

## 基于微带环缝谐振器的 2.45GHz 小功率微波等离子体源的建模与仿真

廖斌 张少君 朱守正

(华东师范大学信息学院电子系 上海 200062)

**摘要:** 该文介绍了一种基于微带环缝谐振器的 2.45GHz 小功率微波等离子体源的建模方法。根据半波长终端开路谐振器的特性,通过选择合适的缝隙宽度和偏转角度、介质基片的介电常数等,使微带环缝谐振器的品质因数最大,同时与馈电端良好匹配。研究表明,实验结果与仿真结果基本吻合,这为小功率微型微波等离子体源的进一步研究提供了理论基础。

**关键词:** 微波等离子体源; 微带环缝谐振器; 品质因数

**中图分类号:** TN015

**文献标识码:** A

**文献编号:** 1009-5896(2007)10-2512-05

## Modeling and Simulation of 2.45GHz Low-Power Microwave Plasma Source Based on a Microstrip Split-Ring Resonator

Liao Bin Zhang Shao-jun Zhu Shou-zheng

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

**Abstract:** A modeling of 2.45GHz low-power microwave plasma source based on a microstrip split-ring resonator is presented in this paper. According to characteristics of half-wavelength resonator with a open circuit at the end, the parameters such as discharge gap, angular position of the feeding point and permittivity of dielectric substrate are optimized to make the quality factor of microstrip split-ring resonator reach maximum and match the input impedance of the resonator to that of the power supply. The research indicates that experimental results are found to be in good agreement with simulated results. The theoretical basis is gained for further research of low-power microwave microplasma.

**Key words:** Microwave plasma source; Microstrip split-ring resonator; Quality factor

### 1 引言

基于微系统的小功率微波等离子体技术是一项近几年发展起来的集微电子技术、微波技术和等离子体技术于一体的高新技术。其基本思想就是采用微带电路通过小功率微波激励起小尺寸的等离子体,例如用不超过 3~5W 的微波功率使气体电离,产生 10mm 甚至 0.2mm 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的优点,如结构简单、使用寿命长、状态稳定,而且无电极污染,特别是更易与其它 MEMS 器件集成等等。由于此项技术在生物 MEMS 的杀菌消毒、小尺寸材料的处理以及微化学分析系统等领域具有良好的应用前景<sup>[1,2]</sup>,因而受到越来越广泛的关注。

目前随着微加工工艺的发展,出现了两种基于微带技术的电容耦合型小功率微波等离子体源。一种是 2.45GHz 小功率微波等离子体源<sup>[1,3]</sup>,它是在金属导带与接地板之间的介质基片中加载填充了惰性气体的微型石英玻璃管,通过金属导带与接地板之间的电场使惰性气体放电,这种结构比较复杂,特别是微型石英玻璃管的加载很困难。另一种是 900MHz

小功率微波等离子体源<sup>[2]</sup>,它采用平面微带环缝谐振器结构,尺寸为 50mm×20mm,结构简单,但在阻抗匹配及小型化等方面还存在一些问题。因此为了解决这些问题,有必要对小功率微波等离子体源的新型结构进行研究。本文根据准静态理论,通过半波长终端开路谐振器的特性,提出了一种小型化的基于微带环缝谐振器(MSRR)的 2.45GHz 小功率微波等离子体源的设计方法,分析微带缝隙的宽度和偏转角度、介质基片的介电常数等的影响,使微带环缝谐振器的品质因数最大,同时与馈电端良好匹配。实验结果与仿真结果比较基本吻合,这为小功率微型微波等离子体源的进一步研究提供了理论基础。

### 2 理论基础

微带环缝谐振器是一种不同于传统的环形谐振器,其环周长仅为工作波长的一半,而且谐振在第 1 个奇模上。为了更好地分析微带环缝谐振器,这里先讨论终端开路微带线谐振器。微带谐振器一般由一段终端开路或者短路的微带线构成。根据传输线理论,终端开路的有限长微带线,当长度为半带内波长的整数倍时,即  $l = n(\lambda_g/2)$ ,其输入导纳  $Y_{in}$  可以写成

2006-03-07 收到,2006-09-26 改回

国家自然科学基金(60471015)资助课题

$$Y_{in} = Y_c \frac{1 - e^{-2\alpha l}}{1 + e^{-2\alpha l}} \quad (1)$$

式中  $Y_c$  为微带线的特性导纳， $\alpha$  为微带线的衰减常数。

由于微带线衰减很小，所以  $e^{-2\alpha l} \approx 1$ ，这时  $Y_{in} \approx 0$ ，相当于并联谐振，为一个半波长并联谐振器，等效电路如图 1 所示，其输入导纳  $Y_{并}$  为

$$Y_{并} = G + jB = G + j\omega C + \frac{1}{j\omega L} \quad (2)$$

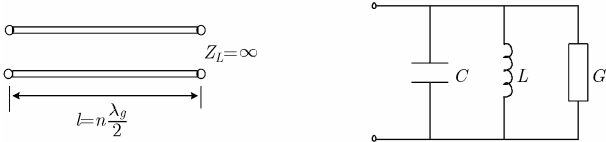


图 1 半波长终端开路微带谐振器示意图及其等效电路

因此在谐振点附近，有  $Y_{in} = Y_{并}$ 。考虑到微带线衰减常数  $\alpha$  很小，忽略展开高次项，式(1)可近似为

$$Y_{in} = Y_c \frac{1 - e^{-2\alpha l}}{1 + e^{-2\alpha l}} \approx Y_c \frac{\alpha l}{1 - \alpha l} \approx Y_c \alpha l \quad (3)$$

即

$$G = Y_c \alpha l = \frac{n}{2} \lambda_g Y_c \alpha, \quad n=1,2,3,\dots \quad (4)$$

由于等效电路仅在谐振频率附件有效，因此工作频率  $\omega$  和谐振频率  $\omega_r$  相差很小，可近似认为  $\omega + \omega_r \approx 2\omega$ 。这样电纳  $B$  可近似写为

$$B = \omega C - \frac{1}{\omega L} = \frac{C}{\omega} (\omega + \omega_r)(\omega - \omega_r) \approx 2C(\omega - \omega_r) \quad (5)$$

将上式对  $\omega$  求导，得到

$$C = \frac{1}{2} \frac{dB}{d\omega} \Big|_{\omega \approx \omega_r} \quad (6)$$

对于终端开路微带线，应有(忽略损耗影响)：

$$Y_{in} = jY_c \operatorname{tg} \beta l \quad (7)$$

因此

$$C = \frac{1}{2} \frac{d(Y_c \operatorname{tg} \beta l)}{d\omega} \Big|_{\omega \approx \omega_r} = Y_c \frac{n\pi}{2\omega_r}, \quad n=1,2,3,\dots \quad (8)$$

因此半波长终端开路微带谐振器的无载品质因数  $Q_0$  可表示为

$$Q_0 = \frac{\omega_r C}{G} = \frac{\pi}{\alpha \lambda_g} \quad (9)$$

可见，无载品质因数  $Q_0$  随传输线衰减的增大而减小。

下面来分析微带环缝谐振器。根据传输线理论，对于终端开路无耗线，有

$$U(l) = 2U_L^+ \cos \beta l \quad (10)$$

其驻波特性如图 2 所示。从图 2 可以看到，当长度为半波长时，传输线的两端电压最大。因此微带环缝谐振器的周长取半波长时，在缝隙两端的电压幅值最大，且相位差为  $\pi$ ，这样在缝隙间就能产生很大的电势差。在谐振状态下，缝隙间的

电场  $E_g$  幅值可表示为

$$|E_g| \approx 2|E_0| \frac{h}{g} \quad (11)$$

式中  $E_0$  为开路端的纵向电场， $h$  为介质基片的厚度， $g$  为缝隙宽度。可见缝隙电场幅值近似与介质基片的厚度成正比，与缝隙宽度成反比。缝隙宽度越小，缝隙电场幅值越大，这样就更容易在缝隙处使气体电离。因此在优化设计时，缝隙宽度是一个重要参量。

当微带环缝谐振器谐振在奇模时，其等效电路近似为两并联微带线<sup>[4]</sup>，如图 3 所示。因此根据传输线理论，有

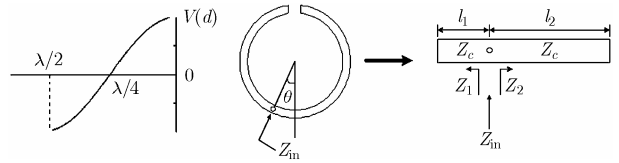


图 2 半波长终端开路沿线电压瞬时变化

图 3 微带环缝谐振器及其奇模等效电路

$$Z_{in} = \frac{Z_c}{\frac{Z_c + Z_{L1} \operatorname{th}(\gamma l_1)}{Z_{L1} + Z_c \operatorname{th}(\gamma l_1)} + \frac{Z_c + Z_{L2} \operatorname{th}(\gamma l_2)}{Z_{L2} + Z_c \operatorname{th}(\gamma l_2)}} \quad (12)$$

式中  $Z_c$  为特性阻抗， $\gamma$  为传播常数， $l_1, l_2$  分别为两微带线的长度， $Z_{L1}, Z_{L2}$  分别为两微带线的终端负载。

无等离子体激励时，两并联微带线终端开路，即  $Z_{L1} \rightarrow \infty, Z_{L2} \rightarrow \infty$ ，此时输入阻抗  $Z_{in}$  可近似为

$$Z_{in} \approx \frac{Z_c}{\alpha \lambda_0} (1 - \cos \theta) = \frac{Z_c Q_0}{\pi} (1 - \cos \theta) \quad (13)$$

式中  $\alpha$  为微带线的衰减常数， $Q_0$  为无载品质因数， $\theta$  为偏转角度， $\lambda_0$  为奇模谐振波长。

根据式(13)，可以分析微带环缝谐振器的阻抗匹配，即无等离子体激励时，使输入阻抗  $Z_{in} = 50\Omega$ 。从式(13)可以看到，输入阻抗  $Z_{in}$  取决于馈电点的偏转角  $\theta$ ，而且随着  $\theta$  的增大而增大。当  $\theta=0$  时，输入阻抗  $Z_{in}=0$ ，此时阻抗不匹配，微波功率不能很好耦合到谐振器，因此一般情况下微带环缝谐振器的馈电点取在  $\theta \neq 0$  的点上。当然为了更好地匹配，还可以在同轴馈线和微带环缝谐振器之间加一段四分之一波长阻抗变换线。在匹配良好的情况下，如果微带线损耗很小，则几乎全部的谐振能量都集中在缝隙内，这样就能更容易激励起微波等离子体。

### 3 数值仿真

采用四分之一波长长阻抗变换线的馈电结构，使用 HFSS 软件对微带环缝谐振器进行数值仿真，得到如下结果。设输入功率为 1W。

#### 3.1 偏转角 $\theta$ 对微带环缝谐振器特性的影响

图 4 为环外半径  $a=4.1\text{mm}$ ，内半径  $b=3.4\text{mm}$ ，缝隙宽度  $g=0.2\text{mm}$  时，微带环缝谐振器的  $S_{11}$  随偏转角  $\theta$  变化的仿

真结果(介质基片的介电常数为 10.2, 厚度为 0.8mm)。可以看到, 当偏转角度变化时, 微带环缝谐振器的谐振频率发生变化, 但这种变化不是很大, 大部分情况下谐振频率仍然在 2.45GHz 附近; 而对于输入阻抗, 影响则很大, 即使  $0.1^\circ$  的变化都会引起  $S_{11}$  较大的变化。仿真发现, 偏转角  $\theta$  变化  $1^\circ \sim 2^\circ$  就可较好实现微带环缝谐振器与微波源之间的阻抗匹配。因此偏转角  $\theta$  是调配的主要参数。比较  $S_{11}$ , 发现最佳偏转角度为  $7.4^\circ$ , 此时谐振频率为 2.44GHz,  $S_{11}$  接近 -13dB。根据  $Q = f_c / \Delta f_{3dB}$ ,  $f_c$  为谐振频率,  $\Delta f_{3dB}$  为 3dB 带宽, 得到仿真的无载品质因数  $Q=482$ , 如图 5 所示。

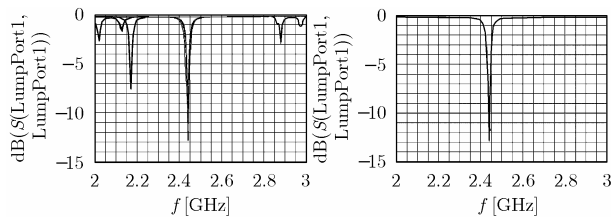
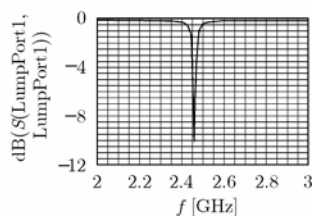


图 4  $\theta$  变化时微带环缝谐振器的  $S_{11}$  仿真

图 5  $\theta=7.4^\circ$  时微带环缝谐振器的  $S_{11}$  仿真 ( $g=0.2\text{mm}$ )

### 3.2 缝隙宽度 $g$ 对微带环缝谐振器特性的影响

下面分析缝隙宽度变化对微带环缝谐振器特性的影响。取环外半径  $a=4\text{mm}$ , 内半径  $b=3.3\text{mm}$ , 介质基片的介电常数  $\epsilon_r=10.2$ , 厚度  $h=0.8\text{mm}$ 。保持上述参数不变, 对不同的缝隙宽度  $g$  进行偏转角优化, 可以得到不同的仿真结果。



(a)  $S_{11}(X_1=2.46\text{GHz}, Y_1=-10.11)$

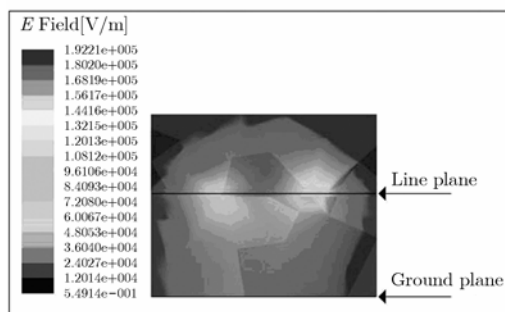
本文对  $g=200\mu\text{m}$ ,  $g=100\mu\text{m}$  和  $g=25\mu\text{m}$  3 种情况进行了仿真, 图 6 为  $g=100\mu\text{m}$  时微带环缝谐振器的仿真特性。

从微带环缝谐振器的场分布图可以发现, 缝隙左右两端的场最强, 近似对称分布, 而且在缝隙附近相对集中, 环上其它区域的场则很小, 说明整个谐振器的能量几乎全部集中在缝隙中, 这样形成的一个强电场缝隙非常有利于等离子体的激励。因此仿真结果与前面分析得到的半波长微带环缝谐振器的电场分布规律相吻合。比较不同缝隙宽度的仿真结果还可以看到, 环尺寸不变, 减小缝隙宽度, 微带环缝谐振器的谐振频率减小, 而缝隙处的场强增大。

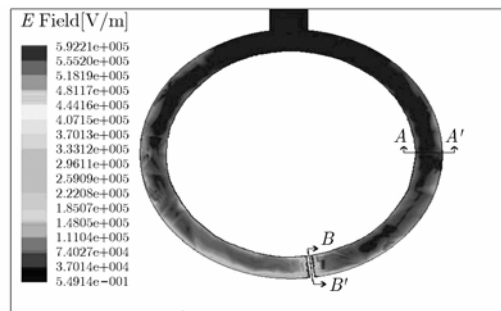
### 3.3 介质基片材料介电常数 $\epsilon_r$ 对微带环缝谐振器特性的影响

介质基片介电常数  $\epsilon_r$  的变化也会影响微带环缝谐振器的特性。分别取  $\epsilon_r=2.2$  (环外半径  $=7.5\text{mm}$ , 内半径  $b=6.5\text{mm}$ , 介质基片厚度  $h=0.8\text{mm}$ , 缝隙宽度  $g=200\mu\text{m}$ ),  $\epsilon_r=10.2$  (环外半径  $a=4\text{mm}$ , 内半径  $b=3.3\text{mm}$ , 介质基片厚度  $h=0.8\text{mm}$ , 缝隙宽度  $g=200\mu\text{m}$ ) 和  $\epsilon_r=81$  (环外半径  $a=1.65\text{mm}$ , 内半径  $b=1.1\text{mm}$ , 介质基片厚度  $h=0.8\text{mm}$ , 缝隙宽度  $g=200\mu\text{m}$ ) 进行仿真, 得到不同的结果。图 7 为  $\epsilon_r=10.2$  时微带环缝谐振器的仿真特性。

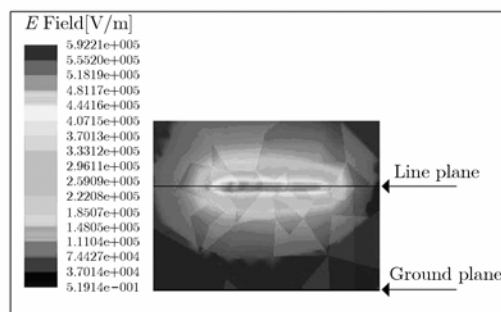
比较仿真结果可以看到, 当谐振频率一定时, 随着介电常数  $\epsilon_r$  的增大, 微带环缝谐振器的环尺寸减小, 缝隙处的场强也减小。因此介质基片的介电常数  $\epsilon_r$  不能太大, 否则缝隙处的场太弱不利于微小功率微波等离子体的激励。本研究取介电常数  $\epsilon_r=10.2$ 。



(c) A-A' 垂直面的场分布



(b) 缝环谐振器水平面的场分布



(d) B-B' 垂直面的场分布

图 6  $g=100\mu\text{m}$  时微带环缝谐振器的仿真特性

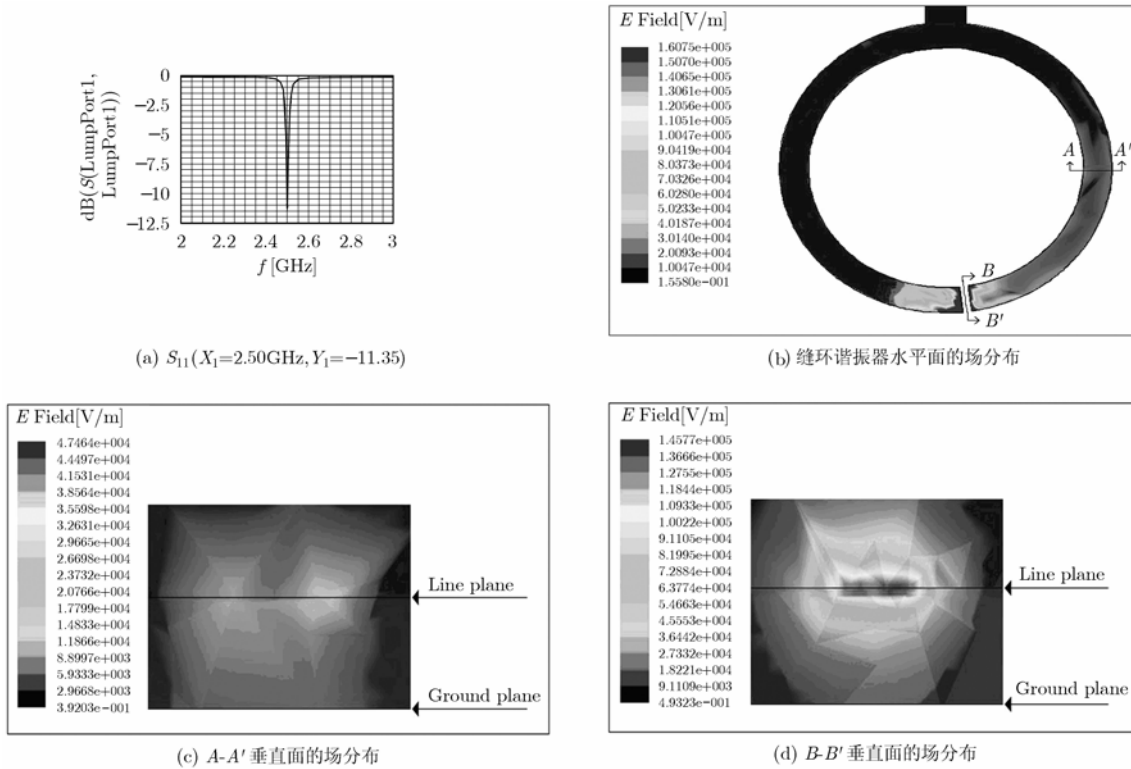


图 7  $\epsilon_r=10.2$  时微带环缝谐振器的仿真特性

### 4 实验结果与分析

根据上面的仿真结果，我们研制了四分之一波长阻抗变换馈电结构的微带环缝谐振器，如图 8 所示(一枚  $\Phi = 19\text{mm}$  的一角硬币作尺寸参考)。环外半径  $a=4.1\text{mm}$ ，内半径  $b=3.4\text{mm}$ ，缝隙宽度  $g=0.2\text{mm}$ ，偏转角  $\theta = 7.4^\circ$ ，介质基片的介电常数为 10.2，厚度为 0.8mm，金属材料选用铜。使用矢量网络分析仪 Agilent N5230A 测量，得到  $S_{11}$ ，如图 9 所示。

从图 9 可以看到，研制的微带环缝谐振器，其谐振频率在 2.42GHz，谐振点处的  $S_{11}$  为 -18.65dB，驻波系数小于 1.3，无载品质因数  $Q = 504$ 。与图 5 比较，发现谐振频率有些减小，但  $Q$  值有所增大，可能是制作工艺误差所致，如制板尺寸及介质基片介电常数的不准确等。实测结果与仿真结果基本吻合，达到设计要求。本文目前研究的是无等离子体激励时的微带环缝谐振器，没有考虑等离子体的影响。对于采用微带环缝谐振器的小功率微波等离子体源，一旦等离子体激励以后，则还必须考虑等离子体的等效阻抗  $Z_p$ ，而  $Z_p$  可以根据反射系数的变化来计算。这种情况将另文介绍。

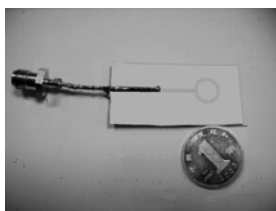


图 8 研制的微带环缝谐振器

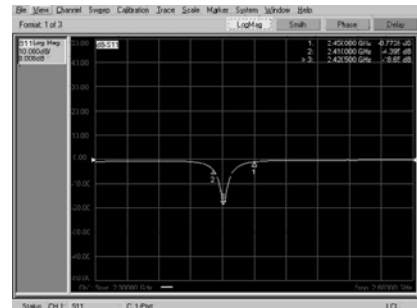


图 9 微带环缝谐振器的实测  $S_{11}$

### 5 结束语

根据半波长终端开路谐振器的特性，通过数值仿真，选择合适的缝隙宽度  $g$  和偏转角度  $\theta$ 、介质基片的介电常数等，可以使基于微带环缝谐振器的小功率微波等离子体源的无载品质因数最大，同时与馈电端良好匹配。研究表明，偏转角度变化时，微带环缝谐振器的谐振频率发生变化，但这种变化不是很大，偏转角  $\theta$  是调配的主要参数；环尺寸不变，减小缝隙宽度，微带环缝谐振器的谐振频率减小，而缝隙处的场强增大；实验结果与仿真结果基本吻合。若进一步减小缝隙宽度，可以使能量集中在更小的范围内，这样更有助于微波等离子体的激励。这为小功率微型微波等离子体源的进一步研究提供了理论基础。

### 参考文献

[1] Bilgic A M, Engel U, Voges E, Kuckelheim M, and Broekaert

- 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 and Hopwood J A. Low-power microwave plasma source based on a microstrip split-ring resonator[J]. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2003, 31(4): 782-787.
- [3] Bilgic A M, Voges E, Engel U, and Broekaert J A C. A low-power 2.45GHz microwave induced helium plasma source at atmospheric pressure based on microstrip technology[J], *J. Anal. Atomic Spectrometry*, 2000, 15(6): 579-580.
- [4] Iza F and Hopwood J. Split-ring resonator microplasma: microwave model, plasma impedance and power efficiency [J]. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2005, 14(2): 397-406.
- 廖 斌: 男, 1967年生, 博士, 副教授, 主要从事小功率微波等离子体源及应用、天线、电波传播预测、电磁兼容等方向研究.
- 张少君: 男, 1980年生, 硕士生, 研究方向为微带天线、电磁场数值计算等.
- 朱守正: 男, 1949年生, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁场与微波技术、天线、计算电磁学、电磁波遥感等方向研究.