

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420333

研究課題名(和文) マルチバンド対応超小型非可逆回路素子の開発

研究課題名(英文) Development of very small isolators for multiband operation

研究代表者

山本 節夫 (YAMAMOTO, Setsuo)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30182629

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：強磁性共鳴近傍を動作点とすることで、大きな波長短縮効果と正・負円偏波に対する透磁率差が大きくとれることから超小型化が可能な非可逆回路素子(アイソレータ)に関して、マルチバンド化の可能性を明らかにした。

アイソレータの最適素子設計方法を明らかにするとともに、複数のバンドに対応するためのバイアス磁場可変機構の提案し、その有効性を検証した。フェライト円板をコプレーナウエーブガイド伝送線路上に配置したタイプのアイソレータについては、IMT-Advancedシステムの3つのバンド(4 GHz帯、2 GHz帯、800 MHz帯)において実用的なレベルの良好な非可逆伝送特性が得られることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The feasibility of multiband operation of a nonreciprocal transmission device for electromagnetic wave (isolator) was investigated. The isolator can be drastically miniaturized due to large wavelength shortening effect and large permeability difference for clockwise and counterclockwise circularly polarized electromagnetic wave, which are realized by setting the operation point of the isolator in the vicinity of ferromagnetic resonance of ferrite.

Optimal design flow of the isolator was established, and the magnetic bias field variable mechanism for multiband operation of the isolator was proposed, and the effectiveness was proved. In the isolator with a ferrite magnetic disk on a coplanar wave guide transmission line, practically utilizable nonreciprocal transmission characteristics was achieved in 4 GHz, 2 GHz and 800 MHz bands in IMT-Advanced system.

研究分野：電子デバイス工学

キーワード：アイソレータ 小型化 低背化

1. 研究開始当初の背景

(1) 非可逆伝送素子(アイソレータ)は、バイアス磁場が印可されたフェライト中における磁気モーメントの歳差運動(ジャイロ磁気効果)と電磁波の磁場との相互作用を利用して、マイクロ波などの電磁波を1方向にのみ通し、逆方向への通過は阻止する、いわゆる電磁波に対して非可逆的な伝送特性を持つ素子である。アイソレータは移動体通信機器の送信回路の最終増幅段とアンテナスイッチとの間に配置されて、アンテナから逆流する高周波電力から送信部を保護する、アンテナ側の負荷変動を抑制して、送信機電力増幅段の電源効率の低下を防止し、消費電力を減少させる、高品質な通信を確保する、通信に不可欠な重要素子である。通信機器の小型化・薄型化・多機能化が急速に進み、内蔵される素子についても小型化・低背化・モジュール化・集積化が強く要求されている。ところが、現行の携帯電話端末用アイソレータは、世界最小サイズの製品においても $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 1.2\text{mm}$ ほどの大きさがあり、他部品と比較すると小型化・低背化が遅れていた。

(2) 研究代表者は、フェライトの強磁性共鳴近傍を動作点とすることで、正・負の円偏波に対する透磁率の差が大きくとれるとともに、大きな実効透磁率による顕著な波長短縮効果が期待できることに着目して、容積が小さく、集積化が容易な構造のアイソレータを既に提案した。引用文献 1-3)

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者提案の強磁性共鳴近傍を動作点とするアイソレータについて、これまでの研究成果を発展させて、マルチバンドへの対応の可能性を追求するとともに、その具体的な応用例として第4世代移動通信システム(IMT-Advanced)規格に適応したマルチバンド動作が可能なアイソレータを設計・実証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 平成25年度には、主にマルチバンド化の実現に不可欠なバイアス磁場可変機構の設計・試作を行なう。

アイソレータのトップマウント型およびボトムマウント型の両方について、マルチバンド化を実現するための基本的な設計理論の構築に向けた研究を開始する。

マルチバンド化の実現に必要なバイアス磁場可変機構について、可変メカニズムの設計と、バイアス磁場可変機構の具体的な試作・評価を行う。

IMT-Advanced 用での使用周波数帯の2つをカバーするマルチバンド化を実現するためのアイソレータ素子設計を実施する。

(2) 平成26年度は、IMT-Advanced 用デュアルバンド対応のアイソレータの設計と試作を行う。

平成24年度の素子設計結果をベースに、素子サイズが $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 以下で、IMT-Advanced システムの2つのバンドをカバーするアイソレータを設計し、素子試作による実証を行う。

(3) 最終年度である平成27年度には、トリプルバンド対応のアイソレータの設計と試作を行う。また、研究期間全体を通して、マルチバンド対応アイソレータの設計理論を確立する。

素子サイズが $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 以下で、IMT-Advanced システムでの3つのバンドをカバーするアイソレータを設計・実証を行う。

3年間のアイソレータの設計・試作・評価を通して、本提案アイソレータのマルチバンド化の設計指針を確立する。

トリプルバンド対応のアイソレータの試作実証が順調に進むようであれば、4バンド対応のアイソレータの設計も試みる。

4. 研究成果

(1) 本研究で対象としたアイソレータの動作原理

研究代表者は低背化を図るために、部品構成が簡素な分布定数型構造に着目し、強磁性共鳴近傍を動作領域としたアイソレータを提案・発表している。

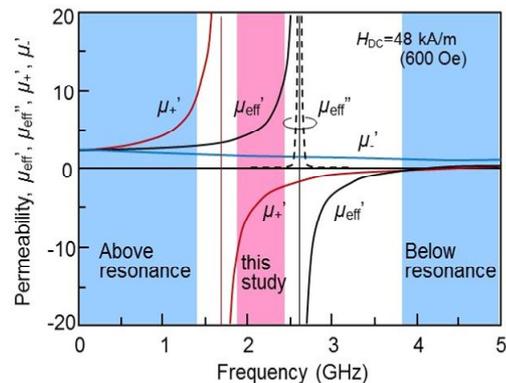


図1 YIG フェライト中での比透磁率の周波数特性。

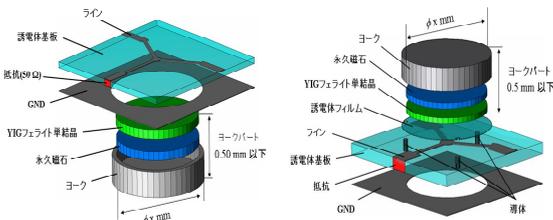
そのアイソレータの動作原理を図1に示す。この図は、600 Oeの直流バイアス磁場を印加したときのYIG(イットリウム鉄ガーネット)フェライト中における比透磁率の周波数特性である。黒い実線が実効透磁率の実部 μ_{eff}' 、黒い点線が実効透磁率の虚部 μ_{eff}'' 、赤い実線が正円偏波透磁率の実部 μ_+ 、青い実線が負円偏波透磁率の実部 μ_- の周波数特性である。アイソレータの動作点を、図中の赤い領域(強磁性共鳴近傍)に設定する。この領域では実効透磁率 μ_{eff}' が大きくなるため、波長短縮効果の影響を大きく受けるこ

とができること、また、正円偏波透磁率と負円偏波透磁率の差 $|\mu_+ - \mu_-|$ が大きくなるため、より短い距離で電磁波を曲げることができるという2つの大きなメリットがあり、結果として、素子の大幅な小型化が可能になる。

この領域を利用するにあたっては磁気損失の影響を考慮しなければならない。そこで、グラフの黒い点線で示しているように、磁気共鳴半値幅 H が小さい YIG フェライトの単結晶を使用することで磁気損失の影響を回避する。

(2) アイソレータの最適素子設計方法

本研究においては、研究代表者が最初に提案したタイプのアイソレータに加えて、その改良版も考案して研究した。



(a) ボトムマウント型 (b) トップマウント型

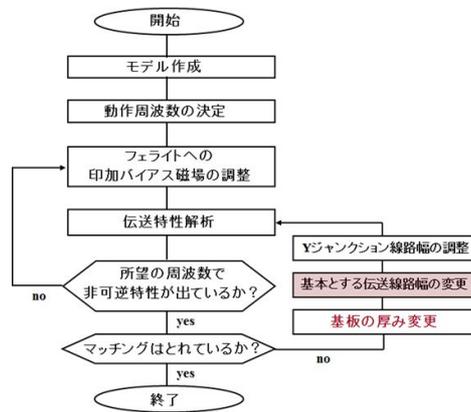
図2 マイクロストリップラインを用いたアイソレータ。

図2の(a)の構造が最初に提案したボトムマウント型アイソレータ、(b)はその改良型のトップマウント型アイソレータである。後者では、伝送線路側に突出部を設けているため、実装の妨げにならない。(a)と(b)ともに伝送線路としてはマイクロストリップライン(MSL)を用いている。

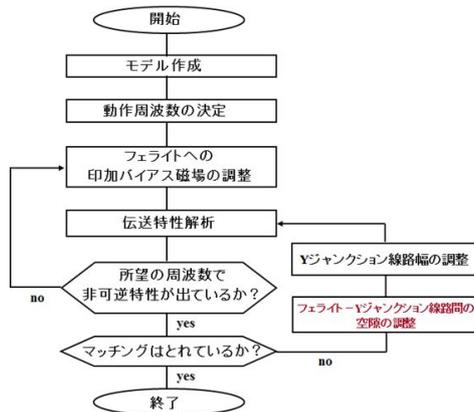
両構造とも、ヨークが接地面(GND)として機能している。ボトムマウント型についてはフェライトだけでなく誘電体基板にも電磁波が伝搬している。トップマウント型については、ヨークをGNDとして機能させるために、基板にスルーホール加工を施し、GNDとヨークをビアで接続する他、フェライト中に電磁波を伝搬させるために基板裏面のGNDを円形に除去している。

有限要素法(FEM)に基づく電磁界シミュレーターによるボトムマウント型とトップマウント型アイソレータの最適素子設計のフローをそれぞれ図3の(a)と(b)に示す。

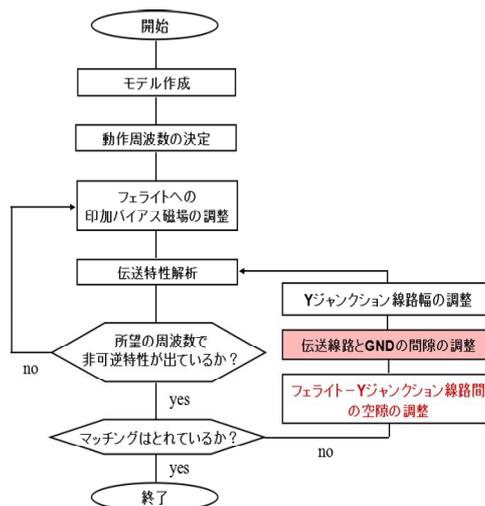
まず、モデルを作製した後、動作周波数など各パラメータを設定し解析を行なう。所望の周波数で非可逆特性が出ていなければフェライトへの印加バイアス磁場を調整し、非可逆特性が確認できたらマッチングを行なう。マッチングの際にボトムマウント型では誘電体基板厚の調整が必要であるが、トップマウント型構造では不要である。また、空隙を設けることでインピーダンス整合をとりやすくなる他、フェライト中での実効透磁率を下げることで磁気共鳴による損失の影響を低減することができる。



(a) MSL ボトムマウント型アイソレータ



(b) MSL トップマウント型アイソレータ



(c) CPW トップマウント型アイソレータ

図3 アイソレータの最適設計のフロー。

研究を進めるうちに、トップマウント型アイソレータは、低い周波数、特に800 MHzあたりの周波数への対応、および広帯域の実現の点で多少難しさがあることがわかってきた。また、基板にスルーホール加工を施し、GND面を円形に除去する必要があるなど、素子作成のプロセスの点でできれば改良したい。そこで、これらの課題に応えるアイソレータとして、線路をマイクロストリップから

コプレーナウエーブガイド(CPW)に変更したトップマウント型アイソレータについて検討を行なった。このタイプの場合には、図2(b)の円形除去したGNDからの電力放射のロスが無いので、非常に良好な結果を得ることができた。

図3の(c)に、CPW トップマウント型アイソレータの最適設計を行う時のフローを示す。まず、モデルを作製した後、動作周波数など各パラメータを設定し解析を行う。所望の周波数で非可逆伝送特性が出ていなければフェライトへの印加バイアス磁場を調整し、非可逆伝送特性が確認できた上で、細かなパラメータの最適化を行い、伝送特性の向上を図る。その際、CPW トップマウント型はトップマウント型同様に素子部のみでチューニングを行うことが可能である。また、伝送線路とフェライトの間にわずかな空隙を設けることでインピーダンス整合を取りやすくなることが分かった。

(3) 複数のバンドに対応するためのバイアス磁場可変機構

マルチバンド化の方法として、YIG フェライトへの印加バイアス磁場の強度を変化させることで動作周波数を変化させることを検討した。

印加磁場可変機構としては、アイソレータの永久磁石とフェライトの間に軟磁性円板を挟み、その直径を変化させることで磁気回路を変化させてフェライトへの印加バイアス磁場を変える。円板の直径を変化させる手法としては、落とし蓋〔特許(特開2009-268872(P2009-268872A))〕からヒントを得た。この原理によって図4のように軟磁性層円板(軟磁性直径可変層)の直径を大きくすると磁束線が水平方向に流れ、磁石背面へ磁束線がショートカットされバイアス磁場を減少させることが可能である。

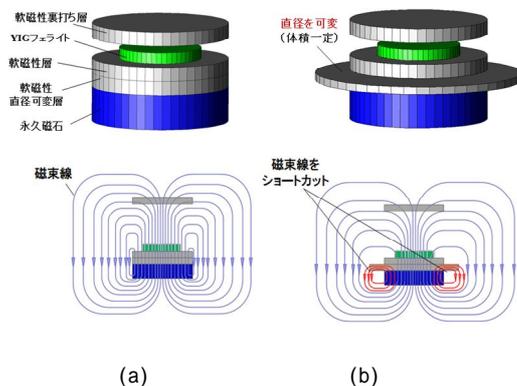


図4 印加磁場可変機構(上図)と磁場分布(下図)。

(a)は軟磁性層(円板)の直径が小さい場合で、(b)は直径が大きい場合

拡大モデルを用いて、磁場解析シミュレーションと実測を比較することでこの磁場可変機構の実証実験を行った。永久磁石にはNd-Fe-B磁石、軟磁性層には78パーマロイを

使用した。軟磁性直径可変層の直径は2.0 mm ~ 4.0 mmの間で変化させた。

磁場解析シミュレーションでは、三次元有限要素法に基づくシミュレータを用いた。軟磁性層の直径を変化させたときの軟磁性層-軟磁性裏打ち層間の磁場強度を図5に示す。

シミュレーションと実測において、直径を大きくすることで軟磁性層間の磁場強度は弱くなり、700 から 400 Oe 程度まで、条件によっては 200 Oe 程度まで可変できることを確認した。

このように、本提案の印加磁場可変機構を用いれば、1つのアイソレータを複数の周波数帯で動作させられる可能性を示した。

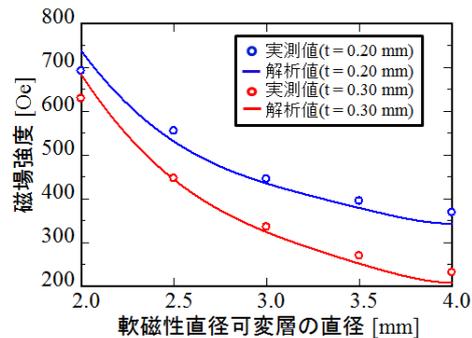


図5 磁場強度の軟磁性直径可変層の直径依存性。

(4) アイソレータのマルチバンド動作

アイソレータの目標仕様として、2 GHz 帯、4 GHz 帯において、実用的な視点から、帯域幅 60 MHz、帯域内挿入損失の最大値 0.8 dB、帯域内アイソレーションの最小値 10.0 dB を設定し、素子サイズは素子径が 2 mm、厚さを 1 mm 未満とした。800 MHz 帯については、非可逆伝送特性発現の可能性を検討する意味で、多少甘めの仕様である、帯域幅 10 MHz、帯域内挿入損失の最大値 0.8 dB、帯域内アイソレーションの最小値 8.0 dB を設定し、素子サイズについても許容度を増して、素子径が 6 mm、厚さを 1 mm 未満とした。設計・性能検証は FEM を用いた高周波電磁界シミュレータ HFSS で行なった。

表1 マイクロストリップラインを用いたアイソレータの素子サイズと伝送特性

項目	800MHz	2GHz	4GHz	
ボトムマウント型	帯域幅	22 MHz	21 MHz	66 MHz
	帯域内挿入損失	0.60 dB _{min}	0.73 dB _{min}	0.38 dB _{min}
	帯域内アイソレーション	14.24 dB _{min}	11.1 dB _{min}	14.0 dB _{min}
	素子サイズ	φ = 6 mm, 0.45 mm ²	φ = 2 mm, 0.45 mm ²	φ = 2 mm, 0.40 mm ²
トップマウント型 (マイクロストリップライン)	帯域幅	—	12 MHz	59 MHz
	帯域内挿入損失	0.85 dB _{min}	0.78 dB _{min}	0.42 dB _{min}
	帯域内アイソレーション	15.19 dB*	12.0 dB _{min}	14.1 dB _{min}
	素子サイズ	φ = 6 mm, 0.48 mm ²	φ = 2 mm, 0.48 mm ²	φ = 2 mm, 0.43 mm ²

表1にシミュレーション結果を示す。4 GHz 帯、2 GHz 帯のどちらの周波数帯についても帯域幅、帯域内挿入損失、帯域内アイソレーション、素子サイズ全ての項目について当初に設定した目標を達成することができた。

マイクロストリップラインを用いたタイプでは、周波数が 800 MHz 程度まで低くなると、良好な非可逆伝送特性と広い帯域幅を実現することが相当困難になる傾向があった。

これに対して、伝送線路を CPW に変えたアイソレータでの、800 MHz 帯における伝送特性の素子サイズ依存性について調べたところ、素子径 4 mm で最小の挿入損失が得られた。挿入損失が 0.80 dB 以下の帯域幅についても素子径 4 mm で最も広い帯域幅が得られた。これらの結果より、800 MHz 帯での素子サイズは 4 mm として解析を行なった。

表 2 に、CPW を用いたトップマウント型アイソレータのサイズと伝送特性についてまとめた。このように CPW に実装したトップマウント型アイソレータは全ての周波数帯において現行製品の半分の厚さ 0.5 mm 以下を満足した上で目標仕様を全て満足した。

また、高周波側は伝搬波長が短くなるため、4 GHz 帯におけるさらなる小型化について検討した。素子径 1.4 mm までは素子サイズを縮小しても挿入損失の最良値に変化はほとんど見られなかった。この素子サイズにおけるアイソレーションの最良値が約 16.5 dB であり、4 GHz 帯においては素子径を 1.4 mm まで縮小できた。

表 2 コプレナーウエーブガイドを用いたトップマウント型アイソレータの素子サイズと伝送特性

項目	800MHz	2GHz	4GHz	
CPW導入 トップマウント型	帯域幅	26 MHz	60 MHz	73 MHz
	帯域内挿入損失	0.69 dB _{min}	0.51 dB _{min}	0.39 dB _{min}
	帯域内 アイソレーション	11.87 dB*	12.2 dB _{min}	15.2 dB _{min}
	素子サイズ	φ = 4 mm, 0.48 mm ²	φ = 2 mm, 0.48 mm ²	φ = 1.4 mm, 0.43 mm ²

以上をまとめると、CPW に実装したトップマウント型アイソレータを提案し、4 GHz 帯、2 GHz 帯、800 MHz 帯についてシミュレーションにより伝送特性を評価した。その結果、帯域内挿入損失の最大値 0.8 dB 以下、帯域内アイソレーションの最小値 10 dB 以上という実用的な非可逆伝送特性を、2 GHz 帯については素子直径 2 mm、厚さ 0.48 mm の素子サイズで、4GHz 帯については素子直径 1.4mm、高さ 0.43 mm という非常に小さな素子サイズと低い素子高で、60 MHz 以上の帯域幅で実現できた。800 MHz 帯については、素子サイズが素子直径 4 mm、高さ 0.48 mm まで大きくなることを許容すれば、挿入損失の最大値 0.8 dB 以下、帯域内アイソレーションの最小値 10 dB 以上を帯域幅 26 MHz で実現できることがわかった。

(5) 素子試作による性能実証

CPW によるトップマウント型アイソレータの素子試作によって、2 GHz 帯において、挿入損失 0.8 dB 以下、アイソレーション 10 dB

以上の非可逆伝送特性が確認され、本原理による小型化の可能性が実証されている。

なお、他のバンドでの性能実証は再現性に困難さがあった。その原因としては、フェライトの強磁性共鳴近傍に動作点に設定する本タイプのアイソレータにおいては、印加する直流バイアス磁場の均一性が特に厳しく要求されることによる。本アイソレータを実用化するにはその対応策が重要になると思われる。

<引用文献>

集積化可能な非可逆回路素子，
特願 2007-80427，2007 年出願。
集積化可能な非可逆回路素子，
特願 2008-144280，2008 年出願。
集積化可能な非可逆回路素子及びその
取付け方法，特許第 4815608 号，
2011 年登録。

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1件)

山本 節夫、3.2.4 アイソレータの小型化技術、高周波マイクロ磁気応用技術調査専門委員会編：電気学会技術報告第 1313号「高周波マイクロ磁気応用技術の最新動向」、査読無、2014、pp.31-34、ISSN 0919-9195

[学会発表](計6件)

S. Yamamoto, M. Yonehara, T. Wakamatsu, H. Kurisu and S. Fuji: "CPW type small isolator operating in 800 MHz, 2 GHz and 4 GHz bands," 25th Annual Meeting of MRS-J (2015), Dec.8-10 (2015). 横浜情報文化センター(神奈川県横浜市).

米原 正道,若松 孝志,藤井 重男,栗巢 普揮,山本 節夫: "小型・低背型トップマウント型アイソレータ," 第39回日本磁気学会学術講演概要集 2015, 8aD-4, p.46, Sep. 8, 2015, 名古屋大学(愛知県名古屋市).

米原 正道,若松 孝志,藤井 重男,栗巢 普揮,山本 節夫: "広帯域 CPW トップマウント型アイソレータ," 第39回日本磁気学会学術講演概要集 2015, 8aD-5, p.46, Sep. 8, 2015, 名古屋大学(愛知県名古屋市).

Kaihei Nishijima, Takashi Wakamatsu, Hiroshi Sato, Shigeo Fujii, Hiroki Kurisu, Setsuo Yamamoto: "Small isolator operating in 800 MHz, 2 GHz and 4 GHz bands," The 15th IUMRS-International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014), 24-30, Aug., 2014,

福岡大学(福岡県福岡市).

K. Nishijima, H. Kurisu, S. Fujii, S. Yamamoto: "Design of Small Isolator operating in 2 GHz and 4 GHz band," 23rd Annual Meeting of MRS-J (2013), Dec.9-11 (2013), 横浜情報文化センター(神奈川県横浜市).

K. Nishijima, H. Kurisu, S. Fujii, S. Yamamoto, "Extremely Small Isolator for 2 GHz and 4 GHz band," THE 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FERRITES (ICF 11), ICF 11 Abstract booklet of THE 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FERRITES, 17pP-50, p.234, April 15-19 (2013), 沖縄コンベンションセンター(沖縄県宜野湾市).

〔産業財産権〕

取得状況(計1件)

名称: 非可逆回路素子

発明者: 安藤 朗、山本節夫、栗巢普揮

権利者: 国立大学法人山口大学、双信電機株式会社

種類: 特許

番号: 特許第 5821093 号

出願年月日: 平成 23 年 5 月 30 日

取得年月日: 平成 27 年 10 月 16 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

研究代表者 山本 節夫

(YAMAMOTO, Setsuo)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 30182629