

論文審査の結果の要旨

氏名：呉 迪

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：複素周波数領域有限差分法の開発とプラズモニックデバイス設計に関する研究

審査委員：（主査） 教授 大 貫 進一郎

（副査） 教授 古 川 慎 一 教授 中 川 活 二

教授 井 上 修一郎

微小金属に局在する表面プラズモンを利用した、光エネルギーを局所領域に集中させるプラズモニックデバイスが注目を集めている。表面プラズモンは光と結合した自由電子の集団振動であり、金属ナノ構造体と誘電体の界面を光と同じ周波数で伝搬するため、回折限界を超えた小型化、高速な信号処理が実現できる。プラズモニックデバイスの設計及びその特性検証に必須となる電磁界解析は、これまで多くの手法が開発・検討されてきた。中でも、時間領域有限差分法（Finite-Difference Time-Domain: FDTD）は商用シミュレータに搭載され、電磁界時間応答解析の代表的な手法として広く利用される。しかしながら、プラズモニック導波路など、ナノメートルの断面構造に対し、導波路の長さがミリメートル以上となるマルチスケールの構造を解析する際は、空間刻みに依存する安定条件から計算コストが膨大となる。無条件安定の陰的 FDTD も開発されているが、計算速度の向上を実現できる一方で、時間間隔が大きくなると計算精度は低下する。このため、高速かつ高精度な解析手法の開発が必要とされていた。

本論文は全 5 章から構成され、申請者が開発した複素周波数領域有限差分法（Finite-Difference Complex-Frequency-Domain: FDCFD）の新規性、正当性及び有用性を、次の点からまとめたものである。

(A-1) ナノスケール電磁界解析における計算精度及び吸収境界と分散モデル

(A-2) 時間応答解析の高速化及び並列化

(A-3) 新規プラズモニックデバイスの設計

以下、各章に沿って審査の内容を報告する。

「第 1 章 序論」では、研究の背景と目的、本論文で用いる記号と用語が適切に説明されている。

「第 2 章 複素周波数領域有限差分法の開発」では、申請者が開発した FDCFD の理論とその定式化が適切に説明され、高速逆 Laplace 変換（Fast Inverse Laplace Transform: FILT）を併用した電磁界の時間応答解析とその計算精度について検証がなされている。また、有限領域での解析を行うために必要な吸収境界の扱いとその実装方法、ナノスケールにおける分散モデルについても議論がなされ、その有用性は以下の点から確認できる。

(B-1) 吸収境界及び分散性として考慮した Hydrodynamic Drude モデルを FDCFD に実装し、その有効性を明らかにした。

(B-2) FDCFD を用いて金属円柱による電磁波散乱の周波数応答解析を行い、厳密解との相対誤差が 1%以下になることを示した。

(B-3) FDCFD と FILT を組み合わせた FDCFD-FILT により、金属円柱における電磁波散乱の時間応答解析を行い、従来の FDTD との相対誤差が 0.1%以下であることを示した。

「第 3 章 時間応答解析の高速化及び並列計算」では、FDCFD と FILT の高速化及び並列化について適切な説明がなされている。また、FDCFD に使用するマルチレベル領域分割法と FILT を適用する際の計算負荷分散法について新規性が確認できる。FDCFD における線形方程式の直接法による求解をマルチレベル領域分割と Schur 補行列を併用することで実現した点、並列計算により FILT を高速化するために複素平面での特異点の最適化及び各計算ノードへの最適な負荷分散を明らかにした点は高く評価できる。本章の有用性は以下の点に認められる。

(C-1) マルチレベルの領域分割と Schur 補行列を適用することにより、三次元 FDCFD における線形方程

式の直接解法を実現した。

(C-2) 複素平面での特異点選択により FILT の最適化を行った。金属球の電磁波散乱解析では従来に比べ約 5 倍の高速化を実現した。

(C-3) FILT における負荷分散を検証し、複素周波数領域分割と時間領域分割の並列化効率及び計算負荷の最大分散数を明らかにした。

「第 4 章 プラズモニックデバイスの設計」では、プラズモニックデバイスの設計例として、FDCFD-FILT を用いた三種類のデバイスの設計及びその特性が検証され、有用性は以下の点から確認できる。

(D-1) 光直接磁気記録用アパーチャー型アンテナ

アパーチャー型アンテナは高密度の光直接磁気記録を実現するための集光器である。局所的に高強度の円偏光を生成するアンテナを設計し、以下の点について明らかにした。

- アンテナ開口部中心において電界強度が増幅すること
- 電界強度と円偏光度の積で評価したアンテナの性能指数より、開口部中心のみに局所的な円偏光が生成できること
- 光照射から約 50fs 後において、定常的な円偏光が生成できること

(D-2) 誘電体装荷グレーティングを用いたプラズモニック導波路

誘電体装荷グレーティングを用いたプラズモニック導波路は光ファイバ間の通信を効率的に行うデバイスとしての提案である。ここでは、誘電体装荷グレーティングカプラーとプラズモニック導波路の設計を行い、導波路の伝搬効率、光ファイバとの結合率を、以下の点から明らかにした。

- 観測面を通過するエネルギーと、グレーティングの周期と幅を変化した際の特性を検証し、薄膜導波路の膜厚変化による伝搬損失から、厚みが 100nm における損失は最小の -2.5dB/100 μ m となること
- 導波路近傍の電界強度分布より、グレーティング構造における光から表面プラズモンへの変換、及び薄膜における表面プラズモンの伝搬過程
- グレーティングを出力端に設けた際、システム全体の入出力比が 12.8%となること

(D-3) 量子ウォーク実現に向けた金属ストリップ型プラズモニック導波路アレイ

金属ストリップ型導波路アレイの量子ウォークへの応用について、以下の点から明らかにした。

- 導波路アレイにおけるエネルギー拡散の時間応答より、量子ウォークに特有なプラズモンの弾道的な広がりとは非 Gaussian 分布の検証
- 導波路アレイを製作し、数値結果と実験結果の電界強度分布の特性が一致
- 金属ストリップ型プラズモニック導波路アレイを用いた量子ウォーク用デバイスの小型化

「第 5 章 結言」では、申請者の行った研究の成果を総括し、今後に残された課題と展望について適切な説明がなされている。

以上、本論文の成果を通観すると、申請者はプラズモニックデバイスを設計するための電磁界シミュレーションに対して、計算効率及び信頼性の高い数値解析手法を開発し、その新規性、正当性及び有用性を示した。また、開発手法をプラズモニックデバイス設計に応用し、新しい知見を得ている点は高く評価できる。これらの成果は、上記の(A-1)、(A-2)、(A-3) に対して以下のように要約できる。

(A-1) ナノスケール電磁界解析における計算精度及び吸収境界と分散モデル

- (a) 吸収境界及び電子の運動方程式から求めた分散モデルを複素周波数領域有限差分法に実装し、参照解と比較することによってその有効性を明らかにした。

(A-2) 時間応答解析の高速化及び並列化

- (b) マルチレベルの領域分割と Schur 補行列の適用により、複素周波数領域有限差分法における線形方程式の直接解法を実現した。
- (c) 高速逆 Laplace 変換法の最適化を行い、従来法より 5 倍の高速化を実現した。
- (d) 並列処理の最適化及び計算負荷の最適な分散法を明らかにした。

(A-3) 新規プラズモニックデバイスの設計

以下のプラズモニックデバイスを設計し、その特性検証を行った。

- (e) 光直接磁気記録用アパーチャ型アンテナ
- (f) 誘電体装荷グレーティングを用いたプラズモニック導波路
- (g) 量子ウォークに向けた金属ストリップ型プラズモニック導波路アレイ

申請者の研究は、電磁界解析、エレクトロニクスシミュレーション、光デバイスなどの研究分野で既に大きな影響を与え、高い評価を得ている（2018年3月電子情報通信学会 学術奨励賞，2019年12月 Photonics and Electromagnetics Research Symposium Best Student Paper Award 1st Prize など受賞）。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門業務に従事するために必要な能力及び基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和3年2月18日