

マイクロ波・ミリ波領域の材料定数測定法に関する研究

学位論文内容の要旨

高度情報化社会の進展に伴って、周波数が 1GHz を越えるマイクロ波・ミリ波領域の利用が急速に拡大している。このため、マイクロ波・ミリ波領域の機器に用いられる部材の開発が盛んであり、低損失材を対象にした精度の高い材料定数(誘電率、透磁率、導電率)の測定法が益々重要になっている。マイクロ波・ミリ波の材料定数測定法に関しては多くの研究が知られているが、被測定物の寸法や要求される精度などから生じる制約があり、最近のマイクロ波・ミリ波の部材に適用できる方法は必ずしも揃っていない。本論分は、マイクロ波・ミリ波の領域で用いられる部材を対象とする精度の高い材料定数測定法の開発を目指し、共振器法に分類される4つの測定法について研究した内容を全6章の構成でまとめたものである。

第1章では、研究の背景、本研究以前の研究の状況、本研究の目的について述べた。

第2章では、低損失なリジッド型プリント配線板において、基板に依存する誘電損と金属クラッドに依存する導電損を高精度に分離測定する方法に関する研究について述べた。この測定法は、プリント配線板を用いてトリプレート線路共振器を構成し、線路の断面寸法に対して共振器の損失に依存する無負荷 Q を測定し、無負荷 Q に対する誘電損と導体損の影響が断面寸法に依存して変わる性質を利用して分離する測定法である。S. B. Cohn がトリプレート線路の導体損を理論的に導出した式を用い、トリプレート線路共振器の断面寸法だけに依存する形状パラメータを新たに導入した。いろいろな断面寸法を持つトリプレート線路共振器に対して無負荷 Q を実測し、形状パラメータと無負荷 Q の関係を検討することによって損失分離測定が可能であることを確認した。また、実際のプリント配線板に用いられる工業用銅箔の損失特性をマイクロ波の広い周波数にわたって測定し、この損失分離測定法によって算出された工業用銅箔の実効導電率が直流値の $1/2 \sim 1/3$ に低下することやその原因が銅箔の表面粗さに依存していることなどを詳しく解析し、提案した損失分離法の有効性を実証した。この損失測定法に関する評価は高く、プリント配線板の代表的な評価法のひとつとして既に実用化されている。

第3章では、基板が薄いベールフィルムからなるフレキシブルプリント配線板の損失分離法に関する研究について述べた。フレキシブルプリント配線板はアンテナの給電線路に利用されるなど、低損失性が特に求められるが、トリプレート線路共振器を構成しても、基板が薄いために無負荷 Q が低く、第2章で述べたプリント配線板の損失分離法は適用出来ない問題があった。このため、フレキシブルプリント配線板を含むサスペンデッド線路共振器を構成し、サスペンデッド線路共振器の断面寸法を変えて損失分離を行う方法を検討した。具体的には、フレキシブルプリント配線板で作製したストリップ導体までの距離を変えて無負荷 Q を測定する次具を作製する一方、無負荷 Q に対する誘電損と導体損の影響を規定するパラメー

タを提案した. このパラメータの決定には, 準 TEM 波近似の電磁界に基づいてシールド型ストリップラインの線路パラメータをグリーン関数と変分原理を用いて数値計算する山下らの方法を採用した. トリプレート線路の場合と異なり, 高次モードとの結合が発生し易いため, 周波数 10GHz において, 高次モードの影響がないことを実測で確かめた. また, ベースフィルム厚さを変えた検討によって, 厚さが 25 μm 程度のポリイミドフィルムを基板に持つ一般のフレキシブルプリント配線板であれば, 損失分離測定が可能であることを示した. この測定法はベースフィルムが薄いフレキシブルプリント配線板の簡便な損失測定法として実用性があると考えられる.

第4章では, 空洞共振器法に関して, 空洞壁の導体損の影響を含む電磁界を用いる材料定数測定法に関する研究について述べた. 軸対称 TM 共振モードを対象に, 空洞壁内部の電磁界も考慮した空洞内部の電磁界を空洞共振器を構成する部材の寸法と材料定数に対してモード整合法を用いて解析し, 空洞壁内部の電磁界の影響を正確に考慮する材料定数測定法を提案した. 導体損がない電磁界に基づいて材料定数を決定する従来の算出方法を適用することによって生まれる誤差を詳しく解析した結果, 材料定数が大きい測定や高次の軸対称 TM 共振モードを用いる測定の場合には, 提案した測定法が僅かに有効であることを示した. 加えて, 空洞壁上に空洞壁と異なる導電率をもつ導体層がある場合の空洞共振器の共振特性を導体層の厚さと導電率に対して解析し, 導体層をもつ空洞共振器を材料定数測定に用いた場合, 導体層の表皮厚が導体層の厚さに近づく条件においては算出される材料定数の値に大きな誤差が生じることを定量的に示した. 実験による検証は必要であるが, 材料定数測定に用いる空洞共振器の設計における表面処理方法に指針を提供する有効な知見が得られたと考えられる.

第5章では, 空洞共振器法に関して, 球空洞共振器とフェライト小球を組み合わせたテンソル透磁率の精密測定に関する研究を述べた. この研究では, テンソル透磁率の厳密解を算出する特性方程式を導出した. また, 無負荷 Q が大きい球空洞共振器を設計・製作し, フェライト材料に対してテンソル透磁率を実測し, 提案した厳密解法の有効性を検証した. 厳密解を摂動解と比較した結果, フェリ磁性共鳴域で大きな違いが生じることが判った. 現在最も一般的に用いられている直六面体空洞や円筒空洞を用いる摂動法による測定値には, もっと大きな誤差が含まれていることは確実である. この測定法はマイクロ波・ミリ波領域の非相反素子に用いられるフェライトの開発に大いに寄与するものと期待される.

第6章では, 本研究の成果について要約するとともに残された課題について述べた.

以上, 本研究によってマイクロ波・ミリ波の材料定数測定法がさらに進歩し, 新しい部材の開発が促進されるものと期待される.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 堤 耀 廣

副 査 教 授 大 場 良 次

副 査 教 授 石 政 勉

副 査 教 授 田 村 信一朗

学 位 論 文 題 名

マイクロ波・ミリ波領域の材料定数測定法に関する研究

情報化社会の進展に伴って、周波数が1GHzを越えるマイクロ波・ミリ波領域の機器に用いられる部材の開発、低損失材を対象にした精度の高い材料定数（誘電率、透磁率、導電率）の測定法が重要になっているが、被測定物の寸法や要求される精度などから生じる制約のため最近のマイクロ波・ミリ波の部材に適用できる方法は必ずしも揃っていない。本論文では、マイクロ波・ミリ波の領域で用いられる部材を対象とする精度の高い材料定数測定法の開発を目指し、共振器法に分類される4つの測定法について研究した内容を全6章の構成でまとめている。

第1章では、研究の背景、本研究以前の研究の状況、本研究の目的について述べた。

第2章では、低損失なリジッド型プリント配線板において、基板に依存する誘電損と金属クラッドに依存する導電損を高精度に分離測定する方法の研究について述べた。この測定法は、プリント配線板を用いてトリプレート線路共振器を構成、線路の断面寸法に対して共振器の損失に依存する無負荷 Q を測定し、無負荷 Q に対する誘電損と導体損の影響が断面寸法に依存して変わる性質を利用して分離する測定法である。S. B. Cohn が理論的に導出した式を用い、トリプレート線路共振器の断面寸法だけに依存する形状パラメータを新たに導入している。種々の断面寸法を持つトリプレート線路共振器に対して無負荷 Q を実測し、形状パラメータと無負荷 Q の関係を検討することによって損失分離測定が可能であることを確認している。実際にプリント配線板に用いられる工業用銅箔の損失特性をマイクロ波の広い周波数にわたって測定、実効導電率が直流値の $1/2 \sim 1/3$ に低下することやその原因が銅箔の表面粗さに依存していることなどを詳細に解析し、提案した損失分離法の有効性が大きいことを述べている。

第3章では、基板が薄いベールフィルムからなるフレキシブルプリント配線板の損失分離法の研究について述べた。フレキシブルプリント配線板はアンテナの給電線路に利用されるなど、低損失性が特に求められるが、基板が薄いため無負荷 Q が低く、第2章で述べたプリント配線板の損失分離法は適用出来ない。このため、フレキシブルプリント配線板を含むサスペンデッド線路共振器を構成、断面寸法を変えて損失分離を行う方法を検討

している。ストリップ導体までの距離を変えて無負荷 Q を測定する次具を作製する一方、無負荷 Q に対する誘電損と導体損の影響を規定するパラメータを、準 TEM 波近似の電磁界に基づいてシールド型ストリップラインの線路パラメータをグリーン関数と変分原理を用いて数値計算する山下らの方法により決定している。トリプレート線路の場合と異なり、高次モードとの結合が発生し易いため、周波数 10GHz において、高次モードの影響がないことを実測で確かめ、ベースフィルム厚さを変えた検討によって、厚さが 25 μ m 程度のポリイミドフィルムを基板に持つ一般のフレキシブルプリント配線板であれば、損失分離測定が可能であることを示した。

第 4 章では、空洞共振器法に関して、空洞壁の導体損の影響を含む電磁界を用いる材料定数測定法に関する研究について述べた。軸対称 TM 共振モードを対象に、空洞壁内部の電磁界も考慮した空洞内部の電磁界を空洞共振器を構成する部材の寸法と材料定数に対してモード整合法を用いて解析し、空洞壁内部の電磁界の影響を正確に考慮する材料定数測定法を提案している。導体損がない電磁界に基づく従来の算出方法によって生まれる誤差を解析し、材料定数が大きい測定や高次の軸対称 TM 共振モードを用いる測定の場合には、提案した測定法が僅かに有効であることを示している。加えて、空洞壁上に空洞壁と異なる導電率をもつ導体層がある場合の共振特性を導体層の厚さと導電率に対して解析、表皮厚が導体層の厚さに近づく条件においては材料定数の値に大きな誤差が生じることを定量的に示している。材料定数測定に用いる空洞共振器の設計における表面処理方法に有効な指針が得られたことを述べている。

第 5 章では、空洞共振器法に関して、球空洞共振器とフェライト小球を組み合わせたテンソル透磁率の精密測定に関する研究を述べた。まず、テンソル透磁率の厳密解を算出する特性方程式を導出している。また、無負荷 Q が大きい球空洞共振器を設計・製作し、フェライト材料に対してテンソル透磁率を実測、提案した厳密解法の有効性を検証している。厳密解と摂動解との比較は、フェリ磁性共鳴域で大きな違いを示し、一般的に用いられている直六面体空洞や円筒空洞を用いる摂動法による測定値には、大きな誤差が含まれている可能性があることを明らかにした。マイクロ波・ミリ波領域の非相反素子に用いられるフェライトの開発に寄与することが期待される。

第 6 章では、本研究の成果について要約するとともに残された課題について述べた。

これを要するに、著者は、マイクロ波・ミリ波領域での材料定数について精度の高い測定法を見出しておりマイクロ波・ミリ波領域の機器開発に貢献するところ大である。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。