

氏名(本籍)	木村泰己				
学位の種類	博士(工学)				
学位記番号	博甲第 10010 号				
学位授与年月日	令和 3 年 3 月 25 日				
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当				
審査学術院	理工情報生命学術院				
学位論文題目	半導体リソグラフィにおけるレジストモデルの 線形方程式への定式化とその解法に関する研究				
主査	筑波大学	教授	博士(工学)	櫻井 鉄也	
副査	筑波大学	教授	博士(理学)	高橋 大介	
副査	筑波大学	教授	博士(工学)	河辺 徹	
副査	筑波大学	准教授	博士(工学)	今倉 暁	
副査	筑波大学	准教授	博士(工学)	高野 祐一	

論文の要旨

本論文は、半導体リソグラフィシミュレーションにおけるレジストモデルについて、線形方程式への定式化とその解法を提案したものである。

第1章では、まず半導体デバイスの微細化による高集積化の歴史とその限界を紹介し、次に半導体製造工程の概要を説明した上で、研究の目的でもあるリソグラフィ工程を精度良く行う事が半導体デバイスの高集積化の為に非常に重要である事について述べている。

第2章では、リソグラフィ工程を精度良く行うためには、精度良くシミュレーションする必要がある事と、その課題について述べている。シミュレーションモデルは光学モデルとレジストモデルから構成される。現在主流の簡易モデルは形状変化を畳み込み積分で表現している。既存の簡易モデルは、基本的に積分核を表現する関数をガウス関数の線形和で表現し、各ガウス関数の分散と線形和の係数をパラメータとして最適化アルゴリズムを用いて実験結果と合う様にパラメータを決定している。線形和の項数を増やせば自由度が上がり精度は向上するが過学習や局所解に陥る可能性も高くなり近年問題となっている。

第3章では、本研究の1つ目の新規性である線形方程式で定式化した新しい簡易レジストモデルについて、次に二つ目の新規性である前処理を用いた新しい悪条件線形方程式の解法について述べている。まず線形方程式への定式化については、畳み込み積分は周期関数を仮定すると離散化され線形方程式の形で表現できる。この性質を利用して線形方程式に定式化している。次に、本研究の2つ目の新規性である右前処理と特異値分解を用いた新しい解法について述べている。この手法は線形方程式の解を先験情報である任意の関数、ここではガウス関数に近づける効果があるものである。また既存の線形方程式の解法と比較し、その違いを特異値分解の観点から考察している。提案手法の有効性を確認する為、実際の問題を用いて精度検証を行い、既存の簡易モデルと比べて新しい簡易モデルの精度が向上している事が示されている。また線形方程式に定式化された新モデルにおいて、既存の解法

と比較して右前処理により解をガウス関数に近づけた事により精度が向上している事を述べている。

第4章では、3章で提案した新レジストモデルをより一般的な形式に改良した事、また合わせて行った比較対象である既存モデルで用いられているコスト関数および最適アルゴリズムの改良について述べている。実際の問題において精度検証を行い、改良した既存モデルと比べても新モデルの方が精度の良い事を示し考察を加えている。

第5章では、提案した右前処理と特異値分解を用いた解法について、あらためて Tikhonov 正則化における正則化行列の観点から考察を加え、より一般的な性質を明らかにした。数理的に前処理行列の逆行列が Tikhonov 正則化における正則化行列になる。この正則化行列には、直流成分を含む低次から高次の正弦波を任意の関数で振幅変調したものに解を近づける性質がある事を明らかにした。

第6章では、本研究により初めて従来のレジストモデルも新しいレジストモデルも不良設定の逆問題であり、本質的には解法の違いでしかない事が明らかになった。この事を踏まえて、これまでの研究成果を改めて正則化の積極性という観点で考察を加えた。

審査の要旨

【批評】

本研究の新規性は大きく二つ認められる。一つ目は、レジストモデルを線形方程式の形に定式化した事である。二つ目は、前処理を用いた新しい悪条件線形方程式の解法を提案した事にある。

これまで長らくレジストモデルを表現する積分核はガウス関数を仮定してきた。しかし本研究によって実験から任意形状のより良い積分核を直接解法で推定する事が可能になった。この事は最適化アルゴリズムを用いた簡易レジストモデル開発に終始してきた歴史において、画期的進歩である。また従来手法と提案手法の違いは本質的に不良設定の逆問題の解法の違いでしかない事を明らかにした点も、問題をより一般的にとらえる事が出来る様になり評価できる。また悪条件線形方程式の解法に関しても、前処理を用いて解を先験情報に近づける新しい手法はレジストモデルだけでなく、より一般的な問題にも応用が可能と考えられる。

【最終試験の結果】

令和3年2月5日、理工情報生命学術院において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。この結果とシステム情報工学研究群情報理工学位プログラムにおける達成度評価による結果に基づき、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。