

学 位 論 文 題 名

高速多層配線系の 3 次元電磁界解析に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、電子デバイスの進歩発達に伴う電気回路の高集積化、高速化が急速に進んでいる。それにつれて、使用周波数の高周波化により回路内において信号の時間的、空間的波動性が見え始めている。この様な場合、配線間結合や伝搬遅延などの問題に見られるように回路配線は集中定数的取扱いから分布定数的取扱いが必要となってくる。一般に、配線における分布定数効果は L, C の梯子回路により構成されているが、高周波帯域では多層配線板の 3 次元配線構造を集中定数素子で厳密に置き換えることが容易ではないこと、また、回路パラメータの周波数分散特性の考慮が容易ではない等の問題がある。そこで、この様な系の取扱いには電磁界解析手法が有効となる。本研究は、電子装置の小型・高機能化に有効な高速多層配線板の基本設計・解析技術確立を目的として、分布定数効果や周波数分散特性が物理構造により自動的に考慮される 3 次元電磁界時間応答解析手法を用いた多層配線板の電磁界解析に関する詳細な検討を行っている。その中では、大規模な問題を小規模な部分に分けて解く分割解法すなわち *Diakoptics* の概念に基づき、多層配線板の設計・解析を行う 1 ステップとして配線板に不可欠な小規模配線部分である 3 次元構造を持つスルーホールの伝送特性およびカップリング特性と平行マイクロストリップ線路のクロストーク解析について検討している。

本論文は、7 章で構成されている。以下に、各章の概要を述べる。

第 1 章では、本研究の背景および目的、従来の関連する研究の概要と当面する課題について述べた。

第 2 章では、電磁界シミュレーションに用いられる汎用的な主な手法の中で時間領域有限差分法と空間回路網法について簡単な説明を行った。

第 3 章では、空間回路網法を用いたスルーホール伝送特性解析について検討を行った。多層配線板に不可欠なスルーホールは複雑な 3 次元構造であるためこれまで高周波帯での伝送特性解析は容易ではなかったが、空間回路網法を用いたシミュレーションによって初めてスルーホール伝送特性解析を定量的に検討した。その結果、時間応答波形と周波

数応答の反射特性において計算値は実験値と良好な一致が確認された。そして、スルーホールは構造条件に依存にして空間的に分布したC成分とL成分の合成によって構成されていることが時間応答波形より新知見として得られた。また、周波数応答より直流成分はスルーホールをほぼ通過し高周波帯で極小値を持つことを確認した。これらのことから、スルーホール伝送特性解析に対する空間回路網法を用いたシミュレーションの妥当性と有効性およびスルーホール伝送特性を定量的に初めて明らかにした。

第4章では、前章の空間回路網法に比べて計算効率の高い時間領域有限差分法を用いた平行マイクロストリップ線路のクロストーク解析について検討した。多層配線板は3次元的に配置された配線間でのクロストークの把握が回路設計上重要である。そこで、シミュレーションによるクロストーク解析の妥当性と有効性の確認を実験値と比較することによって行った。その結果、計算値と実験値はクロストーク時間応答波形、近端漏話係数および遠端漏話係数において良好な一致をすることが確認された。また、不等間隔メッシュ接続を用いて計算効率の向上が図れることを示した。以上のことから、クロストーク解析に対して時間領域有限差分法を用いたシミュレーションが有効かつ妥当であることを示した。

第5章では、シミュレーションの高速化と効率化を目的として、時間領域有限差分法をスルーホール伝送特性解析に適用し実験値との比較検討を行った。その結果、計算値と実験値の良好な一致を確認し、スルーホールのSパラメータはスルーホール入出力線路の結合角、ロッド直径等に大きく依存していることを明らかにした。更に、スルーホールのエネルギー損失と放射損失の周波数特性を計算値と実験値から定量的に初めて求め、それらの損失は回路設計において十分な考慮が必要なレベルであることを示した。また、エネルギー損失と放射損失は主としてランド部分に起因し、その他入出力線路の結合角、ランド直径およびロッド直径に依存すること等を明らかにした。その中で、ロッド直径の変化によってエネルギー損失がピーク値を持たない単調増加となること、結合角が直角の場合においてのみ通過特性が一種のローパスフィルタ的な周波数特性となること等の様に著しい現象の変化が構造条件に応じて発生することを確認した。時間応答特性では結合角に依存した通過波と反射波の分散特性とロッド直径の変化によるC成分とL成分の影響が確認された。尚、第3章の空間回路網法に比べて時間領域有限差分法を用いたシミュレーションは計算効率の大幅な向上が図られた。これらのことから、スルーホール伝送特性の詳細な検討結果と時間領域有限差分法を用いたシミュレーションの有効性を明らかにし、高速多層配線板の設計においてスルーホール伝送特性解析が非常に重要であることを示した。

第6章では、多層配線板の高機能化にとって配線間の相互的な影響を考慮した設計が重要であるため、時間領域有限差分法を用いたスルーホールを含む3次元配線系のカップリング特性解析を検討した。その結果、計算値は実験値とカップリング係数において良好

な一致をすることを確認し、カップリング係数は被誘導側の線路位置、スルーホール入出力線路の結合角および結合線路間のカップリング距離に依存することをシミュレーションによって示した。その中で、結合角が直角で下層板に被誘導線路がある場合、カップリング係数は低周波数帯ではほぼフラットであることやスルーホール間のカップリングにおいて上層板に比べて下層板の被誘導線路側に強いカップリング現象が現れることをシミュレーションから予測した。更に、パルス入力に対する電界強度分布の可視化は、カップリング現象の物理的な動作状態の理解に有効かつ重要であることを示した。

第7章では、結論で各章の主たる結果をまとめて総括した。

以上、本研究は多層配線板に不可欠な小規模配線部分の諸特性に関する有益な多くの新知見を明らかにすると共に、電磁界解析手法を用いたシミュレーションによる特性解析の有効性と妥当性を示した。本研究により高速多層配線板の基本回路設計・解析技術の1ステップが確立され、今後、設計解析技術の一層の高度化に貢献できるものと考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 柴 正 則

副 査 教 授 伊 藤 精 彦

副 査 教 授 本 間 利 久

副 査 教 授 永 井 信 夫

学 位 論 文 題 名

高速多層配線系の3次元電磁界解析に関する研究

近年、電子デバイスの進歩に伴う電気回路の高集積化、高速化が著しく、使用周波数の高周波化により回路内において信号の波動性が見え始めている。このような場合、配線間結合や伝搬遅延などの問題に見られるように、回路配線は分布定数的取扱いが回路設計上必要となってくる。しかし、多層配線板は3次元構造配線のため、高周波帯での分布定数的取扱いや回路パラメータの周波数分散特性の考慮が容易ではないといった問題がある。

本論文は、電子装置の小型・高機能化に有効な高速多層配線板の基本設計・解析技術確立を目的として、分布定数効果や周波数分散特性が自動的に考慮される3次元電磁界時間応答解析手法を用いて、多層配線板の電磁界解析に関する詳細な検討を行ったものである。具体的には、分割解法概念に基づき、多層配線板に不可欠な小規模配線部分であるスルーホール伝送特性およびおカップリング特性と平行マイクロストリップ線路のクロストーク特性について検討している。

第1章では、本研究の背景および目的、従来の関連する研究の概要と当面する課題について述べている。

第2章では、電磁界シミュレーションに用いられる汎用的な解析法として、時間領域有限差分法と空間回路網法についての簡単な説明を行っている。

第3章では、空間回路網法を用いたスルーホール伝送特性の検討を行っている。従来、スルーホールは複雑な3次元構造であるため、高周波帯での伝送特性解析は容易ではなかった。そこで、空間回路網法を用いたシミュレーションによる計算値と実験値の定量的な比較検討を初めて行い、時間応答波形と周波数応答の反射特性において、両者がよく一致することを確認している。時間応答波形からスルーホールの構造条件に依存したキャパシタンス成分とインダクタンス成分の分布状態に関する新知見を得ている。

また、周波数応答より、直流成分はスルーホールをほぼ通過し、高周波帯で極小値をもつことを確認している。

第4章では、配線間でのクロストークの把握が多層配線板の回路設計上重要であるため、空間回路網法に比べて計算効率の高い時間領域有限差分法を用いた平行マイクロストリップ線路のクロストーク解析について検討している。そこでは、計算値と実験値は、クロストーク時間応答波形、近端および遠端漏話係数においてよく一致することを確認している。また、不等間隔メッシュ接続を用いて計算効率の向上を図ることができることから、クロストーク解析に対して、時間領域有限差分法を用いたシミュレーションが有効かつ妥当であることを示している。

第5章では、シミュレーションの高速化と効率化を目的として、時間領域有限差分法をスルーホール伝送特性解析に適用し、実験値との比較検討を行っている。その結果、計算値と実験値の良好な一致が確認され、スルーホールのSパラメータはスルーホール構造に強く依存していることを明らかにしている。さらに、スルーホールのエネルギー損失と放射損失を初めて計算値と実験値から求め、回路設計において損失に関する十分な考慮が必要であることを示している。また、エネルギー損失と放射損失は主としてランド部分に起因し、その他に入出力線路の結合角、ロッド直径に依存していることなどを明らかにしている。時間応答特性では結合角に依存した通過波と反射波の分散特性とロッド直径の変化によるキャパシタンス成分とインダクタンス成分に関する知見を得ている。これらのことから、スルーホール伝送特性の詳細な検討結果と時間領域有限差分法を用いたシミュレーションの有効性を明らかにし、多層配線板の設計においてスルーホール伝送特性解析が非常に重要であることを示している。

第6章では、多層配線板の高機能化にとって、配線間の相互的な影響を考慮した設計が重要であるため、時間領域有限差分法を用いたスルーホールを含む3次元配線系のカップリング特性解析を検討している。そこでは、計算値と実験値のカップリング係数がよく一致することが確認され、カップリング係数は被誘導側の線路位置、スルーホール入出力線路の結合角および結合線路間のカップリング距離に依存することをシミュレーションによって予測している。また、パルス入力に対する電界強度分布の可視化がカップリング現象の物理的な動作状態の理解に有効かつ重要であることを示している。

これを要するに、著者は、高速多層配線板の回路設計・解析技術に対して、その小規模配線部分の諸特性に関する有益な多くの新知見を提供すると共に、時間領域有限差分法を用いたシミュレーションが非常に有効であることを示しており、高周波回路工学、マイクロ波工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

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あるものと認める。