

論文の内容の要旨

論文題目 微細化パターンの結像特性に基づくリソグラフィ用露光装置のシステム設計
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（デバイスパターンのデータから直接描画）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。第1章では、このような光リソグラフィ用露光装置と電子ビーム・リソグラフィ用露光装置の歴史を概観する。

本論文での「システム設計」の定義を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、と再確認する。新たに導入する「結像バジェット」を用いたシステム設計を、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。

第2章では、まず、光リソグラフィ用ステップ&リピート投影露光装置のユニット構成を説明する。それは、露光光源、照明系（露光量制御系を含む）、投影光学系、ウエハ・ステージ系とその位置計測系、マスクおよびウエハ・アライメント系、オート・フォーカス系、これらのハードウェアを支える架台と防振台、マスクやウエハの自動搬送系、装置全体を環境制御する温空調チャンバ、ディスプレイ、制御用コンピュータから成る（図1）。本論文では、主要性能（結像性能、重ね合わせ精度、ウエハ処理能力）のうち、結像性能に関連したシステム設計について論じられるが、関係するのは、露光光源、照明系、投影系、フォーカス制御系である（図2）。

著者は、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（T/B: 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（著者のオリジナル）、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（図3）。また、波長 248 nm の 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（図4）[1]。以上は、第3章での結像バジェットの構築と第4章の露光量制御についての研究の背景となるものである。

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、第1章で述べた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(図2)、必要な要素技術を定める。そこには、マスク・ステージ、ウエハ・ステージの同期制御、スキャン露光でのフォーカス・レベリング制御、露光量制御が含まれる[2]。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、著者が導入した結像バジェットである。具体的には、250 nm ライン&スペース、孤立ライン、孤立スペースに対して線幅制御精度 10% (3σ)を保つために、投影系の最大開口数(N.A.)を 0.6、照明系の最大コヒーレンス・ファクタを 0.75 に決定し(図5)、限界解像度 200 nm パターンに対してのコントラスト低下を抑えるために、露光中の振動許容量を光軸に垂直方向 25 nm (σ)、光軸方向 60 nm (σ)と定めた。この振動誤差において 250 nm パターンに対する線幅制御精度 10% (3σ) が得られるフォーカス誤差、露光量誤差をそれぞれ 730 nm (offset+ 3σ)、2.5% (3σ)に設定した(表1)。以上のように、結像バジェットにより、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、露光波長が連続光源である水銀ランプの i 線(波長 365 nm)からパルス光源の KrF エキシマレーザ(波長 248 nm)に移行する際(1990 年前後)、パルス毎のエネルギーばらつき(当初は 45% (3σ))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。著者は、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(1990 年代半ば)、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(当時 1 μm (3σ))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(図6)、パルスエネルギーばらつき(当時 7% (3σ))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著者が導出、評価データにより本方法の有効性を示した[3]。更に、スキャン露光において、積算露光量を所望の多項式に合わせて変調制御するためのロジックについても説明する。ウエハ上の線幅不均一性分布を補正するのに大変有効である。

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(マスクステージ&ウエハステージの同期制御誤差、フォーカス&レベリング制御精度、露光量制御精度)と総合性能としての結像性能データ(250 nm ライン&スペース、及び 200 nm ライン&スペースの線幅均一性)が紹介され、線幅均一性が 10% (3σ)に入っていることが確認できた[2]。

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、著者が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（クーロン効果）から決まる Blur が主要因となる[4]。著者は、電子ビーム投影露光装置のシステム設計にあたり、結像バジレットの構成要素としてフォーカス・バジレットの代わる Blur 均一性バジレットを考案した[5]（表 2）。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（100 nm ライン&スペースの線幅均一性）が取得され、線幅均一性が 10% (3σ)に入っていることが確認できた[6, 7]。

結論として、結像バジレ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レットを構築してゆくシステム設計手法は、精密機械の設計において所望精度を達成するためのマージンが少ない場合に広く応用できる。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。

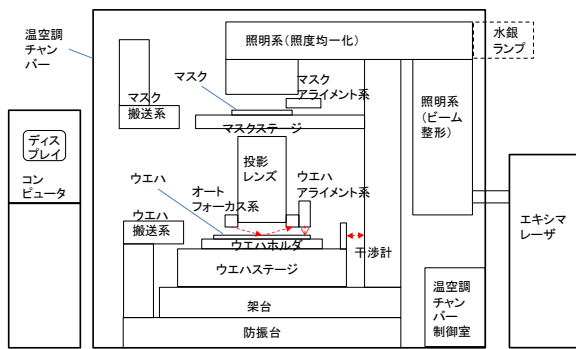


図 1: 光リソグラフィ投影露光装置のユニット構成

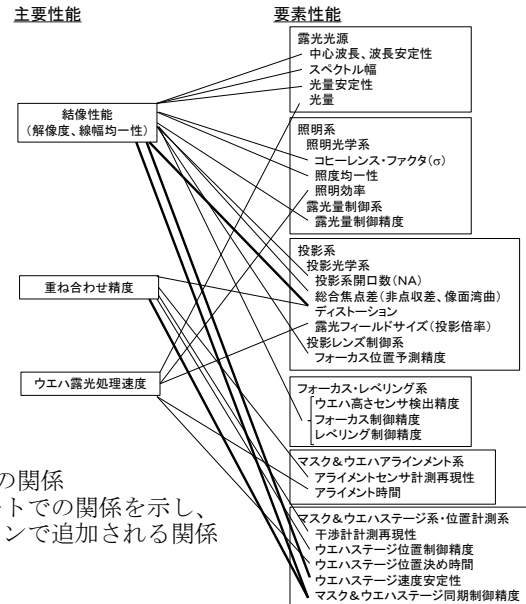


図 2: 主要性能と要素性能の関係

細線はステップ&リピートでの関係を示し、太線はステップ&スキャンで追加される関係を示す。

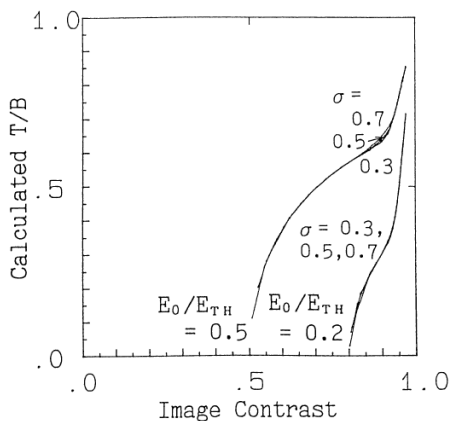


図 3: ベストフォーカスにて 2 種のレジスト特性に対する 1:1 ライン&スペース・パターン空間像コントラストと縁減り値 (T/B) の理論値の関係[1] (Copyright(1992) The Japan Society of Applied Physics)

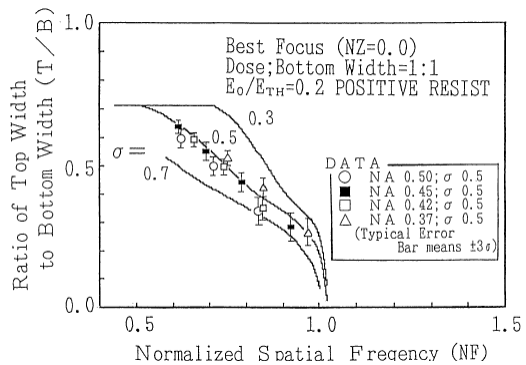


図 4: 縁減り値 (T/B) の規格化空間周波数依存性。規格化空間周波数はパターンピッチの逆数に波長/投影系開口数を乗じたもの。σは照明系のコヒーレンス・ファクタ[1]。(Copyright(1992) The Japan Society of Applied Physics)

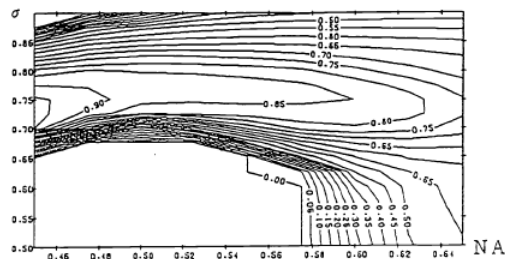


図 5; 開口数(N.A.), 照明系 σ に対する 250 nm パターン (L&S, iso-L, iso-S) が線幅精度 10%を満たす共通焦点深度のマップ (露光量誤差 $\pm 3\%$, 波長 248 nm. 等高線の数値の単位は μm 。) [2]
最大開口数 0.60, 最大照明系 σ 0.75 に決定。

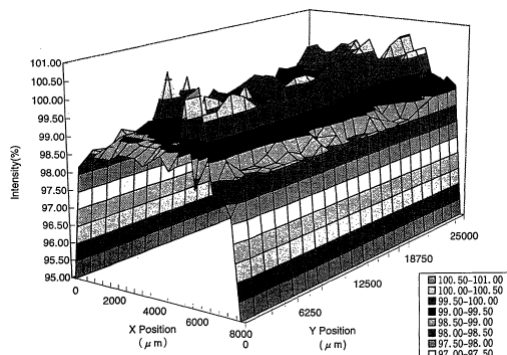


図 6; スリット照野の照度均一性 (投影系開口数 \times 照明系 $\sigma=0.45$) [3]
(Copyright(1995) The Japan Society of Applied Physics)

表 1; 標準解像度 250 nm のステップ&スキャン 投影露光装置の結像バジェット

許容精度	要因	個別要因	許容誤差量
限界解像度 (200 nm)	収差	投影光学系収差	—
		XY振動 25 nm (σ)	マスク&ウエハステージ追従性 22 nm (σ) ディストーション平均化 10 nm (σ)
線幅制御精度 (250 nm)	Z振動 60 nm (σ)	スキャン方向フォーカス・レベリング追従性	50 nm (σ)
		スキャン方向像面平均化	25 nm (σ)
$\Delta L=25$ nm (3 σ)	フォーカス誤差 730 nm (offset +3 σ)	非スキャン方向ウエハ&ホルダ平坦度	100 nm (3 σ)
		フォーカス制御精度	100 nm (3 σ)
		レベリング制御精度	100 nm (3 σ)
		フォーカス位置予測精度	50 nm (3 σ)
		フォーカス・レベリング面設定誤差	50 nm (offset)
		投影光学系の総合焦点差	100 nm (offset)
露光量誤差 2.5 % (3 σ)	ダイナミック照度均一性 スキャン方向露光量制御精度 非スキャン方向照度均一性	デバイス段差	400 nm (offset)
		露光量目標値精度	2 % (3 σ)
		レジスト膜厚ムラ	0.5 % (3 σ)
マスク・パターン寸法精度			$\Delta L=15$ nm (3 σ)

表 2; 電子ビーム投影露光装置での線幅 100 nm パターンに対する結像バジェット (数字は 3 σ) [5]

Total CD Variation	Individual Error	Energy-Blur Tolerance	Individual Factor	Tolerable Error for Resist Image	Condition
CD Uniformity $\Delta L=7$ nm excluding Stitching Region	Resist CD Accuracy excluding Reticle CD Accuracy $\Delta L=5.1$ nm	Dosage Uniformity Δ Dose $\sim 3\%$	Dosage Control Repeatability	$\Delta L=2$ nm	Pattern Shape Correction/GHOST Method
			Illumination Uniformity		
	Reticle CD Accuracy $\Delta L=3.5$ nm	Blur Uniformity Δ Blur ~ 10 nm	Proximity Effect Correction	$\Delta L=4.7$ nm	$\Delta L=14$ nm on Reticle ($\Delta L=10$ nm; ITRS Roadmap 1999)
			Focus Tracking		
Etching Accuracy $\Delta L=3$ nm		XY Synchronization	$\Delta L=3$ nm		
		EO Aberration			
Local CD Irregularity at Stitching Region $\Delta L=10$ nm			Stitching Accuracy	$\Delta L=10$ nm	Reticle Pattern Deformation and Overlap Exposure ($\Delta X, \Delta Y=20$ nm)

< 参照文献 >

- 1) K.Suzuki, Y.Matsumoto and M.Maruyama, *Jpn.J.Appl.Phys.*, **31**, pp.4167-4173 (1992).
- 2) K.Suzuki, S.Wakamoto and K.Nishi, *Proc. of SPIE*, **2726**, pp. 767-779 (1996).
- 3) K.Suzuki, K.Ozawa, O.Tanitsu and M.Go, *Jpn.J.Appl.Phys.*, **34**, pp.6565-6572 (1995).
- 4) K.Suzuki and S.Shimizu, *J.Photopolym.Sci.Technol.*, **15**, pp.395-402 (2002).
- 5) K.Suzuki, et al., *Proc. of SPIE*, **3997**, pp.214-224 (2000).
- 6) K.Suzuki, et al., *J. Vac.Sci. Technol.*, **B21**, pp.2686-2690 (2003).
- 7) K.Suzuki, et al., *J. Vac.Sci. Technol.*, **B22**, pp.2885-2890 (2004).