

氏名	堀川 健
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第 578 号
学位授与の日付	平成 22 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	非可逆移相右手／左手系複合伝送線路からの漏洩波放射に関する研究
審査委員	(主査)教授 政宗貞男 教授 大柴小枝子 教授 野田 実 准教授 島崎仁司 元教授 秋山正博

論文内容の要旨

電磁波を用いた技術は生活に不可欠のものとなっており、利用形態の多様化にともなってマイクロ波回路に求められる機能・性能も高度化している。第 1 章ではマイクロ波技術の流れと今後の展望を示し、高度化する機能・性能要求に対する 1 つの回答としてのメタマテリアル（新奇な電磁気学的特性を示す人工構造体の総称）の可能性と本研究の意義づけを行っている。

第 2 章では左手系（電界、磁界、波数ベクトルがこの順に左手系）メタマテリアルの具体的な構成法の 1 つである伝送線路型（左手系複合伝送線路）の概念を述べ、単位セルの接続で表現される伝送線路の等価回路モデルを用いて右手／左手系複合伝送線路の分散特性を求めている。単位セルの位相定数および特性インピーダンスが波の伝搬方向依存性をもつ場合の伝送線路の分散関係を定式化して波の伝搬特性に非可逆性が現れることを示し、非可逆的移相特性を有する単位セル構造を提案している。さらに、提案したストリップ線路構造では特定の周波数帯で漏洩波の放射方向が線路内の伝搬方向に依存しないことを示している。

第 3 章では、申請者を含む研究グループにより提案され研究が進められている、フェライト基板上に構成したマイクロストリップ線路による右手／左手系複合伝送線路の構成を提案・試作し、シミュレーションと実験によってその動作特性を調べている。電磁界数値シミュレーションに基づいて、使用するフェライト材料および電磁波周波数に対する伝送線路の構造の最適化を行い、設計に基づいて試作されたマイクロストリップ線路の散乱パラメータを測定して、右手系モードおよび左手系モードの伝搬を確認している。フェライトに直流磁界を印加すると移相特性に非可逆性が生じること、および振幅特性は可逆的であることを示し、移相非可逆特性の印加磁界強度依存性を調べている。さらに、伝送線路を伝搬する電磁波の近傍磁界成分の空間分布を直接測定して位相特性の非可逆性および振幅特性の可逆性を確かめている。また、移相非可逆特性の磁界依存性を測定して、フェライトの磁化特性をモデル化した電磁界シミュレーション結果との定性的な一致を確認している。さらに、複合伝送線路からの漏洩波の放射パターンを測定して、放射される漏洩波が 2 つのモード（伝搬方向）に依存せずブロードサイド方向から約 20 度傾いた同一方向に放射されることを確認して、電磁界シミュレーション結果との一致を確認している。こ

のように、フェライトを使用した移相非対称右手／左手系マイクロストリップ線路をシミュレーションにより最適設計し、設計に基づいて試作した実際の回路においてその基本的動作特性を測定し、移相非対称性を確認して、提案した非対称回路構成の原理検証に成功している。

第4章では非可逆移相右手／左手系複合伝送線路からの漏洩波放射の磁気同調性をシミュレーションおよび実験によって調べている。非飽和領域では線路内での伝搬方向によらず磁界強度に対して直線的な同調特性が得られ、一方飽和領域では特に一方の伝搬方向に対して大きな磁気同調性を示すことが確認された。この結果に基づいて、漏洩波の放射方向を磁気的に走査することを試みている。試作したストリップ線路では漏洩波の放射方向をブロードサイド方向から約20度にわたってビーム走査できることを実験的に示している。また、フェライトの非飽和領域で磁気同調が可能であることが示されている。

第5章ではストリップ線路内の伝搬方向に依存しない同一方向への放射特性を利用して非可逆線路からの漏洩波の放射利得および指向性を改善する構造を提案している。線路の終端を不整合として積極的に反射波を発生させると、サイドローブが現れることなく、一方向伝搬の場合に比べて3dBを越えて放射利得が改善すること、放射指向性も改善されることを電磁界シミュレーションにより示している。

論文審査の結果の要旨

本論文では申請者を含む研究グループ独自の方式である、フェライト基板上のマイクロストリップ線路を利用した右手／左手系複合伝送線路の構成を提案し、原理検証実験を行うとともに、このメタマテリアルの応用について議論している。提案された線路は直流磁界を印加しない場合、その位相特性が入射波（右手系）および反射波（左手系）に対して対称であり、直流磁界を印加すると移相非対称性を発現する。論文では特に、移相非対称性により特定の周波数帯で漏洩波の放射角度が電磁波の伝搬方向に依存しないという特性に注目している。

電磁界シミュレーションにより伝送線路の最適設計を行うとともに、対称および非対称領域における散乱パラメータ、移相特性、近傍磁界成分の空間分布、および線路からの漏洩波放射パターンの解析を行っている。

設計に基づいて試作された伝送線路において移相特性、近傍磁界の空間分布および漏洩波放射パターンの測定を行い、これらをシミュレーション結果と比較して、提案した伝送線路の動作原理の実験的検証に成功している。独自の発想に基づくメタマテリアルの構成提案とその原理検証に成功したことは高く評価できる。

本論文ではさらに、移相定数、分散関係および漏洩波放射パターンの磁気同調特性をシミュレーションおよび実験により詳しく解析している。特に、試作した伝送線路において磁気同調性を利用して漏洩波の放射角度を約20度走査できることを実証したことも高く評価できる。主にフェライトの非飽和領域で磁気同調が可能であることも示されており、これは実用性の面からも重要な結果である。提案された伝送線路では、線路の漏洩波放射特性から、終端を不整合として反射波を積極的に発生させると、放射利得の改善が可能であることが示唆される。これを電磁界シミュレーションにより詳しく解析している。試作した伝送線路では、放射利得の向上が3dBを上回ることが予測されており、今後の実験的検証を経て、実用性の検討へと進むことが期待できる。

以上、本論文において申請者らの独自の発想によるメタマテリアルの構造を提案し、その動作の原理的検証に成功したことは高く評価され、また実用性の面からも、今後の発展が期待できる。本論文の内容は十分な新規性と独創性を有しており、博士論文として優秀であることを審査委員全員が一致して認めた。

申請論文の各章の内容は、査読制度が確立された以下の学術雑誌および国際会議プロシーディングズに掲載されている。これらのうち3編が申請者を筆頭著者とする論文である。

1. T. Ueda, K. Horikawa, M. Akiyama, M. Tsutsumi, "Non-reciprocal phase-shift composite right/left handed transmission lines and their application to leaky wave antennas," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 57, No. 7, pp.1995-2005 (2009).
2. K. Horikawa, T. Ueda, M. Akiyama, "Observation of near field distributions along a nonreciprocal phase-shift composite right/left handed transmission line," Proc. 2008 Asia-Pacific Microwave Conference, J3-9, Hong Kong & Macau, China (2008).
3. K. Horikawa, T. Ueda, M. Akiyama, "Beam steering of leaky wave radiation from nonreciprocal phase-shift composite right/left handed transmission lines," IEICE Trans. on Electron. Vol.E93-C (No.7), pp.1089-1097 (2010).
4. K. Horikawa, T. Ueda, M. Akiyama, "Influence of reflected waves at a terminal of nonreciprocal phase-shift CRLH transmission lines on the leaky wave radiation," Proc. of the 2009 Asia-Pacific Microwave Conference, TU3C-5, Singapore (2009).