频段电磁波在等离子体中的传输特性实验研究[J]. *物理学报*, 2018, 67(2): 0252011-0252017.  
MA H J, WANG G L, LUO J, et al. Experimental study of electromagnetic wave transmission characteristics in S-Ka band in plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(2): 0252011-0252017.
- [12] KENICHI I, SHION T, NORITAKA S, et al. Spatiotemporal optical emission spectroscopy to estimate electron density and temperature of plasmas in solution[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53: 235202.
- [13] JANGGUN J, JAVED S, ZHU Y H, et al. Photoacoustic spectral analysis at ultraviolet wavelengths for characterizing the Gleason grades of prostate cancer[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(21): 6042.
- [14] ZHAO Y Z, SU Y L, HOU X Y, et al. Directional sliding of water: Biomimetic snake scale surfaces[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021, 4(4): 210008.
- [15] 薄勇. 电磁波在若干特殊等离子体中电磁特性的关键问题研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
BO Y. Study on key issues of electromagnetic characteristics of electromagnetic waves in some specific plasmas[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [16] 菅井秀郎. 等离子体电子工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
KAN X L. Plasma electronic engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [17] 赵青, 刘述章, 童洪辉. 等离子体技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.  
ZHAO Q, LIU S Z, TONG H H. Plasma technology and its applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [18] BELINGER A. Plasma synthetic jet actuator: Electrical and optical analysis of the discharge[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2014, 47: 345202.
- [19] 李寿哲. 低温等离子体光谱理论基础及应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2019.  
LI S Z. Fundamentals and application of low temperature plasma spectroscopy[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2019.
- [20] 张金禾, 周严东, 刘汝兵, 等. 低压汞灯等离子体电子密度分布光谱诊断研究[J]. *机电技术*, 2015(12): 88-91.  
ZHANG J H, ZHOU Y D, LIU R B, et al. Spectral diagnosis of electron density distribution in low pressure mercury lamp plasma[J]. *Mechanical & Electrical Technology*, 2015(12): 88-91.