

マイクロパターン化磁性膜の実効透磁率のシミュレーション

Database of Effective Permeability of Magnetic Film with Parallel Pattern

池田慎治, Kim Ki Hyeon, 山口正洋, 荒井賢一, 名倉秀明*, 大沼繁弘*, 島田 寛**

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

*電気磁気材料研究所, 仙台市太白区八木山南二丁目 1-1 (〒982-0807)

**東北大学多元物質科学研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

S. Ikeda, K. H. Kim, M. Yamaguchi, K. I. Arai, H. Nagura*, S. Ohnuma*, and Y. Shimada**

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

*The Research Institute for Electric and Magnetic Materials, 2-1-1 Yagiyama-minami, Taihaku-ku, Sendai 982-0807

**Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

Effective hard-axis permeability, effective anisotropy field and ferromagnetic resonance (FMR) frequency of soft magnetic thin films were simulated assuming that the films are applied narrow slits along the easy axis direction. A design chart of the slits was developed based on a static two-dimensional finite element method (FEM) simulation. The critical trade-off between low frequency permeability and FMR frequency is also discussed for a maximum possible saturation magnetization of 2.45 T. This idea is quite useful for soft magnetic applications in a GHz frequency range.

Key words: patterned film, permeability, ferromagnetic resonance frequency, anisotropy field, finite element method

1. まえがき

現在、GHz帯域を利用する高周波アプリケーションの普及が急速に進んでおり、携帯電話やBluetoothなどの無線通信機器がその代表である。これらの構成部品の更なる小型化・高集積化に有用な磁性薄膜材料が切望されている。これらの磁性膜には本質的には高い飽和磁化が必要であり、それによるGHz帯域での高い透磁率と強磁性共鳴周波数、さらにこれらを制御できることが求められる。また、これらに対応するEMC対策材料には、高周波高損失性がこれまで以上に求められる。これに対し、磁性体の共鳴損失を積極的に活用する方法が考えられ、ここでも共鳴周波数の制御が重要となる。本文では共鳴周波数制御の一つの方法としてスリット加工によるパターン膜化を取り上げる¹⁾。

面内一軸異方性を持つ磁性膜を磁化容易軸方向にスリット加工すると、形状異方性と静磁氣的結合の変化に起因する異方性磁界の増大により、強磁性共鳴周波数を高周波側にシフトさせることができ、その一方で透磁率は低下する。単純に両者を増大させることはできないので、スリット加工形状と透磁率・強磁性共鳴周波数の関係を整理しておくことがデバイスの設計指針を得るために重要である。この関係を解析的に得ることは容易ではない

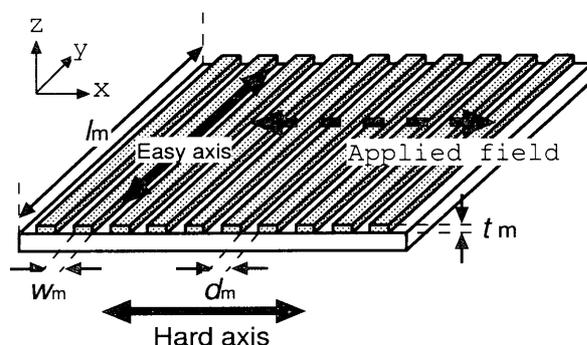


Fig. 1 Magnetic film with micro wire array structure.

が、有限要素法による数値解析手法を用い、RF集積化磁性薄膜インダクタに用いる磁性薄膜の設計を行なった例がある²⁾。この方法は、スリット形状や用いる材料特性をさらに広範囲に設定することにより、多様なアプリケーションの磁性膜に適用することが可能であると考えられる。しかしながら、計算機資源を要する有限要素法計算を設計の都度行なうのは簡便とは言えない。そこで本文では、広範囲にスリット形状と磁気特性の関係を計算し、データベースとしてまとめておくことにした。さらに、実用上最も高い飽和磁化を持つFeCo合金材料を例にとり、GHz帯アプリケーションへの磁性薄膜の適用可能性を示す。

2. 計算方法

2.1 スリット加工による磁気特性の変化

Fig. 1にスリット加工された磁性膜の構造を示す。スリットは磁化容易軸と平行に等間隔に配置され、デバイスへ適用する際の励磁方向は磁化困難軸方向である。磁性膜厚は t_m 、スリット幅は d_m 、分割された各磁性膜の幅は w_m で与えられる。スリット加工前の磁性膜が本来持っている透磁率 μ_i は、飽和磁化 M_s および異方性磁界 H_k を用いて(1)式で与えられる。これに対して、スリット加工後に得られる実効静的透磁率 μ_{eff} および実効異方性磁界 $H_{k,eff}$ はそれぞれ(2)式および(3)式で表される。

$$\mu_r = M_s / H_k \quad (1)$$

$$\mu_{eff} = M_s / H_{keff} \quad (2)$$

$$H_{keff} = H_k + N_d M_s \quad (3)$$

H_{keff} はスリット加工後の実効異方性磁界であり、 N_d は実効反磁界係数で、スリット加工による反磁界や静磁氣的結合の変化による効果が全て含まれるものとする。さらに強磁性共鳴周波数 f_r は(4)式で示される。

$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{(H_k M_s + N_d M_s^2) / \mu_0} \quad (4)$$

ここで、 μ_0 は真空透磁率、 γ はジャイロ磁気定数である。(2)式および(4)式から、スリット加工による N_d の増大によって透磁率は低下するが、共鳴周波数を高周波側にシフトさせることができることがわかる。

2.2 有限要素法静磁界解析を用いた静的実効透磁率の計算

二次元有限要素法静磁界解析により実効静的透磁率 μ_{eff} を導出する方法は、既に茂泉らによって行われているのと同様であり²⁾、分割された各膜片の長さ l_m は無限大としている。また、幅方向に膜が無限に並ぶ周期構造を仮定し、Fig. 2 に示す解析断面を用いる。図中右側の境界はスリットの中心に位置し、左側の境界は膜の中心に位置する。上下の境界は磁束が十分減衰する位置となるように l_{air} を膜厚 t_m の7000倍としている。これを一様磁界印加条件で有限要素法計算により解き、膜内の磁束密度の平均値から μ_{eff} を得る。使用ソフトはMAGNA/FIM ver.7.5(CRC総研)である。得られた μ_{eff} から、(2)および(3)式により N_d が求まり、各磁気特性を見積ることができる。計算の際のパラメータは t_m 、 w_m 、 d_m 、 μ_r であり、Table 1 に計算を行なった範囲を示す。それぞれのパラメータに

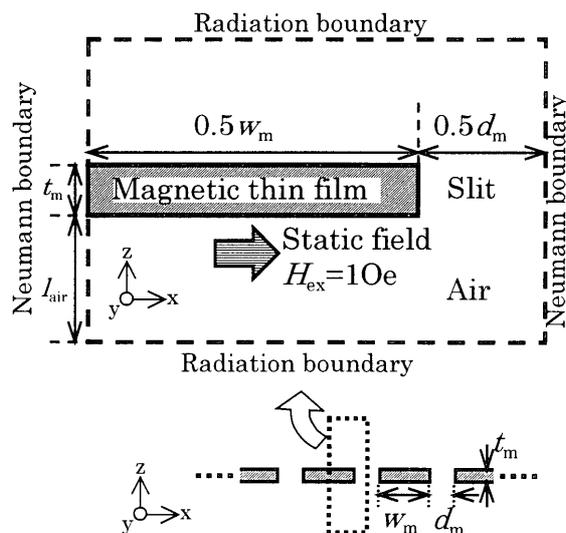


Fig. 2 Cross sectional area and boundary condition for two-dimensional finite element method.

Table 1 Range of chart.

Variable parameter	Range
Width w_m	1 to 5000 μm
Slit Width d_m	0.5 to 1000 μm
Thickness t_m	0.1 to 10 μm
Intrinsic permeability μ_r	10 to 1000

ついて2~3桁の広範囲に設定し、総計およそ10000の条件における計算を行った。

3. 計算結果

3.1 スリット形状と実効透磁率 μ_{eff} の関係

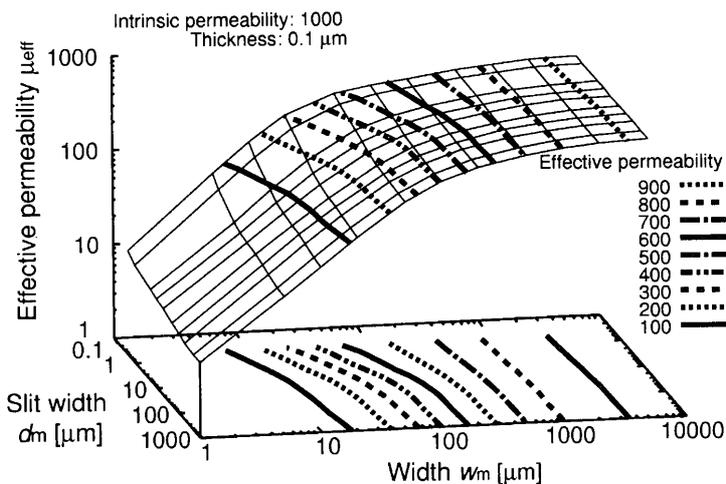
Fig. 3 およびFig. 4 に、計算結果の一部を示す。Fig. 3 は、スリット幅 d_m と膜幅 w_m をパラメータとして実効透磁率 μ_{eff} の変化を示し、Fig. 4 は膜厚 t_m と膜幅 w_m をパラメータとして μ_{eff} の変化を示している。

Fig. 3 より、膜幅の減少およびスリット幅の増加に伴い、 μ_{eff} が低下していることがわかる。これは、膜片の反磁界の増大と、隣接する膜間の静磁氣的結合が弱まるためであると考えられる。Fig. 4 からは膜厚が大きくなるほど μ_{eff} は低下していることがわかる。これは、反磁界の増大のためと考えられ、いずれも定性的に理解される。

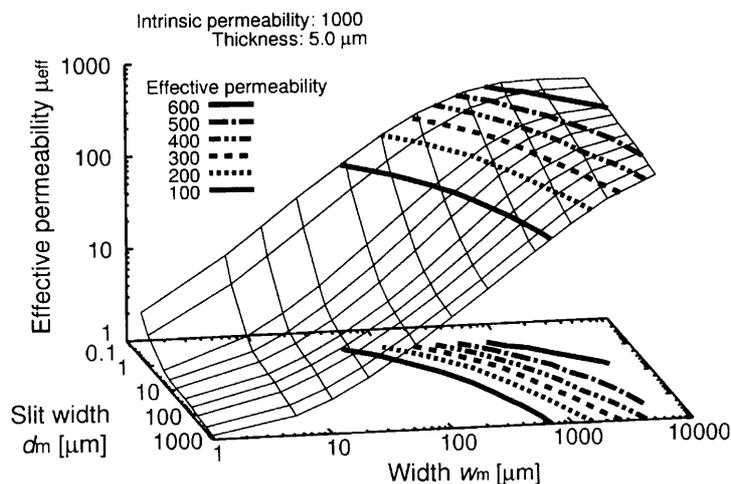
次に、計算結果を用い、 w_m と d_m のいずれを変化させるのが磁気特性の制御に効果的であるかを検討する例を示す。Fig. 3 において、 w_m が1000 μm 、 d_m が10 μm 程度の領域を見ると、膜厚 t_m が5.0 μm の場合では、 w_m および d_m のいずれが変化しても、 μ_{eff} は大きく変化する。それに対して、 t_m が0.1 μm の場合では d_m が変化しても μ_{eff} の変化は小さく、 μ_{eff} の制御のためには、 d_m より w_m を変化させる方が効果的であるとわかる。以上のように簡便に w_m と d_m の効果を知ることができ、パターン形状の設計に有用であると言える。

3.2 実測値との対応

今回行なった計算は、各パラメータを広範囲に変化させた点が特徴であり、実際の試料を用いた実測値との対応も広範囲にわたって検証する必要があると思われる。現在のところデータの十分とは言えないが、一例をFig. 5 に示す。Fig. 5 は、実効異方性磁界 H_{keff} について $\text{Co}_{67}\text{Zr}_8\text{O}_{25}$ グラニューラ膜³⁾による実測値との比較を行なった結果であり、スリット幅 d_m は200 μm であり、以前に検証されている試料²⁾より1桁大きなパターンサイズである。用いた $\text{Co}_{67}\text{Zr}_8\text{O}_{25}$ 膜は平行方向のスリットに加えて、面内直交方向にもスリット加工され、正方形形状にパターン化されているので、本計算のモデルとは若干異なるが、測定値と計算値に大きな開きはないことがわかる。モデルの違いによる影響については、今後検討する必要があると思われる。



(a) Thickness $t_m = 0.1 \mu\text{m}$.



(b) Thickness $t_m = 5.0 \mu\text{m}$.

Fig. 3 A portion of the effective permeability design chart ($\mu_r=1000$).

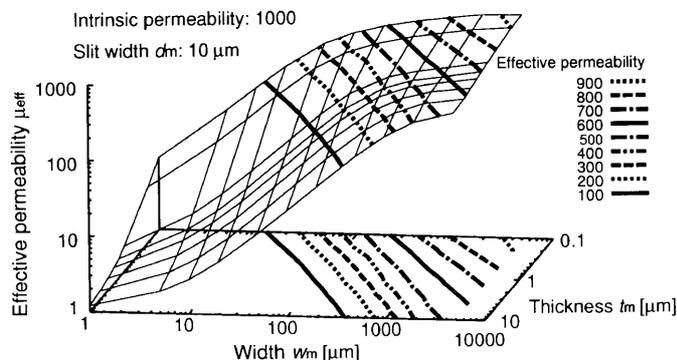


Fig. 4 Thickness dependence of effective permeability ($\mu_r=1000, d_m=10 \mu\text{m}$).

4. 最大の飽和磁化 2.45T を持つ材料の GHz 帯デバイスへの適用可能性

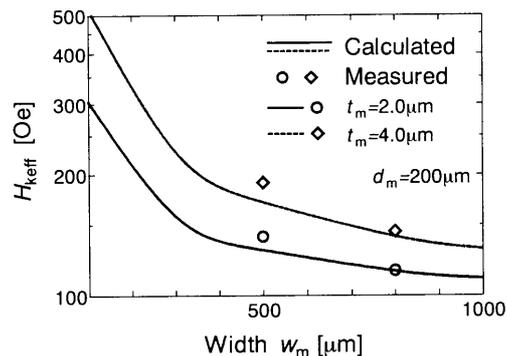


Fig. 5 Calculated effective anisotropy field and measurement results of $\text{Co}_{67}\text{Zr}_8\text{O}_{25}$ granular films.

磁性膜の飽和磁化と独立して異方性磁界を制御できることは、本手法の利点である。しかしながら、式(2)および(4)からわかるように、異方性磁界の制御だけでは実効透磁率 μ_{eff} と強磁性共鳴周波数 f_r を同時に増大させることはできず、そのため、本手法には高い飽和磁化を持つ材料が本質的に求められる。

そこで本章では計算結果を利用し、実用上最大の飽和磁化を持つFeCo系材料のGHz帯高周波アプリケーションへの適用可能性を検討した。例えば、Bluetooth や無線LANで現在利用されている2.4GHz帯域を駆動周波数とするようなインダクタに適用することを目的とすると、強磁性共鳴周波数が十分に高く、かつ透磁率の実部が大きいことが求められる。

Fig. 6 に示すのは、飽和磁化 2.45 T を持ち、かつ 50 Oe の異方性磁界を持つ材料を仮定した場合の実効静的透磁率 μ_{eff} および強磁性共鳴周波数 f_r である。膜幅 w_m は $30\mu\text{m}$ として、横軸をスリット幅 d_m としている。スリット加工しない場合の f_r は 3.0GHz であるが、スリット加工による大幅な f_r の増加がわかる。膜厚 $1.0\mu\text{m}$ の場合、スリット幅を $4\mu\text{m}$ 以上とすると 10GHz を超える極めて高い強磁性共鳴周波数を得られるが、 μ_{eff} は 100 を大きく下回る値になる。しかし、以下に述べるように、膜厚が $0.5 \mu\text{m}$ の場合で d_m を $1.0\mu\text{m}$ とすると、 $2\sim 3 \text{GHz}$ でデバイス化可能な特性が得られる。Fig. 7 にはそれら複素透磁率の周波数特性の計算結果を示した。計算は、LLG 方程式に基づく(5)~(7)式により行ない、異方性分散は考慮していない。なお(7)式の制動定数 α は 0.015 としており、 ω_r は強磁性共鳴角周波数である。

$$\mu' = \frac{4\pi M_s}{H_k} \cdot \frac{\omega_r^2(\omega_r^2 - \omega^2)}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + (4\pi\lambda\omega)^2} + 1 \quad (5)$$

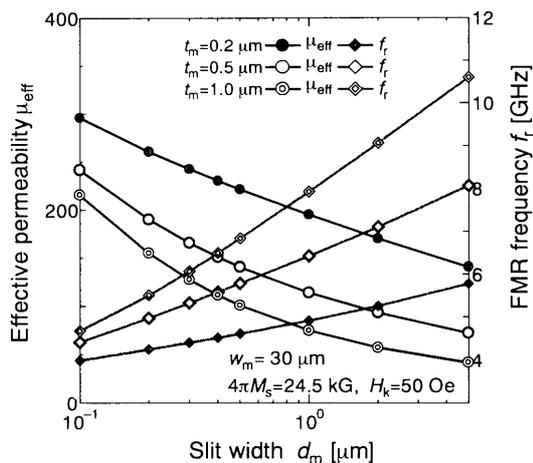
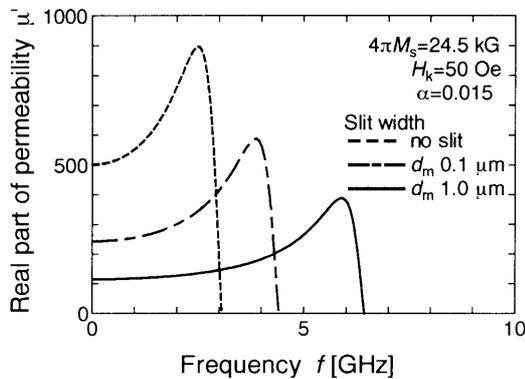
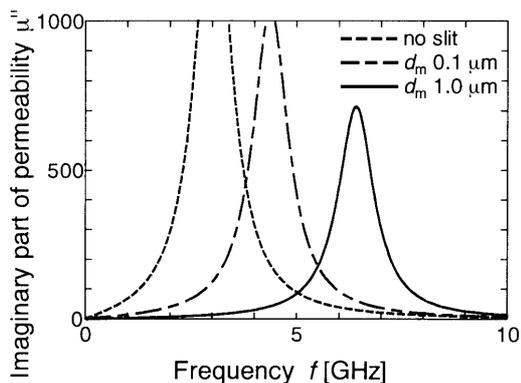


Fig. 6 Slit width dependence of effective permeability and FMR frequency in patterned magnetic films $4\pi M_s$: 24.5 kG and H_k : 50 Oe.



(a) Real part of permeability.



(b) Imaginary part of permeability.

Fig. 7 Frequency profile of complex permeability in patterned magnetic films with $4\pi M_s$: 24.5 kG and H_k : 50 Oe.

$$\mu'' = \frac{4\pi M_s}{H_k} \cdot \frac{\omega_r^2 (4\pi\lambda \omega)}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + (4\pi\lambda \omega)^2} \quad (6)$$

$$\lambda = \alpha \gamma M_s \quad (7)$$

スリット加工をしない場合、Fig. 7 (b)より、共鳴損失を

示す μ'' は2GHzですでに400程度と相当な大きさになっていることがわかる。それに対してスリット幅を1.0 μm とすると、2~3GHzにおける μ'' はおよそ120程度得られており、その時の μ'' は十分小さく抑えられていることがわかる。

最後に、EMC対策材料への適用の可能性について述べる。これは、磁性膜の共鳴損失を利用して高調波ノイズを抑制するのが目的であり、ノイズを効率的に吸収させるためには、 μ'' の周波数特性を制御できることが望ましい。Fig. 7(b)からは、共鳴周波数の高周波化に伴い、 μ'' の極大点は高周波側にシフトしていることがわかり、 d_m が1.0 μm の時には、6.5 GHzにおいて μ'' は約700得られている。本データでは渦電流の効果を考慮していないが、パターン化により面内渦電流は抑制されるので、渦電流による遮蔽効果も抑制され、共鳴吸収を効果的に利用したノイズ吸収が実現できると考えられる。

以上により、適切に設計されたスリット加工により磁気特性の幅広い制御が可能であることと、2.45Tの飽和磁化を持つ磁性薄膜によるGHz帯のデバイス応用の可能性が示された。

5. まとめ

磁性膜のスリット加工による特性制御のために、スリット形状と磁気特性の関係を網羅的に計算した。さらに2.45Tの最大飽和磁化を持つ磁性膜を例にとり、GHz帯デバイスへの磁性材料の適用可能性について述べた。この方法により、磁性膜の高周波応用の設計限界を簡便に得ることが可能である。今後、実測によりデータの信頼性を高める必要があると考えている。

謝辞

本研究の一部は通信・放送機構による地域提案型研究開発制度「ナノ構造制御による高性能電波吸収薄膜材料の開発—マイクロスケールEMCへの展開—」(研究代表者: 東北大 島田寛教授)、および文部科学省革新的技術開発研究推進費補助金「常温作製・高絶縁性フェライト膜を用いたマイクロ磁気技術の開発」(研究代表者: 東工大 阿部正紀教授)によった。

文献

- 1) M. Yamaguchi, M. Baba, K. Suezawa, T. Moizumi, K. I. Arai, A. Haga, Y. Shimada, S. Tanabe, and K. Ito: *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 5, pp.3495-3498,(2000-9).
- 2) T. Moizumi, K. Suezawa, M. Baba, M. Yamaguchi, K. I. Arai, A. Haga, S. Tanabe, and K. Ito: Digest of the 24th annual conference on magnetics in Japan 2000,p.211,(2000-9) (in Japanese).
- 3) S. Ohnuma, H. J. Lee, N. Kobayashi, H. Fujimori, and T. Masumoto: *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2251-2254,(2001-7).

2002年10月7日受理, 2003年1月17日採録