VASIMR 中螺旋波等离子体源设计

李 波 王一白 张普卓 王守国

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191) (中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 螺旋波等离子体具有密度高,可控性强且无电极等优点,被应用于可变比冲磁等离子体火箭(VASIMR,Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket)中. 设计了一个螺旋波等离子体源,并给出了其中 2 个关键部分——磁场线圈和螺旋波天线的设计. 对螺旋波等离子体源进行了初步实验,结果表明,电子密度随射频输入功率的增加几乎呈线性上升,估计电子密度的量级在通入工质后完全可达 10^{11} cm^{-3}.

关 键 词: 可变比冲磁等离子体火箭; 螺旋波等离子体; 磁场线圈; 螺旋波天线

中图分类号: V 439

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)06-0720-06

Design of helicon plasma source for VASIMR

Li Bo Wang Yibai Zhang Puzhuo

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Wang Shouguo

(Institute of Microelectronic of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Helicon plasma has the advantages of very high density, strong controllability and electrodeless. Therefore, it is applied in variable specific impulse magnetoplasma rocket (VASIMR). A helicon plasma source was designed, and the design methods of two key components, magnet coils and helicon antenna, were given. The experimental results of the helicon plasma source indicate that electron density rises linearly as radio frequency power increases, and it is estimated that the order of electron density of the helicon plasma source could absolutely reach 10^{11} cm^{-3} when working fluid is injected in.

Key words: variable specific impulse magnetoplasma rocket (VASIMR); helicon plasma; magnet coils; helicon antenna

可变比冲磁等离子体火箭 VASIMR(Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket)的功率大,推力大,比冲高,并且比冲在恒定功率下是可调节的,因此它非常适合用于载人火星探测和其他深空探测等任务中. 目前,VASIMR 包括 3 个相连的线性磁单元[1],其中,前单元控制气体推进剂的喷射和离子化,称其为螺旋波等离子体源.

螺旋波等离子体是一种高密度的低温低气压等离子体,其密度在 0.1 Pa 的低气压下可达 10^{13} cm^{-3}量级,这是迄今采用人工方法在低气压下所能获得的最大等离子体密度,并且其电离效率可达 100%[2]. NASA 研制的 VASIMR 发展至今,其螺旋波等离子体源的射频加载功率已从最初的3 kW增加到 200 kW,并且磁场场型和天线形式也经过了不断的改进与完善,在此期间,参考文献[3-5]对 VASIMR 的螺旋波等离子体源进行了大量实验,获得了很多有价值的实验数据.

由于国内对 VASIMR 的研究尚处于起步阶段,很多理论和技术上的难题还未解决,因此应当循序渐进,先将螺旋波等离子体源从 VASIMR 中

收稿日期: 2011-03-02; **网络出版时间**: 2012-06-15 15:43

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120615.1543.019.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10705003)

作者简介: 李 波(1985-),男,北京人,博士生,mvp_522_bobo@sa.buaa.edu.cn.

分离出来单独研究,但同时也要考虑其在 VASIMR 中应用这一背景. 单就螺旋波等离子体源而言,参考文献[6 -9]早在 80 年代就开始对其进行研究,他们发现,双磁场线圈能够在等离子体中产生电势差,使得离子加速至超声速,并且此电势差在等离子体产生后约 100 μs 就已建立,随后便可保持稳定. 此外,通过改变磁场强度大小可方便的调节等离子体的出射速度. 在国内,参考文献[10]曾对螺旋波激发等离子体源的结构位形,天线耦合原理及参数设计原则作出过详细介绍. 参考文献[11]首次在国内进行了螺旋波等离子体实验,他们设计了一种玻璃系统的螺旋波等离子体发生装置,并利用朗缪尔双探针法初步研究了该螺旋波等离子体的特性,其等离子体中心区密度估计可超过 10^{12} cm^{-3}. 此外,参考文献[12]设计了一个采用 Nagoya 型天线的螺旋波等离子体源,其工作压强为 2.8×10^{-3} Pa,工作频率为 27.12 MHz,外加磁场强度为 200×10^{-4} T,它能够产生密度高达 3.9×10^{13} cm^{-3}的等离子体.

1　常用高频等离子体源

高频等离子体源是由天线或电极从外部得到功率,通过电磁场对电子的加速作用来维持等离子体,这使得在低气压下产生高密度等离子体成为可能. 与其他等离子体源相比,它更有利于提高功率和电子的能量吸收效率.

1.1　电容耦合等离子体源

电容耦合等离子体(CCP, Capacitively Coupled Plasma)源实质上是由两个间距较小的金属电极组成,它们被安置在一个压强低于或接近于大气压的反应器中. 典型电容耦合等离子体源的电极间距为 1 ~ 5 cm,工作压强为 10 ~ 1 000 Pa,高频功率为 20 ~ 200 W,高频频率为 13.56 MHz. 电容耦合等离子体源产生的等离子体密度较低,但容易产生大口径等离子体,并且可通过双高频电源方案同时控制离子轰击能量和离子通量,另外即使绝缘膜堆积在电极上,也可以稳定的维持等离子体状态.

1.2　感应耦合等离子体源

感应耦合等离子体(ICP, Inductively Couples Plasma)源是通过将射频功率加在一个非共振线圈上来产生等离子体,天线电流产生随时间变化的磁场,磁场引发感应电场,等离子体中的电子受感应电场作用被加速,由于碰撞的存在,电子将吸收的电磁能转移,产生焦耳加热. 这种等离子体源可在 1 ~ 40 Pa 范围内产生密度达 10^{12} cm^{-3},直径达 30 cm 的等离子体,并且其结构简单,无需直流磁场,使用射频电源而不是微波电源,可在较宽的压强范围内获得大口径、高密度的等离子体,但由于使用目的不同,非共振的工作状态可能是优点,也可能是缺点.

1.3　电子回旋共振等离子体源

电子回旋共振(ECR, Electron Cyclotron Resonance)等离子体源是利用电磁波产生、维持放电并加热等离子体中的电子,因此它属于波加热气体放电. 这种等离子体源可在 0.05 Pa 低压下产生密度达 10^{11} cm^{-3}的等离子体,但由于其外加磁场通常是由永磁体产生,因此往往体积较大.

1.4　螺旋波等离子体源

螺旋波等离子体(HWP, Helicon Wave Plasma)源通过射频驱动天线激发螺旋波,并通过绝缘器壁发射到等离子体中,在那里螺旋波具有横波模式结构并且沿着等离子体柱传播,在波的电场作用下,电子的动能增大,能量从波到电子的转化机制比较复杂,除了波的碰撞衰减外,还有无碰撞状态下的朗道衰减以及存在于天线正下方的驻波对电子的直接加速作用等.

中科院物理研究所的房同珍对几种常见等离子体源的放电参数进行了比较[10],如表 1 所示. 可看出,与其他 3 种等离子体相比,螺旋波等离子体有着许多优点,这是它被应用于 VASIMR 中的重要原因. 首先它具有非常高的等离子体密度,这使得 VASIMR 可以具有较大的推力. 实验表明其密度在 0.1 Pa 量级的压强下比 ECR 等离子体的密度提高了一个量级,并且发生装置也要简单一些. 其次,在等离子体的稳定性、易操作性及自动调节等方面,螺旋波等离子体比 ECR 等离子体又略胜一筹,这使得 VASIMR 能够在恒定功率下,通过调节离子化和加速两个阶段所用射频能量的比例来方便的调节推力和比冲. 最后,由于螺旋波等离子体源不需要电极,使得 VASIMR 不仅在最大功率下能够提供较大推力,而且有很高的离子回旋共振加热效率. 另外,无电极设计也避免了离子推进器所面临的电极损耗和推进器寿命等问题.

表 1　几种等离子体源放电参数比较

等离子体类型	f/MHz	P/Pa	B/T	n_e/cm^{-3}	T_e/eV
CCP	0.05 ~ 13.6	10 ~ 100	0	10^{10}	1 ~ 5
ICP	1 ~ 20	0.4 ~ 40	0	10^{10} ~ 10^{11}	1.9 ~ 6
ECR	2450	0.1 ~ 0.7	0.1	10^{11}	3 ~ 25
HWP	10 ~ 20	0.05 ~ 1	0.01	10^{12} ~ 10^{14}	2 ~ 10

2 螺旋波等离子体源设计

通常螺旋波等离子体源主要由以下几部分组成:放电管,磁场线圈,天线和气体注入系统等. 其中磁场线圈和天线的设计尤为重要.

2.1 放电管设计

放电管采用石英制成,它具有极低的热膨胀系数,高的耐温性,极好的化学稳定性,优良的电绝缘性,极佳的透光性以及较高的机械性能,这些优点都是放电管所必需的. 本文设计的放电管主要参数如下:管长 380 mm,管内径 128 mm,管壁厚 5 mm.

2.2 磁场设计

磁场的设计要考虑多方面因素,既要考虑其他系统的要求,又要兼顾自身技术实现方面的要求.

2.2.1 *磁场方案选择*

磁场可以用铜线圈、永磁体或超导线圈来实现. 3 种方案各有优缺点:铜线圈方案可通过改变电流大小方便地调节磁场大小,但强电流带来的线圈发热问题需要冷却系统等辅助设施;永磁方案无需电力,且不存在电流发热问题,但缺点是磁场场型较难达到设计要求,且磁场大小也不易调节,目前在 VASIMR 中没有应用;超导线圈由于不存在电流发热问题,磁感应强度可比另 2 种方案更高,重量更轻,但相应的维持超导线圈运行的低温设施造价较高. 综上所述,最终采用铜线圈方案.

2.2.2 *磁场场型设计*

磁场场型设计主要是针对轴线上的场型. 根据 VASIMR 中螺旋波等离子体源磁场场型要求,采用类似于亥姆霍兹线圈的双线圈方案. 具体设计要求如下:磁场强度峰值以 250×10^{-4} T 为基准,两线圈同轴且匝数相等,其间距在 20 ~ 150 mm之间可调,每个线圈可单独通以直流电,但由于无线圈冷却系统,电流不得超过 30 A. 参考相关磁场线圈设计经验,最终设计并加工完成的双线圈实物照片及主要参数分别见图 1 和表 2.

表 2 磁场线圈主要参数

参数	铜导线直径/mm	线圈内径/mm	线圈外径/mm	线圈轴向长/mm	线圈匝数
数值	5	144	250	90	220

为了获得准确的磁场场型,采用多层多匝线圈轴线场强公式(1)并根据表 2 中参数对其进行计算,分别得到不同加载电流及不同线圈间距时

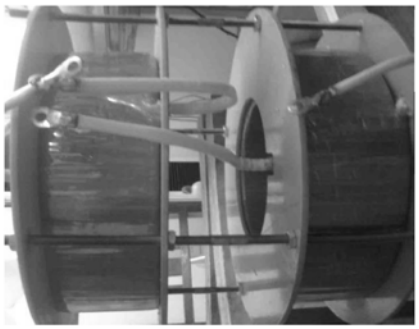


图 1 磁场线圈照片

轴线上的准确场强. 实验中,可以根据计算结果调节相应参数以得到所需磁场场型.

$$B = \frac{\mu_0 nI}{2(R_2 - R_1)} \cdot \left[\left(\frac{l}{2} + z\right) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}} + \left(\frac{l}{2} - z\right) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} \right] \quad (1)$$

式中,B 为轴线上某点的磁场强度;R_1 和 R_2 分别为线圈内径及外径;l 为线圈轴向长度;n 为单位长度的线圈匝数(多层的乘以层数);z 为所求点到轴线中心的距离.

图 2 及图 3 分别是线圈间距为 90 mm 和两线圈加载电流均为 18 A 时的计算结果.

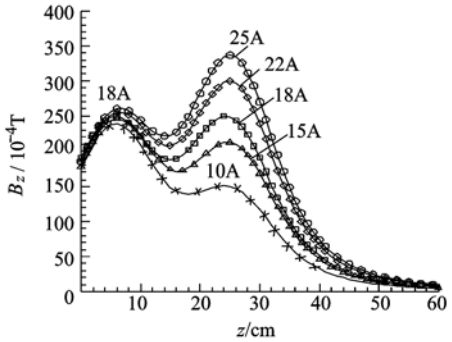


图 2 电流不同时轴线上场强 B_z 分布图

2.3 天线设计

目前,螺旋波等离子体源的天线绕制形式主要有 3 种,即 Boswell 型,Nagoya 型和 Shoji 型,它们的天线位形如图 4 所示.

Nagoya 型是一种标准型的天线,而 Boswell 型是在它的基础上发展得到的,其相当于将 Nagoya 型天线顶端和底端的电流路径分别分成两条独立的路径. Shoji 型天线与前两者有较大区别,

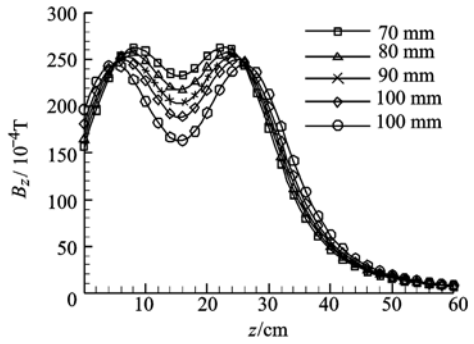


图 3　线圈间距不同时轴线上场强 B_z 分布图

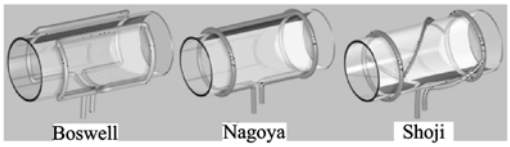


图 4　天线位形图

它的能量耦合具有方向性,也就是说 Shoji 型天线产生的是非轴对称的射频能量耦合,能量被大部分转化为 $m = +1$ 右旋螺旋波并沿着磁场线正向在等离子体中传播,以此来维持非轴对称放电. 在实际应用中,即使等离子体源被设计成同时激发 $m = \pm 1$ 螺旋波,这 3 种天线形式也都优先激发$m = +1$ 右旋螺旋波,而 $m = -1$ 左旋螺旋波几乎观察不到,这是因为在螺旋波等离子体源中密度梯度过大而抑制了它的激发. 此外,中科院微电子所王守国研究员提出了一种交叉型(类似于"8"字)天线,它也同样优先激发 $m = +1$ 右旋螺旋波.

参考文献[13]对前 3 种天线分别进行了实验,并且测量了电子密度和磁场的关系曲线. 他们发现,Boswell 型和 Nagoya 型天线几乎有着完全重合的 n-B 曲线,Shoji 型天线与前两者相比能激发产生更高的电子密度. 在本文的螺旋波等离子体源设计中,选用了 Shoji 型天线.

2.3.1　相关理论

螺旋波是由与磁场成同一角度传播的多个低频哨声波叠加而成,对于它有如下关系成立:

$$mkJ_m(k_\perp R) + k_z J'_m(k_\perp R) = 0 \qquad (2)$$

$$kk_z = \frac{e\mu_0 n_0 \omega}{B_0} \qquad (3)$$

其中 k 是波矢的大小,且有

$$k = (k_\perp^2 + k_z^2)^{1/2} \qquad (4)$$

式中,$k_\perp$ 和 k_z 分别为波矢的径向及轴向分量;e,μ_0,n_0 和 ω 分别为电子电荷,真空磁导率,电子密度及射频源频率;m 和 R 分别为方位角模数及放电管内半径;J_m 为贝塞尔函数.

Shoji 型天线在等离子体源中激发 $m = +1$ 模式的螺旋波,此时存在以下 2 种极限情况:

$$\left.\begin{aligned} k_\perp R &= 3.83 \quad k_z << k_\perp \\ k_\perp R &= 2.41 \quad k_z >> k_\perp \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

它们分别对应于等离子体为低密度和高密度的情况.

2.3.2　参数设计

螺旋波是通过朗道阻尼方式将能量传输给电子,它要求天线能很好的将射频源供给的能量耦合传递给螺旋波,因此确定天线的长度至关重要. 这需要分两步进行:①确定等离子体的临界密度值 n_0^*,即 $k_z = k_\perp$ 时的密度;②确定天线长度 l_a.

已知条件:放电管内半径 $R = 0.064$ m,线圈中心磁场强度 $B_0 = 0.025$ T,射频电源频率 $f = 13.56$ MHz.

1) 确定 n_0^*. 由式(4)可知,当 $k_z = k_\perp$ 时,$k = \sqrt{2}k_z$,根据文献[14]中的图 13,图 15 查得,$k_\perp R = 2.5$,则

$$k_z = k_\perp = 2.5/R = 39.1$$

根据式(3),得

$$n_0^* = \frac{kk_z B_0}{e\mu_0\omega} = \frac{\sqrt{2}k_z^2 B_0}{e\mu_0 2\pi f} = 3.1 \times 10^{12}\ \mathrm{cm}^{-3}$$

2) 确定 l_a. 根据表 1 可知,HWP 的密度一般在 $10^{12} \sim 10^{14}\ \mathrm{cm}^{-3}$之间,因此可以认为是高密度等离子体,根据式(5),得 $k_\perp R = 2.41$ 及 $k \approx k_z$,假设 $n_0 = 1 \times 10^{13}\ \mathrm{cm}^{-3}$,则由式(3)得螺旋波沿轴向的波长为

$$\lambda_z = \frac{2\pi}{k_z} = \sqrt{\frac{2\pi B_0}{e\mu_0 n_0 f}} = 7.6\ \mathrm{cm}$$

由文献[14]可知,天线和螺旋波模式耦合较好时,$k_z \approx \pi/l_a$,$3\pi/l_a$ 等等,对应的波长为 $\lambda_z \approx 2l_a$,$2l_a/3$ 等等. 根据放电管长度,取 $\lambda_z \approx 2l_a/5$,则天线长度 $l_a \approx 5\lambda_z/2 = 19$ cm,并且天线采用宽为 1 cm的扁铜线. 图 5 是 Shoji 型天线在石英管上绕制形式的照片.

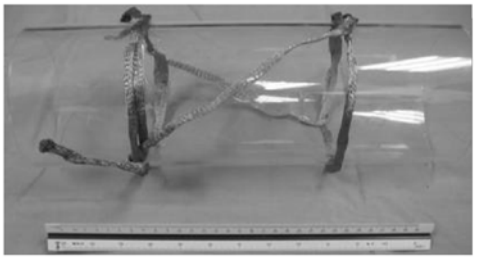


图 5　Shoji 型天线照片

3　初步实验研究

3.1　实验设备

实验设备主要包括螺旋波等离子体源,磁场

电源和射频电源,朗缪尔静电探针,真空系统及配套设备. 其中射频电源采用中科院微电子研究所生产的 SY-500W 型,工作频率为 13.56 MHz. 朗缪尔静电探针采用 Hiden 公司生产的“Espion Advanced Langmuir Probe”,其工作电压为 -200 ~ 100 V,电流为 1×10^{-3} ~ 1 A,可测量范围从直流到 10 MHz ± 3 dB.

真空系统主要由真空舱主体、多窗观测系统、真空机组及辅助系统组成. 其中真空舱主体尺寸为 ϕ800 mm × 1 000 mm,真空机组包括一台低温冷凝泵和一台涡旋式干泵. 辅助系统主要包括分体式冷却循环水机组和低噪音空气压缩机. 其中冷却循环水机组用于冷却低温泵压缩机,空气压缩机用于驱动所有电气阀门的开启与关闭. 本真空系统的真空度可达 10^{-4} Pa. 图 6 及图 7 分别是本实验系统示意图和实物照片.

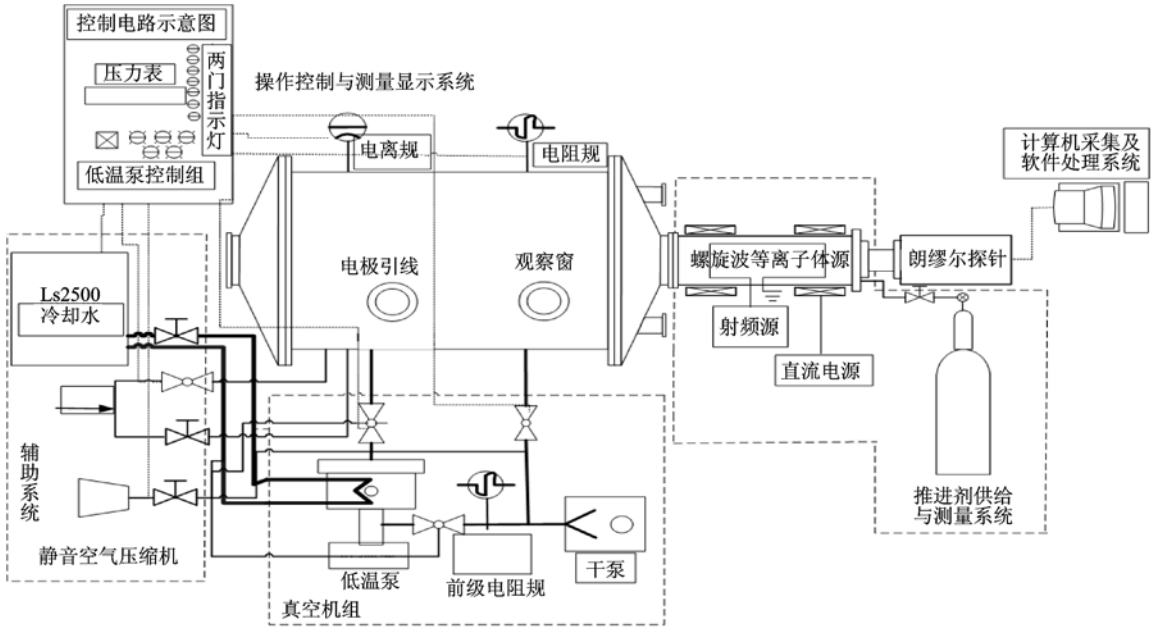


图 6 实验系统示意图

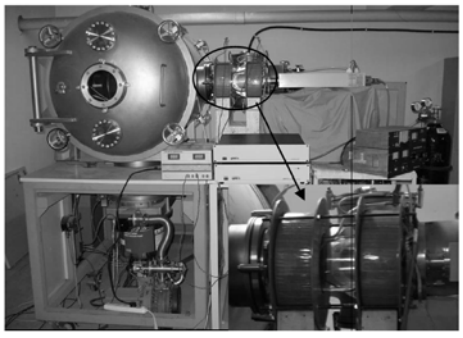


图 7 实验系统照片

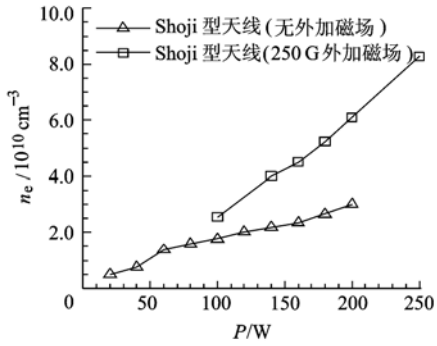


图 8 电子密度 n_e 随射频输入功率变化曲线

3.2 实验结果

实验中未对螺旋波等离子体源通入工质,放电气体为抽真空后剩余的极少量空气,两磁场线圈轴线上场强峰值均为 250×10^{-4} T,射频输入功率从 0 ~ 250 W 之间变化.

图 8 给出了螺旋波等离子体源产生的电子密度随射频输入功率的变化曲线. 可以看出,无论有无外加磁场,电子密度随着输入功率的增加都几乎呈线性上升,而在加入峰值为 250×10^{-4} T 的外加磁场后,电子密度显著增加,这一点由图 9 与图 10的等离子体放电强弱对比也可更为直观的

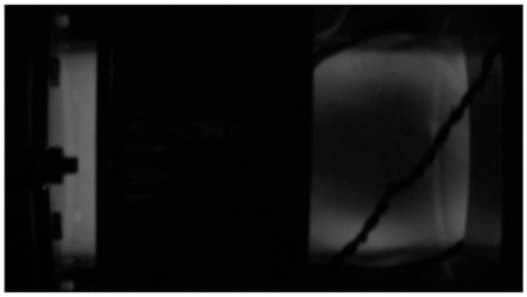


图 9 无外加磁场时等离子体放电照片

看出. 对于 VASIMR 中的螺旋波等离子体,最为关心也是最为关键的就是电子密度,由于未通入工

质且加载的射频输入功率较低,实验得到的最高电子密度量级仅接近于 10^{11} cm^{-3},但根据经验,通入工质后电子密度应该完全可以达到10^{11} cm^{-3}的量级.

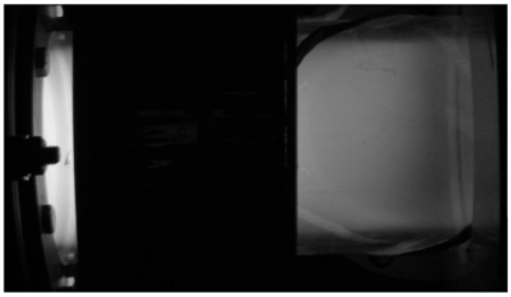


图 10　外加磁场轴线场强为 250 G 时等离子体放电照片

4　结　论

可变比冲磁等离子体火箭具有比冲极高及可控性等优点,是一种先进的高功率电推进方式. 在 VASIMR 中产生的等离子体为螺旋波等离子体(HWP),之所以采用它,是因为与 CCP,ICP 及 ECR 等典型等离子体的发生装置相比,螺旋波等离子体源具有以下优点:

1) 可产生非常高的等离子体密度(10^{13} cm^{-3}),且发生装置相对简单;

2) 等离子体的稳定性好,易操作且自动调节能力强;

3) 无需电极,避免了电极损耗及使用寿命等问题.

典型的螺旋波等离子体源主要由以下几部分组成:放电管,磁场线圈,天线和气体注入系统等. 其中磁场线圈和天线的设计尤为重要. 本文以 VASIMR 为背景,设计出了一套完整的螺旋波等离子体源,并对其进行了初步实验. 结果表明,电子密度随射频输入功率的增加几乎呈线性上升. 此外,由于未通入工质且加载的射频输入功率较低,实验获得的电子密度仅接近于 10^{11} cm^{-3},这与 VASIMR 对电子密度的要求(10^{12} cm^{-3})还存在差距. 因此,后续工作将主要针对螺旋波等离子体源的优化设计和通气实验.

参考文献(References)

[1] Arefiev A V, Breizman B N. Theoretical components of the VASIMR plasma propulsion concept[J]. Physics of Plasmas, 2004, 11(5): 2942 – 2949

[2] Boswell R W. Very efficient plasma generation by whistler waves near the lower hybrid frequency[J]. Plasma Physics Control Fusion, 1984, 26(10): 1147 – 1162

[3] Bering E A III, Squire J P, McCaskill G, et al. Progress toward the development of a 50 kW VASIMR engine[R]. AIAA 2005-369, 2005

[4] Bering E A III, Longmier B W, Glover T W, et al. VASIMR VX-200: High power electric propulsion for space transportation beyond LEO[R]. AIAA 2009-6481, 2009

[5] Squire J P, Chang-D az F R, Glover T W, et al. High power light gas helicon plasma source for VASIMR[J]. Thin Solid Films, 2006: 506 – 507, 579 – 582

[6] Chen F F, Boswell R W. Helicons-the past decade[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(6): 1245 – 1257

[7] Charles C, Boswell R W. Laboratory evidence of a supersonic ion beam generated by a current-free "helicon" double-layer[J]. Physics of Plasma, 2004, 11(4): 1706 – 1714

[8] Charles C, Boswell R W. Time development of a current-free double-layer[J]. Physics of Plasma, 2004, 11(8): 3808 – 3812

[9] Charles C, Boswell R W. Effect of exhaust magnetic field in a helicon double-layer thruster operating in xenon[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5): 2141 – 2146

[10] 房同珍. 螺旋波激发等离子体源的原理和应用[J]. 物理, 1999, 28(3): 162 – 167
Fang Tongzhen. Principle and applications of helicon-wave excited plasma sources[J]. Physics, 1999, 28(3): 162 – 167 (in Chinese)

[11] 江南, 王珏, 凌一鸣. 螺旋波等离子体的实验研究[J]. 真空科学与技术, 2000, 20(3): 207 – 209
Jiang Nan, Wang Jue, Ling Yiming. Experimental studies of helicon plasma[J]. Vacuum Science and Technology, 2000, 20(3): 207 – 209 (in Chinese)

[12] Miao Tingting, Zhao Hongwei, Liu Zhanwen, et al. The study of helicon plasma source[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(2): 02B105

[13] Chen F F, Chevalier G. Experiments on helicon plasma sources[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 1992, 10(4): 1389 – 1401

[14] 迈克尔 A·力伯曼, 阿伦 J·里登伯格. 等离子体放电原理与材料处理[M]. 蒲以康译. 北京: 科学出版社, 2007: 291 – 292, 350 – 352, 374 – 379, 392 – 399
Michael A L, Allan J L. Principles of plasma discharges and materials processing[M]. Translated by Pu Yikang. Beijing: Science Press, 2007: 291 – 292, 350 – 352, 374 – 379, 392 – 399

(编　辑:张　嵘)