

# 高频磁结构与磁极限关系的研究与现状

邓龙江, 周佩珩

(电子科技大学微电子与固体电子学院 成都 610054)

**【摘要】**动态磁谱参数,包括微波磁导率实部和虚部、截止频率等,与材料本征磁参数、结构形貌参数的制约关系,作为高频磁性材料性能的标杆和发展方向的理论指导,一直伴随着高频磁性材料的发展而不断演变,是动态磁化物理理论研究和磁性功能材料设计所关注的核心问题。磁结构决定了极限关系式的形式,而极限关系式为磁结构的设计、应用和发展提供了理论指导。该文综合介绍了近年来国内外高频磁结构和磁极限关系研究的发展情况,着重分析两者相辅相成的关系和研究方法,并归纳了该领域的发展趋势和存在的一些主要问题。

**关键词** 高频磁结构; 磁极限关系式; 磁损耗; 磁共振; 微波磁导率; Snoek关系

中图分类号 O48

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.006

## High Frequency Magnetic Structure and Magnetic Bounds Relation

DENG Long-jiang and ZHOU Pei-heng

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** Bounds relation between the dynamic magnetic parameters (e. g. the real and imaginary part of the microwave permeability, or the cutoff frequency) and the intrinsic magnetic parameters is a key issue for the high frequency magnetic structures. In the past decades, the bounds relation is developed with the fast development of high frequency magnetic structures, as the theoretical support of material design and the guidance of future development. This paper reviews the development and recent progress of both high frequency magnetic structure and bounds relation, focusing on their relationship and study methods. At last, suggestions about future study and existing problems are given.

**Key words** high-frequency magnetic structure; magnetic bounds relation; magnetic loss; magnetic resonance; microwave permeability; Snoek relation

磁性材料的高频(微波)磁导率频谱是学术和应用研究的重大基础问题,其核心问题是建立磁结构的动态磁化物理模型。作为一类重要的功能材料,高频磁性材料要求在较高频率具有宽带高磁导率,可应用于磁记录、高频器件、宽带天线、噪音衰减以及雷达吸波等电子信息的诸多领域。因此研究高频磁谱的特征参数(如磁导率实部和虚部、截止频率等)与磁结构本征参数的限制关系,可以实现由易于测试的本征物理性能对材料高频性能进行预测;简化动态磁化物理模型,以简洁的关系式直观地揭示出动态磁化的物理机制,从而为材料设计和发展提供理论指导。

随着电子信息技术和材料制备技术的飞速进步,高频磁性材料的研究也沿着纳米化、薄膜化、结构化的方向进行,从传统的铁氧体块材到纳米结构材料,发展了具有优异性能的多类型新型材料。

而与之相伴的磁极限关系研究也取得了新的突破,结合新型材料的磁结构特征和特殊物理效应,从著名的Snoek关系衍生发展出更加实用、准确的磁极限关系体系。

综上所述,高频磁材料的发展和磁极限关系的研究相辅相成,具有重要的现实和物理意义。本文将从这两方面出发,介绍国内外研究工作者在该领域的研究进展,总结发展趋势以及存在的问题。

### 1 传统磁性块材和Snoek关系式

在微波频段,磁性材料的频散特性源于铁磁自然共振和畴壁位移。可以统一地描述这两种类型的磁导率频散曲线Lorentzian公式为:

$$\mu_r(f) = 1 + \frac{\mu_s - 1}{1 - i\beta(f/f_r) - (f/f_r)^2} \quad (1)$$

式中  $\mu_s$  是静态磁导率;  $f_r$  为共振频率;  $\beta$  是阻尼系数,

收稿日期: 2008-06-05; 修回日期: 2009-07-26

基金项目: 部级预研基金

作者简介: 邓龙江(1966-),男,长江学者特聘教授,博士生导师,主要从事隐身材料与机理、微波材料与器件方面的研究。

可以转化为Gilbert阻尼因子 $\alpha$ 。对于非Lorentzian形式的频散关系也可以用多个Lorentzian公式拟合为:

$$\mu_r(f) = 1 + \sum_i \frac{4\pi\chi_{s,i}}{1 - i\beta(f/f_{r,i}) - (f/f_{r,i})^2} \quad (2)$$

式中  $i$ 表示第*i*个共振峰。

磁导率频散特性的参数取决于材料的成分、磁结构、晶体结构等本征物理量。最近对微波铁氧体的磁谱研究发现, 高频铁氧体块材的共振峰源于畴壁位移和自然共振共同作用<sup>[1-2]</sup>。通过两类共振模型的表达式可以对两类峰进行分解分析。本文课题组曾对阻尼的影响进行过相关研究, 发现了阻尼系数对两类峰的分布影响和共振峰的展宽作用<sup>[3]</sup>。

根据著名的Snoek公式<sup>[4]</sup>, 对于大多数球状磁性块材, 其频散特征参数——共振频率 $f_r$ 和静态磁导率 $\mu_s$ 的乘积由静态磁参数确定:

$$(\mu_s - 1)f_r = \frac{2}{3}\gamma 4\pi M_s \quad (3)$$

式中  $4\pi M_s$ 是饱和磁化强度; 旋磁比 $\gamma \approx 3 \text{ GHz/kOe}$ 。由此可见同种成分的块材, 共振频率同静态磁导率成反比, 因此材料的微波性能, 特别是应用频率, 受到其本征参数——饱和磁化强度的限制。

Snoek公式广泛用于评估磁性材料的高频性能。因为在频率 $f_r$ 附近, 微波复数磁导率接近 $\mu_s$ 的数值, 高于 $f_r$ , 磁导率快速下降到单位数量1。所以,  $f_r$ 可以视为磁导率的截止频率,  $\mu_s$ 则在数值上等同于低于截止频率范围内的磁导率。通过制备工艺可以调节材料的微结构, 实现对式(3)左端两个参数 $f_r$ 和 $\mu_s$ 的调整, 但是式(3)右端的极限值决定了材料微波磁性能的可调范围和变化规律。如果考虑铁材料, 假设 $f_r = 2 \text{ GHz}$ , 则 $\mu_s = 40$ , 在Snoek公式适用范围内无法再提高。如何突破Snoek极限, 获得优异的微波磁性能, 本文将介绍通过形貌结构来实现这一目标。

但是有一类材料, 它本身的磁结构特征决定了可以突破Snoek极限。这类材料具有较强的面外各向异性, 因而磁矩始终沿面内排布。比如六角铁氧体, 典型的面外各向异性场 $H_\theta = 10 \text{ kOe}$ , 而面内各向异性场 $H_\phi \approx 100 \text{ Oe}$ <sup>[5]</sup>。

对于该类材料的Snoek极限公式, 文献[6]指为 $(\mu_s - 1)f_{\max} = \frac{1}{2}\gamma 4\pi M_s \sqrt{H_\theta/H_\phi}$ ; 而文献[7]则指为 $(\mu_s - 1)f_r^2 = \frac{1}{3}(\gamma 4\pi M_s)^2 \left(1 + \frac{H_\theta + H_\phi}{4\pi M_s}\right)$ 。由此可见, 该类材料突破了Snoek极限。但由于六角铁氧体饱和磁化强度很低, 其微波磁导率仍然低于铁磁性金属。

## 2 新型磁性结构和磁极限关系式

根据铁磁共振原理, 单畴颗粒的磁导率同颗粒形状有关<sup>[8]</sup>, 因此可以通过改变颗粒形状提高高频磁导率, 突破Snoek极限。

### 2.1 形状特征磁性结构

考虑形状因素对单畴颗粒高频磁导率的影响, 文献[9-10]在椭球体模型基础上提出了修改后的极限公式为:

$$(\mu_s - 1)f_r^2 = (\gamma 4\pi M_s)^2 (1 - 3N_k + 2H_k/4\pi M_s) \quad (4)$$

式中  $N_k$ 是颗粒沿易磁化轴方向的退磁因子;  $H_k$ 是各向异性场。通过式(4)可以证明, 具有强各向异性且易磁化方向退磁因子较小的颗粒能够获得更加优异的高频磁导率。

由该理论出发, 继传统的铁氧体、磁性金属块材、粉末, 随着材料制备技术的发展, 具有特殊形状的磁性结构成为研究的重点。磁性纤维易磁化轴在轴向, 且该方向的退磁因子为零, 是很有潜力的高磁导率磁性结构, 经过多年研究, 现在已经商业化。近年来, 薄片颗粒由于具有同样的形状效应——面内易磁化轴和面内退磁因子为零, 且制备方法简单易行, 受到了广泛的关注。文献[11-14]提出了高磁导率铁磁性金属薄片的应用潜力并对该类材料从制备、性能到机理进行大量研究, 在微波频段获得了高达几十的磁导率, 证实该类材料可以应用于电磁吸收等高频信息领域。通过对成分、微结构的调整, 还可以形成晶相/非晶相、多晶相等复合结构薄片材料, 实现对微波磁导率频率特性的控制。但是铁磁性粉末材料磁导率在截止频率附近急剧变化, 共振点后的磁导率, 特别是实部, 迅速下降为1, 带宽还有待提高。

随着纳米制备技术的发展, 颗粒的极限尺寸进一步减小, 目前已能够制备各种形状的纳米磁性颗粒<sup>[15]</sup>, 还形成了表面包覆的纳米磁性颗粒胶囊<sup>[16]</sup>、碳纳米管包裹磁性颗粒<sup>[17]</sup>等更为复杂的单元结构, 此类纳米磁性材料在微波频段的应用还有待进一步研究。

### 2.2 磁性薄膜

根据式(4), 从提高微波磁导率出发, 采用同粉体完全不同的薄膜制备工艺, 还有一类十分重要的高频磁性结构——磁性薄膜:

$$(\mu_s - 1)f_r^2 = (\gamma 4\pi M_s)^2 \quad (5)$$

同样是第一部分列举的铁材料, 如果做成薄膜, 根据式(5), 静态磁导率值可以由40提高到3 600。但

是当共振频率提高, 两者的差别迅速减小, 所以薄膜材料适于提高微波较低频段磁导率, 这也正是目前微波磁性材料研究的一个难点。由于纳米级的厚度, 磁性薄膜在应用上具有薄、轻的特点, 发展很快, 单层膜、多层膜工艺目前都比较成熟, 如Hitachi公司等已大量采用薄膜工艺制备器件。但由于微波测试的原因, 磁性薄膜微波磁导率的报道并不多见, 随着测试技术的进步<sup>[18]</sup>, 这一领域的研究将逐渐成熟。近来, 文献[19-21]用自旋波模型揭示了磁性纳米薄膜的动态磁化特性以及共振模的弛豫速度; 文献[22]测得在2 GHz磁导率虚部高达200的铁基薄膜; 文献[23-24]对磁性多层膜、磁性薄膜和Metamaterial复合材料等磁性膜结构从测试到性能分析开展了系列工作。本文课题组也曾对铁基磁性薄膜的工艺、高频性能进行过相关研究, 通过制备铁氧体薄膜获得了微波高磁导率<sup>[25-27]</sup>。然而纵观当前获得的均匀薄膜材料, 虽然在低频获得了高磁导率, 但磁导率均在共振频率附近很快下降到接近1的水平, 带宽问题仍然是关键问题。

另外, 现实制备的材料结构往往不均匀, 其微波磁导率谱线表现为一个宽带的损耗峰, 式(1)中的阻尼因子 $\beta$ 数值较大, 引起Lorentzian模型向Debye模式的转变。具体表现是 $\beta$ 远大于1, 分母中的最后一项在 $f < f_r$ 时可以忽略。对于高静态磁导率的磁性薄膜, 在 $\mu_s^{1/2}\alpha \geq 1$ 情况下服从Debye分布, 此时损耗峰位置 $f_a = f_r/\beta$ , 相应的磁极限公式为<sup>[28]</sup>:

$$\mu_s f_a = \gamma 4\pi M_s \frac{\sqrt{1+\alpha^2}}{\alpha} \quad (6)$$

所以相对于频率平方项的限制公式, 高阻尼材料更倾向于Snoek公式。

### 3 高频复合物的磁共振极限关系式

在实际的微波测量和应用中, 高频磁性材料通过与有机物等粘接剂复合形成复合物, 而通过复合机理, 复合物参数与磁性材料参数可以相互计算。因此复合物的磁共振关系极具现实意义。

#### 3.1 广义关系式

根据著名的Kramers-Kronig(KK)关系, 磁导率实部与虚部通过积分公式相互制约。该关系为检测测试数据的真实性提供了有力的帮助, 如文献[29]对KK关系的运用。当测试频段以外的磁导率不可被忽略时, KK关系可用于对其他成分的约束<sup>[30]</sup>。

对于具有Lorentzian频散特性的均匀块材, 微波磁导率受式(4)的限制。根据KK关系, 文献[31]基于

式(4)提出了广义积分关系, 该关系式常被称为Acher极限:

$$\frac{2}{\pi} \int_0^\infty \mu''(f) f df \leq k p (\gamma 4\pi M_s)^2 \quad (7)$$

式中  $k$ 是随机因子;  $p$ 是复合物磁性材料的体积分数。同前面提出的公式一样, 以上公式对预测复合物的微波磁性能有重要意义。很多情况下, 式(7)取等式, 从而可将磁性复合物的微波磁导率虚部、工作频率和静态磁性能联系起来<sup>[32]</sup>, 适于对微波磁导率频率特性以及测试的精度分析<sup>[33]</sup>。

该公式的推导同KK关系相似, 将复数磁导率视为复数频率的解析函数。根据柯西定理, 对于解析函数 $F$ 有:

$$\int_{-\infty}^\infty F(f) df = \frac{\pi i}{2} \lim_{f \rightarrow \infty} f F(f) \quad (8)$$

考虑磁性单质多Lorentzian共振峰的情况和磁导率表达式, 由上式可推导出多共振峰复合物的磁导率关系<sup>[34]</sup>:

$$\frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^\infty \mu''(f) f df = \sum_i 4\pi \chi_{s,i} f_{r,i}^2 \quad (9)$$

式中  $\chi_s$ 和 $f_r$ 分别为第 $i$ 共振峰的磁化率强度和共振频率。文献[32-33]采用该方法来验证Acher公式对磁性薄膜的适用性。此外, 微波磁损耗对材料的设计和应用十分重要, 式(9)可以直观地预测磁性材料的磁损耗情况, 极具现实意义。对于多层薄膜, 复合物的积分式同组分的积分式保持线性关系:

$$\int_0^f \mu_{\text{eff}}''(f) f df = \sum_i p_i \int_0^f \mu_i''(f) f df \quad (10)$$

因此极限公式还可以对多层结构等复杂磁结构的平均磁化取向进行研究。

#### 3.2 纳米效应

从材料的角度出发, 对于纳米结构材料, 材料的结构特征尺寸达到纳米量级, 由于小尺寸效应的影响, 块材中被忽略的交换作用成为可以同静磁能相当的主要能量场之一。材料的自旋模式由一致进动转变为非一致进动。因此磁共振极限关系式还需要考虑交换作用引起的共振模式。

文献[35-36]等对具有交换作用和表面各向异性的纳米颗粒的铁磁共振模型进行了理论研究和计算。本文课题组采用相似的思路, 将交换共振模型引入极限关系式, 得到同时考虑由静磁能引起的一致共振和交换能带来的非一致共振的极限关系<sup>[37]</sup>:

$$\frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^\infty \mu''(f) f df \leq p \frac{\pi}{2} \gamma^2 \left[ (4\pi M_s)^2 + \frac{C \chi_1}{R^2} \right] \quad (11)$$

式中  $C$ 和 $\chi_1$ 分别为交换常数和微波场方向的磁化

系数;  $R$ 是特征结构尺寸。 $\frac{C\chi_1}{R^2}$ 表征交换共振能量。

根据交换共振模型, 交换共振能量同特征结构尺寸的平方成反比, 对于铁基材料而言, 当特征尺寸达到几十纳米数量级时, 交换共振项会成为铁磁共振的主导因素, 在高于一致共振频率的频率点产生交换共振, 从而获得多个微波共振峰, 突破式(7)的极限。

研究表明, 纳米颗粒、纳米晶结构和纳米管等多种磁性纳米结构均具有交换共振峰, 在微波频段的多共振峰现象利于宽带高频磁性吸波材料的设计和应用。

### 3.3 涡流效应

在微波频段, 导体内部由于快速变化的磁场产生涡流效应, 对磁性金属材料的磁谱影响很大。涡流效应会使自然共振频率向低频端移动, 严重时涡流损耗峰能够完全掩盖铁磁共振现象<sup>[38]</sup>。

涡流效应对磁导率的影响可以考虑为对磁导率的再归一化。对于Lorentzian频散特性, 涡流效应引起共振频率的分裂, 对于式(1),  $f_r$ 不变, 阻尼系数转变为离散分布的数据序列<sup>[39]</sup>:

$$\beta_j = \beta_0 + 8f_0 \frac{4\pi\chi_{s,j}d^2\sigma}{(2j-1)^2c^2} \quad (12)$$

式中  $c$ 为光速;  $\sigma$ 和 $d$ 是材料的电导率和厚度;  $j=1,2, \dots$ 。因此材料磁谱由于多个共振峰的叠加往往表现成为一个宽频的涡流损耗峰。文献[31]讨论了涡流效应, 得到:

$$\frac{2}{\pi} \int_0^f \mu''(f) f df \approx k(\gamma 4\pi M_s)^2 (1-t-s \pm e) \quad (13)$$

式中  $t$ 和 $s$ 为修正参数;  $s$ 同涡流效应有关;  $e$ 为测试引入误差。不同的颗粒形貌和磁结构, 对应着修正参数的变化。该文献还通过实验验证了式(13)在非晶薄膜微波磁导率测试和特性研究中的应用, 进一步完善了式(13)。

## 4 发展趋势和相关问题

如前所述, 传统高频磁结构已经向薄膜、纳米结构转变。近年来, 自组装生长、光刻技术和薄膜工艺推动了纳米材料的新一轮发展<sup>[40]</sup>, 已经具备制备复杂的纳米磁结构对材料磁性能进行“编辑”的能力, 从而获得前所未有的特性; 而器件小型化、通信高频化决定了材料纳米结构化的必然发展趋势。制备各种形状、构造(中空、多层)的纳米颗粒、纳米线和纳米棒等已经实现, 通过在基板上生长单

个纳米颗粒、线、柱, 推动了纳米结构动态磁化的直接测试和理论研究<sup>[40-42]</sup>。而考虑交换耦合作用和制备需要, 一二维, 甚至三维的周期纳米结构和多层膜结构具有巨大的应用潜力。文献[43-45]揭示了纳米结构自旋磁化边缘模的存在, 通过边缘模和中心模的共同作用, 纳米周期椭圆点具有较同类薄膜更宽的微波传输带宽。还对具有周期纳米带状结构的NiFe薄膜的边缘模也开始进行研究。总体说来, 由于制备、测试技术的进步, 推动了低维纳米材料的动态磁化机制的研究, 带来了新的机遇和挑战。

当然, 目前在该领域同样存在一些重要的问题和难点有待突破。

(1) 复合物测试所得有效电磁参数同磁性成分电磁参数之间的非线性关系研究, 如本文所提到的复合物有效电磁参数均假设与磁性成分的体积含量和电磁参数成线性关系, 然而实际情况是不同成分间的相互作用, 前后两者的关系将相当复杂, 难以用简单的关系式描述。

(2) 目前建立的磁结构关系式, 有其特定的结构和内部磁场分布关系, 如薄膜极限公式式(5)要求外加磁场在面内方向; 交换共振极限公式式(11)中 $R$ 为特征结构尺寸, 对于纳米颗粒是颗粒尺寸, 对于纳米晶材料是晶粒尺寸。虽然式(11)和式(13)正逐步综合考虑重要的磁效应, 但是由于各类特征结构的磁效应不同, 还未能构建出对多种材料普适的极限关系。

(3) 复杂磁结构的结构参数、周期性等重要因素对材料整体的影响还不明确, 因此设计周期磁结构还欠缺理论指导。将结构特征参数引入极限关系式, 通过考虑单元磁结构间或者层间的相互耦合作用, 实现对结构设计的预估, 对新型高频磁结构的发展具有理论指导意义。

## 5 结束语

高频磁结构作为一类重要的磁性材料, 在过去几十年沿着纳米化、薄膜化、结构化的方向发展, 形成了新一代高频磁材料。而与之相辅相成的磁极限关系研究也取得了新的突破, 结合新的磁结构特征和特殊物理效应, 形成了更加实用准确的关系体系以指引材料的发展方向。近来, 随着制备工艺和信息技术的发展, 周期/多层耦合磁结构成为未来高频磁结构的主要研究方向之一, 对与之相关的重大基础问题进行研究具有理论和工程意义。

## 参 考 文 献

- [1] WOHLFARTH E P. Ferromagnetic materials[M]. Amsterdam: North-Holland, 1980, 12: 243.
- [2] TSUTAOKA T. Frequency dispersion of complex permeability in Mn-Zn and Ni-Zn spinel ferrites and their composite materials[J]. Journal Appl Phys, 2003, 93: 2789-2796.
- [3] HAN M G, LIANG D F, Deng L J, et al. Analyses on the dispersion spectra of permeability and permittivity for NiZn spinel ferrites doped with SiO<sub>2</sub>[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90: 192507.
- [4] SNOEK J L. Dispersion and absorption in magnetic ferrites at frequencies above one Mc/s[J]. Physica (Amsterdam), 1948, 204(14): 207-217.
- [5] ROZANOV K N, LI Z W, CHEN L F, et al. Microwave permeability of CoZ composites[J]. Journal Appl Phys, 2005, 97: 013905.
- [6] VERWEEL J. Magnetic properties of materials[M]. New York: McGraw.Hill, 1971, 101.
- [7] ADENOT A L, ACHER O, TAFFARY T, et al. Sum rules on the dynamic permeability of hexagonal ferrites[J]. Journal Appl Phys, 2002, 91: 7601.
- [8] 宛德福, 马兴隆. 磁性物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999, 485-486.  
WAN Fu-de, MA Xing-long, Magnetic Physics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1999, 485-486.
- [9] WALSER R M, WIN W, VALANJU P M. Shape-optimized ferromagnetic particles with maximum theoretical microwave susceptibility[J]. IEEE Trans Magn, 1998, 34: 1390-1392.
- [10] ACHER O, ADENOT A L. Bounds on the dynamic properties of magnetic materials[J]. Phys Rev B, 2000, 62: 11324.
- [11] ZHOU P H, DENG L J, XIE J L, et al. Effects of particle morphology and crystal structure on the microwave properties of flake-like nanocrystalline Fe<sub>3</sub>Co<sub>2</sub> particle[J]. Journal Alloy Comp, 2008, 448: 303-307.
- [12] ZHOU P H, XIE J L, LIU Y Q, et al. Composition dependence of microstructure, magnetic and microwave properties in ball-milled FeSiB nanocrystalline flakes[J]. Journal Magn Mater, 2008, 320: 3390-3393.
- [13] LEE K S, YUN Y C, KIM S W, KIM S S. Microwave absorption of  $\lambda/4$  wave absorbers using high permeability magnetic composites in quasimicrowave frequency band[J]. Journal Appl Phys, 2008, 103: 07E504.
- [14] YOSHIDA S, ANDO S, SHIMADA Y, SUZUKI K, et al. Crystal structure and microwave permeability of very thin Fe-Si-Al flakes produced by microforging[J]. Journal Appl Phys, 2003, 93: 6659.
- [15] MESHCHERYAKOV V F, FETISOV Y K, STASHKEVICH A A, et al. Magnetic and microwave properties of nanocomposite films on the basis of Fe-Co-Ni particles of various shapes[J]. Journal Appl Phys, 2008, 104: 063910.
- [16] LIU X G, GENG D Y, ZHANG Z D. Microwave-absorption properties of FeCo microsphere self-assembled by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-coated FeCo nanocapsules[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92: 243110.
- [17] WEN F S, YI H B, QIAO L, et al. Analyses on double resonance behavior in microwave magnetic permeability of multiwalled carbon nanotube composites containing Ni catalyst[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92: 042507.
- [18] STAROSTENKOV S N, ROZANOV K N, OSIPOV A V. A broadband method to measure magnetic spectra of thin films[J]. Journal Appl Phys, 2008, 103: 07E914.
- [19] WOLTERS DORF G, BUESS M, HEINRICH B, et al. Time resolved magnetization dynamics of ultrathin Fe (001) films: spin-pumping and two-magnon scattering[J]. Phys Rev Lett, 2005, 95: 037401.
- [20] WOLTERS DORF G, BUESS M, HEINRICH B, et al. Magnetization dynamics due to pure spin currents in magnetic double layers[J]. Phys Rev Lett, 2008, 99: 246603.
- [21] WU M, KALINIKOS B A, KRIVOSIK P, et al. Fast pulse-excited spin waves in yttrium iron garnet thin films[J]. Journal Appl Phys, 2006, 99: 013901.
- [22] BUZNIKOV N A, ROZANOV K N. The effect of stripe domain structure on dynamic permeability of thin ferromagnetic films with out-of-plane uniaxial anisotropy[J]. Journal Magnetism and Magnetic Materials Mater, 2004, 285: 314.
- [23] ACHER O, BOSCHER C, BRULE B, et al. Microwave permeability of ferromagnetic thin films with stripe domain structure[J]. Journal Appl Phys, 1997, 81: 4057-4059.
- [24] QUESTE S, DUBOURG S, ACHER O, et al. Exchange bias anisotropy on the dynamic permeability of thin NiFe layers[J]. Journal Appl Phys, 2004, 95: 6873-6875.
- [25] HAN M G, LU H P, LIN C C, et al. Comparisons on the properties of (Zn<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>)<sub>2</sub>-W type barium hexaferrite thin films prepared on the Si (100) and (111) substrates[J]. Thin Solid Films, 2007, 515(18): 7294
- [26] 陆海鹏, 邓龙江, 陈良. GHz高磁导率铁磁薄膜研究进展[J]. 功能材料, 2005, 36(6): 813.  
LU Hai-peng, DENG Long-jiang, CHEN Liang. Development of GHz high permeability ferromagnetic thin films[J]. Journal of Functional Materials, 2005, 36(6):813.
- [27] HAN Man-gui, Ou Yu, DENG Long-jiang, et al. Microwave permeability of amorphous FeCoSiB films on flexible substrates[C]//International Magnetics Conference, Spain, Madrid: IEEE Magnetics Society, 2008.
- [28] LAGARKOV A N, ROZANOV K N, SINMONOV N A, et al. Handbook of Advanced Magnetic Materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005, 4: 414.
- [29] MU G H, CHEN N, Pan X F, et al. Microwave absorption properties of hollow microsphere/titania/M-type Ba ferrite nanocomposites[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91: 043110.
- [30] MILTON G W, EYRE D J, MANTESE J V. Finite frequency range kramers-kronig relations: bounds on the dispersion[J]. Phys Rev Lett, 1997, 79: 3062.
- [31] ACHER O, DUBOURG S. Generalization of Snoek's law to ferromagnetic films and composites[J]. Phys Rew B, 2008, 77: 104440.
- [32] IALUBOY I T, LAGAKOV A N, MAKHLAKOV S A, et al.

- Microwave permeability of laminates with thin Fe-based films[J]. *Journal Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, 272-276: 2208.
- [33] IAKUBOY I T, LAGAKOV A N, MAKLAKOV S A, et al. Experimental study of microwave permeability of thin Fe films[J]. *Journal Magn Magn Mater*, 2003, 258-259: 195.
- [34] LAGAKOV A N, ROZANOV K N. High frequency behavior of magnetic composites[J]. *Journal Magnetism and Magnetic Materials*, 2009, 3219(20): 82-2092.
- [35] AHARONI A. Exchange resonance modes in a ferromagnetic sphere[J]. *Journal Appl Phys*, 1991, 64: 7762-7764.
- [36] SHILOV V P, BACRI J C, GAZEAU F, GENDRON F, et al. Ferromagnetic resonance in ferrite nanoparticles with uniaxial surface anisotropy[J]. *Journal Appl Phys*, 1999, 85: 6642.
- [37] ZHOU P H, DENG L J. Bounds on the dynamic magnetic properties of multiresonant nanostructure composites in exchange resonance model[J]. *Journal Appl Phys*, 2009, 105: 07A509.
- [38] van de Riet E, Roozeboom F. Ferromagnetic resonance and eddy currents in high-permeable thin films[J]. *Journal Appl Phys*, 1997, 81: 350.
- [39] LAGARKOV A N, Osipov A V, Rozanov K N, et al. *Electromagnetic materials[C]//Proceedings of the ICMAT Symposium R*. Singapore: Materials Research Society Singapore, 2005: 74.
- [40] OHNO K, TANAKA M, TAKEDA J, et al. *Nano and micromaterials[M]*. Berlin, Heidenberg: Springer, 2008.
- [41] MURPHY C J, SAU T K, GOLE A, et al. Surfactant-directed synthesis and optical properties of one-dimensional plasmonic metallic nanostructures[J]. *MRS Bulletin*, 2005, 30: 349.
- [42] ROSS C A, CASTANO F J, MORECROFT D, et al. Long, mesoscopic thin film magnetic rings[J]. *Journal Appl Phys*, 2006, 99: 08S501 1-6.
- [43] TOPP J, PODBIELSKI J, HEITMANN D, et al. Grundler D. Internal spin-wave confinement in magnetic nanowires due to zig-zag shaped magnetization[J]. *Phys Rev B*, 2008, 78: 024431.
- [44] McMichael R D I, MARANVILLE B B. Edge saturation fields and dynamic edge modes in ideal and nonideal magnetic film edges[J]. *Phys Rev B*, 2006, 74: 024424.
- [45] McMichael R D, ROSS C A, CHUANG V P. Thickness dependence of magnetic film edge properties in  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  stripes[J]. *Journal Appl Phys*, 2008, 103: 07C505.

编辑 熊思亮



邓龙江，教授，电子科技大学微电子学院博士生导师、长江学者特聘教授。现为教育部隐身材料与技术工程研究中心主任、电子薄膜与集成器件国家重点实验室副主任。主要从事隐身材料与机理、微波磁性材料与器件、新型电磁功能复合材料与应用等方面的研究，研究成果已转化并获得广泛应用，获国家科技进步二等奖、国防科技进步一等奖各1项，申请国家发明专利13项。近年来在 *Journal Appl Phys*、*Appl Phys Lett* 等国内外刊物发表论文60余篇。