

令和 2 年 2 月 26 日現在

機関番号：53601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14674

研究課題名(和文) 伝送線路の表皮効果損失の抑制理論の検証および最適設計方法の確立

研究課題名(英文) Theoretical Verification of Skin Effect Loss Suppression of Transmission Line and Establishment of Most Suitable Design Method

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

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)：本研究は、高周波伝送線路の低損失化を目的として、負の透磁率材料を用いて表皮効果損失を抑制するための理論を確立し、幾つかの低損失化の設計指針を得ることができた。研究成果より、円形および矩形多層構造の電流密度分布等を算出する理論を確立し、複素透磁率の虚部(磁性材料損失)の影響も加味できるようになった。種々の材料パラメータに対して、低損失な積層方法の設計指針を得ることができた。円形と矩形の相違点を明らかにできた。産業課題である導体の表面粗化の影響への対策を検証するための基礎的検討を行うことができ、電流密度分布に改善効果が見られた。伝送線路の試作実験を行い、約5%の損失低減効果を見積もることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

円形および矩形多層構造の伝送線路の電磁界理論により、電界、磁界、電流密度、損失等を理論式で求められるようになり、電磁界理論式の学術的価値は高い。従来の有限要素法シミュレーションでは設計に膨大な計算時間を要したが、理論式では比較的簡単に計算できるため、詳細な最適設計を検討することができる。このため、様々な材料特性に対して多層構造の最適な設計寸法を得ることができ、産業応用面で社会的意義も大きい。産業課題である導体の表面粗化の影響への対策を検証できるようになり、従来、不可避であった表皮効果の影響を抑制可能なことから、次世代高速通信のブレイクスルーになることが期待される。

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, DC resistance and magnetic resonance loss comprehensively has found by using electromagnetic field theory and FEM (finite element method). On the other hand, based on electromagnetic theory, theory of minimum loss design method in rectangular 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：表皮効果 高周波伝送線路 損失 負の透磁率材料 複素透磁率 抵抗率 Cu導体 NiFe磁性体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

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 $2.1 \mu\text{m}$ 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。低周波でも、線路の断面積が大きい場合は、同様であり、表皮効果による影響はあらゆる機器に関わる。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、表皮効果の根本的な原因であ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。

これに対して、中山らが伝送線路内部の磁束密度分布に着目し、更に低損失化を図るために円形多層線路構造の電磁界理論に基づく構造設計を提案し、電流密度分布および直流抵抗を考慮した設計により、更なる低損失化を実証した。一方で、実用的な高周波基板に使用される伝送線路は、上述の円形線路構造ではなく矩形線路構造が多いため、矩形多層線路構造の電磁界理論に基づいた構造設計が必要であった。更に、プリント配線基板の産業課題とされる銅箔表面粗化による損失増大の影響への対策を検証し、導体損失低減課題を解決する必要があったため、本研究の理論を適用し、本技術の実用化のための基礎的検討を行うことを試みた。

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、従来の円形多層線路構造の電磁界理論を展開させ、未解決の矩形多層線路構造の電磁界理論による低損失な構造設計を確立することを目的とした。更に、これまで考慮されていなかった複素透磁率の虚部による損失の影響や銅箔表面粗化による損失の影響も考慮することとした。

加えて、実用化を見据えて、従来のスパッタ製膜とは異なるめっき技術により導体線路を試作し、その課題を明らかにすることを試みた。

3. 研究の方法

次の3項目について研究を実施した。

(1) 強磁性共鳴損失(複素比透磁率の虚部)を考慮した構造設計理論の確立

(2) 矩形多層線路構造における電磁界理論の確立および銅箔表面粗化による損失増大の影響への対策の検証

(3) NiFe/Cu めっき多層伝送線路の試作と特性評価による実証

各実験方法とその結果を次項に記載する。

4. 研究成果

(1) 強磁性共鳴損失(複素比透磁率の虚部)を考慮した構造設計理論の確立

本項では、従来研究の円形多層線路を対象として、新たに複素比透磁率の虚部による強磁性共鳴損失を考慮して検討した。

図1に円形多層線路構造の模式図、式(1)～式(9)に同構造に基づく電磁界理論計算式を示す。

$$i_{z1}(r) = \frac{k_1 I_1 J_0(k_1 r)}{2\pi r_1 J_1(k_1 r_1)} \quad (1)$$

$$i_{z2}(r) = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \cdot \frac{J_0(k_1 r_1)}{J_0(k_2 r_1)} \cdot \frac{k_1 I_1 J_0(k_1 r)}{2\pi r_1 J_1(k_1 r_1)} \quad (2)$$

$$i_{z3}(r) = \frac{J_0(k_2 r_2)}{J_0(k_1 r_2)} \cdot \frac{J_0(k_1 r_1)}{J_0(k_2 r_1)} \cdot \frac{k_1 I_1 J_0(k_1 r)}{2\pi r_1 J_1(k_1 r_1)} \quad (3)$$

$$i_{z4}(r) = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \cdot \frac{J_0(k_1 r_3)}{J_0(k_2 r_2)} \cdot \frac{J_0(k_2 r_2)}{J_0(k_1 r_1)} \cdot \frac{k_1 I_1 J_0(k_1 r)}{2\pi r_1 J_1(k_1 r_1)} \quad (4)$$

$$k_n^2 = -j\omega\sigma_n\mu_n \quad (5)$$

$$J_n(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m!(n+m)!} \left(\frac{z}{2}\right)^{(n+2m)} \quad (6)$$

$$Loss_{con} = \int_{r_{n-1}}^{r_n} \frac{|i_{zn}(r)|^2}{\sigma_n} \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (7)$$

$$Loss_{mag} = \int_{r_{n-1}}^{r_n} \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \mu_n'' \cdot H(r)^2 \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (8)$$

$$Loss_{all} = Loss_{con} + Loss_{mag} \quad (9)$$

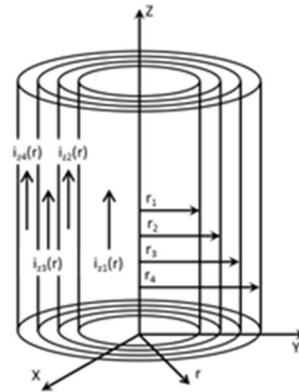


図1 円形多層線路構造の模式図

本項では、円形積層断面構造の線路を対象に、図1に示した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を式(1)～(6)により算出し、式(7)で銅損が計算できる。従来研究では未対応であった磁性材料の複素透磁率の虚部による磁性損失は式(8)で計算でき、式(9)により銅損と磁性損失を合わせた損失を評価でき、低損失な積層構造の設計を得ることができる。

2層モデルにおいて、負の透磁率材料の複素透磁率を考慮した検討を行った結果を図2および図3に示す。負の透磁率材料の比透磁率の大きさを1とし、実部を-1～0、虚部を0～1に変化させることで、 Q 値($Q = \mu_{r''} / \mu_{r'}$)を- から0まで変化させ、各種損失を比較した。また、電磁界理論の比較検証のため、三次元有限要素法による高周波電磁界シミュレーションソフトHFSSを用いた検証を行った。 Q 値を変化させたときの損失割合を比較した。

図2に Q 値の変化に対する各種損失の関係の計算結果を、図3に理論式計算とHFSSの損失の比較結果を示す。図2より Q 値と磁性損失の対応関係が得られ、図3より本理論による計算の妥当性を検証できた。

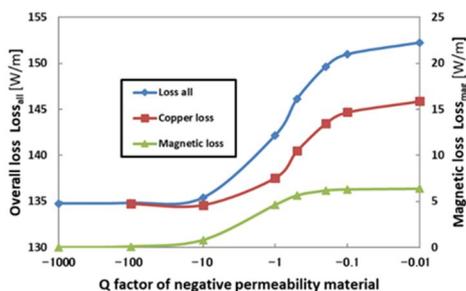


図2 円形多層線路構造における負の透磁率材料の Q 値と伝送線路の損失の関係 (周波数1GHz、負の透磁率材料の比透磁率の大きさ $|\mu_r| = 1$ 、 $Q = \mu_{r''} / \mu_{r'}$ = - ~0)

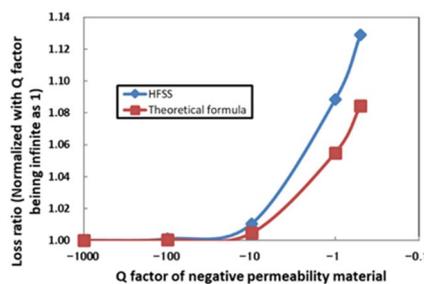


図3 円形多層線路構造における負の透磁率材料の Q 値と伝送線路損失の関係 (理論式と電磁界シミュレーションの比較)

(2) 矩形多層線路構造における電磁界理論の確立および銅箔表面粗化による損失増大の影響への対策の検証

本項は、矩形多層線路を対象として、電磁界理論式を適用し、損失低減効果を検討した。

本項では、矩形積層断面構造の線路を対象に、図4に示した電磁界モデルで検討した。幅方向を無限大と仮定した薄膜積層状の多層線路の電流密度等を式(10)～(13)により算出し、式(14)で銅損および磁性材料の複素透磁率の虚部による磁性損失を計算でき、式(15)により銅損と磁性損失を合わせた損失を評価でき、低損失な積層構造の設計を得ることができる。

絶縁体基板上に導体線路を実装する場合、銅箔表面粗化の影響を考慮する必要があるため、本研究では、矩形多層伝送線路の電磁界理論に基づき、銅箔表面粗化による損失の影響を加味した矩形多層伝送線路の損失低減の効果を基礎的に検討した。

図4の5層構造モデルにおいて、導体材料としてCu(導電率 5.81×10^7 S/m)を想定し、中心の負透磁率材料には、導電率 σ_1 がCuと同等で、比透磁率が $\mu_{r2} = -1$ である仮想的な材料を設定し、第2層目にCuを設定し、最外層に厚さ $1 \mu\text{m}$ の表面粗化層を仮定して、その導電率 σ_3 をCuの0.5倍(2.91×10^7 S/m)に設定して検討した。検討条件は、周波数 $f = 1$ GHz、中心から最外層までの厚さ $y_{\text{max}} = 6 \mu\text{m}$ とし、中心の負透磁率材料の積層条件 y_1 の厚さを変化させて損失の低減効果を検討した。結果として、 $y_1 = 4.03 \mu\text{m}$ の場合に損失が最小となり、Cuおよび表面粗化層のみのモデルと比較して、損失が約36%低減できることが確認できた。

図5に、銅箔表面粗化を考慮した場合の電流密度分布を示す。負透磁率材料の適用により、銅箔表面粗化を考慮しても全体の電流密度の偏りを低減できることが分かった。

$$E_{zn}(y) = A_n e^{+k_n y} + B_n e^{-k_n y} \quad (10)$$

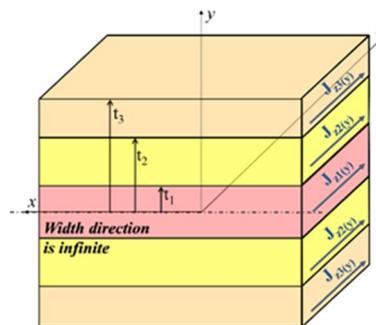
$$J_{zn}(y) = \sigma_n E_{zn}(y) \quad (11)$$

$$H_{xn}(y) = -\frac{k_n}{j\omega\mu_n} (A_n e^{+k_n y} - B_n e^{-k_n y}) \quad (12)$$

$$k_n^2 = j\omega\sigma_n\mu_n \quad (13)$$

$$Loss_n = \int_{y_{n-1}}^{y_n} \frac{|J_{zn}(y)|^2}{\sigma_n} dy + \int_{y_{n-1}}^{y_n} \frac{\omega\mu_n'' |H_{xn}(y)|^2}{2} dy \quad (14)$$

$$Loss = \sum_{i=1}^n Loss_i \quad (15)$$



- Positive permeability material(Cu)
- Negative permeability material
- Surface roughening(Cu)

図4 矩形多層線路構造の模式図

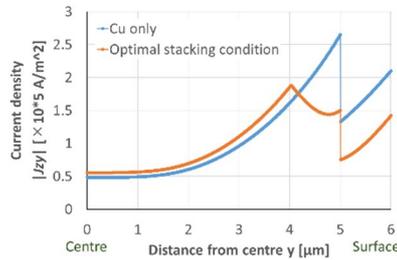


図5 銅箔表面粗化を想定した矩形多層線路構造における電流密度分布の一例
(周波数 1GHz、負透磁率材料の比透磁率 $\mu_{rn} = -1$)

(3)NiFe/Cu めっき多層伝送線路の試作と特性評価による実証

本項では、従来研究のスパッタリング製膜に対して、めっき製膜による導体/磁性体多層線路を試作し、その効果を検証した。

誘電体基板上に、図6に示されるように0.51 μm 厚のCu膜と0.25 μm 厚のNiFe膜を交互にめっき製膜し、12.6 μm 厚のマイクロストリップ線路を作製した。NiFe/Cu多層マイクロストリップ線路は、250 μm 厚のプリント基板($\epsilon_r=3.2$, $\tan \delta=0.002$ @10 GHz)上に製膜され、特性インピーダンスが50 Ω となるように幅609 μm 、長さ40mmの信号線となるようにパターン加工した。

試作したNiFe/Cu多層マイクロストリップ線路はベクトルネットワークアナライザを用いて挿入損失を測定した。図7に試作したNiFe/Cu多層マイクロストリップ線路の挿入損失の測定結果を、同じ厚さ・同じ長さのCu単層線路と比較して示す。挿入損失は、どちらの線路も周波数に対してほぼ直線的であり、周波数25GHzまで0.7dBより小さかった。周期的な変動(1dB未満)は、マイクロストリップ線路のコネクタ部の不完全なインピーダンスマッチングによるものと考えられる。測定結果では、Ni-Fe/Cu多層の挿入損失は、Cu単層より0.05dB大きかった。

ただし、同材料特性を用いて電磁界シミュレーションを行った検討によると、15 GHz付近において、NiFe/Cu多層伝送線路の挿入損失がCu単層よりも5%程度小さくなると見積もられた。挿入損失の測定結果が大きくなった原因は、めっき磁性膜の大きなダンピング定数($\alpha=0.1$)とそれに付随する15GHz近傍の透磁率の虚部の大きさが起因していると考えられる。今後、透磁率の虚部が小さく、ダンピング定数が小さなめっき磁性膜が得られれば、将来的に、表皮効果抑制による挿入損失の低減がより顕著になると考えられる。

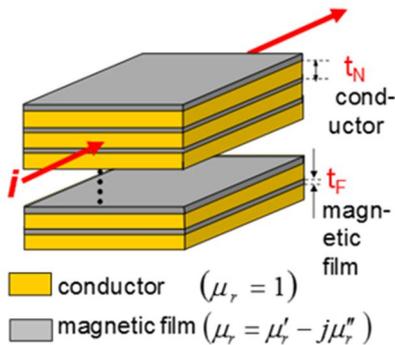


図6 導体/磁性体多層伝送線路の構成

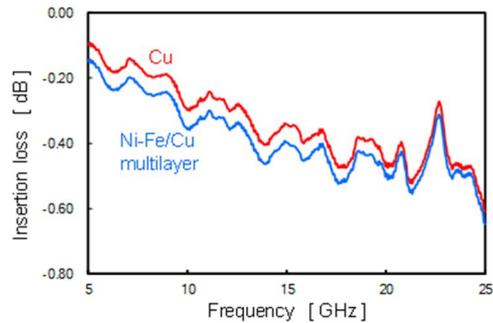


図7 試作したNiFe/Cu多層マイクロストリップ線路の挿入損失

(4)まとめ

本研究により、次のことを実施することができた。

円形伝送線路理論では、従来考慮していなかった複素透磁率の虚部(磁性材料損失)の影響を加味できるように改善した。矩形伝送線路理論では、幅方向に無限大の線路を仮定した近似式を確立した。一方で、伝送線路の試作実験については、Cu導体(正の透磁率材料)およびNiFe磁性体(負の透磁率材料)を用いて、めっき製膜により積層し、伝送線路の試作を実施することができ、特性評価を行うことができた。同実験結果により、Cu導体のみの伝送線路と比較して、負の透磁率材料を用いた積層伝送線路は、約5%の損失低減効果が得られた。確立した円形および矩形の伝送線路理論を用いて、表面粗化の影響への対策を検証した。最外層に表面粗化を仮定した高抵抗材料を配置し、中心に通常の導体層を配置し、その中間に負の透磁率材料を配置した場合、負の透磁率材料の配置により、電流密度分布に改善効果が見られ、損失を抑制できることが分かった。

研究期間全体を通じた研究実績として、査読論文1件、国際会議発表1件、特許出願1件、その他、国内学会等での研究発表16件を実施することができた。

< 引用文献 >

Yamaguchi et al. : MWE 2008 Microwave Workshop Digest、2008、207-210

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・マグネティックス研究会、MAG-15-165～174、2015、51-56

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6件)

鮎澤祥史、久保村航大、中山英俊、田中秀登：負の透磁率材料を用いた矩形多層伝送線路の表皮効果損失低減の検討、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 2019、査読無、24_19aca-014、2019、1-5

中山英俊、山口正洋、柳井武志、ラナジット・サイ、北井佑季、佐藤幹男、寒川潮：負透磁率による表皮効果抑制を目的とした NiFe/Cu めっき多層膜伝送線路の特性評価、MWE2018 Microwave Workshop Digest、査読無、WE4B-3、2018、1-4

Yamaguchi Masahiro、Yanai Takeshi、Nakayama Hidetoshi、Sai Ranajit、Fujiwara Hiroaki、Kitai Yuki、Sato Mikio、Sangawa Ushio : Skin Effect Suppressed NiFe/Cu Electroplated Multilayer Wiring for High Data-Rate and Low Delay-Time I/O Interface Board、IEEE Transactions on Magnetics、査読有、54、2018、1-5

DOIコード：10.1109/TMAG.2018.2866126

鮎澤祥史、森山竜太、寺沢巧斗、久保村航大、中山英俊：負の透磁率材料を用いた円形多層伝送線路の表皮効果損失低減の検証、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 2018、査読無、AP-04、2018、1-6

森山竜太、黒川勇太、鮎澤祥史、中山英俊：正/負透磁率材料の積層構造による円筒型伝送線路の高周波損失低減に関する研究、電気学会研究会資料・マグネティックス研究会、MAG-17-039～085、査読無、2017、19-24

森山竜太、黒川勇太、鮎澤祥史、中山英俊：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、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 2017、査読無、AP-30、2017、1-5

[学会発表](計12件)

久保村航大、鮎澤祥史、中山英俊、田中秀登：正/負透磁率材料を用いた積層伝送線路の低損失化に関する理論的検討、平成31年電気学会全国大会、2019

中山英俊、山口正洋、柳井武志、ラナジット・サイ、北井佑季、佐藤幹男、寒川潮：負透磁率による表皮効果抑制を目的とした NiFe/Cu めっき多層膜伝送線路の特性評価、MWE2018 ワークショップ(招待講演)、2018

M. Yamaguchi、T. Yanai、H. Nakayama、Ranajit Sai、H. Fujiwara、Y. Kitai、M. Sato、U. Sangawa : Skin Effect Suppressed Ni-Fe/Cu Electroplated Multilayer Wiring for High Data-Rate and Low Delay-Time I/O Interface Board、Intermag 2018、2018

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称：磁性導電材、これを用いた電気部材、及び磁性導電材の使用方法

発明者：曾根原誠、中山英俊、山口宗太

権利者：国立大学法人信州大学、独立行政法人国立高等専門学校機構

種類：特許

番号：特願 2018-132255

出願年月日：2018年7月12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/>

<https://researchmap.jp/read0202721>

6 . 研究組織

(1)研究分担者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。