Co- and Ti-substituted M-type hexaferrites for high frequency applications

Ranajit Sai*¹, Masahiro Yamaguchi¹, Shigeru Takeda², Shin Yabukami³ and S. A. Shivashankar⁴

¹Department of Electrical Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan;

²Magnonotech Ltd., Kumagaya, Saitama, Japan

³Department of Electrical Engineering, Tohoku Gakuin University, Tagajo, Japan

⁴Centre for Nano Science and Engineering, Indian Institute of Science, Bengaluru, India

The radio waves for 5G are expected to be in X- band (8-12 GHz) or in K-band (12-40 GHz) according to the latest 3GPP release. This necessitated the development of magnetic materials suitable at aforesaid frequency bands for passive devices as conventional soft-magnetic materials cannot be employed anymore owing to their extremely lossy characteristics at those frequency bands. M-type hexaferrites are blessed with reasonably high permeability and high magnetocrystalline anisotropy that restricts losses up to a few tens of GHz. However, appropriate cation substitution in their crystal lattice not only enables tuning of anisotropy but also transforms it magnetically soft. Co- and Ti-substituted Sr-based M-type hexaferrite can thus be of extreme importance owing to their suitable soft-magnetic properties in the desired frequency regime.

In this work, the candidature of $SrCo_xTi_xFe_{12-2x}O_{19}$, x=1.0, 1.2, and 1.4 polycrystalline powder as a suitable material for its use in microwave passives is assessed. H_C drops drastically from ~300 Oe to ~40 Oe as the level of substitution, x increases from 1.0 to 1.4. As a result, ferromagnetic resonance (FMR) frequency also decreases from ~20 GHz to 5.4 GHz, making it particularly suitable for the use of high frequency passives. ZFC/FC measurement reveals the absence of interparticular interactions in the samples. At the same time the magnetic layers, formed when the powder of all sample are mixed with epoxy resin, found to be magnetically isotropic in all direction. This lowers theirs real part of permeabilities to some extent. High frequency magnetic characteristics of ferrite-epoxy layers are investigated through two different measurement techniques [1], [2], such as microstrip probe, and shorted micro-strip line measurement. Both measurements are calibrated by high external DC bias field. The resulting frequency dispersion of permeability of one of the sample, obtained from both measurements agrees well with each other as demonstrated in Figure 1c, indicates the shift of FMR frequency from with level of substitution. Minute presence of impurity phases as revealed by XRD (Figure 1a) resulted in a small FMR peak around 1.3 GHz observed in all measurements as well. These results outlined the suitability of CoTiM family of hexaferrites for their integration into high frequency passives. The work also highlights the strength and weaknesses of different broadband measurement techniques for the investigation of high frequency magnetic characteristics of relatively low permeable hexaferrites.

Reference

- 1) S. Takeda et al., J. J. Soc. Pow. Mat., 61, p303, (2014).
- 2) T. Kimura et al., J. Magn. Soc. Jpn, 38, 87, (2014).



Figure 1: (a) Powder XRD pattern of the SrCoTiM; (b) M-H plot of four different CoTiM hexaferrite powder (c) Effect of Co and Ti substitution on FMR frequency and in inset, dependence of FMR frequency on coercivity.

Analysis of magnetic near field noise suppression of multilayered Co-Zr-Nb film integrated on MSL

Jingyan Ma, Hanae Aoki, Masahiro Yamaguchi Tohoku University, Sendai, Japan

1. Introduction

As the IC technology becomes finer and its switching speed becomes faster, a radio frequency integrated circuit (RF IC) chip in a receiver of wireless communication system is tend to be led to a failure of signal processing [1], due to inductive and conductive noise couplings generated by magnetic flux and displacement currents. Therefore, a blocking of those coupling paths is required. Soft magnetic film integration has advantage in suppressing near field [2] and conduction noises [3] without increasing footprint on a die, owing to the performance of ferromagnetic resonance (FMR). In order to develop better soft magnetic film, it is necessary to understand the mechanism of noise suppression. Therefore, a microstrip line (hereafter MSL) with an eight-layer crossed-anisotropy Co-Zr-Nb film on the top is chosen as a basic structure to substitute the complicated film-integrated RF IC chip which is consisted of many power and ground lines.

2. Approach

Figure 1 shows the experimental setup in this work. The multilayered magnetic film is deposited on a glass substrate. The film is placed upon the top surface of MSL whose signal line is 160 μ m wide and 20 mm long, and corresponding characteristic impedance is 50 Ω . A magnetic near field probe with a planar shield loop type sensing coil is placed 600 μ m above the film to measure the magnetic field intensity. A network analyzer provides input power of -5 dBm along frequency range of 0.1 to 4 GHz



Fig. 1 Experimental setup

3. Results and discussion

The experimental results and the simulation results agree in both magnetic field and conduction loss, respectively. Additional simulations are performed to analyze the suppression effect of near field noise. The FMR and eddy current loss are considered as the main reasons for near field shielding effectiveness. Therefore, the contributions of frequency-dependent complex permeability and film resistivity into shielding effect is studied separately. Different permeability and resistivity through case B to case E are assumed as shown in Table 1. The corresponding results are shown in Fig.2.

4. Conclusion

In this paper, the magnetic near field shielding effectiveness and conduction noise suppression of four-layer uniaxial anisotropy Co-Zr-Nb film were investigated by both measurement and simulation. The eddy current and FMR losses were analyzed separately by controlling film resistivity and frequency-dependent complex permeability in simulation. The contribution of eddy current



Case	e.a. orientation	Permeability parameter, μ_r		Resistivity, $\rho, \mu \Omega \cdot cm$
		μ _r	$\mu_r^{''}$	
A ^a	MSL//e.a.	$\mu(f)$		120
В	Isotropic	780	≈ 0	$\approx \infty$
С	Isotropic	780	≈ 0	120
D	MSL//e.a.	$\mu(f)$		$\approx \infty$
Ε	Isotropic	1	≈ 0	120
F^{b}	Blank (without film)	1	0	$\approx \infty$
G	MSL//e.a.	$\mu(f)$		60
H	MSL//e.a.	$\mu(f)$		1200



Fig. 2 simulation results of case A to F

and FMR loss in near field shielding were explained. The results clarified that both eddy current and FMR are contributing significantly to magnetic shielding, wherein the quantitative degree of near field noise suppression is significantly controlled by eddy current loss, while the frequency of maximum near field suppression was dominated by FMR frequency.

Reference

- 1) T Sudo, et al. (2004), IEEE Transactions on Advanced Packaging, vol. 27, No. 2, pp. 304-314.
- 2) J Kim et al. (1998), Electronic Components and Technology Conference, vol. 48, pp. 610-614.,
- 3) Y Kayano, et al. (2004), IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility, vol. 46, no. 1, pp. 46-53..

高Q-RFインダクタ用複合材料磁心の基礎検討

*曽根原 誠, 宮嶋 優希, 佐藤 敏郎 (信州大学)

Basic examination of the composite magnetic core for high *Q*-factor RF-inductor M. Sonehara, Y. Miyajima, T. Sato

(Shinshu University)

はじめに

携帯情報端末には通信の安定性向上とバッテリ駆動の長時間化が要求されている. その一例として送受信 回路における CMOS-LNA の低損失化・高効率化が挙げられる. CMOS-LNA には, MOS-FET の他にインダ クタなど各種受動部品が多数使用されている¹⁾. 特にインダクタに注目すると, 平面スパイラル構造の空心 インダクタであり, 近接効果による損失が問題になっている.

そこで筆者らは、コイル間にカルボニル鉄粉(以下、CIP と記述)をエポキシ樹脂中に分散させた複合材料を充填した高 Q-RF インダクタを考案し、開発を進めている.複合材料磁心インダクタは、コイル間に磁性複合材料があるため、交番磁束は隣接するコイル導体よりも複合材料の方へ通り易くなり、近接効果を低減することができる. 520 x 450 x 8 µm³、L/S = 55/15 µm、2 µmの複合材料磁心スパイラルインダクタを作製したところ、1 GHz において Q = 29 を達成し、同サイズの空心インダクタよりも Q 値を約 30 %高くすることができた²⁾.本稿では、更なる高 Q 化のため、CIP が凝集しても渦電流が粒子間を跨いで流れて渦電流損失が大きくならないように CIP を大気中熱処理して高抵抗被膜を形成した実験結果について述べる.

実験・測定方法

表面酸化 CIP の作製には、マッフル炉(デンケン・ハイデンタ ル製; KDF-009)を用いて大気中熱処理をした.熱処理条件は、 180-300 [℃]で 6 h とした.表面酸化 CIP の酸化膜の観察には電界 放出形走査電子顕微鏡 (FE-SEM) を用い、結晶構造の観察には粉 末 X 線回折法 (XRD)を用いた.

実験結果

Fig.1に断面 SEM 像より見積もった表面酸化 CIP の酸化膜厚と 熱処理温度の関係を示すが、熱処理温度が高くなるに伴い単調に 酸化膜厚が厚くなることがわかる.

Fig. 2 に大気中熱処理した CIP の XRD 回折パターンを示す. As-made CIP は α -Fe のみが観測されるが,表面酸化 CIP は熱処理 温度が高くなるに伴い Fe₃O₄ および Fe₂O₃ の強度が増す.また Fig. 3 に Fig. 2 の α -Fe (110)の半値幅より算出した平均結晶子サイズと 熱処理温度の関係を示す.同図より 240°C 以上で結晶子サイズが 増大することがわかり,保磁力も増大するものと考えられる.

当日は、表面酸化 CIP/エポキシ樹脂複合材料の複素透磁率の 周波数特性や電磁界解析の結果などについて報告する.

<u>謝辞</u>

現在本研究は, JSPS 科学研究費補助金 15K18047 の助成を受け ており、ここに深謝します.

参考文献

1) O.A. Hidayov, et al.: *Electronics letters*, **49**, 23, pp.1433-1435 (2013).

2) M. Sonehara, et al.: IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 11, 6, (2016) (In press).





Fig. 2 Powder XRD pattern of annealed CIP



負の透磁率材料を用いた高周波線路の表皮効果抑制メカニズムの考察

森山竜太、黒川勇太、中山英俊、清野雄貴、湯澤凌芽 (長野高専)

Consideration of Skin Effect Suppression Mechanism in RF Transmission Line with Negative Permeability Material

R. Moriyama, Y. Kurokawa, H. Nakayama, Y. Kiyono, R. Yuzawa

(Nat. Ins. Tech. Nagano Coll.)

はじめに

高周波線路では表皮効果により損失が増大するため、低損失化の大き な課題である。表皮効果を解決する革新的手法として、負の透磁率材料 による表皮効果抑制に関する研究^{1),2)}が進められ、山口らの先行研究に より、その抑制効果が実証された¹⁾。同研究では、薄膜積層構造による 矩形断面線路の表皮効果抑制の設計指針を示したが、矩形線路は複雑な 電磁界メカニズムで解析が難しいため、詳細な設計は有限要素法解析等 に頼らざるを得ない。本研究では、負の透磁率材料の適用効果の原理的 検証のため、円形断面線路を対象に理論検証を行い、そのメカニズムを 理解することにより、設計における有効な指針を得ることを試みた。

負の透磁率材料を用いた高周波伝送線路理論

本研究では原理検証のため、最も単純な円形断面構造の線路を対象に、 Fig.1 に示す電磁界モデルで検討した。同心円状の多層線路の電流密度 分布は、電磁界理論式の導出により式(1)で求められる³⁾。半径 *a*[m]の 第1層に正の透磁率材料(導電率σ₁、透磁率μ₁>0)を、半径 *b*[m]の第2層 に負の透磁率材料(導電率σ₂、透磁率μ₂>0)を想定した場合、それぞれの 内部の電流密度 *i*_{Z1}(*r*)および *i*_{Z2}(*r*)は式(1)により算出できる。

 $i_{z1}(r) = \frac{k_1 I_1}{2\pi a} \frac{J_0(k_1 r)}{J_1(k_1 a)} \quad i_{z2}(r) = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \frac{J_0(k_1 a)}{J_0(k_2 a)} \frac{k_1 I_1}{2\pi a} \frac{J_0(k_2 r)}{J_1(k_1 a)} \quad \dots (1)$

ここで、*k*₁および *k*₂は各材料特性に基づく係数であり、*J*₅および *J*₁は Bessel 関数を示す ³。

<u>結果と考察</u>

Fig.2に2層構造の円形断面線路における電流密度分布の一例を示す。 設定条件は、第2層の半径 $b = 7\mu m$ 、周波数f = 3GHz とし、2つの材料 の導電率をCuと同等($\sigma_1 = \sigma_2 = 5.81 \times 10^7$ S/m)とし、比透磁率の大きさ が1である正/負の透磁率材料($\mu_{r1} = +1, \mu_{r2} = -1$)を想定した。第1層の 半径を $a = 0 \sim 7\mu m$ に変化させた場合、Fig.2(b)のように電流密度の位相 $\angle i_z(r)$ が層の境界面で変曲する結果が得られた。以上より、単位電流を 流す場合に、損失を小さくするには、特に位相に配慮して、電流密度の 偏りが少なくなるように積層厚さを設計すれば良いことが分かった。



Fig. 1 Structure of cylinder transmission line.





(b) Phase of current density Fig. 2 Current density vs. distance from the center (f = 3GHz, b = 7µm).

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 26820135 および総務省 SCOPE 若手ワイヤレス研究者等育成型 165104001 の 助成を受けており、ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Yamaguchi et al.: MWE 2008 Microwave Workshop Digest, 207-210 (2018).
- 2) Nakayama et al.: Digest of the 37th Annual Conf. Magn. Jpn., 37, 381 (2013).
- 3) Mizuno et al.: The Papers of Technical Meeting on Magn., IEE Jpn., MAG-06-82~87, 7-15 (2006).

可塑性樹脂/磁性破砕粒子複合材料成形過程における配向性付与の可能性

大久保秀輝*, 三浦健司, 長田洋 (岩手大学)

Feasibility of orientation control during forming process for magnetic powder-plastic composites Hideki Okubo, Kenji Miura, Hiroshi Osada (Iwate University),

<u>まえがき</u>

電波吸収体の減肉化を目的として,可塑性樹脂とソフトフェライト磁性粉の複合材料の透磁率を,熱圧締 方向を考慮して評価することで,熱圧締成形過程での粒子配向の可能性について検討した。粒子形状に由来 する複合材料の反磁界係数算出のために,使用した磁性破砕粒子と軸比において酷似している三次元ボロノ イセルを利用することで粒子配向時の反磁界係数の上限(下限)値を求め,その反磁界係数をもとに算出し た無配向時/配向時の透磁率と実験で得られた透磁率と比較することで,配向度に関する考察を行った。

試料作製および実験方法

Mn-Zn フェライトコアを粉砕した磁性粉とポリプロピレンを主原料とするコンパウンド(磁性粉体積割 合:約40%)を作製し,顆粒状にしたものを100×100×5 mmの金型内で180℃で熱圧締することによ り平板型に成形した。このサンプルの中心から0,15,27,57 mmの4距離(各A,B,C,Dとする)の位置で 一辺約5 mmの立方試験体を作製し,VSMを用いてヒステリシス曲線を測定した。このとき,平板型サンプ ルにおける中心からの面内方向と厚さ(圧締)方向をそれぞれx,z方向とした。

<u>実験結果</u>

Fig. 1 に平板型サンプル中心からの距離に対する各軸方向の比透磁率(反磁界補正後)を示す。すべての 位置において z 軸方向の比透磁率が他の二軸の比透磁率より小さいが,中心から離れるほど x, y 軸方向の比 透磁率の平均と z 軸方向の比透磁率の差が減少する傾向が確認された。これらから,中心付近では粒子短軸 が圧締方向に配向する傾向が強く,中心から離れるほどランダム分散の度合いが強まると考えられた。

Fig.2 に、反磁界係数と透磁率との関係式から導出した、磁性粒子三次元ランダム配向時の比透磁率 (μ random)に対する、後述する粒子配向時の比透磁率(μ oriented)の関係を示す。ここでは、全粒子の短軸を z軸方向に配向(長軸は xy 平面内でランダム配向)した場合の計算結果について示す。完全にz軸方向に短 軸が配向した場合、 μ random が6程度であるとすると μ z と μ x の比が約2倍程度になることが予想された。また、 この理論値と試作した複合材料の透磁率を比較したところ、配向度は必ずしも高くはなく、改善の余地があ ることが明らかになった。



Fig. 1 Relative permeabilities of the specimen A, B, C, and D.



Fig. 2 Relationship between permeabilities of oriented/random cases.

30GHz帯を目指した磁性薄膜の高周波透磁率測定

武田 茂、直江正幸*、発知富夫**、本村貞美**、鈴木洋介** (Magnontech, *電磁研、**キーコム)

High Frequency Permeability Measurements of Magnetic Thin Films aiming at 30GHz Band

S. Takeda, M. Naoe*, T. Hotchi**, S. Motomura**, H. Suzuki**

(Magnontech, Ltd., *Res. Inst. for Electromagnetic Materials, **KEYCOM Corp.)

はじめに 我々は、遮蔽型短絡マイクロストリップ線路を用いて、10GHz までの磁性薄膜の高周波透磁率の 測定結果を報告した¹⁾。今回、さらなる高周波化を目指して、30GHz までの基礎検討を行ったので報告する。 **問題点と対策** 我々の測定原理である集中定数近似²⁾を用いて高周波化する場合の問題点を整理する。一つ は、電磁波の伝播方向の試料の電気的長さをλ/4以下にすることである。また、形状を正方形の形状のまま で小さくすると検出信号が下がる。TEM モードが維持され平面波が伝播するとすれば、その面内垂直方向の 寸法制限は緩い。そこで試料の一辺の長さだけ短くして、形状を長方形とした。さらに、基板体積由来の静 電容量の影響をできるだけ抑えるために、薄い基板を用いた。もう一つは、薄膜試料による微弱な信号強度 と同程度の細かい不要共振モードの雑音を如何に抑えるかということである。このため、測定治具の形状、 ストリップ線路の形状、多重反射を抑えるための吸収体の貼り付けなどを検討した。

実験方法 Fig.1 に測定治具の断面図を示す。ストリップ線路幅 *w*=3.24 mm,線路高さ *h*₁=0.8 mm, *h*₂=3.7 mm である。治具全体の共振の効果を見るために、長さ *l*=3 mm, 8 mm の二つの治具を用いた。試料には高異方性 のナノグラニュラー面内一軸異方性膜 ³を用い、その磁化困難軸の透磁率を測定した。試料形状は、2 mm× 10 mm の短冊試料とした。基板の厚みは、*d*=0.2 mm, 0.3 mm の 2 種類である。ゼロ点測定には、外部からマ イクロ波磁界と平行に 5kOe の静磁界を加えた(Field 法)。周波数掃引範囲は 0.1~30GHz である。

実験結果と考察 Fig.2 に *l*=8 mm 長治具を用いて測定した結果を、Fig.3 に *l*=3 mm 長治具を用いて測定した結果を示す。基板の誘電率と厚みはそれぞれ 6.4 及び 0.2 mm で、試料膜厚は 1.015 μ m である。Fig.2 に示すように、8 mm 長の治具を用いた場合は、20 GHz まではスムースな曲線が得られたが、それ以上では鋭い不要共振が見られ、測定不能であることが分かる。一方、Fig.3 の 3 mm 長治具を用いた場合は、20 GHz 以上の鋭い共振がなくなり、大幅に不要モードによる共振ノイズが軽減されているのが分かる。しかし、26 GHz にもブロードなピークが観測された。試料は不連続な異方性の強度分散を示しているが³⁾、このピークが膜の特性か否かは検討中である。いずれにせよ、今回の検討で 20 GHz まではスムースに測定できることが分かった。ここで、磁化 4 π M_sを実際の 9.3 kG とし、強磁性共鳴周波数 *f*_f と低周波における透磁率 μ 'との関係を、異方性磁界を変化させて計算すると、*f*=30 GHz→ μ '=2.32, *f*=20 GHz→ μ '=3.40, *f*=10 GHz→ μ '=8.64 である。 μ 'は 1+(4 π M_s/H_k)とした。そのときの H_kは、それぞれ 7034 Oe, 3876 Oe, 1216 Oe である。実際には、H_kが 1216 Oe であり、*f*=10 GHz、5GHz での μ 'は 8.0 であった。これらは上記計算結果と非常によく一致している。



参考文献

- 1) S. Takeda, et al., J. Magn. Soc. Jpn., 39, 227-231 (2015),
- 2) S. Takeda, et al., J. Magn. Soc. Jpn., 39, 116-120 (2015),
- 3) M. Naoe, et al., IEEE Magn. Lett., 5, #3700404 (2014)

磁性薄膜の応力と強磁性共鳴の評価

森 修, 薮上 信*, 遠藤 恭**, 島田 寛**, 内海 良一 (東栄科学産業, *東北学院大学, **東北大学)

Ferromagnetic resonance and stress of magnetic thin film by microstrip probe

O. Mori, S. Yabukami^{*}, Y. Endo^{**}, Y. Shimada^{**}, R. Utsumi

(Toei Scientific Industrial co., ltd, *Tohoku Gakuin University, **Tohoku University)

<u>1 はじめに</u> インピーダンス整合を考慮した マイクロストリップ型プローブを磁性膜に近接させ 強磁性共鳴周波数と応力との関係を評価した。

2 計測方法 Fig.1は磁性薄膜への歪みの印加 方法を示したものである。磁性薄膜上部からマイク ロストリップ型プローブ¹⁾を磁性薄膜にポリスチレ ンフィルムを介して近接配置し、磁性薄膜へ Fig. 1 のようにスペーサ(PTFE フッ素樹脂,約 0.2 mm 厚) を薄膜下に配置することで、磁性薄膜へ応力を与え、 薄膜内部の異方性を変化することにより、強磁性共 鳴周波数の変化を評価する。マイクロストリップ線 路に流れる高周波電流は線路の幅方向に高周波磁界 を励磁するため、薄膜の磁化困難軸方向をマイクロ ストリップの幅方向と平行にして、強磁性共鳴周波 数を評価する。プローブは同軸ケーブルを介してネ ットワークアナライザ(アジレントテクノロジー製 N9928A)に接続し、薄膜の容易軸方向へ約 1700 Oe の直流磁界を印加し、ほぼ飽和させた状態でネット ワークアナライザをキャリブレーションする。その 後磁界を解除してメインの測定をする。

3 計測結果 Fig. 2 に NiFe 薄膜(24 mm × 12 mm, 厚さ 50 nm) のインピーダンスに対する磁性薄 膜の寄与分(50(1-S21)/S21)¹⁾を周波数に対して示した。 メイン測定は磁化容易軸方向へ 150 Oe の直流磁界 を印加させて透過係数(S21)を測定した。BWは1kHz, 平均化回数は 10 回とした。NiFe 薄膜はガラス基板 (厚み 0.15 mm) 上に RF スパッタにより約 50 nm 成膜し、光てこ法で測定した磁歪定数は約 5×10⁻⁶で あった。Fig. 2 の実線は応力を印加しない状態、破 線はFig.1のようにNiFe薄膜へ引っ張り応力を与え た場合、一点破線はFig. 1の薄膜と基板を反転させ て NiFe 薄膜へ圧縮応力を与えた場合の強磁性共鳴 の変化を併記した。与えた歪みはFig.1に記載する ように厚さの変化が約 0.2 mm 程度であり、これを 円周近似すると曲率半径は約0.36mと見積もられる。 Fig. 2 より応力印加による強磁性共鳴周波数の変化 は圧縮応力および引っ張り応力ともに約 230 MHz であった。磁性薄膜の容易軸方向へ引っ張り応力を

与えた場合には磁性薄膜の異方性磁界が高くなり、 強磁性共鳴周波数が高周波化したものと考えられる。 一方磁性膜厚の容易軸方向へ圧縮応力を与えること で、異方性磁界が低下し、強磁性共鳴周波数が低下 したものと考えられ、これらの結果は定性的に合理 的と考えられる。今後は共鳴周波数シフトと磁歪定 数との関係の妥当性について吟味し、磁歪評価へ進 める予定である。

<u>謝辞</u>本研究の一部は宮城・仙台富県チャレンジ応 援基金事業の成果である。

<u>参考文献</u> 1) T. Kimura, S. Yabukami, T. Ozawa, Y. Miyazawa, H. Kenju, and Y. Shimada, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, **38**, 87 (2014).



Fig. 1 Schematic of measurement system.



Fig. 2 FMR of FeNi film(24 mm \times 12 mm, 50nm thick).