

称号及び氏名 博士（工学） 由比藤 崇

学位授与の日付 令和 3 年 9 月 25 日

論文名 「Study of Resolution Enhancement and Focus Control in Sub-Wavelength Optical Lithography

(サブ波長光リソグラフィにおける解像度向上及びフォーカス制御に関する研究)」

論文審査委員 主査 平井 義彦

副査 岡本 晃一

副査 内藤 裕義

副査 笹子 勝

論文要旨

大規模集積回路（LSI: Large-Scale Integrated circuit）の目覚ましい発展により、デジタル端末やデータ基地局の情報処理能力は飛躍的に高速大容量化し、現代のグローバル情報化社会の礎となった。その高集積化、高性能化を牽引した主要技術の一つが光リソグラフィである。光リソグラフィとは、電子回路パターンを高精度にシリコン基板上へ形成する技術である。LSI の高集積化に対応するため、光リソグラフィでは、露光光源の短波長化、投影レンズの大口径化、そして様々な解像度向上技術（RET: Resolution Enhancement Technology）による形成パターンの微細化が進められるとともに、フォーカス深度（DOF: Depth of Focus）の低下を補うため、フォーカス制御性の向上も並行して行われた。近年、光リソグラフィに求められる加工精度は露光波長以細となり（サブ波長光リソグラフィ）、レンズとシリコン基板の間を水で浸す液浸技術により ArF エキシマレーザー（波長 193 nm）は延命され、開口数（NA: Numerical Aperture）は最終的に 1.35 まで拡大された。一方、RET としては、マスクを透過する光の位相を相殺して解像度（コントラスト）を向上させる位相シフトマスクの実用化の試みがなされた。しかし、パターンサイズが露光波長を下回ることで、マスクトポグラフィー効果と呼ばれるマスクの立体構造に起因する光散乱の影響が顕著となり、期待した性能が得られない問題に直面した。この影響により位相シフトマスクの実効的な透過率と位相シフト量がその設計値から大きく乖離し、解像度の低下だけにとどまらず、パターン転写位置の横ずれや、フォーカスずれが生じるなど、深刻なパターン形成不良が引き起こされた。このように、特に 45 nm ノード世代以降の LSI 製造に向けたサブ波長光リソグラフィにおいては、このマスクトポグラフィー効果の理解と解決が大きな課題となった。

本研究では、サブ波長光リソグラフィにおけるマスクトポグラフィー効果の定量的な解明と、同効果を考慮した位相シフトマスクによる RET の実現、さらに、同効果を活用した新たなフォーカス制御の確立に取り組んだ。

まず初めに、実用可能な超解像技術の候補としてエンハンサーマスクに着目し、マスクトポグ

ラフィー効果を考慮したマスク設計とそれによるパターンニング性能の最大化について議論する。さらに、45 nm ノード世代以降の LSI 製造に向けたコンタクトホールパターン形成の実現可能性についても示す。さらに、マスクトポグラフィ効果の原理に基づいた二つの新規フォーカス計測手法を提案し、その性能について既存技術との比較と実施例を示しながら明らかにする。そして、露光波長サイズ以下の微小な位相シフターを搭載する位相シフトマスク全般を対象として、微小位相シフターにおけるマスクトポグラフィ効果を定量的に明らかにし、その効果を考慮した位相シフトマスク設計の新しいスキームを提案する。以下、本研究の成果について、論文構成に沿って述べる。

第 1 章では、本研究の背景、目的および内容についての概略を示し、本論文の構成について述べる。

第 2 章では、光リソグラフィにおけるパターン形成の基礎理論と、マスクトポグラフィ効果について論述する。まず、マスクトポグラフィを考慮しない（フラットマスクの仮定）従来のイメージング理論を述べ、次いでマスクのガラス基板の掘り込み構造によって実現される位相シフトの原理について述べる。そして、その一般的な応用例として、RET の一つであるレベンソンマスクと、フォーカス計測手法の一つである位相シフトフォーカスマニター (PSFM: Phase Shift Focus Monitor) について論述する。

第 3 章では、エンハンサーマスク技術に関する研究成果について論じる。エンハンサーマスクとは任意配置のパターン形成が可能な位相シフトマスクであり、パターンを形成するメイン開口と、コントラストを強調する逆位相のシフター開口から構成される。本研究ではまず、上記エンハンサーマスク構成を具現化した異なる二つのマスク立体構造について、マスクトポグラフィ効果を数値計算および実験の両面から検証した。二つの構造とは、メイン開口を掘り込む構造と、シフター開口を掘り込む構造である。前者では、マスクトポグラフィ効果によるコントラストの低下により、形成パターンの寸法制御性を示す MEEF (Mask Error Enhancement Factor) が、一般的な上限である 4 を超えて 10 以上となったが、後者ではコントラスト低下が防がれ、再密集パターン ($k_1 = 0.39$) で 2.5 以下が得られることを実証した。次に、後者の構造と従来のハーフトーンマスクとのパターンニング性能を比較し、エンハンサーマスクの任意配置パターン形成に対する実用性を実証するとともに、従来技術の問題であった再密集パターンでの MEEF 増加と中間ピッチでの DOF の低下を解消できることを実証した。さらに、SRAM (Static Random Access Memory) パターン、一列コンタクトホールアレイへの応用、およびエンハンサーマスクと液浸技術との組み合わせによる 28 nm ノード世代のパターン形成の実現可能性を示した。

第 4 章では、エンハンサーマスクにおけるマスクトポグラフィ効果に関する議論を踏まえ、様々な位相シフトマスクを対象としたサブ波長微小位相シフターにおけるマスクトポグラフィ効果について論じる。本研究では、微小位相シフターの実効透過率および実行位相を直接測定するための測定方法と、そのための測定用テストパターンを新たに提案した。テストパターンとして、微小位相シフターのみを測定光学系の解像限界以下のピッチで多数配置した回折格子を用い、0 次回折光の振幅および位相を光干渉法にて計測した。また、開口サイズおよび掘り込み量を様々に変化した複数のテストパターンを同一マスクに配置することで、マスクトポグラフィ効果と立体構造のサイズとの相関を定量的に評価した。測定の結果、掘り込み構造型の微小位相シフターでは、位相シフターの開口サイズに依存して実効透過率は大きく減少し、理論値から最大 85% 低下することを明らかにした。さらに位相シフターの実効位相は、開口幅が波長サイズ以下となると設計値から乖離し、半波長以下では位相シフト効果が得られないこと示した。また、数値計算による比較検証により、得られた測定結果は数値計算とよく一致することを示した。以上より、微小位相シフターを有する位相シフトマスクを用いたサブ波長リソグラフィでは、マスクトポグラフィ効果を考慮したマスク設計が必須であり、かつ数値モデル化による実現が可能であることを実証した。

第 5 章では、マスクトポグラフィ効果に関する知見に基づき、波長サイズ以下の微小マスク

構造を活用した二つの新たなフォーカス計測手法を提案した。第一は、フレネル回折フォーカスモニター (FDFM: Fresnel Diffraction Focus Monitor) である。FDFM では、非対称に配置されたサブ波長補助パターンを主パターン横に配置することで、主パターンの転写像にデフォーカス量に依存する横ずれを生じさせ、その量を計測することでフォーカス値を特定する手法である。主パターンと補助パターンの設計は、マスク近傍のフレネル回折領域において、主パターンと補助パターンが形成する回折像の光強度分布の最大ピーク位置が、マスクから遠ざかるにつれて横方向へ移動するよう、数値計算を用いて行った。続いて PSFM とのベンチマークを実験的に行い、FDFM では約 8 倍の測定感度が得られることを実証した。さらに FDFM を用いたフォーカス計測の応用例として、露光機のウェハステージ上に真空チャックされたウェハのフラットネス測定に成功した事例を示した。第二は、サブ波長回折格子フォーカスモニター (SWG-FM: Sub-Wavelength Grating Focus Monitor) である。SWG-FM も PSFM や上記の FDFM と同様に、デフォーカス量に依存する転写像の横ずれ量を計測することで、フォーカス値を特定する。横ずれが生じる要因は PSFM と同様に 90 度の位相シフトによる転写像の非対称化であるが、SWG-FM では、実効位相が 90 度となるようあらかじめ設計した位相シフターアレイを主パターンの片側に配置することで、通常の 180 度位相シフトマスクでフォーカス計測が可能であることが特徴である。数値計算による検証の結果、SWG-FM では NA が 0.85 以上の条件下において、PSFM の 2 倍以上のフォーカス域でリニアリティが得られ、安定したフォーカス計測が可能であることを実証した。また、FDFM および SWG-FM は、半導体製造で用いられる通常のマスクで実現可能であることから、半導体製造工程でのインラインフォーカス制御の可能性を示した。

第 6 章では、本研究で得られた研究成果を総括するとともに、次世代リソグラフィとして実用化が進められている極紫外線リソグラフィ (EUVL: Extreme Ultra-Violet Lithography) への展開や、ライフサイエンスへの微細加工技術活用の展望を述べた。

審査結果の要旨

本研究は、サブ波長光リソグラフィを用いた半導体微細加工技術に関するもので、実験および数値計算によるマスクトポグラフィ効果の定量的解明、及びその効果を応用した位相シフトマスクによる解像度向上の最大化と高精度フォーカス制御を実現するための研究であり、以下の成果を得ている。

1)エンハンサーマスクを具現化した二つの異なるマスク立体構造について、マスクトポグラフィ効果を数値計算および実験の両面から検証し、シフターを彫り込む構造とすることでマスクトポグラフィ効果によるコントラスト低下を防ぎ、再密集パターン MEEF を 2.5 以下に抑えることに成功した。

2)エンハンサーマスクと ArF 液浸技術との組み合わせにより、28nm ノード世代のランダムロジックパターン形成の実現可能性を実験的に示すとともに、従来技術の問題であった再密集パターンの MEEF 増大と中間ピッチでの DOF 低下を解消できることを実証した。

3)波長サイズの微小な位相シフターの実効透過率および実行位相を直接測定するための測定方法、および測定パターンを新たに考案し、掘り込み構造型の微小位相シフターにおける、開口サイズに依存して実効透過率が最大 85%低下することを見出した。さらに、開口サイズが露光波長の半波長を下回る領域では、掘り込み構造による位相シフト効果は得られないことを示した。

4)波長サイズ以下の微小マスク構造を活用した新規フォーカス計測手法であるフレネル回折フォーカスモニターを考案し、標準的なバイナリマスク基板を用いたフォーカス計測を実現するとともに、従来技術と比較して約 8 倍のフォーカス測定感度を達成した。

5)掘り込み型微小位相シフターのマスクトポグラフィ効果による位相シフト劣化現象を逆利用した新規フォーカス計測手法であるサブ波長回折格子フォーカスマニターを考案し、標準的な位相シフトマスク基板を用いたフォーカス計測を実現するとともに、従来技術と比較し 2 倍以上のフォーカス域での安定したフォーカス計測を実現した。

以上の成果は、今後の高精度微細加工を利用した集積化デバイス分野の発展に、学術的・産業的に大きな貢献が認められ、申請者が自立した研究活動を行うことに必要な能力と学識を有することを証したものである。