

高周波電磁環境を支える新規ギガヘルツ帯域 電磁ノイズ吸収材料の開拓

千葉工業大学 工学部電気電子工学科 安川雪子

Developments of Novel Electromagnetic-wave Absorbers Applicable in the GHz Frequency Range for the High-frequency Electromagnetic Wave Environments

Yukiko Yasukawa

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering,
Chiba Institute of Technology

本研究では、高周波帯域の電磁波吸収に優れるフェライト材料の開発を目指した。電磁波吸収能を計る最重要因子のひとつである透磁率の測定を厳密に行った。基本となるスピネル型フェライト材料において、短絡型マイクロストリップ線路法とマイクロストリッププローブ法でそれぞれ 30GHz、50GHz までの複素透磁率を測定し、両法における結果の一致を確認した。その後、より高周波帯域の電磁波吸収を期待できるマグネトプランバイト型フェライト材料を作製・評価したところ、 ~ 4 GHz での共鳴周波数を観測した。以上の結果より、マグネトプランバイト型フェライトの物質に由来した優れた高周波電磁波吸収特性を明らかにした。今後は物質そのものの特性と人工構造体を組み合わせることによって、さらなる高周波電磁波吸収を目指す。

We have attempted to develop the ferrite materials that can be applicable as electromagnetic-wave absorbers at high-frequency region, in this study. We precisely measured the high-frequency permeability, which is one of the most crucial parameters for the electromagnetic-wave absorption capability. For the high-frequency permeability measurements of spinel-structured ferrite materials, a short-circuited microstrip line method and a microstrip line-probe method were applied up to 30 GHz and 50 GHz, respectively. It was clarified that the obtained results by both methods were well consistent. The magnetoplumbite-structured ferrite materials expected to absorb higher electromagnetic waves than spinel-structured materials. Thus, the magnetoplumbite ferrites were fabricated and measured. In this material, we observed the resonance frequency of ~ 4 GHz. Namely, the magnetoplumbite ferrites have high potentials for the high-frequency electromagnetic wave absorption. This is owing to the material characteristics of magnetoplumbite ferrites. We expect more superior electromagnetic-wave absorption at high-frequency region by a combination of material characteristics of magnetoplumbite-structured ferrites and artificial structures.

1. はじめに

近年の急激な高度情報化社会への変容に伴い、携帯電話、無線 LAN や様々な電子機器

の駆動信号の高周波化が驚異的である。一例が移動通信システムであり、4G システムの使用周波数帯域は最大で ~ 3.5 GHz の非常に周波数の高い電磁波を利用している。5G システムの最大周波数帯域はさらに高く ~ 28 GHz の電磁波が割当てられている。

他方で、我々は高性能・小型・軽量を兼ね備えた電子機器を日常的に使用するようになった。このような高機能電子機器の GHz 帯域での利用も急速に拡大している。電子機器に入力する駆動信号すなわち交流電気信号の周波数が極めて高周波数化したことにより、高速演算・高速動作による高性能化が実現した。また機器内部の電気回路に様々な微小素子が複雑に高密度実装されることにより、機器の小型化や軽量化が実現した。その一方で、このような微小で狭小な機器の回路に周波数の極めて高い交流電気信号が入力されると、回路内のある特定素子を狙って電気信号を入力しても、隣接素子にまで同時に信号が入力してしまう現象、あるいは回路の伝送線路同士が電氣的に結合し、隣接する伝送線路にも高周波の交流電気信号が入力されてしまう現象が頻発するようになってきた。これは電磁干渉と呼ばれる弊害である。

電磁干渉は、電子機器の誤作動や機器から許容値を超えるエネルギー密度の電磁波が輻射される要因であり、GHz 帯域の高周波電磁環境に晒されて生きる 21 世紀の人類の深刻な問題である。人類がこれまでに経験したことのない高周波電磁環境に晒されることは、環境にも人体にも未知で予測のできない影響が懸念される。

以上の背景を踏まえ、高周波電磁環境の安全を実現するため、GHz 帯域の電磁ノイズを高効率に吸収する Fe_2O_3 を主成分とする磁性材料フェライトの開発を目的に本研究を実施した。本研究では高透磁率・低損失を両立する材料として、Ni - Zn 系のスピネル型フェライト $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 及びより高周波帯域(数十 GHz)の極めて高い周波帯域の電磁ノイズの吸収が期待されるマグネトプランバイト型フェライト $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ を研究対象とした。

2. 実験方法

2.1 薄帯の作製

スピネル型フェライト $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 及びマグネトプランバイト型フェライト $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ は、 α - Fe_2O_3 、NiO、ZnO、 BaCO_3 、 TiO_2 、CoO の粉末を化学量論比で混合し、仮焼、粉碎、加圧成形、高温本焼による固相反応法で合成した。粉末 X 線回折法で得られた焼結体試料の結晶相の同定を行った。また粉末化した試料の磁気特性は室温にて振動試料型磁力計で評価した。

得られた焼結体試料をさらに粉碎して微粒子を分級したのち、結着剤のポリビニルアルコールや純水などと混合して得たスラリーを金属板上に塗布した。このスラリーをドクターブレード法によって薄帯化し、乾燥の後加熱しながら熱結着して薄帯試料とした。

2.2 薄膜の作製

マグネトプランバイト型フェライトについては $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ 薄膜試料においても透磁率の検討を行った。薄膜は有機金属分解法で作製した。

金属の有機金属錯体を含有したコート剤を Si (100) 基板上に塗布し、常温大気圧下でスピンコートにより液膜化した。その後、水分を蒸発させる目的でホットプレート上にて試料を仮焼し、続いて有機物を燃焼する目的で、より高温のホットプレートで再仮焼を行っ

た。薄膜の膜厚を制御するため再度コート剤の塗布から仮焼までを繰り返し、最後に高温で本焼を施した。なお、本焼は所定の温度に加熱した電気炉内に試料を挿入する急加熱法で行った。この方法により目的とする $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ 結晶相以外の相の生成を大幅に抑制することができた。

2.3 複素透磁率の評価

本研究では電磁ノイズの吸収能を計るのに重要な因子となる複素透磁率に重点を置いた評価を行った。GHz 帯域以上の周波数帯で試料の複素透磁率を測定する技術は、未だ集中定数近似^{1,2)}や分布定数近似^{3,4)}などの理論や測定法、測定装置に大きく依存することが多く、研究グループにより様々な見解や結果があがっている。

そこで本研究では、スピネル型フェライト $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 薄帯は短絡型マイクロストリップ線路法⁵⁻⁷⁾とマイクロストリッププローブ法^{8,9)}の異なる2つの方法で複素透磁率を測定し、結果を比較した。マグネトプランバイト型フェライト $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ 薄帯および $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ 薄膜は、マイクロストリップ線路法で複素透磁率を評価した。

3. 結果と考察

3.1 スピネル型フェライト¹⁰⁾

合成したスピネル型フェライト焼結体試料のX線回折結果より、結晶性に優れた単相の $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ の生成が確認された。また本試料は典型的な軟磁性体であることが明らかとなった。この焼結体の薄帯試料は、薄帯面内に異方性をもつ面内磁気異方性の軟磁気特性を示した。

スピネル型フェライト薄帯をマイクロストリップ線路法で測定し、複素透磁率の周波数依存性を明らかにした。複素透磁率の虚部は ~ 0.75 GHz 付近に極大を示し、同時にこの周波数近傍で実部の急激な減少が見られたため、 ~ 0.75 GHz 付近が共鳴周波数であると結論した。

次に、同じ薄帯試料をマイクロストリッププローブ法で計測を行った。複素透磁率の周波数スペクトルは、マイクロストリップ線路法で得られた結果と本質的な一致が見られた。マイクロストリッププローブ法においては、測定時に外部から印加する静磁場の強度を変化させながら測定を行った。その際に得られた共鳴周波数の外部性磁場強度依存性を求めたところ、外部性磁場強度の増加と共に共鳴周波数が増大する傾向が明らかとなった。この結果は Kittel の強磁性共鳴の理論¹¹⁾に一致する。

3.2 マグネトプランバイト型フェライト¹²⁾

マグネトプランバイト型フェライト焼結体試料のX線回折結果より、目的とする $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ 相の生成を確認した。また $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ の母物質である $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ と比較すると、顕著な軟磁気化が見られた。 $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ 薄帯は等方的な磁気特性を示したが、薄帯面内の異方性に僅かながら優位性が見られた。

マイクロストリップ線路法で複素透磁率を測定した結果、共鳴周波数は ~ 4 GHz 付近であり、スピネル型フェライト $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 薄帯より共鳴周波数の高周波化が見られた。しかし透磁率の値は小さく、共鳴周波数における複素透磁率の実部は ~ 1.1 、虚部は $\sim 2.2 \times 10^{-1}$ であった。さらに複素透磁率の周波数スペクトルはブロードで急峻性に欠け、

これは薄帯内部の粒子の異方性分散が要因であると考えた。

そこで厚さ 525 μm の Si (100) 基板上に、有機金属分解法によって $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ 薄膜を成膜し、同様の検討を行った。X 線回折法から、薄膜にもかかわらず優れた結晶性の $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ 単相の生成を確認した。断面 SEM 像からは、緻密で高密度な粒子で構成される薄膜の内部構造を確認した。断面 SEM 像から見積もった膜厚は約 480 nm であり、面内磁気異方性を有する軟磁性薄膜であることがわかった。

作製した薄膜の複素透磁率をマイクロストリップ線路法で測定した。マグネトプランバイト型フェライトに由来する共鳴周波数のピーク位置と、基板に由来する信号のピーク位置が重複すると予測されたため、基板の厚さを 100 μm まで研磨して複素透磁率を測定した。基板を研磨することにより、基板由来のスペクトルを除くことができた。複素透磁率の実部については測定点のばらつきが大きく、有意なスペクトルを得ることはできなかった一方で、虚部からはスペクトルの傾向と、 $\sim 3\text{GHz}$ 付近に共鳴周波数が見受けられた。

4. 結論

スピネル型フェライト $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 薄帯試料とマグネトプランバイト型フェライト $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ 薄帯試料、 $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ 薄膜試料を作製し、複素透磁率を評価した。複素透磁率はマイクロストリップ線路法で測定した。特に $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 薄帯試料ではマイクロストリッププローブ法も用いて測定を行い、異なる方法から得られた結果を比較した。両法で測定した複素透磁率には、本質的な一致が見られた。

一方、 $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ 薄膜試料では高品位な薄膜を作製することができたが、複素透磁率の周波数特性からはスペクトル応答と測定ノイズの分離が困難であった。従って測定信号を増幅するための試料の改善が今後の課題である。

$\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 薄帯試料からは $\sim 0.75\text{GHz}$ 、 $\text{BaCoTiFe}_{10}\text{O}_{19}$ 薄帯試料からは $\sim 4\text{GHz}$ の共鳴が明らかとなり、本研究で作製したフェライト薄帯試料の GHz 帯域での電磁ノイズ吸収材料が期待される。

5. 謝辞

本研究の一部は、日本板硝子材料工学助成会の第 42 回研究助成を受けて実施しました。ここに深甚なる謝意を表します。

6. 参考文献

1. Abeywickrama, N., Serdyuk, Y. V. & Gubanski, S. M., IEEE Trans. Powder Del. 23, 2042–2049 (2008).
2. Takeda, S., Hotchi, T., Motomura, S. & Suzuki, H., J. Magn. Soc. Jpn. 39, 116–120 (2015).
3. Sato, T., Sato, K., Yamasawa, K., Zhang, F. & Yanagisawa, K., IEEE Trans. Magn. 39, 3205–3207 (2003).
4. Sato, K., Sato, T., Yamasawa, K., Zhang, F. & Yanagisawa, K., J. Magn. Soc. Jpn. 28, 731–737 (2004) ((in Japanese)).
5. Takeda, S., Hotchi, T., Motomura, S. & Suzuki, H., J. Magn. Soc. Jpn. 39, 227–231 (2015).

6. Sai, R., Sato, M., Takeda, S., Yabukami, S. & Yamaguchi, M., *J. Magn. Magn. Mater.* 459, 49–56 (2018).
7. Takeda, S. & Naoe, *Magn. Jpn.* 14, 12–19 (2019) ((in Japanese)).
8. Yabukami, S. et al., *J. Magn. Soc. Jpn.* 41, 25–28 (2017).
9. Yabukami, S., Nozawa, K., Tonthat, L., Okita, K. & Sai, R., *IEEE Trans. Magn.* <https://doi.org/10.1109/TMAG.2020.3011971> (2020).
10. Yasukawa, Y., Nozawa, K., Tiittanen, T., Karppinen, M., Lindén, J., Shirsath, S. E., & Yabukami, S., *Sci. Rep.* 11, Article number: 614 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79768-z>
11. Kittel, C., *Phys. Rev.* 73, 155–161 (1948).
12. Yasukawa, Y. & Takahashi, C., *Electrochem.* 88, 515–521 (2020).