フェライト薄膜を使用したサーキュレータの設計

Design of a Circulator with Ferrite Thin Film

大城和宣・登尾尚史・藤森宏高・三上秀人*・藤井重男*・松浦 満・山本節夫

山口大学工学部, 山口県宇部市常盤台 2-16-1 (〒755-8611)

*日立金属先端エレクトロニクス研究所, 埼玉県熊谷市三ヶ尻 5200 (〒360-0843)

K. Oshiro, T. Noborio, H. Fujimori, H. Mikami*, S. Fujii*, M. Matsuura, and S. Yamamoto

Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ., 2-16-1 Tokiwadai, Ube 755-8611, Japan

*Advanced Electronics Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd., 5200 Mikajiri, Kumagaya 360-0843, Japan

A microstrip-Y-junction circulator with ferrite thin film was designed and its transmission characteristics were analyzed by the 3D finite-element method. The circulator consists of a dielectric substrate with a cylindrical GND, a dielectric layer with a low dielectric constant, a ferrite thin film, a silver transmission line, and a ground plane. The thickness of the ferrite thin film is set at 5 μm . The cylindrical GND is located in the proximity of the center of Y-junction to obtain a large gyro-magnetic effect efficiently. A 15- μm -thick dielectric layer with a dielectric constant of 4 is inserted between the ferrite thin film and the cylindrical GND to decrease the loss resulting from the transmission line, and to obtain a wide permissible range for misalignment between the GND and Y-junction. The results show non-reciprocal transmission characteristics at approximately 5.9 GHz with an insertion loss of 1.6 dB and an isolation of 23 dB.

Key words: microstrip-Y-junction, circulator, ferrite, thin film

1. はじめに

携帯電話などの通信機器の小型化, 多機能化が急速に進む中, それらの機器に用いられる電子部品の小型化, 薄型化への要求が高まっている. フェライトのジャイロ磁気効果を利用したサーキュレータなどの非可逆回転素子の高さは現在最も小型の物で, 1.6 mmもあり, 他の電子部品が約 1 mmにまで薄型化されているのに対し, 薄型化が遅れている. 筆者等は, バルクのイットリウム鉄ガーネット (YIG) フェライト焼結体を用いて高さ 1 mmのマイクロストリップYサーキュレータの設計, 試作に成功した^{1),2)}. 一方, フェライト薄膜を利用したマイクロ波用サーキュレータの開発は, MMICなどへの集積化の観点から, 非常に重要である. また, 最近では光磁気材料と誘電体の多層膜を用いたファラデー回転子を利用した光アイソレータ/サーキュレータの研究も盛んに行われている^{3),4)}.

フェライト薄膜を用いたマイクロ波用サーキュレータの試作は 1987 年に阿部らによって先駆的に行われた. 0.8 μm 厚のNi-Znフェライトメッキ膜を用いたサーキュレータが試作され, フェライト薄膜による非可逆素子の可能性が示された⁵⁾. またH. Howらは, ガドリニウムガリウムガーネット(GGG)単結晶基板上に液相エピタキシャル法により成膜したYIGフェライト単結晶膜 (厚さ 100 μm) をX-bandで動作するサーキュレータに応用し, 挿入損失 1.3

dB, アイソレーション 25 dBという, 良好な非可逆特性を得ている⁶⁾. また, 堤らはGGG基板上にエピタキシャル成長により形成したYIG膜を用いて, サーキュレータの広帯域化を議論した⁷⁾. デバイスへの応用を考えると, 単結晶基板を必要としないスパッタ法によるフェライト薄膜の活用は重要である. また, 製造プロセスにかかる時間を考えると, 使用できるフェライトの膜厚はせいぜい数 μm 程度であると考えられる.

通常, 基板は誘電体を用いられており, その厚さはサブmm~mmオーダーであるのに対し, 薄膜は厚くてもサブ μm ~数 μm である. よって, 基板とフェライト薄膜との体積比は 10^3 のオーダーであり, フェライトの充填率は非常に低く, 伝送特性に対するフェライトの寄与は小さい. したがって, ジャイロ磁気効果が伝送特性に反映されないため, 非可逆特性が得られにくい. 伝送特性に対するフェライト薄膜の寄与は, フェライト薄膜の上下を直接伝送線路と接地面で挟んだ構造にすることで大きくすることができる. 一方で, 導体損失による電磁波の減衰定数は伝送線路-接地面間距離に反比例するため, このような構造では導体損失が非常に大きくなる. このような二律相反する状況がフェライト薄膜を使用したサーキュレータの実現を困難にしている.

本研究では, 良好な非可逆特性が得られ, 且つ導体損失を低減できる構造のサーキュレータを設計し, フェライト薄膜を活用したサーキュレータの可能性を示すことを目的とした.

2. フェライト薄膜を用いたサーキュレータの設計

最も効率よくフェライトのジャイロ磁気効果を伝送特性に反映させるためには電磁波がフェライトのみを通過するようにすればよいと考えられる. このような状況はフェライト薄膜を挟んで伝送線路と接地面を配置することにより実現される. 前述したように伝送線路と接地面が近いと導体損失が大きくなるが, そのような部分の線路長を可能な限り短くすれば, 損失を低減することができる. Y 結合サーキュレータの非可逆特性において最も重要な部分は Y 結合部である. そこで筆者らはこのコンセプトに沿った基本的なモデルとして Fig. 1に示すサーキュレータ(モデルA)を設定した. モデル A は, Y 結合部が円板状の導体により穴埋めされた基板上にフェライト薄膜, 伝送線路の順に積層し, 電磁波の入出力ポート部以外の素子外周は接地された導体により覆われた構造である. したがって穴埋めされた円板状の導体は接地面となり, Y 接合部ではフェライトを通過する電磁波の割合が多くなるため

Fig. 1 Structure of a microstrip-Y-circulator with a cylindrical GND (model A).

Fig. 2 Structure of a microstrip-Y-circulator with a cylindrical GND and dielectric layer (model B).

に、ジャイロ磁気効果を伝送特性に反映させることができる。さらに、フェライト薄膜が伝送線路と接地面で直接挟まれた構造は、Y 結合部のみとなるため、導体損失の大きい部分の線路長が短くなり、導体損失も低減できると考えられる。ところが、モデル A の構造は、デバイス作製時に伝送線路と接地面の位置がわずかもずれると(アライメント誤差)、素子のインピーダンスが大きく変化し、伝送特性が大きく変化することが危惧される。

さらなる導体損失の低減と伝送線路と接地面のアライメント誤差による伝送特性の変化を抑えるように改良したモデル (モデル B) を Fig. 2 に示す。モデル B は、モデル A と同様に Y 結合部が円板状の導体で穴埋められた誘電体基板を用いているが、その上部に低誘電率を持つ誘電体層を設けることで伝送線路と接地面のアライメント誤差によるインピーダンスの変化を低減することができると考えられる。フェライト薄膜および伝送線路は、この誘電体層の上に積層されている。また、モデル A と同様に電磁波の入出力ポート部以外の素子外周は接地された導体により覆われているとした。

Fig. 3 Structure of a microstrip-Y-circulator.

Fig. 4 Dependence of the linewidth on the thickness of the dielectric layer.

モデル B では伝送線路-接地面間に低誘電率層があるためモデル A と比べて電磁波がフェライトを通る割合が低い。よって低誘電率層の厚さをどの程度にすれば良いのかを見積もるために、Fig. 3 に示す単純な構造のマイクロストリップ Y サーキュレータにおいて誘電体層の厚さ t を変化させ、非可逆動作に必要な線路幅 w をシミュレーションにより求めた。線路幅 w はアイソレーション及び反射損失共に 20 dB 以上となる周波数帯域なるべく広くなるように決定した。その結果を Fig. 4 に示す。基板が厚くなるのに伴い、線路幅 w を大きくする必要があることがわかる。また、同じ誘電体厚に着目すると誘電率の低い方が必要な線路幅 w は大きくなる。Fig. 3 に示したサーキュレータにおいて、 w が大きいということは Y 結合部が大きいということである。したがって、 w が大きいということは、モデル B において Y 接合部の中心円半径が大きくなり、導体損失が大きい部分の線路長が長くなることを意味している。また、インピーダンス整合させるために必要なキャパシタンス部が大きくなることも示唆している。 w を固定して考えると、誘電率の高い方が誘電体層を厚くすることができるが、その一方で、一般に誘電率が高い物質は誘電

Fig. 5 Transmission characteristic of model B.

Fig. 6 Transmission characteristic of model A.

損失が大きく、また、マイクロストリップラインにおいて基板の厚さが同じ場合、誘電率の低い方が導体損失は小さいため、誘電体層の誘電率はある程度低いほうが良いと考えられる。

以上のことを踏まえ、低誘電率の誘電体層の厚さは $15\ \mu\text{m}$ 、誘電率は SiO_2 やポリイミドなどを想定し、 $\epsilon = 4$ とした。穴埋めされた誘電体基板の厚さは $0.2\ \text{mm}$ 、誘電率は $\epsilon = 65$ とした。伝送線の構造を決定する他のパラメータ (w_p , r など) はシミュレーションにより十分な非可逆特性が得られるように最適化した。

3. 高周波電磁界シミュレーション

シミュレーションはAnsoft社のHFSSを用いて行い、使用した物質定数は以下の通りである。フェライト薄膜に対して、誘電率 $\epsilon = 15$ 、飽和磁化 $M_s = 1700\ \text{G}$ 、磁気共鳴半値幅 $\Delta H = 50\ \text{Oe}$ 。また、伝送線路と接地面の電気伝導率は銀の典型的な値である $\sigma = 6.1 \times 10^7\ \text{S/m}$ を用いた。フェライトと誘電体の電気伝導率は $\sigma = 0\ \text{S/m}$

Fig. 7 Dependence of the insertion loss and isolation on the misalignment in the x-direction for model B.

Fig. 8 Dependence of the insertion loss and isolation on the misalignment in the y-direction for model B.

とし、さらに誘電損失は無視した。フェライト内部に印加されるバイアス磁場 H_b は、 $1400\ \text{Oe}$ とした。挿入損失に大きく影響するフェライト膜の磁気共鳴半値幅 ΔH の値は、著者らが実際に作製しているYIGフェライト膜の磁気共鳴半値幅 ΔH の値 ($32 \sim 70\ \text{Oe}$ 程度) を参考にして決定した^{8,9)}。

フェライトの透磁率はテンソルとして扱われ、そのテンソル透磁率は

$$\mu = \begin{pmatrix} \mu_r & -i\kappa_r & 0 \\ i\kappa_r & \mu_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

で与えられる。ここで

$$\mu_r = 1 + \frac{(\omega_b + i\gamma\Delta H/2)\omega_m}{(\omega_b + i\gamma\Delta H/2)^2 - \omega^2}, \quad (2)$$

$$\kappa_r = \frac{\omega\omega_m}{(\omega_0 + i\gamma\Delta H/2)^2 - \omega^2} \quad (3)$$

である。 ω は電磁波の角振動数であり、 γ は磁気回転比である。 また、 $\omega_b = \gamma H_b$ 、 $\omega_m = \gamma M_s$ である。

モデルBに基づくサーキュレータの伝送特性を Fig. 5 に示す。 3つのポートのうち、 1ポートを $50\ \Omega$ の抵抗で終端させ、 残り2ポート間の伝送特性を示した。 約 $5.9\ \text{GHz}$ に良好な非可逆動作がみられ、 挿入損失は $1.6\ \text{dB}$ 、 アイソレーションは $23\ \text{dB}$ であった。 アイソレーションが $20\ \text{dB}$ 以上となる帯域幅は約 $50\ \text{MHz}$ であった。 比較の為、 モデルAに基づくサーキュレータの伝送特性を Fig. 6 に示す。 非可逆動作の中心周波数は約 $4\ \text{GHz}$ であり、 挿入損失は $3.0\ \text{dB}$ 、 アイソレーションは $36\ \text{dB}$ であった。 $20\ \text{dB}$ における帯域幅は約 $30\ \text{MHz}$ であった。 モデルBではモデルAに比べて挿入損失が約 $1/2$ に減少していることから、 導体損失の低減に成功し、 また、 帯域幅が約 1.7 倍に広がっていることが分かる。

作製時のアライメント誤差がどの程度許されるかを調べるために誘電体基板に穴埋めされた円板状接地面を Y 結合部の中心位置からシフトさせ、 伝送特性がどのように変化するかを調べた。 モデルBにおいて、 接地面の位置を x 軸方向および y 軸方向にシフトさせた時の挿入損失及びアイソレーションの値をそれぞれ Fig. 7 および Fig. 8 に示す。 このとき、 挿入損失の値はアイソレーションのピーク周波数での値をとった。 挿入損失が $3\ \text{dB}$ 以下でアイソレーションが $20\ \text{dB}$ 以上の特性を保つために許される x 軸方向のアライメント誤差は $\pm 0.1\ \text{mm}$ であり、 y 軸方向のアライメント誤差は $\pm 0.05\ \text{mm}$ であることがわかる。 ここでは示さないが、 モデルAにおいて、 接地面の位置を x 軸方向および y 軸方向にシフトさせた時、 挿入損失が $3\ \text{dB}$ 以下でアイソレーションが $20\ \text{dB}$ 以上の特性を保つためには x 軸方向および y 軸方向共にアライメント誤差が全く許されない。 よってモデルBはモデルAに比べて許されるアライメント誤差が広がっていることが分かる。

4. まとめ

高いアイソレーションと低い導体損失を両立することが困難であったフェライト薄膜を使用したサーキュレータにおいて、 両者を高次元で両立し、 かつ、 デバイス製作時の組み立て誤差に対して広いマージンを持つ新構造のサーキュレータを提案した。 これは上面にマイクロストリップ Y 結合部を付けたフェライト薄膜の真下に、 円筒状の接地面を適度な厚みの低誘電率層を介して配置することによって実現された。

このサーキュレータは、 約 $5.9\ \text{GHz}$ に非可逆動作の中心周波数があり、 挿入損失が $1.6\ \text{dB}$ 、 アイソレーションが $23\ \text{dB}$ である。 アイソレーションが $20\ \text{dB}$ 以上となる帯域幅は $50\ \text{MHz}$ である。 挿入損失が $3\ \text{dB}$ 以下でアイソレーションが $20\ \text{dB}$ 以上の特性を保持するために許されるアライメント誤差は x 軸方向に $\pm 0.1\ \text{mm}$ であり、 y 軸方向に $\pm 0.05\ \text{mm}$ である。 よって提案された薄膜サーキュレータは、 十分試作可能であり、 良好な非可逆特性を持つ

ことが示された。

本研究により、 フェライト薄膜を活用したサーキュレータ実現の可能性が示された。

今後、 この設計に基づいたサーキュレータを実際に試作し、 良好な非可逆特性が得られることを、 検証する予定である。

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。 ころより感謝申し上げます。 また、 当研究室の栗奥普揮助教授、 田中輝光研究員には常日頃より議論いただいている。

References

- 1) S. Yamamoto, M. Matsuura, H. Mikami, and S. Fujii: *Ninth International Conference on Ferrite*, GB-2 (in press).
- 2) K. Oshiro, S. Yamamoto, K. Shitamitsu, H. Kurisu, M. Matsuura, H. Mikami, S. Murakami, and S. Fujii: *Ninth International Conference on Ferrite*, GB-3 (in press).
- 3) S. Sakaguchi and N. Sugimoto: *J. Lightwave Technol.*, **17**, 1087 (1999).
- 4) H. Kato, T. Matsushita, A. Takayama, M. Egawa, K. Nishimura, M. Inoue: *J. Appl. Phys.*, **93**, 3906 (2003).
- 5) M. Abe, T. Itoh, Y. Tamaura, Y. Gotoh, and M. Gomi: *IEEE Trans. Magn.*, **23**, 3736 (1987).
- 6) H. How, S. S. Oliver, S. W. McKnight, P. M. Zavracky, N. E. McGruer, C. Vittoria, and R. Schmidt: *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **46**, 1645 (1998).
- 7) J. Warit, T. Ueda, H. Shimasaki, and M. Tsutsumi: *Proceedings of the 2000 IEICE General Conference*, C1, 112 (2000).
- 8) S. Yamamoto, H. Kuniki, H. Kurisu, M. Matsuura, and P. W. Jang: *Phys. Status Solidi*, (a) **201**, No. 8, 1810 (2004).
- 9) Y. Ushio, T. Tanaka, K. Oshiro, H. Fujimori, H. Kurisu, M. Matsuura, and S. Yamamoto: *Digests of the 28th Annual Conference on Magnetism in Japan*, 76 (2004).

2004 年 10 月 12 日受理, 2004 年 2 月 8 日採録