

トランス結合型透磁率測定装置の広帯域化のための改良

田丸 慎吾

(産総研 新原理コンピューティング研究センター)

Modification of transformer coupled permeameter for wider bandwidth

Shingo Tamaru

(AIST, Research Center for Emerging Computing Technologies)

はじめに

インバータやコンバータなどのパワーエレクトロニクスモジュールは、脱炭素社会実現に向けた中核技術の一つとして、その重要性が益々高まっている。一般にパワエレモジュールは、スイッチング周波数が高いほど小型化できるため有利であるが、現時点ではインダクタコアの損失が周波数の上昇に従い急激に増加し、高周波化の阻害要因となっている。従って、コアに用いられる軟磁性材料の高周波特性の向上、具体的には数 100kHz から数 10MHz の帯域における損失のメカニズム解明及びその低減は喫緊の課題となっている。この帯域をカバーする従来の透磁率測定装置は、トロイダル形状の試料にコイルを巻き、その自己ないしは相互インダクタンスを測ることにより、試料の透磁率を得ていた。しかしながらこの方法は 1)最終的なトロイダル形状にするまで測定できない、2)外部磁場が印可できないといった問題があった。最終形状に固める前の粉末状態の単一磁性粒子の高周波透磁率を、外部磁場を印可しつつ測定できれば、特性を理解する上で極めて有利である。この目的のため、我々は単一磁性粒子を、短絡終端された平面導波路(CPW)で挟み、電磁石に挿入して測定する「トランス結合型透磁率測定装置」(以下 TC-Perm)を開発し、横幅が約 100 μm 程度、厚さが 1 μm 以下のセンダストやパーマロイ単一粒子の透磁率を、10MHz-20GHz という広帯域に渡って高感度で測定できることを示した¹⁾。その後当該装置の帯域をさらに広げるため、以下に示す改良を行った。

装置の概要

従来の TC-Perm では、高周波側は治具内で起こる反射により 22GHz 近傍に現れるノッチによって、低周波側は使用するベクターネットワークアナライザ(VNA)の帯域によって制限されていた。これらの問題を解決するため、治具を図 1、装置構成を図 2 に示すように改良した。治具は裏面 GND と、表面に形成された CPW の GND との間にビアを通すことにより、スロットモードを抑え、メインの伝搬モードだけが励起されるように設計変更した。装置構成については、VNA を 100kHz-44GHz をカバーするモデルに置き換え、また 100MHz より低域では低雑音アンプ(LNA)で信号を増幅する回路を付加した。これらの結果、治具は 40GHz 付近まで反射がなくスムーズな伝送特性を示すようになった。また低周波側も図 3 に示す通り、低周波での雑音が約 1/40 と大幅に減少した。改良後の装置を用いて 300 μm ×600 μm 、厚さ 100nm のパーマロイ標準試料の透磁率を、200mT の磁場下で測定したところ、300kHz-40GHz という広帯域に渡り高感度で測定できることが確認された。本発表ではこれらの改良の詳細及び、得られた TC-Perm の測定性能について解説する。(謝辞) 本研究開発は総務省 SCOPE(受付番号 JP195003002) の受託を受けたものです。

参考文献

- 1) S. Tamaru et. al, J. Magn. Magn. Mater. 501, 166434(2020).

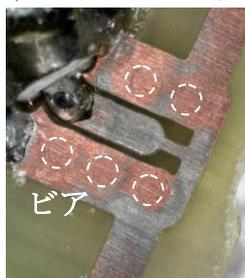


図 1、新設計した TC-Perm 治具写真

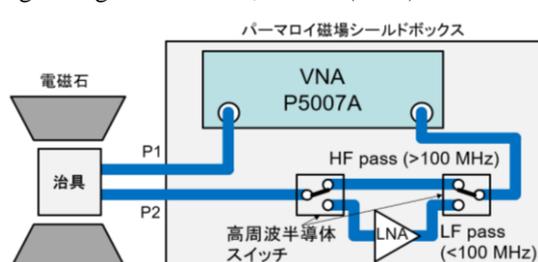


図 2、低周波(<100MHz)において LNA を入れた TC-Perm 装置の回路構成

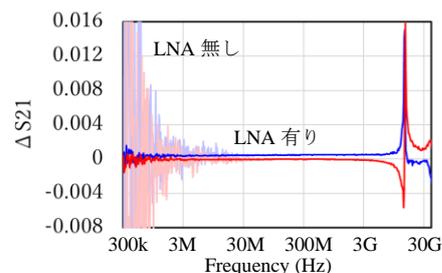


図 3、LNA 有無によるパーマロイ標準試料測定結果の比較

ノイズ抑制シートにおける bimodal 型

複素透磁率スペクトルメカニズム

五十嵐利行、田丸慎吾*、菊池伸明**、吉田栄吉**、岡本聡**

((株)トーキン、*産総研、**東北大)

Physical mechanism of bimodal complex permeability spectrum of a noise-suppression sheet

T. Igarashi, S. Tamaru*, N. Kikuchi**, S. Yoshida**, and S. Okamoto**

(TOKIN Corp., *AIST, **Tohoku Univ.)

はじめに

ノイズ抑制シート(NSS)は電子機器内部での不要電磁波吸収を目的に、1995年に(株)トーキンより BUSTERAID®として上市され、携帯移動端末をはじめとして幅広く利用されている。NSSの構成は、表皮深さ以下に薄くした軟磁性扁平磁粉を有機バインダーと混練し、シート状に加工したものとなっている。その開発当初から bimodal 型の複素透磁率スペクトルを示すことが知られていたが、これまでは定性的な解釈に留まっており、その起源に関する理解は十分ではなかった。本研究では、シート試料とその構成要素である単一扁平磁粉の複素透磁率スペクトルがほぼ同一であることを明らかにし、さらにその挙動が磁気 Vortex 理論で説明できることを示したので、その結果をまとめて報告する。

実験方法

NSSの特性について広く調べることを目的として、一般的に製品に用いているセンダストに加えて $\text{Fe}_{74.8}\text{Al}_{25.2}$ と $\text{Fe}_{50.2}\text{Co}_{47.6}\text{V}_{2.2}$ 、ならびに純 Fe を用いて、シート試料および単一扁平粒子での複素透磁率測定を行った。シート試料はシールドドループコイル法、単一粒子はトランス結合型透磁率測定法(TC-Perm)²⁾を用いた。

結果

Fig. 1 に代表例として Fe を用いた場合のシート試料と単一扁平粒子の複素透磁率スペクトルを示す。これまで広く知られてきたセンダストを用いた NSS と同様に、Fe でも bimodal 型の複素透磁率スペクトルが得られた。さらに、単一粒子でも、ほぼ同様の結果となっていることが確認された。この結果は、NSS の bimodal 型の複素透磁率スペクトルが個々の粒子特性に起因したものであることを明瞭に示している。さらに他の材料系でもほぼ同様の結果であり、bimodal 型の複素透磁率スペクトルは材料に依らない扁平磁粉ならびに NSS のユニバーサルな特徴であることが分かった。その起源について詳細な検討を行った結果、扁平微粒子内に磁気 Vortex の磁化状態が形成されており、低周波ピークは磁気 Vortex コアの共鳴で、高周波ピークは磁気 Vortex の flux closure 状態での共鳴でそれぞれ定量的によく説明できることが分かった。

本研究開発は総務省 SCOPE(受付番号 195003002) の受託を受けたものです。

参考文献

- 1) 五十嵐利行, 東北大学博士論文(2021)
- 2) S. Tamaru et al., J. Magn. Magn. Mater. 501, 166434, (2020).

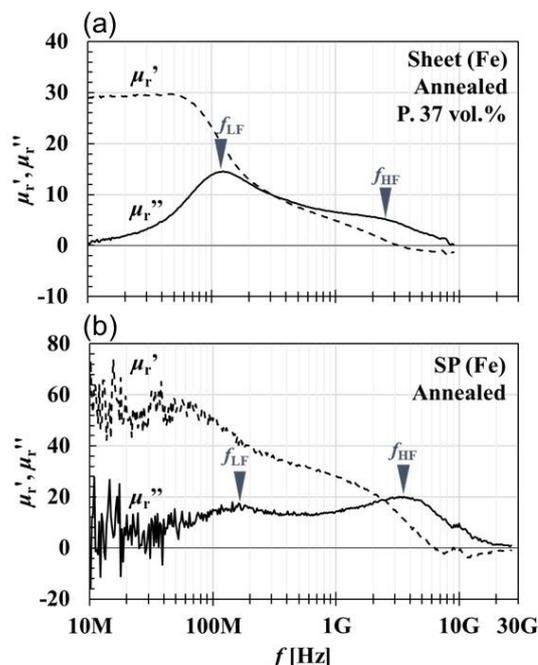


Fig. 1 Complex permeability spectra of (a) sheet sample and (b) single flake of Fe.

Fe 単一扁平粒子の透磁率スペクトルの粒径依存性

大沼智幸、五十嵐利行*、田丸慎吾**、菊池伸明、吉田栄吉、岡本聡
(東北大、*(株)トーキン、**産総研)

Size dependence of complex permeability spectrum of Fe single flakes

T. Onuma, T. Igarashi, S. Tamaru, N. Kikuchi, S. Yoshida, and S. Okamoto
(Tohoku Univ., *TOKIN Corp., **AIST)

はじめに

近年、スマートフォンなどの小型端末において、その内部の高集積化された部品間の電磁干渉が問題視されており、その対策としてノイズ抑制シート(NSS)が広く用いられている。NSSは金属磁性扁平粒子の集合組織であり、bimodal型の透磁率スペクトルを示すことが広く知られている。われわれは単一粒子においてもbimodal型の透磁率スペクトルが得られ、詳細な検討の結果、扁平粒子内に生じる磁気 Vortex の理論で説明できることを示した^{1,2)}。今回、Fe 単一扁平粒子の透磁率の粒径依存性を調べた結果を報告する。

実験方法

Fe 単一粒子の透磁率測定にはトランス結合型透磁率測定法(以下 TC-Perm)³⁾を用いた。この測定法は短絡終端された2つのコプレーナウェーブガイドを重ねて構成した誘導結合トランスに被測定単一磁性粒子を挿入し、ベクトルネットワークアナライザで透過係数 S_{21} を測定することにより、磁性粒子の複素透磁率を測定するものである。試料は、厚み $0.9\mu\text{m}$ 、直径 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ の三種類の純 Fe 扁平粒子を用いた。

実験結果

Fig.1 に TC-Perm により測定した直径 $200\mu\text{m}$ の Fe 扁平粒子の複素透磁率の虚部 μ'' の周波数スペクトルの一例を示す。これまでに知られていた bimodal 型ではなく、三つの共鳴ピークが存在していることが確認できた。Fig.2 に Fe 扁平粒子の各直径に対するそれぞれ三つの共鳴ピーク周波数の変化を示す。最も高い共鳴周波数 High および最も低い共鳴周波数 Low のピークは扁平粒子の直径によらずほぼ一定の値をとり、中間の共鳴周波数 Middle は直径が大きいくほど周波数が低下する傾向が観測された。

ここで High のピークが磁気 Vortex の flux closure 状態での共鳴に起因し、Low のピークが Vortex コアの共鳴に起因すると仮定し、理論値との比較を行った。その結果、High と Low の共鳴周波数は磁気 Vortex 理論で定量的に説明でき、さらに磁気 Vortex 径は Fe 扁平粒子の直径に依存せず、 $80\sim 100\mu\text{m}$ 程度のサイズであることが示唆された。これらのことから、High および Low の共鳴は磁性粒子内に存在するひとつまたは複数の磁気 Vortex に起因するものと判断される。Middle のピークの要因については考察中である。

謝辞

本研究は総務省 SCOPE (受付番号 195003002)の研究助成によるものである。

参考文献

- 1) 五十嵐利行, 東北大学博士論文(2021)
- 2) 五十嵐利行 他, 第45回日本磁気学会学術講演会講演概要(2021)
- 3) S. Tamaru, N. Kikuchi, T. Igarashi, S. Okamoto, H. Kubota and S. Yoshida, J. Magn. Magn. Mater, vol. 501, p. 166434, 2020.

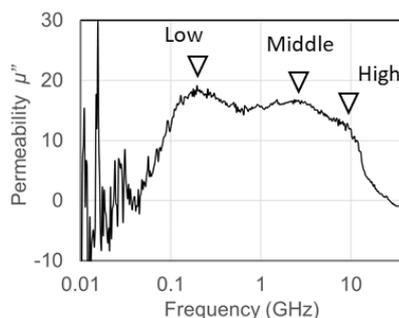


Fig.1 Permeability spectrum of an Fe particle. ($d=200\mu\text{m}$) (imaginary part μ'')

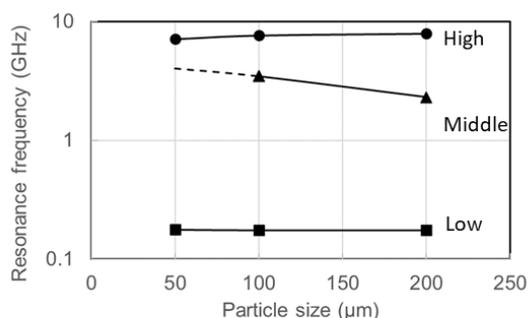


Fig.2 Particle size dependence of Resonance frequency.

伝送線路内の RF 電流集中によるシート状磁性体の共鳴周波数シフト

山口正洋 宮澤安範
(東北大学)

FMR frequency shift of a magnetic sheet caused by RF current crowding in transmission line

M. Yamaguchi, Y. Miyazawa
(Tohoku Univ.)

1. はじめに ノイズ抑制体の伝送減衰率等の測定¹⁾では、磁界源となる信号線の幅が有限のため、反磁界が影響して FMR 周波数が高周波側にシフトすることがある^{2),3)}。これでは説明できない高周波シフトが観測された⁴⁾ため、本研究ではマイクロストリップ線路 (MSL) を電磁界解析し、まず信号線の幅方向の端部へ電流が集中し、信号線の周囲磁界が局在化することを定量的に示した。この信号線の上にノイズ抑制シートや磁性薄膜等を置くと、強い反磁界が生じ、共鳴周波数は更に高周波側にシフトしうることを示す。

2. MSL の電流および磁界解析 Fig. 1 に MSL の電磁界解析モデル (Ansys 社、HFSS Ver 14.0) を示す。導体の材料は Cu、厚さは $18\ \mu\text{m}$ とし、誘電体の比誘電率は $\epsilon_r=2.17$ とした。信号線幅 w_{sig} を $95\sim 4740\ \mu\text{m}$ の範囲で変化させ、特性インピーダンス Z_0 をほぼ $50\ \Omega$ を保つよう誘電体厚を変化させた。代表的解析結果として、Fig. 2 は $f=2\ \text{GHz}$ における信号線断面内の電流分布を示す。Cu の表皮厚 δ は $1.4\ \mu\text{m}$ であり、導体厚より十分薄い。このため、表皮効果と近接効果によって信号線の幅方向の端部へ電流が著しく集中している。このため、周囲磁界も局在化する。Fig. 3 は、信号線が幅広であると磁性体は信号線端部の上空でのみ局所的に励磁される。その幅は信号線より狭いため反磁界が強く、FMR 周波数は高くなる。信号線と磁性体との垂直距離 (Fig. 1 中の h) が広がれば、影響は低減される。これを示唆する実験結果が得られている⁵⁾。高透磁率材料では漏洩磁束に関する特性長⁶⁾が長いので影響は限定的と思われ、検討中である。なお、電流分布が一様るとき、信号線幅が十分広ければ反磁界を無視できるので、傾向は逆となる。

謝辞 ご討論頂いた東北大学 藪上 信教授、岩崎千里氏に感謝します。本研究は、総務省電波資源拡大のための研究開発「不要電波の高分解能計測・解析技術を活用したノイズ抑制技術の研究開発」(JPJ000254) の成果である。

参考文献

- 1) IEC 62333-2:2006, 2006.
- 2) S. Muroga et al., IEEE Trans. Magn., **49**, 7, 4032, 2013.
- 3) S. Muroga et al, J. Electronic Materials, **48**, 3, 1342-1346, 2018.
- 4) M. Yamaguchi et al, EMC Sapporo & APEMC 2019, MonPM2C.6, 2019.
- 5) 高木、他、マイクロストリップ型プローブにおける測定誤差の検討、本学術講演会発表予定, 2021.
- 6) R. E. Jones, IEEE Trans Magn., MAG- 14, 509-511, 1978.

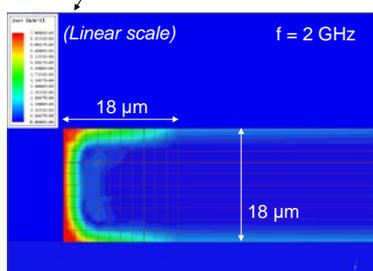
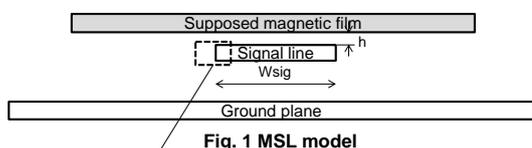


Fig. 2 Simulated current crowding ($w_{\text{sig}}=4,700\ \mu\text{m}$)

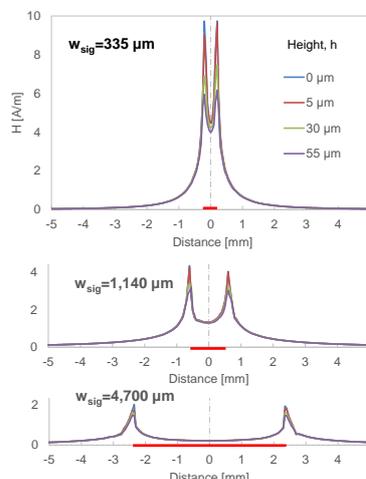


Fig. 3 Simulated magnetic field intensity above signal line

sub-100MHz 向け新規磁性多層 EMI シールド膜

喜々津哲、黒崎義成、白鳥聡志、藤田篤史*、西垣寿*、松中繁樹*
 ((株)東芝、*芝浦メカトロニクス(株))

New EMI Shielding Layer with Magnetic Multilayer for sub-100MHz Frequency Range

A. Kikitsu, Y. Kurosaki, S. Shirotori, A. Fujita, H. Nishigaki, S. Matsunaka
 (Toshiba Corp., *Shibaura Mechatronics Corp.)

はじめに

半導体素子が高密度に実装された機器における電磁波干渉(EMI)対策として、素子のモールド上にシールド膜を直接成膜する direct-on-chip シールドが検討されている¹⁾。著者らは、磁性層/金属層界面での電磁波の多重反射を利用した多層シールド膜の提案²⁾に基づき検討した結果、Cu/NiFeCu/Cu 多層膜において 300-600 MHz の帯域で Cu よりも高いシールド性能が得られ、さらに[Cu(100 nm)/ NiFeCuMo(100 nm)]₁₀の構成の多層膜が、100 kHz~100 MHz の周波数帯域において高いシールド性能を示すことを見出した³⁾。しかしながら、これらの磁性多層膜は大きな凹凸のある樹脂モールド上では軟磁性が劣化し十分なシールド特性が得られていない。また、磁気異方性もあるため direct-on-chip シールド膜として用いるには課題が残る。

本研究では、後者の積層構造に着目し、軟磁性層との積層構成を検討した結果、樹脂基板上でもガラス基板上でも 100MHz 以下で高いシールド性能を持ち、かつ磁気異方性が小さいものを見出したので報告する。

実験方法

多層膜サンプルは、前回³⁾と同様に Cu と NiFeCuMo 合金ターゲットを用いて、芝浦メカトロニクス製スパッタ装置 CCS-2800 により成膜した。基板にはガラスおよび数 μm の凹凸を有する 2.5cm 角の樹脂モールドを用いた。シールド性能は過去の文献²⁾と同様の手法を用い、基板の二つの辺に沿った方向で測定した。シールド効果 MSE (dB) を $-20\log(\text{透過パワー}/\text{投入パワー})$ で定義し、ネットワークアナライザを用いて周波数依存性を調べた。

結果および検討

Fig.1、2 にガラス基板、樹脂基板上に成膜した、[Cu(100)/NiFeCuMo(100)]₁₀/ [Ta(5)/NiFeCuMo(50)]₅₅/

[Ta(5)/NiFeCuMo(300)]₁₀ 積層膜のシールド特性を示す。リファレンスとして Cu 3μm の特性も示す。樹脂基板であってもガラス基板と同様に、30-50 MHz にピークを持つ特性が得られた。さらに方向依存性も小さく、等方的な特性となっている。多層膜を構成する 3 種の各磁性層の役割はまだよくわかっていないが、ヒステリシスループが軟磁性層単層のような振る舞いを示すことから、各層が静磁気相互作用によって[Cu/NiFeCuMo]₁₀層の磁壁共鳴をエンハンスしていることが想定される。

参考文献

- 1) M. Yamaguchi, et al.: *IEEE Trans. Magn.*, **46**, 2450 (2010)
- 2) K. Yamada et al.: 2011 IEEE International Symposium on EMC, p.432
- 3) A. Kikitsu: 第 44 回日本磁気学会学術講演概要集 14aD-10(2020), abstract of JEMS2020, 3238 (2020)

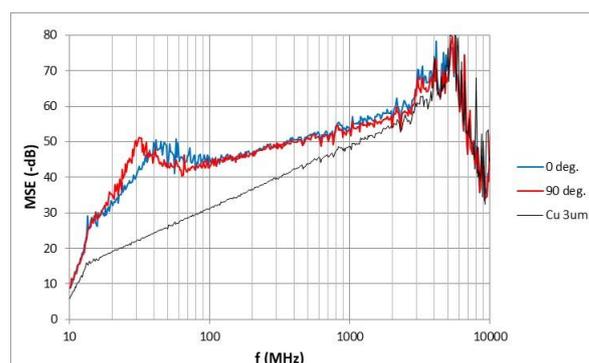


Fig.1 Shield effect of the multilayer sample on a glass substrate

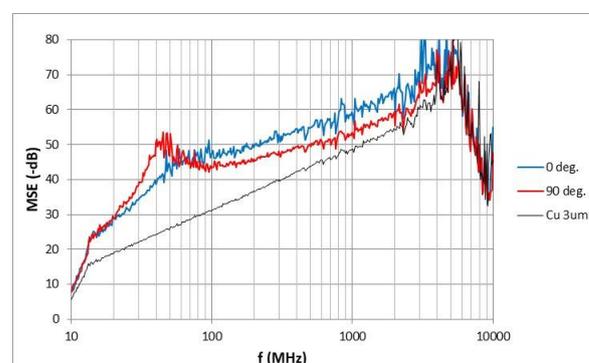


Fig.2 Shield effect of the multilayer on a mold substrate