

# 射频集成软磁薄膜器件分析

## Analyses of Radio Frequency(RF) Integrated Soft Magnetic Film Devices

高翔, 晓鹰 编译

**摘要**: 文章首先介绍了在行波场存在的情况下, 怎样对射频直到 6GHz 频率范围内的金属软磁薄膜的磁导率进行测量。然后, 在软磁薄膜复数磁导率分布图的基础上, 系统地论述了金属软磁薄膜在射频频段范围内的应用。这种薄膜用在工作频率为 2GHz 的绕有 4 匝尺寸为  $200 \times 400 (\mu\text{m}^2)$  矩形螺旋线圈的铁磁射频集成电感器及在 AC 场中, 灵敏度为  $4.8 \times 10^{-6} \text{Am}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$  ( $6 \times 10^{-12} \text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) 的高频载波型薄膜磁场传感器 (也被称为 GMI 传感器) 时具有最佳性能:  $L=7.9\text{nH}$  和  $Q=12.7$ 。文章对这两种磁器件进行了详细分析。

**关键词**: 薄膜铁磁材料, 复数磁导率, 射频 (RF), 特高频 (UHF), 铁磁共振, 集成磁器件, 高频载波型薄膜磁场传感器

中图分类号: TM454 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2014)11-5-138

### 1 引言

IT 技术的发展为软磁薄膜在射频 (RF) 范围, 尤其是在 800MHz~6GHz 频率范围工作的集成无源元件、抗电磁噪声干扰 (EMI) 器件和传感器等方面的应用提供了广阔的市场。这些应用可以根据磁膜的复数相对磁导率  $\mu_r$  加以分类 ( $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ )。

对于单片微波集成电路 (MMICs) 所使用的集成磁性薄膜电感器、变压器和传输线而言, 高  $\mu_r'$  和  $\mu_r''=0$  的磁性薄膜将是理想的磁膜; 这样, 通过增大磁性薄膜中的磁通链并减小器件的尺寸和降低其损耗, 就能够提高晶片每单位面积的功能度。

集成化抗电磁干扰噪声的元件要求低的  $\mu_r'$  和高的  $\mu_r''$  值。在这类元件中, 磁性薄膜的理想作用不是增大在通带上的插损, 而是在阻带上提供尽可能大的衰减以消除噪声谐波。磁性薄膜的高  $|\mu_r| (= \sqrt{\mu_r'^2 + \mu_r''^2})$  值和对外部磁场感应的灵敏性, 则对磁场传感器特别是高频载波型传感器 (GMI) 更为有利。

本文讨论了在 GHz 频率范围获得高的复数磁导率的一些技术, 以及它们在 RF 集成磁性薄膜电感器和高频载波型薄膜磁场传感器上的应用。

### 2 在 RF 范围内的磁膜磁导率的测量

#### 2.1 测量装置与测量方法简介

对 RF 范围检测磁性薄膜的磁导率是了解材料特性和

开发现代 TI 器件的基础。在此文所论的测量中, 对 UHF 或其以上频率范围, 需要将平面磁膜——基片样品使用的现有磁导仪加以分类, 以便于阐明这项工作的特点。在大多数情况下, 磁导仪是以传输线形式构成的 UHF 磁场发生器。其实际结构可以是平行线、微带线、或是带状线。在本文中, 提出了又一种磁导仪, 它由可以产生均匀行波电磁场的带状线、屏蔽回路型平面耦合线圈, 能向耦合线圈区域感生强劲直流 (DC) 场的亥姆霍兹线圈、一台网络分析仪 (Hp8720D 型) 和一台主计算机构成。该磁导仪的特点是将行波激励和耦合线圈拾取相结合, 以鉴定金属薄膜。这种测量装置与方法曾有文章讨论过, 但对于 GHz 频率范围电场的感生电压的影响如何尚不明了。

图 1 所示为带状线存在的圆锥形部分, 其可以使整个夹具保持阻抗匹配。这种结构可以叫做侧敞式 TEM 单元, 其具有电磁场物理对称性良好, 接地面的外漏磁场低等特点, 这些性能都优于平行线和带状线。由于带状线连通 50  $\Omega$  的匹配电阻, 所以沿磁场传输长度方向的场均匀性更好, 这也是这种测量方法的又一个显著特点。此外, 先前采用的磁导仪在短路端使用带耦合线圈的平板传输线,



图 1 磁导计夹具的外面

如图 2 所示, 三维 (3D) 有限元 (FEM) 电磁场模拟 (Ansoft HFSS, Ver.8.0.25) 揭示, 其对短路端的 FEM 模拟电磁场的均匀性的破坏相当明显, 这是由紧挨着其放置的线圈之导电材料造成的。图 2(a) 描述了在 6GHz 频率时, 原有夹具的磁膜面上之模拟磁场。

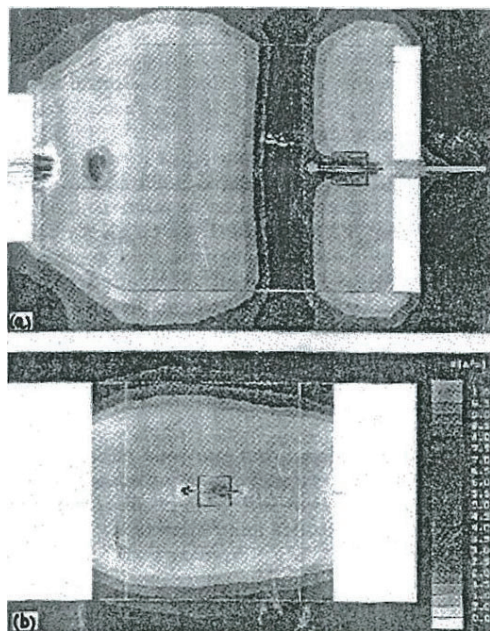


图 2 夹具中的磁场分布状况 (a) “ $\times$ ”型夹具, (b) “ $\square$ ”型夹具

将金属软磁薄膜插入位于带状线下部窗口中央的耦合线圈窗口, 耦合线圈形成平面屏蔽回路结构, 它由底部连接地面、信号线和顶部连接地面层叠而成, 其相互之间置有绝缘层。这种线圈的最显著特点是对感应电压的抑制以及平衡——不平衡模式转换能力较强。

对采用 3D、FEM 模拟耦合线圈部分测量电场分布, 假定沿横截面垂直方向的单轴相对磁导率为 300, 则在其它模拟中磁膜饱和。在采集磁导率期间, 这两种情况分别被称为主测量和参考测量, 两种模拟结构彼此非常相似。

## 2.2 RF 磁导率的测量步骤

RF 磁导率的测量步骤可以概括如下: 从网络分析提供给测量夹具端口 RF 的功率; 从屏蔽回路线圈的感应电压中获取磁导率信号, 这是在网络分析中按  $S_{21}$  参数得到的初步信号; 还要从网络分析中  $S_{22}$  的测量时获得屏蔽回路线圈的阻抗。

在主测量中, 把线圈的感应电压标作  $V_s$ , 线圈阻抗抗为  $Z_s$ 。同样, 在参考测量中则相应地定义为  $V_r$  和  $Z_r$ , 测量

期间, 要利用外部的亥姆霍兹线圈使磁性薄膜元件沿易饱和轴饱和。然后, 复数磁导率  $\mu_r$  由下式 (1) 给出:

$$\mu_r = \frac{K_1 S_c}{t_m d_m} \left\{ \frac{V_s (Z_s + 50)}{V_r (Z_r + 50)} - 1 \right\} \quad (1)$$

式中,  $S_c$  为屏蔽回路线圈的横截面积,  $t_m$  是磁膜的厚度,  $d_m$  为磁膜的宽度,  $K_1$  是校准绝对磁导率强度的实数常量,  $K_1$  与频率无关。

## 2.3 电场感应电压的测量

根据以上 2.1 节中所模拟获得的结果, 假定当金属磁性薄膜样品受行波电磁场作用时, 电场感应电压  $V_e$  在主测量和参考测量中都是相同的。设式 (1) 中的每个感应电压  $V_s$  和  $V_r$  由电场感应电压和磁场感应电压组成, 因此可得出:

$$\mu_r = \frac{K_1 S_c}{t_m d_m} \left\{ \frac{(V_{sm} + V_e)(Z_s + 50)}{(V_{rm} + V_e)(Z_r + 50)} - 1 \right\} \quad (2)$$

式中,  $V_{sm}$  为主测量期间的磁场感应电压,  $V_{rm}$  则为参考测量时的磁场感应电压。公式 (2) 和 (1) 必须相等才能获得精确的磁导率, 但这仅在电场感应电压  $V_e$  可忽略不计时才成立。

$$V_e = 0 \quad (3)$$

用作耦合的屏蔽回路线圈可以自然地产生良好的电场感应电压抑制作用。图 3 对实际尺寸的屏蔽回路线圈感应电压的 3D 模拟效果进行了比较: 将线圈放置在理想的行波 TEM 场中, 它的磁场可以是与线圈平面 (a) 垂直的  $0^\circ$ , 或是与平面 (b) 平行的  $90^\circ$ 。感应电压可以沿线圈电流回路的电场线积分给出。该方法经常在电磁兼容 (EMC) 技术范围内使用, 故对照 (a) 和 (b) 可给出电场感应电压的抑制比。显然, 直至 6GHz 频率模拟的电场抑制比至少可以达

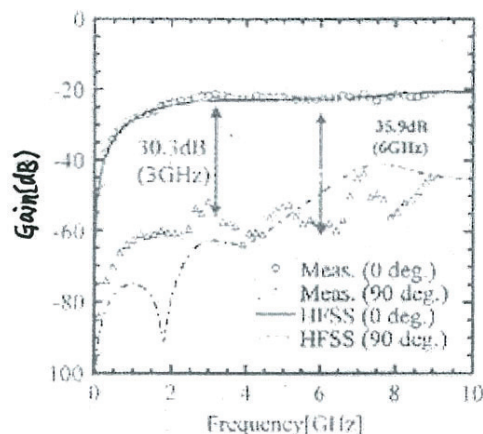


图 3 实际屏蔽回路线圈中电压的 3D 模拟结果比较



到 26.5dB。因此，使用屏蔽回路线圈时，公式 (3) 是可以成立的。

## 2.4 实验测试结果

图 4 所示为从厚度为  $1.82\mu\text{m}$ 、面积为  $4\times 4\text{mm}^2$  的矩形 CoZrO 颗粒膜测得的复数磁导率频谱（其膜的电阻率为  $1800\mu\cdot\text{m}$ ）。直到频率达 6GHz，所测得的频谱与采用 LLG 公式所计算的值是一致的，这说明文章所提出的方法是有效的。

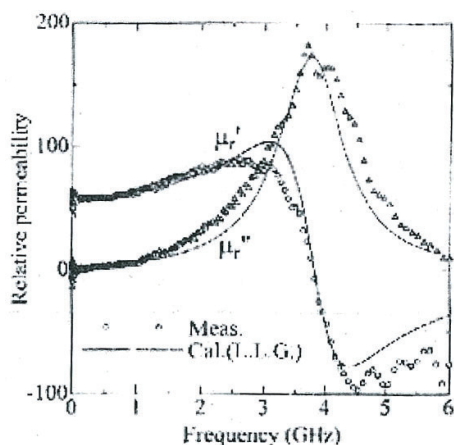


图 4 一种 CoZrO 磁膜所测得的复数磁导率与频率的关系

## 3 射频 (RF) 集成铁磁薄膜电感器及其性能

我们在具有高电阻率 ( $\rho>500\cdot\text{m}$ ) 的硅 (Si) 晶片上，用微制造技术制备了两种 RF 集成磁性薄膜电感器。图 5 所示出的是叠层式螺旋线单端电感器，它具有尺寸为  $400\times 200\mu\text{m}^2$  的 4 匝螺旋形铜导体线圈（横截面积的尺寸为  $8\times 3\mu\text{m}^2$ ）。该线圈用厚度为  $0.1\mu\text{m}$  的  $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$  的非晶软磁薄膜夹住，这种磁膜具有沿易磁化轴方向的狭缝用作增大铁磁共振频率。具有微线阵列磁膜结构的铁磁薄膜电感器在频率达 2GHz 时，都将显示和空心线圈一样高的品质因数。采用铁磁性线阵（宽  $7\mu\text{m}$ ，间距  $4\mu\text{m}$ ）时，在频率为 2GHz 所获得的最佳性能为： $L=7.9\text{nH}$ ， $Q=12.7$ 。其电感值比空心线圈的  $L$  高出 19%，品质因数也高出 23%。

作者还制作和检测了简单结构的顶上型两端螺旋形线圈电感器。在图 6 中，显示出了这种电感器的尺寸为  $377\times 377\mu\text{m}^2$ ，具有 4 匝矩形的螺旋形铜导体线圈，使用  $0.1\mu\text{m}$  厚度的  $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$  非晶态磁膜包覆。在 100MHz~5GHz 频率范围内，对其进行了等效电路分析，搞清楚了其寄生电容、电阻以及主电感及电阻。重要的是，

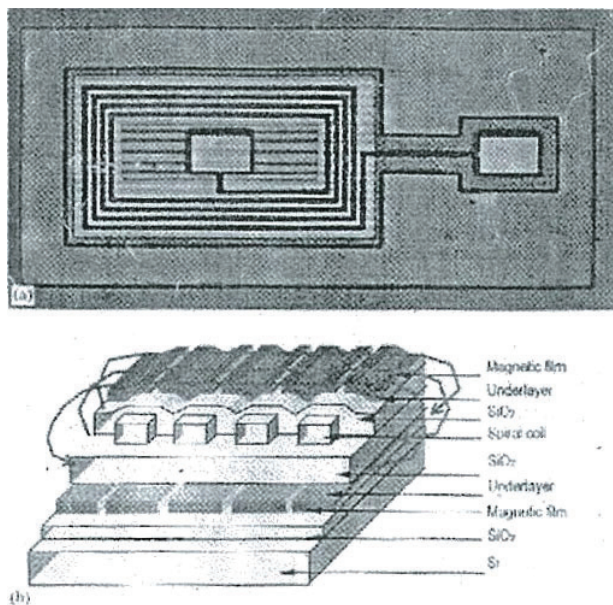


图 5 叠层式铁磁性 RF 集成电感器：(a) 外观图，(b) 磁通分布图

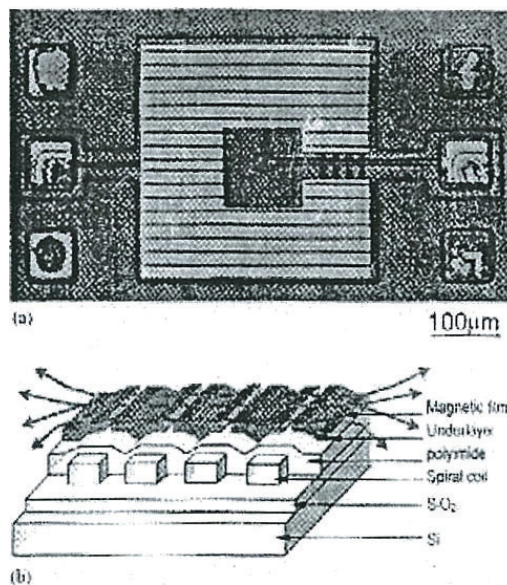


图 6 顶上型铁磁性 RF 集成电感器：(a) 外观照，(b) 磁通分布图

直到 5GHz，包覆的磁膜都将使电感值增大。

## 4 高频载波型磁性薄膜磁场传感器及其性能

### 4.1 高分辨率磁场传感器

高频载波型磁性薄膜磁场传感器（或称 GMI 传感器）对磁场的影响非常敏感。假定 GMI 的磁化过程是受理想的转动磁化过程支配，并且在电子电路中不存在电磁噪声的情况下，由于其受磁矩的热波动控制，使得传感器可以

具有最大灵敏度，它们在室温的范围内是  $10^{-7} \text{A/m}$  ( $10^{-9} \text{oe}$ )。电路的电磁噪声还受热噪声限制，在室温下为了  $-174 \text{dB}$ 。

为了获取这种低电磁噪声电平，采用双层磁膜结构对减少磁膜中的闭合磁畴面积很有帮助，从而可以在整个磁膜中实现转动磁化过程。在探测交流 (AC) 场时，最明显的电路噪声是相噪声，它提高了被检测边带频率下的噪声分层电平。把计数器电路并联到传感器上，这是抑制载波的一项有用技术。当外加磁场为零时，可以抵消传感器输出的载频成分。这项技术可使交流 (AC) 场的分辨率达到  $7.2 \times 10^{-6} \text{A/m}$  ( $9.0 \times 10^{-8} \text{oe}$ )。在本设计中即引入了两项该技术以提高交流 (AC) 场的分辨率。

## 4.2 提高磁场的分辨率

图 7 所示为驱动和探测高频载波型薄膜磁场传感器的电路连接。该电路由 8563EC 型频谱分析仪、8664A 型信号发生器、衰减器、移相器、功率分配器以及传感元件组成。传感元件宽  $50 \mu\text{m}$  长  $5 \text{mm}$ 、厚  $1 \mu\text{m}$ 。为三种材料  $[\text{CoNbZr}(0.5 \mu\text{m})/\text{Nb}(5 \text{nm})/\text{CoNbZr}(0.5 \mu\text{m})]$  组成的叠层结构。传感元件安装在具有 DC 场和  $-90 \text{dB}$  的低频屏蔽因子的磁屏蔽室中。在探测交流 (AC) 场时，频谱分析仪上的 AM 信号的边带与有关的磁场强度相对应，这是要获得如上所述的最高磁场分辨率及高频载波抑制制度最为关键的所在。以上的叙述表明， $46 \text{dB}$  的载波抑制制度至少要求相位噪声降低到热噪声电平以下。

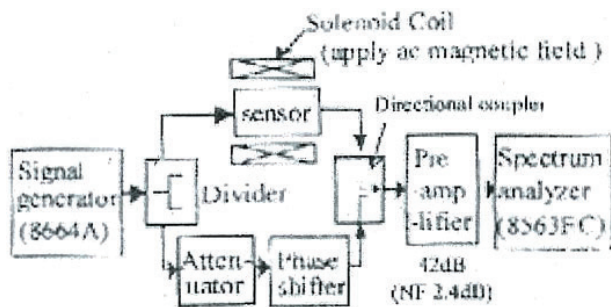


图 7 载波抑制的电路连接

在本节中首先需要讨论搞清楚的是计数器电路中所要求的衰减器和移相器的精确度，以便得到大于 ( $>$ )  $46 \text{dB}$  的载波抑制。详细计算后显示，同时具有分辨率为  $0.1 \text{dB}$  的衰减器和  $0.1^\circ$  的移相器可以提供  $46 \text{dB}$  的载波抑制。在本设计中，都引入了这些器件。

在此接着要讨论的问题是，怎样通过降低计数器电路

和传感器的临界点功率损耗方式来提高频谱分析仪的功率水平？这可以用定向耦合器取代功率分配器来实现，因为定向耦合器的功率衰减仅为  $3 \text{dB}$ ，而功率分配器的衰减为  $6 \text{dB}$ ，因为功率分配器存在内电阻，这表明可以将传感器信号分给计数器电路以及频谱分析仪中。或者从原理上讲，这项技术可以使频谱分析仪中的信号强度增大  $3 \text{dB}$ 。

在实验中，我们将频率设置为  $200 \text{MHz}$ ，直流 (DC) 偏置场为  $390 \text{A/m}$ ；再采用另外的实验，找出  $50 \sim 700 \text{MHz}$  频率范围内的最高灵敏度。在  $501 \text{kHz}$  时，检测到的交流 (AC) 场为  $0.24 \text{A/m}$ 。实验时，用亥姆霍兹线圈外加直流 (DC) 偏置场，用螺线管线圈加交流 (AC) 场。

图 8 示出了在  $200 \text{MHz} + 50 \text{kHz}$  时，没有载波抑制的情况下，相位噪声电平和热噪声电平间存在  $46 \text{dB}$  的差异。该图还示出了当载波受到抑制和不受抑制时载波频率四周的功率频谱。频谱分析仪的带宽为  $3 \text{kHz}$ ，受抑制的载波约为  $60 \text{dB}$ 。

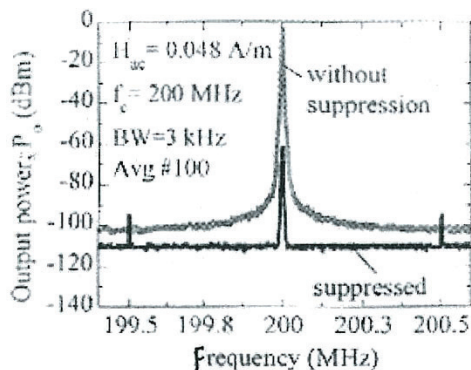


图 8 频谱分析仪上接收到的信号

图 9 所示为传感器输出对外部 AC 场的关系曲线。频谱分析仪的带宽为  $1 \text{GHz}$ ，可探测到非常低的，接近于热噪声电平的传感器输出噪声电平，这说明其具有很高的灵敏度 [约为  $4.8 \times 10^{-6} \text{A/m} \sqrt{\text{Hz}}$  ( $6 \times 10^{-12} \text{T} / \sqrt{\text{Hz}}$ )]。

## 5 小结

文章阐述了在行波电场存在的情况下，测量了直到  $6 \text{GHz}$  时的金属磁性薄膜的磁导率。屏蔽回路线圈和耦合线圈一样地对磁导率的测量产生影响，具有良好的电场感应电压抑制的特点。

用两片铁磁性  $\text{CoNbZr}$  薄膜覆盖住螺旋线圈，可以增大经过线圈电流的磁通链数量。在  $2 \text{GHz}$  频率时，尺寸为

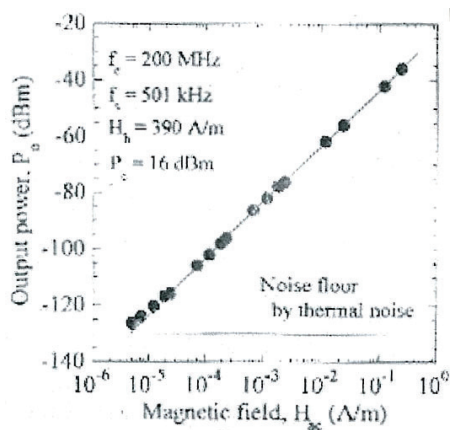


图9 外部交流 (AC) 场与传感器输出功率的关系曲线

$200 \times 400 (\mu\text{m}^2)$  的 4 匝矩形螺旋线圈获得的性能参数为：  
 $L=7.9\text{nH}$ ， $Q=12.7$ 。

测量结果证实了高频载波型薄膜磁场传感器（或被称为 GMI 传感器）的交流 (AC) 场灵敏度为  $4.8 \times 10^{-6} \text{A/m}$  ( $6 \times 10^{-12} \text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ )，这是在室温下高频 GMI 传感器的最高值。这可通过采用载波抑制技术，在室温下将相位噪声分层降低到热噪声 (174dB) 以下来实现。

（参考文献略）

（编译自：Yamaguchi M. et, al. J Magn Mater. 2004 (268) 170~177）