第 40 卷 第 1 期
2 0 1 8 年 2 月
低 温 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF LOW TEMPERATURE PHYSICS
Vol.40,No.1
Feb 2 0 1 8

外部磁场与氩气流对等离子体天线辐射性能影响研究*

徐 姿[1] 龚学余[1,2] 杜 丹[3†] 陈文波[1]

[1]南华大学 电气工程学院,湖南 衡阳 421001;

[2]南华大学 核科学技术学院,湖南 衡阳 421001;

[3]南华大学 数理学院,湖南 衡阳 421001

收稿日期:2017-12-21;接收日期:2018-02-08

【摘要】 本文建立了等离子体天线的二维轴对称模型,利用有限元法分析研究了低气压条件下氩气流和外部磁场对等离子体天线辐射性能的影响.本文通过改变外部磁场强度和氩气流速等条件,引起等离子体天线内部电子密度等物理参量的空间分布变化,并分析讨论空间分布变化产生的原因及其对天线辐射性能的影响.研究结果表明通过控制外部磁场强度、氩气流的大小可在一定程度上改善等离子天线的辐射性能.

关键词: 等离子体天线;外部磁场;氩气流;天线辐射

PACS: 52.77.-j;52.20.Xz;52.80.Hc;1340

1 引 言

等离子体作为与物质的气态、液态、固态三态并存的第四态,已经被广泛应用于生产生活的各个领域中.等离子体是由大量的正离子与自由电子组成的整体,宏观上呈准中性,是一个有集约效应的非束缚态体系.高密度的等离子体对一定频率的电磁波呈现良导体性能,使用等离子体代替金属作为天线辐射元件成为可能.由于等离子体对电磁波的放射和吸收特性,使得等离子体天线又具有一定的隐身能力[1].因此等离子体天线受到人们越来越多的关注.

等离子体产生维持过程不是一个单一的过程,影响等离子体天线特性因素是多元的,需要考虑磁场、电场、流体力学、传热、质量传输、化学反应等一系列问题.目前对等离子体天线的研究着重在等离子体天线的阻抗、色散关系等方面,但是也有不少研究人员开始分析其他因素对天线特性的影响:赵国伟等讨论了等离子体天线腔体材料的半径、厚度等对等离子体密度分布及天线辐射方向的影响[2];夏新仁等分析了磁场对激光等离子体通道天线的传播特性的影响[3];逯贵祯采用有限元方法对等离子体的电磁散射问题进行了多物理场分析,得到了温度场分布与电子密度分布的关系及其对电磁散射的影响[4];任静对等离子体天线的感应耦合场、粒子运动场等进行了研究,并分析了其对于天线辐射性能的影响[5].本文利用 comsol 有限元数值分析方法,研究了外部磁场与氩气流对等离子体天线内部参数空间分布及其辐射性能的影响.

2 理论模型的建立

整体系统模型如图 1 所示,其中等离子体化学反应的腔体通过位于顶部与底部的进气口与抽气口,在腔体内形成有效对流,使气体纯度更高,气体压强更加均匀.腔体外部放置有产生磁场的线圈,材料为黄铜[12].在数值分析中,采用 Comsol Mul-

* 国家自然科学基金(批准号:11675073, 11375085);湖南省聚变与等离子体物理创新团队建设项目(批准号:NHXTD03);南华大学博士启动基金项目(批准号:2015XQD43)资助的课题.

† 9367645@qq.com

tiphysics 多物理场有限元分析仿真软件建立二维轴对称模型对等离子体天线进行模拟分析，如图 2 所示：半径 0.0625 m，阴极与阳极间距 0.5 m，外加直流电压 500 V，天线辐射远场区域的纵向长度 0.75 m、横向长度 0.25 m.

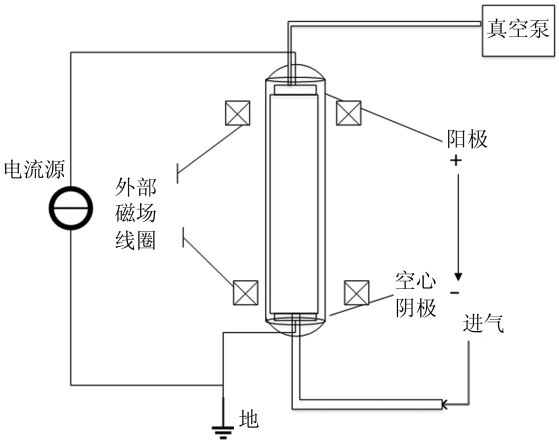

图 1　等离子体天线整体系统模型

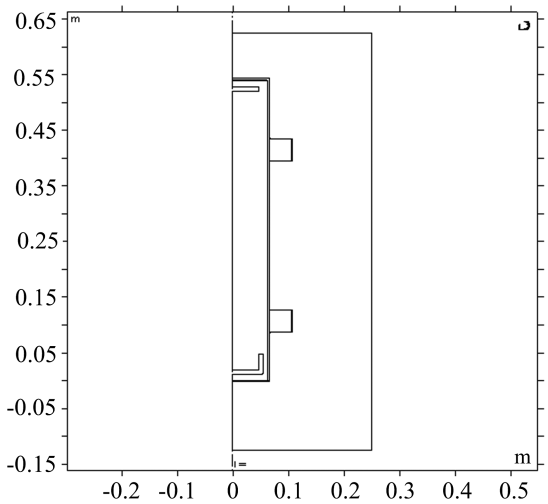

图 2　等离子体天线仿真图

2.1　等离子体化学反应模型

真空放电过程中，等离子体区要考虑粒子弹性碰撞、激发、电离、重物质反应及电极表面反应.其中与电子有关的化学反应过程的反应速率系数（k_k）由截面数据计算求得

$$k_k=\gamma\int_0^{\infty}\varepsilon\sigma_k(\varepsilon)f(\varepsilon)\,d_\varepsilon \tag{1}$$

式中 $\gamma=(2q/m_e)^{1/2}$ 为常数，γ 中的 m_e 是电子质量，ε 是电子能量，σ_k 是反应的碰撞截面数据，$f(\varepsilon)$ 是电子能量分布函数，一般服从麦克斯韦分布.

2.2　磁场、流场、等离子体间相互耦合作用

等离子体中存在流场、电场和磁场间相互作用.等离子体在磁场和流场作用下不断改变自身的温度、密度、压力等参数，反之这些参数变化又会对流场和磁场产生作用.因此，等离子体的仿真计算涉及流场与磁场耦合计算.等离子体数学模型包括基于流体理论的粒子输运方程和 Maxwell 方程具体如下：

Ⅰ. 电子、离子的连续性方程与动量传递方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e)+\nabla\cdot\Gamma_e=R_e-(u\cdot\nabla)n_e \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_i)+\nabla\cdot\Gamma_i=R_i-(u\cdot\nabla)n_i \tag{3}$$

$$\Gamma_e=-n_e(\mu_e\cdot E)-D_e\cdot\nabla n_e \tag{4}$$

$$\Gamma_i=-n_i(\mu_i\cdot E)-D_i\cdot\nabla n_i \tag{5}$$

式中 n_e、n_i 为电子、离子密度（$1/m^3$），R_e、R_i 为电子源项表达式（$1/(m^3\cdot s)$），μ_e、μ_i 为电子、离子迁移率（$m^2/(V\cdot s)$），E 为电场（V/m），D_e、D_i 为电子、离子扩散率（m^2/s），u 为电中性流体速率（m/s），Γ_e、Γ_i 为电子流、离子流通量（m^2/s）.

Ⅱ. 电子的能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_\varepsilon)+\nabla\cdot\Gamma_\varepsilon+E\cdot\Gamma_\varepsilon=R_\varepsilon-(\mu_\varepsilon\cdot\nabla)n_\varepsilon \tag{6}$$

式中 n_ε 为电子能量密度（V/m^3），R_ε 为非弹性碰撞能量（$V/(m^3\cdot s)$），μ_ε 为电子能量迁移率（$m^2/(V\cdot s)$），Γ_ε 电子能量通量（m^2/s）.

Ⅲ. 电势满足泊松方程

$$\nabla\cdot(\varepsilon_0\varepsilon_r\nabla\vec{V})=-e(n_i-n_e) \tag{7}$$

$$\vec{E}=-\nabla\cdot\vec{V} \tag{8}$$

式中 $\vec{V}$ 为电势，ε_0 为真空介电常数，ε_r 为相对介电常数.

Ⅳ. 电磁场相关的 Maxwell 方程

$$\nabla\times\vec{H}-\sigma(\vec{E}+v\times\vec{B})=\vec{J_e} \tag{9}$$

$$\nabla\times\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \tag{10}$$

式中，$\vec{J_e}$ 为外部电流密度.

Ⅴ.流场动量守恒方程

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t}+\rho u\cdot\nabla u=$$

$$-\nabla p+\nabla\cdot\left(\mu(\nabla u+(\nabla u)T)-\frac{2}{3}\mu(\nabla u)I\right)+F \tag{11}$$

式中，ρ 为混合气体密度 (kg/m^3)；u 表示速度 (m/s)；p 表示压力 (Pa)；F 表示体积力 (N/m^3)，在当前不考虑重力条件下为 0；T 表示气体温度 (K)；I 是单位矩阵 $\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}$.流场与等离子体放电模型之间可以通过速度 u 耦合起来.

Ⅵ.天线辐射方程

等离子体的非磁化电导率可以表示为：

$$\sigma=\frac{n_e e^2}{m_e(j\omega+\upsilon)}=\frac{\varepsilon_0\omega_{pe}^2}{\omega^2+\upsilon^2}(\upsilon-j\omega) \quad (12)$$

$$\varepsilon_r=n^2=1-j\frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega}=1-\frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega-j\upsilon)} \quad (13)$$

式中：e 是电子电荷量；ω 为电磁波角频率；$\omega_{pe}=\sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e\varepsilon_0}}$ 是等离子体角频率，υ 是等离子体碰撞频率.

等离子体磁化电导率（σ）与相对介电常数 (ε_r) 如下：

$$q\,n_e\sigma-1=\begin{bmatrix}1&-\alpha B_z&-\alpha B_y\\\alpha B_z&1&-\alpha B_x\\-\alpha B_y&\alpha B_x&1\end{bmatrix} \quad (14)$$

其中非磁化等离子体电导率 σ 与 α 的关系为：$\sigma=\alpha n_e e$，B_x、B_y、B_z 为磁场的沿 x、y、z 轴的分量.

$$\varepsilon_r=\begin{bmatrix}\varepsilon_{xx}&\varepsilon_{xy}&0\\-\varepsilon_{xy}&\varepsilon_{xx}&0\\0&0&\varepsilon_{zz}\end{bmatrix} \quad (15)$$

其中（ω_c 是回旋角频率）：

$$\varepsilon_{xx}=1-\frac{\left(1-\frac{j\upsilon}{\omega}\right)\left(\frac{\omega_{pe}}{\omega}\right)^2}{\left(1-\frac{j\upsilon}{\omega}\right)^2-\left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}$$

$$\varepsilon_{xy}=-\frac{j\left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)\left(\frac{\omega_{pe}}{\omega}\right)^2}{\left(1-\frac{j\upsilon}{\omega}\right)2-\left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2};\varepsilon_{zz}=1-\frac{\left(\frac{\omega_{pe}}{\omega}\right)^2}{\left(1-\frac{j\upsilon}{\omega}\right)}$$

由麦克斯韦方程组推导得到的电磁波动辐射方程如下：

$$\nabla\times(\mu_r^{-1}\nabla\times\vec{E})-k_0^2\left(\varepsilon_r-\frac{j\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right)\vec{E}=0 \quad (16)$$

$$\nabla\times\left(\left(\varepsilon_r-\frac{j\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right)-\nabla\times\vec{H}\right)-k_0^2\mu_r\vec{H}=0 \quad (17)$$

其中 μ_r 为相对磁导率，k_0 为自由空间波数.

3 仿真结果与分析

3.1 外部磁场对等离子体天线内部参数分布及其辐射特性的影响的研究

为了研究等离子体天线内部参数空间分布变化，仿真初始条件设置如下：初始温度 $T=300$ K，压强为 $P=0.5$ T，初始电子密度 $n_e=1.0\times10^{13}$ m^{-3}.仿真时间设定为 1 s 其中等离子体在 $t=10$ ms 电子密度达到平衡.外加磁场有垂直于电场方向和平行于电场方向两种，下面分析采用的是实践中应用更多的垂直磁场.

从图 3、图 5、图 7 中可以看出，电子密度随着外部磁场强度的增加而增加，但在等离子体天线内部的不同区域，电子密度增加的幅度是不一样的：在阴极区附近电子密度有较大增加，在阳极附近电子密度增加的幅度小于阴极.这种现象产生的原因，一是由于外部磁场的加入导致中性粒子与电子的电离碰撞次数增加，产生了更多的二次电子，整个等离子体区域电子都有所增加；二是电子在电场和磁场的共同作用下运动（洛仑兹力和电场力），电子运动轨迹发生了变化，呈螺旋状，电子运动的自由程增加，电子滞留阴极时间加长，导致阴极的电子密度增加比阳极大.

从图 9、图 11 中可以看出，随着外部磁场强度的增加，等离子体区域内的电子温度纵向变化不大，横向略有增加.这是因为，在外部磁场条件下，电子在洛伦兹力作用下做回旋运动，回旋半径与磁场强度成反比，电子横跨磁力线的纵向运动受到束缚，纵向各处电子都被束缚在阴极附近，边缘区域电子与峰值区域中的电子能量交换减弱，其很少失去能量，因此出现了纵向和横向的不同变化.

图 13、图 15、图 17、图 19 为等离子体天线，在不同电磁波条件下的辐射方向图，从中可以看出：1）在辐射相同频率的电磁波时，随着外部磁场强度的增强，天线的辐射范围略有增加，但是天线的辐射方向图曲线变得不光滑，出现了一些小波峰，天线的方向性变差，如图 13 外部磁场强度为 0.093731 T 的辐射方向图出现了小波谷，这说明外部磁场强度有一最佳值使得天线的辐射性能最优，从图 13、图 15、图 17、图 19 的综合来看，外磁场强度为 0.003794 T 时，4 个频率的电磁波辐射方向图都没有出现大的

波动，辐射性能表现最为出色；2)在相同的外部磁场强度下，随着电磁波频率的增加，天线的辐射范围增加，但方向性变差：如图 19 所示，在辐射最高频率(1.2 GHz)电磁波时，不同外部磁场强度的辐射性能出现不同程度的变差，外部磁场强度为 0.03794 T 和 0.093731 T 的辐射方向图的主瓣都由一个变成了两个，外部磁场强度为 0 T 和 0.003794 T 的辐射方向图中间略微向内凹陷.

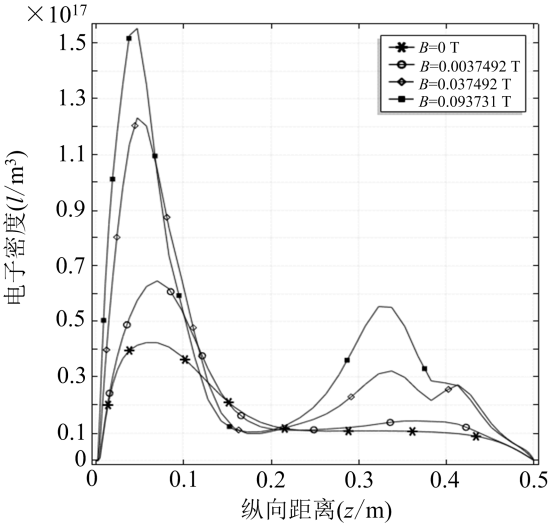

图 3 磁场条件下电子密度沿中心轴纵向分布图

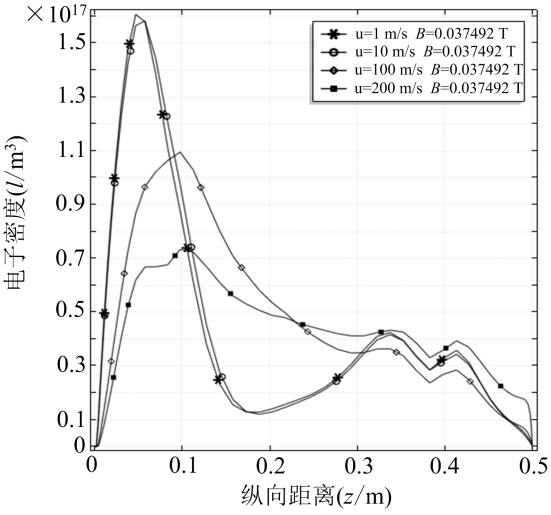

图 4 流场条件下电子密度沿中心轴纵向分布图

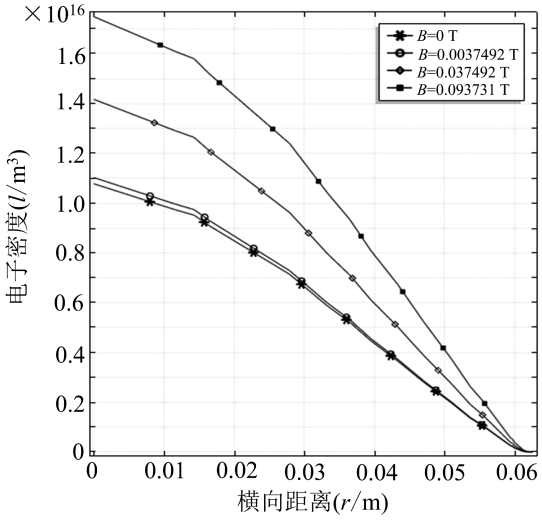

图 5 磁场条件下电子密度沿中心轴横向分布图

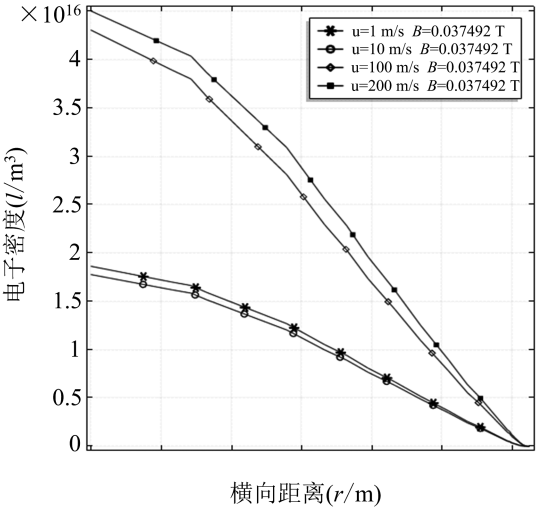

图 6 流场条件下电子密度沿中心横向分布图

3.2 在相同外部磁场条件下，氩气流对等离子体天线内部物理参数分布及其辐射特性的影响研究

为了进一步研究氩气流对等离子体天线内部参数分布的影响，仿真初始条件设置如下：初始温度 $T=300$ K，压强为 $P=0.5$ Torr，磁场强度 $B=0.0374$ T，初始电子密度 $n_e=1.0\times10^{13}\,\mathrm{m}^{-3}$，氩气流沿阴极进气口到阳极抽气口.仿真时间设定为 1 s，其中等离子体在 $t=10$ ms 电子密度达到平衡.

图 4、图 6、图 8 展示了在不同氩气流速条件下，对应不同放电过程的等离子体的电子密度沿中心轴纵向和横向分布情况.模拟结果表明，在相同的外部磁场条件下，与静态氩气流情形相比，改变氩气流速可以改变等离子体区域中的电子密度空间分布.随着氩气流速的增加，整体电子密度递减，但是天线内部的不同区域出现了不同的变化：纵向的电子密度随着氩气流速的增大而减小，如图 4 所示；横向的电子密度出现了相反的情况，电子密度随着氩气流速

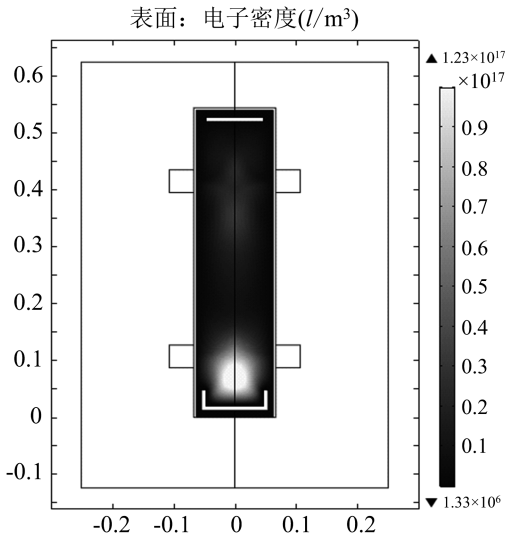

图 7 磁场条件下电子密度二维分布图

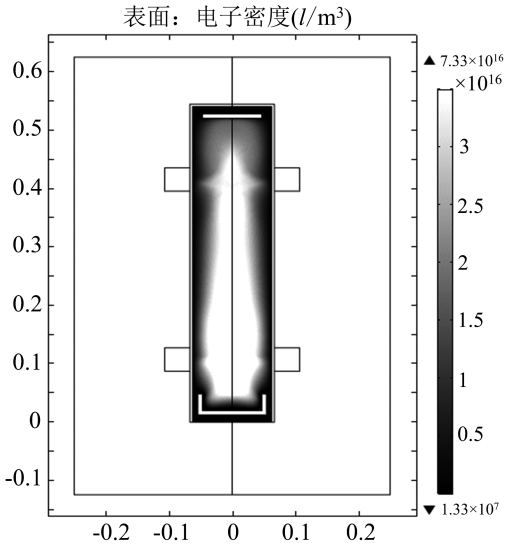

图 8 流场条件下电子密度二维分布图

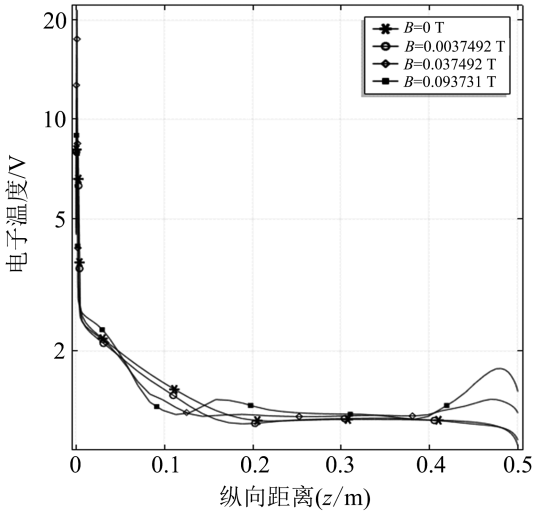

图 9 磁场条件下电子温度沿中心轴纵向分布图

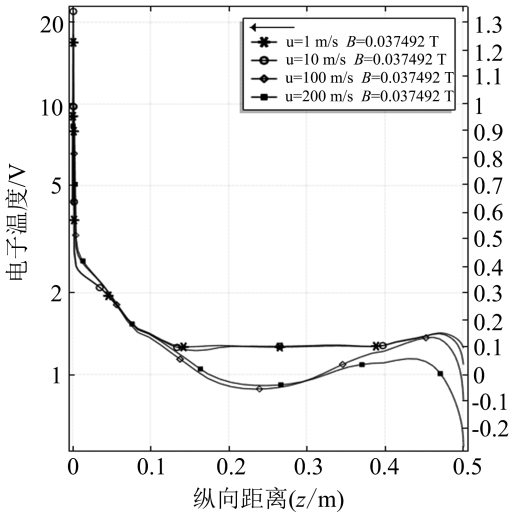

图 10 流场条件下电子温度沿中心轴纵向分布图

的增加而增加，如图 6 所示.随着纵向电子密度的减少与横向电子密度的增加，电子密度纵向和横向的分布越来越接近，图 7 和图 8 的对比也可以佐证这一点，即氩气流速的加入使得电子密度在空间上的分布更加均衡.通过图 9 与图 10、图 11 与图 12 的对比可知：纵向的电子温度与静态氩气流时相比整体变化不大，中间区域略微下降；横向电子温度整体性下降.这是因为在氩气流从阴极向阳极的对流作用下，天线内部的电子和离子整体都向阳极迁移，电场与外部磁场共同作用导致的电子加速在阴极附近集中的情况在某种程度上被氩气流对流效应抵消了一部分，成功阻止了部分电子迁移到阴极附近，大量的电子滞留在了离阴极距离约为 0.2 m 附近的中间区域，导致这部分的电子密度明显升高，并且这种增长趋势沿着纵轴向阳极方向延伸扩展.随着氩气流速的增加，这种趋势越来越明显.然而电场与外部磁场的作用仍然使得大量电子向阴极集中，在电子被限制在阳极和中间区域的情况下，阴极区域电子的损失不能被有效弥补，因此阴极附近的电子密度随着氩气流速的增加而下降，波峰逐渐消失，分布曲线分布越来越均衡.

图 14、图 16、图 18、图 20 为等离子体天线在相同外部磁场强度、不同氩气流速条件下的天线辐射方向图，从中可以看出：与静态氩气流相比，天线的辐射范围略有增加，辐射性得到能明显改善，这一点通过图 19 与图 20 的对比可得：在辐射 1.2 GHz 电磁波时，加

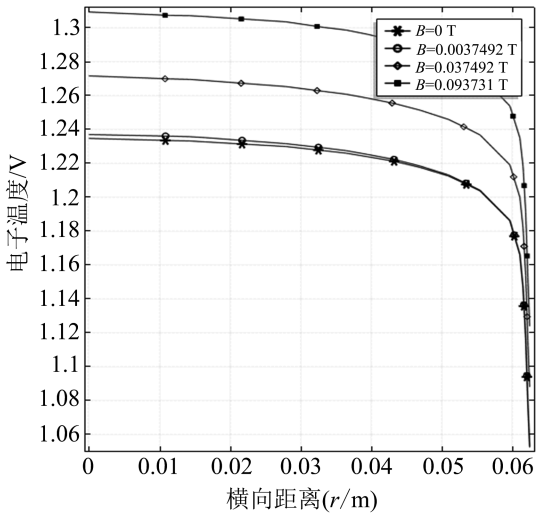

图 11 磁场条件下电子温度沿中心轴横向分布图

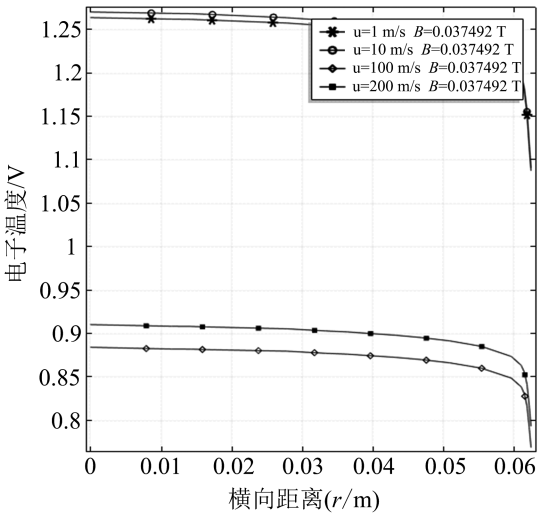

图 12 流场条件下电子温度沿中心轴横向分布图

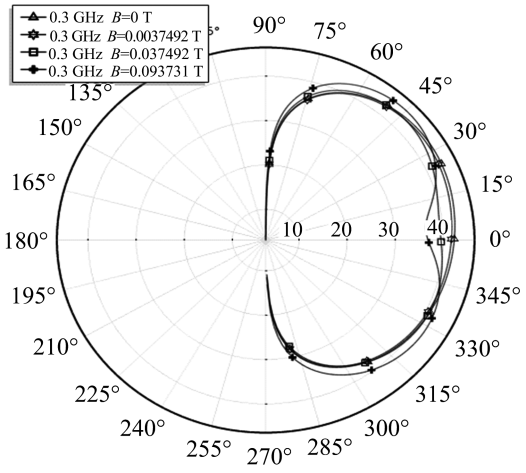

图 13 磁场条件下0.3 GHz电磁波辐射方向图

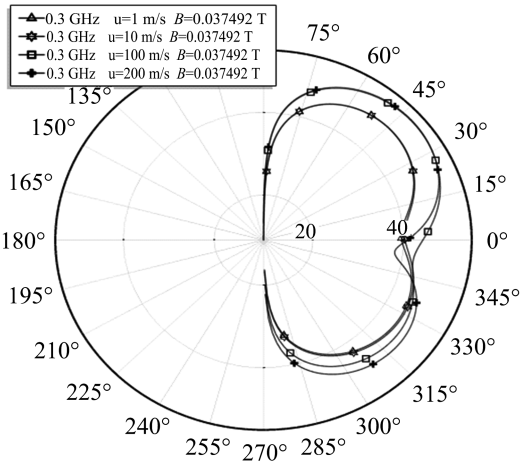

图 14 流场条件下0.3 GHz电磁波辐射方向图

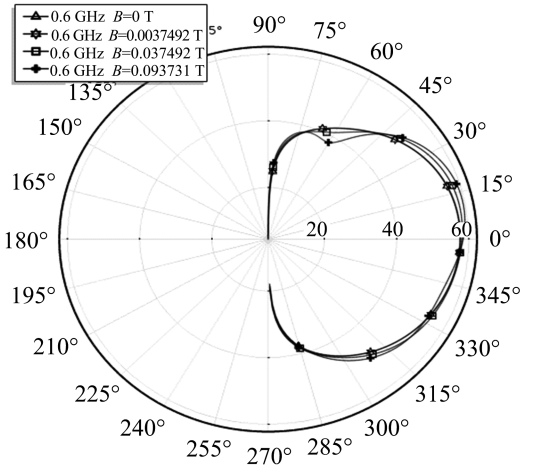

图 15 磁场条件下0.6 GHz电磁波辐射方向图

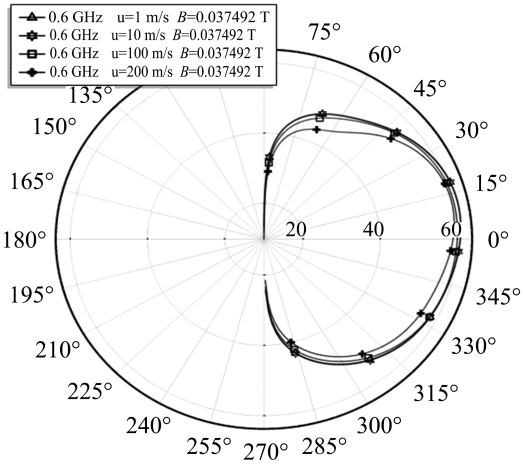

图 16 流场条件下0.6 GHz电磁波辐射方向图

入氩气流的天线,辐射方向图主瓣没有变成两个.这表明氩气流的加入可以拓宽等离子体天线辐射电磁

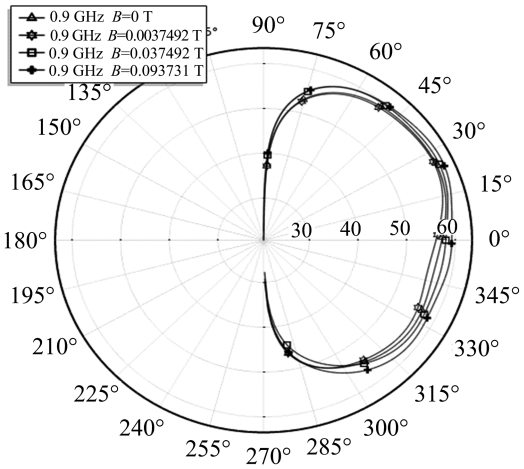

图 17 磁场条件下0.9 GHz电磁波辐射方向图

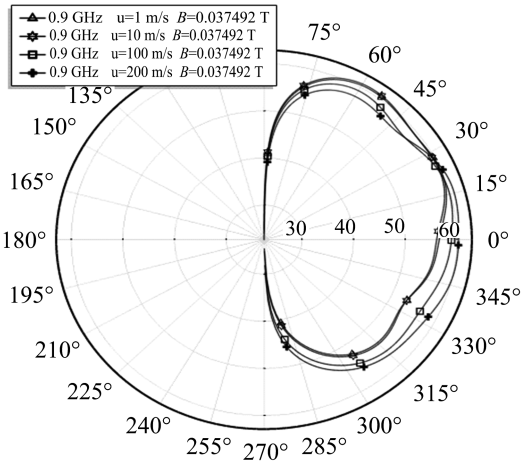

图 18 流场条件下0.9 GHz电磁波辐射方向图

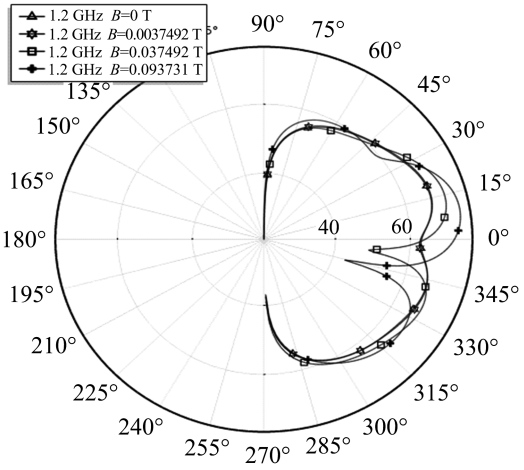

图 19 磁场条件下1.2 GHz电磁波辐射方向图

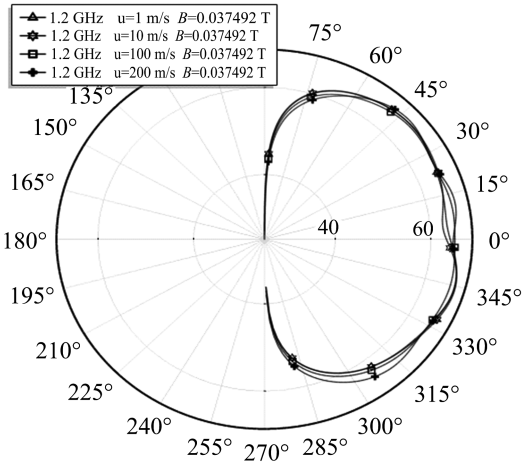

图 20 流场条件下1.2 GHz电磁波辐射方向图

波的范围,优化等离子体天线的辐射性能.

4 结 论

本文建立了等离子体天线的二维轴对称模型,利用有限元软件 Comsol 模拟研究了低气压条件下氩气流和外部磁场对等离子体天线辐射特性的影响.研究结果表明,有外部磁场而无氩气流作用时,外部磁场虽然能够提高等离子体的电子密度和能量,但在磁场和电场双重作用下导致阴极附近的电子密度增加大于阳极附近,等离子体电子密度空间分布曲线更加尖锐,等离子体天线的辐射范围略有增加但方向性变差.在相同的外部磁场强度条件下,加入的氩气流通过对流效应,使得等离子体电子密度的空间分布曲线越来越均衡,优化了等离子体天线的辐射性能.这表明通过控制外部磁场强度及氩气流大小可在一定程度上改善等离子天线的辐射性能.

参　考　文　献

[1] Zhou J, Fang J, Lu Q, et al., *The Scientific World Journal*, **2014**(2014), 290148.

[2] 赵国伟，徐跃民，陈诚，物理学报，**56**(2007)，5298.

[3] 夏新仁，尹成友，强激光与粒子束，**9**(2008)，1833.

[4] 逯贵祯，洪楚雨，中国传媒大学学报(自然科学版)，**2**(2014)，18.

[5] 任静，龚学余，王恩峰，任玉虎，低温物理学报，**36**(2014)，109.

[6] 夏新仁，尹成友，王守杰，金贤龙，吉首大学学报(自然科学版)，**30**(2009)，46.

[7] 夏新仁，尹成，核聚变与等离子体物理，**30**(2010)，30.

[8] 陈文波，龚学余，路兴强，等.，物理学报，**63**(2014)，80.

[9] Mathew J, Fernsler R F, Meger R A, et al, *Physical Review Letters*, **77**(1996), 1982.

[10] Caillault L, Larigaldie S, *Journal of Physics D Applied Physics*, **35**(2002), 1010.

[11] Conrads H, Schmidt M, *Plasma Sources Science & Technology*, **9**(2000), 441.

[12] Wang Shiqing, Yan Zelin, Li Wenzhong, Liu Jian, Li Jian, Xu Lingfei, *Plasma Science and Technology*, **10**(2008), 671.

Influence of External Magnetic Field and Argon Flow on Radiation Characteristics of Plasma Antenna*

XU Zi[1]　　GONG Xueyu[1,2]　　DU Dan[3]　　CHEN Wenbo[1]

[1] *School Of Electrical Engineering, University Of South China, Hengyang, Hunan* 421001, *China*;

[2] *School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan* 421001, *China*;

[3] *School of Mathematics and Physics, University of South China, Hengyang* 421001, *China*

Received date: 2017-12-21; accepted date: 2018-02-08

【Abstract】 In this paper, a two-dimensional axisymmetric model of plasma antenna is established. The influence of argon gas flow and external magnetic field on the radiation characteristics of plasma antenna under low pressure are studied by finite element method. In this paper, the spatial distribution of physical parameters such as the electron density inside the plasma antenna is changed by changing the conditions of the external magnetic field and the flow rate of the argon gas. The reasons for the spatial distribution change and its influence on the radiation performance of the antenna are analyzed and discussed. The results show that by controlling the strength of the external magnetic field, the size of the argon flow can improve the radiation performance of the plasma antenna to a certain extent.

Keywords: Plasma Antenna; External magnetic field; Argon flow; Antenna Radiatio

PACS: 52.77.-j; 52.20.Xz; 52.80.Hc; 1340

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos: 11675073, 11375085); the Construct Program of Fusion and Plasma Physics Innovation Team in Hunan Province (Grant no. NHXTD03); the Doctoral Startup Foundation of University of South China (Grant Nos: 2015XQD43).