

審査の結果の要旨

論文提出者：畔野 靖行

20世紀後半を特徴付けるエレクトロニクス時代を支えてきたのは、半導体素子の大量生産を可能にする光リソグラフィ技術の着実な進歩である。最近の半導体露光装置光学系には露光領域数10mmにわたって100nmオーダーの解像性能が要求される。この性能を実現するため、紫外域エキシマーレーザーを光源とし、開口数(NA) 0.6 から 0.7 を超える光学系が用いられている。また、要求される解像性能を満たすため、結像系は数十枚のレンズ素子を配列した大型のものとなっている。このような高性能光学系の結像特性の解析では、従来のスカラー理論では不十分で、偏光を考慮したベクトル理論が不可欠となる。第1に、高NAの結像では、レンズの周縁部分を通過する光線は光軸に対し大きな交差角を持つため、光電場のベクトル性が無視できなくなる。第2に、光学材料に残存する応力分布に起因する複屈折が結像特性を劣化させる可能性がある。この効果は小さなものであるから、通常の光学系では問題にならない。ところが、最新の半導体露光装置では、極限的な結像性能を追及する結果、このような小さな効果も無視できなくなっているのである。本論文は、半導体露光装置光学系の設計上重要となる偏光を考慮した結像解析法を開発し、特に光学材料に残留する複屈折の影響を解析した結果をまとめたものである。

本論文は7章から構成される。

第1章は序論であり、研究の背景と論文構成の概略が述べられている。

第2章は「従来の結像特性評価方法」と題し、従来の結像評価の元となる偏光を考慮しないスカラー回折理論に基づく評価方法を紹介している。ここでは、露光装置光学系をモデル化し、部分的コヒーレント照明下における従来の結像式を導き、解像の評価基準となる像コントラストを定義する。その後、従来法の問題点を指摘し、本研究に至る動機づけを与えている。

第3章「偏光を考慮した結像式」では、光線に沿って偏光状態を追跡することにより、従来の光線追跡法を拡張し、偏光を考慮した結像式を導いている。始めに、光線に付随した座標系を定義し、屈折に伴う変換式を求めておく。この変換式には反射防止膜の偏光特性を含めることもできる。こうした準備の後、照明光の偏光状態を考慮して物体空間における初期偏光状態を決めれば、光線追跡により、像空間における電場分布が求まり、各偏光成分に対する結像式が得られる。結果は、照明光がそれぞれx方向、y方向に直線偏光している場合のベクトル点像分布関数のインコヒーレントな和で表された。

第4章は「高NA結像における偏光の影響」と題し、光学系は理想的であるとして、ベクトル理論のスカラー理論からのずれを論じている。理想レンズを仮定し、フーリエ光学的な解析法を用い、周期回折格子を物体としたときの像のコントラストから解像性能を評価している。

一般に偏光を考慮すると、スカラー理論に比べ解像性能は低下する。特に直線偏光で照明した場合、格子による回折方向が偏光方向に平行な場合に低下は著しく、一方、偏光が直交する場合、解像性能はスカラー理論とほとんど変わらない。非偏光照明の場合、スカラー理論を基準とした解像性能の相対的な低下率は、物体の空間周波数および結像系の NA のそれぞれの 2 乗に比例して低下するが、照明のコヒーレンスには依らないという結果が得られた。

第 5 章と第 6 章は本論文の主要な部分である。第 5 章「ランダム複屈折分布による結像性能の低下」では、光学材料中にランダムに分布する残留応力による複屈折の効果を解析している。波長 193nm の ArF レーザー照明では、色消しのために石英ガラスと蛍石の 2 種類の光学材料が用いられる。蛍石は等軸晶系に属する結晶であるが、レンズの大きさ 30cm にわたって完全な単結晶を成長するのは難しい。このため、応力分布が結晶内に残り、複屈折が誘起される。シミュレーションでは、複屈折の大きさや方向をランダムに分布させ、光線追跡を行い、解像性能を評価した。その結果、解像性能の低下は、複屈折の大きさの平均値の 2 乗に比例し、また、光学系のレンズ素子数に比例する。この数値計算結果は、複屈折が統計的に独立に分布するとして波面収差の大きさを平均 2 乗誤差で評価することにより理論的に確かめられた。この解析により、複屈折の許容量を評価している。

第 6 章は「光軸対称複屈折分布による結像性能の低下」と題し、光学材料内部の応力分布が、中心軸に対し軸対称であるときの結像特性を評価している。レンズ素子内部の応力分布は製造過程に依存する。熔融石英の場合、溶かした材料を型に入れてガラス化するが、その型枠が軸対称であるため、でき上がったレンズ内に軸対称な応力分布が残存しやすくなる。このため、複屈折も軸対称な分布をもつことになる。進相軸が放射状に分布し、複屈折が中心からの距離の 2 乗に比例する場合に、点像強度分布関数を解析的に導出し、この影響を解析している。その結果、複屈折量がある大きさを超えると、波面収差に特異点が生じることが分かった。これは、波面の干渉計測により実験的にも確認された。また、複屈折量がある大きさを超えると、焦点位置に明部で囲まれた暗部が生じること、すなわち、光の空洞が作られるという結果も得られた。以上の解析に基づき、収差の評価から、半導体露光装置に使うための複屈折の許容量を求めている。

第 7 章「全体のまとめ」では本論文の内容をまとめ、複屈折による解像性能の低下が光学系の特性量を用い簡単な近似式で表されることを結論している。

以上を要するに、本論文は、従来問題にならなかった光学材料中の応力分布に起因する複屈折が、最先端の半導体製造装置光学系において、無視できない影響を与えることを見出し、その効果を定量的に評価する方法を確立したものである。この成果は半導体製造装置の光学設計に活かされ、現代の半導体産業の進歩を支える基礎技術に貢献した。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。