

# EAST 低杂波天线耦合特性研究

李军, 贾华, 刘甫坤

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 采用数值模拟方法研究了 EAST 低杂波天线的耦合特性。基于二维线性耦合理论, 计算了天线功率反射系数和方向性系数与等离子体参数的关系, 分析了无源波导对天线耦合性能的影响, 并给出了不同参数下天线的功率谱。结果表明, 无源波导使天线的方向性略有下降, 但减小了天线的功率反射系数, 这有利于天线与等离子体的耦合。

**关键词:** 低杂波天线; 耦合; EAST; 无源波导

**中图分类号:** O532<sup>+</sup>.23; TL61<sup>+</sup>2.11

**文献标识码:** A

## 1 引言

利用低杂波实现非感应电流驱动已经成为托卡马克装置上实现稳态运行的重要手段和途径。低杂波电流驱动是通过大功率微波来驱动等离子体, 而波能的输送则是通过波导阵列天线来实现。考虑到只有满足可进性条件的波才能进入到等离子体中, 因此天线发射波的功率谱必须满足一定的要求, 才能达到等离子体电流驱动的目的<sup>[1]</sup>。

本文就 EAST 低杂波天线耦合特性展开研究, 首先简要介绍了天线的结构, 然后进行了理论分析与推导, 最后计算了天线的功率谱分布及耦合参数与等离子体参数和天线参数的关系, 分析了无源波导对天线耦合特性的影响, 为将来低杂波天线的工程设计提供了参考。

## 2 EAST 低杂波天线结构

EAST 2.45GHz 低杂波天线采用的是相控波导阵列式的结构, 通过相位调节的方法使得功率辐射谱中的大部分功率都能满足可进性条件, 从而把高功率的微波有效地耦合到等离子体中, 以实现低杂波电流驱动。天线主视图如图 1 所示。天线共有 5 排, 每一排有 4 个主波导, 每一个主波导包含 8 个子波导, 同一个主波导中相邻子波导间相位差是为

90°, 天线的每一排主波导间的相位差是由相位反馈系统进行控制, 通过调节主波导之间的相位差来得到所需要的功率谱分布<sup>[2]</sup>。

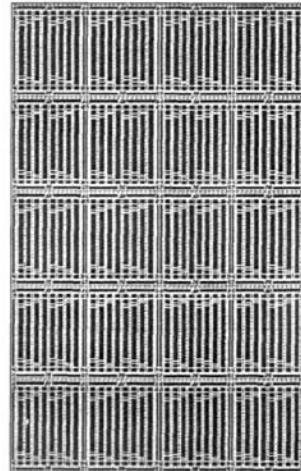


图 1 天线主视图

该天线中同时包含有源波导和无源波导, 通过选择合适的无源波导深度, 能够使耦合到无源波导的功率再以合适的相位耦合进入等离子体中, 就可以改善天线的功率谱<sup>[3]</sup>。在天线每一排的外侧及相邻主波导间各插入一个短路的无源波导(无源波导

收稿日期: 2009-03-01; 修订日期: 2009-11-17

作者简介: 李军(1983-), 男, 湖北汉川人, 中科院等离子体物理研究所微波与加热研究室博士生, 主要研究方向为微波工程与等离子体物理。

深度取为  $1/4$  波长<sup>[4]</sup>), 结构示意图如图 2 所示。因此, 天线每排包含 37 个波导, 即 32 个有源波导和 5 个无源波导, 整个天线构成了一个  $5 \times 37$  的波导阵。

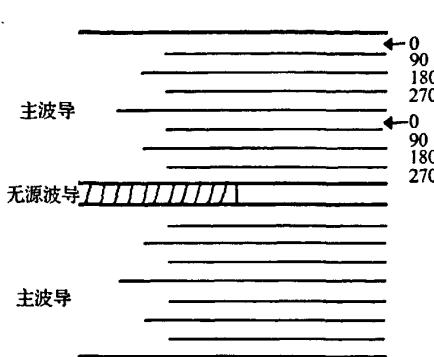


图 2 主波导及无源波导结构示意图

### 3 理论分析与计算

Brambilla 于 1976 年提出了低杂波与等离子体耦合经典理论。本文在计算原理上与文献[5]相同, 采用二维平板模型, 运用场匹配的方法进行数值计算。一维简化耦合模型如图 3 所示。

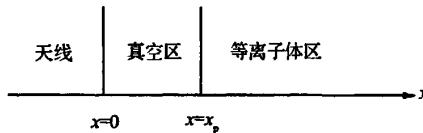


图 3 低杂波天线与等离子体耦合模型示意图

由图 3 可见, 有两个分界面, 一个是天线口与真空分界面, 另一个是真空与等离子体的分界面(当  $x_p = 0$  时, 二者重合)。相控波导阵列天线有源波导的入射波, 经过真空区后到达等离子体区, 一部分波被等离子体吸收, 一部分被反射回来。被耦合到无源波导的功率再耦合进入等离子体中, 并将能量传给等离子体。从某种意义上讲, 短路的无源波导是比较特殊的有源波导。其特殊之处就在于其入射波是由于能量被耦合到无源波导而形成的, 因此可以把短路的无源波导理解成有源波导。波在无源波导中被反射回来后, 所改变的相位因子为  $\exp\{-i[(4L/\lambda)+1]\pi\}$ ,  $L$  为无源波导深度。然后在两个分界面上分别运用场连续性条件建立方程

联立求解即可。分析推导过程如下。

a. 天线区域场的形式为:

$$E_z^{w\theta}(x, z) = \sum_{p=1}^N e^{i\theta_p} \theta_p(z) \sum_{n=0}^{\infty} (\alpha_{np} e^{ik_n x} + \beta_{np} e^{-i[(4L/\lambda)+1]\pi} e^{ik_n x}) \cos \frac{n\pi(z - z_p)}{b} \quad (1)$$

$$B_y^{w\theta}(x, z) = -\frac{k_0}{k_n} \sum_{p=1}^N e^{i\theta_p} \theta_p(z) \sum_{n=0}^{\infty} (\alpha_{np} e^{ik_n x} - \beta_{np} e^{-i[(4L/\lambda)+1]\pi} e^{-ik_n x}) \cos \frac{n\pi(z - z_p)}{b} \quad (2)$$

其中,  $\alpha_{np}$  和  $\beta_{np}$  分别为第  $p$  个波导中第  $n$  个模式的入射波和反射波的振幅;  $z_p = b + d$ ,  $b$  和  $d$  分别为子波导宽度和波导壁宽度;  $k_0 = \omega/c$  为真空中的波数。

b. 真空区场的表达式可以写为:

$$E_z^v(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(k_1) [e^{ik_1 x} - y(k_1) e^{-ik_1 x}] e^{ik_1 z} dk_1 \quad (3)$$

$$E_y^v(x, z) = -k_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(k_1) [e^{ik_1 x} + y(k_1) e^{-ik_1 x}] e^{-ik_1 z} dk_1 \quad (4)$$

其中,  $\sigma(k_1)$  为入射电场;  $y(k_1)$  为电场反射系数;  $k_1$  是沿  $z$  方向的波数。

利用天线波导口处场的连续性条件, 并运用傅立叶分析和三角函数的正交性等数学知识可以得到:

$$\sigma(k_1) [1 - y(k_1)] = \sum_{p=1}^N e^{i\theta_p} \sum_{n=0}^{\infty} (\alpha_{np} + \beta_{np} e^{-i[(4L/\lambda)+1]\pi}) F_{np}(k_1) \quad (5)$$

$$\sum_{p=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} k_{np} (q, p) (\alpha_{np} + \beta_{np} e^{-i[(4L/\lambda)+1]\pi}) + (\alpha_{mq} + \beta_{mq} e^{-i[(4L/\lambda)+1]\pi}) = \alpha_{mq} \quad (6)$$

$$\text{此处, } k_{np}(q, p) = \frac{4\pi r_m}{b} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F_{mq}^*(k_1) F_{np}(k_1) [1 + y(k_1)]}{k_1} dk_1;$$

$$F_{np}(k_1) = -i \frac{k_1}{2\pi} \frac{1 - (-1)^n e^{-ik_1 b}}{k_1^2 - \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2} e^{-ik_1 z}; \quad r_m|_{m=0} = -\frac{i}{2} k_0.$$

在真空区与等离子体区分界面上, 利用阻抗匹配条件得到入射波在等离子体边界的电场反射系数  $y(k_1) = e^{i2k_1 z_p} \frac{1 - z(k_1)}{1 + z(k_1)}$ , 其中,  $z(k_1)$  为等离子体边界的波阻抗<sup>[5]</sup>。

为降低计算的复杂程度, 同时考虑到高次模在波导中的衰减性, 假定入射波只有零次模, 则

$\alpha_{0p} = A_p e^{i\phi_p}$ , 其中  $A_p$  为复振幅,  $\phi_p$  为第  $p$  个波导的相位。联立方程(5)和(6)可解得  $\beta_{0p}$  和  $\sigma(k_i)$ , 从而求得功率反射系数  $R = \sum_{p=1}^N |\beta_{0p}|^2 / |\alpha_{0p}|^2$ , 并可以得到天线的方向性系数  $D_p$  及功率谱分布  $|\sigma(k_i)|^2$ 。

基于上述理论, 笔者编写了一个计算程序, 对相控波导阵列天线辐射的低杂波与等离子体耦合进行了计算机模拟, 可以计算出天线在不同条件下的耦合参数。

#### 4 数值结果和分析

在相同的参数条件下, 求解了两种情况(a. 考虑无源波导; b. 不考虑无源波导)下天线的功率谱分布、功率反射系数  $R$  及方向性系数  $D_p$  与等离子体边界密度梯度  $dn/dx$  的关系, 并对 a、b 两种情况的结果进行了对照与分析, 最后求解了天线功率谱分布和反射系数与主波导相位差  $\delta\phi$  的关系。

天线的功率反射系数是衡量天线与等离子体耦合性能好坏的重要参数。反射系数过大, 说明天线与等离子体匹配不好, 到达等离子体区的微波能量就少, 影响微波能量的传输。图 4 计算了 a、b 两种情况下功率反射系数。从图 4 中可以看出, 在合理的密度梯度范围内, a 情况下可以得到相对较小的功率反射系数。这说明, 无源波导能够使天线与等离子体较好地匹配, 提高天线的耦合性能。图 5 给出了在  $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-4}$  密度梯度下, a、b 两种情况下天线功率谱(取  $N_1$  为正的部分)的比较。可以看出, 功率谱形状结构没有发生变化, 而考虑无源波导影响时, 天线功率谱峰值较大, 曲线变得更尖锐, 更有利于驱动等离子体电流<sup>[6]</sup>。

天线的方向性系数是衡量低杂波电流驱动效率重要指标, 方向系数大, 说明电流驱动效率好。图 6 是 a、b 两种情况下天线的方向性系数与密度梯度的关系, 可见考虑无源波导时的方向性系数要比不考虑无源波导时要小一些, 并随天线口等离子体参数的变化而变化。

图 7 给出了主波导相位差  $\delta\phi$  在  $-180^\circ \sim 180^\circ$  之间变化时, 功率反射系数  $R$  的变化情况。从图 7 中可以看出, 当天线每一排相邻主波导间相差为  $0^\circ$  时, 功率反射系数为最小, 并且对于不同的等离子体密度梯度, 天线的反射情况是不一样的, 这可以理解成

由于等离子体阻抗的不同所引起的。因此, 可以调节主波导之间的相位差来得到一个满足物理实验需要的功率谱。通过改变等离子体参数及天线参数, 能够得到不同的功率谱。图 8 所示为 EAST 低杂波天线在不同相位差情况下计算出来的功率谱。可以看出, 功率谱都是不对称谱, 并且相位差为  $90^\circ$

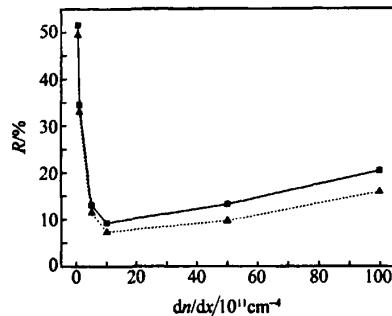


图 4 a、b 两种情况下  $R$  的比较  
▲—情况 a; ■—情况 b。

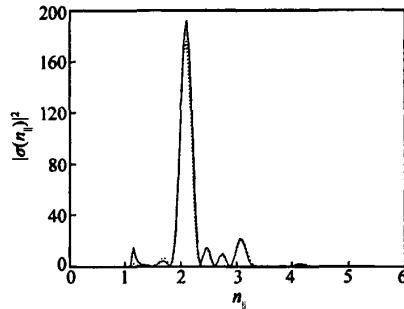


图 5 a、b 两种情况下天线的功率谱的比较  
—情况 a; ···—情况 b。

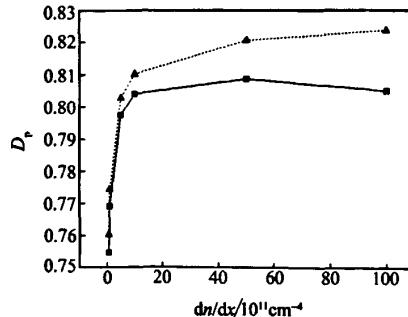


图 6 天线方向性与密度梯度的关系  
■—情况 a; ▲—情况 b。

的时候功率谱峰值最大, 更有利于驱动等离子体电流。

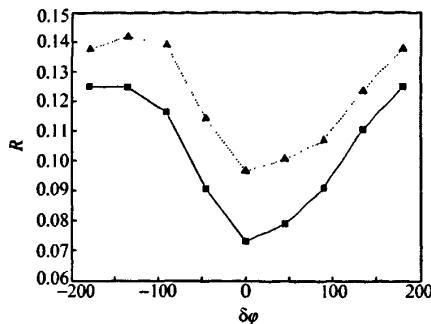


图7 不同相位差下的天线耦合情况  
—  $dn/dx=1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-4}$ ; ▲  $dn/dx=0.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-4}$ 。

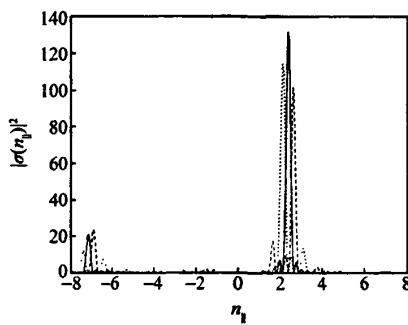


图8 不同相位差下天线的功率谱  
—  $\delta\phi=0^\circ$ ; -  $\delta\phi=90^\circ$ ; ...  $\delta\phi=180^\circ$ 。

## 5 结束语

低杂波天线与等离子体之间的耦合对低杂波电流驱动起着至关重要的作用, 笔者编制程序计算了在不同情况下天线的耦合参数及功率谱。通过考虑无源波导和不考虑无源波导两种情况的对比与分析, 发现无源波导对整个天线的耦合特性影响不大。它使天线的方向性系数略有下降, 但是无源波导减小了天线的功率反射系数, 没有改变天线的功率谱形状结构, 只是使功率谱主峰变窄, 曲线变得更尖锐, 并且当天线主波导间相位差为  $90^\circ$  时功率谱峰值最大, 更有利于驱动等离子体电流。

## 参考文献:

- [1] 朱士尧. 核聚变原理 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1992.
- [2] 石秉仁. 磁约束聚变原理与实践 [M]. 北京: 原子能出版社, 1999.
- [3] LITAUDON X, MOREAU D. Coupling of slow waves near the lower hybrid frequency in JET [J]. Nucl. Fusion, 1990, 30(3): 471.
- [4] Bibet P, Litaudon X, Moreau D. Conceptual study of a reflector waveguide array for launching lower hybrid waves in reactor grade plasmas [J]. Nucl. Fusion, 1995, 35(10): 1213.
- [5] Brambilla M. Slow-wave launching at the lower hybrid frequency using a phased wave-guide array [J]. Nucl. Fusion, 1976, 16(1): 47.
- [6] Stevens J E, Bell R E, et al. Lower hybrid experiments on PLT using grills with various  $n_i$  spectral widths [J]. Nucl. Fusion, 1988, 28(2): 217.

## Coupling properties of EAST lower hybrid wave launcher

LI Jun, JIA Hua, LIU Fu-kun  
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract:** The coupling properties of EAST LHW launcher are analyzed by numerical simulation. Based on the two-dimensional linear coupling theory, the relationships of power reflection coefficient and power directivity with plasma parameters are calculated. The effects of passive waveguides on the coupling properties are analyzed, and the power spectrums of launcher under different parameters are given. The results indicate that the passive waveguides give a slight reduction on power directivity, but to decrease the power reflection coefficient, which is good for the coupling between launcher and plasma.

**Key words:** LHW launcher; Coupling; EAST; Passive waveguide

## 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](http://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](http://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](http://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>