

# 基于等离子体的定向天线阵理论与实验研究\*

黄方意 时家明<sup>†</sup> 袁忠才 汪家春 许波 陈宗胜 王超

(电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

(2012年11月22日收到; 2013年3月7日收到修改稿)

当前国内学者对等离子体天线的研究主要集中于柱状天线和反射面天线, 而在国外已有学者以等离子体阵列结构设计了功能多样的智能天线系统. 为了较系统地了解这一新的设计思路, 基于等离子体散射理论对中心单元激励的圆形定向天线阵进行了理论和实验研究. 设计了一个16元等离子体无源振子的圆形天线阵, 实现了天线电磁波单波束和多波束的定向辐射. 通过理论计算和分析, 阐述了天线电磁波单波束和多波束辐射的原理. 通过建立实验系统, 测试了圆形天线阵的定向辐射特性. 实验结果和理论值接近, 说明该等离子体圆形天线阵可以实现天线电磁波的定向辐射和多波束辐射. 另外, 该天线阵还具有快速切换辐射方向、参数快速重构、雷达隐身性良好的优点.

**关键词:** 等离子体, 定向天线阵, 单波束, 多波束

**PACS:** 52.20.-j, 13.40.Ks

**DOI:** 10.7498/aps.62.155201

## 1 引言

国内外学者对等离子体天线的研究方向主要为等离子体柱状天线和等离子体反射面天线. 在等离子体柱状天线方面, Borg等<sup>[1,2]</sup>做了等离子体柱状天线效率、幅度噪声幅度测量等实验; 时家明等<sup>[3-5]</sup>介绍了表面波激励等离子体柱状天线的原理与实现; 赵国伟等<sup>[6-8]</sup>用解析方法计算了柱形离子体的轴向密度分布、色散关系、辐射场、阻抗等关键天线参数. 在等离子体发射面天线方面, Meger等<sup>[9]</sup>介绍了等离子体作为反射面设计的无源雷达反射面天线, 较为系统地分析了其原理和特性.

由于等离子体独特的物理性能<sup>[10,11]</sup>, 等离子体在天线系统中还可以得到更广泛的应用, 例如利用等离子体设计阵列天线. Anderson等<sup>[12,13]</sup>提出了利用等离子体阵列组合设计智能天线的概念, 并对此做了大量的理论分析和实验研究. 而在国内公开发表的论文还没有见到对此类天线的研究, 为了针对这个研究方向进行探索, 本文利用均匀冷等离子体作为无源振子设计了一款16元的定向天线阵, 通过理论分析计算其辐射特性, 并开展了实验研究.

## 2 等离子体电磁散射理论分析

本文的研究对象为图1所示的圆柱形阵列, 其中组成圆形阵列的16元振子为非磁化均匀冷等离子体柱状介质, 中心振子是一根全向天线, 作为系统的辐射源. 全向天线可以是偶极子天线或其他全方向上均匀辐射的天线. 其中心频率波段为300 MHz—3 GHz.

利用散射理论对其进行分析. 在空间区域中, 由线源产生的一次场相对于 $z$ 轴而言仅有TM极化波, 即纵向场分量仅有电场 $E_z$ 分量. 对于均匀分布在圆周位置上的每个等离子体柱而言, 线电流源的一次辐射场可以看作是垂直入射的电磁波. 以中心天线为轴线建立圆柱坐标, 第 $i$ 个等离子体柱圆心的坐标为 $(\rho_i, \psi_i)$ , 中心辐射源的电磁波可表示为

$$E_{zi}^{\text{inc}} = -\frac{j\omega\mu_0 I}{2\pi} |K_0(jk_0 d)| e^{-jk_0 \rho_i \cos(\varphi_i - \psi_i) - jk_0 d}, \quad (1)$$

其中,  $\psi_i = \frac{2\pi}{N}(i-1)$ ,  $i=1, 2, \dots, N$  (本文中 $N=16$ );  $\varphi_i$ 为第 $i$ 根等离子体柱与观测点的夹角, 如图1(b)中的 $\varphi_3$ 为第3根等离子体柱与观测点 $p$ 的夹角;  $K_n(x)$ 为第二类改进型 $n$ 阶贝塞尔函数 (在此取0

\* 教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: 2010A001005D) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: sjmeci@yahoo.com.cn

阶), 表达式为

$$K_n(x) = j\frac{\pi}{2} e^{jn\pi/2} H_n^{(1)}(e^{-j\pi/2}x) = -j\frac{\pi}{2} e^{jn\pi/2} H_n^{(2)}(e^{-j\pi/2}x). \quad (2)$$

第  $i$  个等离子体柱散射场为

$$E_{zi}^s = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{in} H_n^{(2)}(k_0 \rho_i) e^{jn\phi_i}. \quad (3)$$

第  $i$  个等离子体柱中透射场为

$$E_{zi}^t = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_{in} J_n(k_0 \rho_i) e^{jn\phi_i}, \quad (4)$$

其中,  $k_i$  是电磁波在第  $i$  个等离子体柱的波数;  $J_n(k_0 \rho_i)$  为  $n$  阶第一类贝塞尔函数;  $H_n^{(2)}(k_0 \rho_i)$  为  $n$  阶第二类汉克尔函数;  $A_{in}, B_{in}$  为未知的谐波系数, 由电磁场量在分界面的连续特性决定; 文中采用 16 元等离子体柱状介质振子, 因此由边界条件决定的方程组为

$$E_{z1}^{\text{inc}} + \sum_{l=1}^{16} E_{z1}^s = E_{z1}^t \Big|_{\rho_1=R},$$

$$H_{z1}^{\text{inc}} + \sum_{l=1}^{16} H_{z1}^s = H_{z1}^t \Big|_{\rho_1=R},$$

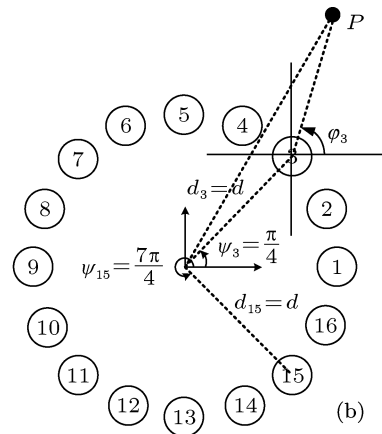
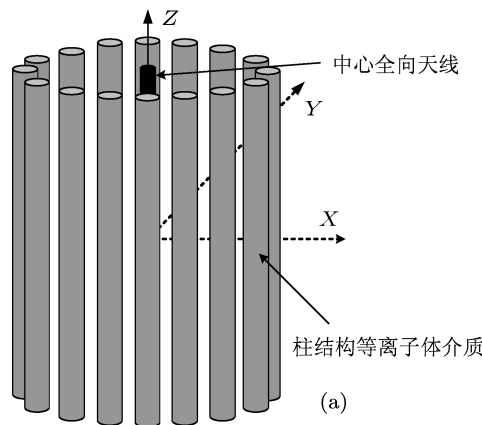


图 1 等离子体定向天线阵的结构示意图 (a) 立体结构图; (b) 截面示意图

### 3 等离子体定向天线阵的工作机理

通过确定等离子体介质管的两端电极是否放电来控制等离子体介质的生成和猝灭. 中心天线的辐射为在垂直于等离子体柱的方面内的全方向均匀辐射, 但是受到四周的等离子体无源振子的散射作用, 中心天线的辐射场将发生改变. 假定每根等离子体无源振子对天线的电磁散射作用是独立

$$E_{z2}^{\text{inc}} + \sum_{l=1}^{16} E_{z1}^s = E_{z2}^t \Big|_{\rho_2=R},$$

$$H_{z2}^{\text{inc}} + \sum_{l=1}^{16} H_{z1}^s = H_{z2}^t \Big|_{\rho_2=R},$$

.....

$$E_{z16}^{\text{inc}} + \sum_{l=1}^{16} E_{z1}^s = E_{z16}^t \Big|_{\rho_{16}=R},$$

$$H_{z16}^{\text{inc}} + \sum_{l=1}^{16} H_{z1}^s = H_{z16}^t \Big|_{\rho_{16}=R}, \quad (5)$$

因此, 由入射波引起的等离子体柱外复合散射场可以表示为

$$E_{\text{tot}}^s = \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 \rho}} e^{-jk_0 \rho} e^{j\frac{\pi}{4}} \sum_{i=1}^N \sum_{n=-n_0}^{n_0} A_{ni} j^n \times e^{jk_0 d_i \cos(\phi_i - \psi_i)} e^{jn\phi_i}. \quad (6)$$

加上入射波对远场观察点处的贡献, 则等离子体柱外总场表达式为

$$E_z^{\text{tot}} = E_z^{\text{inc}} + E_{\text{tot}}^s, \quad (7)$$

利用上述电磁散射理论, 可以计算出图 1 所示的等离子体圆阵天线的辐射方向图.

的, 那么天线阵的总辐射场将由中心天线的辐射场和所有等离子体无源振子的散射场叠加而成. 因此在已经猝灭的等离子体振子对应的方向上, 天线电磁波将能通过, 天线阵在该方向的辐射场主要由中心天线的辐射场组成, 再加上其他等离子体振子的散射场. 而在等离子体振子对应的方向上, 天线电磁波将无法通过该方向, 天线阵的辐射场即为所有激发的等离子体振子的复合散射场. 如图 2 所示,

(a), (b) 分别表示中心天线工作频率为 500 MHz 和 900 MHz 时, 定向天线阵在等离子体介质管全通电和全断电的情况下的方向图. 由图可知, 等离子体无源振子约束了中心天线的电磁辐射场, 利用这种约束作用, 我们可以实现对天线波束的定向控制.

### 3.1 单波束任意定向的实现

文中所述等离子体圆阵天线的第一个作用是发射定向波束, 并且可以控制该方向的切换. 其实现方法是通过控制等离子体柱单元振子的通断来控制天线的辐射的方向, 在图 3 中的任意一根等离子体柱猝灭时, 它对电磁波的传输就不会产生任何影响, 此时的边界条件 (8) 式所示, 假设“1”号等离子体柱猝灭, 柱外总散射场只包含由“2”至“16”号等离子体柱的复合散射场.

$$\begin{aligned}
 E_{z2}^{\text{inc}} + \sum_{l=2}^{16} E_{zl}^s &= E_{z2}^t \Big|_{\rho_2=R}, \\
 H_{z1}^{\text{inc}} + \sum_{l=2}^{16} H_{zl}^s &= H_{z2}^t \Big|_{\rho_2=R}, \\
 E_{z3}^{\text{inc}} + \sum_{l=2}^{16} E_{zl}^s &= E_{z3}^t \Big|_{\rho_3=R}, \\
 H_{z3}^{\text{inc}} + \sum_{l=1}^{16} H_{zl}^s &= H_{z3}^t \Big|_{\rho_3=R}, \\
 &\dots\dots \\
 E_{z16}^{\text{inc}} + \sum_{l=2}^{16} E_{zl}^s &= E_{z16}^t \Big|_{\rho_{16}=R}, \\
 H_{z16}^{\text{inc}} + \sum_{l=2}^{16} H_{zl}^s &= H_{z16}^t \Big|_{\rho_{16}=R}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

可得到系统天线的辐射方向波瓣图, 如图 3 所示. 图 3(b) 为“1”号等离子体猝灭时的天线方向波瓣图, 由该图可以看出, 该天线系统的辐射方向特性与单极定向天线的相似, 具有很强的指向性. 与此同时, 由于等离子体特有的物理特性, 如快速激发和猝灭 (时间约为微秒级)、等离子体密度与碰撞频率可变等, 可实现该天线系统的快速重构. 通过控制不同等离子体单元振子的猝灭, 可以切换天线的辐射方向. 如依次使“3”, “8”, “12”, “14”号猝灭, 得到的天线的方向波瓣图如图 4 所示, 天线在各个方向上都可以很好地实现定向效果. 辐射方向的变化其实就是猝灭的等离子体柱的变化, 因此选择猝灭的等离子体柱单元, 可以控制辐射角度的变化.

### 3.2 多波束定向的实现

图 1 所示的圆形天线阵不仅可以实现单方向的定向辐射, 还可以实现向多个目标方向发射电磁波信号, 实现方法是同时使多根等离子体单元振子猝灭. 以双波束、三波束、四波束情况为例, 分别计算了其天线方向波瓣图, 结果如图 5 所示.

随机选取“3”和“14”号等离子体柱, 使其猝灭. “3”号等离子体柱对应的辐射角度是  $\Delta\varphi_3 \in \left[ \frac{3\pi}{16}, \frac{5\pi}{16} \right]$ , “14”号等离子体柱对应的辐射角度  $\Delta\varphi_{14} \in \left[ \frac{25\pi}{16}, \frac{27\pi}{16} \right]$ , 根据上述理论分析天线的方向波瓣图的主瓣应该在  $\left[ \frac{3\pi}{16}, \frac{5\pi}{16} \right]$  和  $\left[ \frac{25\pi}{16}, \frac{27\pi}{16} \right]$  方向角上. 结果如图 5(a) 所示, 天线的方向波瓣图有两个方向性很好的主波瓣, 实现了天线的双波束辐射.

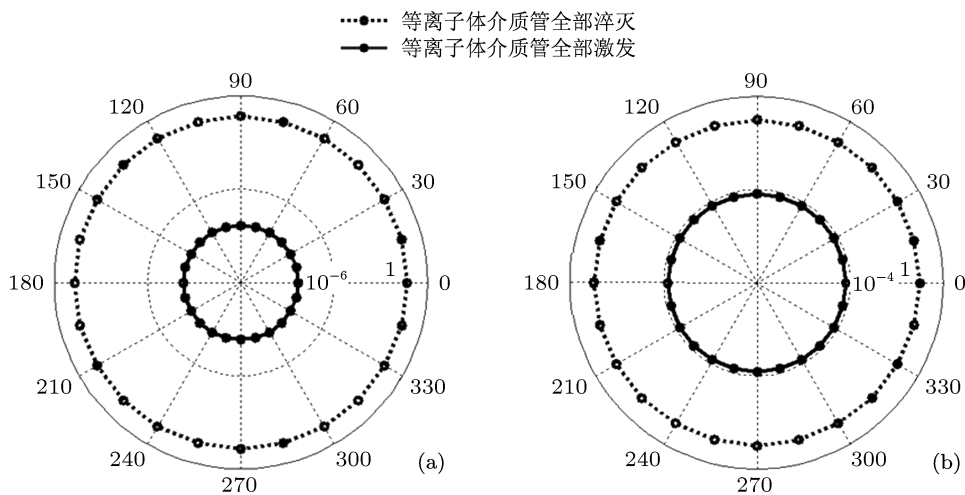


图 2 等离子体在全通电和全断电时的辐射方向图 (a)  $f = 500 \text{ MHz}$ ; (b)  $f = 900 \text{ MHz}$

同理得到三波束和四波束的天线的方向波瓣图如图 5(b), (c) 所示, 天线在多个方向上也保持着良好的方向性.

天线多波束的定向辐射效果跟等离子体密度、等离子体碰撞频率、阵列结构等因素有关, 关于此方面的研究将另写文章介绍.

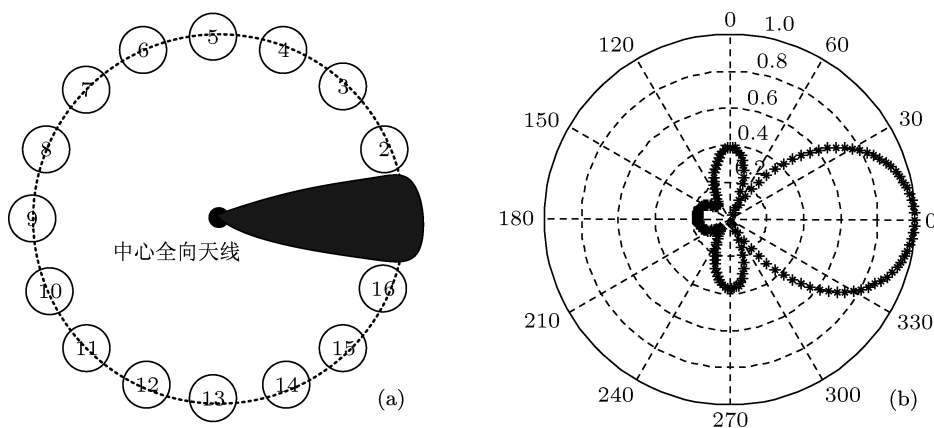


图 3 系统天线在“1”号等离子体柱猝灭时的辐射方向示意图和波瓣图 (a) 方向示意图; (b) 方向波瓣图

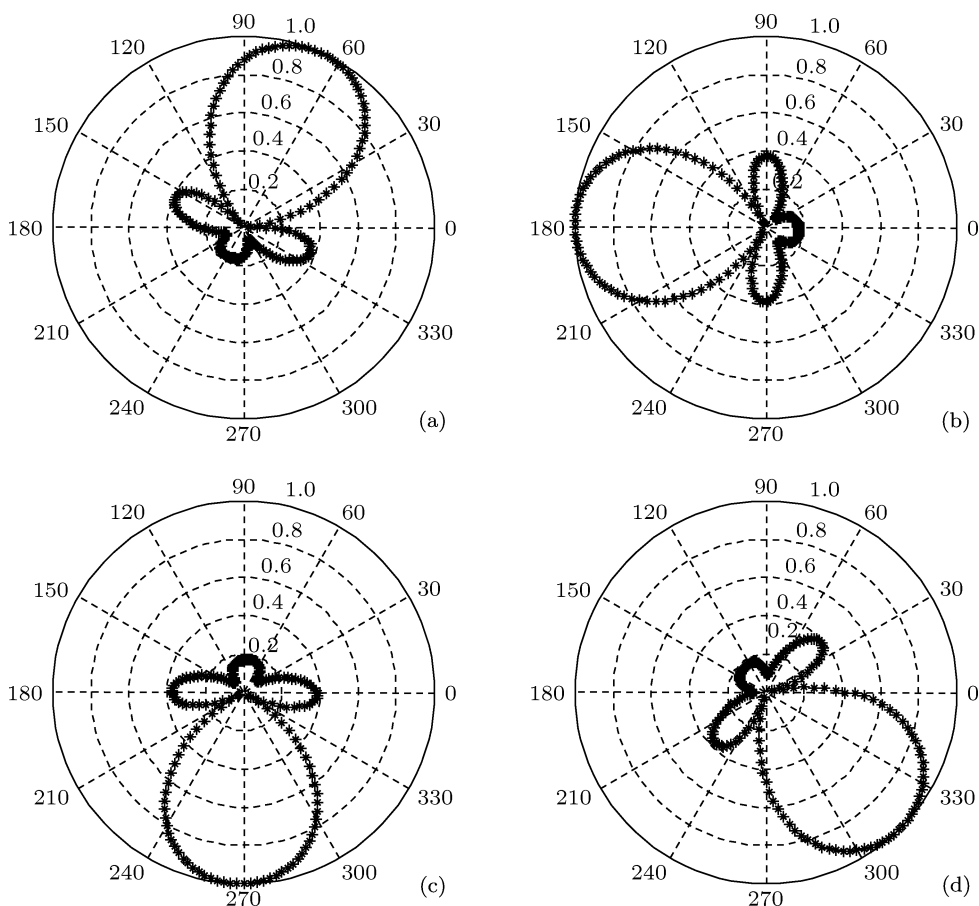


图 4 系统天线任意角度的定向辐射波瓣图 (a) “3”号等离子体柱猝灭; (b) “8”号等离子体柱猝灭; (c) “12”号等离子体柱猝灭; (d) “14”号等离子体柱猝灭

#### 4 实验结果与讨论

为了验证等离子体振子圆阵定向天线特性

和计算方法的正确性, 设计制作了如图 6(a) 所示的实验系统, 中心全向天线采用的是偶极子天线, 均匀等离子柱环绕其周围, 图 6(b) 为工作状

态下的天线实物图, 其中等离子体电子密度约为  $2.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ , 有效碰撞频率约为  $1 \times 10^9 \text{ Hz}$ , 等离子体柱半径为  $1.25 \text{ cm}$ , 等离子体柱轴向长度为  $0.6 \text{ m}$ , 等离子体单元振子数量为 16 根. 图 6(c) 展示了实验过程中使用到的部分仪器.

实验选取了  $300 \text{ MHz} - 3 \text{ GHz}$  为测试波段, 由

于偶极子天线的尺寸一旦固定, 其工作频率也将固定, 因此实验采用四根中心频率分别为  $360, 460, 2450, 2990 \text{ MHz}$  的偶极子天线作为中心辐射源; 用场强分析仪记录天线在各个方向的电磁波信号场强, 得到实验测得系统天线单波束状态时 (此时“1”号等离子体柱猝灭) 的辐射方向图.

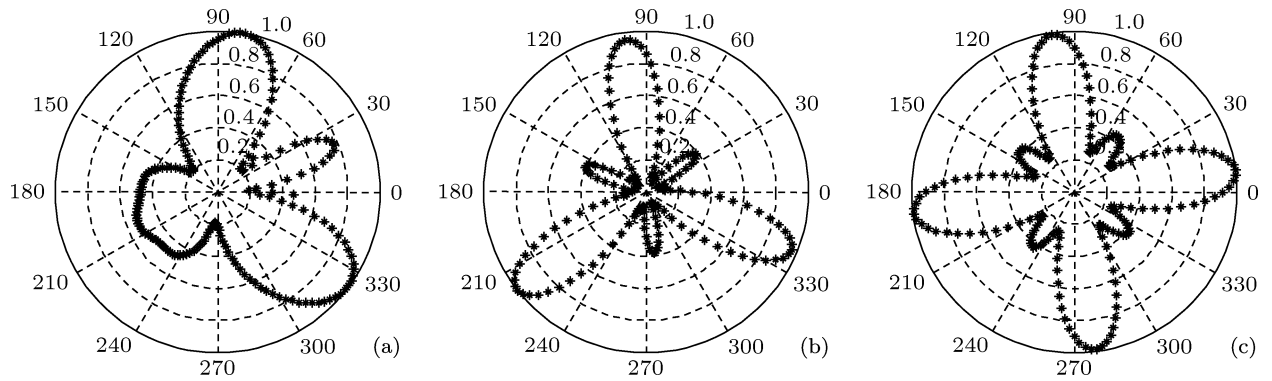


图 5 系统天线多波束定向传输波瓣图 (a) 双波束辐射波瓣图; (b) 三波束辐射波瓣图; (c) 四波束辐射波瓣图

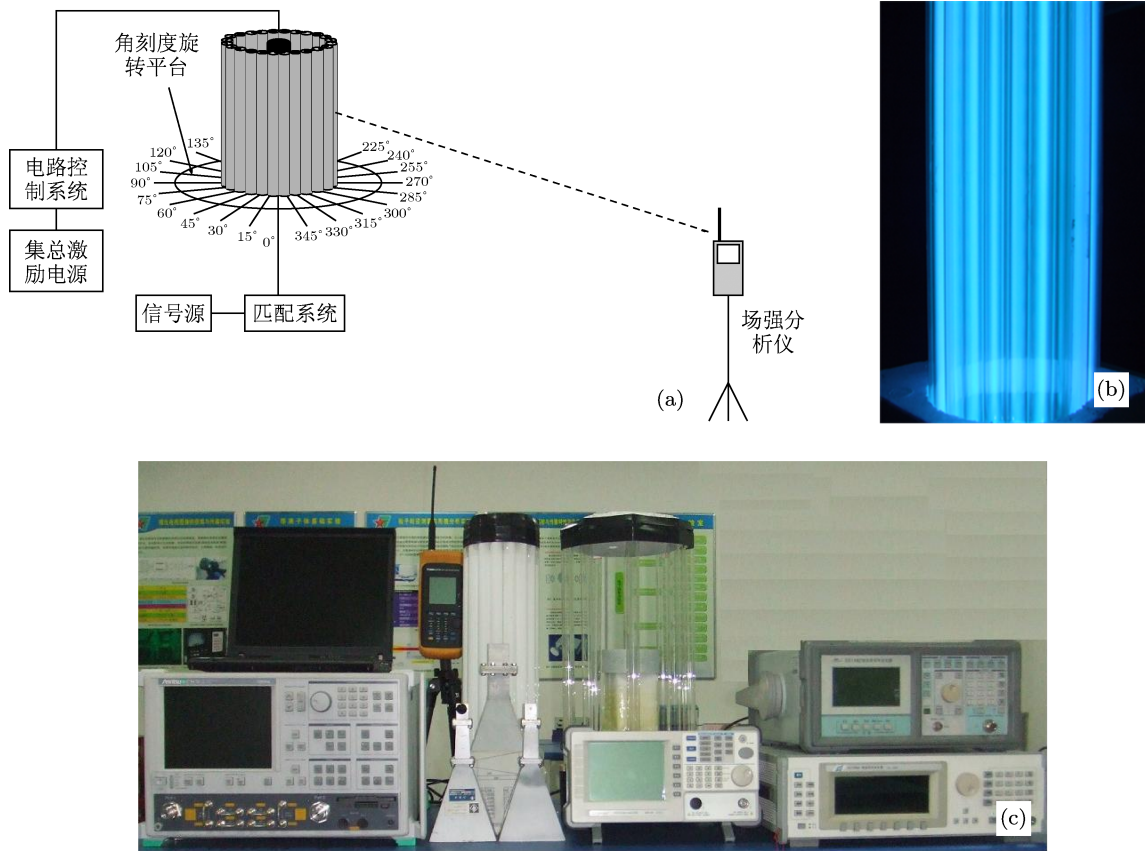


图 6 系统天线的实验测试图 (a) 测试系统机构图; (b) 等离子体阵列实物图; (c) 实验测试系统中的仪器

图 7 所示的是实验测得的在  $f = 360, 460, 2450, 2990$  MHz 四个频点上的数据, 从实验测得的几组数据结果可以看出, 在天线波瓣图的形状方面, 该定向天线阵确实可以实现电磁波的定向传输, 具有良好的方向性. 实验数据与理论计算结果和数值结论符合得比较好, 尤其是频率较低时. 随着频率的增大, 开始出现偏差, 主要体现为波束的副瓣电平较高, 造成这种现象的原因可能是:

1) 随着工作频率的增大, 轴向长度有限的等离子体柱的末端电容效应加剧了对电磁场分布的影响;

2) 随着工作频率的增大, 等离子体柱的金属电极以及激励源传输线对电磁场分布的影响变得更加明显, 不能被忽视;

3) 随着工作频率的增大并逐渐靠近等离子体

的特征频率时, 高频放电产生的等离子体的微弱不稳定都会很敏感地对散射分布产生影响, 这一影响在实验中是无法回避的.

定向天线阵的回波损耗和增益也是很重要的参数, 实验获取图 6 所示四种情况下的天线阵的回波损耗和增益如表 1 所示. 由表 1 可知, 在试验频点上, 中心天线与等离子体无源振子组成天线阵之后, 整个天线系统的回波损耗变小、增益变小, 天线的性能有所下降, 尤其是在较高频段上, 回波损耗和增益变化得更加明显, 这是因为电磁波的频率越高, 等离子体介质管对其的散射越小, 因此为了优化等离子体定向天线阵的回波损耗和增益等参数, 可以尝试使用电子密度更大、碰撞频率更小的等离子体.

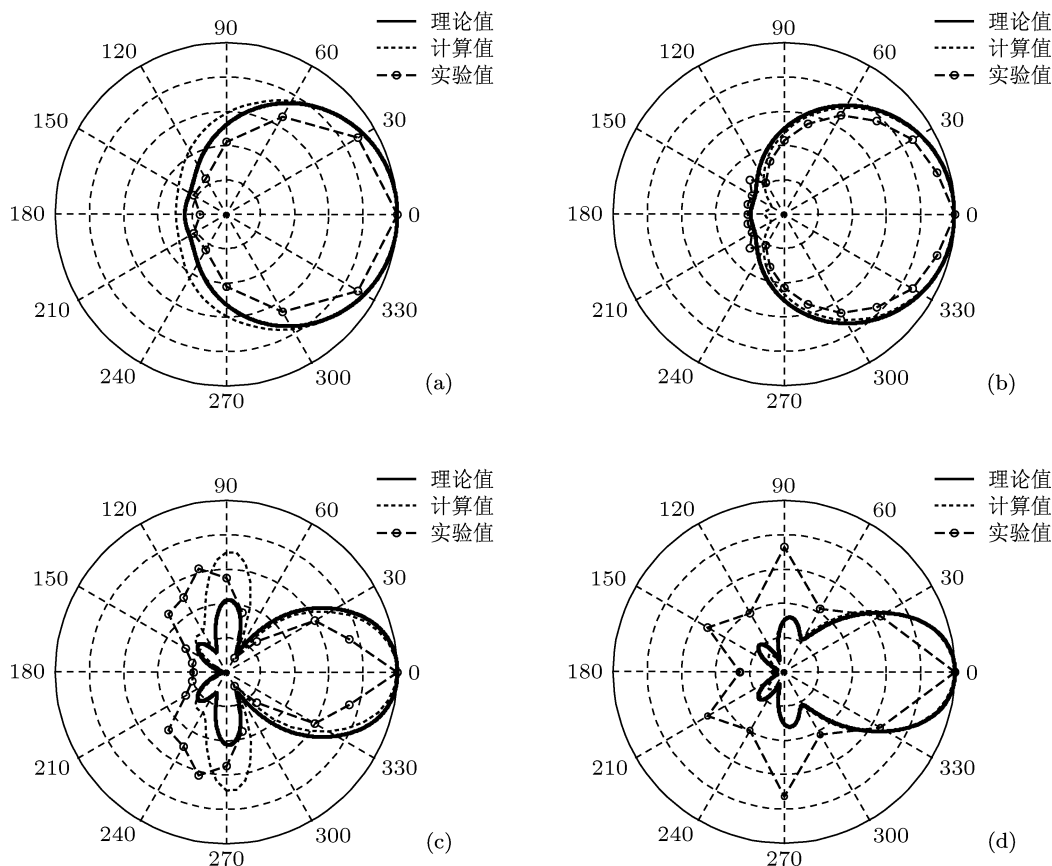


图 7 单波束定向辐射波瓣图的理论值、仿真值、实验值 (a) 360 MHz 天线辐射波瓣图; (b) 460 MHz 天线辐射波瓣图; (c) 2450 MHz 天线辐射波瓣图; (d) 2990 MHz 天线辐射波瓣图

表 1 定向天线阵在四个频点时的回波损耗和增益

| 参数类型    | 360 MHz |        | 460 MHz |        | 2450 MHz |        | 2990 MHz |        |
|---------|---------|--------|---------|--------|----------|--------|----------|--------|
|         | 中心天线    | 天线阵    | 中心天线    | 天线阵    | 中心天线     | 天线阵    | 中心天线     | 天线阵    |
| 回波损耗/dB | -15.3   | -11.6  | -16.4   | -11.9  | -23.2    | -12.5  | -26.7    | -14.5  |
| 增益/dB   | 1.12db  | 0.91db | 1.25db  | 0.94db | 1.39db   | 0.82db | 1.47db   | 0.76db |

## 5 结论

本文对由等离子体无源振子组成圆阵定向天线的原理进行了分析,设计了一款能够快速切换方向的定向天线系统,并实现多方向定向传输的功能。

通过对该天线的性能的测试,发现该天线系统具有良好的方向性和可控制性.且实验结果与理论结果基本符合.还测量了定向天线阵的回波损耗和增益,并为天线系统性能优化提出了建议,即适当提高等离子体的电子密度和降低碰撞频率.

- 
- [1] Borg G G, Harris J H, Martin N M, Thorneraft D, Milliken R, Milak D G, Kwan B, Ng T, Kireher J 2000 *Phys. Plasmas* **7** 2198
- [2] Borg G G, Harris J H, Milak D G, Martin N M 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 3272
- [3] Yuan Z C, Shi J M, Yu G F 2006 *Electron. Inf. Warf. Tech.* **21** 38 (in Chinese) [袁忠才, 时家明, 余桂芳 2006 电子信息对抗技术 **21** 38]
- [4] Yuan Z C, Shi J M 2005 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **25** 78 (in Chinese) [袁忠才, 时家明 2005 核聚变与等离子体物理 **25** 78]
- [5] Chen Z S, Shi J M, Wang J Y, Yuan Z C 2008 *Vac. Electron* **2** 18 (in Chinese) [陈宗胜, 时家明, 王甲寅, 袁忠才 2008 真空电子技术 **2** 18]
- [6] Zhao G W, Wang Z J, Xu Y M, Liang Z W, Xu J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5304 (in Chinese) [赵国伟, 王之江, 徐跃民, 梁志伟, 徐杰 2007 物理学报 **56** 5304]
- [7] Zhao G W, Xu Y M, Chen C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5303 (in Chinese) [赵国伟, 徐跃民, 陈诚 2007 物理学报 **56** 5303]
- [8] 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]
- [9] Meger R A, Mathew J, Gregor J A, Pechacek R E, Fernsler R F, Manheimer W, Robson A E 1995 *Phys. Plasmas* **2** 2532
- [10] Shi L, Ding J, Ding Q, Guo C J 2009 *Aer. Com. Tech.* **39** 31 (in Chinese) [石磊, 丁君, 丁芊, 郭陈江 2009 航空计算技术 **39** 31]
- [11] Zhen L, Zhao Q, Luo X G, Ma P, Liu S Z, Huang C, Xing X J, Zhang C Y, Chen X L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 155203 (in Chinese) [郑灵, 赵青, 罗先刚, 马平, 刘述章, 黄成, 邢晓俊, 张春艳, 陈旭霖 2012 物理学报 **61** 155203]
- [12] Anderson T 1999 *U.S. Patent* **5** 963 169 [1999-10-5]
- [13] Anderson T, Alexeff I 2006 *Plasma Science* **15** 057104

# Theoretical and experimental study of plasma directional antenna array\*

Huang Fang-Yi Shi Jia-Ming<sup>†</sup> Yuan Zhong-Cai Wang Jia-Chun  
Xu Bo Chen Zong-Sheng Wang Chao

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Key Laboratory of Anhui Province of Infrared and Low Temperature Plasma, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

(Received 22 November 2012; revised manuscript received 7 March 2013)

## Abstract

Domestic scholars are often concerned with the characteristics of the plasma cylindrical antenna and the plasma reflector antenna. However, foreign scholars have begun to study the plasma array antenna and used it to design smart antenna. In order to understand this new design idea, based on the plasma electromagnetic scattering theory, a theoretical and experimental study on the directive circular antenna array with a center element driving is presented. A sixteen-element plasma passive oscillator circular array, the mechanism of whose single-beam and multi-beam is transmitting, is established. And an experimental system is established to test the radiation result of circular antenna array. The measured results of radiation patterns are in good agreement with the computational values, verifying that electromagnetic waves can be directional and multi-beam transmitted in this circular antenna array. The advantages of this antenna array are fast switching of the radiation parameters, rapid reconstruction, radar stealth and so on.

**Keywords:** plasma, circular antenna array, single-beam, multi-beam

**PACS:** 52.20.-j, 13.40.Ks

**DOI:** 10.7498/aps.62.155201

---

\* Project supported by the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. 2010A001005D).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: sjmeci@yahoo.com.cn