

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月 15日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2012

課題番号：23686054

研究課題名（和文）希土類によらないジャイロ磁気特性の実現とそのマイクロ波デバイスへの応用

研究課題名（英文）Artificial magnetic gyrotropy creation without rare-earth element and its application to microwave devices

研究代表者

小寺 敏郎 (KODERA TOSHIRO)

山口大学・大学院理工学研究科・講師

研究者番号：90340603

研究成果の概要（和文）：マイクロ波非可逆素子に不可欠な希土類磁性体が示すジャイロ磁気特性を、磁性体を一切含まない進行波共振回路により人工的に創出し、これを各種マイクロ波素子に応用した。マイクロ波領域において、考案した構造が希土類磁性体と同一の特性を示すことを実験理論両面から確認し、これをマイクロ波ファラデー回転子、サーキュレータ、アイソレータに応用できることを明らかにし、その成果は雑誌論文(5件)、国際会議発表(11件)、特許出願(2件)として公表した。

研究成果の概要（英文）：The rare-earth iron oxides is an indispensable element for microwave components due to its unique non-reciprocity. In this work, the magnet-less non-reciprocal magnetic gyrotropy realized by a traveling-wave resonator is proposed and studied both experimentally and theoretically. As a proof of concept, the developed theory has been applied to several microwave components including Faraday rotator, circulator, and isolator. The achievements are published as five journal papers, eleven conference papers, and two patents.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	5,500,000	1,650,000	7,150,000

研究分野：電子デバイス・電子機器

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：ジャイロ磁気特性，進行波共振，非可逆特性，人工磁性体，マイクロ波デバイス，希土類代替技術，ミリ波デバイス

1. 研究開始当初の背景

サーキュレータやアイソレータに代表されるマイクロ波フェライトデバイスは、その素子機能である非可逆性が通信システムの安定化と多機能化に有効であることから、広

く実用化されている。これらのマイクロ波デバイスは導波路構造あるいは共振構造に希土類鉄酸化物、具体的にはイットリウム・鉄・ガーネット(YIG)が一般的に用いられており、更に磁性体に加える直流磁界生成には

ネオジム磁石が小型で強力であることから広く用いられている。しかしながら従来技術には大きく分けて2つの問題がある。

(1) 希土類の供給安定性

日本は商業レベルで希土類を産出しておらず、現時点では全量輸入に頼っている。更に供給量の95%以上を中国に依存している。この事実は産業の命脈を特定の国に委ねていることを意味する。

(2) 磁性体デバイスの進歩の停滞

鉄酸化物である磁性体はシリコン等の半導体と物質構造が根本的に異なることから、融合することができない。半導体集積回路製造プロセスは進歩し続けているが、磁性体との親和性の低さから、集積回路化を図る事も、その技術を応用することもできない。結果的にマイクロ波フェライトデバイスの基本的構造は50年以上進歩が途絶えている。

2. 研究の目的

マイクロ波非可逆素子に不可欠な希土類磁性体の代替手段として、単向性デバイスを含む進行波共振構造により人工的にジャイロ磁気特性を作り出し、これをマイクロ波帯域において人工磁性体として用いることを研究目的とした。

本研究は単に従来の希土類フェライト材料との置換であるのみならず、バイアス磁界生成磁石が不要であることから小型化、軽量化、低コスト化を同時に実現するものである。更に構成要素は従来の半導体集積回路と同一であることから、既に高度に進化している集積回路製造技術をそのまま応用可能であり、超低コスト化と大量生産性も期待できる。

一般的に磁石は入射電磁波を反射あるいは減衰させるものであるが、これが不要になることより透過電磁界の偏波面にファラデー回転を与える電磁境界面が可能となり、従来技術では磁石の存在が実現を阻害する新規デバイスの実現も期待できる。

3. 研究の方法

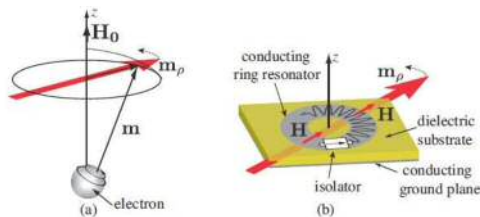


図1 回転する磁気モーメント (a) 磁性体の場合 (b) 提案する構造の場合

磁性体における磁気モーメントの歳差運動は一方方向への回転運動であり(図1(a))、これがポルダテンソル透磁率の非対角項が共役の形で現れる原因となる。透磁率テンソルの転置が元のテンソルと等しくならない

ことは非可逆を示す必要条件となるが、受動素子(RLC)の組み合わせでこの条件を満たすことは不可能である。負の透磁率の実現を目的にスプリット共振器が広く研究されているが、構造中の左右の向きの電流による回転磁界は等しく存在し、互いに打ち消し合うため結果として可逆な素子しか実現し得ない。図1(b)のようにリング共振器に単向性素子を装荷する場合、構造中の波は一方方向に制限されるので共振は定在波ではなく進行波共振となる。この時回転磁気(ジャイロ磁気)が実現できることを図2を用いて説明

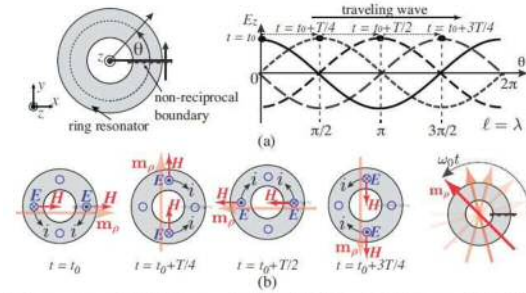


図2 リング共振器の一点に非可逆境界(無損失かつ位相変化無し)を挿入した場合の界の動き。(a) 4分の1周期毎に電界 E_z を周に沿って観測したもの。(b) 電磁界に対応する等価的磁気モーメント m_ρ を4分の1周期毎に描いたもの。

する。リング共振器の一点に無損失かつ位相変化の無い非可逆境界を挿入した場合の+θ方向に伝搬する電磁波の電界成分の時間変化を1/4周期毎に描いたものを図2(a)に示す。それぞれの時刻に対して磁界成分を描くと図2(b)のようになり、時間変化と共に共振角速度と同じ角速度で磁界成分が回転し、磁気モーメントの回転運動、すなわちジャイロ磁気特性が得られることが分かる。この進行波共振現象に伴う電磁界をマイクロ波非可逆素子に応用した。

4. 研究成果

本研究で得られた人工ジャイロ磁気特性を反射形ファラデー回転子、マイクロ波アイソレータ、マイクロ波サーキュレータへと応用した。

(a) 反射形ファラデー回転子

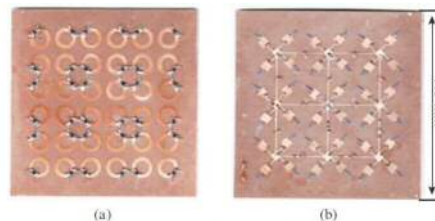


図3 36個のジャイロ磁気共振器により構成される人工磁性体。(a)表面(RF面)。(b)裏面(バイアス回路面)。両面の間には接地導体が入っている。

FETの増幅回路を組み込んだジャイロ磁気共振器を36個並べたものを試作し、人工ジャイロ磁気による磁気光学カー効果を測定

した。図 3 に試作した素子を示す。表面と裏面の間には接地導体（銅箔面）が入っており、FET へのバイアス電圧は接地導体を貫くスルーホールにて裏面のバイアス回路より供給される。この表面における反射偏波面を図 4 の環境により測定した。ホーンアンテナ対をそれぞれポート 1、ポート 2 とし、ポート 2 のみ偏波面を可変とした。この時のホーンアンテナ間の角度 θ を変化させたときの伝送特性の測定結果を図 5 に示す。

図 5(b) と (c) を比較するとフェライトのファラデー回転に基づく磁気光学カー効果と全く同様に偏波の回転が非可逆を示し、角度 θ の符号に対して逆特性が得られていることが分かる。この結果により人工ジャイロ磁気特性の有効性を実証した。

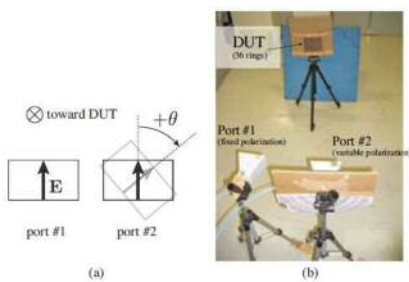


図 4 測定環境。(a) ホーンアンテナ対により表面反射を測定。一方のアンテナは測定偏波面を可変とする。(b) 全体図。

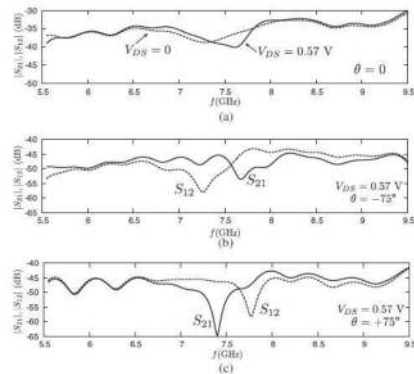


図 5 ホーン間の相対角度 θ を変化させたときの伝送特性。(a) $\theta = 0$, $V_{DS} = 0, 0.57$ V. (b) $\theta = -75^\circ$, $V_{DS} = 0.57$ V. (c) $\theta = +75^\circ$, $V_{DS} = 0.57$ V.

(b) マイクロ波アイソレータへの応用

フェライトの場合、伝搬方向に対して直交方向に磁化した導波路において界の偏りが生じることが知られている。人工ジャイロ磁気によっても同様な現象が得られる事を確認するために、図 6 に示す構造を電磁界シミュレーター (CST Microwave Studio) により解析した結果を図 7 に示す。明らかにフェライトと同様に伝搬方向により界の偏りが逆になっており、構造を非対称とすることでアイソレータが実現できることがわかる。この特性を用いたアイソレータのデバイスを図 8

に、特性の測定結果を図 9 に示す。

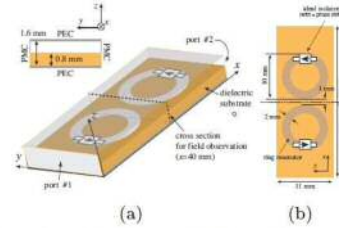


図 6 ジャイロ磁気特性による界の偏りを検討する為のシミュレーションモデル。

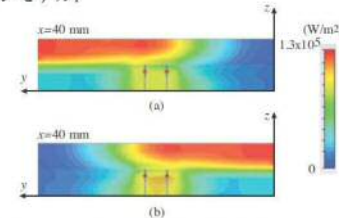


図 7 図 6 の $x = 40$ mm の断面におけるポインティングベクトルの絶対値。(a) ポート #1 励振 (b) ポート #2 励振

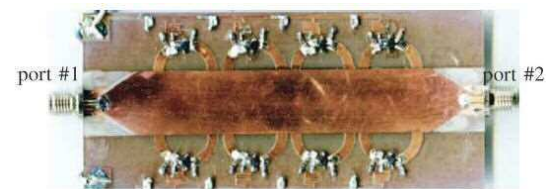


図 8 人工ジャイロ磁気特性によるアイソレータ

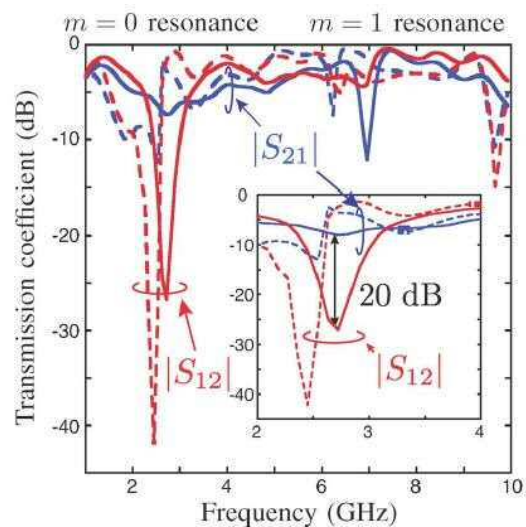


図 9 図 8 のアイソレータの周波数特性。

図 9 に見られる通り、2.5 GHz において最大 20dB の非可逆性が得られた。更に従来のフェライトでは見られないジャイロ磁気特性自体の高次モード ($m=1$) の動作が確認できた。従来のアイソレータと比較して挿入損と非可逆比は良好あるいは凌駕する結果が得られたが、帯域幅は圧倒的に狭く、この改善が今後の課題となっている。

(c) マイクロ波サーキュレータへの応用

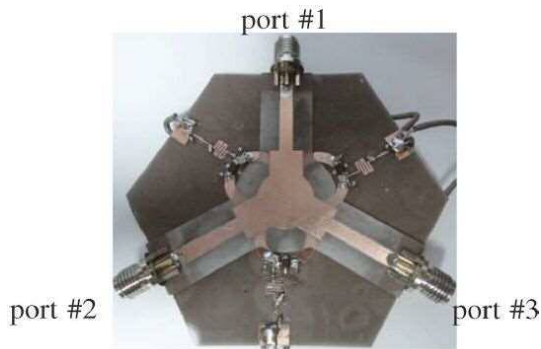


図9 人工ジャイロ磁性によるマイクロ波サーキュレータの構造

更にジャイロ磁性を磁化フェライトと同様にサーキュレータに応用した。試作したデバイスを図9に、測定結果を図10に示す。

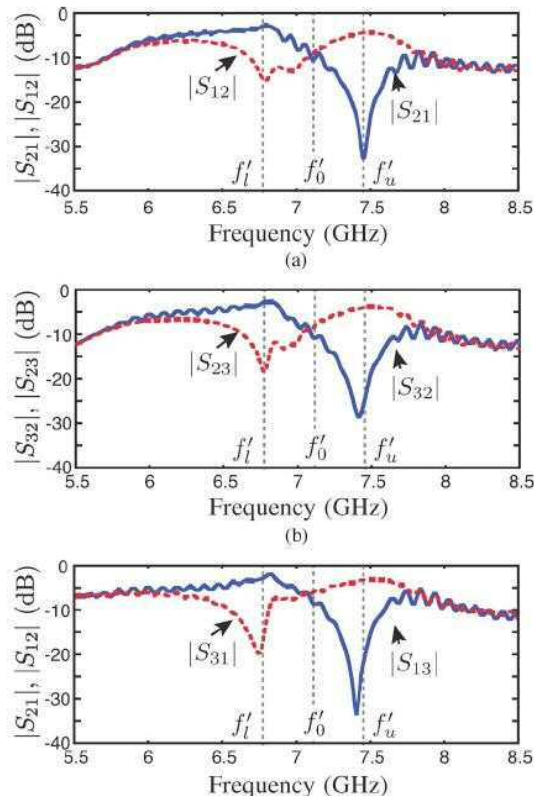


図10 人工ジャイロ磁性によるサーキュレータの測定結果

以上の結果は、デバイス応用を通して本課題で提案した人工ジャイロ磁性特性が実際に磁化フェライトと同様の物性を等価的に示し、従来の磁性体を置き換えるという基礎的な立証を与えるものであり、当初の目標は達成できたと判断している。これらの成果は雑誌論文(5件)、国際会議発表(11件)、特

許出願(2件)として公表した。

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5件)

① “Magnet-less Non-reciprocal Metamaterial (MNM) Technology: Application to Microwave Components”, Toshiro Kodaera, Dimitrios L. Sounas, Christophe Caloz, IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 61, no. 3, pp. 1030-1042, 2013. 査読有

DOI: 10.1109/TMTT.2013.2238246

② “Electromagnetic modeling of a magnet-less non-reciprocal gyrotropic metasurface,” Dimitrios L. Sounas, Toshiro Kodaera, and Christophe Caloz, IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 61, no. 1, pp. 221-231, 2013.

DOI: 10.1109/TAP.2012.2214997. 査読有

③ “Switchable Magnet-less Non-Reciprocal Metamaterial (MNM) and its Application to a Switchable Faraday Rotation Metasurface”, Toshiro Kodaera, Dimitrios L. Sounas, Christophe Caloz, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 11, pp. 1454-1457, 2012. 査読有

DOI: 10.1109/LAWP.2012.2231043

④ “Non-Reciprocal Magnet-less CRLH Leaky-Wave Antenna based on a Ring Metamaterial Structure,” Toshiro Kodaera, Dimitrios L. Sounas, Christophe Caloz, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 10, pp. 1551-1554, 2012. 査読有

DOI: 10.1109/LAWP.2011.2181477

⑤ “Artificial Faraday Rotation using a Ring Metamaterial Structure without Static Magnetic Field,” Toshiro Kodaera, Dimitrios L. Sounas, Christophe Caloz, Applied Physics Letters, vol. 99, no. 3, pp. 031114:1-3, 2011. 査読有

DOI: 10.1063/1.3615688

[学会発表] (計11件)

① “Magnet-less non-reciprocal metamaterials,” Christophe Caloz, Toshiro Kodaera, and Dimitrios L. Sounas, META '13, pp. 1-2, 2013年3月22日, アラブ首長国連邦 シャールジャ.

② “Analytical modeling of a magnetless non-reciprocal metasurface under oblique plane-wave incidence,” Dimitrios L.

Sounas, Burak Gurlek, Toshiro Koder, Christophe Caloz, META '13, pp. 1-2, 2013年3月19日, アラブ首長国連邦 シャールジュヤ.

③ “Tunable Magnet-less Non-Reciprocal Metamaterial (MNM) and its Application to an Isolator,” Toshiro Koder, Dimitrios L. Sounas, Christophe Caloz, Proc. of Asia Pacific Microw. Conf. (APMC2012), pp. 1-3, 2012年12月8日, 台湾 高雄.

④ “Magnet-less Non-reciprocal Metamaterial and its Applications in Radiative Structures,” Toshiro Koder, Dimitrios L. Sounas, Christophe Caloz, Proc. of Int. Symp. Antennas Propagat. (ISAP2012), pp. 1-3, 2012年11月2日, 名古屋, 名古屋国際会議場.

⑤ “Faraday rotation by artificial electric gyrotropy in a transparent slot-ring metamaterial structure,” Toshiro Koder, Dimitrios L. Sounas, and Christophe Caloz, Proc. of IEEE AP-S Int. Antennas Propagat. (APS), pp. 1-2, 2012年7月7日, 米国 シカゴ.

⑥ “Network modeling of multi-layer magnet-less non-reciprocal gyrotropic metamaterials
Dimitrios L. Sounas, Toshiro Koder, Christophe Caloz, Proc. of IEEE AP-S Int. Antennas Propagat. (APS), pp. 1-2, 2012年7月6日, 米国 シカゴ.

⑦ “Isolator utilizing artificial magnetic gyrotropy,” Toshiro Koder, Dimitrios L. Sounas, Christophe Caloz, Proc. of IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. (IMS), Montreal, pp. 1-3, 2012年6月21日, カナダ モントリオール.

⑧ “PEMC metamaterial surface whose gyrotropy is provided by traveling-wave ring resonators,” Toshiro Koder, Dimitrios L. Sounas, and Christophe Caloz, International Symposium Antennas Propagat. (ISAP2011), pp. 1-3, 2011年10月27日, 韓国 濟州島.

⑨ “Non-reciprocal gyrotropic semiconductor based metasurface not requiring magnetic bias,” Dimitrios L. Sounas, Toshiro Koder, Christophe Caloz, Proc. Metamaterials '2011, Fifth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, 1 pp. 1-3, 2011年10月17日, スペイン バルセロナ.

⑩ “Field displacement in a traveling-wave ring resonator meta-structure,” Toshiro Koder,

Dimitrios L. Sounas, Christophe Caloz, XXXth General Assembly and Scientific Symposium (GASS) vol. 1, pp. 1-4, 2011年8月15日, トルコ イスタンブール.

⑪ “Non-reciprocal gyrotropic electrically-biased ring metasurface,” Dimitrios L. Sounas, Toshiro Koder, Christophe Caloz, Proc. CNC/USNC URSI National Radio Science Meeting, vol. 1, pp. 1-4, 2011年7月6日, 米国 スポーケン.

[産業財産権]
○出願状況 (計2件)

名称: 人工磁性体、人工磁性体デバイス、人工磁性反射壁および人工磁性透過体
発明者: 小寺敏郎, クリストフ キャロ, デイミトリオス ソーナス
権利者: 山口大学・エコール・ポリテクニク・ドゥ・モンレアル
種類: 特許
番号: 特開2012-146945
出願年月日: 2011年12月22日
国内外の別: 国内

名称: ARTIFICIAL MAGNETIC MATERIAL, ARTIFICIAL MAGNETIC DEVICE, ARTIFICIAL MAGNETIC MATERIAL REFLECTING WALL AND ARTIFICIAL MAGNETIC MATERIAL TRANSPARENT WALL
発明者: Toshiro Koder, Christophe Caloz, Dimitrios Sounas
権利者: Ecole Polytechnique de Montreal
種類: PCT
番号: PCT/CA2011/001422
出願年月日: 2011年12月22日
国内外の別: 国外

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織
(1) 研究代表者
小寺敏郎 (KODERA TOSHIRO)
山口大学・大学院理工学研究科・講師
研究者番号: 90340603
(2) 研究分担者
なし
(3) 連携研究者
なし
(4) 研究協力者
クリストフキャロ (Christophe Caloz)
モントリオール理工科大学・教授
ドミトリアスソナス (Dimitrios Sounas)
モントリオール理工科大学・ポスドク