

文章编号: 0255-8297(2007)04-0359-06

ICP 源平面微带螺旋天线参数对性能的影响

周蓓, 廖斌, 朱守正

(华东师范大学 信息学院电子系, 上海 200062)

摘要: 分析了平面电感耦合微波等离子体源(ICP)的基本理论, 根据其等效电路设计了一个谐振频率在2.45 GHz的平面微带螺旋天线, 通过建模进行仿真优化, 并提出减小损耗的方法。研究发现, 螺旋线圈的尺寸是影响谐振频率和Q值的关键因素, 这为小功率电感耦合微波等离子体源的进一步研究提供了理论基础。

关键词: 电感耦合微波等离子体源(ICP); 平面微带螺旋天线; 数值仿真

中图分类号: TN99 文献标志码: A

Parameters' Impact on Performance of Antenna in Planar Microstrip Spiral ICP Source

ZHOU Bei, LIAO Bin, ZHU Shou-zheng

(Department of Electronic Engineering, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: In this paper, theoretical analysis of inductively-coupled microwave plasma source (ICP) is presented. According to its equivalent circuit, a planar microstrip spiral antenna with resonant frequency at 2.45 GHz is designed. The antenna is simulated and optimized based on modeling, and the loss reduction method is proposed. The dimensions of coil are found to be the key factors having significant impact on resonance frequency and quality factor. Theoretical foundation is obtained for further research on low power planar spiral inductively-coupled microwave plasma source.

Keywords: inductively-coupled microwave plasma source (ICP); planar microstrip spiral antenna; numerical simulation

基于微系统的小功率微波等离子体技术是近几年发展起来的集微电子、微波和等离子体技术于一体的高新技术。其基本思想是采用微带电路和小功率微波激励形成小尺寸的等离子体^[1], 例如用不超过3~5 W的微波功率使气体电离, 产生10 mm甚至0.2 mm尺寸的等离子体。这种基于微系统的小功率微波等离子体具有很多突出优点, 如结构简单、使用寿命长、状态稳定、无电极污染、易与其它MEMS器件集成等等。此项技术在生物MEMS杀菌消毒、小尺寸材料处理以及微化学分析系统等领域具有良好的应用前景^[2~4], 因而受到越来越广泛的关注。

电感耦合等离子体(inductively coupled plasma)是由射频天线或电极的磁场加速电子后, 电离中性气体而产生的。与其他低气压、高密度等离子体源相

比, ICP源无需外磁场, 装置结构简单。一般来说, 等离子体的设备都很庞大且造价昂贵, 例如传统13.56 MHz的ICP源, 直径就有300 mm。随着MEMS工艺的快速发展, 对等离子体源的小型化、小功率要求越来越高。1999年, 美国波士顿东北大学J. Hopwood等开始研究450 MHz小功率平面电感耦合等离子体源, 其直径只有5 mm^[4,5], 主要应用于微型分光计。但到目前为止还没有更高频段ICP源研究的相关报道。

由于电感耦合等离子体源的激励单元采用平面微带螺旋天线, 因此它是ICP源的关键部分。本文根据平面电感耦合微波等离子体源的基本理论, 对2.45 GHz平面微带螺旋天线进行建模和仿真, 并通过建立等效电路, 提出了减小损耗的方法。这为小功

收稿日期: 2006-09-01; 修訂日期: 2007-04-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60471015)

通讯作者: 廖斌, 博士, 副教授, 研究方向: 小功率微波等离子体源及应用、天线、电波传播预测、电磁兼容, E-mail: bliao@ec.ecnu.edu.cn;

朱守正, 教授, 博导, 研究方向: 电磁场与微波技术、天线、计算电磁学、电磁波遥感, E-mail: szzhu@ee.ecnu.edu.cn

率电感耦合微波等离子体源的进一步研究提供了理论基础。

1 理论基础

等离子体源工作时,高频电流通过天线线圈激发出交变的电磁场。由于正离子质量太大,不能对电磁场的变化作出快速响应,因此一般忽略正离子的运动。而电子在环形电场的加速下运动,同时还受到磁场洛伦兹力的作用。电子在等离子体中与其它粒子不断碰撞,其运动轨迹为环绕轴向对称的一些不规则的类圆周运动。电子在电场的不断加速下达到很高的速度,当它与中性粒子(分子或原子)相撞击时足以发生弹性碰撞,电子的能量转化为中性粒子的内能,这样使中性粒子电离或激发到较高能级。而新产生的电子,只要交变电场的频率小于电子与中性粒子的碰撞频率,它就会在交变电场的作用下加速,再去撞击其它中性粒子。电子的这种级联碰撞最终使气体产生并维持等离子体放电。

由等离子体放电的原理可知,等离子体激励的关键是电场和磁场的强度。因此在天线设计中,重点是分析天线的Q值及其激发的场分布情况,并进行优化。

根据文献[6]设计ICP微带天线,其示意图和等效电路如图1所示,其中 L_C 、 R_C 为螺旋线圈的等效电感和等效电阻。由于微带电路的寄生效应,螺旋线圈之间以及线圈与介质之间还存在等效并联电容 C_P 。等效电感 L_C 与电容($C_T + C_P$)形成谐振,谐振时产生强磁场。并联电容 C_L 用于消除电路的感抗,使ICP微带天线与 50Ω 激励功率源阻抗匹配。天线的谐振频率主要取决于螺旋线圈的结构尺寸和调谐电容 C_T (由于是微带电路,介质层介电常数也有一定影响),而阻抗匹配可以通过调节并联电容 C_L 的

大小来实现。在这里调谐电容 C_T 采用叉指电容,电容 C_L 采用微带突变结构^[7]。

考虑到电容耦合结构对天线特性的影响,比如阻抗增大会使天线的损耗增大,从而使Q值降低,因此,本文还提出一种螺旋线圈的自谐振结构,如图2所示。此时天线不使用叉指电容耦合,谐振频率主要由螺旋线圈的自谐振频率决定,并联电容 C_L 进行调配。

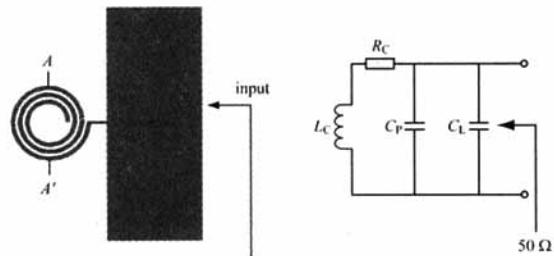


图2 自谐振结构等离子体源天线及其等效电路

Fig.2 Self-resonant ICP antenna and its equivalent circuit

理论上,由于没有了耦合损耗,自谐振结构的ICP源与前者相比,激发的电磁场会更强,这就意味着电子更易吸收能量,也就更容易激发出等离子体。本文将通过比较这两种结构的仿真结果,来验证这一结论。

2 数值仿真与分析

假定无微波等离子体激励。由于要使感应放电功率最大,等离子体源本身消耗的功率最小,即功率源到感应放电能量转换的效率达到最大,因此重点研究了Q值和辐射场强等关键参数。为了降低功率损耗,本文所有设计均选用金作为金属导带,介质厚度为0.6 mm,介电常数为2.5,激励源选择边馈形式。

2.1 螺旋线圈尺寸变化对Q值的影响

平面螺旋天线电感部分结构如图3所示,其中 w 、 s 为螺旋微带线宽度、线间距, D_0 为外直径, n 为匝数。仿真发现,在耦合结构天线中(图1结构),螺旋线圈尺寸(w 、 s 、 D_0 、 n)对谐振频率影响最大。由于线圈匝数增加会引起等效电阻和寄生电容增大,使损耗增加,导致Q值下降,因此, n 一般取3。在HFSS软件仿真中发现,螺旋线圈外径对频率的调整范围较大。当其他参数不变,而外径 D_0 增大时,谐振频率减小,如图4所示。

保持外直径为4 mm,分别改变 w 和 s ,可发现 w

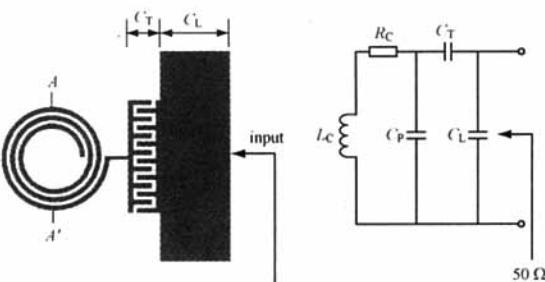


图1 电感耦合等离子体源天线及其等效电路

Fig.1 ICP antenna and its equivalent circuit

和 s 的改变对频率的影响较小,但对 Q 值却有极大影响,如图 5 所示。值得注意的是, Q 值随 w 、 s 的增

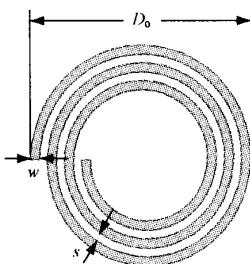


图 3 平面螺旋电感线圈

Fig.3 Planar spiral coil

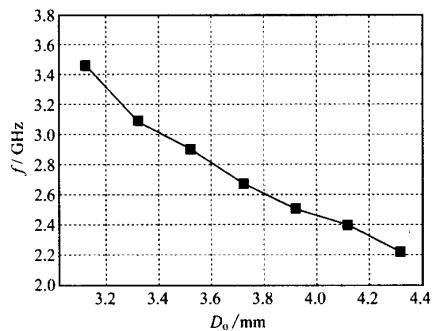


图 4 螺旋线圈外径变化对谐振频率的影响

Fig.4 Resonant frequency versus coil outer diameter

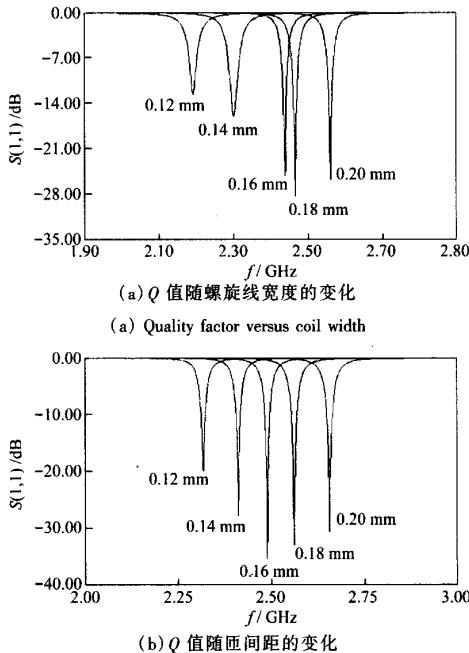


图 5 螺旋线圈尺寸变化对品质因数的影响

Fig.5 Quality factor versus dimensions of coil

大,出现先增大后减小的变化趋势。这是由于增大导线宽度或线间距,相当于减小了电感的欧姆损耗,从而提高了电感的 Q 值。 w 很大时,线圈的环路电流效应明显,电损耗增大; s 很大时,电感值迅速减小, Q 值降低。因此在电感线圈的设计中有一个最优的线宽和匝间距。通过优化,本文取 $w = 0.16 \text{ mm}$, $s = 0.14 \text{ mm}$ 。

调配后的 S_{11} 如图 6 所示,频点在 2.48 GHz,对应的反射损耗为 -27.38 dB, Q 值为 820。

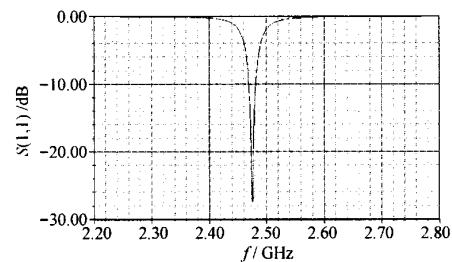


图 6 S_{11} 仿真曲线

Fig.6 Simulated S_{11} versus frequency

2.2 介质介电常数对 Q 值及其辐射效率的影响

介质基片的介电常数对频点和辐射效率也有较大的影响。保持其他参数不变($D_o = 4 \text{ mm}$),取介电常数分别为 7、6、4.5、2.5,仿真得到的 S_{11} 曲线分别标注为 A、B、C、D,如图 7 所示。可以发现随着介电常数的减小,谐振频率从 1.52 GHz 上升到 2.48 GHz。因此随着介质基片介电常数的减小,谐振频率开始增大。

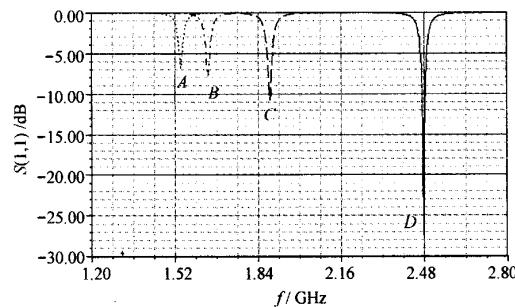
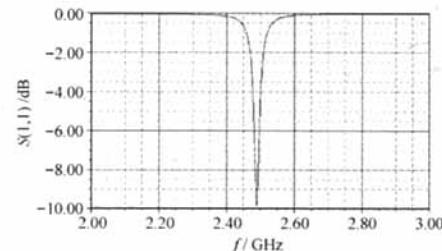


图 7 仿真的 S_{11} 随介电常数的变化
Fig.7 Simulated S_{11} versus permittivity of dielectric substrate

为了观察介电常数对辐射效率的影响,取介电常数为 2.5、10.2 和 81 的 3 种情况进行比较。分别调节不同介电常数情况下平面微带螺旋天线的尺寸,使其谐振频率工作在 2.45 GHz 左右,如图 8 所示。

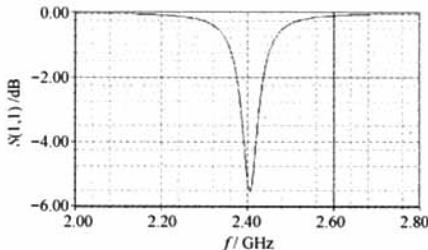
介电常数为 2.5 时的 S_{11} 前面已经讨论过。介电常数为 10.2 时, 反射损耗为 -9.81 dB , Q 值为 245; 介电常数为 81 时, 反射损耗为 -5.51 dB , Q 值为 50。可以看到, 随着介电的常数增大, Q 值呈减小趋势。

下面对相同位置几个剖面的电磁场分布进行仿真分析。 AA' 面为螺旋线圈的轴向剖面(见图 1), BB' 面为紧贴天线表面的水平剖面。



(a) 介电常数为 10.2 时的 S_{11} 曲线

(a) Simulated S_{11} when $\epsilon_r = 10.2$



(b) 介电常数为 81 时的 S_{11} 曲线

(b) Simulated S_{11} when $\epsilon_r = 81$

图 8 不同介电常数的 S_{11} 仿真曲线图

Fig.8 Simulated S_{11} versus permittivity of dielectric substrate

图 9 为 $\epsilon_r = 2.5$ 时两剖面的电场与磁场分布。从 AA' 面的场分布可以看到, 电磁场类似于螺线管的场分布, 在线圈半径大约 $2/3$ 处电磁场最强, 而轴心和其他区域则较弱。由于螺旋线圈的聚焦作用, 感应辐射的能量相对集中, 从而得到等离子体激发所需要吸收的能量。比较电场和磁场, 发现电场大部分集中在介质内部。因此要使电场从介质的束缚中释放出来, 必须考虑介质基片的介电常数对能量损耗的影响。

图 9 中还可以看到, 从电感线圈表面开始, 电磁场随着轴向距离的增大而减弱。也就是说, 等离子体激励以后, 等离子体密度、电子所产生的射频电流密度都会由于远离电感平面而逐渐减弱。

从 BB' 剖面分布看, 电场、磁场沿螺旋电感线圈呈环状分布, 且终端开路处电场最强、磁场最弱, 沿

螺旋线圈电场逐渐减弱。同时从图 9(c) 中发现, 由于耦合结构中叉指电容的存在, 一部分电场能量集中在电容区域, 造成了能量的损耗, 但对磁场影响较小。

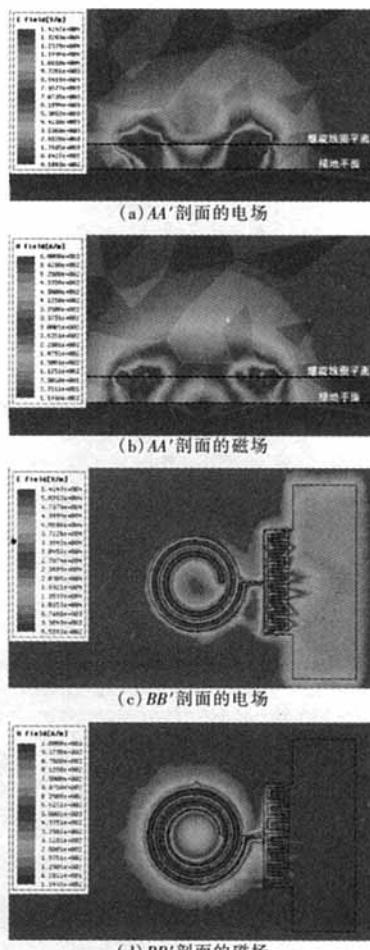


图 9 平面微带螺旋天线的电磁场分布 ($\epsilon_r = 2.5$)

Fig.9 Electromagnetic field distribution of planar microstrip spiral antenna ($\epsilon_r = 2.5$)

当介电常数为 10.2 时, 激发的电场强度明显减小, 磁场强度也略为减小。此外螺旋线圈上方的电场能量略趋向集中于介质层分布, 如图 10 所示。当介电常数为 81 时, 平面螺旋天线上方的能量辐射很弱, 电磁场几乎集中在介质层附近区域。因此, 选用介电常数较小的介质。而在实际应用中还要考虑等离子体激发对介质材料的温度和使用寿命的要求。

2.3 耦合结构天线与自谐振结构天线的比较

自谐振结构天线的谐振频率主要取决于螺旋电感的自谐振频率, 这里取尺寸为 $D_o = 3.5 \text{ mm}$,

$w = 0.16 \text{ mm}$, $s = 0.14 \text{ mm}$. 调配后的 S_{11} 如图 11 所示, 频点在 2.48 GHz, 对应的反射损耗为 -26.91 dB , Q 值为 1 200. 可以看到, 自谐振结构的天线 Q 值比耦合结构的 Q 值有一定增大.

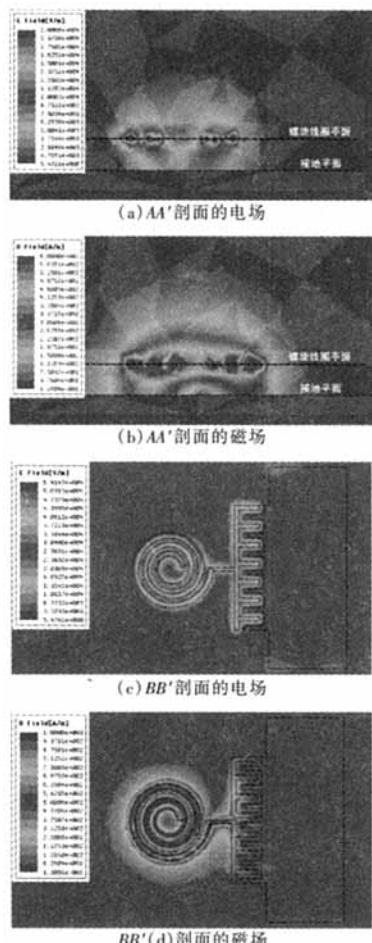


图 10 平面微带螺旋天线的电磁场分布 ($\epsilon_r = 10.2$)

Fig. 10 Electromagnetic field distribution of planar microstrip spiral antenna ($\epsilon_r = 10.2$)

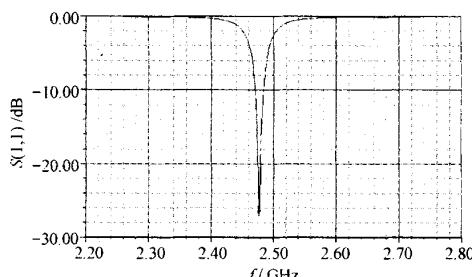


图 11 自谐振结构的 S_{11} 仿真曲线

Fig. 11 Simulated S_{11} of self-resonant structure versus frequency

图 12 为自谐结构两剖面的电场及磁场分布. 与耦合结构相比, 自谐振结构磁场变化不大, 靠近螺旋平面处最大值都约为 10^3 A/m , 而电场最大值约为 $3.5 \times 10^5 \text{ V/m}$, 是耦合结构相同剖面处电场最大值的 7 倍, 同时电场分布范围扩大. 上述结果表明, 自谐振结构产生的电场和磁场强度都比耦合结构的有明显增大, 从而验证了理论分析时提出的结论.

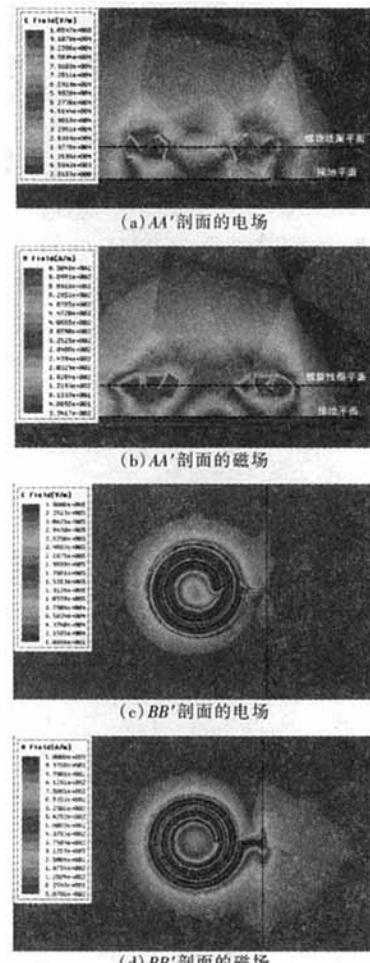


图 12 自谐振结构的电磁场分布图

Fig. 12 Electromagnetic field distribution of self-resonance structure

文献[8]对一个传统 ICP 源的电场进行了测量, 结果表明在一定真空度下 (10^{-3} Torr), 受激励气体为 Ar 气时, 电场强度最大为 200 V/m , 而激励气体为空气时, 电场强度约为 Ar 气的 2 倍^[9]. 由图 9(c)、图 12(c)的仿真可知, 空气时耦合结构电场强度可达到约 $5.4 \times 10^4 \text{ V/m}$, 自谐结构电场强度可达到约 $3.5 \times$

10^5 V/m, 都远高于传统 ICP 源激发的电场强度。因此, 从理论上来讲, 在一定真空度下可以激发出等离子体。

3 结语

本文在研究射频电感耦合等离子体源的基础上, 根据频率更高、输入功率更低、尺寸更小的微波等离子体激励源的要求, 设计了一个谐振频率在 2.45 GHz 的平面微带螺旋天线。同时还提出了一种使损耗减小的自谐振结构, 使辐射场大大增强, 从而提高了功率源到感应放电能量转换的效率。对于平面微带螺旋天线的各个重要参数, 通过仿真分别讨论了它们对天线特性的影响: 外径 D_0 增大时, 谐振频率减小; 随着 w 、 s 的增大, Q 值先增大后减小; 介质基片介电常数增大, 谐振频率减小, 同时 Q 值呈减小趋势。

至于微波等离子体激励以后, 等离子体阻抗对 S_{11} 和 Q 值的影响, 将另文介绍。

参考文献:

- [1] BILGIC A M, ENGEL U, VOGES E, KUCKELHEIM M, RROEKAERT J A C. A new low-power microwave plasma source using microstrip technology for atomic emission spectrometry [J]. Plasma Sources Sci Technol, 2000, 9(1): 1–4.
- [2] IZA F, HOPWOOD J A. Low-power microwave plasma source based on a microstrip split-ring resonator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(4): 782–787.
- [3] IZA F, HOPWOOD J A. Split-ring resonator microplasma: microwave model, plasma impedance and power efficiency [J]. Plasma Sources Sci Technol, 2005, 14(2): 397–406.
- [4] HOPWOOD J. A microfabricated inductively-coupled plasma generator [J]. Journal of Microelectro-mechanical Systems, 2000, 9(3): 309–313.
- [5] YIN Y, MESSIER J, HOPWOOD J. Miniaturization of inductively coupled plasma sources [J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1999, 27(5): 1516–1524.
- [6] PIEJAK R B, GODYAK V A, ALEXANDROVICH B M. A simple analysis of an inductive RF discharge [J]. Plasma Sources Sci Technol, 1992, 1(3): 179–186.
- [7] HONG Jiasheng, LANCASTER M J. Microstrip filters for RF/microwave applications [M]. John Wiley & Sons, 2001.
- [8] HOPWOOD J, GUARNIERI C R, WHITEHAIR S J, CUOMO J J. Electromagnetic fields in an rf induction plasma [J]. Vac Sci Technol, 1993, 11(1): 147–151.
- [9] BROWN S C. Basic data of plasma physics [M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 1966: 252.

(编辑:欧阳丽霞)

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>