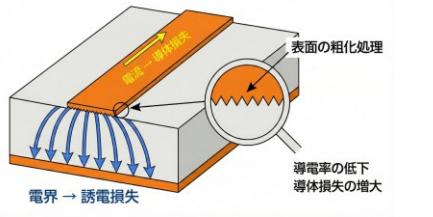


BCDRを用いた基板の誘電損失と 表面粗さによる電気伝導性の測定

5E 春日研究室 柳原魁人

研究背景

- これからの社会(AI,5G/6G)を支えるのは高周波技術。
- データセンター内等のハードウェアでは、とても高い周波数(100 GHz)での通信が必要になる。
- 高周波で基板での損失が大きくなる。

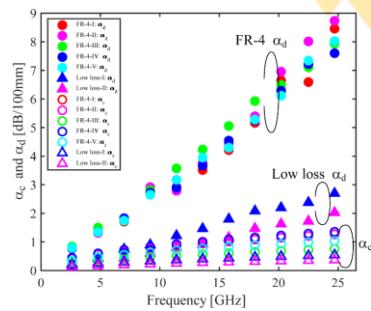


減衰定数 $\alpha = \text{表皮効果 } \alpha_c + \text{誘電体損 } \alpha_d$

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{(\pi f \mu)/\sigma}}{Z_0 W} \quad \alpha_d = \frac{\pi f \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}{c} \tan \delta$$

長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College



研究の背景について説明します。

これからの社会では、AIや6Gの発展に伴って、大量のデータを処理するためサーバやデータセンターで**100GHz級の通信**が必要になります。

周波数が高くなると、基板での損失が大きな問題になります。

損失は主に基盤材料自体での「誘電損失」と表皮効果による「導体損失」があります。

誘電損失の研究は進んでいますが、導体損失、特に表皮効果や表面粗さの影響については、評価が十分ではありません。

研究の目的・やったこと

目的

- 表面粗さによる電気伝導性への影響を明らかにする。

やったこと

- 平衡円板共振器法（BCDR法）による誘電率の測定。
- 導電率測定のため誘電率の測定を行う。
- 導電率測定
- 減衰定数の算出



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

本研究の目的は、**表面粗さが電気伝導性に与える影響を明らかにすること**です。

その評価には、導電率の評価が必要です。

手順として、まず標準試料で基板の誘電損失を求め、次に評価したい試料を測定し、導体損失を算出します。

基板材料の比較

基板名	メーカー名	公称厚	用途
L-6504C2 (FR-4)	東芝ケミカル	0.3mm	高耐久性、高熱伝導性、低価格であり、1GHz以下の帯域でよく使われる。
R-5775GH (MEGTRON6)	パナソニック	0.3mm	1GHz以上・高速通信向け高性能材料。

MEGTRON 6 高周波帯でも低損失な材料で、
サーバやデータセンタなどで使用されていく。
MEGTRON6のような低損失材料の評価が必要
→MEGTRON6を測定



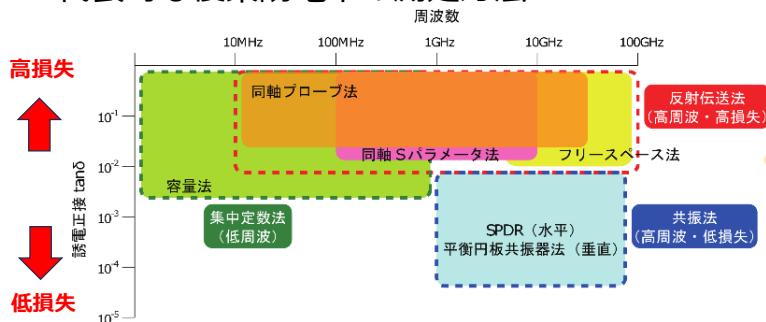
長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

今回の測定対象の基板材料は

MEGTRON6という低損失材料で、高速通信機器に用いられます。

今後の高周波通信では、MEGTRON6のような高性能基板の特性を正確に評価し、設計やシミュレーションに活用することが不可欠です。

代表的な複素誘電率の測定方法



共振法, BCDRが今回の材料, 誘電率, 導電率測定に適している



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

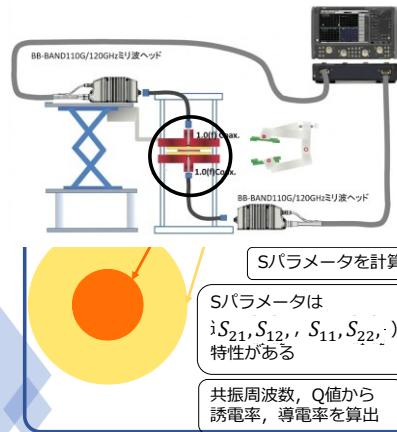
こちらに複素誘電率の代表的な測定法を示しました。

今回測定対象とするMEGTRON6は**高周波帯で低損失材料**なので、この測定に適した手法がこの共振法でBCDR法です。

BCDR法は誘電率だけでなく、導電率の測定も可能です。

平衡形円板共振器の測定原理

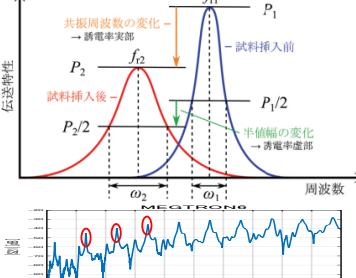
平衡円板共振器法



- 共振周波数 f_r と信号の共振の鋭さの程度を表すQ値を測定

$$Q_1 = \frac{f_{r1}}{\omega_1}, Q_2 = \frac{f_{r2}}{\omega_2}, \frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d}$$

- Q値が高い（ピークが高くて細い）ほど損失が小さい



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

BCDR法の測定原理について説明します。

BCDRとは「平衡円板共振器」のことです。

構造はこのようになっています。

この図のように、測定したい基板を円盤電極で挟み込みます。

一方の電極から高周波信号を入力し、基板を透過してきた信号をもう一方の電極で測定します。周波数を変動させ、その際の電力比を周波数ごとに評価します。

この透過特性が、Sパラメータの一つであるS21です。

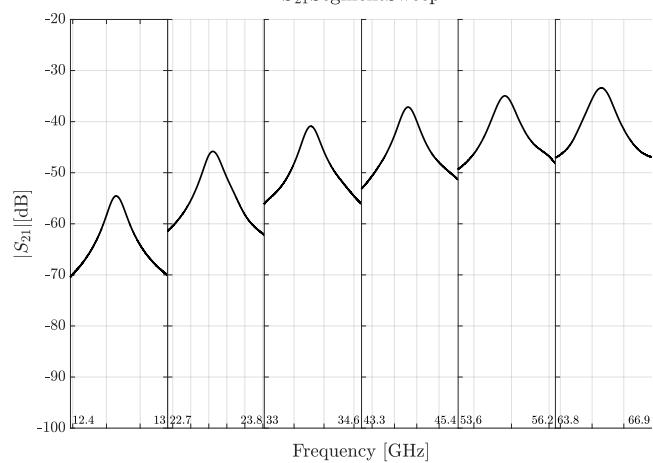
右下のグラフが、S21の例です。特定の周波数で鋭いピークが現れます。この周波数を「共振周波数」と呼びます。このピークの鋭さを表す指標が「Q値」です。Q値が高い、つまりピークが鋭いほど、その材料の損失が小さいことを意味します。

Q値は導体損失によるものと、誘電損失によるものがあります。

BCDR法では、この共振周波数とQ値を精密に測定することで、材料の誘電率や導電率を算出します。

S21 セグメントスイープ

S_{21} SegmentSweep



Sパラメータ測定結果

計算に必要な部分を細く計測



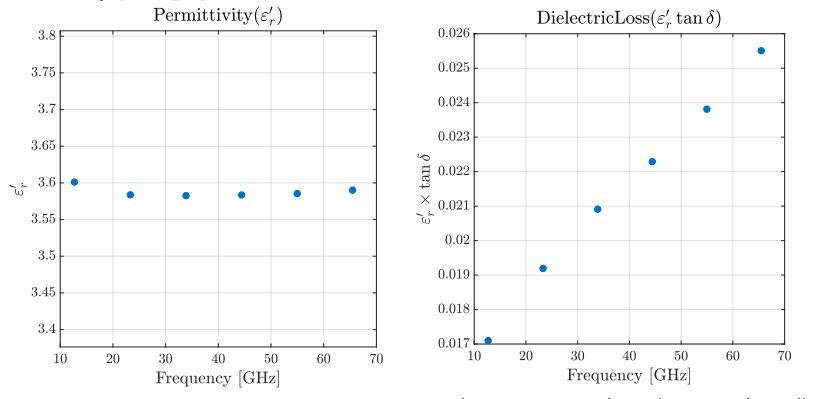
長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

これから実験結果を紹介していきます。

Sパラメータの測定結果で、この結果から各値を算出します。

共振周波数周りを細かく測定しています。

複素誘電率



$$\epsilon_r = \epsilon'_r(1 - j\tan \delta) = \epsilon'_r - j\epsilon'_r \tan \delta = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$$

誘電率は一定の値になった

誘電損失は増加傾向になった。



長野高専 春日研究室

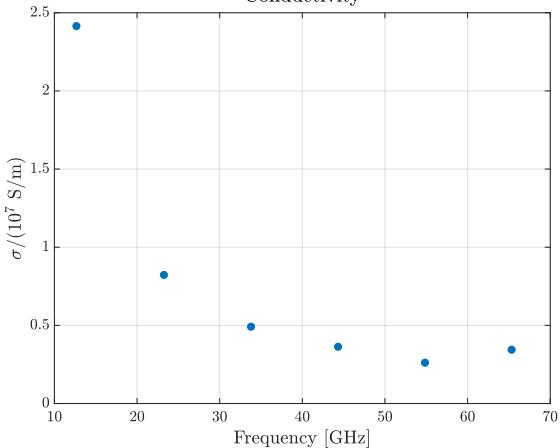
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

誘電率はある程度一定の値になった。

誘電損失は周波数が上がると上昇している。

導電率

Conductivity



実効導電率は周波数が高くなるほど低い
表面粗さ、表皮効果の影響が出ている



長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

導電率の測定です。

この実効導電率は表面粗さによる損失を導電率に含めたもので、
実効導電率は周波数が高くなるほど低くなっている。表面粗さの影響が出
ていると考えられる。

減衰定数

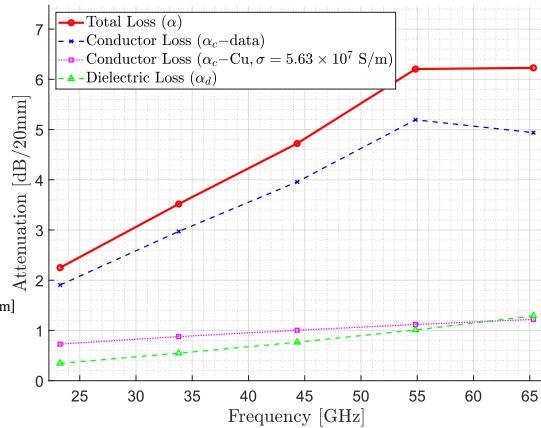
Attenuation Constant Simulation
($W = 0.220 \text{ mm}$, $H = 0.1000 \text{ mm}$, $T = 18.0 \mu\text{m}$)

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r' + 1.41}} \ln \left(\frac{5.98 H}{0.8 W + T} \right)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r' + 1}{2} + \frac{\epsilon_r' - 1}{2} \left(1 + \frac{10H}{W} \right)^{-1/2}$$

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d \alpha_c = 0.17372 \frac{\sqrt{\pi f \mu_0 \rho}}{Z_0 W} \quad [\text{dB}/20 \text{ mm}]$$

$$\alpha_d = 0.17372 \frac{f \pi}{c} \epsilon_r' \sqrt{\frac{\epsilon_{re} - 1}{\epsilon_r' - 1}} \quad [\text{dB}/20 \text{ mm}]$$



誘電率と導電率から算出した減衰定数
実効導電率と導電率から求めたものは大きく違う。



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

これは先程の複素誘電率と導電率から求めた減衰定数。

使った式はこのようになっている。

誘電率から求めた誘電損失,

実効導電率から求めた導体損失,

一定の値の導電率から求めた導体損失。

実効導電率から計算した導体損失は一定の導電率から計算したものよりも大きくなり,

表面粗さの正確な評価が必要だということが分かる。

結果と課題

- ・表面粗さの評価のために導電率の測定をした。
- ・今回は導電率測定をし、減衰定数の算出をした。
- ・MEGTRON6基板で導電率を測定することができた。
- ・導電率から減衰定数の算出をして、高周波において導体損失には表皮効果の影響で損失が増大することがわかった。



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

今回、BCDR法によりMEGTRON6の導電率を高精度に測定できることを確認しました。

導電率から減衰定数を算出して、表面粗さによる導電率の以上で発表を終わります。