

5G通信RF CMOS的磁性纳米铁氧体材料研究

Ranajit Sai¹, S. A. Shivashankar², Masahiro Yamaguchi³

¹ 新产业孵化中心 (NICHe)

² 纳米科学与工程中心 (CeNSE)

³ 日本东北大学电气工程系

1 5G 的出现

从联网恒温器到自动驾驶车辆，先进的连接正在改变我们的生活的同时，也在节约能源和减少污染，从而使生活更加可持续。这是物联网 (IoT) 的标志。但物联网的全部可能性尚未实现。5G 是作为未来容量 (capabilities) 核心架构的关键基础技术之一，即第 5 代电信系统。与其前身不同，5G 将成为一个新的异构生态系统，包括 4G、Wi-Fi、毫米波和其他无线接入技术的集成，它利用来自 <4GHz 至 100GHz 各种频段的带宽。不同的使用场景需要在不同频段获得不同的容量。根据国际电信联盟 (ITU)，三种主要使用场景预计将扩展和支持国际移动通信 (IMT) 2020 及更高版本的各种应用，即：1) 增强的移动宽带；2) 大规模的机器式通信；3) 超可靠和低延迟通信 (如图 1 所示)，以及与之相关的关键性能指标 (KPI)。频谱的调节 (taming) 对于实现真正的 5G 联网世界愿景至关重要。

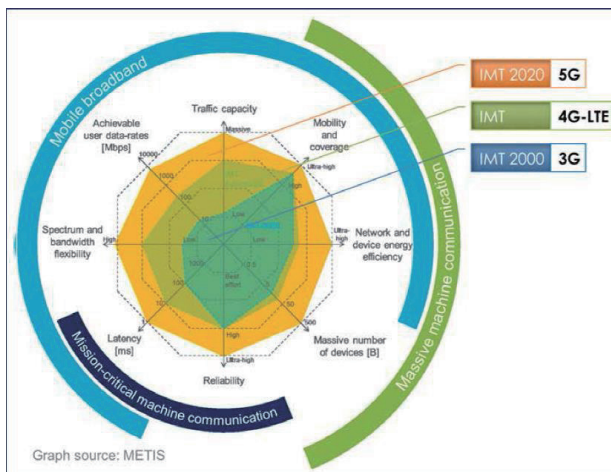


图 1 即将面临的 5G 技术的关键性能指标

2 RF CMOS : 要求和主要挑战

本文的重点主要是两个提议频段，它们分别以 6GHz 和 28GHz 为中心，分别用于连接车辆和室内热点应用。各种应用的苛刻 KPI 都在要求创新射频集成电路 (RFIC) 设计。例如，对于城市电网和高速公路中的联网车辆，高机动性 (>300km/h)、高可靠性和低延迟 ($\leq 1\text{ms}$) 是必不可少的。通过使混合信号芯片中的电路元件彼此更接近，可以实现更低的延迟。

然而，电磁 (EM) 噪声干扰源 (即数字组件) 与受害者 (即模拟组件) 在如此高的频率下的物理接近可能导致严重的电磁干扰，这反过来可能降低设备和系统的可靠性。在设计使用与 5G 相关的所有频段的 RF CMOS 电路布局时，这是一个严重的问题。因此，为了在保持高可靠性的同时，继续射频集成电路的小型化，要么采用新颖的电路设计方法，要么必须使用片上 EM 噪声抑制器。

除了电磁兼容性问题之外，要在一个芯片上 (通常称为片上系统, SoC) 集成模拟、数字和 RF 电路，很大的障碍在于关键的无源元件——电感器。电感器广泛用于 RF 集成电路。它们是低噪声放大器 (LNA)、功率放大器 (PA)、振荡器、滤波器等的基本组件。但是，它们通常是电路中最大的元件，占芯片面积的 50% 以上。除了占位面积大之外，它们的大尺寸还会导致高频下的大寄生电容，这反过来会降低品质因数并降低自谐振频率。现在我们必须获得在上述频带中具有高电感密度和高品质因数的电感器。

通过优化线圈设计，控制衬底损耗，使用图案化接地屏蔽等，已经进行了各种尝试来提高硅上集成电感器的品质因数，并取得了显著的成功。但是，据了解，要跟上技术扩展，片上电感可能不适用于 10GHz 以上频带。当频率为 $\geq 10\text{GHz}$ 时，建议使用传输线等分布式无源元件。

但是对于在 30GHz 以下的片上集成来说，这种分布式元件的长度可能是不允许的。

因此，铁磁和高 ϵ 材料的集成对于 10~30GHz 的频率——5G 应用的一些关键频带——变得必不可少。因此，为了继续 RFIC 的小型化并转向 SoC 解决方案，磁性材料的片上集成是必要的，并且可以为 10GHz 以上频段的高性能片上电感器铺平道路，从而可以实现 SoC 和物联网的所有可能性。

自上世纪中叶以来，磁性材料在实现高效高频设备方面发挥了重要作用。多年来不断变化的要求激发了材料科学和加工技术的创新。目前，对磁材的要求是在 Si-CMOS 芯片上获得合适的集成磁性薄膜。因此，为了清楚起见，接下来的讨论将局限于这样的片上集成磁膜及其两个应用——电感器磁心和 EM 噪声抑制器。

适当选择的集成薄膜既可用于解决电磁兼容性问题，又可提高片上无源元件的性能。然而，需要注意的是，使用磁膜抑制电磁干扰的控制原理不同于具有磁心线圈的电感增强背后的原理，即使两者都与磁介质的磁导率有关。

当受到高频磁场（几 kHz 或更高）时，磁性材料的磁导率可以表示为复数量 ($\mu = \mu' - j\mu''$)，考虑到材料的磁偶极子表现出延迟响应，这导致了损失。通常， μ' 表示材料限制磁通量的能力，而 μ'' 表示磁损耗。 μ' 在较低频率处呈现恒定值并且开始下降到零以下，超过截止频率，称为铁磁共振频率 (f_{FMR})，并且对具有所述材料作为磁心线圈的电感具有直接影响。另一方面，噪声抑制器的驱动想法是通过在 RF 频率附近放置具有大 μ'' 的材料来补偿 RF 磁场，其在互连附近是最强的。

图 2 中示出了磁性材料（非晶铁磁 CoZrNb 薄膜，作为示例选择）的复磁导率的频率分散，突出了与电感磁心或 EM 噪声抑制器相同的使用场景。每个磁性薄膜通常表现出类似的特性——低频时的高 μ' 和 f_{FMR} 时的最高 μ'' 。磁性材料被表征为这三个参数—— μ' 、 μ'' 和 f_{FMR} 。

因此，如果噪声频率接近 f_{FMR} ，则给定材料可用作 EM 噪声抑制器，而相同材料可用作频率范围远低于 f_{FMR} 的电感磁心，其中损耗分量可忽略不计。换句话说，对于给定的应用频率，单一材料不能同时用于两个目的。

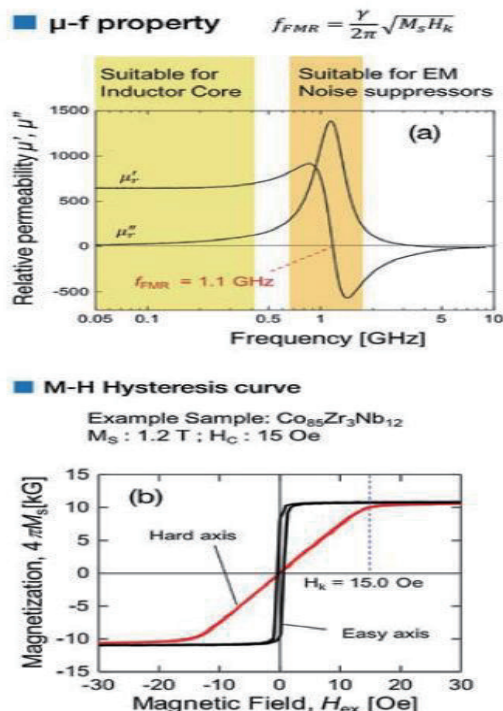


图 2 (a) 复磁导率的频散示意图，突出了电感和噪声抑制器应用的适当频率范围。选择非晶 CoZrNb 薄膜作为例子；(b) 同一薄膜的磁滞曲线。

3 为何选择铁氧体？

基于铁磁金属合金的材料非常受欢迎，并且广泛用作 EM 噪声抑制器和电感磁心，特别是在 2GHz 以下的频带中。

然而，由于它们的低电阻率，在 GHz 范围内涡流损耗非常高。此外，在大多数铁磁谐振频率低于 5GHz 的情况下，它们既不能用作电感磁心，也不能用作 5GHz 和 ~30GHz 之间的频带中的 EM 噪声抑制器。铁磁共振频率取决于材料中存在的磁各向异性，并且可以如下表示，假设球形颗粒：

$$f_{FMR} = \frac{\gamma}{2\pi} H_a$$

其中 γ 是旋磁常数， H_a 是有效磁各向异性场，它是磁晶各向异性、形状各向异性、应力各向异性的总和。金属合金基铁磁薄膜本质上是非晶的，不具有磁晶各向异性，

因此具有非常低的各向异性和 FMR 频率。因此，现在的重点是磁性氧化物，如尖晶石铁氧体、六角铁氧体和石榴石，作为铁磁金属合金的替代品，以便在上述特定频带（5G 领域）中取得成功。

铁氧体材料是独特的，因为它们属于绝缘氧化物系列，具有中等磁导率、非常高的磁各向异性、中至高介电常数和低至几十 GHz 的低损耗。尖晶石铁氧体（结构式： AB_2O_4 ，如 $NiFe_2O_4$ 、 Fe_3O_4 、 $Mn_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ 等）和石榴石（结构式： $A_3B_5O_{12}$ ，如 $Y_3Fe_5O_{12}$ 、 $Y_3GaxFe_{5-x}O_{12}$ 等）具有立方晶体结构，具有紧密堆积的氧晶格，而六角铁氧体可以存在几种六方密堆积结构变化，如 M、Y、W、X、Z、U，其中金属和氧的化学计量不同。

金属替代的无数组合的可能性在它们中允许根据要求微调其属性。然而，真正的技术挑战是在 Si-CMOS 芯片上沉积这种复合氧化物的薄膜。与非晶态金属合金薄膜不同，铁氧体和石榴石应结晶良好，以显示其磁特性。通常需要高温退火以获得所需的结晶质量。

4 铁氧体薄膜的 CMOS 集成：问题与解决方案

鉴于磁性薄膜通常集成在 CMOS 制造步骤的后端，因此使用 400°C 以上的加工温度是站不住脚的，因为它使得整个器件制造工艺与 CMOS 不兼容。另一方面，低温工艺经常导致不充分结晶的铁氧体薄膜，从而导致较差的磁性和弱的粘附性，因此限制了它们的实际用途。在聚合物基质中印刷 / 粘附预处理铁氧体粉末的复合层，当然可以与低温 CMOS 兼容的工艺。但是，由于聚合物材料的存在，复合层的有效磁导率变得难以维持。因此，重点应放在连续、致密的铁氧体薄膜上，以获得最佳效果。简而言之，挑战在于需要在低于 400°C 的硅芯片上获得良好粘附的铁氧体薄膜，其 FMR 频率在 -30GHz 范围内。

在铁氧体中，六角铁氧体具有高磁晶各向异性，因此在几 GHz 到几十 GHz 的频率范围内表现出 FMR，使得它们非常适合于所需频带的应用。然而，六角铁氧体的形成需要在 1000°C 以上退火，这样它们才能用于片上集成。低温六角铁氧体沉积方法的开发可以为适当的应用选择合适的磁性材料提供宝贵的自由度。

尽管具有比六角铁氧体略低的磁晶各向异性，尖晶石铁氧体可以通过各种软化学沉积途径在与 CMOS 加工相容的温度下沉积，例如旋涂、微乳液技术、声化学方法和

微波溶剂热技术等，此外还有物理途径，如脉冲激光沉积 (PLD) 和交替目标激光烧蚀沉积 (ATLAD)。

在低温尖晶石铁氧体沉积工艺中，旋转喷涂技术在低于 100°C 的温度下可提供结晶良好的铁氧体层。然而，铁氧体的形成需要连续喷涂反应和氧化溶液，这两者都可能腐蚀裸露的片上电路元件的铜布线，如电感器或传输线。

此外，建议基板预处理达到所需的粘附性。另一方面，尽管能够在低温下沉积外延质膜，但脉冲激光沉积 (PLD) 和交替目标激光烧蚀沉积 (ATLAD) 等方法仍然存在。由于沉积速率低、基板尺寸小，因此仅限于有价值的研究工具。

由于它们的对称立方晶体结构，尖晶石铁氧体具有适度的磁晶各向异性，这可在低于 10GHz 频率下产生铁磁共振。因此，将尖晶石铁氧体的 f_{FMR} 推向 30GHz 已成为一个额外的挑战。

5 调整 FMR：低温非均衡方法

铁氧体中磁性的起源是相邻金属离子的自旋之间的交换能量，它们以其最低能量配置彼此反平行排列。由于铁氧体中两种金属离子之间的距离太大而不能支持直接交换，与大多数磁性金属不同，铁氧体中的交换相互作用是由位于两个阳离子之间的晶格氧介导的——称为超级交换。这种超级交换的强度取决于三个因素——距离、方向和超级交换相互作用角度。

因此，很容易推测，用不同尺寸和电负性的外来阳离子取代晶格阳离子会改变晶体的对称性，从而改变铁氧体的磁特性。

通过诱导氧空位也可以打破晶体对称性。研究表明，分别由 PLD 和 ATLAD 沉积的 Mn 和 Cu 铁氧体薄膜系统中氧分压介导的阳离子远离平衡分布，使磁各向异性从 -20Oe 增加到 >1000Oe，从而将尖晶石铁氧体的适用性扩展到比通常与它们相关的频率更高的频率。

现在的问题是：我们能否通过软化学方法诱导阳离子的远离平衡分布和 / 或破坏晶体对称性？快速合成纳米晶铁氧体可能是答案。

在这种背景下，微波辅助沉积技术 (MADT) 已成为在硅芯片上沉积纳米晶尖晶石铁氧体薄膜的最佳选择，因为它是快速、低于 200°C 和“远离平衡”的基于溶液的薄膜沉积方法，其中前体在微波辐射的影响下分解并反应形成所需的组合物。图 3 为锌铁氧体薄膜沉积工艺步骤的示

例以及微波反应器的描述。

应注意，氧化物纳米晶体的形成及其特性在很大程度上取决于反应机理，其由微波介电加热控制。因此，前体材料和溶剂体系的选择对于获得期望的结果是非常重要的。有一些优秀的综述文章深度讨论了微波辅助合成氧化物纳米粒子。

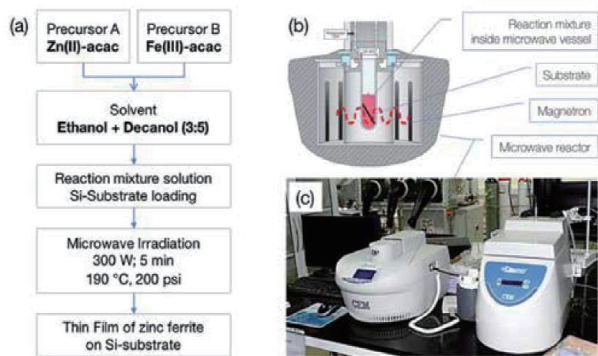


图 3 (a) 通过微波辅助沉积技术 (MADT) 进行锌铁氧体薄膜沉积的处理步骤；(b) 用于 MADT 的微波反应器的示意性横截面图；(c) 台式沉积系统的照片。

此外，通过微波辅助合成制备的锌铁氧体纳米晶显示出异常高的反转程度，约 50% 的晶格锌原子在晶体结构中的平衡位置之外。这种高度的晶体反转可以改变晶体的对称性和旋转结构，因此，可以由此诱导更高的各向异性和增强的 f^{FMR} 。虽然它处于起步阶段，但这种方法可以通过软化学途径调制尖晶石铁氧体的铁磁共振频率。

6 片上铁氧体磁心电感器和噪声抑制器

最近的一篇文章描述了一种通过 MADT 直接在 Si-CMOS 集成电路上沉积的部分倒置的铁氧体薄膜，该薄膜具有优异的软磁特性，即 -130emu/cc 的饱和磁化强度和 -120Oe 的矫顽力。

通过比较 MOSFET 暴露于微波辅助处理之前和之后的 ID-VD 和 ID-VG 特性，也证明了沉积工艺的 CMOS 兼容性。

除了产生牢固粘附、均匀和无孔的薄膜之外，所述沉积技术在任何不规则几何形状的暴露表面上提供保形涂层。在另一篇文章中，对螺旋形二氧化硅基微螺旋浆上的这种保形涂层进行了演示。而且可获得各种厚度，其范围从几百纳米到几十微米。

由 MADT 沉积的部分反转的锌铁氧体复合薄膜的 FMR 频率高于 30GHz ，在 15GHz 以下可 FMR 损耗忽略不计。因此，该薄膜具有完美的特性，可在高达 15GHz 的频率范围内用作电感器磁心，并可作为 30GHz 左右的 EM 噪声抑制器。薄膜厚度为 $1\mu\text{m}$ 时，电感增强了 20%——这使其成为最佳的片上铁氧体磁心电感器，它在 5GHz 时具有最高的电感密度 (750nH/mm^2)。

此外，在 10GHz 时，电感密度提高了 13%，品质因数提高了 25%，这是该频率下密度 (450nH/mm^2) 最高的电感。仅在电感线圈顶部沉积铁氧体薄膜，这些电感的品质因数不能大大增强。

此外，理论上证明，通过只在线圈的一侧沉积磁性薄膜，电感只能增加 100%。为了利用磁性薄膜的最佳效果，完整的磁路，即完全封装线圈是必要的。通过利用 MADT 共形沉积铁氧体薄膜的能力，片上线圈的三面可在一个步骤中被铁氧体薄膜覆盖。得到的线圈结构在图 4 中用示意图和 SEM 图像进行了说明。如图 4e 所示，Q 因子增强了 78%。应注意，该磁路仍未闭合。如果可以在铁氧体层而

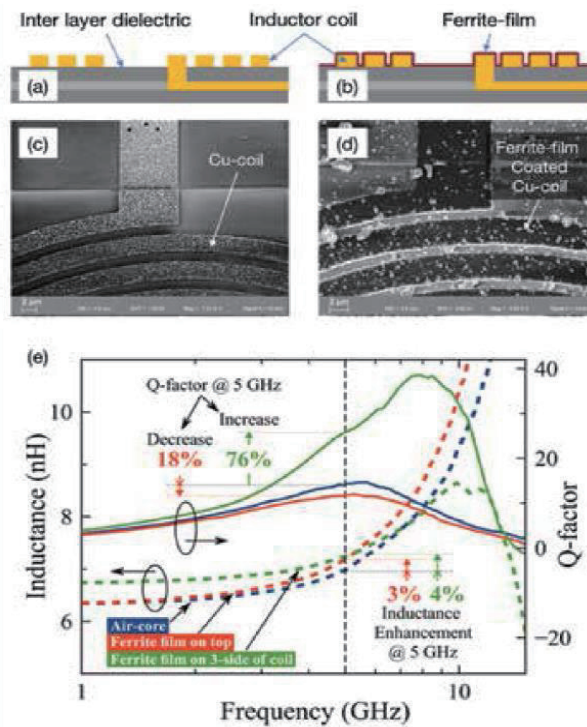


图 4 铁氧体涂层片上电感及其测量：Si-CMOS 片上电感线圈示意图 (a) 线圈 3 面去除钝化，和 (b) 用铁氧体薄 (250nm) 薄膜涂覆保形；(c) 和 (d) 为铁氧体涂层之前和之后的线圈的 SEM 图像；(e) 铁氧体薄膜仅沉积在线圈的顶部 (红色) 和周围的三个侧面 (绿色) 的片上电感的测量电感值和 Q 因子。

不是层间电介质上制造线圈，则可以实现电感和电感密度的非常大的增加。

现在，片上铁氧体磁心电感器严重缺乏。大多数正在研究仍在实验室领域。到 2020 年，将这种电感器推向市场的兴趣正在迅速增长，以满足 5G 系统的需求。

在图 5 中，报告的铁氧体磁心电感器与微波沉积的铁氧体磁心片上电感器进行了比较。微波沉积方法的优越性是显而易见的，因为它在最好的两个方面——IC 技术的高质量线圈制造和铁氧体磁心的积极效果——形成了桥梁。

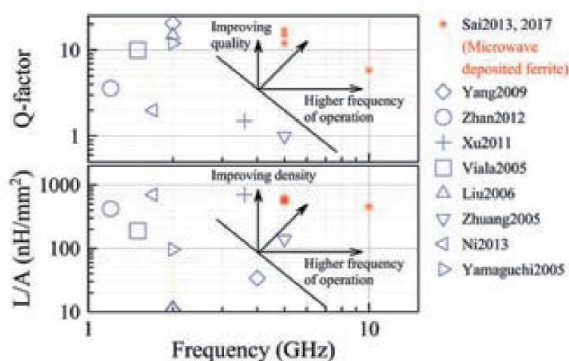


图 5 工作在 GHz 频率的最先进铁氧体磁心电感器，突出了 MADT 沉积的铁氧体复合薄膜的结果。

通过在共面波导上沉积薄膜，然后测量薄膜中的功率损耗比，可以显示铁氧体薄膜的电磁噪声抑制效果。如前所述，已经证明 400nm 厚的薄膜部分倒置锌铁氧体的 FMR 频率约为 30GHz。因此，该薄膜适用于 -30GHz 频段的 EM 噪声抑制。

在图 6 中，示出了部分倒置的锌铁氧体涂覆的片上 CPW 结构的损耗功率与输入功率之比。结果发现，铁氧体薄膜可以消耗高达 20% 的 EM 噪声功率。这远远低于目前该行业的要求。然而，这是片上铁氧体薄膜在 30GHz 时首次也是唯一的 EM 噪声抑制演示。

7 结语和展望

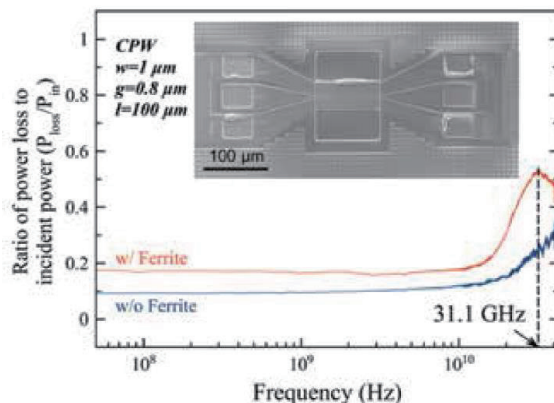


图 6 通过 MADT 沉积的部分反转的锌铁氧体复合薄膜实现 -30GHz 的 EM 噪声抑制演示

迫在眉睫的 5G 系统向更高频率的技术转变带来了无数的挑战，从而也提供了无限的创新机会，以满足高频集成电路的高要求规格。从电路设计到器件制造再到系统封装，创新在各个层面都至关重要。功能材料，尤其是铁氧体等磁性氧化物，对集成器件来说将是最重要的。

开发与 CMOS 兼容的铁氧体薄膜的低温沉积以及将这种沉积方法集成到半导体加工技术中是迫切需要的。作为几 GHz 到几百 GHz 频段内最合适的磁性材料，六角铁氧体及其化学计量衍生物是实现未来几年高频磁性的全部潜力的关键。

因此，需要认真努力以 CMOS 兼容的方式沉积六角铁氧体膜。微波辐射辅助、基于溶液的非平衡尖晶石铁氧体沉积技术为 CMOS 兼容和可扩展的铁氧体薄膜沉积提供了极好的方法。然而，它仍处于起步阶段，需要进行广泛的研究才能获得工业规模的可靠性和对材料特性的控制。

除纳米铁氧体薄膜沉积外，精确测量几十 GHz 的磁特性也极具挑战性。开发具有高灵敏度的磁导率测量系统也是必不可少的。最重要的是，将射频工程师、半导体技术人员、材料科学家、物理学家和化学家的智慧结合在一起，跨学科方法是前进的方向。