



マイクロ波薄膜抵抗器 – CH シリーズ

By Didier Darrouzes and Aimen Oueslati

概要

高周波回路はワイヤレステクノロジーの進化と強固な関係にあり、データ送受信の高速化を図る強力なソリューションを提供します。高速化のニーズは、軍、航空宇宙、車載、そして当然モバイル 5G など、ほぼすべての市場での通信に関係します。受動部品はこれらの周波数とリンクする物理特異性に準拠する必要があり、抵抗器も例外ではありません。“マイクロ波”周波数範囲は 300 MHz から 300 GHz⁽¹⁾ ですが、この範囲に入る集中定数抵抗器は更に限られています。

歴史の概要⁽²⁾

James Clerk Maxwell (スコットランド、エディンバラで誕生) はマイクロ波理論の創立者で、著名なる公式を 1860 年代に発表しました。氏の“Treatise on Electricity and Magnetism”は 1873 年に出版されました。Heinrich Hertz (ドイツ、ハンブルク誕生) は 1888 年、周波数がおよそ 1 GHz の電磁波の生成に初めて成功しました。彼の功績は無線工学の開発に大きな影響を与えました。1930 年代、Guglielmo Marconi (イタリア、ボローニャ誕生) は地球上で 2 つの地点を空気中の電磁波で接続できることを実証し、無線通信の幕開けを告げました。翌年以降も多くの発見がされ、医療、工業用加熱、電波天文学、粒子加速器、電子機器など多くのアプリケーションに貢献しました。

マイクロ波周波数帯域

国際電気通信連合(1)によると、マイクロ波周波数範囲は 3 つの帯域を網羅します：UHF、SHF、および EHF です

シンボル	周波数 ⁽³⁾ (GHz)	主な用途
UHF (超高周波)	0.3 to 3	テレビ放送、電子レンジ、電波天文学、携帯電話、bluetooth
SHF (UHFより高い高周波数) Frequency)	3 to 30	電波天文学、通信、レーダー、ケーブルテレビや衛星 テレビ放送
EHF (極高周波)	30 to 300	電波天文学、マイクロ波遠隔検出、アマチュアラジオ、衛星 ラジオ

1 GHz から 110 GHz の間で、電気電子技術者協会 (IEEE) は下表に示すようにサブバンドを定義しています。

注：

- (1) [国際電気通信連合ラジオ通信部門\(ITU-R\) – 推奨 ITU-R V.431-8 \(08/2015\)](#)
- (2) ‘Micro-ondes’ Paul F Combes Dunod (1996)
- (3) 下限は排他的、上限は包括的

マイクロ波薄膜抵抗器 – CH シリーズ

バンド	周波数 (GHz)	波長
L	1 to 2	30 cm to 15 cm
S	2 to 4	15 cm to 7.5 cm
C	4 to 8	7.5 cm to 3.75 cm
X	8 to 12	3.75 cm to 2.5 cm
Ku	12 to 18	2.5 cm to 1.67 cm
K	18 to 26.5	1.67 cm to 1.13 cm
Ka	26.5 to 40	1.13 cm to 0.75 cm
Q	33 to 50	9 mm to 6 mm
V	50 to 75	6 mm to 4 mm
W	75 to 110	4 mm to 2.73 mm

基本知識

マイクロ波効果は、長さ = l の伝送ライン (RF ケーブル、コネクタと基板上の配線) を介して信号発生器 ($R_g = 50\Omega$) に接続された抵抗負荷

($R = 50\Omega$) を使って簡易的に説明できます。

低周波数 $\lambda \gg l$ (図 1.a) では波長による伝搬遅延はなく、伝送線上の電圧も均一です。また、 $Z_g = R = 50\Omega$ 、および最大電力が負荷 $P_{max} = (V_g / 2)^2 / R$ に送信されるため、負荷から発電機への信号反射もありません。

抵抗器負荷は“純粋な”抵抗器動作を示し、ごくわずかな寄生インダクタンスと容量値が見られます。

非常に高い周波数 $\lambda \ll l$ (図 1.b) では他の現象も現れます。抵抗器の構造、または抵抗器から基板配線インタフェースにより生成されるすべての寄生要素は、初期の“純粋な”負荷抵抗値を複雑な負荷インピーダンス $Z \neq 50\Omega$ へと変化させます。

この現象の欠点はインピーダンスの不整合で以下の現象が起こります：

- 負荷に伝わる電力の減少
- 係数要因による反射効果 $\Gamma = (Z - Z_c) / (Z + Z_c)$ - Z_c は伝送線の特性インピーダンス
- 伝送遅延が発生し、電線上の 2 点における電位が異なる $V(0) \neq V(l)$

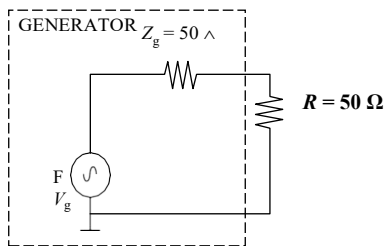


図 1.a

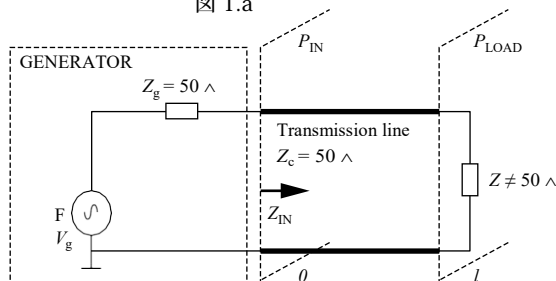


図 1.b

マイクロ波薄膜抵抗器 – CH シリーズ

(図 1.a) 低周波数で 50Ω の抵抗器負荷が、発電機の 50Ω 抵抗器と整合されます。この抵抗器は高周波(図 1.b) で複雑なインピーダンスとなり、不整合に至ります。

寄生効果

薄膜抵抗器技術の場合、基板に実装される面実装抵抗器のインピーダンス Z は下記図のようにモデル化できます。このモデルは DC から 50 GHz 周波数まで有効です。

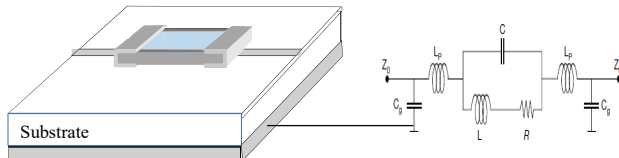


図. 2

注：

- R が公称抵抗値
- L が抵抗器に関連するインダクタンス値
- C は抵抗器に関連する容量値
- L_p は抵抗器を回路に実装することによる寄生インダクタンス
- C_g は抵抗器を回路に実装することによる寄生容量値
- Z_0 は回線の特徴インピーダンス

インピーダンスは周波数の関数であるため、 $|Z|/R$ 曲線は、“完璧な” 50Ω 抵抗器と比較した“真”の抵抗インピーダンス vs. 周波数の変化を示すために最適です。

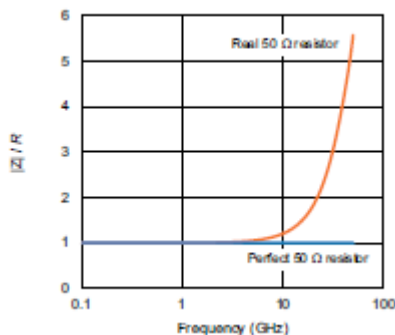


図 3 – 周波数が増加するとインピーダンスは 50Ω から逸れます

試験と測定

インピーダンス Z は確かに有効ですが、発電機、コネクタ、基板配線の不整合に関するすべての寄生効果の考慮が必要なため、直接測定することができません。このため、反射波および送信波を測定することが、インピーダンスを測るより良い方法となります。この方法ではスキャタリング・パラメーター (S パラメーター) を使います。適正な較正後、被試験体 (DUT) の S パラメーターを抽出し、順方向と逆方向の両方で信号を変換する方法を理解することができます。

マイクロ波薄膜抵抗器 - CH シリーズ

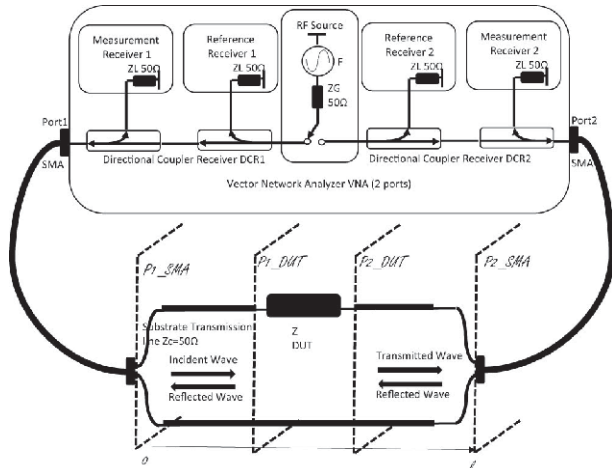


図 4a - 2ポート VNA による S パラメーター測定のための試験セットアップ。ポート 1 は RF ソースに接続されています。

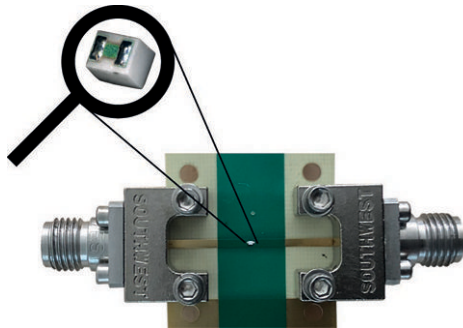


図 4b - 面実装抵抗器と面実装コネクタを実装する試験測定用基板

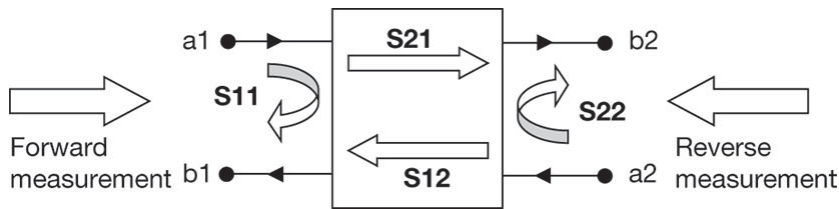


図 5

- S11 は順方向測定での反射路
- S21 は順方向測定での送信路
- S12 は逆方向測定での送信路
- S22 は逆方向測定での反射路

a1、b1、a2、b2 は電力の平方根として定義される波。

スキャタリング・マトリックスは入射波 a1、a2 と、外向き波 b1、b2 を線形方程式でリンク。

$$\begin{bmatrix} b1 \\ b2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S11 & S12 \\ S21 & S22 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a1 \\ a2 \end{bmatrix}$$

マイクロ波薄膜抵抗器 – CH シリーズ

従って、Sパラメーターは以下のように定義できます：

- $S_{11} = b_1 / a_1$ 、 $a_2 = 0$
- $S_{21} = b_2 / a_1$ 、 $a_2 = 0$
- $S_{12} = b_1 / a_2$ 、 $a_1 = 0$
- $S_{22} = b_2 / a_2$ 、 $a_1 = 0$

Sパラメーターは複素数値のため、その大きさは、他の複素数値と同じように計算することができます。

例：

$$|S_{11}| = \sqrt{\text{Re}(S_{11})^2 + \text{Im}(S_{11})^2}$$

一般的に、Sパラメーターはデシベル(dB)単位で定義されます。

二つの電圧の比率であるため、次の公式を利用します：

$$|S_{11}|_{\text{dB}} = 10 \times \log(|S_{11}|)$$

4つのSパラメーターはDUTの動きを十分に表し、システムを完全に特徴づけることができます。これらに基づき、DUTの構成要素を求めるなど計算をさらに進めることができます。例として、インピーダンスZの大きさは次の単純な関係で算出することができます。

$$|Z| = \frac{2 \times Z_0 \times |S_{11}|}{|1 - S_{11}|}$$

テクニカルソリューション

抵抗器に適用する薄膜技術は寄生インダクタンスと容量値を軽減することができます。

薄膜抵抗器は薄い金属抵抗層を基板上に真空蒸着し、フォトリソグラフィーによりエッチングされたものが基本的な構造となります。

ビシェイ Sfernice ブランドのCHマイクロ波ファミリーは、純アルミナ基板(99.5%)上のニクロム抵抗層、端子材料はニッケルバリアに施され、SnAgまたは金めっきを特長とします。

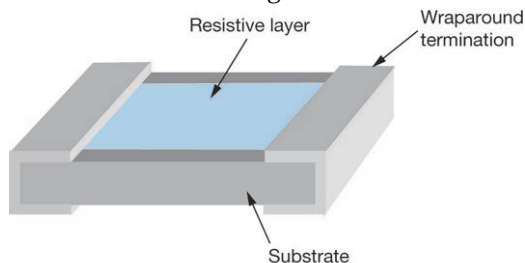


図6 – ラップアラウンド設計

上記のラップアラウンド抵抗器の利点は、他の面実装品と同様に回路にはんだ付けされることです。抵抗層は直線で大きな信号経路を持ち、信号通過を緩和し、寄生要素を軽減します。多くの場合にこの設計は高性能を提供しますが、最良の設計ではありません。抵抗器の全長を通過する必要がある信号は、寄生インダクタンスとしてとらえることができます。電流経路が短いほど寄生インダクタンスは減少します。電流経路を短くするには、部品サイズを小さくするか、端子の配置を次のように近づけます。

マイクロ波薄膜抵抗器 – CH シリーズ

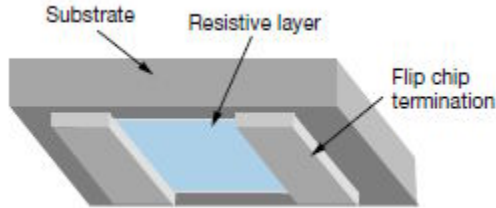


図 7 – フリップチップ設計

フリップチップ設計はラップアラウンド設計と異なり、抵抗層が回路に面しています。これにより信号経路が短くなり、Sパラメーター曲線および $|Z|/R$ 曲線にてその効果が見られます。そのインピーダンスは、周波数軸に沿ってさらに安定しています。

例として 50 GHz、基板の $\epsilon_r = 3.6$ の場合、標準波長は $\lambda = 3 \text{ mm}$ です。

CH フリップチップ 02016 サイズでは、抵抗線の長さ $l = 300 \mu\text{m}$ が実現可能、 $\leq \lambda / 10$ となります。従って、集中定数素子を使うことに問題はありませぬ。

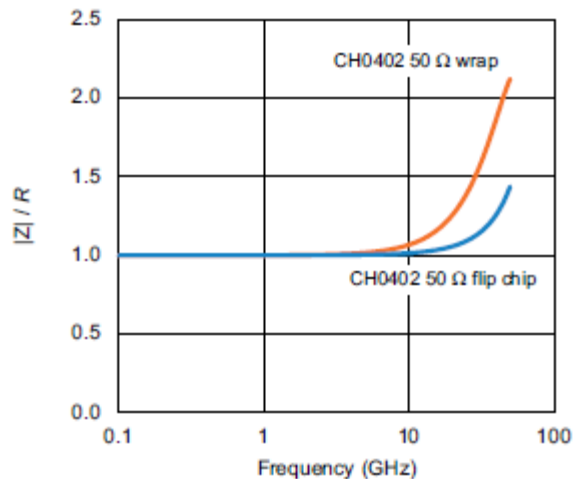


図 8 – フリップチップとラップアラウンド設計の比較

上記の曲線により、0402 ケースサイズによるフリップチップとラップアラウンド設計の CH 抵抗器に $|Z|/R$ をもたらします。10 GHz を超えると性能に大きな差が見られ、フリップチップ設計では寄生素子による影響が少ないことがわかります。

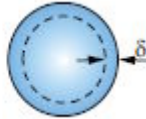
物理的考慮

側面表皮効果

表皮効果とは、電流密度が導体の端（表皮）から中心に向かって減少するよう、導体の端に交流電流が分布する傾向の事です。結果として電流分布の限られた表面からの影響を受け、抵抗値が増加します。表皮の奥行き δ は、表面上の電流密度の $1/e$ (約 37%) と定義されます。電流の 90% が導体の表面と δ の間の奥行きに流れ、電流の周波数、および導体の電気および磁気特性に依存します。また、ワイヤ円形の断面において、表皮効果関係の概算は次のようになります：

マイクロ波薄膜抵抗器 – CH シリーズ

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\sigma \mu \pi f}}$$



注：

- δ はメートル単位の表皮の厚み
- ω は角周波数($2 \pi f$) [rad/s]
- f は Hertz [Hz] 単位の周波数
- $\mu = \mu_r \mu_0$ [H/m]
- μ_r は導体の比透磁率
- μ_0 はフリースペースの絶対透磁率 [H/m]
- σ は導体の伝導率 [S/m]

しかし、薄膜技術を使ったフラット導体ではこの現象がより複雑になります(1)。薄膜はナノメートルの単位で計測されるため、厚さ軸での表皮効果は 50 GHz でも顕著ではありません。しかし、幅軸においては逆で、電流分布が次のようになります。

注：

- (1) [フラット導体における側面表皮効果 V. Belevitch Philips tech. Rev 32, 221-231 1971](#)

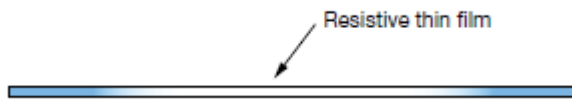


図 9 - 層における非線形電流分布

例として、CH シリーズ NiCr 薄膜での表皮効果は 50 GHz で $\sigma = 0.36 \mu\text{m}$ です。CH シリーズの厚みは $0.1 \mu\text{m}$ なので表皮効果の影響を受けません。

マイクロ波薄膜抵抗器 - CH シリーズ

標準 CH 性能曲線

S パラメーター

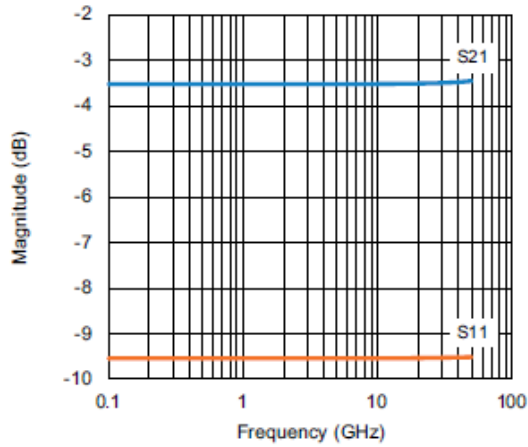


Fig. 10 - CH02016 flip chip ($Z_0 = Z_g = R = 50 \Omega$)

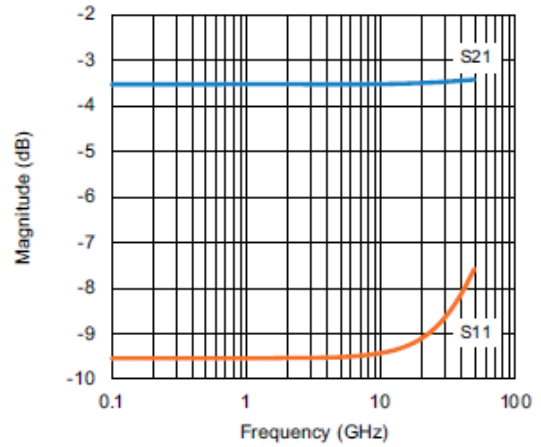


Fig. 11 - CH02016 flip chip ($Z_0 = Z_g = R = 100 \Omega$)

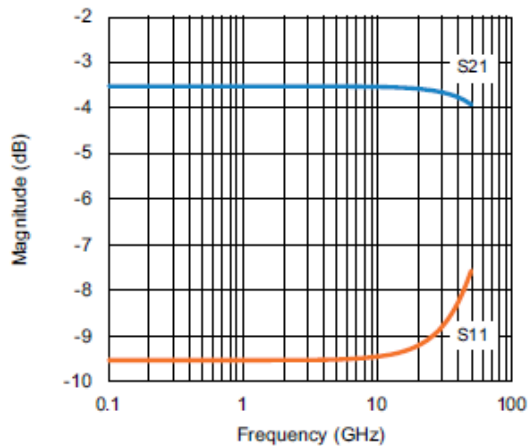


Fig. 12 - CH0402 flip chip ($Z_0 = Z_g = R = 50 \Omega$)

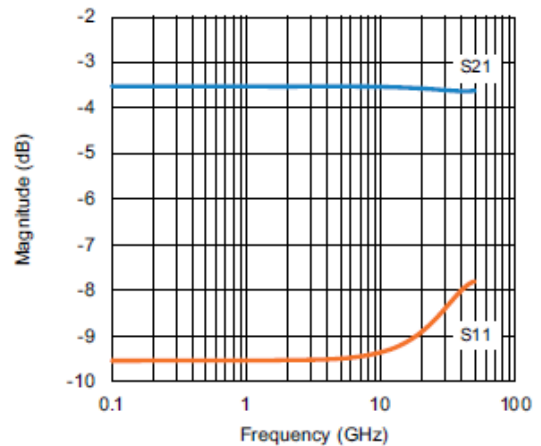


Fig. 13 - CH0402 flip chip ($Z_0 = Z_g = R = 100 \Omega$)

詳細に関しては CH シリーズデータシートを参照してください: www.vishay.com/doc?53014

アプリケーションノート