

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 30 日現在

機関番号：53601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820135

研究課題名(和文)負の透磁率特性を利用した表皮効果抑制線路の設計方法確立とその実証

研究課題名(英文) Establishing design method of skin effect suppression transmission line using negative permeability

研究代表者

中山 英俊 (Nakayama, Hidetoshi)

長野工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：10390452

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高周波線路の低損失化・省エネ化を目的として、負の透磁率特性を用いて表皮効果を抑制した超低損失線路の設計方法を確立し、その効果を実証することを目標とした。

研究成果より、抵抗率が高い負の透磁率材料を考慮して、電流密度および磁束密度分布に応じた積層構造を設計し、表皮効果の抑制だけでなく、総合的に実効抵抗が最小となる設計を明らかにした。理論検証では、円形断面構造で、複数の材料の透磁率、抵抗率を設計に考慮して、総合的に損失が最小となる積層構造を見出す理論を導くことができ、学術的成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to lower loss in high frequency transmission line, design method of low loss transmission line which is able to suppress skin effect using negative permeability has been proposed and considered.

As a result, in consideration of negative permeability material with high resistivity, design method of multi-layer structure transmission line which has minimum effective resistance such as skin effect and DC resistance comprehensively has found by using FEM(finite element method). On the other hand, based on electromagnetic theory, theory of minimum loss design method in cylindrical section transmission line with plural materials was derived, and academic outcomes were obtained.

研究分野：電気電子工学

キーワード：伝送線路 表皮効果 実効抵抗 透磁率 負の透磁率材料 低損失 高周波

1. 研究開始当初の背景

伝送線路では、周波数が高いほど表皮効果が発生し、線路表面にしか電流が流れないため、抵抗が高くなり、損失が大きくなる。例えば、銅線の表皮厚さは、1GHz で約 2.1 μm であり、これ以上の寸法で断面積を大きくしても、抵抗低減効果は少ない。表皮効果を抑制できれば、さらに断面積を大きくできるため低損失化が図れ、省エネ効果が得られる。

リッツ線やスリットを設ける構造などの表皮効果抑制対策が知られているが、両者は線路断面の一部を絶縁することにより、断面積の無駄が生じる。一方で、負の透磁率特性を利用した表皮効果抑制線路は、表皮効果の原因となる線路内の磁束を相殺することができ、負の透磁率材料も電流通路となるため、断面積として有効に機能し、大幅な低損失化が図れる革新的な研究である。

負の透磁率材料と導体の積層構造による表皮効果抑制線路は、山口らにより、Al/NiFe 多層膜のコプレーナ線路などが作製され、その効果が実証されたが、30 層もの積層膜であるため、製造コスト面での課題があった。本研究では、伝送線路内部の磁束密度分布に着目し、隣接する磁束が相殺される積層厚さを適切に設計することで、表皮効果を更に抑制できることを提案した。一方で、その設計理論は不十分な部分があり、線路内部の電流密度分布や使用材料の抵抗率の影響を加味して、より最適な設計を検証する必要があるため、最適設計方法の確立を試みた。

2. 研究の目的

本研究では、革新的な表皮効果抑制技術として注目される負の透磁率特性を利用した表皮効果抑制線路について、これまで考慮されていない抵抗率の違いを考慮し、抵抗率と透磁率のパラメータを考慮して、表皮効果だけでなく、直流抵抗が異なることも考慮し、総合的に実効抵抗が最小となる設計理論を確立することを目的とした。

本理論の実証のため、先行研究の手法との違いを定量的に明らかにすることも試みた。

3. 研究の方法

次の 3 項目について研究を実施した。

(1) 表皮効果抑制と直流抵抗を総合的に評価した最適構造の設計方法の検討

(2) 伝送線路試作と特性評価による実証

(3) 負の透磁率特性を対象とした積層伝送線路の電磁界理論の確立

各実験方法とその結果を次項に記載する。

4. 研究成果

(1) 表皮効果抑制と直流抵抗を総合的に評価した最適構造の設計方法の検討

本実験の前提として、本研究における表皮効果抑制の原理に触れる。

図 1 に本研究の特徴を示す伝送線路構造の模式図を示す。本研究の構造は、同図に示す

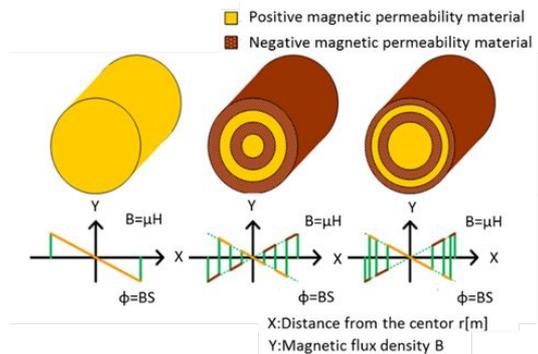


図 1 本研究の伝送線路構造を説明する線路断面図(上)および磁束密度分布(下)の模式図

3 つの線路構造の内、右側に示す構造であり、外側の層ほど積層厚さがやや薄くなる傾向がある。正 / 負の透磁率材料の比透磁率を +1 / -1 と仮定した場合に、山口らの先行研究の理論では積層厚さが 1:1 となる同図中央の構造になるのに対し、本研究では磁束密度分布が外側ほど大きくなることを考慮し、隣接する層の磁束が相殺される積層厚さとする。

本手法による積層構造が先行研究よりも低損失となることは既に報告しており、その構造を表皮効果のみを抑制する最適構造とした。

一方で、負の透磁率材料は、一般的に導体材料である Cu の数 10 倍以上の抵抗率を有し、本研究で対象とした CoZrNb 磁性材料は、抵抗率 $1 \times 10^{-6} \text{ m}$ とされる。Cu 導体の抵抗率 $1.72 \times 10^{-8} \text{ m}$ に対し、約 60 倍である。高い抵抗率材料を使用すれば、表皮効果を抑制できたとしても、線路の実効抵抗が高くなる可能性があるため、材料の抵抗率を考慮した最適構造の設計方法を検討した。

本研究では、三次元有限要素法電磁界シミュレーションソフトウェア (HFSS、ANSYS 社製) を使用し、上記の Cu 導体と CoZrNb 磁性材料の積層線路を想定して、それぞれの抵抗率を代入し、比透磁率は +1 / -1 であると仮定して、設計方法の検証を行った。

抵抗率の高い、負の透磁率材料を多く使用すれば直流抵抗値が高くなることから、先ず上記の表皮効果のみを抑制する最適構造を基準として、負の透磁率材料の使用割合を減じていくことで、実効抵抗が最小となる最適な構造を導出した。

図 2 は、シミュレーションの対象とした同軸線路の解析モデルであり、中心導体の直径を 10 μm とし、外側導体は、線路の特性インピーダンスが 50 となるように、内径 23 μm とした。線路長は 100 μm とした。

図 3 にシミュレーション結果を示す。図 3 は、周波数 3GHz とし、上述の各材料の透磁率および抵抗率を設定し、表皮効果を最適に抑制する構造 (正の透磁率材料 (導体) 使用割合 57%) を基準に、負の透磁率材料の割合を減じて、導体使用割合 100% となるまでの損失および電流密度分布の変化を検証した。

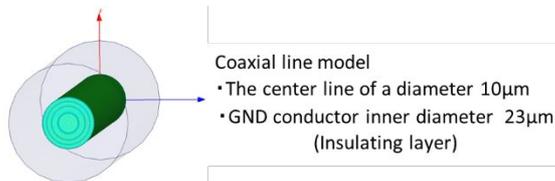


図2 同軸線路の解析モデル図

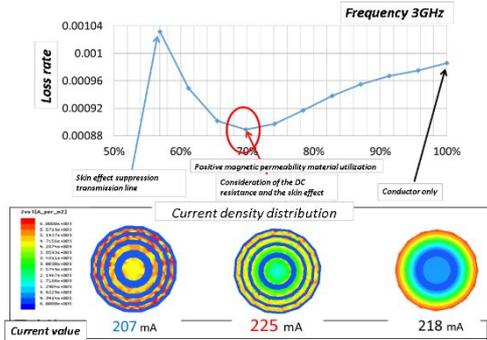


図3 同軸線路における導体使用割合と損失率および電流密度分布の関係(周波数 3GHz、負の透磁率材料の比透磁率 $\mu_r = -1$)

図3より、導体使用割合 100%の電流密度分布は表皮効果が発生していることが分かり、導体使用割合 57%では表皮効果が抑制され、導体内部まで電流が流れている様子が分かる。しかしながら、抵抗率の高い負の透磁率材料の割合が多い場合は、実効抵抗が高くなってしまったため、損失が最小とはならないことが分かった。損失が最小となる構造は、この条件において導体使用割合 70%であった。

以上より、各材料の透磁率および抵抗率、周波数などの条件により、損失が最小となる積層構造をそれぞれ算出することができ、電磁界シミュレーションを使用すれば最適構造を設計できることが分かった。

(2)伝送線路試作と特性評価による実証

前記の最適構造の検証結果を踏まえて、負の透磁率材料を使用した伝送線路の試作を行い、特性評価を行った結果を示す。

本研究では、導体材料に Cu、負の透磁率材料に CoZrNb を用いて、スパッタ法により積層製膜し、フォトリソグラフィによりパターンニングして、コプレーナ線路を形成した。

なお、CoZrNb 膜の強磁性共鳴周波数は約 1GHz であり、LLG 方程式により算出される複素比透磁率によれば、周波数 3GHz で比透磁率が約 -90、10GHz で約 -7 とされている。

コプレーナ線路は、線路長 2.5mm、線路幅 15μm、線路と GND の間隔 10.1μm、積層膜の合計厚さを 3.0μm とし、50 線路を設計した。

線路構造は次の 3 種類を作製して比較した。Cu 導体のみの線路、先行研究の方法により設計した (CoZrNb/Cu)₆/CoZrNb の計 7 層構造の線路、本研究の方法により設計した同 7 層構造の線路とした。周波数 10GHz の比透磁率を用いて、最適構造を設計した。

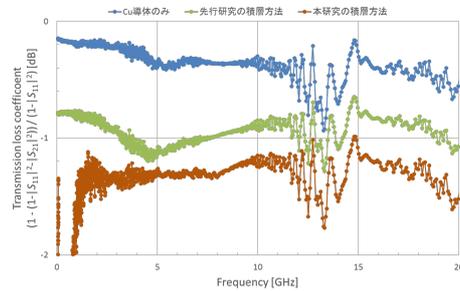


図4 Cu/CoZrNb 積層コプレーナ伝送線路の特性評価結果

図4に試作した Cu/CoZrNb 積層コプレーナ伝送線路の特性評価結果を示す。測定には、ネットワークアナライザ (HP8720D) および高周波プローブ (GGB 社製ピコプローブ、40GHz) を使用した。結果より、電極パッドや高周波プローブの接触状況の影響により、微小な損失を区別できる測定結果が得られなかった。本研究の対象となる高周波の微小な線路損失を測定するためには、電極パッドの影響等を差し引くための高周波測定技術を導入する必要があることが分かった。

(3)負の透磁率特性を対象とした積層伝送線路の電磁界理論の確立と表皮効果抑制メカニズムの考察

上述の設計方法は、電磁界シミュレーションを用いる必要があり、多大な計算時間と計算機リソースが必要であり、多様な実施例の最適設計を行うことは難しい。

本節では、電磁気学の理論的アプローチにより、最も単純な円形断面構造の線路を対象に、電磁界理論を確立し、表皮効果抑制メカニズムを考察した。

図5に、対象とした同心円状の円形多層伝送線路の構造モデルを示す。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。半径 a [m] の第 1 層に正の透磁率材料 (導電率 σ_1 、透磁率 $\mu_1 > 0$) を、半径 b [m] の第 2 層に負の透磁率材料 (導電率 σ_2 、透磁率 $\mu_2 > 0$) 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)および式(2)により算出できる。

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

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

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_0 および J_1 は Bessel 関数を示す。

図6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 $b = 7\mu\text{m}$ 、周波数 $f = 3\text{GHz}$ とし、2つの材料の導電率を Cu と同等 ($\sigma_1 = \sigma_2 = 5.81 \times 10^7 \text{S/m}$) 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。

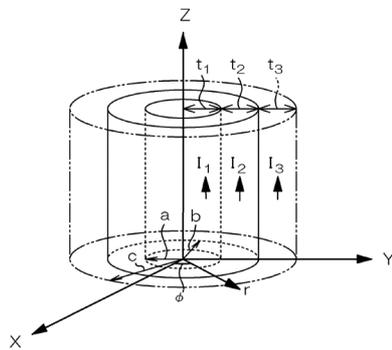
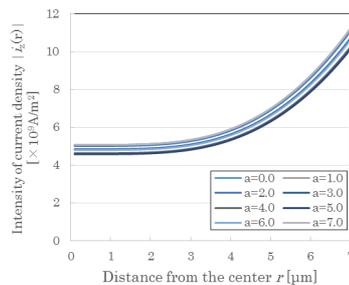
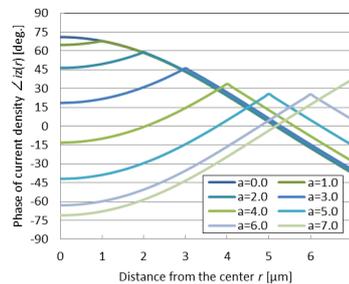


図5 円柱伝送線路の構造模式図



(a) 電流密度の大きさの分布



(b) 電流密度の位相の分布

図6 円形2層伝送線路の電流密度分布
(周波数 3GHz、線路直径 14 μm 、各材料の抵抗率 $=1.72 \times 10^{-8} \text{ m}$ 、比透磁率 $=+1$ および -1)

図6より、第1層の半径を $a = 0 \sim 7 \mu\text{m}$ に変化させた場合、図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。

(4)まとめ

本研究により、負の透磁率特性を用いた表皮効果抑制技術の最適設計を改善することができ、少ない積層数でも損失低減効果が高めることが可能となる。同電磁界理論の確立により、比較的簡単に精密な低損失設計を行うことができ、今後の技術の発展に有効であると考えられる。現状、表皮効果を理由に高周波抵抗の増大をやむなしと捉える常識を覆し、表皮効果を抑制可能な高周波線路の実現により、次世代の高速通信や高周波応用のブレイクスルーとなることが期待される。

<引用文献>

Yamaguchi et al.: MWE 2008 Microwave Workshop Digest, 207-210 (2008).

Mizuno et al.: The Papers of Technical Meeting on Magn., IEE Jpn., MAG-06-82 ~ 87, 7-15 (2006).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

(1) 森山竜太、中山英俊、清野雄貴、湯澤凌芽、川久保志朗：負の透磁率材料を用いた高周波伝送線路の低損失化、エレクトロニクス実装学会アカデミックプラザ講演論文集2016、査読無、AP-10、2016、1-5

(2) 清野雄貴、川久保志朗、湯澤凌芽、中山英俊、中島利郎：負の透磁率材料を用いた高周波伝送線路の低損失化、電気学会研究会資料、査読無、MAG-15-165~174、2015、51-56

(3) 清野雄貴、川久保志朗、中山英俊、曽根原誠、佐藤敏郎：負の透磁率材料を用いた高周波伝送線路の低損失化、エレクトロニクス実装学会アカデミックプラザ講演論文集2015、査読無、AP-26、2015、1-7

〔学会発表〕(計6件)

(1) 森山竜太、中山英俊、清野雄貴、湯澤凌芽、川久保志朗：負の透磁率材料を用いた高周波伝送線路の低損失化、エレクトロニクス実装学会アカデミックプラザ2016、2016年6月1日~3日、東京国際展示場(東京都江東区)

(2) 湯澤凌芽、清野雄貴、川久保志朗、中山英俊、中島利郎：負の透磁率材料を用いた高周波伝送線路の低損失化、平成27年度電気学会東海支部学生発表会、2016年2月11日、信州大学工学部(長野県長野市)

(3) 清野雄貴、川久保志朗、湯澤凌芽、中山英俊、中島利郎：負の透磁率材料を用いた高周波伝送線路の低損失化、電気学会マグネティックス研究会、2015年11月27日、富山工業高等専門学校(富山県富山市)

(4) 清野雄貴、川久保志朗、湯澤凌芽、中山英俊：負の透磁率材料を用いた高周波伝送線路の低損失化、東北大学電気通信研究所平成27年度スピニクス特別研究会、2015年11月19日、信州大学工学部(長野県長野市)

(5) 中山英俊：高周波線路の表皮効果抑制・低損失化技術~負の透磁率利用~、イノベーション・ジャパン2015、2015年8月27日~28日、東京国際展示場(東京都江東区)

(6) 清野雄貴、川久保志朗、中山英俊、曽根原誠、佐藤敏郎：負の透磁率材料を用いた高周波伝送線路の低損失化、エレクトロニクス実装学会アカデミックプラザ2015、2015年6月3日~5日、東京国際展示場(東京都江東区)

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

(1) 名称：伝送線路、配線基板、及び、これらを用いた高周波回路、並びに、伝送線路の設計方法

発明者：中山英俊、佐藤敏郎、曾根原誠、吉原拓実、川久保志朗、清野雄貴、湯澤凌芽

権利者：独立行政法人国立高等専門学校機構

種類：特許

番号：特願 2016-073215

出願年月日：2016 年 3 月 31 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nagano-nct.ac.jp/teacher/nakayama/>

6．研究組織

(1)研究代表者

中山 英俊 (Nakayama, Hidetoshi)

長野工業高等専門学校・電子制御工学科・
准教授

研究者番号：10390452