

## コプレーナ導波路構造を用いたサーキュレータ

大城和宣、三上秀人\*、藤井重男\*、松浦 満、山本節夫

山口大学 工学部

\*日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所

### Circulator utilizing a Coplanar Waveguide Structure

K. Oshiro, H. Mikami\*, S. Fujii\*, M. Matsuura, S. Yamamoto

Faculty of Engineering, Yamaguchi University

\*Advanced Electronics Res. Lab. Hitachi Metals, Ltd.

Circulator with a coplanar wave-guide structure, whose external form is a rectangular, was designed and analyzed by using 3D finite-element method. In this analysis, the non-reciprocal transmission characteristics with an insertion loss of 1.0 dB and an isolation of 33 dB appeared at around 7 GHz. The bandwidth defined as the band with isolation of over 20 dB was 50 MHz. A circulator was fabricated based on the design and the transmission characteristic of the circulator was measured. The fabricated circulator showed an insertion loss of 4.9 dB and an isolation of 28 dB at around 8 GHz. The bandwidth at isolation over 20 dB was 70 MHz.

#### 1. 緒言

近年の高度情報化社会の進展により、伝達される情報量は増加の一途をたどっており、通信速度の高速化が余儀なくされている。通信に使用する周波数を高くし、一度により大量の情報を伝達することは、通信速度の高速化への要求を満たすための一つの有力な方法である。また、情報通信の高速化・高周波化の一方で、情報端末の多機能化に対する要求は疑いようもない。現在の携帯電話は、カメラ機能、インターネットへのアクセス機能はもちろんの事、音楽再生機能、支払い機能を有するなど、手のひらサイズで、パソコンに匹敵する機能を有している。現在の携帯電話の多機能化の実現は、素子の小型化、集積化技術の発展によって支えられてきた。

アイソレータは、現在主流になりつつある第3世代携帯電話ににおいて、アンテナと送信回路の間に位置し、送信回路の安定動作を保証するために用いられている。このアイソレータは、フェライトのジャイロ磁気現象を利用し非可逆性を得ており、他の電子部品と比べて、小型化が遅れており、未だに集積化には至っていない。

現在、電子回路、高周波回路にはマイクロストリップラインが広く用いられるが、素子の更なる小型化、集積化を考えると、コプレーナ導波路（コプレーナライン）の方が、特性インピーダンスの調整、作製行程の単純化などの面で、有利である。このような観点から、コプレーナ導波路の研究が最近盛んに行われるようになってきたが、コプレーナ導波路を用いたアイソレータやサーキュレータなどの非可逆性を持つ素子の研究は、まだ比較的少ないのが現状である。

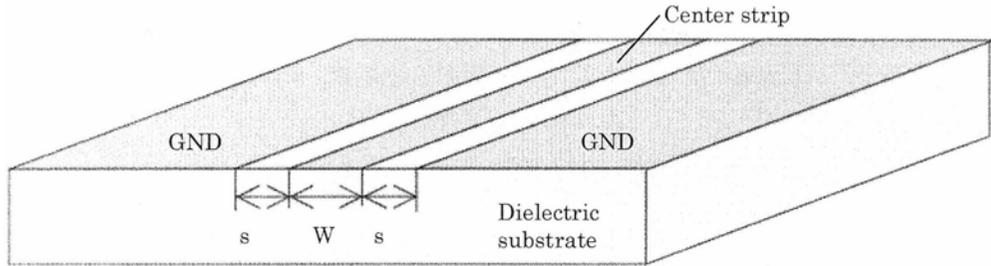


Fig. 1. Structure of coplanar waveguide.

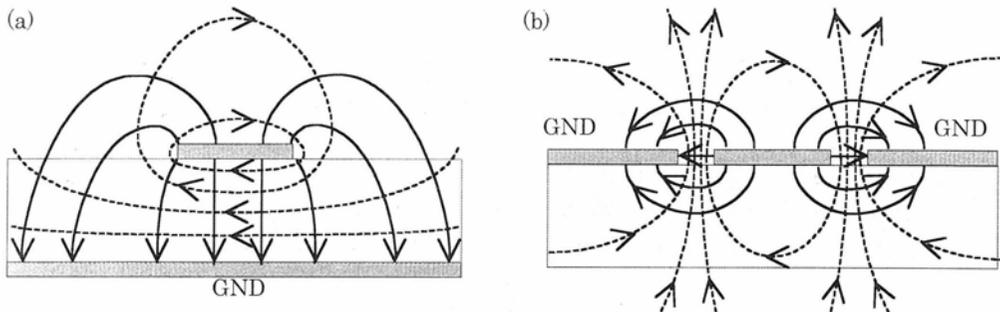


Fig. 2. (a) Schematic distribution of the electric line of force (solid line) and the magnetic line of force (broken line) for (a) microstrip line and (b) coplanar waveguide.

## 2. コプレーナ導波路を用いたアイソレータ・サーキュレータに関するこれまでの研究

コプレーナ導波路の構造を Fig. 1 に示す。中心導体と接地板が同一平面上にあり、集積化に適している。また、特性インピーダンスは  $s$ ,  $W$  の寸法を変えるだけで変更できる。Fig. 2 にマイクロストリップラインとコプレーナ導波路の電磁場分布を示す。マイクロストリップラインでは、導波路を形成する中心導体と GND が基板を挟んで、上下面に対向して配置されており、電場は基板内に密に分布している。一方、コプレーナ導波路の電場分布は、基板の外側にも基板内部と同様な分布が見られる。磁場の分布も大きく異なり、マイクロストリップラインでは、中心導体下の基板内部が最も密に分布しており、コプレーナ導波路では、中心導体の側面が最も密に分布している。

コプレーナ導波路を用いた非可逆素子に関する先駆的な仕事は Wen によって行われた<sup>(1)</sup>。Fig. 3 に Wen が提案したコプレーナ導波路を用いたアイソレータの構造を示す。YIG フェライト単結晶は中心導体と GND の間に位置する。つまり、磁場分布が最も密な所に YIG フェライトを配置している。バイアス磁場は基板の面内方向に印加するとしている。Wen は、この構造でバイアス磁場の強さが約 2 kOe のとき、順方向と逆方向の伝送特性の差が約 40 dB であることを報告している。その後も、このタイプのアイソレータは数名の著者らが、より詳細な解析、および試作を行っている<sup>(2)-(4)</sup>。

Y 結合型のコプレーナ導波路を用いた 3 ポートサーキュレータは 1971 年に Ogasawara ら<sup>(5)</sup> により、1989 年に E. Schloemann<sup>(6)</sup> によって提案されたが、いずれも、定量的な議論はほとんどなく、

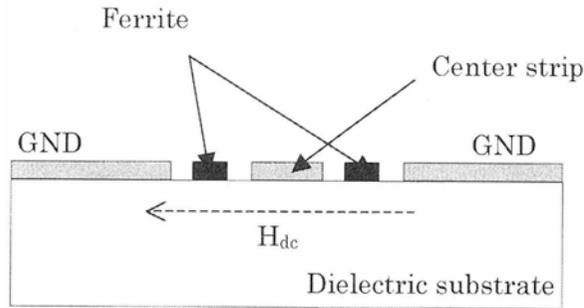


Fig. 3. Wen's resonant isolator in CPW configurations in Ref. (1).

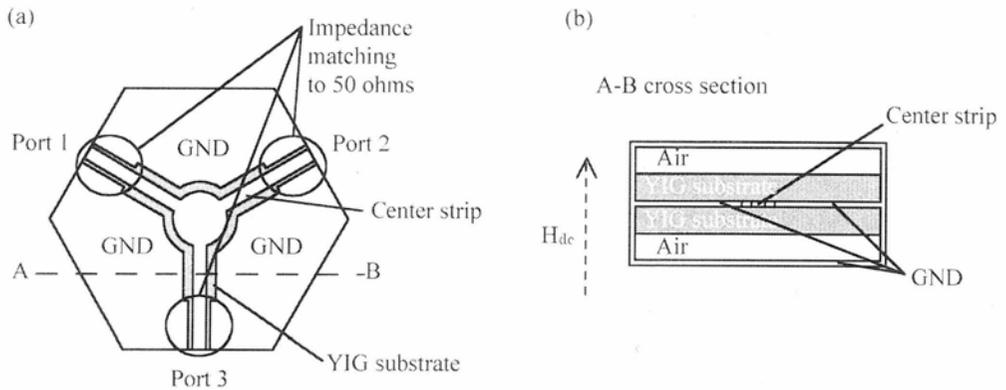


Fig. 4. Structure of a hexagonal circulator with CPW structure in Ref. (7): (a) top view of the signal line and ground plane, and (b) cross-sectional view at line A-B. The impedance was adjusted to 50 ohms at three ports.

構造および伝送特性の詳細は報告されていない。そこで、我々は Y 結合型のコプレーナ導波路を用いた 3 ポートサーキュレータについて議論した<sup>(7)-(9)</sup>。

### 3. コプレーナ Y 結合線路サーキュレータの設計

Fig. 4 に、筆者らによって設計された六角板状の 3 ポートサーキュレータの構造を示す。中心導体と GND を挟んで 2 枚の六角板状のフェライト板および空気層があり、さらにそれらが接地されたシールドで覆われた構造をしている。

周波数特性は 3 次元有限要素法に基づく電磁場解析ソフトを用いた。解析に用いたパラメータは、YIG フェライトに対して、比誘電率  $\epsilon = 15$ 、飽和磁化  $M_s = 90$  mT、誘電正接  $\tan \delta_e = 0.002$ 、および磁気共鳴半値幅  $\Delta H = 3.98$  kA/m を用いた。YIG フェライト内部には、 $H_{in} = 64$  kA/m のバイアス磁場が YIG フェライト板に垂直に印加されているとした。Wen のアイソレータ (Fig. 3) とはこのバイアス磁場の印加方向も異なる。中心導体の電気伝導率は銀を想定し、 $\sigma = 6.1 \times 10^7$  S/m とした。

Fig. 5 (a) に中心導体と GND 間距離  $s$  を変化させた時の伝送特性 ( $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$ , および  $|S_{31}|$ ) を

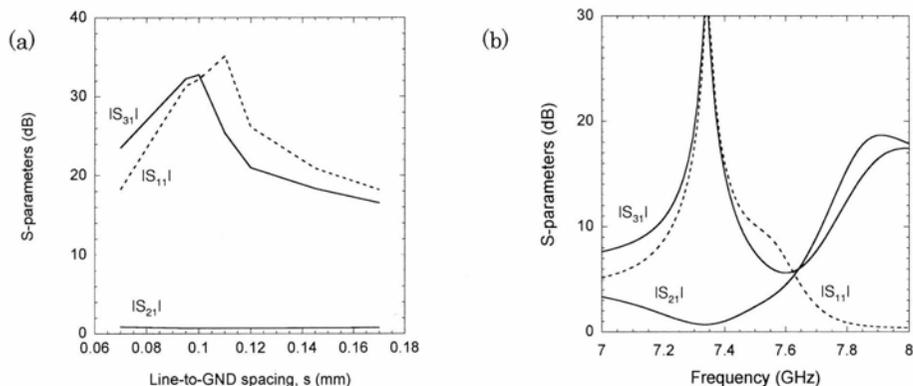


Fig. 5. (a) Dependence of S-parameters on Line-to-GND spacing,  $s$ . (b) Frequency characteristics of the designed circulator.

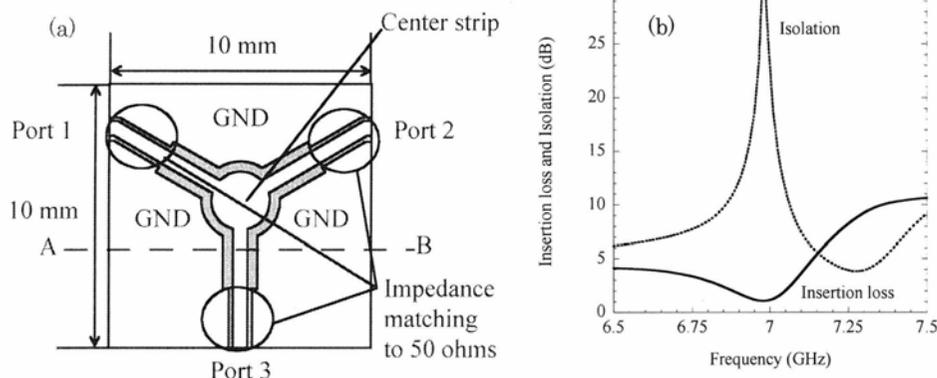


Fig. 6. (a) Structure of a designed rectangular circulator with CPW structure. Dimensions of YIG ferrite substrates are 10 mm x 10 mm x 0.5 mm. The impedance was adjusted to 50 ohms at three ports. (b) Frequency characteristics (insertion loss  $|S_{21}|$  and isolation  $|S_{12}|$ ) of the designed circulator in the case of the magnetic bias field of 64 kA/m. The solid line shows the insertion loss and the dotted line shows the isolation.

示す。  $s = 0.075$  mm から  $s = 0.15$  mm まで、の範囲で  $|S_{11}|$  は 20 dB 以上となり、  $s = 0.1$  mm で  $|S_{31}|$  が最大となった。ポート付近の中心導体-GND 間距離は、  $s = 0.1$  mm のとき、50  $\Omega$  にインピーダンスが整合されるように決定した。

Fig. 5 (b) に  $s = 0.1$  mm のときの S パラメータの周波数特性を示す。7 GHz 付近に  $|S_{21}|$  が約 1.0 dB、  $|S_{31}|$  が 33 dB という良好な非可逆特性が生じていることがわかる。この 7 GHz 付近の  $|S_{31}|$  が 20 dB 以上となるバンド幅は 50 MHz であった。

Fig. 4 に示したサーキュレータの中心導体の形状は、従来のマイクロストリップ Y 結合線路による 3 ポートサーキュレータとほぼ同様であり、同一面内の GND 以外にも中心導体の上下にシールド面 (GND) が存在するため、従来のマイクロストリップ Y 結合線路と同様な動作モードとなっている事が

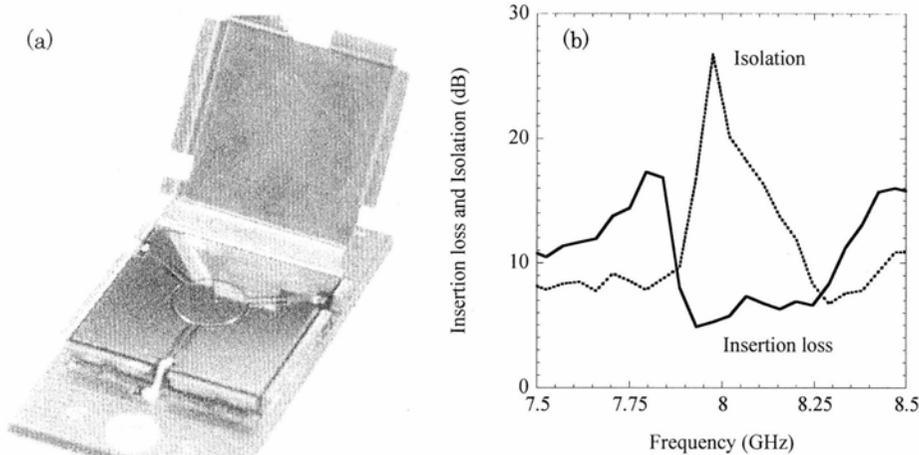


Fig. 7. (a) Photograph of the fabricated circulator. One of three ports was terminated by a register of 50 ohms. (b) Frequency characteristics (insertion loss  $|S_{21}|$  and isolation  $|S_{12}|$ ) of the fabricated circulator in the case of the magnetic bias field of 112 kA/m. The solid line shows the insertion loss and the dotted line shows the isolation..

懸念される。そこで、同一面内の GND を取り除いた構造で、シミュレーションを行った結果、入力インピーダンスが大幅に変化することはもちろんのこと、非可逆性もほとんど見られなくなる事を確認した<sup>(7)</sup>。また、電磁場の分布を見ても、マイクロストリップ Y 結合線路とは大きく異なっており、Fig. 5 の非可逆性はコプレーナ導波路の構造に起因している事が示唆された<sup>(7)</sup>。

六角形状のフェライト板のどの部分が非可逆性に寄与しているのかを調べるために、フェライト板の一部を比誘電率  $\epsilon = 15$  の誘電体に置き換えて、シミュレーションを行った<sup>(8)</sup>。その結果、六角形状のフェライト全体が非可逆性に寄与しており、シールドで覆われた空間の電磁場分布をうまく取り込んだ設計となっている事が、示唆された<sup>(8)</sup>。

#### 4. アイソレータの試作と評価

Fig. 4 の六角形状の構造に基づき、作製し易い四角形状に設計し直し、アイソレータの試作を行った。Fig. 6 (a) に四角形状とした時の線路形状、Fig. 6 (b) に S パラメータの周波数特性の解析結果を示す。ポート 3 を 50  $\Omega$  の抵抗を介して GND に接続し、アイソレータとして動作するようにした<sup>(9)</sup>。アイソレータのサイズは約 10 mm 角で、Wen 等のアイソレータの約半分のサイズである。

Fig. 7 (a) に試作したアイソレータの写真を示す。バイアス磁場は永久磁石を用いて外部から印加し、伝送特性はベクトルネットワークアナライザ (Agilent Technologies, Inc. の E8357A) を用いて測定した。YIG 内部に生じたバイアス磁場が約 112 kA/m のときの周波数特性を Fig. 7 (b) に示す。バイアス磁場は外部磁場をガウスメータで測定し、YIG 板の反磁場を考慮して算出した。8 GHz 付近に非可逆動作が確認でき、 $|S_{21}|$  が 4.9 dB、 $|S_{12}|$  が 28 dB であった。従って、Y 結合線路型の CPW サーキュレータの非可逆特性が実験においても確認することができた<sup>(9)</sup>。

#### 5. まとめ

コプレーナ導波路を用いた Y 結合線路型サーキュレータを設計し、実際に試作し、非可逆性を確認する事ができた。3次元有限要素法に基づく電磁場解析により、7 GHz 付近に非可逆特性が得られる

事を確認した。さらに、この設計に基づいて、アイソレータを試作した。作製したアイソレータは 8 GHz 付近に明瞭な非可逆特性を確認する事ができた。

解析、実験の両面からコプレーナ導波路を用いたサーキュレータの非可逆特性を示す事ができた。

## 謝辞

本研究は経済産業省地域新生コンソーシアム研究開発事業「モバイル情報通信機器用フェライトの薄型化技術開発」の支援を得て実施された。阿部正紀東京工業大学教授、直江正彦東京工業大学名誉教授、中村慶久東北大学教授、篠原 肇東京電機大学教授、日立金属(株)の山内清隆氏(現所属(株)NEOMAX) および村上志郎氏により、激励と貴重なアドバイスをいただきました。こころより感謝申し上げます。また、当研究室の下光敬子氏にはサーキュレータの設計と解析の補助、栗巣普揮助教授、田中輝光研究員には常日頃より議論いただいている。

## 参考文献

- (1) C. P. Wen, "A surface strip transmission line suitable for non reciprocal gyromagnetic device applications," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 17(12), pp. 1087-1090, 1969.
- (2) Y. Naito and Y. Yamana, "New Nonreciprocal Devices in A Coplanar Waveguide," *Microwave Symposium Digest, 1980 MTT-S International, Volume 80 Issue 1*, pp. 235-237, 1980.
- (3) B. Bayard, D. Vincent, C. R. Simovski, and G. Noyel, "Electromagnetic Study of a Ferrite Coplanar Isolator Suitable for Integration," *IEEE Trans, Microw. Theory Tech.* 51(7), pp. 1809-1814, 2003.
- (4) S. Capraro, T. Boudiar, T. Rouiller, J. P. Chatelon, B. Bayard, M. Le Berre, B. Payet-Gervy, M. F. Blanc-Mignon, and J. J. Rousseau, "Exploration of a Thin YIG Film-based Coplanar Isolator," *Microwave and Optical Technology Letters*, 42(6), pp. 470-471, 2004.
- (5) N. Ogawawara and M. Kaji, "Coplanar-Guide and Slot-Guide Junction Circulator," *Electric Letters*, 7, No. 9, 1971.
- (6) E. Schloemann, "Miniture Circulators," *IEEE Trans. Magn.* 25(5), pp. 3236-3241, 1989.
- (7) S. Yamamoto, K. Shitamitsu, H. Kurisu, M. Matsuura, K. Oshiro, H. Mikami, and S. Fujii, "Circulator with coplanar waveguide structure," *phys. stat. sol. (b)* 241, No. 7, pp. 1769-1772, 2004.
- (8) S. Yamamoto, K. Shitamitsu, H. Kurisu, M. Matsuura, K. Oshiro, H. Mikami, and S. Fujii, "Proposed New Circulator with Coplanar Waveguide Structure," *Trans. Magn. Soc. Japan*, Vol. 4, No. 2, pp. 56-59, 2004.
- (9) K. Oshiro, H. Mikami, S. Fujii, T. Tanaka, H. Fujimori, M. Matsuura, and S. Yamamoto, "Fabrication of Circulator with Coplanar Wave Guide Structure," *IEEE Trans. Magn.*, 41(10), pp. 3550-3552. 2005.

2006年6月2日受理