

学 位 論 文 題 名

素子特性を考慮した3次元フルウェーブ回路解析法に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、半導体技術の進歩に伴う集積回路の超高速化は著しい。それに伴う使用周波数の高周波化により当該回路においても信号の時間的、空間的波動性が見え始めており、そのような回路の取り扱いには集中定数的取り扱いから分布定数的取り扱いへと移行しつつある。特に、分布定数効果による信号の伝搬遅延の問題等は特性への影響が大きく、このような系の取り扱いの際、電磁界解析法が有効となる。電磁界解析法は、一般に、準静的解析、周波数領域解析、時間領域解析と3つに分類できる。準静的解析とは、電磁界解析の段階で時間項を無視し、ラプラス方程式を支配方程式とした解析をいい、従来のLSIおよび各種アナログ回路は、その回路サイズとその動作周波数から集中定数的取り扱いの領域に属し、配線の遅延効果の問題も定常的な配線容量と配線抵抗、回路の負荷インピーダンスを考慮したゲート間遅延、クロストークの問題として取り扱われている。周波数領域解析は時間項を陰に含むヘルムホルツ方程式に基づく解析であり、時間領域解析は時間項を陽に含むマクスウェル方程式に基づく解析で、両者は全電磁界成分を用いて解析を行う点からフルウェーブ解析と呼ぶ場合もある。時間領域における数値計算は、現在のデジタルシステムにおいて重要であるパルス伝搬を扱う場合において、周波数領域計算に比べ優位で、フーリエ変換を利用して周波数領域換算も可能である点でも有効な数値計算法である。数値計算法の中でもマクスウェル方程式の差分表現に基づく時間領域解析法は一般にシミュレーション法として知られている。シミュレーション法が一般の数値計算法と分類される理由は、有限要素法、境界要素法、モーメント法等に代表される数値計算法が多くの場合、特定の電磁界モードの固有状態とそれに対応した特性パラメータを計算

するのが一般的であるのに対して、シミュレーション法は時間のみを陽なパラメータとして状態を計算する点にあり、あたかも実際に起こる現象を計算機の中に再現し、そこで実験を行うと考えてもよい点からである。シミュレーション法として分類されるマクスウェル方程式に基づく時間領域における数値計算法としては有限差分時間領域法(FD-TD:Finite-Difference Time-Domain)、伝送線路行列法(TLM:Transmission Line Matrix)、空間回路網法(SNM:Spatial Network Method)が挙げられる。有限差分時間領域法はマクスウェル方程式を直接時間軸上で差分し逐次的に界分布を求めていく手法で、数値的安定性に問題が生じることがあるが、計算効率に優れている特徴をもつ。また、伝送線路行列法、空間回路網法はマクスウェル方程式を満足する電磁界の等価回路網を考え、それを時間軸上で差分し逐次的に界分布を求めていく手法で、記憶容量が大きい等計算効率に難点をもつが、数値的安定性に優れている。最近、これらのフルウェーブ解析であるシミュレーション法をマイクロ波回路の解析に適用する試みが、盛んに行われている。ICチップ上の回路において信号の波動性が見え始める領域すなわち回路の物理長と信号の波長の比が1に近づく周波数は数十GHz以上の高周波領域であり、この領域では、全電磁界成分を用いたフルウェーブ解析が必要となる。実際、周波数がミリ波領域に近づくに従い、MMICチップ上の回路を分布定数回路として考えるべき領域に入り始め、一部、集中定数キャパシタンス、インダクタンスを併用しつつ、分布定数回路構成のモノリシック化の試みが行われている。さらに、近年盛んに報告されている100GHz級の f_t 、 f_{max} を有する高速集積デバイスやピコ秒オーダの立ち上がりを持つ電気パルスを発生するフォトコンダクティブスイッチの回路応用を考えた場合、デバイスを含めた系全体の分布定数的取り扱いによるの設計が必須となると予想され、その意味で、LSIチップ上のモノリシック回路に対するフルウェーブ解析は、今後の高速回路技術の柱であると言える。

また、広帯域な回路の設計において分布定数効果と非線形素子を一体に解析する方法が必要となっており、それらは一般に、配線系のLC梯子回路に非線形素子の等価回路を付加することで計算されているが、放射損等の損失の取り扱いや線路パラメータの周波数分散特性が考慮されない等の問題がある。それに対して、最近、非線形回路解析に対する解析法として非線形部と線形部を切り分けて効率

よく計算するハーモニックバランス法が提案されているが、基本的に定常状態の解析で考慮し得る高調波の次数を実質的にあまり多くとれない等の問題があり、適用できる回路が限定されている。

そこで、本論文では、上述の問題の解決のため、従来において分布定数受動回路の解析に用いられているフルウェーブ数値計算法であるマクスウェル方程式の直接の差分表現である有限差分時間領域法およびマクスウェル方程式を満たす電磁界の等価回路の差分表現である空間回路網法に非線形素子の等価回路を組み込むことで、集積回路における配線系の分布定数効果および素子の非線形特性両者を考慮した統一的3次元フルウェーブ回路解析法の提案を行っている。本解析法により、分布定数回路は物理的な構造、材料パラメータを用いて容易に考慮され、回路解析とともに従来の電磁界解析が一体化して行われ、従来から提案されている様々な回路解析では困難であった線路の周波数分散特性および回路からの放射損等を含めた非線形回路の厳密な解析が可能となる。第1章では電磁界解析法の分類、本論文の構成について述べている。第2章では数値計算法である有限差分時間領域法、空間回路網法について簡単に説明を行い、空間回路網法については遅波特性を利用した可変的空間離散化法について述べている。第3章では、高周波帯で問題となる集積回路配線系の導体損、誘電体損および放射損等の損失の取り扱いについて述べ、その取り扱いについてエネルギー保存則を用いて妥当性を論じている。第4章では半導体素子の解析においてスカラーポテンシャル、ベクトルポテンシャルを用いた電界の縦成分、横成分両者を考慮した厳密な解析法について提案し、従来の電界の縦成分のみを考慮した解析法との比較を行っている。第5章では、第3章および第4章での取り扱いを利用し、広帯域な回路の回路設計で必要とされる配線系の分布定数効果および素子の非線形素子特性を考慮した統一的3次元フルウェーブ解析法について提案している。第6章では、本研究の総括を行っている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	深井一郎
副査	教授	長谷川英機
副査	教授	小柴正則
副査	助教授	吉田則信

学位論文題名

素子特性を考慮した3次元フルウェーブ回路解析法に関する研究

近年、半導体技術の進歩に伴う集積回路の高集積化、高周波化は著しく、それに伴い回路内部においても信号の波動性が見え始める領域にはいつている。回路の分布定数効果は信号の伝搬遅延問題等に既に現れており、その意味で、回路の分布定数的取り扱いには回路設計においては必要不可欠なものとなっている。また、回路設計においては最近の計算機性能の向上に伴い、差分法、有限要素法、境界要素法等の数値計算法の利用が実用的となってきた。数値計算法の中でもスーパーコンピュータの出現に伴い可能となったマクスウェル方程式の差分表現に基づく計算法はシミュレーション法として、数値計算法の中でも分類され、電磁界解析に用いられている。有限要素法、境界要素法、モーメント法等に代表される数値計算法が多くの場合、特定の電磁界モードの固有状態を計算するのが一般的であるのに対して、シミュレーション法は時間のみを陽なパラメータとして状態を計算する点にあり、あたかも実際に起こる現象を計算機の中に再現し、そこで実験を行うと考えてもよい手法で、時間軸上で現象の可視化が行えるという点でも有効な解析法である。

本論文は広帯域な回路設計において必要となっている配線系の分布定数効果および素子の非線形素子特性両者を考慮した回路解析を目的として、従来において分布定数受動回路の解析に用いられてきたシミュレーション法として分類される3次元電磁界解析法である有限差分時間領域法および空間回路網法に素子の等価

回路を組み込むことにより統一的3次元フルウェーブ回路解析法の提案を行っている。

第1章では、回路設計の立場から見た電磁界解析法の分類を試み、さらに、本論文の構成について述べている。第2章では、数値計算法としてマクスウェル方程式の直接の差分表現である有限差分時間領域法、マクスウェル方程式を満たす電磁界の等価回路網の差分表現である空間回路網法について説明を行い、さらに、微細構造解析において必要となる可変的空間離散化法について述べている。第3章では、回路配線系において問題となる導体損、誘電体損および放射損等の損失の3次元電磁界解析法における取り扱い法について述べ、その妥当性をエネルギー保存則により検討している。第4章では、高周波帯で問題となると予想される横波電界を考慮した半導体素子の解析について、スカラポテンシャルとベクトルポテンシャルを用いた電界の縦成分および横成分両者を用いた解析法を提案し、ステップリカバリーダイオードを例として従来の縦成分電界のみを考慮した解析との比較を行っている。その結果、横成分電界は縦成分電界に比べ十分小さく、従来の縦成分電界のみによる解析法で十分であることを示している。第5章では、配線系の分布定数効果と素子の非線形素子特性両者を考慮した解析を目的として、分布定数受動回路の解析に用いられている3次元電磁界解析法である有限差分時間領域法、空間回路網法に素子の集中定数素子を導入法を示している。さらに、本解析法をダイオードおよびトランジスタを含むコプレーナ線路解析に適用し、その有効性を示している。

以上を要するに、本論文は、広帯域な回路設計において必要となる配線系の分布定数効果および素子の非線形特性両者を考慮した解析法の提案を行い、その有効性を述べたもので、その提案は電磁波工学、回路設計に貢献するところ大である。よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。