

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：53901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820131

研究課題名(和文)磁性膜を用いた誘導磁界に対する帯域通過フィルタに関する研究

研究課題名(英文)Study on magnetic-flux band-pass filter using magnetic film

研究代表者

室賀 翔(Muroga, Sho)

豊田工業高等専門学校・電気・電子システム工学科・講師

研究者番号：60633378

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、電磁干渉を抑制しつつ、特定の周波数帯域のみ磁束を透過することにより通信品質を良好に維持できる磁束に対する帯域通過フィルタを、磁性体を用いて実現し、そのフィルタのメカニズムを明確化することにより、その設計指針を考察した。また、様々な寸法の信号線上に集積化された磁性膜について、帯域除去フィルタの中心周波数が同一とするための設計について考察した。その結果、磁性膜が、暗号および復号化デバイスを狙った非接触あるいは非破壊のサイドチャネル攻撃への物理的な対抗手段となることを示した。

研究成果の概要(英文)：This study demonstrates and analytically discussed that a magnetic film becomes transparent for the magnetic flux when the relative permeability of the magnetic film becomes negative above the intrinsic ferromagnetic resonance frequency. The shielding effectiveness of the magnetic flux through the magnetic film was evaluated by a magnetic circuit considering leakage magnetic flux from the magnetic film and demonstrated by the near field measurement using shielded loop coil type magnetic field probe. In this case, the coplanar and microstrip transmission lines was developed as a flux source. As a result, it was clarified that the magnetic flux in the magnetic circuit increases when the magnetic circuit resonated with a negative reluctance of magnetic film. Therefore, the magnetic film can behave as a bandpass filter.

研究分野：電気工学

キーワード：電磁環境両立性 磁気応用 高周波回路 磁性薄膜 帯域通過フィルタ 電子デバイス

1. 研究開始当初の背景

非接触型 IC カードや RFID (Radio Frequency Identification) は急速に普及しており、金融、公共、交通等様々な分野に応用される基盤製品となっている。その通信周波数は kHz 帯から GHz 帯域であり、通信距離は数 mm から数 m である。このようなデバイスは、暗号化・復号処理を高速に行うための暗号回路を伴い、そのアルゴリズムは、理論的な安全性が十分に検証されている一方で、暗号機器の物理実装から得られる情報に基づいて暗号鍵解読を試みるサイドチャネル攻撃の脅威に晒されている。

サイドチャネル攻撃は、耐タンパー性を備えた暗号機器に対して、暗号化あるいは復号化のための処理時間、消費電力、電磁放射などを外部から測定および解析することにより、暗号鍵を特定する攻撃であり、近年、情報セキュリティ分野で注目されている。特に、攻撃者が暗号機器内の電流より生じる磁束を測定・解析する手法は、外部から非接触・非破壊での攻撃が可能である点で脅威である。その対策として、IC 内部で乱数などの擬似信号を生成する対策法は存在するが、物理的に漏洩電磁波自体を減衰するような対策手法は少ない。

磁性膜は、磁性体の高透磁率を用いて、磁気シールド効果により磁束を閉じ込める、或いは外部から侵入する磁束を遮蔽する、強磁性共鳴損失によって減衰させることが可能であり、暗号機器内の電流より生じる磁束を機器内に遮蔽することが可能である。よって、磁性体により、暗号あるいは復号化のための処理時間、消費電力の情報が漏洩しないように対策を行うことは、サイドチャネル攻撃への対抗手段となり得る。

一方、磁性膜の材料選択・設計によって、GHz 帯の強磁性共鳴周波数付近で磁束を透過する効果が発現させることが可能であることがわかっている。この磁束の透過効果と、上述した抑制・シールド効果を組み合わせることにより、電磁干渉を抑制しつつ、特定の周波数帯域のみ磁束を透過することにより通信品質を良好に維持できる磁束に対する帯域通過フィルタが実現可能になると予測できる。

しかしながら、磁性膜を帯域通過フィルタとして用いる場合の磁束の透過量、通過帯域、通過周波数以上の周波数帯域におけるシールド効果は明らかになっていない。さらに、磁性膜に生じる反磁界の大きさは、磁性膜近傍の信号あるいは電源配線の寸法によって様々変化するため、それぞれの配線上で磁性体の共鳴周波数が異なるという問題が生じる可能性がある。

2. 研究の目的

電磁干渉を抑制しつつ、特定の周波数帯域のみ磁束を透過することにより通信品質を良好に維持できる磁束に対する帯域通過フ

ィルタを、磁性体を用いて実現し、そのフィルタの透過量、通過帯域、遮断量の決定メカニズムを明らかにすることにより、設計指針を考察する。また、様々な寸法の信号線上に集積化された磁性膜について、同一の強磁性共鳴周波数を実現するための膜形状あるいはパターンの考察を行う。その結果、磁性膜が、暗号および復号化デバイスを狙った非接触あるいは非破壊のサイドチャネル攻撃への物理的な対抗手段となることを示す。

3. 研究の方法

通信周波数帯域の信号あるいは磁束のみを透過させ、他の周波数帯域に生じる磁束は低減するような、磁性体を用いた帯域通過フィルタについて、フィルタの透過量、通過帯域、遮断量に対する設計指針の明確化を行うため、本研究では次の事項を検討した。

- (1) 磁性膜を集積化した際の磁気回路を用いたシールド効果の定量的導出法の確立
 - (2) 強磁性共鳴周波数あるいは帯域通過フィルタの中心周波数の制御法の明確化
- また、(1) および (2) の実証実験として、回路や IC チップ内配線を模擬した伝送線路を用いて、実際に磁性膜をデバイスに直接実装することにより、非接触あるいは非破壊のサイドチャネル攻撃に物理的な対抗手段となることを示すために次の事項を検討した。
- (3) 線幅の異なる複数のオンチップ配線の設計および試作
 - (4) 磁性膜を用いた帯域通過フィルタの実証実験

磁性膜を用いた帯域通過フィルタのメカニズムを実証し、その設計指針を示すため、コプレーナ線路上に磁性薄膜を配置した場合のシールド効果を、磁性薄膜の漏洩磁束を含めた磁気回路を用いて導出した。

コプレーナ線路の寸法は、信号線幅 $160 \mu\text{m}$ 、グラウンドギャップ $30 \mu\text{m}$ とし、直流抵抗を無視した場合に特性インピーダンスが 50Ω に整合するよう設計した。この他に、信号線幅を $5 - 100 \mu\text{m}$ まで変化させたコプレーナ線路およびマイクロストリップ線路を IC のチップ上に設計・作製した。

作製した伝送線路上を磁束発生源として、帯域通過フィルタをその直上に配置した。帯域通過フィルタは、膜厚 $0.25 - 1.0 \mu\text{m}$ で変化させ、Co-Zr-Nb 膜、Co-Zr-O 膜、Ni-Fe 膜それぞれ用いた。比透磁率は 0.1 GHz において 700 程度、強磁性共鳴周波数 f_r は 1.1 GHz である。

帯域通過フィルタの特性はフィルタによるシールド効果を測定することにより評価した。その測定系を図 1 に示す。

ネットワークアナライザを用いて、 0 dBm の電力をコプレーナ伝送線路の一端から入力し、もう一端を 50Ω 抵抗により終端させた。

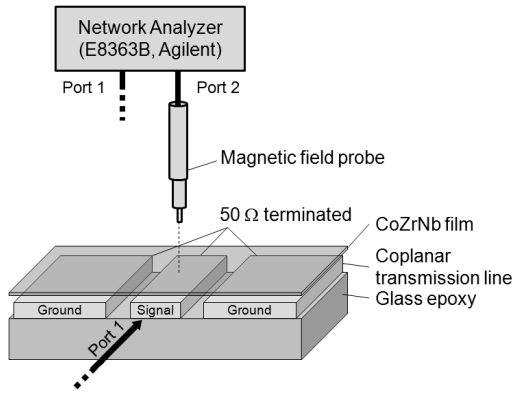


図1 シールド効果の測定系

シールド効果は磁性膜を配置した場合としていない場合の磁界強度を比較することにより次式より評価した。

$$SE = 20 \log \left(\frac{H_m}{H_{wo}} \right) = 20 \log \left(\frac{V_m}{V_{wo}} \right)$$

$$= 20 \log \left(\frac{s_{m21}}{s_{wo21}} \right) \quad [\text{dB}]$$

ただし、 H_{wo} 、 V_{wo} および s_{wo12} はそれぞれ、磁性薄膜がない場合の磁界強度、プローブでの誘起電圧および透過係数であり、 H_m 、 V_m および s_{m12} は磁性薄膜を配置した場合である。

図2にコプレーナ伝送線を磁束の発生源とした場合の信号線周りの経路の磁気回路を示す。

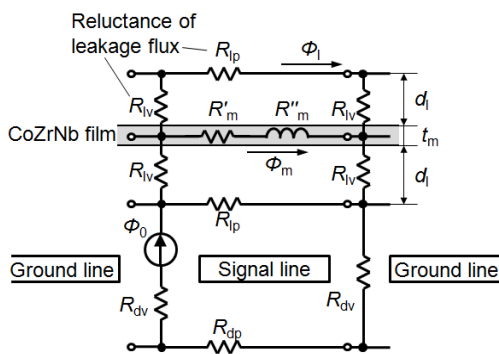


図2 信号線周りの磁気回路網

R'_m および R''_m はそれぞれ磁性薄膜内の磁気抵抗の実部および虚部、 R_{lp} および R_{lv} は、磁性薄膜からの漏洩磁束の磁気抵抗、 R_{dl} および R_{dv} は信号線周りの磁気抵抗を表す。 R_{lp} および R_{lv} の導出には、パーミアンス法を用いた。ただし、信号線を通る伝導電流は周波数に対して一定値とし、膜内のシールド効果に対する渦電流の影響は磁性の影響と分離して議論するため今回の計算では無視した。

4. 研究成果

帯域通過フィルタとして製膜した膜厚 0.25

μm の Co-Zr-Nb 膜の周波数特性を図3に示す。

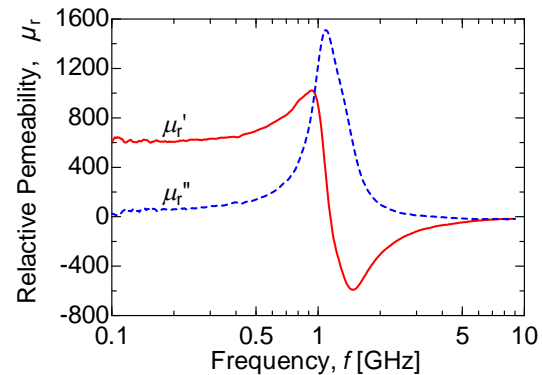


図3. CoZrNb の比透磁率の周波数特性

比透磁率は 0.1 GHz において 700 程度、強磁性共鳴周波数 f_r は 1.1 GHz である。

このフィルタが特定の周波数帯域において磁束を透過する現象の理解を行うため、磁性薄膜内外の磁気抵抗の周波数特性を考察した。図4に磁気抵抗の周波数特性を示す。

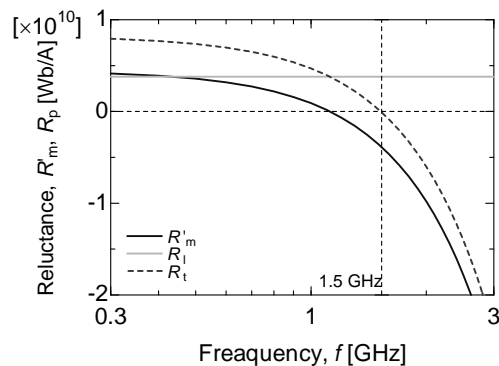


図4 磁気抵抗の周波数特性

黒の実線は磁性薄膜内部の磁気抵抗の実部、灰色の実線は漏洩磁束の経路における磁気抵抗を示している。膜固有の強磁性共鳴周波数 1.1 GHz 以上においては磁性薄膜の比透磁率が負となることから、磁気抵抗内部の磁束は周波数範囲において負の値となり、その後、単調減少する。その結果、膜固有の強磁性共鳴周波数以上の周波数帯域において、磁性薄膜の磁気抵抗と漏洩磁束の経路の磁気抵抗の和が 0 となる周波数帯が存在することになる。

このため、磁気回路の負性磁気抵抗による共振現象により漏洩磁束が増大し、磁束が透過することを明らかにした。これにより、磁気抵抗の和が 0 となる周波数は、基本的には磁性薄膜固有の強磁性共鳴周波数に等しく、副次的に配線と磁性薄膜との幾何学的配置および寸法で定まる反磁界によって高周波側へシフトすることと考えられることを示した。

この考えを実証するため、実験値との比較を行った。図5にシールド効果の周波数特性

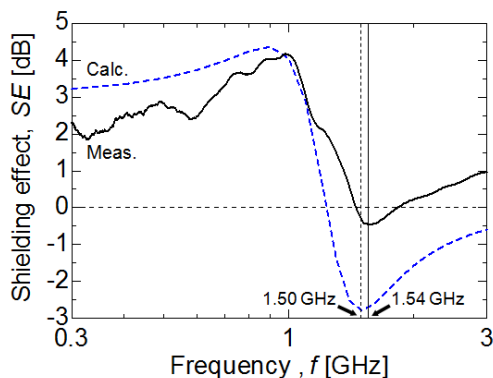


図5 シールド効果 SE の周波数特性

の実験値および解析計算値を比較して示す。実線が実測値、破線が解析計算値を表す。シールド効果は磁性薄膜の強磁性共鳴周波数である 1.1 GHz までは 2~4 dB であり、磁性薄膜のシールド効果が得られている。一方、シールド効果は 1.1~1.5 GHz まで単調に減少し、最小となった後に上昇した。1.5 GHz では、シールド効果が負となっており、この周波数帯においては、磁束が磁性薄膜を透過している。

計算結果は、実験結果と傾向がよく一致しており、特に磁束を透過する周波数帯域についてはほぼ一致しており、上述した磁気回路の共振現象が実証されていることを表していると考えられる。ただし、シールド効果が負となる周波数以上の周波数帯域においては実測値のシールド効果が高く得られた。この原因は、磁気回路計算においては、渦電流による反射や磁気損失を考慮していないためと考えられ、今後、磁気回路計算によるシールド効果の解析に、渦電流による反射や磁気損失の効果を検討する、或いは電磁界解析を行う必要があると考えられる。

帯域通過フィルタの中心周波数の実験値および解析計算値を図 6 に示す。

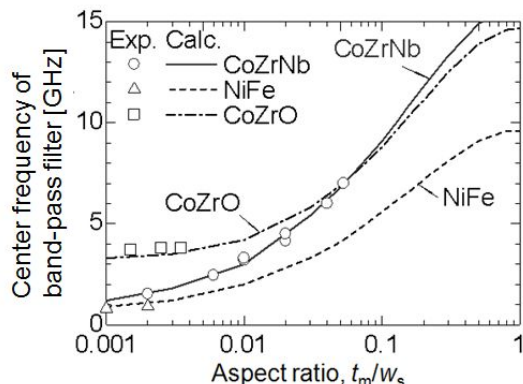


図6 帯域通過フィルタの中心周波数の設計

実験値および解析計算値はおおよそ一致した。このことから、帯域通過フィルタの中心周波数は、磁性薄膜固有の強磁性共鳴周波数

に等しく、副次的に配線と磁性薄膜との幾何学的配置および寸法で定まる反磁界によって高周波側へシフトすることを示した。

以上、磁性膜をデバイスに実装することにより、特定の周波数帯域の磁束のみを透過し、その他の周波数帯域ではシールド・抑制する磁束に対するバンドパスフィルタを実現し、様々な伝送線路に対する中心周波数の定量的な導出法を明らかにした。フィルタの透過量および帯域幅に関しては、渦電流による反射や磁気損失を考慮した磁気回路解析を行うこと、また電磁界解析を行うことで導出可能となることを示した。

これにより、非接触あるいは非破壊のサイドチャネル攻撃に物理的な対抗手段となることから、非接触 IC カードや RFID 技術における、情報セキュリティ分野に対して、大きな貢献が可能となることを示した。また、本研究課題で提案する帯域除去フィルタは、フットプリントを増加させることなく、線路上にあるいはチップのパッシベーション層上に数 μm 厚の磁性体を集積化することのみで実現できることから、通信や集積回路工学等、様々な分野に応用可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

(1) 学術論文 (査読有り)

Yutaka Shimada, Jingyan Ma, Tetsuo Ito, Kunio Yanagi, Yasushi Endo, Sho Muroga, Masahiro Yamaguchi, "Performance of Crossed Anisotropy Multilayered CoZrNb Films as IC Chip Level Electromagnetic Noise Suppressor," IEEE Transactions on Magnetics, Article# 2801704 (2014).

Sho Muroga, Kaoru Arai, Dhungana Sandeep, Okuta Ryosuke, Yasushi Endo, Masahiro Yamaguchi, "3-D Magnetic-Near-Field Scanner for IC Chip-Level Noise Coupling Measurements," IEEE Transactions on Magnetics, IEEE Magnetics Society, Vol. 49, pp. 3886-3889 (2013).

Sho Muroga, Yuki Asazuma, Masahiro Yamaguchi, "Study of FMR Frequency Shift Through Electromagnetic Simulation and Its Application to Analyze Integrated Ferromagnetic Noise Suppressor," IEEE Transactions on Magnetics, IEEE Magnetics Society, Vol. 49, pp. 4032-4035 (2013).

(2) 国際会議論文 (査読有り)

T. Tanaka, C. Okamura, S. Okajima, K. Kato, S. Muroga, Y. Asazuma, M. Yamaguchi "Radiated and conductive noise suppression of non-magnetic metal-coated non-woven fabric," 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC),

pp. 532-535(2015).

Sho Muroga, Yuki Asazuma, Yamaguchi Masahiro, Tomoya Tanaka, Chie Okamura, Shin-ichi Okajima and Kazufumi Kato, "Electromagnetic Shielding Effectiveness of Non-magnetic Metal Coated Non-woven Fabric Noise Suppressor," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 134-137 (2014).
S. Muroga, M. Yamaguch, "Effect of Demagnetizing Field on Frequency Dispersion of Complex Permeability," 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp.786-788 (2014).

[学会発表](計7件)

- (1) Sho Muroga, Jiang Fu, Masahiro Yamaguchi, Tomoya Tanaka, Chie Okamura, Lumina Obi, Kazufumi Kato "Shielding Effectiveness of Meltblown Non-Woven Fabric Type Non-Magnetic Noise Suppressor" EMCJ / IEE-EMC / IEE-MAG (2016, 台湾).
- (2) 室賀 翔, "磁性膜を用いた電磁ノイズ抑制体のノイズ抑制機構" IEEE EMC Society Sendai Chapter Colloquium(2016, 仙台).
- (3) T.Tanaka, C. Okamura, S. Okajima, K. Kato, S. Muroga, Y. Asazuma, M. Yamaguchi "Radiated and conductive noise suppression of non-magnetic metal-coated non-woven fabric," 2015 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), pp. 532-535(2015, 台湾).
- (4) Sho Muroga, Yuki Asazuma, Yamaguchi Masahiro, Tomoya Tanaka, Chie Okamura, Shin-ichi Okajima and Kazufumi Kato, "Electromagnetic Shielding Effectiveness of Non-magnetic Metal Coated Non-woven Fabric Noise Suppressor," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (2014, 米国).
- (5) S. Muroga, M. Yamaguch, "Effect of Demagnetizing Field on Frequency Dispersion of Complex Permeability," 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo (2014, 東京).
- (6) S. Muroga, Y. Endo, T. Ito, S. Tanaka, M. Murakami, K. Hori, S. Takahashi, A. Naoya, T. Makita, S. Imai, M. Nagata, M. Yamaguchi, "In-band spurious attenuation in LTE-class RFIC chip using a soft magnetic thin film," 2013 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp.

657-661(2013, 米国).

- (7) Masahiro Yamaguchi, Sho Muroga, Shiori Nanba, Kaoru Arai, Kunio Yanagi, Yasushi Endo, "A 60 x 60 μm^2 Size Planar Shielded Loop Probe for Low Lift-Off On-Chip Magnetic Near Field Measurements," EMC Europe 2013 Proceedings (2013, ベルギー).

6. 研究組織

(1)研究代表者

室賀 翔 (MUROGA SHO)

豊田工業高等専門学校・電気・電子システム工学科・講師

研究者番号：60633378