

一种基于 5—20 kHz 交流激励的 U 形等离子体天线*

赵建森¹⁾ 张芝涛^{1)2)†} 王健²⁾ 俞哲¹⁾

1) (大连海事大学轮机工程学院, 大连 116026)

2) (大连海事大学物理系, 大连 116026)

(2012 年 1 月 14 日收到; 2012 年 4 月 4 日收到修改稿)

以 5—20 kHz 交流电源作为等离子体天线激励源, 建立了一款 U 形等离子体天线. 在详细阐述天线结构的同时并对其部分电特性进行了测量. 结果发现, 在 50—300 MHz 频率范围内, 同工频交流与直流电源激励相比, 该天线的噪声电平非常低, 与相同构造的金属天线的噪声电平相近. 同时, 该等离子体天线具有很好的阻抗带宽特性, 且在较宽频带范围内也表现出了良好的增益特性.

关键词: 等离子体天线, 交流激励, 阻抗, 增益

PACS: 52.20.-j

1 引言

与常规天线相比, 等离子体天线具有许多独特的性质^[1,2], 如隐身效果好、可快速实现天线的动态重构、体积小便于远程布置及抗干扰特性等. 因此, 利用等离子体代替金属作为传导电磁波的天线元引起了国内外研究者和研究机构的关注^[1-21]. 等离子体天线主要分为等离子体介质天线及等离子体反射面天线两种形式, 前者为有源辐射器, 主要应用于短波和超短波频段内的通信. 后者为无源反射器, 主要应用于大功率超宽带脉冲雷达^[3]. 等离子体天线研究的工作, 主要是从等离子体天线激励模式、等离子体天线中电磁波传播机理、天线辐射与散射理论、等离子体天线性能的实验研究和数值仿真分析等方面开展的^[1,2,4-21]. 在激励源的研究方面, 已经实现了激光、直流、工频交流、脉冲、射频以及微波源等离子体天线的激励^[1,11,12,17,19-21]. 但就 VHF 频段天线的激励而论, 激光激励所需要的能耗过大; 工频交流所激励的天线的噪音较大, 而且天线效率和增益也不理想^[1,11]; 射频电源被大多数研究者所采用^[1,2,4,11,19], 也证明具有较高的增益, 较低的噪声以及快速可调的特性. 但也有一定的不足^[17], 如通

信频带受限, 造价高及激励能量和维持能量之间的巨大差异导致调谐困难等等. 近年来已有微波等离子体天线相关工作的报道^[20,21], 但微波源过大的耗能, 昂贵的造价及较大的电磁干扰也成为微波等离子体天线发展的瓶颈. 因此, 在确保天线在一定频段范围内噪声、阻抗、增益等天线特性满足要求的前提下, 需要对成本及能耗进行考虑. 本文采用 5—20 kHz 交流源作为等离子体天线的激励源, 制作了 U 形等离子体天线并对该天线在部分 VHF 和 UHF 频率范围内进行阻抗、增益等特性的测量. 得出的结果为 VHF 频段等离子体天线的构建提供参考.

2 5—20 kHz 交流激励源工作原理

5—20 kHz 高压电源工作流程如图 1 所示, 其工作流程比较简单, AC 220V 工频市电经过 EMC 滤波后送入 AC/DC 桥式全波整流电路, 目的是将 50Hz 交变电转变为脉动的直流电. 经过电容滤波把脉动的直流变成平滑的直流电, 生成约为 300V 的直流电压. 该直流电压经半桥变换器变为 5—20 kHz 高频交流输出. 主控部分主要是对功率驱动单元进行功率调节与频率调节, 频率调节

* 国家自然科学基金 (批准号: 50877005) 资助的课题.

† E-mail: newzhangzhitao@163.com

通过变频器件产生 5—20 kHz 可调的高频信号, 通过升压变压器得到最高为 7 kV 的输出高压, 激励放电管产生等离子体. 该电源的最大输出功率为 500 W, 可产生高密度均匀等离子体.

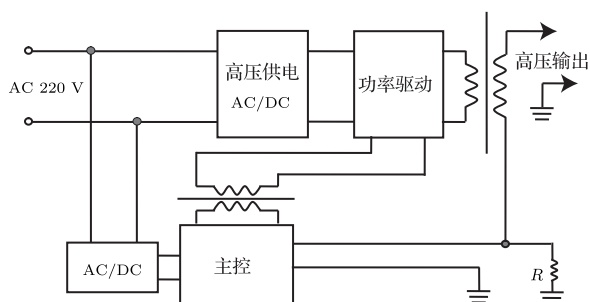


图 1 5—20 kHz 高压电源工作流程示意图

在 5—20 kHz 交变电场中, 气体的电离与在直流稳定电场及 50 Hz 交流电场中的情况不同 [22]. 主要是由于电场周期性的改变, 质量较大的正离子不容易到达器壁或电极而离开放电空间. 设正离子的迁移率为 μ_i , 则从电压峰值开始到 t 时, 正离子迁移距离 x 为 [22]

$$x = \int_0^{\omega t} \frac{\mu_i}{\omega} E_0 \cos \omega t d\omega t = \frac{\mu_i E_0}{\omega} \sin \omega t. \quad (1)$$

如果确定放电间隙的距离为 d , 与正离子迁移距离 x 相等, 则有

$$f = \frac{\mu_i E_0}{2\pi d} \sin \omega t. \quad (2)$$

因为在外加电压反向之前最大的有效时间是四分之一周期, 即 $\omega t = \pi/2$, 由 (2) 式得到电场的最大频率 f_{\max} 为

$$f_{\max} = \frac{\mu_i E_0}{2\pi d}. \quad (3)$$

如果出现频率 f_c 使得在该频率下, 正离子在半周期内走完电极间距离 d , 则

$$d = \int_{-T/4}^{T/4} \mu_i E_0 \cos \omega t dt = \frac{2\mu_i E_0}{\omega} = \frac{\mu_i E_0}{\pi f_c}. \quad (4)$$

可以看出, $f_c = 2f_{\max}$. 当 $f_{\max} < f < f_c$ 时, 因为正离子空间电荷在空间存在的时间长了, 会被在相反方向产生的一个新的雪崩所扩张. 此时, 存在着这样的可能性, 即引发击穿过程的雪崩可以小于在静电场时所需的雪崩, 击穿电压会有所下降 [22]; 当 $f > f_c$ 时, 正离子空间电荷会在极间振荡, 新的雪崩会使正离子空间电荷增长, 所以 f_c 成为在两个不同击穿机理之间的界限 [22].

3 U 形等离子体天线构成及实验系统

天线装置如图 2 所示, 放电管总长度为 1200 mm, 内充 Ar 与 Hg 的混合气, 气压约为 200 Pa. 放电管的两极和 5—20 kHz 高压电源电路板均放入绝缘盒中, 绝缘盒内置有金属屏蔽层, 以屏蔽导线产生的电磁干扰. 放电管一侧利用电容耦合模式进行馈电, 外面封有由铸铝制成的金属屏蔽盒. 为防止高电位对电磁波信号接收、发射装置造成伤害, 电容耦合器离放电管接地电极的距离不超过 200 mm. 通过调节等离子体天线电源的频率调节旋钮, 可以在 5—20 kHz 动态调节电源的输出频率.

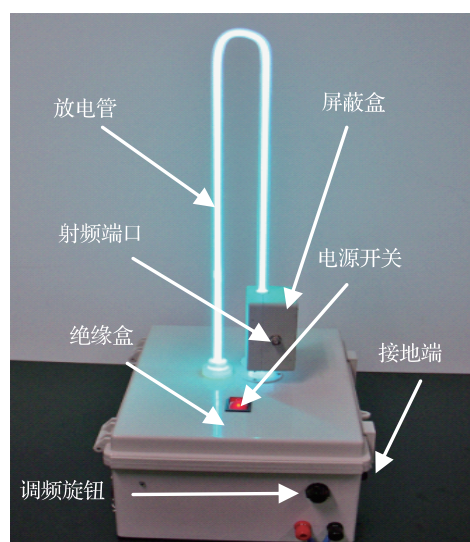


图 2 5—20 kHz 交流等离子体天线装置图

图 3 为 U 形等离子体天线阻抗、增益、噪声特性测量的实验装置示意图. 其中示波器和交流电流表用来测量等离子体天线放电管两端电压和通过放电管的电流, 得到等离子体天线消耗功率. 利用经过校准的矢量网络分析仪测量 U 形等离子体天线的输入阻抗, 连接天线和网络分析仪射频端口的传输线为特性阻抗为 50 Ω 同轴线, 网络分析仪的输出端口特性阻抗为 50 Ω . 天线的噪声特性是利用连接等离子体天线的频谱分析仪接收的信号频谱图来表征的, 连接信号发生器的发射天线为施加匹配电路的金属天线. 利用比较法测量等离子体天线的增益, 标准天线是定做的在 155—433 MHz 范围内驻波比小于 1.5, 增益在 3.7—4.4 dBi 的宽频带天线. 在实验过程中还将 5—20 kHz 交流源换成直流源、和工频交流源并制作相同款式的金属天线,

将其替换原等离子体天线进行相同实验, 得出结论.

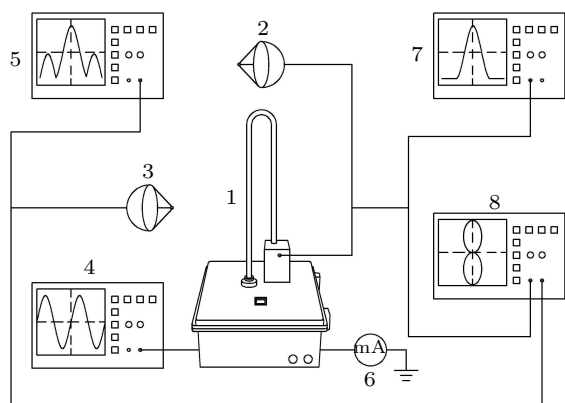


图3 天线测量实验装置示意图 1. 等离子体天线, 2. 标准增益天线, 3. 发射天线, 4. 示波器, 5. 信号源, 6. 毫安表, 7. 频谱分析仪, 8. 网络分析仪

4 实验结果与分析

4.1 等离子体天线放电特性

图4给出的是激励电压 520 V, 频率分别为 10, 12, 16 和 20 kHz 时的电流、电压波形. 从图中可以看出, 电流与电压的相位差接近 0, 呈纯电阻特性, 说明放电管与电源之间的匹配程度较好. 电源频率改变时, 所测得放电管电压相差不大, 而放电电流

随着频率的增加逐渐减小. 图5表示的是激励电压 520 V, 5—20 kHz 交流电源在不同工作频率下等离子体天线的放电功率. 放电功率在 5—14 kHz 频率范围内随着频率的增加而迅速下降. 放电功率最大值约 12.5 W, 当放电频率大于等于 8 kHz 时, 放电功率已经小于 10 W, 能耗较低. 经双探针诊断得出的不同放电频率下的电子密度如图6所示. 在本实验条件下, 放电频率在 12 kHz 以内所产生的等离子体电子密度较高, 接近 10^{17} m^{-3} . 进一步增大放电频率时, 电子密度越来越小, 接近 $2 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$. 电源放电频率在 5—8.5 kHz 范围内时, 放电时变压器产生较大噪声, 放电功率也较大. 当频率超过 14 kHz 时, 等离子体电子密度较小. 而且等离子体产生和促灭时间较长, 在放电频率为 20 kHz 左右时等离子体的熄灭时间甚至超过了 1 s, 不利于天线的快速开启和关闭. 因此, 实验中等离子体天线激励源的工作频率为 10 kHz, 在该频率下的放电功率为 6.2 W, 功率在 1W 左右时仍可维持等离子体. 其放电与维持功率远低于微波电源与射频电源 [4,19]. 因此, 该 5—20 kHz 交流等离子体源可在较低的功率下产生密度较高的等离子体, 适用于等离子体线天线的构建.

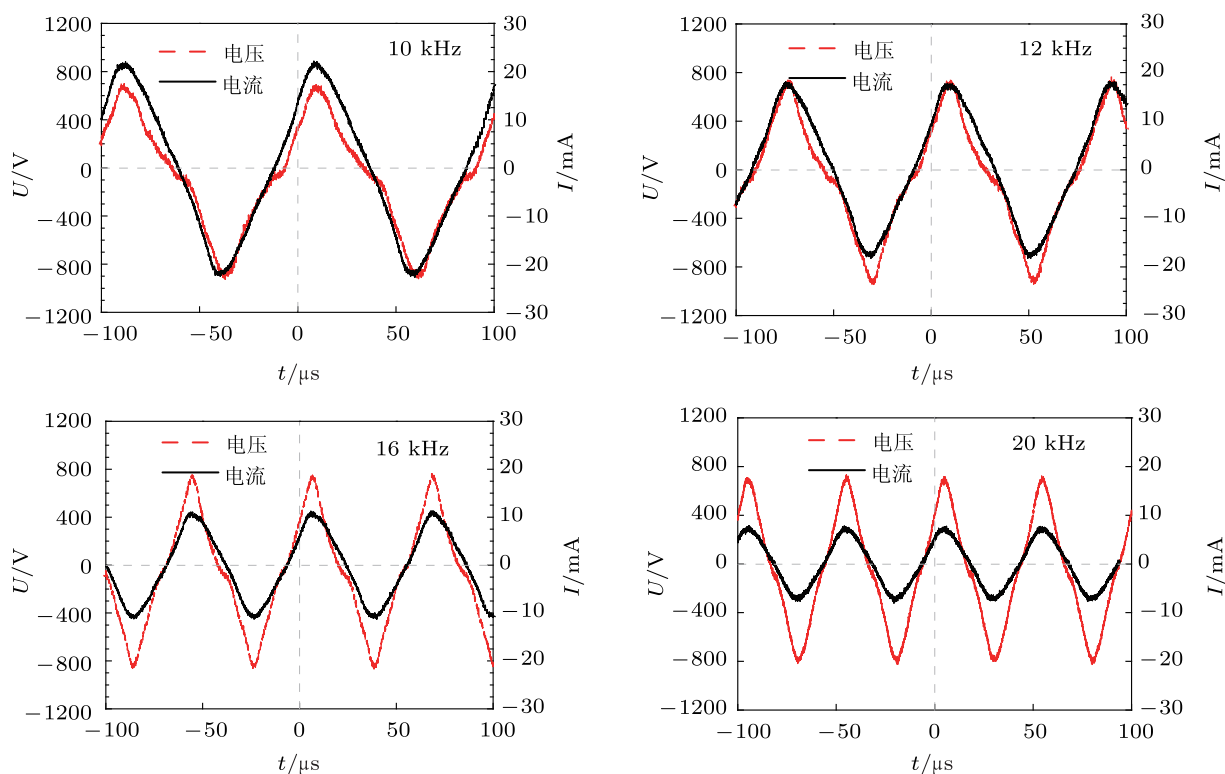


图4 5—20 kHz 交流等离子体天线电流电压波形图

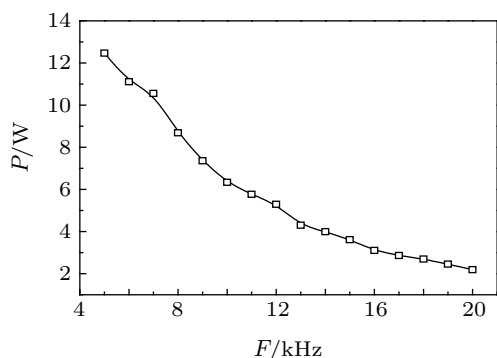


图5 不同放电频率下等离子体天线的放电功率

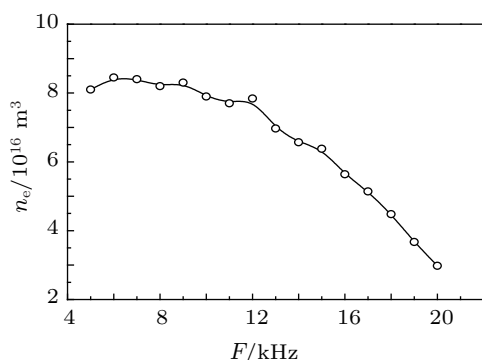


图6 不同放电频率下等离子体的电子密度

4.2 等离子体天线阻抗特性

在图3的天线测量系统中,同轴线特性阻抗为 $50\ \Omega$,调节网络分析仪射频端子输出阻抗为 $50\ \Omega$,使得射频端子与传输线之间匹配,减小测量误差.图7为5—20 kHz交流等离子体天线工作前后的输入阻抗.测量中,选取的试验频率范围从100 MHz到500 MHz.其中图7(a)为电阻曲线,图7(b)为电抗曲线.很显然,当等离子体天线未工作时,电阻曲线在一定周期内出现了相应峰值,其阻值非常大.电抗随着电磁波频率的改变呈正负交替变化,变化较大.与传输线的特性阻抗 $50\ \Omega$ 相差甚远.尽管电容耦合器为金属,但在该频段(100—500 MHz)内不能作为信号的辐射体.当等离子体被激发后,天线的阻抗发生了显著的变化.无论是电阻分量和电抗分量,其变化非常平缓.电阻分量在很宽的频带范围内与 $50\ \Omega$ 非常接近,而电抗分量接近于0.

为更好的体现等离子体天线的阻抗带宽特性,实验测量了天线的驻波比曲线如图8所示.当等离子体天线去电离时,10 kHz等离子体天线驻波比(VSWR)在50—400 MHz均大于13.而当等离子

体天线工作时,天线驻波比大幅度下降.在180—400 MHz频率范围内,天线驻波比皆低于2,甚至在很宽的频带内低于1.5.从图8中还可以看出工频交流等离子体天线驻波比在较宽的频带范围内也比较低,阻抗带宽比10 kHz等离子体天线略窄.这说明,等离子体天线具有宽频带阻抗特性,通过调整等离子体的工作状态完全可以加宽等离子体的阻抗带宽.

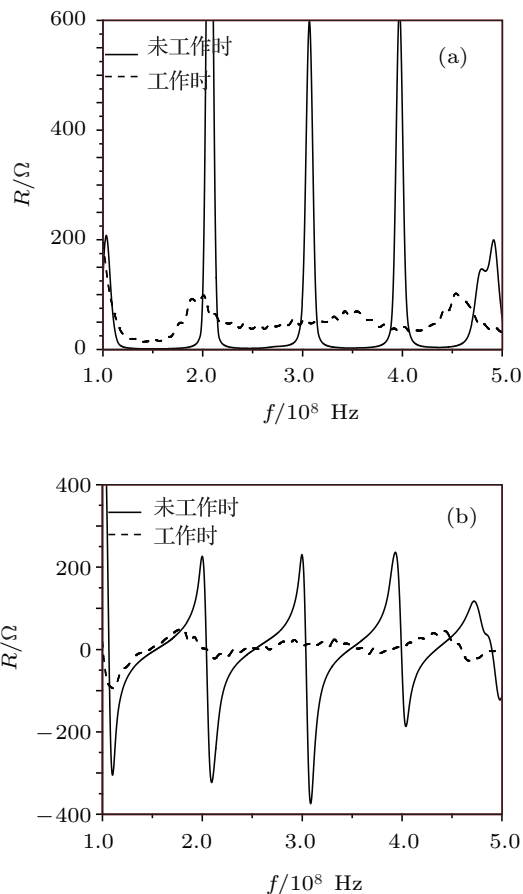


图7 等离子体天线输入阻抗 (a)电阻;(b)电抗

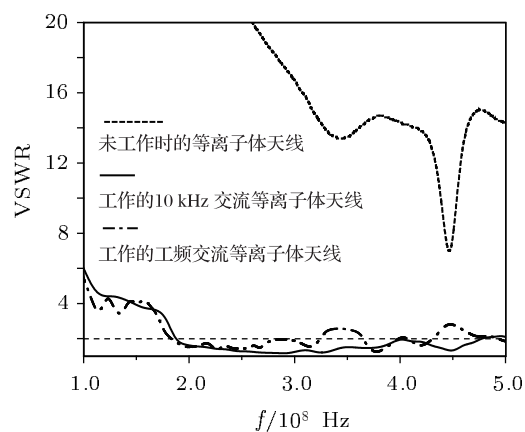


图8 等离子体天线的驻波比

4.3 等离子体天线噪声特性

天线的噪声特性是衡量天线性能的另一个重要指标,当等离子体天线工作时,由于等离子体中粒子无规则的热运动,使得等离子体本身成为一个重要的噪声源^[1,11].不同激励模式下或多或少均有一定的噪声,在这里天线的噪声特性是通过频谱分析仪所接收的信号频谱图来表征的.实验中分别探索了5—20 kHz交流等离子体天线、直流等离子体天线、50 Hz交流等离子体天线以及相同规格的金属天线的噪声特性.图9(a)中的频谱图为工频交流等离子体天线所接收的信号频谱图,信号频率为150 MHz,实验发现,利用直流和工频交流等离子体天线所接收到得信号频谱图几乎相同,等离子

体放电管的放电功率也相差不大,大约5.8 W.从图中可以看出,基于直流或50 Hz交流源激励的等离子体天线所接收的电磁波信号噪声电平很大,信号电平与噪声电平相差仅12 dB.同时实验发现随着信号频率的提高,噪声电平越来越高,在300 MHz以上时噪声电平甚至高过信号电平.图9(b)为利用相同规格的金属天线接收的150 MHz信号频谱.很明显,金属天线不但相对增益高过等离子体天线近5 dB,而且噪声电平非常低,与信号电平相差近40 dB.10 kHz交流等离子体天线接收相同频率信号的频谱图如图9(c)所示,可以看出,该等离子体天线接收的信号电平和噪声电平与金属天线大致相当,相差为38.7 dB.而且天线噪声电平在300 MHz以内与金属天线相差不大.

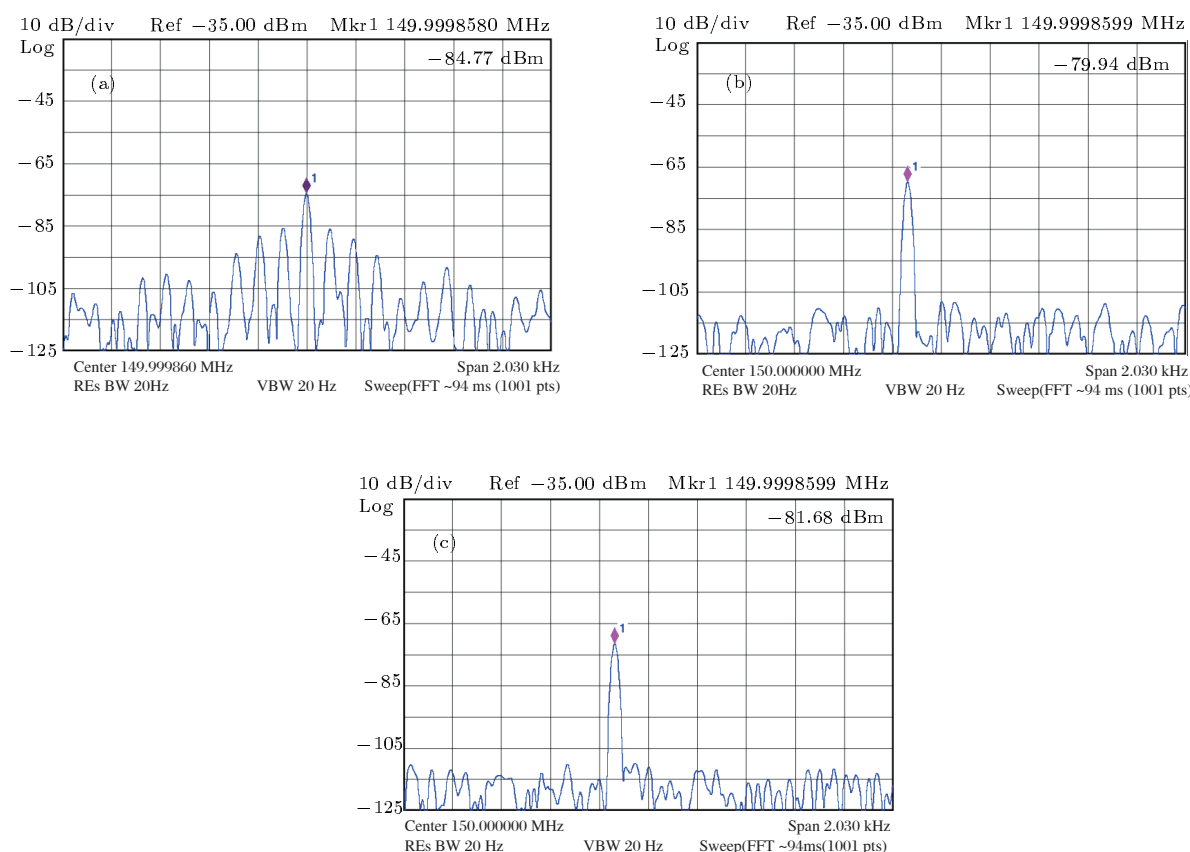


图9 等离子体天线与金属天线信号频谱图

表1 等离子体天线与金属天线增益

频率/MHz	185	210	250	285	320	350
工频交流等离子体天线增益 /dBi	1.67	0.76	—	—	—	—
10 kHz 等离子体天线增益 /dBi	1.77	1.68	1.69	1.56	1.24	1.03
金属天线增益 /dBi	2.13	1.82	1.88	1.95	2.34	2.97

4.4 等离子体天线的增益

工程应用中,不仅要考虑天线的带宽、噪声,也不应忽略天线的增益.利用比较法对等离子体天线的增益进行测量.测试场地在有地面反射的场地进行.实验中,10 kHz 等离子体天线放电功率为 6.2 W.利用双探针法对等离子体的特征参量进行诊断,等离子体电子温度 T_e 约为 2 eV,电子密度 n_e 约为 $7.8 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$.实验中还测量了相同规格金属天线和交流等离子体天线的增益,金属天线与信号接收系统之间连有由集总参数元件制作的阻抗匹配网络,确保实验中所测量的信号的驻波比低于 1.2.交流等离子体天线放电功率约为 5.8 W,电子温度约为 1.8 eV,电子密度约为 $2 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$.三款天线的增益测量结果如表 1 所示,实验所选取的频率对于三款天线来说,驻波比均在 1.2 附近.显而易见,在不考虑噪声的情况下,当信号频率较低时,交流等离子体天线就增益而言,可以作为天线使用.但随着频率的增加,增益越来越小.以至于

到 200 MHz 以上已无增益.而由 5—20 kHz 交流源激励产生等离子体的电子密度较高,等离子体天线的似金属性较好,在较宽的频带范围内增益与金属天线接近.

5 结论

将 5—20 kHz 交流电源作为等离子体的激励源制作等离子体天线,在确保其具有一定增益的前提下,不仅可以减小天线噪声,还可以使天线具有宽频带阻抗特性.该等离子体天线模型在 180—400 MHz 频率范围内的驻波比皆低于 2,但在 350 MHz 以上时,等离子体对电磁波的衰减特性表现的越为明显,而且噪声电平逐渐升高.该等离子体天线在 30—300 MHz 频率范围内增益和噪声电平都与金属天线相接近.该等离子体天线最大放电功率不超过 10 W,维持功率低于 2 W,能源损耗较小.

- [1] Rayner J P, Whichello A P, Cheetham A D 2004 *IEEE Trans. Plasma. Sci.* **32** 269
- [2] Liang Z W, Sun H L, Wang Z J, Xu J, Xu Y M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4292 (in Chinese) [梁志伟, 孙海龙, 王之江, 徐杰, 徐跃民 2008 物理学报 **57** 4292]
- [3] Jian F S 2009 *Ph.D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) [鉴福升 2009 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [4] Liu P, Liu L G, Deng J C, Jia Q 2006 *J. Zheng Zhou University (Engineering Science)* **27** 126 (in Chinese) [刘平, 刘黎刚, 邓记才, 贾琦 2006 郑州大学学报 (工学版) **27** 126]
- [5] Nowakowska H., Zakrzewski Z. Moisan M 2001 *J. Phys.* **D 34** 1474
- [6] Zhang Z T, Zhao J S, Xu X W, Yin Y 2011 *Plasma Science & Technology* **13** 279
- [7] Zhao G W, Xu Y M, Chen C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3458 (in Chinese) [赵国伟, 徐跃民, 陈诚 2006 物理学报 **55** 3458]
- [8] Zhao G W, Xu Y M, Chen C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5298 (in Chinese) [赵国伟, 徐跃民, 陈诚 2007 物理学报 **56** 5298]
- [9] Liu S B, Mo J J, Yuan N C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 778 (in Chinese) [刘少斌, 莫锦军, 袁乃昌 2004 物理学报 **53** 778]
- [10] Wu Z Y, Yang Y T, Wang J Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1890 (in Chinese) [吴振宇, 杨银堂, 汪家友 2010 物理学报 **59** 1890]
- [11] Borg G G, Harris J H 2000 *Physics of Plasmas* **7** 2198
- [12] Anderson T R, Aiksnoras R J U.S. Patent 6 650 297 B2 [2003-11-18]
- [13] Alexeff I, Anderson T 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 166
- [14] Lee Y, Ganguly S 2005 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **46** 252
- [15] Li X S, Luo F, Hu B J 2009 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **8** 756
- [16] Li X S, Hu B J 2010 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **9** 175
- [17] Chung M, Chen W S, Huang B R, Chang C C, Ku K Y, Yu Y H, Suen T W 2007 *Tencon 2007-2007 IEEE Region 10 Conference Taipei, China, October 30–November 2, 2007* p1
- [18] Bezpálov A Y, Gnatushenko V V, Ovsyanikov V V, Ovsyanikov V V, Reuta O V, Safonov V V, Sydorenko O A 2010 *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) Barcelona, Spain, April 12–16, 2010* p1
- [19] Kumar R, Bora D 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 553303
- [20] Cerri G, Leo R D, Primiani V M, Russo P 2008 *IEEE Trans. Instrumen.* **57** 242
- [21] Russo P, Primiani V M, Cerri G, Leo R D, Vecchioni V 2011 *IEEE Trans. Antennas and Propag.* **59** 425
- [22] Xu X J, Zhu D C 1996 *Gas Discharge Physics* (1st Ed.) (Shanghai: Publication of Fudan University) p268 (in Chinese) [徐学基, 诸定昌 1996 气体放电物理 (第一版) (上海: 复旦大学出版社) 第 268 页]

A U-shape plasma antenna based on excitation of 5—20 kHz alternating current power supply*

Zhao Jian-Sen¹⁾ Zhang Zhi-Tao^{1)2)†} Wang Jian²⁾ Yu Zhe¹⁾

1) (*Institute of Marine Engineering Dalian Maritime University, Dalian 116026, China*)

2) (*Department of Physics Dalian Maritime University, Dalian 116026, China*)

(Received 14 January 2012; revised manuscript received 4 April 2012)

Abstract

A U-shape plasma antenna is established by a 5—20 kHz alternating current(AC) source. The structure of the antenna is described, and part of electrical characteristics are measured. Results show that in a frequency range from 50 to 400 MHz, the noise level of 5—20 kHz AC plasma antenna is close to that of a metal antenna, but much lower than that of frequency AC plasma antenna. Besides, the antenna shows good impedance and gain bandwidth characteristics.

Keywords: plasma antenna, AC excitation, impedance, gain

PACS: 52.20.-j

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50877005).

† E-mail: newzhangzhitao@163.com