

称号及び氏名	博士（工学） 岡野 正登
学位授与の日付	平成2007年9月30日
論文名	「電子ビーム近接効果補正法を用いた回折光学素子の自動設計」
論文審査委員	主査 平井 義彦 副査 堀中 博道 副査 石原 一 副査 菊田 久雄

論文要旨

近年、光技術産業の社会への寄与は年々高まっており、情報通信、光記録システムなど様々な分野に広がっている。これらのシステムの性能と生産コストを決定付ける素子のひとつに回折光学素子がある。このため、大量生産が容易で安価な加工方法について、盛んに研究開発が行われている。さらに、格子の周期を波長より短くすることで、特異光学現象が発現するアノマリー現象を利用して、偏光制御機能や反射防止機能を付加した、新たな回折光学素子の提案もされている。

従来、回折光学素子は切削加工によって製作されてきたが、光学素子の高機能化に伴って1ミクロン以下の微細構造が必要となり、その製作が困難になってきた。この問題を解決する1つの方法として、半導体製造に利用されている電子線リソグラフィーを用いた光学素子の製法が提案され、より微細で形状精度の高い回折光学素子の製作が実現可能となってきた。このとき、製作可能な素子の断面形状の設計を行うことが重要な観点となってくる。しかし、回折光学素子においては形状のわずかな違いによって光学特性が大きく変わり、光学設計では高度な技術が要求される。

本研究の目的は、プロセス条件を含んだ微細な回折光学素子の自動設計法を提案することにある。本研究では、半導体製造プロセスで利用されるリソグラフィーシミュレーションを光学素子作製のプロセスに適用することによって、所望の光学特性を得るためのプロセス自動設計法の開発を行った。

第1章では、光技術産業の動向と光学素子の設計・製作の現状を述べた。その上で微

細構造をもつ回折光学素子を製作するために、リソグラフィー技術による開発状況を述べ、本研究の意義と目的を明確にした。

第2章では、回折光学素子を半導体リソグラフィー技術で製作するにあたり、電子線照射量分布を適切に設定するための素子の断面形状予測法について議論した。半導体リソグラフィーではレジストと呼ばれる電子線感応樹脂を基板上に塗布し、電子線を照射することによってレジストを変質させ、この部分を現像によって除去し、所望の微細構造を得る。ここで、構造寸法が概ね1ミクロン以下になるとレジスト中ならびに基板からの電子の散乱により、近接するパターンの解像性が劣化する。これは近接効果と呼ばれる。所定の形状を得るための電子線照射量の算定は、この近接効果を補正する必要がある。従来、この近接効果をレジストの厚さ方向に平均化して、現像の残膜厚を予測するレジスト残膜特性法(CCM)がある。しかし、この方法は、短周期構造において実験結果と予測形状にずれが生じた。このため、リソグラフィーシミュレーションで用いられる現像シミュレーターを光学素子の製作に適用し、残膜特性法(CCM)による照射量補正の有効性を議論した。その結果、特に短周期構造における形状の予測精度の向上に寄与することが確かめられた。例えば、1次回折効率が最大となるブレード格子の作製では、レジスト厚みが1 μm を越えるブレード格子の鋸歯形状を構成する斜面部において、周期8 μm では最大0.15 μm の形状誤差が生じる。したがって、微細な周期構造に対して近接効果の補正を行うには、レジスト現像における形状の変化が考慮できる時間発展型現像シミュレーション(TPS)を取り入れることの必要性を提起した。

第3章では、リソグラフィーシミュレーションを用いて、素子断面が周期的な形状を持つブレード格子を製作するための、電子線照射量の自動設計法について議論した。この手法は、前章の時間発展型現像シミュレーション法(TPS)を用いて、任意の連続形状を得るための電子線照射量分布を導くことを目的とする。このことは、従来の矩形形状のみに適用していた半導体製造プロセスにおいて、近接効果補正が格子周期方向に対する補正にとどまらず、レジストの厚さ方向に対する断面形状の制御へ拡張したことに意義を持つ。例として、周期4 μm のブレード格子におけるシミュレーションと実験の比較検討を行った。従来手法である残膜特性法(CCM)では、鋸歯形状の斜面部における目標形状との誤差が最大0.18 μm 生じたのに対し、提案した時間発展型現像シミュレーション法(TPS)による補正法では最大0.06 μm と、高い精度でレジスト形状が得られることを確認した。これらの結果は、時間発展型現像シミュレーション法(TPS)が微細周期構造をもつ回折光学素子の製作に有効であることを示した。

第4章では、大口径となる回折レンズにおける電子線照射量の自動設計法の検討を行った。回折レンズは口径が数ミリに達するのが一般的であり、また、集光機能を持たせるためには、格子周期が素子中央部から離れるにつれて短くなる可変周期構造となる。

時間発展型現像シミュレーション法(TPS)による電子線照射量の自動設計を行うには、計算に要する実行時間も飛躍的に大きくなることが問題となる。そこで、大口径の回折レンズにおける電子線照射量分布の自動設計の提案にあたり、現像後のレジスト形状と目標形状との誤差に応じて照射量補正の判定を行う選択補正法を、時間発展型現像シミュレーション法(TPS)と併用することで、評価関数の収束性の改善に効果があることを示した。また、得られた電子線照射量分布を用いて製作を行い、目標との形状誤差が $0.1 \mu\text{m}$ 以内となる良好な回折レンズ形状が得られることが確認できた。

第 5 章と第 6 章では、形状ではなく光学特性を評価関数とする回折光学素子の自動設計法に関する提案を行った。短周期の回折光学素子はアノマリーと呼ばれる特異光学現象のために、鋸歯状のブレード格子の 1 次回折効率が低下することが知られている。1 次回折効率が最大となるブレード格子は周期が十分長い場合にしか適用できず、短周期格子の形状は鋸歯状にはならない。このような形状の算出には、電磁波の厳密解析法を使って自動設計を行う必要がある。しかし、その結果は高い解像度をもつ構造など、実質的に製作できない断面形状が要求される。

そこで、第 5 章においては時間発展型現像シミュレーション法(TPS)と、電磁波の厳密解析法(RCWA)を統合化した回折光学素子の新たな自動設計法を提案した。この手法では、回折光学素子の形状ではなく光学特性を評価関数とし、電子線照射量分布などのプロセスパラメータを最適化するものである。これによって自動設計された短周期格子について、例えば周期 $1.4 \mu\text{m}$ のブレード格子では、従来の鋸歯状ではなく、丸みをもつ階段状の形状となった。このときの 1 次回折効率は 67% となり、従来のブレード格子よりも 25% 向上した。また、従来の時間発展型現像シミュレーション法(TPS)を用いた格子形状の 1 次回折効率よりも 19% 向上できた。以上により、リソグラフィシミュレーターを「目標形状を製作するために電子線照射量分布を求める」手段だけでなく、「目標形状がなくても、プロセス条件をパラメータとして、光学素子を自動設計で算出する」、新たな手法が有効であることを示した。さらに実際に製作を行うことで、ブレード格子を上回る回折効率が得られることを明らかにした。

第 6 章では、特に光ディスクの読取りに用いられるピックアップ光学系を構成する高開口数(Numerical Aperture, NA)回折レンズについて、自動設計法を検討した。レンズの集光特性を向上させるには高 NA 化を行う必要があるが、回折レンズの周期構造は NA が高くなるにつれて、周期構造が微小となり製作が困難となる。この影響により、回折レンズの周辺部では回折効率が低下する。

そこで、時間発展型現像シミュレーション法(TPS)と、電磁波解析法の 1 つである時間領域差分法(FDTD)を組み合わせることによって、高 NA 回折レンズの自動設計法を開発した。これにより、回折レンズ周辺部の短周期構造において、従来の鋸歯形状とは異なる

る連続形状をもつ高 NA 回折レンズを示した。本手法によって得られる焦点強度は、理論上の集光限界である回折限界に対して 49% となり、従来の鋸歯形状をもつ回折レンズよりも 12% 向上できた。さらに、この自動設計法は、格子周期が素子中央部から離れるにつれて短くなる可変周期条件下で、所定の集光特性を満たすように回折光学素子の形状を設計し、同時にそれを製作するための電子線照射量も算出することができる。一方、前章で示した周期条件における自動設計で得られる格子形状は、そのまま回折レンズ状に配列しても集光特性を改善できないことを示した。以上の結果から、回折レンズの可変周期条件に基づくプロセス自動設計の有効性を明らかにした。

最後に第 7 章では、本研究で得られた成果について総括した。

審査結果の要旨

本論文は、多様な微細断面形状が要求される回折光学素子の効率的な作製を目的として、半導体微細加工に用いる電子ビーム加工によるプロセス条件の自動設計について、素子の断面形状を予測したうえで、断面形状ならびに光学特性を評価関数として、電子線露光量分布を自動的に最適化しようとするもので、以下の成果を得ている。

1) 素子の予測形状を評価関数とするプロセス最適設計

素子断面が連続的な形状を持つ鋸歯状のブレード格子を製作するため、感光樹脂の厚さ方向に対する断面形状の予測方法に、露光後に行う樹脂の現像による時間的な形状変化を考慮することにより、予測された素子形状と目標形状との誤差を評価関数とすることより、連続的な微細周期構造をもつ回折光学素子の製作に有効であることを示している。

2) 光学特性の予測値を評価関数とするプロセス最適設計

素子の予測形状を評価関数とする方法に代わり、光学特性の予測値を評価関数とする新しい作製プロセス自動設計手法について提案を行っている。短周期の回折光学素子はアノマリーと呼ばれる特異光学現象のために、鋸歯状のブレード格子の一次回折効率が低下することが知られている。そこで、予測した光学特性を評価関数とすると、従来の鋸歯状の形状ではなく、丸みをもつ階段状の形状が光学性能を改善することを明らかにした。これにより、例えば一次回折効率が従来の鋸歯状のブレード格子より約 25% 向上することを示している。

また、光ディスクのピックアップ光学系を想定した、高開口数 (Numerical Aperture, NA) 回折レンズの集光特性の改善について、光学特性を時間領域差分法 (FDTD) で予測することにより、従来の鋸歯形状とは異なる連続形状をもつ高 NA 回折レンズ作製のためのプロセス自動設計を検証している。

以上の成果は、複雑な形状が要求される回折光学素子作製プロセスの自動設計を可能にする新たな手法を実証し、工学的に有益な情報を提供したものであり、本分野の学術的・産業的な発展に貢献するところ大である。

また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。

学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、申請者に博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。