

氏名	藤井 重男 ^{ふじい しげお}		
授与学位	博士(工学)		
学位記番号	理工博甲第676号		
学位授与年月日	平成27年9月30日		
学位授与の要件	学位規則第4条1項		
研究科、専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程)物質工学系専攻		
学位論文題目	高周波用磁性体開発と磁気デバイスへの応用に関する研究		
論文審査委員	主査	山口大学 教授	山本 節夫
		山口大学 教授	久保 洋
		山口大学 教授	嶋村 修二
		山口大学 教授	真田 篤志
		山口大学 准教授	浅田 裕法

【学位論文内容の要旨】

携帯電話ではフロントエンドモジュールと呼称される部分に、非可逆回転素子およびアンテナ素子を代表とした高周波デバイスが使用されている。前者は送受信信号の相互干渉防止のための磁気素子で、アイソレータとして知られている。携帯電話の多機能化に伴い搭載部品点数が増え、また機器の薄型化も進展している情勢のもと、当該素子には小型低背型化が求められている。しかし、市場のアイソレータは伝送線に個別の受動部品を設ける集中定数型構造を採用しているため、低背化には対応が困難であった。本研究では、その部品を不要とする分布定数型構造に着目した。この構造は小型化に不向きとされ、深い研究がなされていない。本研究ではこれまでの研究経緯について纏めている。まず低背型構造を設計し、当時の業界製品(高さ1.4 mm)に先駆けて高さ1 mm以下(面積: 7 mm×7 mm)のアイソレータを実現し、機能試作によってその性能を実証したことを報告している。そして、困難とされている小型化が可能な新規構造も提案している。

後者のアンテナでは、最近開始された地上波デジタルTV放送(地デジ)の携帯機器内蔵型受信アンテナを対象としている。利用周波数は携帯電話より低いものの、470 MHzから770 MHzに渡る広い帯域幅への対応が必要とされる。内蔵型としては、市場では電磁波の波長短縮効果を有する高誘電体を用いた小型アンテナが採用され出している。しかし、この帯域での誘電体利用は、高誘電率に起因して共振動作が生じ易くなるため、広帯域化が困難となる。そこで、本研究では、誘電率と透磁率を合わせ持つことから波長短縮効果が高い、酸化物磁性材料(フェライト)を利用した小型アンテナを開発している。誘電率と透磁率が所定帯域で一定な材料を開発することで、従来のアンテナでは困難な広帯域動作が期待できる。本研究では、高周波特性に優れ損失の少ない六方晶フェライト材料に着目している。そして、小型磁性体アンテナを試作することで、機器内蔵型に適用できる実用性能を発現することを明らかにしている。

本論文では以下の5章から成り、上記の研究内容を詳述している。

本研究で対象とした上記二つの磁気デバイスでは、磁性材料の高周波特性が重要であるため、第1章ではまず、磁性体の高周波挙動を概説する。次に、アイソレータのジャイロ磁気効果に

基づく動作原理を、アンテナでの電磁波伝播はMaxwellの法則に従った動作原理であることを、それぞれ概説する。

磁性体を利用した地デジ対応アンテナを開発するに当たって実施した、新規な磁性体の開発については、第2章で詳述している。地デジ帯域の高周波用途に適する材料として六方晶系Y型フェライト($\text{Ba}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}:\text{Co}_2\text{-Y}$)を選定し、1 GHzまでの高周波帯域で低損失な材料を開発したことを述べる。また、損失が磁化挙動における磁化回転機構に関係していることを示唆する。

第3章では、高周波磁気特性の評価方法について考察する。アイソレータに利用されるガーネットフェライト磁性体の高周波損失の指標として、強磁性共鳴半値幅 (ΔH) が評価されるが、低背型アイソレータ開発にあたり、新規に提案された短絡ストリップ線路を用いた簡便な手法に着目し、その妥当性を検証している。一方、高周波磁気特性の評価では複素透磁率が指標とされ、その評価には市販の装置が利用されている。磁性体アンテナ設計においてはこの周波数特性を精度良く評価することが肝要であるため、その評価方法についても考察している。

第4章では、分布定数型構造の小型低背型アイソレータについて詳述する。その端緒として、まず高さ1 mmの低背型アイソレータを開発している。電磁界解析により素子構造を設計し、ガーネットフェライト上に直接、伝送線(中心導体)パターンを描画するプロセスを構築し、5 GHzで動作するアイソレータ素子を試作し、挿入損失が0.65 dBと良好な性能が発現することを検証している。また、平面の伝送線をもつコプレーナ構造サーキュレータも試作し、初めてこの構造での性能を実証している。そして、これら要素技術の構築を基に、分布定数型構造で小型化を実現できる新規素子構造をさらに提案している。

第5章では、機能試作した数種の磁性体アンテナの特性について述べる。磁性体には、第2章で開発した低損失なCuO添加 $\text{Co}_2\text{-Y}$ を採用している。角柱状磁性体の長手方向中心部をCu導体線が貫通した構造で、3 mm×3 mm×30 mmの小型アンテナを試作・評価し、470 MHzから770 MHzまでの広帯域な地デジ対応携帯電話内蔵小型アンテナが実現できたことを報告する。携帯機器用のデバイスの推移は変化が激しいものの、最後に、製造コスト上での優位化を期待し、汎用材のNi-Znスピネルフェライトを用いた新規構造アンテナを提案する。試作・評価を実施し、その可能性を検証している。

【論文審査結果の要旨】

携帯電話において、フロントエンドモジュールと呼ばれる部分には、アイソレータ(送受信信号の相互干渉防止のための磁気素子。非可逆回転素子ともいう)およびアンテナ素子等の高周波デバイスが使用されている。携帯電話の多機能化に伴って搭載部品の点数が増え、機器の薄型化も進展する状況の中で、これらの素子には小型化・低背化が求められている。本研究は、アイソレータとアンテナに注目し、実用的性能を示す素子開発およびその一部に使用する磁性材料の開発を行ったものである。

まず、市場のアイソレータについては、伝送線に個別の受動部品を設ける集中定数型構造を採用しているため、特に低背化への対応が困難であった。本研究では、その部品を不要とする分布定数型構造に着目した。この構造は小型化に不向きとされ、十分な研究はなされていなかった。本研究ではこれまでの研究経緯について纏めた後、まず低背型構造のアイソレータを設計し、業界に先駆けて高さ1 mm以下(面積: 6.5 mm×6.5 mm)のアイソレータを実現し、機能試作によってその性能を実証した。さらには、小型化が可能な新規構造のアイソレータの提案も行った。

アンテナについては、最近開始された地上波デジタルTV放送の携帯機器内蔵型受信アンテナを研究開発の対象とした。利用周波数は携帯電話より低いものの、470 MHzから770 MHzに渡る非常に広い帯域幅への対応が必要である。内蔵型としては、市場では電磁波の波長短縮効果を有する高誘電体を用いた小型アンテナが採用されているが、この帯域での誘電体利用は、高誘電率に起因して共振動作が生じ易くなるため、広帯域化が困難であった。そこで、本研究では、誘電率と透磁率を合わせ持つことから波長短縮効果が高い、酸化物磁性材料(フェライト)を利用した小型アンテナを開発した。誘電率と透磁率が所定帯域で一定な材料を開発することで、従来のアンテナでは困難な広帯域動作が期待できる。本研究では、高周波特性に優れ損失の少ない六方晶フェライト材料に着目し、素子に使用するとともに汎用のフェライト材料使用の可能性も追及しつつ、小型磁性体アンテナを試作することで、機器内蔵型に適用可能な実用性能を達成できることを明らかにした。

本論文は以下の5章で構成され、上記の研究内容を詳述している。

本研究で対象とした上記二つの磁気デバイスでは、磁性材料の高周波特性が重要であるため、第1章ではまず、磁性体の高周波挙動を概説している。次に、アイソレータのジャイロ磁気効果に基づく動作原理を、アンテナでの電磁波伝播はMaxwellの法則に従った動作原理であることを、それぞれ概説している。

第2章では、磁性体を利用した地上波デジタルTV放送受信アンテナを開発するにあたって実施した、新規な磁性体の開発について詳述している。この帯域の高周波用途に適する材料として六方晶系Y型フェライト($\text{Ba}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}:\text{Co}_2\text{-Y}$)を選定し、1GHzまでの高周波帯域で低損失な材料を開発したことを述べている。また、損失が磁化挙動における磁化回転機構に関係していることを示唆した。

第3章では、高周波磁気特性の評価方法について考察している。アイソレータに利用されるガーネットフェライト磁性体の高周波損失の指標として、強磁性共鳴半値幅(ΔH)が評価されるが、低背型アイソレータを開発するにあたり、新規に提案された短絡ストリップ線路を用いた簡便な手法に着目し、その妥当性を検証している。一方、高周波磁気特性の評価では複素透磁率が指標とされ、その評価には市販の装置が利用されている。磁性体アンテナ設計においてはこの周波数特性を精度良く評価することが肝要であるため、その評価方法についても考察している。

第4章では、分布定数型構造の小型低背型アイソレータの研究開発の詳細を述べている。その端緒として、まず高さ1 mmの低背型アイソレータを開発した。電磁界解析により素子構造を設計し、ガーネットフェライト上に直接、伝送線(中心導体)パターンを描画するプロセスを構築し、5 GHzで動作するアイソレータ素子を試作し、挿入損失が0.65 dBと良好な性能が発現することを検証した。また、平面の伝送線をもつコプレーナ構造のアイソレータも試作し、初めてこの構造での性能を実証した。さらにはこれら要素技術の構築を基に、分布定数型構造で小型化を実現できる新規素子構造を提案している。

第5章では、機能試作した数種の磁性体アンテナの特性について述べている。一部のアンテナには、磁性体として第2章で開発した低損失なCuO添加Co₂-Yを採用した。角柱状磁性体の長手方向中心部をCu導体線が貫通した構造で、3 mm×3 mm×30 mmの小型アンテナを試作・評価し、470から770 MHzまでの広帯域な地上波デジタルTV放送の受信に対応した携帯電話内蔵小型アンテナを実現した。さらには、製造コスト上での優位化を期待し、汎用材のNi-Znスピネルフェライトを用いた新規構造のアンテナを提案し、試作・評価を実施して、その可能性を検証している。

以上の研究成果は、学術面はもとより産業応用上でも価値がある。

公聴会における主な質問内容は、各種提案アンテナにおいて六方晶系Y型フェライトを使用する必要性、フェライトの高周波での磁気特性とアイソレータの非可逆回転性発現との関係、アイソレータにおける非線形性の検討の必要性、提案アイソレータにおけるマージンの確保などについてであった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値すると判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計 4 編、参考論文 計 22 編)
(これらは全て査読付き)

- 1) S. Fujii, S. Ohnuma, F. Matsumoto, H. Fujimori and T. Masumoto: "Magnetic Properties and Structure and Structure of FeN/AlN Multilayered Films," Journal of Magnetism Society of Japan, Vol. 16, No. 2, pp. 269-272 (1992).
- 2) S. Fujii, S. Ohnuma, H. Fujimori and T. Masumoto: "Soft Magnetic Properties of Fe-N Films Composed of Two Phases," IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan, Vol. 9, No. 2, pp. 110-115 (1994).
- 3) Shigeo Fujii, Koji Wakamatsu, Hiroshi Satoh, Setsuo Yamamoto: "Low-Loss Co₂-Y Ferrites with Added CuO Sintered in Air for High Frequency Application," Materials Sciences and Applications Vol. 5, No. 13, pp. 984-989 (2014).
- 4) Shigeo Fujii, Kaihei Nishijima, Hiroshi Satoh, Setsuo Yamamoto: "Co₂-Y ferrite modified by CuO addition applied to a terrestrial broadcasting antenna," Journal of magnetism and magnetic materials, Vol. 379, pp. 256-259 (2014).