

表面波等离子体鞭状天线方向特性的理论分析

陈宗胜

(电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室,安徽 合肥 230037)

Theoretical Analysis on Radiation Characteristics of the Plasma Whip Antenna Sustained by Surface Wave

CHEN Zong-sheng

(Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province,
Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Plasma antenna has attracted much attention due to its unique characters. Using the transmission-line equivalent theoretic of the metal antenna, the effects of plasma electron density and collision frequency on the radiation pattern characteristics of the plasma whip antenna sustained by surface waves were studied. Moreover, the calculating method was validated by use of the high frequency simulation software (HFSS). The calculating results show that the radiation patterns of the plasma whip antenna and the metal antenna of the same size have widely differences when the plasma electron density is low and collision frequency is high. However, they would have the similar radiation patterns when the plasma electron density is high and collision frequency is low. Besides, the radiation pattern of the plasma antenna would approach to the radiation pattern of the same-sized metal antenna when the plasma electron density is higher and collision frequency is lower.

Key words: Surface wave; Plasma; Whip antenna; Collision frequency; Electron density

摘要:等离子体天线因其具有许多独特的性质而受到广泛关注。利用金属天线的传输线等效理论,研究了等离子体电子密度和碰撞频率对等离子体鞭状天线辐射方向特性的影响,并利用高频仿真软件 HFSS 对计算方法进行了验证。结果表明,当等离子体电子密度较小、碰撞频率较高时,等离子体鞭状天线与相同物理尺寸的金属天线辐射方向图相差较大;而在较高电子密度和较低碰撞频率条件下,两种天线具有相似的辐射方向图,并且电子密度越大、碰撞频率越低,其与金属天线的辐射方向图越接近。

关键词:表面波;等离子体;鞭状天线;碰撞频率;电子密度

中图分类号: TN826 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-8935(2009)06-0030-04

等离子体鞭状天线是指利用柱状等离子体替代金属杆作为导电媒质的天线。产生等离子体的气体可以是密封在介质管内,也可以直接对大气进行电离。电离气体的方法也有许多种,利用直流高压、射频、波导以及激光等各种方式都可以产生等离子体。然而,利用激光照射形成等离子体的过程较复杂,且等离子体参数的可控性较差,而直流放电方法所产生的等离子体的噪声较大,且一旦电极固定,等离子体的长度和厚度也随之固定,因此这两种方法均有较大的局限性^[1]。Moisan 等^[2]提出了利用射频功率,

通过表面波激励从气体管的一端来驱动产生等离子体的方法。利用此原理,Borg 等^[3]提出了等离子体天线一种实现方法,如图 1 所示。当天线工作时,信号源发出的射频功率经放大后,通过耦合器在低气压介质管内放电产生并维持等离子体柱;对于一定频率的无线电信号,当等离子体参数满足一定的要求时,柱状等离子体即可作为天线使用;当等离子体猝灭时,天线关闭,管内气体为普通介质不具备导电性,从而对其他天线的方向图不会产生影响,且其雷达散射截面可忽略不计。同时,通过改变激励等离

子体的频率和功率,可以方便地调节等离子体的参数,从而在不改变天线物理尺寸的条件下,即可以方便的改变天线的工作频带、谐振特性、方向特性和增益等特性。这些显著的优点使表面波等离子体天线具有巨大的应用前景。目前,国内外有多个研究机构完成了表面波等离子体天线的演示性试验,有关成果正在向应用领域转化^[1-4]。

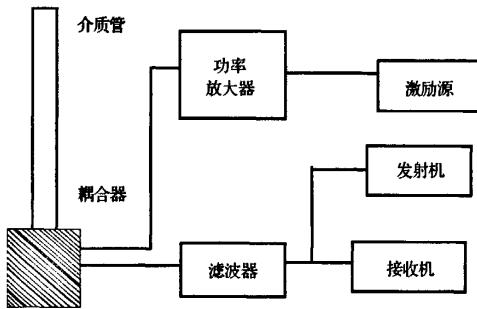


图 1 表面波等离子体鞭状天线结构图

1 理论分析与计算模型建立

由于任意形状的天线均可看成由无限多个电基本振子组成,而对于电基本振子,其远区辐射场的表达式为^[5]:

$$E(\theta) = j \frac{60\pi I l \exp(-jk_0 r)}{\lambda_0 r} \sin\theta \quad (1)$$

式中, I 为电基本振子中的电流, l 为基本振子的长度, k_0 为自由空间的波数, r 为场点到电基本振子源点的距离, λ_0 为自由空间电磁波的波长。

对于金属线天线,如果已知了天线上的电流分布为 $I(z)$,即可由式(1)求出该金属天线在远场区激励的电场。在研究金属鞭状天线时,可将其等效为终端开路的单线传输线,当忽略金属天线损耗时,其波数也为常数,且等于真空中波数 k_0 ,电流沿天线轴向上的分布可以近似写为^[5]:

$$I(z) = I_0 [e^{-ik_0 z} - e^{-ik_0 (2l-z)}] \quad (2)$$

式中 I_0 为电流幅度值。

类似地,如果已知了等离子体天线上的电流分布为 $I(z)$,同样利用式(1)求出其在远场区激励的电场。对于真空中一个无限长、均匀的等离子体柱,表面波沿其轴向传播的色散关系可表示为^[3,6]:

$$\frac{\epsilon_r T_0 I_1(T_p a)}{K_1(T_0 a)} + \frac{T_p I_0(T_p a)}{K_0(T_0 a)} = 0 \quad (3)$$

其中, $T_p^2 = k^2 - \epsilon_p k_0^2$, $T_0^2 = k^2 - k_0^2$, a 为等离子体柱的半径, $k_0 = \omega/c$ 代表角频率为 ω 的电磁波在自

由空间中传播的波数, $I_i(\cdot)$ 和 $K_i(\cdot)$ 分别为第一类和第二类变形的第 i 阶贝塞尔函数, k 为表面波沿等离子体柱传播的波数大小, ϵ_p 为等离子体的相对介电常数, ω_p 为等离子体角频率, v 为等离子体中的电子动量转移碰撞频率。

假设表面波的时谐因子为 $e^{j\omega t}$,在考虑电子碰撞频率的影响时波数 k 为复数,可以表示为:

$$k = k_r - ik_i \quad (4)$$

其中 $k_r \geq 0$, $k_i \geq 0$ 。当等离子体柱电子密度分布均匀时,式(3)中 k 为常数。由式(2)、式(3)和式(4)即可得到等离子体柱轴向电子密度均匀分布时天线上电流的近似分布。

在得到天线上电流的近似分布后,考虑到理想导电平面的影响,等离子体天线的远区辐射电场可表示为:

$$E(\theta, \varphi) = j \frac{\omega \mu_0 \exp(-jk_0 r)}{4\pi r} \sin(\theta) \times \int_{-L}^L I(z) \exp(jk_0 z \cos(\theta)) dz \quad (5)$$

式中 r 为远区场点到天线上位于 z 点处的辐射电流元之间的距离, μ_0 为自由空间的波阻抗。从而得到其电场 E 面方向图为:

$$F(\theta) = \left| \frac{\sin(\theta)}{I_{\max}} \int_{-L}^L I(z) \exp(jk_0 z \cos(\theta)) dz \right| \quad (6)$$

式中 I_{\max} 为天线上分布电流的最大幅度值。

2 计算结果与分析

利用式(2)、式(3)和式(6),通过数值计算,研究了等离子体电子密度和碰撞频率对天线辐射特性的影响。假设等离子体柱半径 $a = 0.0125\text{m}$, 长度 $L = 1\text{m}$, 通信信号的频率 $f = 200\text{MHz}$ 。在数值分析时,等离子体的参数取值范围为: 电子密度 $10^{16} \text{ m}^{-3} \leq n_e \leq 10^{18} \text{ m}^{-3}$, 碰撞频率 $10^8 \text{ Hz} \leq v \leq 10^9 \text{ Hz}$ 。为了便于得到等离子体参数对天线辐射特性的影响,计算中同时给出了相同物理尺寸的金属单极天线在通信信号 $f = 200\text{MHz}$ 时的辐射方向图,并假设电流在金属天线中的传播常数等于真空中的传播常数 k_0 ,计算结果如图 2 所示。

图 2 表明等离子体电子密度和碰撞频率的变化将对等离子体天线的辐射特性产生显著的影响。由图 2(a)可以看出,当等离子体电子密度较低时,等离子体天线的有效电长度小于相同物理尺寸金属天线的有效电长度,两者的辐射方向图相差较大,而提高等离子体电子密度以及降低碰撞频率可以有效提高等离子体天线的有效电长度,等离子体天线的辐

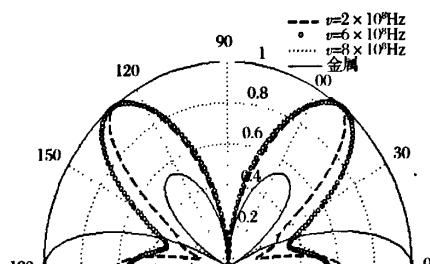
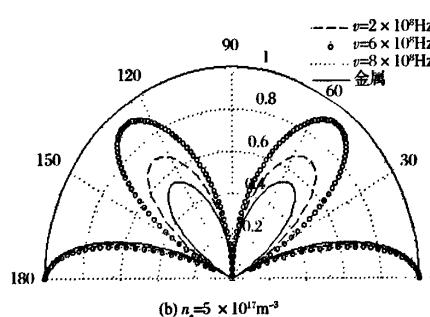
(a) $n_e = 5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ (b) $n_e = 5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$

图 2 不同的等离子体参数对天线方向图的影响

射方向图也逐渐逼近相同尺寸的金属天线。这主要是由于表面波沿等离子体柱传播时的波数 k 与等离子体参数有密切关系,等离子体频率越高,电子碰撞频率越低,所对应的表面波的传播常数($\text{Re}(k)$)越接近自由空间中的传播常数 k_0 ,所对应的表面波的衰减常数($\text{Im}(k)$)越小^[7]。比较图 2(a)和(b)可知,在所选择的等离子体范围内,电子密度的改变对天线辐射方向图的影响大于电子碰撞频率变化所造成的影响。

3 等离子体天线的 HFSS 仿真

HFSS 软件是 Ansoft 公司推出的基于电磁场有限元方法(FEM)的一种分析微波工程问题的三维电磁仿真软件。由于 HFSS 软件采用稳定成熟自适应网格剖分技术,使其具有较高的仿真精度和可靠性。目前,该软件已广泛应用于高频设计的各个领域^[8]。图 3 为所建立等离子体天线的 HFSS 模型。

图 3 中等离子体天线放置在无穷大金属平板上,大圆柱体作为理想吸收边界完全吸收来自天线的辐射,用以模拟无限大的自由空间,其半径不小于天线所辐射信号波长的 $1/4$,天线末端利用 HFSS 中的集总端口(Lumped Port)方式激励,等离子体的参数取值为:电子密度 n_e 分别为 $5 \times 10^{16}, 5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$,碰撞频率 v 均为 $6 \times 10^8 \text{ Hz}$,仿真结果如图 4 所示。

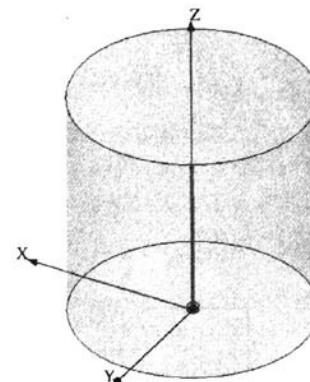


图 3 等离子体天线的 HFSS 模型

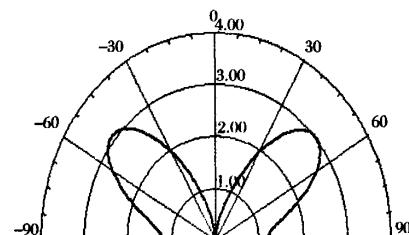
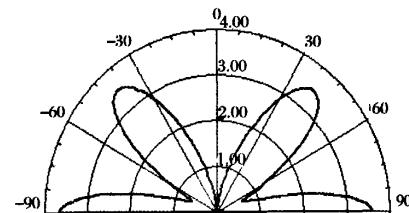
(a) $n_e = 5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}, v = 6 \times 10^8 \text{ Hz}$ (b) $n_e = 5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}, v = 6 \times 10^8 \text{ Hz}$

图 4 不同等离子体参数的 HFSS 仿真结果

从图 4 可以看出, HFSS 仿真所得的结果与前面数值分析所得到的结果基本一致,这也验证了前面计算方法的正确性。

4 结论

从前面的分析可以看出,对于一定频率的电磁波,当等离子体的参数满足一定的要求时,等离子体表现较好的导电性,等离子体柱可以用来作为天线,并且等离子体频率以及碰撞频率对辐射方向特性有较大的影响。利用金属天线的传输线等效模型可以较为准确地计算出不同参数条件下等离子体天线的辐射方向图。从所选择参数的计算结果可以看出,当等离子体电子密度较小、碰撞频率较高时,等离子体鞭状天线与相同物理尺寸的金属天线辐射方向图相差较大;而在较高电子密度和较低碰撞频率条件下,辐射方向图将逐渐逼近相同尺寸的金属天线。

下,两种天线具有相似的辐射方向图,并且电子密度越大、碰撞频率越低,其与金属天线的辐射方向图越接近。

参 考 文 献

- [1] 袁忠才,时家明. 表面波激励等离子体天线的原理与实现[J]. 电子信息对抗技术,2006,(4):39-42.
- [2] Moisan M, Shivarova A, Trivelpiece A W. Experimental Investigations of the Propagation of Surface Waves along a Plasma Column[J]. Plasma Physics, 1982, 24(11).
- [3] Borg G G, Harris J H. Application of Plasma Columns to Radio Frequency Antennas [J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(22).
- [4] Rayner J P, Whichello A P, Cheetham A D. Physical Characteristics of Plasma Antennas[J]. IEEE Trans on
- [5] 周朝栋,王元坤,周良明,线天线理论与工程[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社,1988.
- [6] Moisan M, Zakrzewski Z J. Plasma Sources Based on the Propagation of Electromagnetic Surface Waves[J]. Appl Phys, 1991, 24.
- [7] 陈宗胜,时家明. 表面波等离子体天线的柱状等离子体源参数研究[J]. 真空电子技术,2008,(2).
- [8] 谢拥军,王鹏. Ansoft HFSS 基础及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社,2007,第1版.

作者简介:陈宗胜(1982-),男,主要研究方向为等离子体应用,e-mail: chenzongsh@tom.com.

收稿日期:2009-04-23;修回日期:2009-05-06

动态信息

美发现纳米真空管 能量密度大于锂离子电池

来源:电源系统

目前,仍经常有科学家们试图对真空管(vacuumtubes)进行微化改造,不过成功的案例却不多,主要是因为该种用玻璃封装的阀门已经在大多数应用领域被晶体管取代。

而美国伊利诺大学香槟分校(University of Illinois at Urbana-Champaign)的研究人员则认为,真空管可用以做为高能量密度电池或是非易失性内存的基础;据说在理论上,纳米尺寸的真空管数组的能量密度应可达到锂离子电池的3倍。

伊利诺大学的研究人员 Alfred Hubler 与 Onyeama Osuagwu,发表了一篇题为:“数字量子电池:将能量与密度储存在纳米真空管数组中”的论文,不过相关研究仍在理论阶段,还有待进行实际验证。

该论文的基础是建立在场发射器件(field-emission devices)具备明显可允许电流通过结构的研究上;作者声称,将场发射器件通过适当的纳米等级设计,能将电击穿(electric breakdown)以量子化现象压缩;在10nm的间隙距离之下,其电容量却会非常大。

该纳米真空管数组的架构,是以比10nm临界间距稍大的距离,以阴极、阳极、阴极的规则来垂直排列,与现今尖端微影技术的节点相当。论文作者指出,真空管的能量密度是受真空击穿(vacuum breakdown)所限制,不过在大气压力低于 1.41×10^4 Pa的情况下,击穿场就不会依赖剩余气体(residual gas),而是随着电极表面的特性。

论文指出,纳米真空管的能量/功率密度会大于锂离子电池以及电化学电容器(electrochemical capacitors),估计重量能量密度可达每公斤1-Mjoule,体积能量密度则可达每立方公尺3-Gjoules。而且这种数字量子电池(虽然需要数十亿颗真空管组合成的数组),还有许多其他的优势。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>