

## 審査の結果の要旨

論文提出者：山添賢治

半導体露光装置は極限的な結像特性が要求される最先端光学機器である。機能は写真の露光装置と同じであるが、最新の装置では数十 nm オーダーの解像力が要求される。このような結像系では、光源、照明光学系、マスク、結像光学系、感光材料の全てを含む結像シミュレーションが不可欠となる。この基礎となるのが部分コヒーレント結像理論である。この理論に基づく像計算法には、主に二つの方法が実用になっている。一つは、システム理論の伝達関数に相当する相互透過係数(Transmission cross coefficient, 以下 TCC と略記)を用いる TCC 法で、もう一つが、光源を有限個のインコヒーレントな点光源に分解しそれぞれの点光源による像を足し合わせる光源積分法である。TCC 法ではあらかじめ TCC を計算するが、その定義式は多重積分で与えられており、計算に時間がかかる。ただし、一度 TCC を求めておくと、マスクパターンを変えた時の像は比較的短時間で計算できる。一方、光源積分法ではマスクパターンを変えるたびにはじめから計算し直すことになるから、少数のマスクパターンの計算にはこの方法が有利になるが、多数のマスクパターンに対して計算するときは TCC 法のほうが高速になる。このような状況の中で、論文提出者は結像特性を高速に計算する瞳シフト行列法と呼ぶ画期的な方法を考案した。この方法によると、計算に時間のかかる TCC が、実は非常に簡単に構成できる二つの行列(瞳シフト行列)の積の形に書けることが判明した。こうして、TCC そのものも、また、その固有値展開(特異値分解)も高速に計算できるようになった。本論文は、この成果をまとめたもので、6章の本文と参考文献、および、A から M まで 13 項目の付録からなる。

第 1 章「序論」では、本論文テーマの背景と、論文の概要が述べられている。  
第 2 章「従来の部分コヒーレント結像式」では、部分コヒーレント結像の従来理論を整理し、具体的な計算法と、その問題点をまとめている。  
第 3 章は「瞳シフト行列による部分コヒーレント結像の行列理論：光源と瞳関数を含んだ行列」と題し、本論文の中核をなす瞳シフト行列の構成法と基本的な性質が詳しく述べられている。光源を有限個の互いにインコヒーレントな点光源の集まりと考えると、像は各点光源による像の強度和で与えられる。とこ

ろが、異なる位置の点光源の像は、点光源位置を固定して瞳をシフトしたときの像と位相項を除いて一致するから、有限個の点光源が作る像は、1個の点光源で瞳をシフトした像の強度和に等しくなる。この事実を数学的に表現したのが瞳シフト行列である。瞳シフト行列により TCC の計算が高速で行えること、特に、数値計算に必要な行列の固有値展開が高速になることが具体例を挙げて述べられている。

第4章「部分コヒーレント結像の包括的行列表記：光源、物体、そして、瞳関数を含んだ行列」では、前章で得られた瞳シフト行列を用いて、部分コヒーレント結像理論を再構築し、部分コヒーレント結像の数学的、物理的な意味を論じている。すでに述べた二通りの数値計算法、光源積分法と TCC 法、それぞれに準じた結像理論が構築できること、これらは、数学的には異なりそれぞれ異なる物理モデルを表すこと、しかし計算結果は当然一致することなどが述べられている。

第5章「部分コヒーレント結像における干渉」では、部分コヒーレント結像において任意形状物体中の分割された部分物体が、互いにどのように干渉するかを、瞳シフト行列の固有関数を用いて論じている。この干渉性を考慮し、目標となる像パターンを達成するために最適なマスクパターンの設計法を考案した。具体的には、解像限界以下の微小なパターンを補助的に付け加え、干渉効果により、像を目標パターンに近づける効果的な方法を提案し、モデル実験で有効性を実証した。

第6章「まとめ」は本論文全体のまとめである。この後に、主に数学的な事柄を補足する付録が付けられている。

以上に述べた通り、本論文は半導体露光装置の結像シミュレーションを高速に実行するアルゴリズムを開発するという実践的研究から始まったものであるが、その考え方は、部分コヒーレント結像理論の中心概念である TCC に新たな知見を加える重要な結果を生み出した。この成果は半導体露光装置設計の効率化に大きく寄与するものである。よって、本論文は物理工学に対し寄与するところ大であり、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。