

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：32685

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289106

研究課題名(和文)人工ジャイロ磁気・誘電特性の創出とその電磁波素子への応用

研究課題名(英文)Creation of artificial gyrotropic magnetic/electric property and its application to microwave components

研究代表者

小寺 敏郎 (Kodera, Toshiro)

明星大学・理工学部・准教授

研究者番号：90340603

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,900,000円

研究成果の概要(和文)：半導体能動素子の単向性によりリング共振器中に進行波共振を励起させ、これに伴う回転電磁界によりジャイロ電磁物性を人工的に創出し、これを電磁波素子に応用する基礎技術を確立した。リング共振器によりフェライトと等価な電磁材料物性であるジャイロ磁気特性を創出し、更に双対構造であるスロットリング共振器によりジャイロ誘電特性を創出する技術を新たに生み出した。得られた両電磁物性を複合して新しい人工電磁材料を作成し、これをマイクロ波多機能平面回路、自律的に特性が変化する多機能電磁境界、機能性アンテナへと応用し、さらにソフトウェアの見地から如何に制御信号を生成するかを検証するシステムの試作も試みた。

研究成果の概要(英文)：Artificial gyromagnetic property is created by the traveling-wave resonance in a unilateral component inserted ring resonator and its properties are applied to various microwave components. The developed gyrotropic properties are equivalent of that in a magnetically biased ferrite material and also slot-ring resonator, which is complementary to the strip-line traveling-wave resonator, is introduced in order to create gyrotropic electric property. The developed technology is applied to microwave planar component, adaptive electromagnetic boundary and multi-function antennas. In addition, a standalone system providing adaptive beam control is made as a proof of concept.

研究分野：電磁波工学

キーワード：人工電磁材料 ジャイロ磁気特性 ジャイロ誘電特性 マイクロ波素子 マイクロ波非可逆素子

1. 研究開始当初の背景

フェライトと呼ばれる希土類鉄酸化物はこれまで 60 年以上の期間にわたり、サーキュレータ、移相器、更に広帯域同調可能な共振器に応用されてきた。フェライトは高電力耐性に優れる反面、動作には直流磁界が必要であり、小型化軽量化は容易ではない。残留磁化の高い六方晶フェライトは直流磁界が不要であるが一般的に磁気損失が高く、ミリ波や THz 領域への応用は難しい。更に半導体と鉄酸化物の物性が全く異なることから集積回路との融合は容易ではなく、微粒子化したフェライトを半導体に含有する研究も見られるが実用可能な特性は得られていなかった。更にフェライトに含まれる希土類材料は多くを海外に依存しており、地政学的にも代替技術の確立と発展は望ましいものであった。

2. 研究の目的

半導体動素子の単向性(一方向信号伝達性)によりリング共振器中に進行波共振を励起させ、これに伴う回転電磁界によりジャイロ電磁物性を人工的に創出し、これを電磁波素子に応用することを目的とする。マイクロストリップリング共振器によりフェライトと等価な電磁材料物性であるジャイロ磁気特性を創出し、更に双対構造であるスロットリング共振器によりジャイロ誘電特性を創出する。得られる両電磁物性を複合して新しい人工電磁材料を作成し、これをマイクロ波多機能平面回路、多機能電磁境界、機能性アンテナへと応用する。単向性素子と導波路で構成可能であるため、本研究成果を元に高精度な集積回路技術を適用することで THz 領域のジャイロ電磁特性、更に将来的には光領域の人工ジャイロ電磁特性の実現にも道を拓くものである。

3. 研究の方法

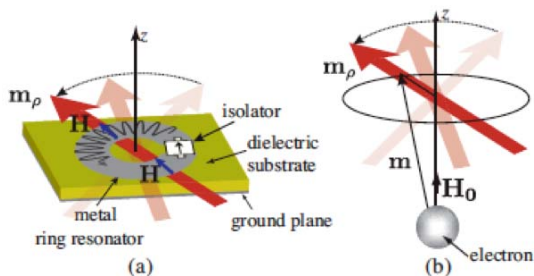


図1 基本構成 (a)ジャイロ磁気特性を生み出す単向性素子を装荷したリング共振器 (b)等価的な回転磁気ダイポールモーメント

図1に基本構成図を示す。図1(a)は金属ストリップ線路と単向性素子を装荷したリング共振器を示し、図1(b)に等価的な回転磁気ダイポールの模式図を示している。単向性素子としてはトランジスタ(FET)を用いており、この構造に電磁界が結合すると共振器内に波動が励振される。単向性素子の機能により、

一般的な定在波共振ではなく、リング共振器一周の位相条件に基づく進行波共振となる。この状態の高周波磁界に着目するとリングに沿った回転磁界がえられることになる。回転磁界はこの構造における磁化として見る事ができ、結果的に構造内に回転磁気ダイポールを生み出すことができる。これを従来のフェライト材料における磁気ダイポールと置き換える形で高周波デバイスに応用し、更に双対構造に対して生じる電氣的ダイポールを作り出すことでこれまででない新しい高周波デバイスを作り出すことができる。さらに使用する要素は半導体集積回路の要素と同じであるため、従来のフェライト技術では不可能であった集積化・小型化の検証も行うことができる。

4. 研究成果

研究成果を以下の 4.1~4.3 の各節に分けて説明する。

4.1 基礎技術の発展

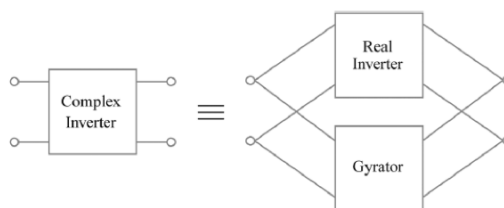


図2 複素かつ非可逆性を有する電磁界結合を実現する複素インバーターとそれを実現するジャイレーターとインピーダンスインバーターの接続

初めに基礎技術の発展的研究として、電磁界結合に非可逆性を含む場合に得られる周波数特性の理論・実験両面からの検証を行った(雑誌論文④)電磁界結合を含む従来のフィルター回路の研究においては結合は可逆であることが大前提であるが、これを非可逆とすることで伝送方向に対する位相特性を任意に設計可能な技術を確立した。具体的には図2に示す複素インバーターをトランジスタにより構成するジャイレーターとインピーダンスインバーターの組み合わせで実現し、これを電磁界結合部分に挿入することで実際に位相特性に新たな自由度が得られることを明らかにした。

4.2 構造の改良による特性の改善

さらに図1の基本構造にも見直しを図った。従来構造ではリング共振器毎に単向性素子(トランジスタ)を装荷する必要があり、複数アレイ構造とした場合、それぞれの消費電力と生成するノイズは単純加算となるため、できるだけ単向性素子数は少ない方がよい。さらに単向性素子における位相変化量を一

一般的なソース接地回路で得られる 180 度とすると、共振器構造は半波長必要となり、小型化に限界がある。これを解消するべく 2 個のリング共振器を 8 の字の形で接続し、交差部分を立体交差とすることで 8 の字全体で半波長の電気長を実現した。この場合従来 2 個必要な単向性素子は半分で済むことで上に述べた複数の問題を解決することができた。

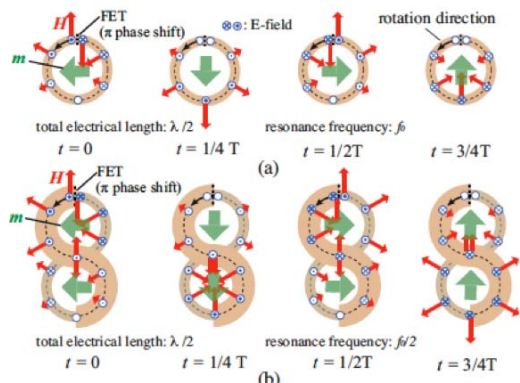


図 3 8 の字共振器による回転磁気ダイポールの生成

図 3 に構造を示す。従来技術の 2 個の共振器の占有面積で倍の電気長が得られるため、動作周波数を一定とした場合半分の面積で従来構造と同じ効果が得られる。この構造により実際にアイソレータを試作し従来構造と比較して大幅な特性改善が得られることを確認した (雑誌論文番号③)

4.3 さらに発展的研究

さらに本研究の技術を電圧制御可能なビーム走査アンテナへ応用した。



図 4 試作したアンテナ構造

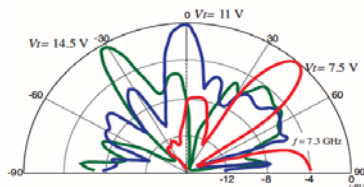


図 6 図 4 のアンテナで実現した放射方向の電圧制御

従来のメタマテリアル技術、特に CRLH 応答と呼ばれる電磁界応答を用いることで正面方向を含む漏洩波ビームが得られることがすでに広く知られているが、本研究ではこの CRLH 応答を人工ジャイロ磁気特性により実現することで非可逆性を有するアンテナを実現した。通常のアンテナは信号の送信・受信端子は同一であるが、図 4 のアンテナは送受信端子が別に存在し、送信信号と受信信

号をアンテナ自体が有する非可逆性により自動的に分離することができる

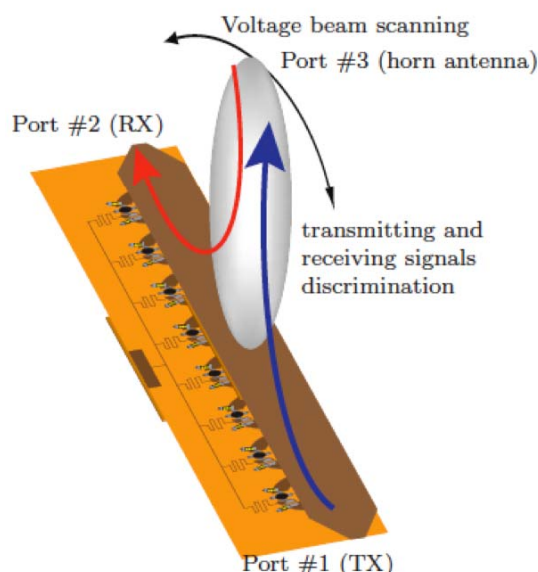


図 7 図 4 に示すアンテナの動作

この送受信信号の分離に加えて放射方向の電圧制御を共振器内にバラクタダイオードを装荷することで実現した (雑誌論文番号②)

さらに研究を進展させるため、対象を電磁界構造を含む情報処理回路へと発展させた。

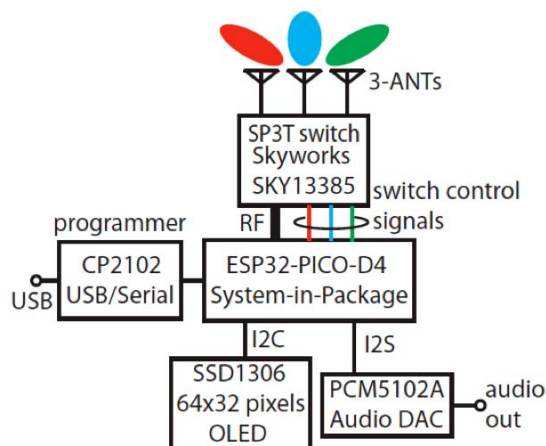


図 8 自律的に最適なアンテナ放射パターンを検出し、それを用いて通信を行うシステム (雑誌論文番号①)

今日の無線通信システムの構成は電磁界構造の研究のみならず、制御信号を如何に生成するかという点も重要である。実際にシステムを構成して確認することで電磁界構造へ要求性能をフィードバックできるという観点から図 8 に示す自律的に最適なアンテナ放射パターンを検出し、それを用いて通信を行うシステムを試作した。このシステムのコアは ESP32-PICO-D4 という 7x7 mm のチップであり、その内に 240MHz で動作するデュアルコアプロセッサ、フラッシュメモリ、メインメモリ、さらに 2.4GHz の WiFi と

BluetoothのRF部全てを含む。プロセッサのプログラミング環境は公開されており、リアルタイムに通信信号強度(RSSI)を検出することができる。

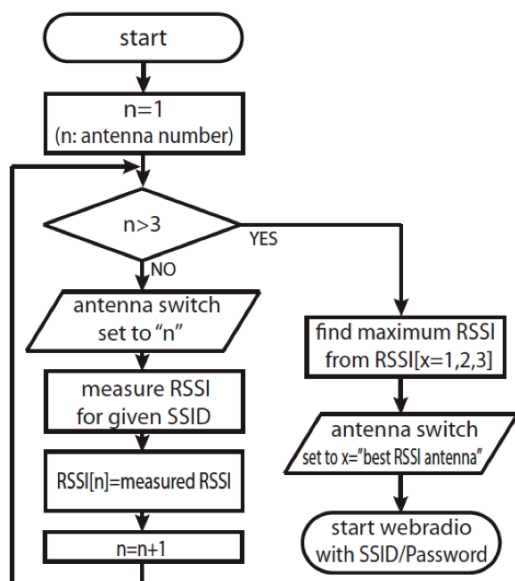


図9 最適なアンテナ放射特性を決定するフローチャート

この試作したシステム上で図9に示すフローチャートで実際に最適なアンテナ動作を検出し、動作することを確認した(雑誌論文番号①)

この研究で得られたソフトウェア技術は図4に示したような人工ジャイロ磁気特性に基づくアンテナ構造の制御信号生成システムとして応用可能であり、さらに電磁界応答が可変なシステムの制御信号生成に極めて有効な技術であると言える。

さらに人工ジャイロ磁気特性による人工電磁界境界(メタサーフェス)が応用可能なRFタグの新技术を考案した。

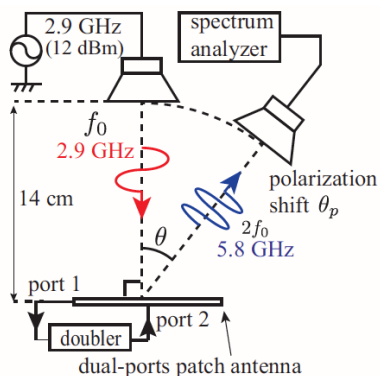


図10 電磁波の入射方向と反射方向が異なり、さらに反射信号の周波数が異なるRFタグシステム(発表論文番号③)

従来のRFタグは電磁波の照射方向と検出方向は同じで、更に照射周波数と反射周波数も同一であるが図10に示すシステムにおいて

ではこれらが全て異なる。照射信号と反射信号が空間的にも時間的にも異なり、反射方向と周波数関係を秘匿とすることで偽造が困難な、更に誤検出を防止できるRFタグシステムを構成することができる。

発表論文③で示したRFタグは通常の誘電体上に構成したパッチアンテナによるものであるが、この誘電体部分を人工ジャイロ磁気・誘電特性を有する材料と置き換えることによりさらに高度な情報処理が可能なRFタグシステムを構成することができる。

以上に述べた通り、4年の研究期間を通して、電磁界構造により生成できる人工ジャイロ磁気・誘電特性に関する総合的研究を行うことができた。成果発表として学術論文4報、査読ありの国際会議論文11件、国内研究会・委員会発表6件として報告した。

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4件)

① Toshiro Kodaera, "Adaptive antenna system by ESP32-PICO-D4 and its application to web radio system," *Hardware X*, vol. 3, pp. 91-99, 2018
DOI: 10.1016/j.ohx.2018.03.001
査読有 2018年

② Yuhi Yokohama, Toshiro Kodaera, "Voltage controlled duplexer-integrated leaky-wave antenna using Magnet-less Non-reciprocal Metamaterial (MNM)," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 369-376, 2016
DOI: 10.1016/j.jesit.2016.10.015
査読有 2016年

③ Shota Komatsu, Toshiro Kodaera, "Simple and tunable MNM by figure of eight resonator and its application to microwave isolator," *IEICE Transaction on Electronics*, vol. E99-C, no.10, pp. 1215-1218, 2016
DOI:10.1587/transele.E99.C.1215
査読有 2016年

④ Qingfeng Zhan, Tongfeng Guo, Bakhtiar Ali Khan, Toshiro Kodaera, Christophe Caloz, "Coupling Matrix Synthesis of Nonreciprocal Lossless Two-Port Networks Using Gytrators and Inverters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 9, pp. 2782-2792, 2015, DOI: 10.1109/TMTT.2015.2450733
査読有 2015年

〔学会発表〕(計 17 件)

① Toshiro Koderu, “Noise figure evaluation of metamaterial structure including active components,” International Symposium Antennas Propagat. (ISAP2017) 2017 年

② Yuhi Yokohama, Toshiro Koderu, “Transistor-Loaded Isolator Based on both Frustrated Propagation and Field Cancellation Mechanisms,” URSI GASS 2017, 2017 年

③ Toshiro Koderu, “Dynamic parameter control of magnet-less non-reciprocal metamaterial (MNM) for adaptive electromagnetic material,” META’ 17, the 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, 2017 年

④ Toshiro Koderu, “Q-factor evaluation of traveling-wave ring resonator in Magnet-less Non-reciprocal Metamaterial (MNM),” IEEE ICCEM2017, 2017 年

⑤ Shota Komatsu, Toshiro Koderu, “A new passive RFID tag system by dual excitation port antenna and frequency doubler,” IEEE ICCEM2017, 2017 年

⑥ Toshiro Koderu, “Electromagnetic Gyrotropes,” Hackaday Superconference, 2016 年

⑦ 野崎大輝, 小寺敏郎, “外来信号を用いた信号源を持たない近距離通信の基礎実験” 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2016 年

⑧ Toshiro Koderu, “Recent Topic of Magnet-Less Non-Reciprocal Metamaterial, Performance Enhancement and Antenna Application (URSI APRASC 2016) 2016 年

⑨ 小寺敏郎, “非可逆素子を含む電磁界構造に生じる回転磁気ダイポールのマイクロ波デバイスへの応用、電気学会マグネティクス研究会, 2016 年

⑩ Yuhi Yokohama, Toshiro Koderu, “Voltage Beam-Steerable Leaky-wave Antenna Using Magnetless Non-Reciprocal Metamaterial (International Symposium of Antennas and Propagation (ISAP2015)) 2015 年

⑪ 横濱雄飛, 小寺敏郎, “MNM を用いたビー

ム走査可能な漏洩波アンテナの検討,” 電子情報通信学会アンテナ伝搬研究会, 2015 年

⑫ 小寺敏郎, “会議報告 “META’ 15” 日本学術振興会第 187 委員会 平成 27 年度第 2 回委員会総会 2015 年

⑬ Shota Komatsu, Toshiro Koderu, “Compact and tunable MNM by gure of eight resonator and its application to microwave isolator (META’ 15, the 6th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics) 2015 年

⑭ 小松将太, 小寺敏郎, “バラクタを用いた 8 の字リング共振器における MNM の同調特性とその応用,” 電子情報通信学会マイクロ波研究会 2015 年

⑮ 小松将太, 小寺敏郎, “8 の字リング共振器による MNM アイソレータの能動素子削減の検討,” 電子情報通信学科総合大会 2015 年

⑯ Toshiro Koderu, “Ferrite antenna structures: Principle, Applications, and Innovation,” IEEE International Microwave Symposium 2014

⑰ Toshiro Koderu, Christophe Caloz, “Tunable magnetless non-reciprocal metamaterials and their application to circulator” Proc. of META’ 14, the 5th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, 2014

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕0 件

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.hino.meisei-u.ac.jp/ee/koderu/Site/Welcome.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小寺 敏郎 (Koderu, Toshiro)

明星大学・理工学部・准教授

研究者番号：90340603

(2) 研究協力者

クリストフ・キャロ (CHRISTOPHE, Caloz)

モンリオール理工科大学・教授