フェライト埋め込みガラスセラミック複合基板型 サーキュレータの開発

冥加 修*, 生稻 一洋*, 金子 友哉**, 古谷 充*, 岡田 芳嗣*

Development of Complex-Substrate-Type Circulator with Ferrite Column Embedded in Glass-Ceramic

Osamu MYOHGA*, Kazuhiro IKUINA*, Tomoya KANEKO**, Mitsuru FURUYA* and Yoshitsugu OKADA*

*日本電気株式会社機能材料研究所（〒216-8555 神奈川県川崎市宮前区宮崎4-1-1）

**日本電気株式会社マイクロ波衛星通信事業部（〒224-8555 神奈川県横浜市都筑区池辺町4035）

*Functional Material Laboratories, NEC Corp. (4-1-1 Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 216-8555)

**Microwave and Satellite Communications Division, NEC Corp. (4035 Ikebe-cho, Tsuzuki-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 224-8555)

概要 ガラスセラミック（GC）に円板状フェライトを埋め込んだ複合基板型サーキュレータ（CIR）を開発した。本CIRは、直径1.7mm、厚さ0.25mmのNi-Znフェライト円板をGCに埋め込み、一方の面に30GHz付近で動作するように設計した信号回路、他方の面にグラウンドを印刷技術で形成した一辺3mmの寸法形状である。印刷用導体材料としてAu、Ag、Ag-Pdを使用し、信号回路の円形導体部直径1.26mm～1.54mmの5種類を作製し周波数特性を測定した。その結果、安価なAg導体材料を使用して円形導体部直径1.33mmで挿入損失0.5dBを実現した。本CIRは温度サイクル試験（-55℃～125℃）の結果、1000サイクル以上で信号回路の破断や構成材料の破壊は起こらなかった。Coffin-Manson's Lawから模擬的に寿命を見積もると、58年以上の予測寿命を算出した。

Abstract

Reported here is the development of a complex-substrate-type circulator (CIR) with a ferrite column embedded in glass-ceramic (GC). The CIR, designed to operate at about 30 GHz, is 3 mm square. We started with a GC substrate embedded with a Ni-Zn ferrite column (1.7 mm diameter), and on this we tested 3 possible conductive materials (Au, Ag, Ag-Pd) and 5 different diameter, ranging from 1.26 mm to 1.54 mm, for the circular center conductor area. The lowest insertion loss (0.5 dB) was achieved with Ag at a diameter of 1.33 mm. Temperature-Cycle-Test (-55°C to 125°C) over more than 1000 cycles, this combination also suffered neither breaks in circulator circuits nor any cracking in any of the component materials. According to Coffin-Manson's Law, this would correspond to an estimated life span of 58 years.

Key Words: Circulator, Isolator, Complex-Substrate-Type, Glass Ceramic, Ni-Zn Ferrite

1. はじめに

ミリ波帯を使用した無線通信の各種方式が国内外で具体的に提案され、各種部品の低損失化、および高周波化に伴う小型化を狙った部品開発が活発になっている。

ミリ波部品の1つとして、すでに市販されているCIR/ISO（サーキュレータ/アイソレータ）は、軟磁性フェライト基板に印刷技術あるいはめっき技術によりAu導体を形成したものである。しかしながら、フェライトは高周波化と共に損失の増大がGC（ガラスセラミック）より大きいという欠点がある。

著者らは、動作周波数30GHz帯CIRの損失の低減を狙って、低温焼成のGCに円板状Ni-Znフェライトを埋め込んだ構造の複合基板を作製した。その基板の片面にCIRの信号（SIG）回路、他面にグラウンド（GND）を印刷技術で形成した。この構成は、MSLのほとんどがGC基板上に配線

されるため、上記したフェライト基板型に比べて損失が小さくなると期待できる。また、実装基板として使用されるアルミナ基板（熱膨張係数 α ; 5.7ppm/℃）とフェライト（ α ; 9.9ppm/℃）は熱膨張差が大きく、フェライトと実装基板をろう付けすると、ろう付け作業あるいは長期間の温度変化によってフェライトに割れが発生した。しかしながら、フェライトをGC基板に埋め込んだ本報告の構成は、GCと実装基板の熱膨張係数がほぼ同等であるために、GC基板に割れが発生しないことが期待できる。

本報告は、導体を使用する材質およびSIG回路の円形導体部直径の最適化とインピーダンス整合等により最適構成としたCIRの周波数特性、および上記構成のCIRを温度サイクル試験により信頼性評価した結果を報告する。

2. サーキュレータの構成および作製方法

フェライト埋め込みGC基板（3mm□-0.25mm）にSIG

Fig.1 Schematic of the developed complex circulator

Fig.2 Manufacturing process of circulators

回路を形成したCIRの平面図をFig. 1 に示す。円形導体部から120度の等角度でMSLを引き出し、各々のMSLにインピーダンス整合用スタブと微調用ランド、ISO用途の際に搭載する終端抵抗（50Ω）の片端を接地するオープンスタブと微調用ランドを形成した。

SIG回路およびGNDは、Au、AgおよびAg-Pdの3種類の導体ペーストを使用した。

このCIRは、グリーンシートの穴あけ加工および積層後、Fig. 2 に示すようにフェライト（直径1.7mm）を配置後焼成し、その複合焼成体を両面研磨してその研磨面に導体印刷後導体焼き付けするプロセスで作製した。1つの基板には25個（5行5列）のCIR/ISOを配列した。

3. 測定方法

Fig. 1 に示すCIRのMSL－オープンスタブ間に50Ωの終端抵抗をAu-Snろう材で接続してISOとし、 S_{11} 、 S_{22} （反射損失）、 S_{12} （アイソレーション）および S_{21} （挿入損失）のSパラメータを20GHz～40GHzの周波数範囲で測定した。

測定には、HP製ネットワークアナライザ（8510C）およびアンリツ製フィクスチャ（3680V）と治具を使用し、CIR/ISOをFig. 3 に示す構成でフィクスチャに接続した。CIR上方には0.2mmのギャップを設けて直径1.75mm－長

Fig.3 Composition for measuring circulator

さ4mmのマグネット（ $B_r=5000\text{G}$ ）を配置した。

4. サーキュレータSIG回路の設計

MSL幅は特性インピーダンスを50Ωにするために0.25mmとした。

動作周波数の設計¹⁾には、円形導体部による TM_{110} モード共振（ f_1 ）と埋め込まれた円板フェライトによる TM_{110} モード共振（ f_2 ）を考慮し、この2つの共振が結合するモデルを使用した。 f_1 はオールフェライト基板における動作周波数と一致するもので、式(1)（ ϕ は円形導体部直径）により求めた。 f_2 は式(1)の ϕ に埋め込みフェライトの直径（ D ）を代入して求めた。

$$f_1 = \frac{1.84}{\phi \pi \sqrt{\mu_0 \mu_{\text{eff}} \epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}}}} \cong \frac{177}{\phi \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{177}{\phi \sqrt{14}} (\text{GHz}) \quad (1)$$

ただし、 μ_0 、 μ_{eff} は各々真空の透磁率、実効透磁率、 ϵ_0 、 ϵ_{eff} は各々真空の誘電率、実効誘電率、 ϵ_r は比誘電率である。

結合共振モード周波数 f_0 は、これらの2つの共振周波数 f_1 、 f_2 より以下の式(2)から算出した。

$$f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (2)$$

円板フェライト直径をパラメータとし、算出した動作周波数vs円形導体直径の関係をFig. 4 に示す。

Fig.4 Relation between calculated operating center frequency and diameter of circular center conductor area

Table 1. Diameter of circular center conductor area

Types	a	b	c	d	e
Diameter (mm)	1.54	1.47	1.40	1.33	1.26

同図から、動作周波数30GHzに対する円形導体部直径を1.40mmとし、その前後10%の範囲で5種類（Table 1）のCIR/ISOを作製した。なお、フェライト直径 $D=1.7\text{mm}$ である。

5. アイソレータ特性

本報告のCIRはFig. 1の下側のMSL-オープンスタブ間に 50Ω の終端抵抗を接続し、ISOとしてSパラメータの周波数特性を測定した。

5.1 導体材質と円形導体部直径の最適化

3種類の導体材質で各5種類の直径の円形導体部を形成したCIR/ISOについて、Sパラメータの周波数特性を測定し、 S_{21} の最小値を円形導体部直径に対してプロットした（Fig. 5）。

S_{21} は導体材質の電気抵抗率の大小に対応しており、何れの導体材質においても、 S_{21} は、円形導体部直径が1.54mmから1.26mmに減少すると共に〔フェライト直径（1.7mm）より小さくなるにつれて〕減少する傾向が見られる。

AuとAgは $\phi=1.33\text{mm}$ と1.26mmではほぼ同等の値である。したがって、低コストの観点から導体材質としてAgが適切である。

Ni-ZnフェライトとGCの損失を比較するために $3\text{mm}\square$ 、厚さ0.25mmのGC基板とNi-Znフェライト基板にAg導体で長さ3mm、幅0.25mmのMSLを形成したスルー基板を同一方法で測定し、30GHzでフェライトの損失の方が0.34dB大きいことを確認した。したがって、円形導体部直径がさらに小さくなるとフェライト上のMSLの損失が増大し、挿入損失は増加すると考えられる。すなわち、フェライト基板型CIR/ISOはフェライト上にMSLが形成されているため、 S_{21} は複合基板型より大きくなる。このことから、本報告のCIR/ISOは低損失化に適した構成である。

5.2 Sパラメータの周波数特性

Table 1に示すCIRタイプd（円形導体部直径 $\phi=1.33\text{mm}$ ）は、所望の周波数範囲でタイプeより優れた周波数特性を

Fig.5 Relation between measured minimum insertion loss and diameter of circular center conductor area

Fig.6 S-parameter characteristics of the developed circulator

Fig.7 Relation between calculated operating center frequency and diameter of circular center conductor area

有しており、その特性をFig. 6に示す。27GHz～32GHzの周波数範囲（送受信に使用する帯域）に注目すると、無調整であるにもかかわらず S_{11} 、 S_{22} および S_{12} とも15dB程度を確保している。 S_{21} はその周波数帯域で0.3～0.8dBの小さい値が得られた。

5.3 設計値と実測値の対応

Ag導体を使用した5種類の円形導体部直径のCIRの動作周波数（実測値）を、モデル計算したFig. 4のグラフ上に●印でプロットすると（Fig. 7）、フェライト直径2.0mmの曲線近傍に沿って変化していることがわかる。円形導体部直径1.33mmのCIRについて、3つのMSLに形成したスタブを除去すると、動作周波数が2GHz程度増加し（○印）、フェライト直径1.7mmの曲線近傍に移動した。このことから、2つの共振が結合するモデルを使用した動作周波数vs円形導体部直径の計算は、MSLにスタブを形成しないCIR/ISOのSIG回路構成に適用できることがわかった。したがって、スタブ形成等でインピーダンス整合によ

Fig. 8 Composition of the adjusted circulator on AlN substrate, similar to actual loading

る周波数変化を考慮すると、所望の周波数で使用する CIR/ISOの円形導体部直径をおおむね計算で求めることができる。

6. 調整したサーキュレータの周波数特性

CIRのAg導体にAuめっきを施し、Fig. 8に示すようにランドを利用してAuリボンをボンディングしてスタブ長を調整したCIR/ISO、MSLを形成したアルミナ基板および終端抵抗とチップキャリアを、表面がAuめっきされたAlN基板にAu-Snろう材で接合しGNDを共通にして配置した。SIG回路はAuワイヤボンディングで接続した。

CIRの下方に直径1.7mm、長さ0.4mmの軟磁性材料を0.1mmのギャップを設けて配置し、上方に前述と同様のマグネットを0.1mmのギャップを設けて配置した。これをフィクスチャにセットしてアイソレータ特性を測定した。その結果をFig. 9に示す。

Fig. 9の測定結果を読み取り、挿入損失0.5dB以下、アイソレーションおよび反射損失15dB以上の周波数帯域幅をTable 2に示す。

同表からわかるように、各項目の周波数帯域幅は、無調整のCIRの特性 (Fig. 5) に比べて著しく改善されていることがわかる。

7. 信頼性

本報告のCIR/ISOは熱膨張係数の異なるGC、フェライトおよびAg導体を使用しているため、温度変化による各部材の割れや破断が起こることが考えられ、信頼性確認のためにCIR/ISO単体およびFig. 8のように構成したCIR/ISOを温度サイクル試験 (−55℃-30分〜125℃-30分) した。その結果、1055回の試験後において、十分なISO特性を示し、部材の割れや断線がないことを確認した。この結果は、金属の塑性変形に対する疲労に関するCoffin-

Fig. 9 Microwave characteristics of the adjusted circulator

Table 2. Properties of the adjusted circulator

Request Properties	Frequency Width (GHz)	Best Value (dB)
Insertion Loss (below 0.5 dB)	4.7	0.3
Isolation (above 15 dB)	10.6	22
Return Loss (above 15 dB)	7.9	23

Manson's Law⁹⁾ (式3) から模擬的に寿命を見積もると、58年以上の予測寿命 (Y) を算出した。

$$Y = \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)^2 \times \frac{\Delta C_1}{\Delta C_2 \cdot d} \quad (\text{年}) \quad (3)$$

ただし、 ΔT_1 は試験の温度差 (180℃)、 ΔT_2 はフィールドを想定した温度差、 C_1 は試験温度サイクル数 (1055)、 C_2 はフィールドで想定した一日の温度サイクル数 (1回)、 d は1年の日数 (365日) を示す。

8. まとめ

小型、低損失および高信頼性のCIR/ISOを開発した。以下に主な成果を述べる。

(1)Ag導体で回路を印刷形成し、その表面にAuめっきしたCIR/ISOを作製し、30GHzで挿入損失0.5db以下を実現した。

(2)SIG回路の円形導体部直径は、2つのTM110モード共振が結合するモデルから概略算出できた。

(3)上記CIR/ISOは、温度サイクル試験 (−55℃〜125℃) で1055回後も十分なISO特性を示し、高信頼性を有することがわかった。

(1999.9.24-受理 2000.1.17-再受理)

文献

- 岡田文明：“マイクロ波工学 基礎と応用”，学献社，1993
- 橋本雅之：“加速試験の進め方・方法とデータ解析・評価”，応用技術出版，1992