

審査の結果の要旨

氏名 鈴木 一明

半導体デバイスの性能向上を牽引して来たのは光リソグラフィ用露光装置であり、マスク上の回路パターンをシリコン・ウエハ上に塗布されたレジストに転写する機能を持つ。一方、原版であるマスクは、ガラス基板或いは合成石英基板上のクロム膜上に塗布されたレジストを電子ビーム・リソグラフィ用露光装置により露光し、レジストを現像、クロム膜をエッチングすることで得られる。電子ビーム・リソグラフィによるマスク精度の向上は、光リソグラフィ用露光装置の性能向上を下支えして来た。本論文では「システム設計」を1) 開発すべき装置の主要な仕様、機能を設定し、2) それに対し既存の要素技術の改良や実現可能な新技術の考案によって、3) 要素技術の組み合わせで装置の仕様、機能を実現化できる見極めと、要素技術への要求性能を明らかにする設計作業、と定義する。新たに導入する「結像バジェット」とこのシステム設計作業を、エキシマレーザを露光光源としたステップ&スキャン投影露光装置や電子ビーム投影露光装置という新しい露光コンセプトの装置に適用し、設計手法としての有効性を確認することが、本論文の目的である。

結像性能の評価メトリックとして、実験データを取得し易い縁減り値（レジストパターンのトップ線幅のボトム線幅に対する比）に着目した。そして、部分的コヒーレンス理論を用いて縁減り値のモデル式を導出し、1:1ライン&スペースパターンの空間像コントラストの理論値との関係を明らかにした。また、KrFエキシマレーザを露光光源とした場合の縁減り値の実験データがモデル値と概ね一致すること、パターンへの照明条件、パターンの規格化空間周波数、デフォーカス量、露光量が結像特性の本質的なパラメータであることを示した。

第3章では、光リソグラフィ用露光装置がステップ&リピート投影露光方式からステップ&スキャン投影露光方式に移行するというパラダイム・シフトに際し、3ステップでのシステム設計を標準解像度250 nmのステップ&スキャン投影露光装置に具体的に適用した例を記述する。まずは、ニーズ分析から主要性能の仕様を設定する。次に、主要性能と要素性能の関係がスキャン露光でどう変わるかを考察し、必要な要素技術を定める。ここで、パターン微細化に伴う投影光学系の焦点深度減少に対し考慮され始めたフォーカス誤差バジェットの概念を大幅に拡張し、線幅制御精度と限界解像度を維持するためのバジェットとして許容されるフォーカス誤差、露光量誤差、振動量を規定したものが、結像バジェットであり、要素性能の仕様が定められると同時に、主要性能が所

望の精度に入るといいう見積もりが得られるようになった。

第4章では、結像バジェットの一要因である露光量制御について論じる。ステップ&リピート投影露光装置の解像度が小さくなるのに伴って、パルス毎のエネルギーばらつきに対し、少ないパルス数での積算エネルギーのばらつきの抑制が課題であった。照明光学系に複数種類の減光フィルタを載置し、粗露光後の積算露光量により修正露光時の減光度とパルス数の適切な組み合わせの選択を決定する方法を考案した。更に、ステップ・アンド・スキャン投影露光へと移行する際、スキャン速度の不安定性に起因する露光位置のばらつきの影響を和らげるためにスリット照野のエッジ部の照度分布にスロープを持たせ、パルスエネルギーばらつきの影響も加えたスキャン露光後の照度均一性の一般式を導出、評価データにより本方法の有効性を示した。

第5章では、第3章で論じたシステム設計によるステップ&スキャン投影露光装置での要素性能データと総合性能としての結像性能データが紹介され、線幅均一性が10%に入っていることが確認できた。更に、結像バジェット作成によるシステム設計は、光リソグラフィ用露光装置だけでなく、システム設計をリードした電子ビーム投影露光装置においても採用された。この装置では、厚み2 μm のシリコン薄膜にパターン開口があるステンシル・マスクを用いて、散乱コントラストを利用する。電子ビーム・リソグラフィ用露光装置の限界解像度は、電子光学系の収差と電子同志の反発力によるビームぼけが主要因となる。、電子ビーム投影露光装置のシステム設計にあたり、結像バジェットの構成要素としてフォーカス・バジェットの代わるBlur均一性バジェットを考案した。そして、要素性能データ（同期制御誤差、照明均一性）と総合性能としての結像性能データが取得され、線幅均一性が10%に入っていることが確認できた。

結論として、結像バジェットに基づいたシステム設計を行ったステップ&スキャン投影露光装置、電子ビーム投影露光装置において、その線幅均一性データが目標値以下を達成できたため、本システム設計手法の有効性が確認でき、本論文の目標が達成された。最終的な要求性能から精度バジェットを構築してゆくシステム設計手法は、精密機械一般の設計に応用できる。また、本論文で述べた露光量制御法は、パルスエネルギーばらつきを持つエネルギー源からの積算パルスエネルギーを制御する場合一般に広く応用できる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。