

博士論文

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

鈴木 一明

<目次>

第1章 序論	4
1.1 光リソグラフィとそれを支える電子ビームリソグラフィ	4
1.2 光リソグラフィ用露光装置	6
1.3 電子ビームリソグラフィ用露光装置	8
1.4 半導体技術ロードマップ	10
1.5 本博士論文でシステム設計について論じる背景	11
1.6 「システム設計」の定義の再確認と本博士論文の目的	11
1.6.1 本博士論文における「システム設計」の定義の再確認	11
1.6.2 本博士論文の目的	12
1.7 本博士論文の構成	12
1.8 第1章のまとめ	15
第2章 光リソグラフィ用投影露光装置の概要	17
2.1 投影露光装置のユニット構成	17
2.2 主要性能と要素性能の関係	21
2.3 解像度と焦点深度（結像性能と露光光源仕様の関係）	23
2.3.1 解像度と焦点深度の定義式	23
2.3.2 エキシマレーザの波長安定性の影響	23
2.4 部分的コヒーレンス理論に基づく空間像コントラスト （結像性能と、照明系／投影系パラメータやフォーカス系精度の関係）	27
2.4.1 相互透過係数による像強度分布の計算	27
2.4.2 一次元周期構造物体の空間像コントラスト	28
2.5 レジスト像の縁減り値の特性	33
2.5.1 レジスト像の縁減り値と FH-EX1 レジストの特性	33
2.5.2 縁減り値の理論値と空間像コントラストの関係	34
2.5.3 縁減り値の実測データ	35
2.6 第2章のまとめ	43
第3章 光リソグラフィ用露光装置のシステム設計	45
3.1 ステップ&スキャン投影露光装置開発時の主要仕様の設定（ステップ1）	45
3.1.1 ニーズ分析からのアプライオリな仕様設定	45

3.1.2	ステップ&スキャン投影露光方式の採用	46
3.1.3	スリット幅の決定	47
3.2	ステップ&スキャン投影露光装置の要素技術の組織化（ステップ2）	48
3.2.1	静止露光とスキャン露光における要素性能の影響の違い	48
3.2.2	システム・コンセプトとユニット構成	48
3.3	結像バジェットによるシステム設計手法（ステップ3）	56
3.3.1	投影光学系の開口数(N.A.)と照明条件( $\sigma$ )の最適化（光学系への要求）	56
3.3.2	許容振動量の設定（機構系、制御系への要求）	57
3.3.3	結像バジェット	57
3.3.4	結像性能に関するシステム設計手法のまとめ	59
3.4	第3章のまとめ	65
第4章	露光量制御	67
4.1	エキシマレーザのパルス毎エネルギーばらつき	67
4.2	ステップ&リピート投影露光装置での露光量制御	68
4.3	ステップ&スキャン投影露光装置での露光量制御	75
4.3.1	ダイナミック露光量制御精度のモデル式の導出	75
4.3.2	実機データでの検証	79
4.4	ステップ&スキャン投影露光装置での露光量変調制御	86
4.5	第4章のまとめ	90
第5章	製品への展開	93
5.1	ステップ&スキャン投影露光装置での要素性能データと結像データ	93
5.2	電子ビーム投影露光装置でのシステム設計と結像データ	98
5.2.1	電子ビーム投影露光装置での解像度と近接効果	98
5.2.2	システム設計と結像バジェット	101
5.2.3	実機データ	103
5.3	第5章のまとめ	111
第6章	結論	113
	謝辞	115
	業績リスト	116
	略歴	120

## 第1章 序論

### 1.1 光リソグラフィとそれを支える電子ビームリソグラフィ

現代社会に押し寄せた IoT (Internet of Things) の波は、人工知能やロボット制御を可能とする高性能マイクロプロセッサ、ビッグデータを取り込む画像センサ、それを格納する高容量メモリといった半導体デバイスの性能向上により到来した。その半導体デバイスの性能向上を牽引して来たのが光リソグラフィ用露光装置であり、原版であるマスク上のパターンをシリコン・ウエハ上に塗布されたレジスト (感光剤) に転写する機能を持つ。光リソグラフィにおけるマスクは、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用露光装置の向上は、光リソグラフィの精度向上を下支えして来たのである。尚、等倍露光用原版を「マスク」、縮小投影露光用原版を「レチクル」と呼ばれることもあるが、本博士論文では出来る限り両者に対し「マスク」という用語を用いることにする。

図 1.1 は半導体デバイスのパターン露光プロセスのブロック図である。まず所望の半導体デバイスのパターンを LSI (Large Scale Integration; 大規模集積回路) CAD 等の EDA (Electric Design Automation) Tool を用いて設計した後、関連装置間で共通に扱えるデータ・フォーマット GDS II に変換される。次に光リソグラフィ用の補正 (光学近接効果補正 (OPC)、など) を加えるデータ変換を行い、上述したように電子ビームリソグラフィ用露光装置にてデバイスパターンのデータからマスクが直接描画される。こうして出来上がったマスクが光リソグラフィ用露光装置に載置され、レジストが塗布されたウエハが順次露光される。そして露光、現像されたウエハはエッチング装置によりエッチングされて、所望のシリコン・エッチングパターンが得られる。以上のように、電子ビームリソグラフィはマスク描画の点で光リソグラフィ成立の前提であり、両者は密接な関係にある (図 1.1 (a))。

ところで、電子ビームリソグラフィ用露光装置には、デバイスパターンのデータから直接描画を行う電子ビーム露光装置以外に、電子ビーム用のマスクを用いる電子ビーム投影露光 (Electron Projection Lithography; EPL) 装置がある。この電子ビーム投影露光 (EPL) 方式については、光リソグラフィと同様の露光プロセスが成り立っている。GDS II フォーマットのパターンデータから EPL 用データ変換エンジンによって電子ビーム露光装置への入力データと電子ビーム投影露光 (EPL) 露光装置への電子光学

系制御データ（パターン依存のダイナミック補正）が生成される。電子ビームリソグラフィ用露光装置にて直接描画露光されたウエハからステンシル・マスクが作られる。このステンシル・マスクが電子ビーム投影露光（EPL）露光装置に載置される。レジストが塗布されたウエハが順次露光されていくのは、光リソグラフィ用露光装置の場合と同じである（図 1.1 (b)）。

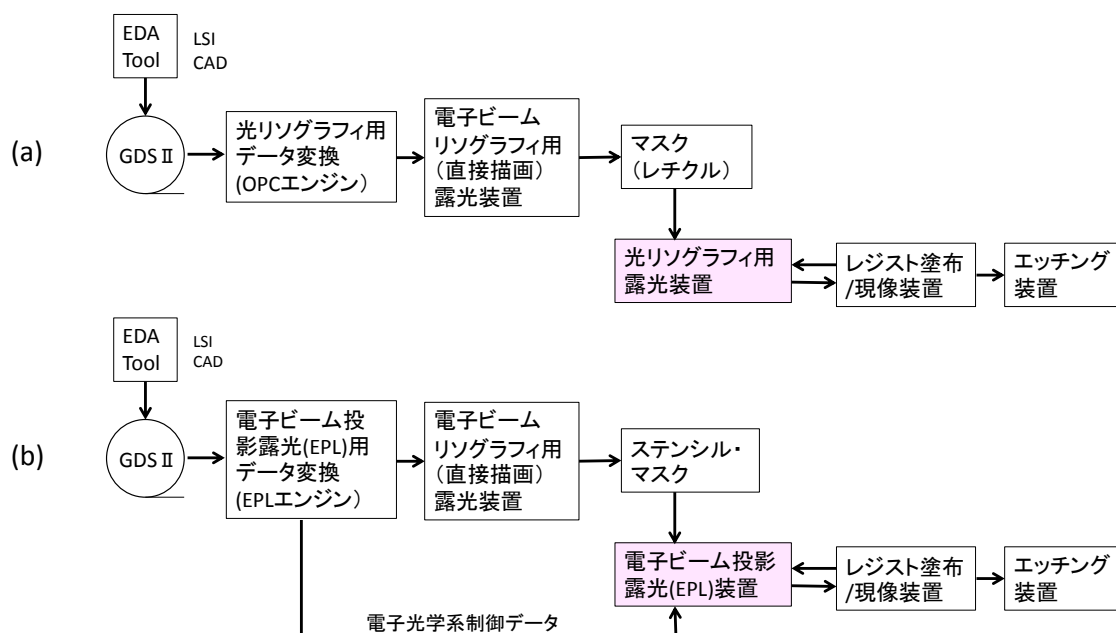


図 1.1; 半導体デバイスのパターン露光プロセス

(a) 光リソグラフィ用露光装置の場合、(b) 電子ビーム投影露光（EPL）装置の場合。

本博士論文では、光リソグラフィ用露光装置および電子ビーム投影露光(EPL)装置について述べる。尚、電子ビームリソグラフィはマスク描画の点で光リソグラフィ成立の前提であり、両者は密接な関係にある。

## 1.2 光リソグラフィ用露光装置

光リソグラフィ用露光装置の主要性能は結像性能（解像度を含む）、重ね合わせ精度、ウエハ露光処理速度に大別される（本博士論文第2章で詳述）。これらの性能向上に伴う露光方式の変遷を図1.2に示す。

- 1) コンタクト露光：1960年代半ばから使用開始。マスクとウエハを密着させることでマスク上のパターンを1:1のサイズでウエハに日光写真のように転写露光。マスクとウエハを密着させるため、マスク欠陥の発生、寿命が問題であった。
- 2) プロキシミティ露光：1970年代、コンタクト露光の欠点を避ける方式として登場。マスクとウエハ間のギャップを0.01～0.03 mmに近接させ、1:1のサイズで転写露光。フレネル回折領域でのパターン転写であり、 $d$ をギャップ長さ、 $\lambda$ を露光波長とすると、解像度 $R$ は $R \approx \sqrt{d\lambda}$ で表される。露光波長を400 nm程度とすると、解像度は、2000 nm程度が限界であった。
- 3) ミラー・プロジェクション露光：1970年代に登場し、1980年代前半に一世を風靡した。等倍反射投影系において光軸から一定距離において収差が良好なことを利用して、円弧状のスリット領域を走査露光。投影光学系が単純な反面、本博士論文の第2章で説明する投影系の開口数が0.17程度と限界があり、250～400 nm近辺の水銀ランプの波長にて、解像度は、1000～2000 nm程度が限界であった。マスクとウエハの位置が離れたことで、マスク欠陥の発生や寿命の問題は解消したが、マスクのパターンの線幅誤差、位置誤差が1:1でレジストに転写するという精度問題は残った。尚、大きな反射投影光学系を用いれば大面積を走査露光できる利点がある。
- 4) ステップ&リピート投影露光：1970年代後半に登場し、1980年代から本格使用された。マスク上のパターンをウエハ上の一部に縮小投影し静止露光、その後ウエハを載置したステージを順次ステップ移動させて、ウエハの隣接箇所の静止露光を順次繰り返す。縮小投影を採用することでマスク起因誤差は縮小されるが、ウエハステージのステップ回数が増えるため、ウエハ露光処理速度が律速される。光源は解像度向上の必要性に伴い、従来の水銀ランプ（g線波長436 nm、i線波長365 nm）に加え、より波長が短いエキシマレーザ（KrF波長248 nm、ArF波長193 nm）が導入された。本方式の露光装置はステッパとも呼ばれる。
- 5) ステップ&スキャン投影露光：1990年代半ばに登場し、2000年以降、本格使用されている。マスク上のパターンの一部をウエハ上の一部に縮小投影しつつマスク位

置とウェハ位置を同期させて走査露光。その後、ウェハを載置したステージを順次ステップ移動させて、ウェハ上の隣接箇所の走査露光を順次繰り返す。マスク上の走査方向のパターン領域の長さを最大限にとると共に投影倍率（縮小倍率）を下げることで、ウェハ上の1回の走査露光面積を拡大できる。その結果、ウェハステージのステップ回数が減り、ウェハ露光処理速度が向上。現在の主流の露光方式で、装置はスキャナーとも呼ばれる。

以上のように露光方式が変遷して、今日に至っている [1, 2, 3]。

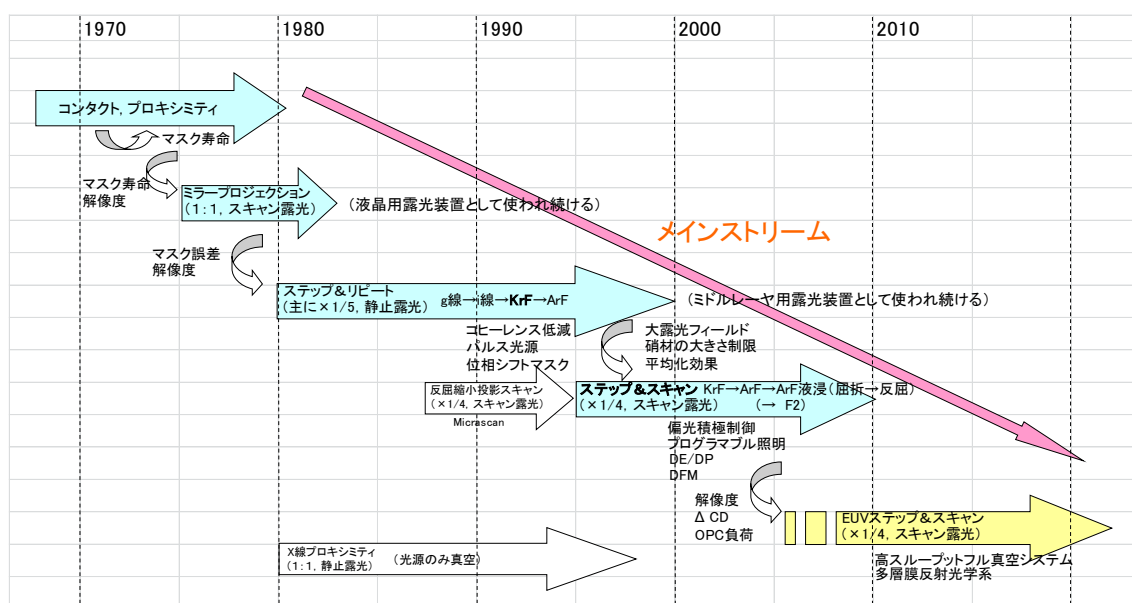


図 1.2; 光リソグラフィ用露光装置の歴史

ステップ&リピート方式、ステップ&スキャン方式により、露光パターンの微細化と生産性向上が進んだ。本博士論文では、エキシマレーザの採用、ステップ&スキャン方式導入でのパラダイム・シフトに対応した技術検討を詳述する（第2章～第5章）。

### 1.3 電子ビームリソグラフィ用露光装置

電子ビームリソグラフィ用露光装置には解像度と露光処理能力が要求される。露光処理能力向上のために、試料面での電子ビーム照度を下げることなく一度に大きな面積を露光できるコンセプトの追及（ショット数低減）、また解像度向上のために、1本の電子ビームの電流値を下げることで電子間の反発力によるビームぼけを抑制して解像度を向上しつつ（クーロン効果抑制）、下げた電流値分はビーム本数を増やすという、マルチビーム装置の試行が行われて来た。この流れを示すと図 1.3 のようになる。

- 1) スポットビーム：電子源から放射される単一電子ビームでラウンド・ビーム或いはガウシアン・ビームとも呼ばれる。露光処理能力を上げるための大電流を得るためには熱電子源が有利だが、電流値が大きくなると電子放出面積も大きくなり、ウエハ上でのスポット径が大きくなってしまい、というトレード・オフがある。また、電子間の反発力によってもスポット径が大きくなる。そのため、電流値を落として露光処理能力は低いながら、高解像を実現したナノ・リソグラフィ用露光装置として使い続けられている。描画方式としては、試料ステージの連続移動およびそれと直交する方向の電子ビーム偏向を行いながら電子光学系内のブランキング機能によりビームを ON/OFF 制御するラスタースキャン方式と、パターンを形成したい2次元座標位置に電子ビームを偏向するベクター走査方式がある。
- 2) 固定成形ビーム：試料面に対し共役面に配した正方形開口にて成形した単一ビーム。スポットビームに比べ、試料面でのスポットサイズを保ったまま電流値を上げられるので露光処理能力が向上する。
- 3) 可変成形ビーム：正方形開口により成形された電子ビームを偏向させつつ第2開口面上に結像させ、ビームの一部を遮ることで矩形、三角形などに成形。大きな面積のパターンを小さな面積の電子ビームで多数ショットで露光するのではなく、比較的大きな面積の電子ビームを含む複数ショットで露光するので、ショット数が低減されて、露光処理能力が向上する。
- 4) マルチビーム：電子ビームを数万～数十万という多数の正方形開口によりマルチビーム化して、全ビームが平行にラスタースキャンし、BAA（ブランキング・アパーチャ・アレイ）により各ビーム独立にブランキング(OFF)制御することで露光を行う（Massively Parallel Beam）。仮に、固定成形ビームに比べ総電流値が同じで、ラスタースキャン時の露光処理能力が同等でも、ひとつのビームの電流値は小さいため、電子間の反発力によるスポット径の増大は軽減される利点がある。尚、



単に可変成形ビームをマルチ化したものもあるがビーム本数は数～数十本である。

また、電子ビーム用のマスクを必要とするものとして、以下のものがある。

- 5) キャラクター・プロジェクション：通常の可変成形に加え、繰り返し現れる露光パターンについて第2開口面上に予めパターン開口（キャラクター）を準備しておくもので、ショット数が大幅に低減し、露光処理能力が向上する。キャラクター・マスクは、別のパターンを持つキャラクター・マスクと交換可能になっている。
- 6) 電子ビーム投影露光 (EPL; Electron Projection Lithography)：光マスクと同じく、露光パターンと相似形で1対1の関係にある電子ビーム用マスク（ステンシル・マスク）を用い、マスクの部分領域を均一照度の電子ビームで順次照射し、透過した電子ビームをウエハ面上に順次投影露光する。

以上のように、描画方式、露光方式が変遷している [4, 5]。キャラクター・プロジェクションやマルチビームは、スループット向上が期待できるためウエハ露光機用も視野に入れている。また、電子ビーム投影露光はウエハ露光機用として研究された。本博士論文第5章では、製品への展開の例として電子ビーム投影露光装置のシステム設計について述べ、その結像データを紹介する。

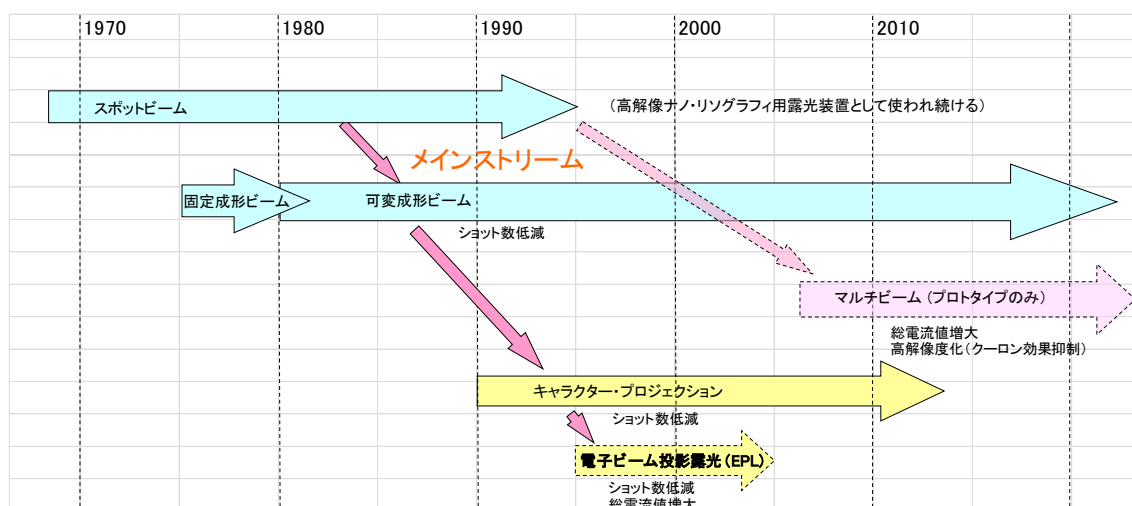


図 1.3; 電子ビーム・リソグラフィ用露光装置の歴史

可変成形ビームは、マスク描画用露光機として 20 年以上主役の座を保持している。本博士論文の第5章では、デバイスパターンと相似形で1対1に対応したマスクを用いた電子ビーム投影露光について触れる。

### 1.4 半導体技術ロードマップ

半導体デバイスの性能向上は、多岐にわたる関連装置、材料の性能向上があって初めて実現する。そのため、デバイスメーカーのリーディングの下、技術ロードマップが作成され、それを指針に各種開発が進められて来た。表 1.1 は米国の SIA (Semiconductor Industry Association) がまとめた NTRS (National Technology Roadmap of Semiconductor) の 1997 年版である [6]。こうした技術ロードマップ制定は米国だけでなく国際協力で行われるようになり、2001 年版以降は、ITRS (International Technology Roadmap of Semiconductor) ロードマップと呼ばれている。1997 年量産開始のデバイスは Half Pitch 250 nm のデザインルール (孤立線では 200 nm) で、線幅均一性はエッチング後で孤立線幅の 1/10 の 20 nm、重ね合わせ精度は、250 nm の約 1/3 の 85 nm が要求されている。デバイスメーカーはプロセス最適化のための期間が必要なため、量産開始の 2 年前には露光装置を必要としている。露光装置メーカーは装置開発のために 2~3 年の期間を要する。その結果、上記 Half Pitch 250 nm のデザインルール用露光装置の開発は 1992-1993 年には開始する必要がある。こうした業界共通のロードマップが存在しない時代は、露光装置メーカーは、デバイスメーカーの開発動向の把握や具体的商談の中で、開発すべき露光装置の仕様を決定していった。具体的な例としてステップ&スキャン投影露光装置のシステム設計例を本博士論文第 3 章で述べる。

表 1.1; 半導体技術ロードマップ

(NTRS1997 年版 [6])  
 1997 年量産開始のデバイスは Half Pitch 250 nm のデザインルール (孤立線では 200 nm) で、線幅均一性は孤立線幅の 1/10 の 20 nm、重ね合わせ精度はデザインルールの 1/3 の 85 nm が要求されている。

Table 24 Product Critical Level Lithography Requirements

Year of First Product Shipment Technology Generation	1997 250 nm	1999 180 nm	2001 150 nm	2003 130 nm	2006 100 nm	2009 70 nm	2012 50 nm
<b>Product Application</b>							
DRAM (bits)	256M	1G	—	4G	16G	64G	256G
MPU (logic transistors/cm <sup>2</sup> )	4M	6M	10M	18M	39M	84M	180M
ASIC (usable transistors/cm <sup>2</sup> )*	8M	14M	16M	24M	40M	64M	100M
<b>Minimum Feature Size (nm)**</b>							
Isolated lines (MPU Gates)	200	140	120	100	70	50	35
Dense lines (DRAM Half Pitch)	250	180	150	130	100	70	50
Contacts	280	200	170	140	110	80	60
Development capability (minimum feature size, nm)	140	120	100	70	50	35	25
Gate CD control (nm, 3 sigma at post-etch)**	20	14	12	10	7	5	4
Product overlay (nm, mean + 3 sigma)**	85	65	55	45	35	25	20
<b>DRAM Chip Size (mm<sup>2</sup>, 2:1 aspect ratio)</b>							
Year 1	280	400	480	560	790	1120	1580
Year 2	220	320	390	450	630	900	1300
Year 3	170	240	290	340	480	670	950
<b>MPU Chip Size (mm<sup>2</sup>, 1:1 aspect ratio)</b>							
Year 1	300	360	400	430	520	620	750
Year 2	240	290	320	340	420	500	600
Year 3	180	220	240	260	310	370	450
Field Size (mm × mm)	22 × 22	25 × 32	25 × 34	25 × 36	25 × 40	25 × 44	25 × 52
Field Area (mm <sup>2</sup> )	484	800	850	900	1000	1100***	1300***
Depth of focus (µm, usable @ full field with ± 10% exposure)	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5
Defect density, (defects per layer/m <sup>2</sup> @ nm defect size, lithography only)**	100 @ 80	80 @ 60	70 @ 50	60 @ 40	50 @ 30	40 @ 20	30 @ 15
Mask size (mm, square, quartz for optics)	152	152	230	230	230	230	230
Wafer size (mm, diameter)	200	300	300	300	300	450	450

Solutions Exist  Solutions Being Pursued  No Known Solution   
 \* ASIC will use maximum available field size  
 \*\* Requirements scale with resolution for striaks  
 \*\*\* Field size requirements are based on Year 2 chip sizes, the year demanding the full field size for high volume production

## 1.5 本博士論文でシステム設計について論じる背景

半導体パターン露光用の光リソグラフィ用投影露光装置においては、当初は総合性能達成にマージンがあり、要素性能の誤差を積み上げても、総合性能の許容誤差より小さかったため、装置設計時に細かい配慮をする必要がなかった。結像性能の面では、1980年代後半に入り要求される露光パターンの微細化に伴って焦点深度が減少して来ると、焦点方向の精度の仕様配分（フォーカス・バジェット）が考慮されるようになって来たが、その他の要因については未配慮でも結像性能は許容範囲内であった。その状況が一変するのが、エキシマレーザの露光光源への採用と、ステップ&スキャン投影露光方式の採用である。前者はそのパルスエネルギーばらつきによる露光量誤差が、後者は露光中のマスクとウエハの位置制御誤差（投影像の振動）が結像性能に影響を及ぼす。このように、総合性能達成にマージンがなくなって来ると、関連した複数の要素性能の整合を取りつつ、それぞれの精度を規定していく作業が装置設計におけるシステム設計の段階で必要になって来た。

## 1.6 「システム設計」の定義の再確認と本博士論文の目的

### 1.6.1 本博士論文における「システム設計」の定義の再確認

本博士論文のタイトルに「システム設計」という用語を使っているが、「システム設計」の意味は一義ではないため、ここで本博士論文における「システム設計」の定義を再確認しておく。それは、開発すべきリソグラフィ用露光装置における以下の設計作業である。

- 1) 主要な仕様、機能を設定する作業
  - ・市場ニーズを収集、分析（製品企画、マーケティング）
- 2) 設定された仕様、機能を実現するための要素技術の採用と組織化
  - ・既存の要素技術の改良
  - ・実現可能な新技術の考案
- 3) 採用予定の要素技術への要求性能の明確化
  - ・要素技術の組み合わせで達成できる性能の見極め
  - ・精度バジェット（要素技術の仕様配分）の作成

上記システム設計においては、ものづくりの指標である QCD（Quality, Cost, Delivery）のうち、仕様や機能に代表される Quality（品質）の観点だけでなく、Cost

(設計・製造原価)、Delivery (開発リードタイム、顧客への納期) も考慮しつつ、仕様設定や要素技術の組織化が行われる。

本博士論文では、特に、精度バジェット<sub>の</sub>一種である結像バジェットの考案とそれを用いたシステム設計手法について詳しく述べる。

### 1.6.2 本博士論文の目的

1.5 節で述べたように半導体パターン露光用の光リソグラフィ用投影露光装置において結像性能達成のためのマージンが徐々に小さくなっていた状況下、1990 年代前半にステップ&スキャン投影露光装置におけるシステム設計が行われた。本博士論文の目的は、1.6.1 項で定義を再確認したシステム設計を具体的にエキシマレーザを露光光源とするステップ&スキャン投影露光装置の設計にて実施し、その過程で結像バジェットを作成して要素技術に要求される精度を規定していくという設計手法の有効性を確認することである。また、電子ビーム投影露光装置に対しても同様にシステム設計を実施し、その中で電子ビーム投影露光としての結像バジェットを考案し、それを用いた設計手法の有効性を簡単に紹介する。

### 1.7 本博士論文の構成

本博士論文の構成は以下の通りである。

第1章では、今まで述べて来たように、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した。そして、本論文でのリソグラフィ用露光装置の「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、と再確認した。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。

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について説明する。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、フォーカス・レベリング系、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。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。

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、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 (著者のオリジナル)。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。以上は、第3章での結像バジレットの構築と第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場合について論じる。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。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。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レ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レットとして許容フォーカス誤差、許容露光量誤差、許容振動量を規定したものが、著者が導入した結像バジレットである。この結像バジレットにより、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、結像バジレ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% (3 $\sigma$ )) 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&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  $1\ \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ ）の影響とパルスエネルギーばらつき（当時 7% ( $3\sigma$ ））の影響の両方を加味した露光量制御方法とスキャン露光後の照度均一性の一般式を著者が導出し、評価データにより本方法の有効性を示した。更に、著者が導出した、スキャン露光における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エキシマレーザ光源のパルスエネルギー変調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章で論じられ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）を紹介し、線幅均一性が 10% ( $3\sigma$ )に入っていることを確認する。

更に、結像バジェット構築によるシステム設計を、光リソグラフィ用露光装置だけでなく電子ビーム投影露光装置においても採用した。著者は、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、結像バジェットは Blur 均一性と露光量制御のバジェットから成るとした。そして、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）を取得し、線幅均一性が 10% ( $3\sigma$ )のバジェット内に入っていることを確認した。

第6章では、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、結像バジェットを用いた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できたことを述べる。更に、リソグラフィ用投影露光装置以外の装置に対する拡張性について言及する。

以上の論文構成から、本博士論文の流れを図 1.4 に示す。論旨の軸は第1章→第2章→第3章→第5章であり、第4章は第3章を補強して第5章に繋げる内容となっている。

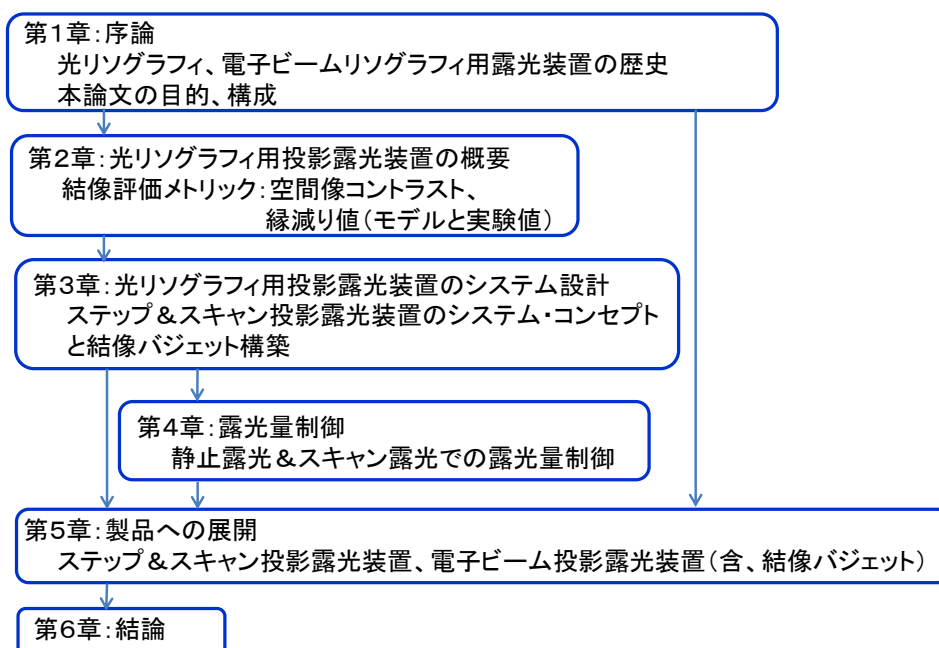


図 1.4; 本博士論文の構成

## 1.8 第1章のまとめ

- 1) 現在社会の発展を支える基盤技術のひとつが半導体デバイスであり、その実現を支えているのが、光リソグラフィと電子ビームリソグラフィである。
- 2) 光リソグラフィ用露光装置は、パターン微細化とウエハ処理能力向上のために、エキシマレーザを露光光源に採用し、ステップ&スキャン投影露光に移行した。
- 3) 電子ビームリソグラフィ用露光装置では、ウエハ露光用に処理能力の大幅向上が期待できる投影露光方式が研究開発された。
- 4) 半導体技術ロードマップと、一般的に要求される線幅均一性について述べた。
- 5) 本博士論文でシステム設計を論じる背景を説明した。
- 6) 「システム設計」の定義を再確認し、本博士論文の目的を明記した。

本博士論文の目的は、結像バジェットに基づくシステム設計を光リソグラフィ用投影露光装置や電子ビーム投影露光装置の設計に適用し、その設計手法としての有効性を確認することである。

- 7) 本博士論文の構成を説明した。

第1章の参考文献：

- [1] J.H. Bruning, “Optical Lithography – Thirty years and three orders of magnitude; The evolution of optical lithography tools”, *Proc. of SPIE*, **3048**, pp.14-27 (1997).
- [2] D.D. Massetti, M.A. Hockey and D.L. McFarland, “Evaluation of deep-UV proximity mode printing”, *Proc. of SPIE*, **221**, pp.32-38 (1980).
- [3] M.S. Hibbs, “Chapter 1 System Overview of Optical Steppers and Scanners”, *Microlithography – Science and Technology – 2<sup>nd</sup> edition* (K. Suzuki & B. Smith) (CRC Press, New York, 2007).
- [4] G. Owen, “Electron lithography for the fabrication of microelectronic devices”, *Rep. Prog. Phys.*, **48**, pp.795-851 (1985).
- [5] H.C. Pfeiffer, “Direct Write Electron Beam Lithography: A Historical Overview”, *Proc. of SPIE*, **7823**, p.782316 (2010).
- [6] Semiconductor Industry Association, “The National Technology Roadmap for Semiconductors 1997 Edition”.



## 第2章 光リソグラフィ用投影露光装置の概要

本章では、光リソグラフィ用投影露光装置のユニット構成と主要性能の概略説明を行う。更に結像特性の評価メトリックとしての空間像コントラストおよびレジスト像縁減り値（トップ線幅のボトム線幅に対する比）の関係を理論値にて考察し、レジスト像からの縁減り値の実験値を用いて投影露光装置の結像特性について論じる。

### 2.1 投影露光装置のユニット構成

図 2.1 にステップ&リピート投影露光装置のユニット構成図を示す。この図は露光光源がエキシマレーザである場合になっているが、露光光源が水銀ランプの場合には点線で示した水銀ランプが備わる。

以下、光リソグラフィ用投影露光装置のユニット構成を簡単に説明する。

- 1) 露光光源：水銀ランプの場合には g 線 436 nm または i 線 365 nm が主で、エキシマレーザの場合には KrF 248 nm または ArF 193 nm である。
- 2) 照明系：光源からの光を均一照度でマスクに照明させる照明光学系と、ウエハ上のレジストへの積算露光量を所望の精度に制御する露光量制御系から構成される。光源が水銀ランプ時には、まず楕円鏡で集光点を作り、コリメータレンズで平行光にしてフライアイレンズ入口に導光する。エキシマレーザ光源時には、シリンドリカル・ズームレンズにてビームサイズを調節しフライアイレンズ入口まで導光する。フライアイレンズは縦横に配されたロッド状のレンズエレメント群から出来ていて、その出口には 2 次光源像がフライアイレンズのエレメント数形成される。この 2 次光源像の位置をマスク面照明時の瞳位置に合致させることでケーラー照明となり、照明均一性が確保できる。この瞳位置に照明系のコヒーレンス・ファクタを決定する  $\sigma$  絞りが載置されている。従来は固定であったが、後述するように、露光パターンにより最適化を行う必要性から、1990 年代半ばより可変機構が供えられるようになった。第 4 章で詳しく説明するが、照明系内には分岐ミラーがありマスク面と共役な場所に露光量制御用の光量モニタが設置されている（ウエハ面照度と校正されている）。また、エキシマレーザを光源とする場合には露光量制御用に複数種類の減光フィルタも備えられている。
- 3) 投影系：マスクのパターンをウエハに塗布されたレジストに投影転写する投影光学

系と、大気圧変化や露光光のわずかな吸収による結像性能変化を補正する投影レンズ制御系から構成される。瞳位置に開口絞り (N.A.絞り) があり従来は固定であったが、露光パターンにより最適化を行う必要性から、照明系  $\sigma$  絞りと同様に 1990 年代半ばより可変に移行している。投影レンズ制御系は一部のレンズエレメント間の気圧を変化させたり、一部のレンズエレメントを上下動させて投影光学系の性能安定化を図ると共に、フォーカス位置の変化を予測してウエハ面の高さにオフセットを加える。

- 4) マスク (微動) ステージ: ステップ&リピート方式では、マスクを載置した際の微小回転誤差を投影光学系を介してウエハステージの XY 座標系に合わせる際の短ストロークがあればよい。
- 5) ウエハステージ: ウエハを載置する真空チャック機構付きウエハホルダ、X&Y 並進機能 (長ストローク)、Z 並進機能 (短ストローク)、回転機能、レベリング機能から成る。座標系の校正用マーク (Fiducial Mark) や照度均一性計測センサも載置されている。
- 6) マスクアライメント系: 露光光を用いて、投影レンズを介してマスクのマークをウエハステージ上の座標系校正用マークに合わせこむように回転ずれ補正を行う。同時に X, Y 方向の位置も計測する。
- 7) ウエハアライメント系:  
検出光源に He-Ne らのレーザを用い、ウエハ上のアライメント・マーク (格子パターン) からの回折光を検出する方式と、検出光源にはハロゲンランプのような波長スペクトル幅が広い白色光を用い、画像処理によりアライメント・マークの位置決めを行う方式、などがある。後者は、レジスト膜厚による干渉条件で信号がゼロになることがほとんどないため、アライメント・マーク近辺のデバイス段差やレジスト膜厚不均一性に対するロバスト性が高い。
- 8) マスクステージ位置計測系: ステップ&リピート方式の場合には短ストロークの計測系のみが備えられている。
- 9) ウエハステージ位置計測系: 周波数安定化 He-Ne レーザ干渉計による X, Y, Yawing 計測。空気揺らぎ対策のため、光路空調も行われる。近年、干渉計に代わってグレーティングを用いて空気揺らぎの影響を実質的にゼロにしている。
- 10) ウエハ高さ計測系 (オートフォーカス系): ニコン製の投影露光装置ではレーザダイオードからのスリット状のビームをウエハ面で反射させ、高さの変化によりその位

置が横シフトすることを利用している。ビーム数を多点化することで、ウエハの傾きも検出できる。

- 11) マスク&ウエハ搬送系：ベルトやアームを用いて搬送する。マスクやウエハの外縁を利用してプリアライメントを行い、各々のステージ上での位置決めを容易にしている。また、ウエハのオリエンテーション・フラットやノッチを利用して回転方向の位置決めを行う。
- 12) 架台：上記 1) - 11)を支える架台。但し、エキシマレーザ光源は直接床に設置される。
- 13) 防振台：主に床からの振動を制振し、架台から上への伝達を減衰させる。
- 14) 温空調チャンバ：装置全体が環境制御される。空気温度安定化、空気清浄化（微小パーティクル除去）、所望のレジスト性能を引き出すためのケミカルクリーン（アンモニア除去）を行う。
- 15) コンピュータとディスプレイ：コンピュータが制御全体を統括し、ディスプレイがオペレータとのインターフェースの役割を持つ。

図 2.2 はニコンの初期 g 線ステップの写真である（温空調チャンバには格納されていない）。初期のステップは、露光フィールドも開口数（N.A.; Numerical Aperture。2.3.1 項で説明）も小さいため、投影レンズのサイズは小さく、装置全体のサイズも小さく納まっている。図 2.3 は投影レンズの写真であるが、左は g 線用フィールドサイズ 15 mm×15 mm、開口数 0.3 のもの、右は KrF エキシマレーザ用フィールドサイズ 22 mm×22 mm、開口数 0.6 のものである。フィールドサイズ、開口数の増大に伴い、投影レンズも大きなものとなっている。

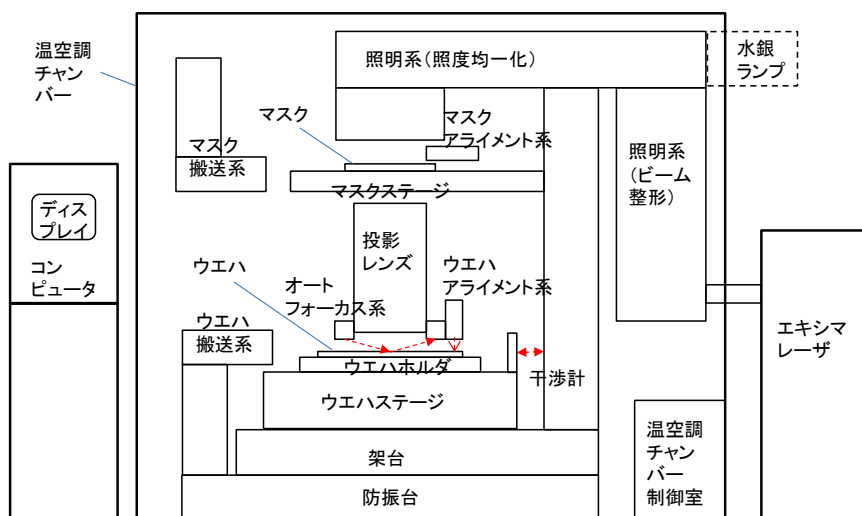


図 2.1; ステップ&リピート投影露光装置のユニット構成図

ウエハ搬送系により自動搬送されたウエハはアライメント系にて位置決めされた後、マスクパターンの投影露光と次の露光位置へのウエハステージ移動が順次繰り返される。

図 2.2; NSR-1505G2A (重要科学技術資料)

(ニコンミュージアムにて、2016年12月著者撮影)

ニコン製の第2世代ステップ&リピート投影露光装置 (g線、投影系開口数 0.35)。

サーマル・チャンバをはずして展示。



図 2.3; NSR-1505G (NA 0.30) (左) と NSR-2205EX14C (NA0.60) (右) の投影レンズ

(ニコンミュージアムにて、2016年12月著者撮影)

投影系開口数と露光フィールドサイズの増大に伴い、投影レンズの大きさも拡大。



## 2.2 主要性能と要素性能の関係

第1章で触れたように、光リソグラフィ用露光装置の主要性能は、結像性能（解像度、線幅均一性）、重ね合わせ精度、ウエハ露光処理速度に大別される。

まず、結像性能は、焦点深度がある程度確保できる解像度（これを標準解像度と呼ぶことにする。次の2.3.1項で定義される $k_1$ ファクタ、 $k_2$ ファクタがそれぞれ0.8、1.0の場合に相当）、焦点深度は浅くてもレジストパターンがぎりぎり解像する限界解像度（ $k_1$ ファクタが例えば0.5に相当）、線幅均一性、など、結像関連の性能の総称である。

重ね合わせ精度は、前工程にて既にウエハ上に形成されているパターンに配されたアライメント・マークを検出してウエハ上のパターンに対する露光位置の位置決めを行い、露光を実施した場合の、パターン層と露光&現像後のレジスト層の間の位置誤差である。通常、ウエハ全面から選択された箇所での位置誤差の平均値の絶対値に標準偏差の3倍を加えたもの（ $|\text{平均値}| + 3\sigma$ ）で評価する。アライメント・シーケンスとしては、ウエハ全面から選択された複数箇所のマーク位置を検出し、検出位置をモデル関数（例えば、露光位置座標の格子配列からの並進オフセット、回転、直交度、スケールリング、など）にフィッティングして、露光位置座標の補正を行うグローバル・アライメント、露光ショット毎にアライメント・マークの検出を行うダイ・バイ・ダイ・アライメントがある。重ね合わせ精度として要求される値は、表1.1からわかるように、標準解像度の約1/3になっている。

ウエハ露光処理速度は、1時間に露光可能なウエハ枚数であるスループット $Th$ （wafers/h）で表現されることが多い。ウエハ上の露光フィールドの数を $n$ 、ひとつの露光フィールドの露光時間 $T_e$ （sec）、露光フィールド間のステージ移動 $T_{step}$ （sec）、ウエハアライメント時間 $T_{al}$ （sec）、ウエハ交換時間 $T_{ex}$ （sec）として、

$$Th = \frac{3600}{T_{ex} + T_{al} + n(T_e + T_{step})}, \quad (2.1)$$

で表現される。

これらの主要性能と、それに影響を及ぼす要素性能の関係を図2.4に示す。要素性能は、露光光源、照明系、投影系、フォーカス・レベリング系、マスク&ウエハアライメント系、マスク&ウエハステージ系・位置計測系の6種のユニットに分けられる。主要性能と要素性能の主な関係は、以下においてである。

- ・結像性能（解像度、線幅均一性）：露光光源、照明系、投影系、フォーカス・レベリング系
- ・重ね合わせ精度：マスク&ウエハアライメント系、ウエハステージ系&位置計測系、

(投影系)

- ・ウエハ露光処理速度：ウエハアライメント系、ウエハステージ系、露光光源&照明系、(投影系)

図 2.4 からわかるように、結像性能は最も多くの要素性能項目と関連しており、エキシマレーザ光源やステップ&スキャン露光方式の採用の影響を直接受ける。そのため、本博士論文では、結像性能（解像度、線幅均一性）に注目したシステム設計手法を中心に論じ、第 3 章ではこれらの要素性能への許容誤差について議論を展開して行く。重ね合わせ精度、ウエハ露光処理速度に関連する事項には、必要に応じて触れることとした。

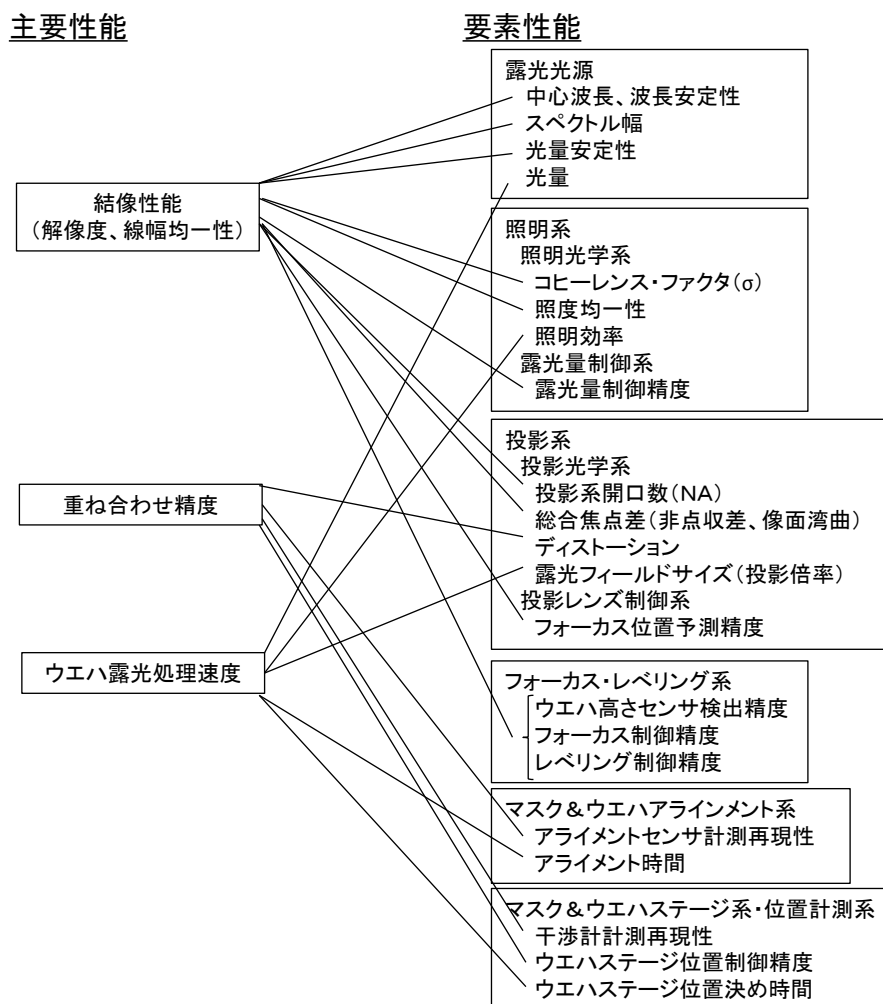


図 2.4; ステップ&リピート投影露光装置の主要性能と要素性能の関係

主要性能は、結像性能、重ね合わせ精度、ウエハ露光処理速度に大別されるが、そのうち結像性能は最も多くの要素性能項目と関連し合っている。

## 2.3 解像度と焦点深度（結像性能と露光光源仕様の関係）

まず、結像性能に関連した基本的な指標である解像度と焦点深度についての定義式を説明し、結像性能の向上が露光光源の仕様にどう影響しているかについて述べる。

### 2.3.1 解像度と焦点深度の定義式

図 2.5 に示すように、マスクへの照明半角を  $\theta$ 、投影レンズでの回折光取り込み最大半角を  $\theta_k$ 、ウェハへの投影半角を  $\theta_w$  とおく。このとき、照明系のコヒーレンス・ファクタ（またはフィリング・ファクタ） $\sigma$  は、

$$\sigma = \frac{\sin \theta}{\sin \theta_k} \quad , \quad (2.2)$$

で定義される。投影光学系の中には開口絞りが設置してあり、マスクからの回折光の取り込み範囲を規定している。今、空気の屈折率を  $n_a$  とおくと、開口絞りの大きさを示す開口数（N.A.; Numerical Aperture） $\rho_0$  は、次式で定義される。

$$\rho_0 = n_a \sin \theta_w \cong \sin \theta_w \quad . \quad (2.3)$$

この時、解像度（Resolution） $R$ 、焦点深度（Depth of Focus） $D$  の定義式は、

$$R = k_1 \frac{\lambda}{\rho_0} \quad , \quad (2.4)$$

$$D = k_2 \frac{\lambda}{\rho_0^2} = \frac{k_2 R}{k_1 \rho_0} = \frac{k_2 R^2}{k_1^2 \lambda} \quad , \quad (2.5)$$

で与えられる。ここで、 $\lambda$  は露光波長、 $k_1$ 、 $k_2$  は比例係数でそれぞれ 0.8, 1.0 程度の値である（ $k_2$  が 1.0 程度の焦点深度が得られる解像度は  $k_1$  が 0.8 程度）。尚、 $k_1$ 、 $k_2$  は、2.4 節で説明する部分的コヒーレンス理論から、それぞれ規格化空間周波数、デフォーカスに伴う波面収差量と関連した量であることがわかる。式(2.4)から波長が短い程、開口数が大きい程、解像度が向上する。一方、式(2.5)から、開口数が大きい程、解像度が小さい程、焦点深度は狭くなる。今、KrF エキシマレーザ波長  $\lambda$  を 248 nm、開口数の値を 0.42 とおくと、解像度は 470 nm 程度、焦点深度は 1400 nm 程度となる。（次の 2.3.2 項で紹介する表 2.1 を参照）

### 2.3.2 エキシマレーザの波長安定性の影響

次に、KrF エキシマレーザ（波長 248 nm）が露光光源の場合の光源波長の安定性に対する要求を考察する。波長 300 nm 以下の Deep UV 領域で高い透過率を持ち、比較的大きなサイズを入手できる硝材は合成石英と蛍石に限られる。このうち蛍石は温度係数が大きく、均質性にも問題があることから、主として合成石英を使用した投影レン

ズが、性能の安定性の点でも、レンズの量産性の面からも有利である。そこで、投影レンズを石英の薄肉単レンズでモデル化する。以下は、著者が行った、光線追跡を使わない簡易見積りの結果である [1]。図 2.6 に示すように、薄肉単レンズの公式 [2]およびウエハ側がテレセントリック（主光線がウエハに垂直）な場合の投影倍率に関する関係式から、

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{1}{L-l} + \frac{1}{l+\varepsilon} = \left( \frac{n_q}{n_a} - 1 \right) \frac{1}{K} \end{array} \right. , \quad (2.6)$$

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{1}{L-l} + \frac{1}{l} = \left( \frac{n_{q0}}{n_{a0}} - 1 \right) \frac{1}{K} \end{array} \right. , \quad (2.7)$$

$$\left[ \begin{array}{l} M_0 = -\frac{l}{L-l} \end{array} \right. . \quad (2.8)$$

ここで、 $L$ 、 $l$ 、 $M_0$ は、それぞれ、マスク～ウエハ距離、レンズ～ウエハ距離、投影倍率（倒立の場合はマイナス符号）であり、 $\varepsilon$ はフォーカス変化量（レンズから離れる向きを正方向）である。また、 $K$ は薄肉単レンズ面の曲率に関する定数である。更に、 $n_q$ 、 $n_a$ はそれぞれ石英と空気の屈折率を表し、 $n_{q0}$ 、 $n_{a0}$ は露光波長が基準波長時の値を表す。式(2.6)～(2.8)より、

$$\frac{d\varepsilon}{d\lambda} = M_0 L \frac{1}{(n_{q0} - n_{a0})} \left( \frac{dn_q}{d\lambda} - \frac{n_{q0}}{n_{a0}} \frac{dn_a}{d\lambda} \right) . \quad (2.9)$$

石英と空気の屈折率（ $n_q, n_a$ ）の分散公式は、波長の単位を $\mu\text{m}$ として、それぞれ Malitson [3], Edlén [4]の公式から、

$$n_q^2 - 1 = \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - (0.0684043)^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - (9.896161)^2} , \quad (2.10)$$

$$(n_a - 1) \times 10^6 = 83.4213 - \frac{24060.30}{\left(130 - \frac{1}{\lambda^2}\right)} + \frac{159.97}{\left(38.9 - \frac{1}{\lambda^2}\right)} . \quad (2.11)$$

エキシマレーザの波長を $\lambda = 0.2484 \mu\text{m}$ として、式(2.10)、式(2.11)より、

$$n_{q0} = 1.50833, \quad dn_q/d\lambda = -0.557380 \times 10^{-6} \text{ (1/pm)},$$

$$n_{a0} = 1.00030, \quad dn_a/d\lambda = -0.000283 \times 10^{-6} \text{ (1/pm)},$$

が得られる。これらの値を式(2.9)に代入し、更に、 $M_0 = -1/5$ 、 $L = 500 \text{ (mm)}$ とすると、

$$\frac{d\varepsilon}{d\lambda} = +0.11 \text{ (}\mu\text{m/pm)} .$$



焦点深度の観点から、波長の時間安定性として、 $\Delta\lambda=1$  pm 程度が必要であることがわかる。また、通常の KrF エキシマレーザの発振スペクトル幅は 0.3 nm (FWHM; Full Width Half Maximum (半値幅))のため、レーザ共振器内にプリズム、回折格子、エタロン等の波長選択素子を置いて発振スペクトル幅を 5 pm (FWHM) 程度にしたスペクトル狭帯化エキシマレーザが開発された。

式(2.4)、式(2.5)のところで述べたように、解像度の向上と共に、投影系の開口数は大きな値となり、その結果、焦点深度は狭くなる。そのため、エキシマレーザの波長安定性、スペクトル幅に対する要求仕様も小さい値となる。

表 2.1 に 1992 年当時のニコン製 KrF エキシマステップの仕様比較表を挙げた[5]。エキシマステップの世代と共に投影系の開口数 N.A.が増大し、解像度が向上している。また、露光フィールドサイズも大きくなっている。また、開口数 N.A.の増大に伴ってエキシマレーザの波長安定性、スペクトル幅の仕様が厳しくなっていることがわかる。

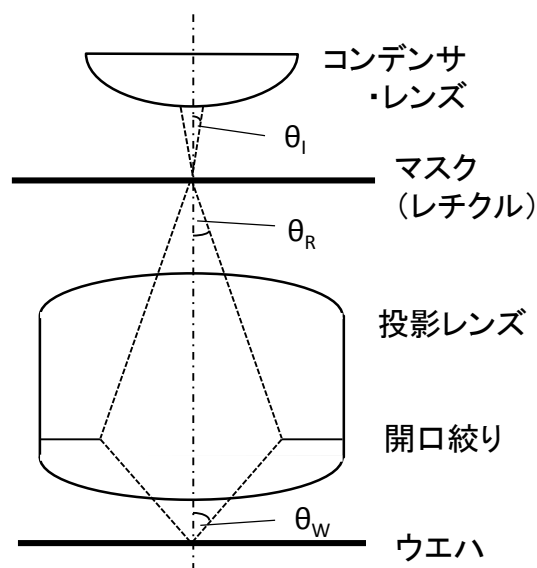


図 2.5; マスクへの照明半角 ( $\theta_i$ )、投影系での取り込み半角 ( $\theta_R$ )、ウエハへの投影半角 ( $\theta_w$ )

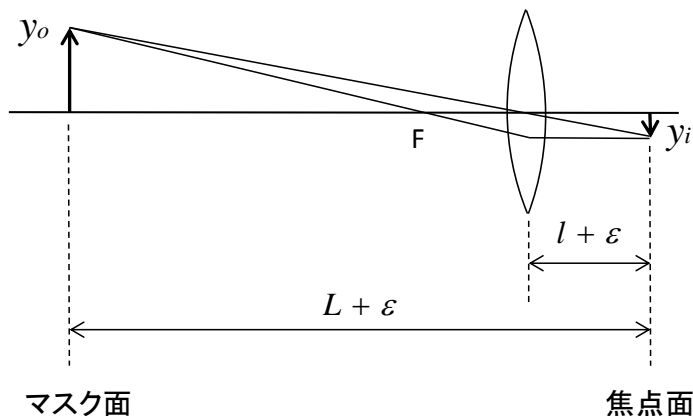


図 2.6; 薄肉単レンズモデル

$L$ ,  $l$ ,  $\epsilon$  は、それぞれマスク～ウエハ距離、レンズ～ウエハ距離、フォーカス変化量を表す。

表 2.1; エキシマステッパの仕様向上 [5]

新製品では解像度向上、重ね合わせ精度向上、スループット向上が図られている。解像度の向上は投影系開口数 (NA) の改善、スループットの向上はフィールドサイズ拡大と像面パワー向上に依っている。

		NSR-1505EX	NSR-1755EX8A	NSR-2005EX8A (開発中)
投影 レン ズ	解像度(μm)	0.47	≤0.45	≤0.40
	NA	0.42	0.45	≥0.45
	フィールドサイズ (mm □)	15 縦長最大18.8mm	17.5 縦長最大20.1mm	20 縦長最大25.2mm
照 明 系	像面パワー(mW/cm <sup>2</sup> )	≥40	≥80	≥80
	照度均一性(%以内)	±2.5	±2.0	±1.7
	露光量設定範囲(mJ/cm <sup>2</sup> )	5 ~	0.5 ~	
	露光量制御再現性 (%以内)	±1.5 (≥50mJ/cm <sup>2</sup> )	±1 (≥1mJ/cm <sup>2</sup> )	
ア ラ イ メ ン ト 系	重ね合わせ精度(μm) ( X̄ +3σ, LSA)	≤0.18μm	≤0.12	
	アライメントセンサ	LSA	LSA FIA(オプション) LIA(オプション)	
	方 式	オフアキシス	オフアキシス	
スループット(枚/hr) 6インチウェハ 露光量100mJ/cm <sup>2</sup> 露光量 10mJ/cm <sup>2</sup>		10 13	24 38	29 43
レチクルサイズ(インチ)		5	5	6
ウェハサイズ(インチ)		4, 5, 6	4, 5, 6, 8	
エ キ シ マ レ ー ザ	発振出力(W)	2	4	
	発振周波数(Hz)	200	400	
	スペクトル幅 (FWHM)(pm)	≤5	≤3	
	波長安定性(pm 以内)	±1	±0.5	
	パルス間エネルギー安定性(%以内)	±45	±15	

注：アライメントセンサのうち、LSA, LIA は He-Ne レーザを光源にし、マークからの回折光をそれぞれ DC 検出、ヘテロダイン検出するセンサ、FIA は白色光源を用いて、マークを画像処理検出するセンサ。

## 2.4 部分的コヒーレンス理論に基づく空間像コントラスト

### (結像性能と、照明系／投影系パラメータやフォーカス系精度の関係)

2.5 節ではレジスト像の特性と空間像コントラストとの関係を述べる。そこで、まず部分的コヒーレンス理論を用いて微細パターンの空間像の特性についての考察を行う。その結果として、投影系の開口数 N.A.や照明系のコヒーレンス・ファクタ ( $\sigma$ ) が装置設計上の重要なパラメータであることを示す。

#### 2.4.1 相互透過係数による像強度分布の計算

正弦波入力に対する Modulation Transfer Function; MTF の周波数特性は光学の教科書にてみかけるが、実際のマスクパターンの透過率分布は正弦波状ではなく、遮光部は 0%、透過部は 100%なので、これに対応して矩形波入力に対する空間像のコントラスト計算値がシステム設計上欲しい結果である。部分的コヒーレンス理論に基づいた像強度分布の計算は、Born & Wolf 共著の教科書[6]や Kintner の論文[7]を参考に行うことができる。

像強度分布関数  $I(\mathbf{v})$  は、物体の振幅透過率（電場ベクトルの透過率）を  $a(\mathbf{u})$  として、

$$I(\mathbf{v}) = \iint T(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) a^{\wedge}(\mathbf{x}_1) a^{\wedge*}(\mathbf{x}_2) \exp[-i2\pi(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) \cdot \mathbf{v}] d\mathbf{x}_1 d\mathbf{x}_2 \quad . \quad (2.12)$$

ここで、 $\wedge$  は Fourier 変換、 $*$  は複素共役を表す。また、 $T(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  は相互透過係数 (TCC; Transmission Cross Coefficient) と呼ばれる瞳を透過した 2 つの回折波の積であり、定義式は、

$$T(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \int S(\mathbf{x}_3) \cdot P(\mathbf{x}_3 + \mathbf{x}_1) \cdot P^*(\mathbf{x}_3 + \mathbf{x}_2) d\mathbf{x}_3 \quad . \quad (2.13)$$

ここで、 $S(\mathbf{x}_3)$  は瞳面上の点  $\mathbf{x}_3$  での有効光源 (Effective Source) を表し、 $P(\mathbf{x}_3 + \mathbf{x}_1)$  は瞳関数 (Pupil Function) を表す。尚、 $\mathbf{x} = (\xi, \eta)$  は瞳面上の規格化空間周波数座標 (開口数 N.A./波長、即ち  $\rho_0/\lambda$  により除して規格化) である。有効光源の瞳面上分布の積分値を  $A_0$  とおくと、

$$A_0 = \int d\mathbf{x} \quad , \quad (2.14)$$

$$1 = \int S(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad . \quad (2.15)$$

ここで、

$$S(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1/A_0; \text{ for all } \mathbf{x} \text{ (i.e. } \sigma \rightarrow \infty \text{) (incoherent)} \\ \begin{cases} 1/A_0; & |\mathbf{x}| \leq \sigma \\ 0 & ; |\mathbf{x}| > \sigma \end{cases} \text{ (partial coherent)} \\ \delta(\mathbf{x}) \quad \text{(coherent)} \end{cases} \quad . \quad (2.16)$$

Partial Coherent 時は  $A_0 = \pi\sigma^2$  である。

水銀ランプを光源とする場合には、マスク面に対し瞳面（フーリエ変換面）になっているフライアイレンズ出口の照度分布は中心が強く周辺が弱くなっている式(2.16)は厳密には成立していないが、エキシマレーザ光源の場合には照明光学系内の集光点強度低減のためダブルフライアイレンズを採用しているため、第2フライアイレンズ出口では照度分布が均一化され、式(2.16)が成立している。

次に瞳関数（Pupil Function）は、 $\rho^2 = \xi^2 + \eta^2 \leq 1$  として、

$$P(\mathbf{x}) = P(\mathbf{x})|_{\Delta z=0} \cdot \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \Phi) \quad . \quad (2.17)$$

ここで、波面収差量  $\Phi$  は、

$$\Phi = (1 - \sqrt{1 - \rho_0^2 \rho^2}) \cdot \Delta z \cong \frac{1}{2} \rho_0^2 \rho^2 \cdot \Delta z \quad . \quad (2.18)$$

更にデフォーカス量を、

$$\Delta z = \beta \cdot \frac{\lambda}{\rho_0^2} \quad , \quad (2.19)$$

とおけば（ $\beta$ は規格化デフォーカス）、

$$P(\mathbf{x}) = P(\mathbf{x})|_{\beta=0} \cdot \exp(i\pi\beta\rho^2) \quad . \quad (2.20)$$

無収差投影光学系における瞳関数  $P(\mathbf{x})$  は、 $\Delta z = 0$  にて、

$$P(\mathbf{x}) = P(\mathbf{x})|_{\Delta z=0} = P(\mathbf{x})|_{\beta=0} = \begin{cases} 1 & ; |\mathbf{x}| \leq 1 \\ 0 & ; |\mathbf{x}| > 1 \end{cases} \quad , \quad (2.21)$$

となる。図 2.7 に示したように、Partial Coherent な照明下で合焦時には、式(2.13)の積分範囲は図中の斜線部となる。

#### 2.4.2 一次元周期構造物体の空間像コントラスト

以上は、一般的な物体に対し成立する式であったが、ここで特別な場合として、物体が1次元周期構造の場合について述べる。この時、物体の振幅透過率は、

$$a(\mathbf{u}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \exp(-i2\pi \mathbf{m} \cdot \mathbf{f} \cdot \mathbf{u}) \quad (2.22)$$

$$\therefore a^{\wedge}(\mathbf{x}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \delta(\mathbf{x} - n\mathbf{f}') \quad (2.23)$$

ただし、 $\mathbf{f}'$ は規格化空間周波数で、

$$\mathbf{f}' = \mathbf{f} / \left( \frac{\rho_0}{\lambda} \right) \quad (2.24)$$

1次元周期構造が原点对称でしかも位相物体ではない時には、任意の $n$ に対し、

$$a_n = a_{-n} = a_n^* = a_{-n}^* \quad (2.25)$$

$$\therefore I(\mathbf{v}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_n a_m^* \cdot T(n\mathbf{f}', m\mathbf{f}') \exp[-i2\pi(n-m)\mathbf{f}' \cdot \mathbf{v}] \quad (2.26)$$

更に、物体が1:1のline & space パターンの時には、

$$a_0 = 1/2, \quad a_{2k} = 0 \quad (k \text{ は } 0 \text{ 以外の整数}), \quad a_{2k-1} = \frac{1}{\pi} \cdot (-1)^{k-1} / (2k-1) \quad (k \text{ は整数}) \quad (2.27)$$

更に、1次回折光以下のみが結像に寄与している場合を考える。即ち、

$$(1+\sigma)/3 \leq |\mathbf{f}'| \leq (1+\sigma) \quad (2.28)$$

に対し、 $n = -1, 0, 1$ ;  $m = -1, 0, 1$ の場合のみを考えると、 $I(\mathbf{v})$ は整理されて、

$$\begin{aligned} I(\mathbf{v}) = & |a_0|^2 T(\mathbf{0}, \mathbf{0}) + 2|a_1|^2 T(\mathbf{f}', \mathbf{f}') \\ & + 4a_0 a_1 \operatorname{Re}[T(\mathbf{0}, \mathbf{f}')] \cos(2\pi \mathbf{f}' \cdot \mathbf{v}) + 2|a_1|^2 T(-\mathbf{f}', \mathbf{f}') \cos(2\pi \cdot 2\mathbf{f}' \cdot \mathbf{v}) \quad (2.29) \end{aligned}$$

式(2.29)は、像強度分布の定数項は $T(\mathbf{0}, \mathbf{0})$ ,  $T(\mathbf{1}, \mathbf{1})$ ,  $T(-\mathbf{1}, -\mathbf{1})$ という互いに干渉しない回折波 ( $T(\mathbf{1}, \mathbf{1})$ ,  $T(-\mathbf{1}, -\mathbf{1})$ は同値) で決まり、マスクパターンと同じ周期項は0次と1次の回折波の干渉 ( $T(\mathbf{0}, \mathbf{1})$ ,  $T(\mathbf{0}, -\mathbf{1})$ ,  $T(\mathbf{1}, \mathbf{0})$ ,  $T(-\mathbf{1}, \mathbf{0})$ ; 同値) で生成され、マスクパターンに対し倍周期の項は-1次と1次の回折波の干渉 ( $T(-\mathbf{1}, \mathbf{1})$ ,  $T(\mathbf{1}, -\mathbf{1})$ ; 同値) で生成される、ということを意味している。図2.7はこれを図示したものであり、開口絞りを通過した0次、+1次、-1次の回折波がウエハ上で干渉する様子を示している。

以下、余弦の多項式に変換し係数を整理すると、

$$\therefore I(\mathbf{v}) = A + B \cos(2\pi \mathbf{f}' \cdot \mathbf{v}) + C \cos^2(2\pi \mathbf{f}' \cdot \mathbf{v}) \quad (2.30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = |a_0|^2 T(\mathbf{0}, \mathbf{0}) + 2|a_1|^2 (T(\mathbf{f}', \mathbf{f}') - T(-\mathbf{f}', \mathbf{f}')) \quad , \\ B = 4a_0 a_1 \operatorname{Re}[T(\mathbf{0}, \mathbf{f}')] \quad , \\ C = 4|a_1|^2 T(-\mathbf{f}', \mathbf{f}') \quad , \\ a_0 = 1/2 \quad , \quad a_1 = 1/\pi \quad . \end{array} \right. \quad (2.31)$$

図 2.9 は像強度分布の一例であり、余弦の 2 次項の影響により 1/2 ピッチの位置に像強度の小さなピークがあることがわかる。尚、規格化空間周波数が 1 以上の領域では、-1 次と 1 次の回折光の干渉は発生せず、 $T(-1,1)$ 、 $T(1,-1)$  はゼロになり、(2.30)右辺の余弦 2 乗項はなくなる。

空間像コントラスト  $C_a$  を、(パターン開口中心での像強度 -1/2 ピッチ位置での像強度)/(パターン開口中心での像強度 +1/2 ピッチ位置での像強度) で定義すると、

$$C_a = \frac{I(0) - I\left(\frac{f}{2|f|^2}\right)}{I(0) + I\left(\frac{f}{2|f|^2}\right)} = \frac{B}{A+C} \quad (2.32)$$

となる。4 種類のデフォーカス量 (規格化デフォーカス  $\beta = 0, 1/4, 1/2, 3/4$ ) について、横軸を規格化空間周波数、縦軸を空間像コントラストにして、照明系  $\sigma = 0.2 \sim 0.8$  (0.1 刻み) をパラメータにして作成したグラフを図 2.10 に示す。式(2.4)の左辺  $R$  は空間周波数を用いて表すと  $1/(2|f|)$  で表されるので、式(2.24)で定義された規格化空間周波数

と式(2.4)で定義された  $k_1$  ファクタを比較すると、規格化空間周波数の 2 倍の逆数が  $k_1$  ファクタに相当する。即ち、規格化空間周波数 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 は  $k_1$  ファクタ 1.0, 0.50, 0.33, 0.25 にそれぞれ相当する。さて、図 2.10 より、ベストフォーカスでは、規格化空間周波数 1.05 近辺を境に、それ以下の規格化空間周波数では小  $\sigma$  が、それ以上の規格化空間周波数では大  $\sigma$  が空間像コントラストが大きくなる。デフォーカスして行くと、分岐点の規格化空間周波数は 1.0 以下に下がって来るが、それ以下の規格化空間周波数での  $\sigma$  による差は小さく、それ以上の規格化空間周波数では大  $\sigma$  が空間像コントラストが高い。また、デフォーカスが大きくなると、式(2.32)によるコントラストの定義ではマイナスになる状況も発生する。これは、偽解像と呼ばれる白黒反転現象で、図 2.9 でのピッチ 1/2 の位置での像強度が、原点での像強度よりも大きくなる場合に生じる。ところで、式(2.4), (2.5)の後で、 $k_1$ 、 $k_2$  はそれぞれ 0.8, 1.0 程度と紹介した。 $k_1$  ファクタ 0.8 は規格化空間周波数 0.625、 $k_2$  ファクタ 1.0 は規格化デフォーカス  $\pm 1/2$  に相当する。よって、この時の空間像コントラストは 0.8 弱に相当している。

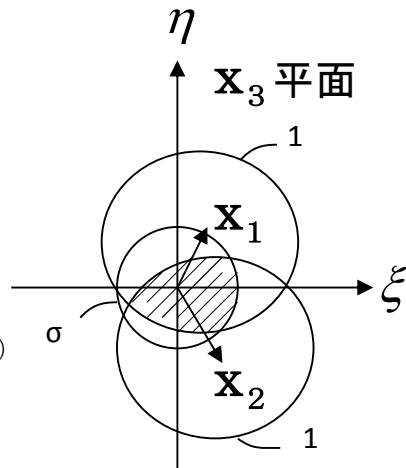
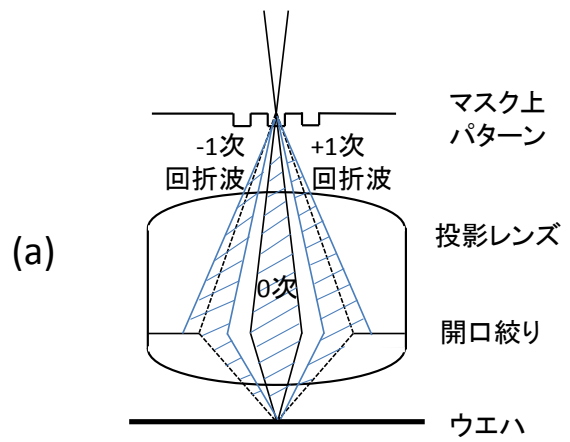
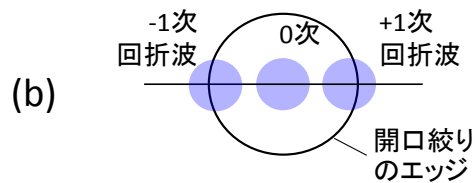


図 2.7; 瞳面上での有効光源 (Partial Coherent;  $\sigma$  時) と瞳関数 (合焦時) を示す図。  
斜線部が式(2.13)の積分領域。



(a)



(b)

図 2.8; パターンからの回折波の進路  
(a) 異なる次数波がウエハ上で干渉する図  
(b) 開口絞り上での回折波の分布を示す図

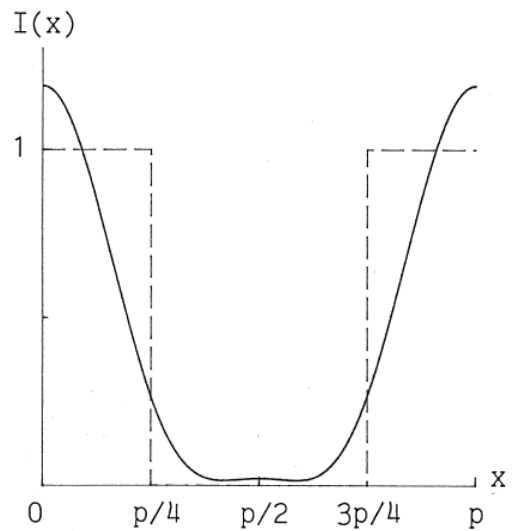


図 2.9; 空間像強度分布の一例

規格化空間周波数が 1 以上の領域では、倍周波数成分は 0 になり、像強度分布は定数項と周期  $p$  の余弦関数の和となる。

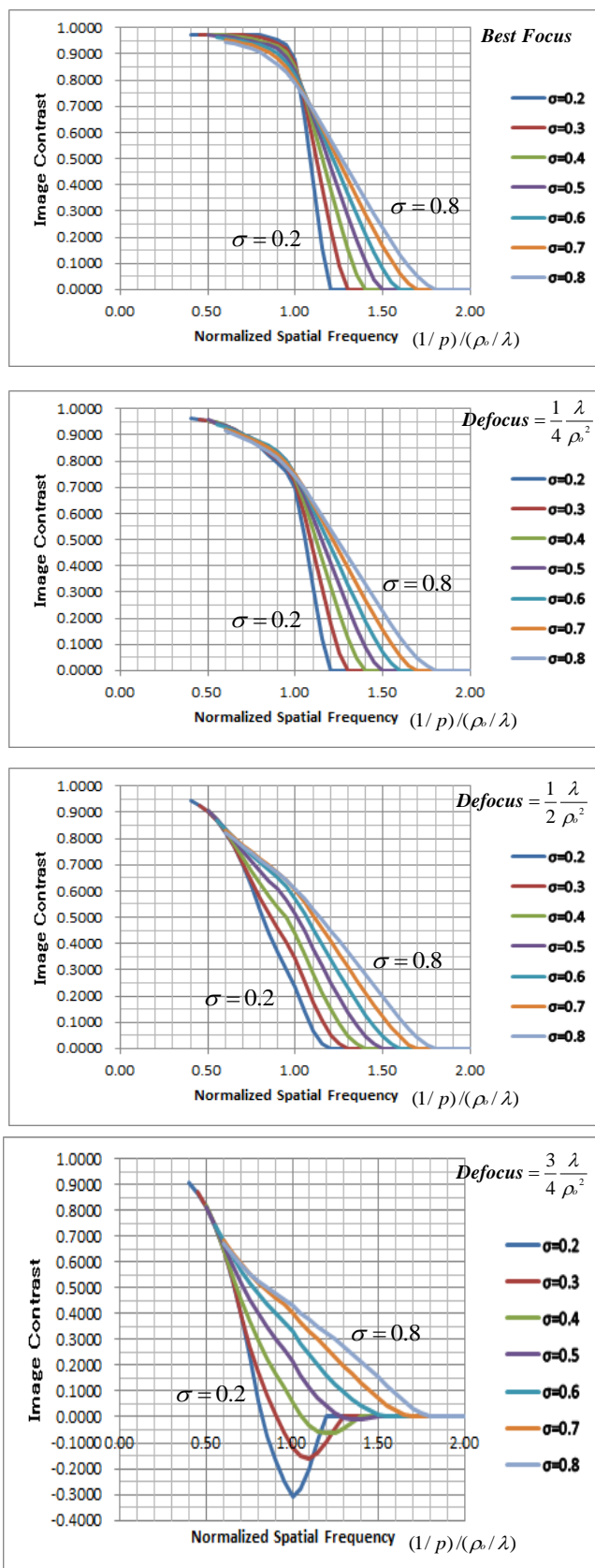


図 2.10; 規格化空間周波数に対する  
1:1 ライン&スペースの像コ  
ントラスト  
最上段：合焦時、  
中上段：規格化デフォーカス 1/4、  
中下段：規格化デフォーカス 1/2、  
最下段：規格化デフォーカス 3/4  
(コントラストが負は偽解像領域)



## 2.5 レジスト像の縁減り値の特性

### 2.5.1 レジスト像の縁減り値と FH-EX1 レジストの特性

投影系の開口数 N.A.や照明系のコヒーレンス・ファクタ ( $\sigma$ ) の空間像への影響について、2.4 節にて考察を進めたが、1990 年代前半には微細パターンの空間像を精度よく計測できる光電センサは無かった。一方、半導体デバイスの製造プロセスでは、レジスト像を介して基板のシリコンがエッチングされるため、レジスト像の断面形状の特性が重要であり、かつデータ取得も比較的容易である。そこで、図 2.11 に示すように、レジスト断面形状の指標として、レジスト表面の線幅  $L_T$  と底面の線幅  $L_B$  の比  $L_T/L_B$  を縁減り値 ( $T/B$ ) と定義し、その特性を理論と実験から明らかにして行く。

$$T/B = \frac{L_T}{L_B}, \quad (2.33)$$

波長 248 nm での露光に対応したレジストのうち、露光・現像後の断面形状が台形で縁減り値計測に適したレジストとして FH-EX1 (富士ハントエレクトロニクステクノロジー社製 (現・富士フイルムエレクトロニクスマテリアルズ社)) を著者は結像特性評価対象に採用した。FH-EX1 は露光された箇所のレジストが現像により除去されるポジ・レジストである。図 2.12 は異なるパターンピッチに対するレジスト断面形状の SEM 写真、図 2.13 はデフォーカスに対するレジスト断面形状の SEM 写真である。パターンピッチが緩い程、またベストフォーカスに近い程、縁減り値が大きな値であることが観察でき、縁減り値が空間像コントラストに対応した物理量であることを暗示している。

FH-EX1 の最適膜厚決定のための実験データを図 2.14 に示す。このグラフは、ウエハ上に均一に塗布されたレジスト膜厚と、パターン無しの状態での露光および現像後に 90% の膜厚が除去される露光量の関係をプロットしたものである。レジスト膜厚としては、後工程のエッチングに耐える膜厚を確保しつつなるべく薄く、しかも露光量変化に対し変化のぶい値が望ましい。そのため厚さ 480 nm に決定した。また多重干渉の膜厚周期が約 60 nm であることから、露光波長 248 nm を振動周期の 2 倍で除し、レジスト屈折率として約 2.0 という値が得られる。次に膜厚 480 nm にてパターン無しの状態での露光量と現像後のレジスト残膜の関係 (残膜特性) を図 2.15 に示す。レジストの膜減りが始まる露光量 ( $E_0$ ) とレジストが現像後に抜けきる露光量 ( $E_{TH}$ ) の比は、レジスト膜厚 ( $t_r$ )、露光光の吸収係数 ( $\kappa$ ) を用いて、次式で表される。

$$E_0/E_{TH} \cong \exp(\mp \kappa t_r), \quad (\text{上段符号; ポジレジスト, 下段符号; ネガレジスト}). \quad (2.34)$$

この図より、 $E_0$  と  $E_{TH}$  はそれぞれ 12 mJ/cm<sup>2</sup> と 60 mJ/cm<sup>2</sup> で、 $E_0/E_{TH} = 0.2$  を得る。

### 2.5.2 縁減り値の理論値と空間像コントラストの関係

式(2.31)で表された空間像強度分布関数の係数  $A$ ,  $B$ ,  $C$  は、ベストフォーカスにてそれぞれ値  $A_{bf}$ ,  $B_{bf}$ ,  $C_{bf}$  を持つものとする。レジストと表面と底面では空間像のデフォーカス度に差が生じる可能性があるが、レジスト厚が 480 nm の場合、その差は規格化デフォーカス量 1/3 未満であり、空間像の形状にはほとんど影響がないため、トップ線幅とボトム線幅に同じ空間像強度分布の式を適用する(薄膜レジスト近似)。図 2.16 に、空間像強度分布の一例を用いて、右側に示したレジスト残膜曲線にて  $E_0$  および  $E_{TH}$  が指定された場合の、縁減り値のモデルを示した。ここで、最適露光時間を  $T_{best}$ 、最適露光量に対する任意の露光量の比を  $\alpha$  とおくと、式(2.30)を用いて、

$$E_0 = \left\{ A \mp B \cos\left(\pi \frac{L_T}{p}\right) + C \cos^2\left(\pi \frac{L_T}{p}\right) \right\} \alpha T_{best} \quad , \quad (2.35)$$

$$E_{TH} = \left\{ A \mp B \cos\left(\pi \frac{L_B}{p}\right) + C \cos^2\left(\pi \frac{L_B}{p}\right) \right\} \alpha T_{best} \quad . \quad (2.36)$$

ここで、ベストフォーカスにて、レジスト底面の線幅  $L_B$  が  $p/2$  に等しくなる露光量を最適露光量とするので、式(2.36)より、

$$E_{TH} = A_{bf} T_{best} \quad . \quad (2.37)$$

式(2.37)から  $T_{best}$  を式(2.35)、(2.36)に代入し、 $L_T$  と  $L_B$  を求めると、その比  $L_T/L_B$  から、

$$\left\{ \begin{array}{l} T/B = \frac{\cos^{-1} \left[ \pm \frac{B}{2C} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{4C}{B^2} \left( A - \frac{E_0}{E_{TH}} \frac{A_{bf}}{\alpha} \right)} \right\} \right]}{\cos^{-1} \left[ \pm \frac{B}{2C} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{4C}{B^2} \left( A - \frac{A_{bf}}{\alpha} \right)} \right\} \right]} \quad , \quad ((1+\sigma)/3 \leq |f'| < 1) \\ \\ T/B = \frac{\cos^{-1} \left[ \pm \frac{1}{B} \left\{ A - \frac{E_0}{E_{TH}} \frac{A_{bf}}{\alpha} \right\} \right]}{\cos^{-1} \left[ \pm \frac{1}{B} \left\{ A - \frac{A_{bf}}{\alpha} \right\} \right]} \quad . \quad (1 \leq |f'| \leq 1+\sigma) . \end{array} \right. \quad (2.38)$$

ベストフォーカス、最適露光量の条件化では、式(2.38)は簡単になり、

$$\left\{ \begin{array}{l} T/B = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \pm \frac{B_{bf}}{2C_{bf}} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{4A_{bf}C_{bf}}{B_{bf}^2} \left( 1 - \frac{E_0}{E_{TH}} \right)} \right\} \right] \quad , \quad ((1+\sigma)/3 \leq |f'| < 1) \\ \\ T/B = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \pm \frac{A_{bf}}{B_{bf}} \left\{ 1 - \frac{E_0}{E_{TH}} \right\} \right] \quad . \quad (1 \leq |f'| \leq 1+\sigma) \end{array} \right. \quad (2.39)$$

尚、式(2.35)、(2.36)、(2.38)、(2.39)にて符号の上段符号はポジレジスト、下段符号はネガレジストを示す。また、余弦に関する2次方程式の解として平方根は両符号を持つが、 $|f|=1$ での値の連続性からマイナス符号を採用している。

式(2.32)で求まる空間像コントラスト値と式(2.38)で求まる縁減り値の理論値の関係をプロットしたものが図 2.17 である。(a)はベストフォーカス時、(b)は規格化デフォーカス 1/4 時となっている。(a)、(b)ともポジレジストを仮定し、レジスト特性として  $E_0/E_{TH}$  が 0.2 (FH-EX1 相当) と 0.5 のケースについて計算した。本図から、縁減り値は空間像コントラストと概ね 1:1 の関係があることが示され、2.5.1 項で触れたレジスト断面形状からの暗示が理論的に証明された。ただし、 $E_0/E_{TH}$  の値によって相関度が大きく変化することから、縁減り値はレジスト性能により大きく変化すると言える。

### 2.5.3 縁減り値の実測データ

表 2.2 に、縁減り値データ取得に用いた投影系の開口数 (N.A.) の種類を示す。1/5 倍投影系はスペクトル狭帯化 KrF エキシマレーザ対応の投影レンズで 4 種類の開口数 (0.50, 0.45, 0.42, 0.375) であり、1/10 倍投影系は蛍石を多く使用した色消しレンズでスペクトルを狭帯化しない KrF エキシマレーザにも使用でき、投影系の開口数は 0.37 である。図 2.18、図 2.19 に縁減り値の規格化空間周波数依存性の計算値 (式(2.39)による) と実験値を示した。縁減り値のデータは露光フィールド中心のレジスト像を用い、SEM を用いてレジスト表面の線幅  $L_T$  と底面の線幅  $L_B$  を計測し、その比  $L_T/L_B$  を縁減り値 ( $T/B$ ) とした。 $L_T$ 、 $L_B$  の計測誤差は共に 10 nm ( $3\sigma$ ) として、縁減り値の計測誤差は、以下の誤差の伝播公式により求めた。

$$\Delta(T/B) = \frac{1}{L_B} \sqrt{(\Delta L_T)^2 + (T/B)^2 (\Delta L_B)^2} \quad , \quad (2.40)$$

図 2.18 では、照明系  $\sigma=0.5$ 、色消しレンズを含む 4 種類の投影系開口数 (0.50, 0.45, 0.42, 0.37) の条件下での縁減り値データをプロットした。データはほぼ  $\sigma=0.5$  の計算値のカーブに沿い、また色消しレンズのデータも、縁減り値の劣化は見られていない。図 2.19 では、投影系開口数 (N.A.) が 0.45 の時に、照明条件  $\sigma=0.3$  および  $\sigma=0.5$  での縁減り値データをプロットした。 $\sigma=0.3$  のデータは計算値をやや下回るものの、 $\sigma=0.5$  のデータより高い縁減り値を示し、また規格化空間周波数が 0.7 以下の領域で飽和傾向にあり、計算値からの予想とよい一致を見ている。このことから、簡易モデルにて導出した縁減り値のモデル式(2.39)は、すべての条件での縁減り値の絶対値を説明

できるところまでは行かないが縁減り値変化の傾向は十分説明できると言える。

図 2.20 では、投影系の開口数  $N.A.=0.45$ 、照明系  $\sigma=0.5$  の条件化、450 nm ライン&スペース、400 nm ライン&スペースの縁減り値の露光量依存性データを示した。ここで、パターン線幅（ウエハ面でのレジスト線幅、すなわちレジスト断面の底辺の線幅  $L_B$ ）は所望の線幅 450 nm または 400 nm になる露光量（ベスト露光量）は 120 ~ 130 mJ/cm<sup>2</sup> である。縁減り値は、露光オーバーに対して緩やかに低下する一方、露光アンダーに対しては急激に低下する。図 2.16 に示した空間像と縁減り値の関係において、ポジレジストの場合には、露光量変化に対応して像強度を変化させると露光アンダーの方が  $L_B$ 、 $L_T$  の変化が大きいと予想され、その結果、露光アンダー側にて縁減り値の低下が急激であると考えられる。

図 2.21 では投影系の開口数  $N.A.=0.45$ 、照明系  $\sigma=0.5$  の条件化、450 nm ライン&スペース、400 nm ライン&スペースの縁減り値のデフォーカス依存性データを示した。縁減り値のデフォーカス依存性はピークに対しほぼ対称であり、ピークを与えるフォーカス位置をベストフォーカスとすることができる。

以上、照明条件、投影条件だけでなく、露光量とデフォーカス量がレジストへの結像性能にとって重要なパラメータであることがわかる。この知見を活かしたシステム設計について第 3 章にて論じる。

図 2.22 は様々な照明条件、投影条件による 350 nm ライン&スペースの縁減り値のデフォーカス特性のデータである。この実験で使用した照明系内の  $\sigma$  絞りの形状を図 2.23 に示した。 $\sigma=0.5$  の部分的コヒーレント照明、輪帯照明（2種の投影系開口数  $N.A.=0.45, 0.375$  にて使用）、2つ目開口（Two Apertures）照明の4条件である。ここで 2/3 Annular とは、 $\sigma$  絞りの開口部直径の 2/3 を直径とする同軸遮蔽円がある輪帯状の絞りを言う。また、2つ目開口（Two Apertures）照明はダイポール照明ともいい、350nm ライン&スペース（縦パターン）に最適化された位置に2つの小開口がある。図 2.22 のデータから  $\sigma=0.5$  の通常照明が最も高い縁減り値が得られるが焦点深度は浅くなること、輪帯照明では焦点深度拡大効果があるが、開口数  $N.A.=0.375$  では縁減り値のピーク値の劣化が大きいこと、2つ目開口（ダイポール）照明では縁減り値自身はやや低下するが、データを取得したデフォーカス範囲内ではほとんど縁減り値の劣化がないことが一目瞭然でわかる。

本節では、縁減り値を用いて、投影系、照明系の条件、パターンサイズ、デフォーカス度、露光量により結像特性が変化することを示した。

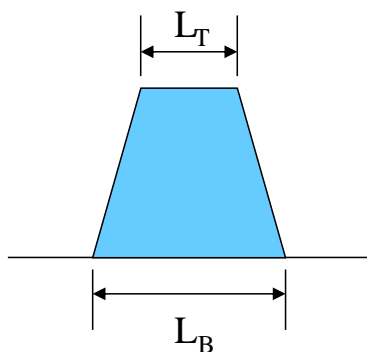


図 2.11; レジスト断面形状の模式図

レジスト表面の線幅を  $L_T$ 、底面の線幅  $L_B$  すると、縁減り値 ( $T/B$ ) は、その比  $L_T/L_B$  で定義される。

F H - E X 1 (t : 0.5  $\mu$ m)  
 SOFT BAKE : 90 °C / 60 SEC  
 EXPOSURE : NSR-1755EX8A  
 90 mJ/cm<sup>2</sup>  
 PEB : 110 °C / 60 SEC  
 DEVELOPMENT : HPRD-402X / 60 SEC (PUDDLE)

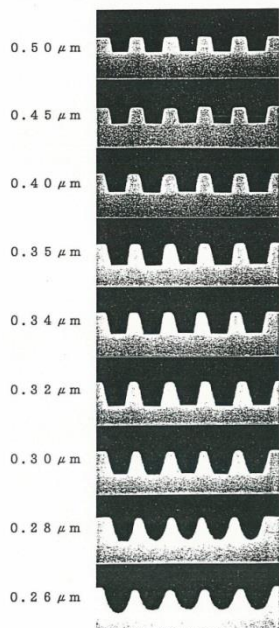


図 2.12; パターンサイズによる断面プロファイル変化の SEM 写真 (0.50  $\mu$ m ~ 0.26  $\mu$ m half pitch)

パターン微細化に伴い、縁減り値が低下している。

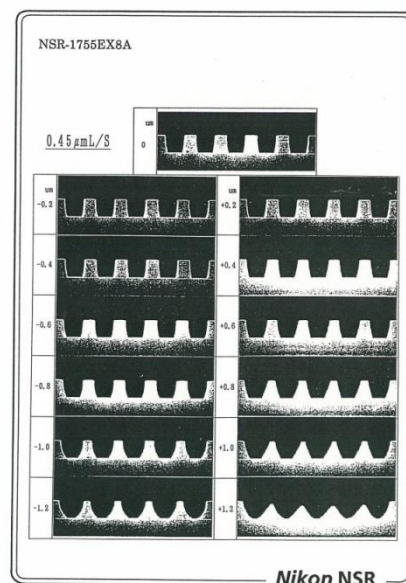


図 2.13; デフォーカスによる断面プロファイル変化の SEM 写真 (0.45  $\mu$ m half pitch)

デフォーカスに伴い、縁減り値が低下している。

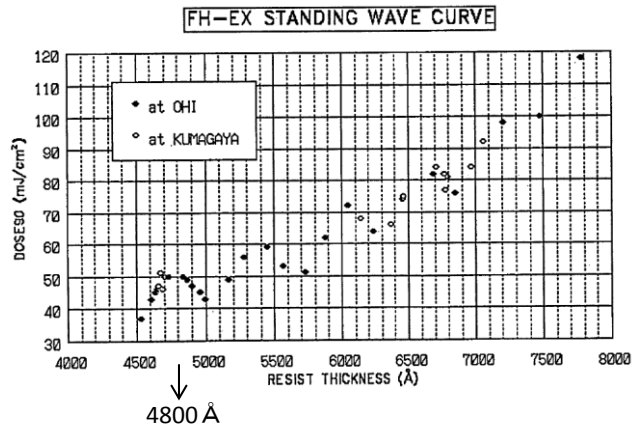


図 2.14; レジスト塗布膜厚と、パターン無しでの状態の露光および現像後に膜厚の 90% が除去される露光量 (DOSE90; 縦軸) の関係

光干渉式膜厚測定装置での計測データから、最適なレジスト膜厚を、膜厚に対する感度がにぶい 480 nm に決定。膜厚 60 nm 周期と露光波長 248 nm から、レジストの屈折率は約 2.0。

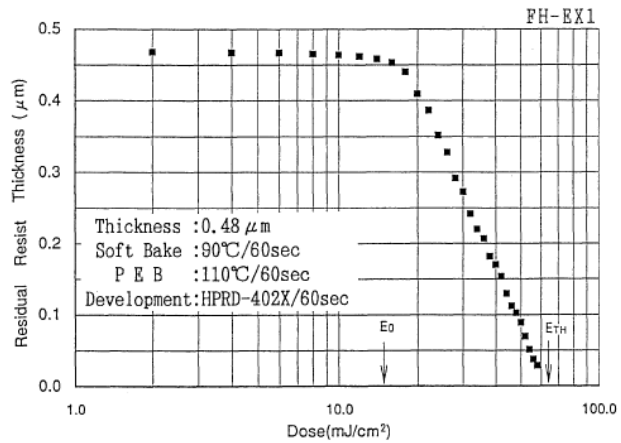


図 2.15; レジストの残膜特性

光干渉式膜厚測定装置での計測データ。現像後レジストが膜減りを開始する露光量 ( $E_0$ ) が 12 mJ/cm<sup>2</sup>、抜ける露光量 ( $E_{TH}$ ) が 60 mJ/cm<sup>2</sup>である。  
(reproduced from [8]. Copyright(1992) The Japan Society of Applied Physics)

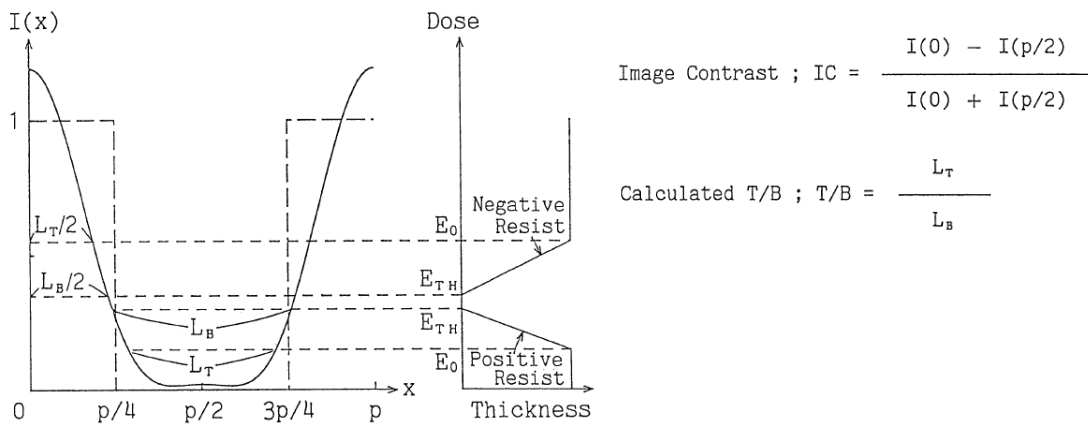
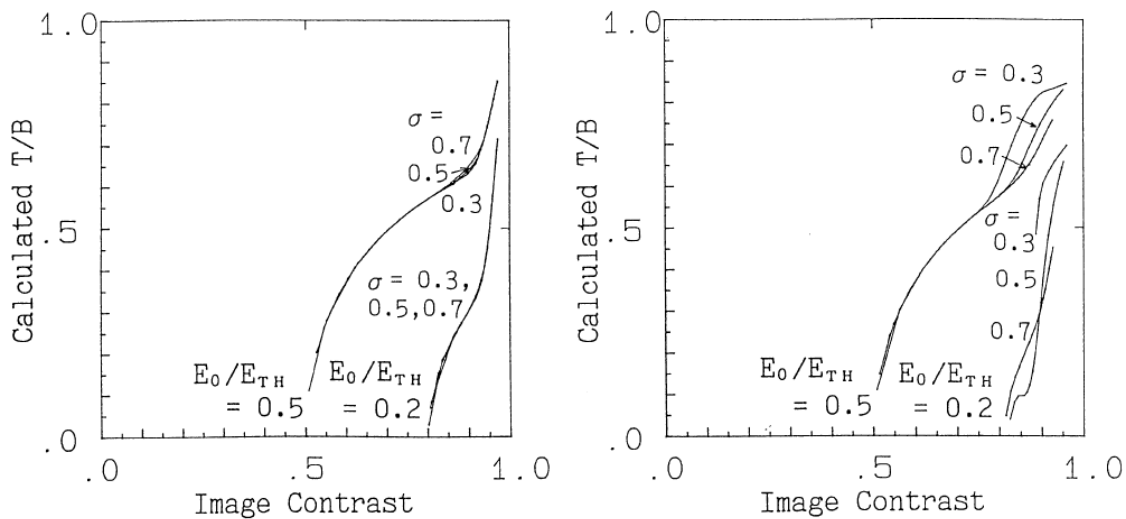


図 2.16; 空間像、コントラスト、縁減り値の関係を示す図

(reproduced from [8]. Copyright(1992) The Japan Society of Applied Physics)



(a) at NZ = 0.0 (the best focus)

(b) at NZ = 0.25

図 2.17; 空間像コントラストと縁減り値の理論値の関係

(a)ベスト・フォーカス時、(b)規格化デフォーカス 1/4 時

$E_0/E_{TH}$  はレジスト特性を表すパラメータ。

(reproduced from [8]. Copyright(1992) The Japan Society of Applied Physics)

表 2.2; 縁減り値の実験データ取得時の投影系の開口数の種類

1/10 倍レンズは色消しタイプでスペクトル狭帯化無し。

(reproduced from [8]. Copyright(1992) The Japan Society of Applied Physics)

Lens type	Magnification	NA	Spectral bandwidth of excimer laser (FWHM, typical)
Chromatic	1/5	0.50	3 pm
		0.45	
		0.42	
		0.375	
Achromatic	1/10	0.37	300 pm

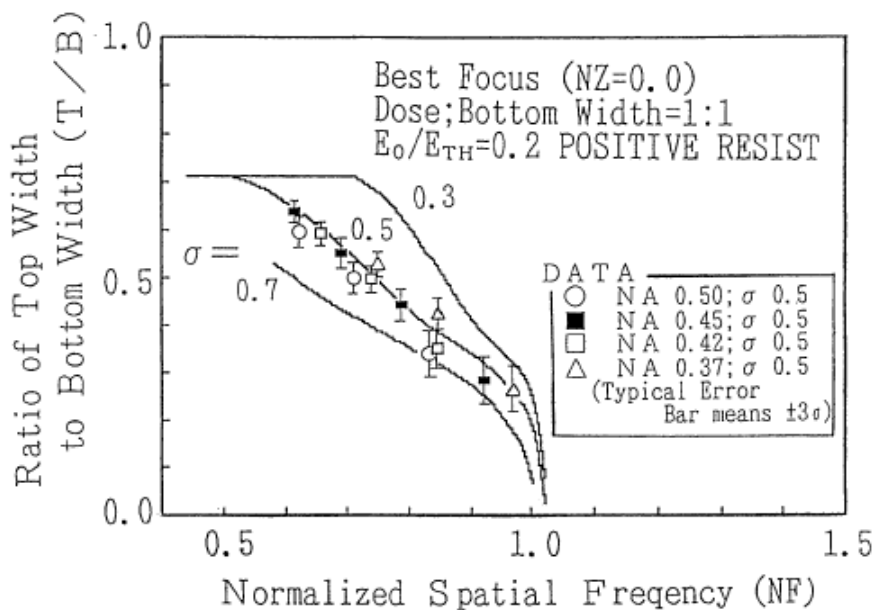


図 2.18: 縁減り値の規格化空間周波数に対する依存性

照明系  $\sigma=0.5$  一定、投影レンズ変更時の縁減り値データは、理論値と概ね一致。  
(reproduced from [8]. Copyright(1992) The Japan Society of Applied Physics)

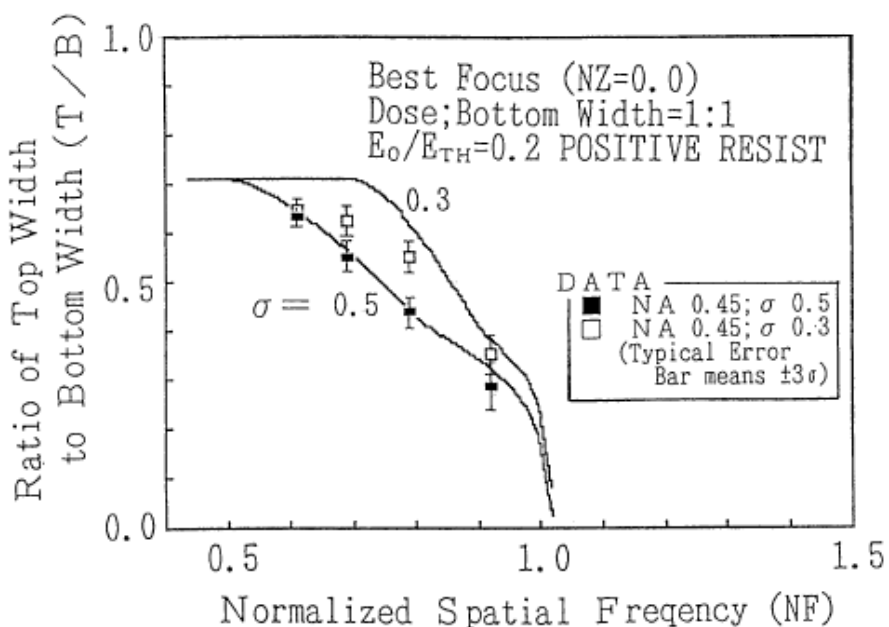


図 2.19: 縁減り値の規格化空間周波数に対する依存性

投影レンズ開口数 0.45 時、照明系  $\sigma=0.3$  での縁減り値は、 $\sigma=0.5$  での縁減り値より高く、理論値から予測される傾向と一致。  
(reproduced from [8]. Copyright(1992) The Japan Society of Applied Physics)



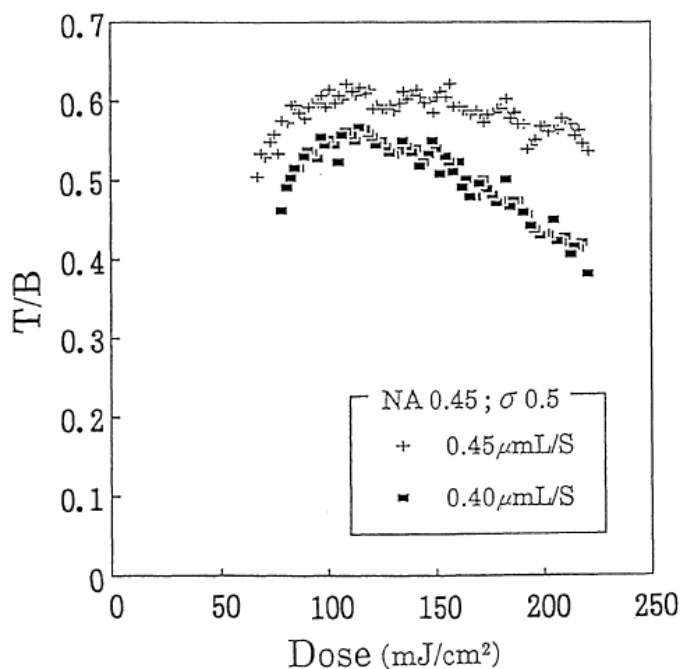


図 2.20; 縁減り値の露光量依存性

ベスト露光量は  $120 \sim 130 \text{ mJ/cm}^2$ 。縁減り値は、露光オーバーに対してゆるやかに低下、露光アンダーに対しては急激に低下する。

(reproduced from [8]. Copyright(1992) The Japan Society of Applied Physics)

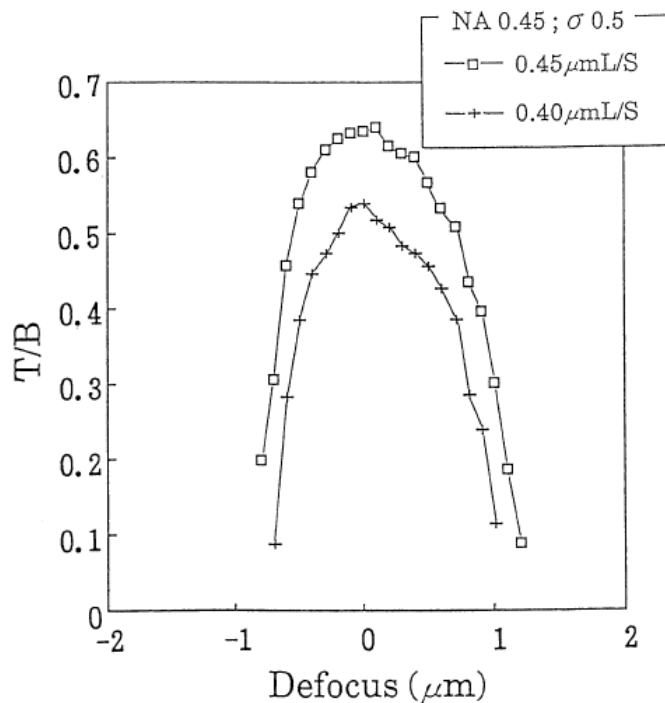


図 2.21; 縁減り値のデフォーカス依存性

デフォーカスの両方向に対しほぼ同様に縁減り値は低下する。

(reproduced from [8]. Copyright(1992) The Japan Society of Applied Physics)

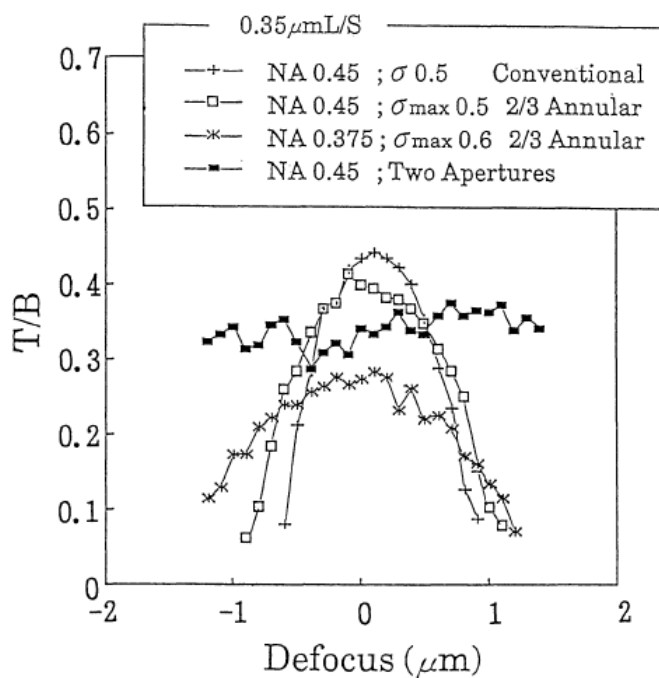


図 2.22: 縁減り値のデフォーカス依存性

(ベストフォーカス $\pm 1.2\mu\text{m}$ 、異なる投影系開口数、照明条件)

投影系開口数と照明条件により、縁減り値のデフォーカス特性が大きく変化する。

輪帯照明にすると縁減り値のピーク値は下がるが、デフォーカスによる縁減り値の低下は緩やかになる。一方向の特定ピッチのパターンに特化した2つ目開口 (Two Apertures) では、デフォーカスによる縁減り値の低下がほとんど見られない。

(reproduced from [8]. Copyright(1992) The Japan Society of Applied Physics)

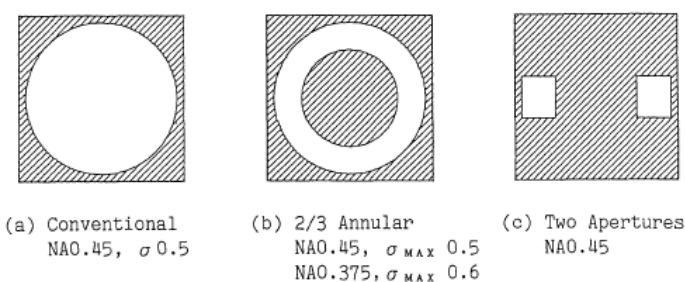


図 2.23: 異なる照明条件実現のための絞り形状

(a) 通常照明 (Conventional)、(b) 輪帯照明 (Annular)、(c) 2つ目開口 (Two Apertures)。

(c) の Two Apertures の一方の開口中心は、その開口からの照明光がマスク上の  $0.35\mu\text{m}$  L/S に対応したパターンにより発生する1次回折光の一方と0次回折光が、同じ入射角(符号は逆)でウエハ面に達するように配置。(reproduced from [8]. Copyright(1992)

The Japan Society of Applied Physics)

## 2.6 第2章のまとめ

- 1) 光リソグラフィ用投影露光装置の構成要素を概観した。その主要性能は結像性能（解像度、線幅均一性）、重ね合わせ精度、ウエハ露光処理速度であるが、種々の要素性能が複合して、主要性能を成り立たせていることを説明した。
- 2) 露光光源が連続光の水銀ランプから **KrF** エキシマレーザに変更になり、光源の性能が光リソグラフィ用投影露光装置の主要性能に大きな影響を及ぼすようになった。そのうち、**KrF** エキシマレーザの波長変化の影響を考察し、波長安定化、スペクトル狭帯化が必要であることを示した。
- 3) 結像特性の評価メトリックとして空間像コントラストを取り上げ、半導体デバイスパターンのマスクのように露光光の透過率が 100%または 0%の二値的に変化する場合について、照明条件（コヒーレンス・ファクタ： $\sigma$ ）、投影光学系の開口数（N.A.）、パターンピッチに対する振る舞いを理論的に考察した。その結果、照明条件（ $\sigma$ ）、投影光学系の開口数（N.A.）により、結像性能は大きく異なることを示した。
- 4) 結像特性の評価メトリックとして、現像後のレジストパターンのトップとボトム之比（ $T/B$ ）（縁減り値）に注目した。モデル式を導出し、縁減り値の理論値を算出し、空間像コントラストの理論値と比べることで、ほぼ 1:1 の関係があることを確認した。また、縁減り値の規格化空間周波数に対する変化について理論値と実験データがよい一致を見た。焦点誤差や露光量誤差の影響で縁減り値が大きく変化することも確認され、これらが縁減り値変化の主要因であることを実験データから確認した。更に、複数の照明条件（通常照明、輪帯照明、2つ目開口照明）で実験データを取得し、その特性を明らかにした。これらの知見は、第3章以降の結像バジェットの構築とその構成要素となる露光量制御についての研究のベースとなるものである。

縁減り値は SEM にて比較的簡単に計測できるし、近年では OCD（Optical Critical Dimension）計測（Scatterometry とも呼ぶ）でも計測できる。レジスト表面の線幅、レジスト底面の線幅だけでなく、レジスト膜厚や側壁角も計測出来る（独立なのは3パラメータ）が、各パラメータ値の許容範囲はレジスト特性により異なるため、システム設計自身は空間像ベースで進めることにする。

第2章の参考文献：

- [1] 鈴木一明, “パターン露光装置(I)”, ULSI 製造装置実用便覧 (サイエンス・フォーラム) , pp. 370-377 (1991).
- [2] F.A. Jenkins and H.E. White, Fundamentals of Optics 4th ed. (McGraw-Hill, New York, 1976), pp.60-77.
- [3] I. H. Malitson, “Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica”, J. Opt. Soc. Am., **55**, pp.1205-1209 (1965).
- [4] B. Edlén, “The Refractive Index of Air”, Metrologia, **2**, pp.71-80 (1966).
- [5] 鈴木一明, “エキシマレーザステッパ”, 電子材料 3 月号, pp.76-80 (1992).
- [6] M.Born and E.Wolf, Principles of Optics 4th ed. (Pergamon Press, London, 1970), pp.526-532.
- [7] E.C. Kintner, “Method for the calculation of partially coherent imagery”, Appl. Opt., **17**, pp. 2747-2753 (1978).
- [8] K.Suzuki, Y.Matsumoto and M.Murayama, “The Method of Measuring Optical Performance in KrF Excimer Lithography”, Jpn.J.Appl.Phys., **31**, pp.4167-4173 (1992). (申請論文1)

## 第3章 光リソグラフィ用露光装置のシステム設計

第2章で述べた光リソグラフィ用投影露光装置に関する知見、特に結像性能に関する知見を元に、本章では、ステップ&スキャン投影露光装置のシステム設計について説明する。ここで言うシステム設計は、1.6.1項で再確認した定義に従っており、1) 主要な仕様、機能の設定、2) 仕様、機能を実現するための要素技術の採用と組織化、3) 要素技術への要求性能の明確化、という3ステップから構成されている。そして、3ステップ目の要素技術への要求性能の明確化を進めるにあたり、システム設計手法として結像バジェットを導入する。

### 3.1 ステップ&スキャン投影露光装置開発時の主要仕様の設定 (ステップ1)

#### 3.1.1 ニーズ分析からのアプリオリな仕様設定

表1.1で紹介したNTRSロードマップの1997年版に挙げられている解像度が250 nm ハーフピッチに対応した露光機(1992年頃に露光機開発着手、1995年露光機導入、1997年デバイス量産開始)の仕様や機能について検討する。このロードマップでは必要なウエハ上の露光フィールドサイズは22 mm×22 mmになっており、1999年の180 nm ハーフピッチにて25 mm×32 mmに拡大されているが、1992年当時、著者および著者が所属しているニコン関係者による市場のニーズ分析からは250 nm ハーフピッチにて25 mm×33 mmが望ましいと考えた。マスクサイズは5インチ×5インチから6インチ×6インチへの拡大がステップ&リピート投影露光装置で開始されていたため、6インチ×6インチを採用することができたからである。マスク上のデバイスパターン領域は、マスク全面が使えるわけではなく、マスクの周辺部に位置する、電子ビーム露光機でのパターン描画時に固定用のメカ・チャックが覆う部分、マスクのアライメント・マーク領域、デバイスパターン周辺の遮光帯(余分な露光光が周辺部からパターン部に混入しないようにする)、などを除いた部分になる。その結果、投影光学系の倍率を1/4とし、マスク上で必要なパターン領域を100 mm×132 mmとした。ウエハサイズは、やはりステップ&リピート投影露光装置で使用が開始されていた径200 mmを採用した。次に要求される精度については、表1.1のNTRSロードマップ1997年版の250 nm ハーフピッチ(標準解像度)では、200 nm 孤立ラインに対して10%をとってエッチング後20 nm (3 $\sigma$ )の線幅精度、プロダクト・ウエハに対し標準解像度の約1/3にあたる85 nm (mean + 3 $\sigma$ )の重ね合わせ精度となっているが、1992年当時の著者ら

の検討では、レジスト像の計測にて、線幅精度として標準解像度の 10% ( $3\sigma$ ) (即ち 25 nm ( $3\sigma$ ))、重ね合わせ精度として標準解像度の 1/5 (即ち 50 nm (mean +  $3\sigma$ ))、と設定した。

### 3.1.2 ステップ&スキャン投影露光方式の採用

ここで、25 mm×33 mm の露光フィールドサイズを従来のステップ&リピート投影露光装置で実現する場合には、図 3.1 に示すように投影光学系の露光フィールド径は  $\phi 41$  mm (25 mm×33mm の対角線長) が必要になる。一方、投影光学系の露光フィールドからスリット状の長方形領域のみを使い、スリットの短手方向にマスクとウエハを同期走査させて露光するステップ&スキャン投影露光装置を採用した場合には、同じく図 3.1 に示すように投影光学系の露光フィールド径は約  $\phi 26$  mm で済む[1]。投影光学系に必要な硝材の量は、露光フィールド径の約 3 乗に比例するので、 $\phi 41$  mm を  $\phi 26$  mm にすることで、 $(26/41)^3 = 1/4$  となり、必要な硝材の量が約 1/4 になる。1992 年当時の合成石英の硝材価格は、当時の金の価格と同程度で 1 グラム当たり 1,500 円であった。 $\phi 26$  mm の時に必要な合成石英の硝材の重さを仮に 10 kg とし、 $\phi 41$  mm のそれを 40 kg とすると、必要な硝材費は、それぞれ 1,500 万円、6,000 万円になる。投影光学系が小型になることで、それを支える架台を含め、装置全体をコンパクトに出来るメリットも期待できる。一方、同期走査露光採用によるステージ、架台系の剛性強化設計、ステージ同期制御系の開発などが予想される。露光機開発の中・長期的視野に立ち、250 nm ハーフピッチ対応の露光装置が、ステップ&リピート投影露光装置からステップ&スキャン投影露光装置へのパラダイム・シフトの良いタイミングである、と判断するに至った。

### 3.1.3 スリット幅の決定

投影光学系の露光フィールドのスキャン方向幅をスリット幅と定義する。スリット幅は、ステップ&スキャン投影露光装置での最終性能の前面には現れて来ないが、システムを構築する上で基本的なパラメータである。

1.2 節で触れたが、ミラー・プロジェクション露光では、等倍反射光学系における収差の観点から円弧状スリット領域をスキャン露光した。また、図 1.2 に挙げた Micrascan と呼ばれる反射縮小投影スキャン方式も第 1 世代は収差の観点から円弧状スリット領域を採用していた[2]。ところが、屈折投影光学系を持ったステップ&スキ

ヤン投影露光装置ではそのような制約はない。ここで、スキャン露光において、ステージ走査が必要な長さは、ウエハ上の露光フィールド長+スリット幅になるため、スリット幅は細い方がウエハ露光処理速度の観点から有利であるが、それにはスリット幅に反比例して像面照度が大きくなること（そのような照明光学系の実現）が前提条件となる。

一方、エキシマレーザのようなエネルギーばらつきを持ったパルス光源を露光光源とする場合、露光量制御精度を維持するために必要な最小露光パルス数 ( $N_{\min}$ ) が存在する（第4章にて詳述）。1992年当時のスペクトル狭帯化 KrF エキシマレーザでは、発振周波数 ( $f$ ) が 500 pps (pulse per second)、最小露光パルス数  $N_{\min}$  は 50 パルスであった。よって、ウエハ上の1点の最小露光時間 ( $T_{\min}$ ) は、

$$T_{\min} = N_{\min} / f, \quad (3.1)$$

から 0.1 秒になる。一方、スキャン露光中のウエハステージの最大速度 ( $v_{\max}$ ) とスリット幅 ( $W$ ) から、最小露光時間 ( $T_{\min}$ ) は、

$$T_{\min} = W / v_{\max}, \quad (3.2)$$

で表されるので、(3.1)、(3.2)から、スリット幅 ( $W$ ) は、

$$W = v_{\max} T_{\min} = v_{\max} N_{\min} / f, \quad (3.3)$$

となる。想定されるスキャン露光中のウエハステージの最大速度 ( $v_{\max}$ ) は 80 mm/sec である。その結果、スリット幅 ( $W$ ) として 8 mm が得られ、必要な投影光学系の露光フィールド径は  $\phi 26.3$  mm (25 mm  $\times$  8 mm の対角線長) となる[3]。

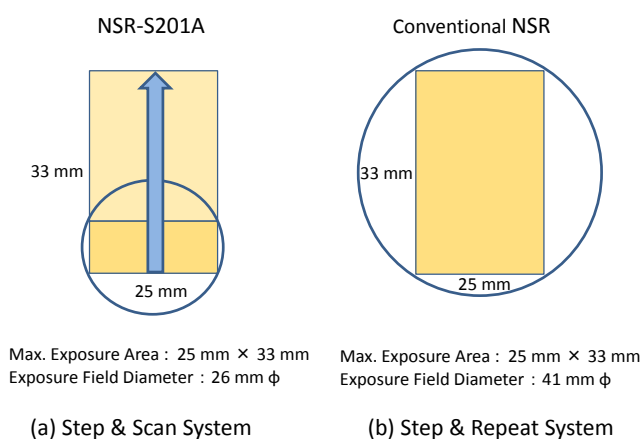


図 3.1; (a)ステップ&スキャン方式と(b)ステップ&リピート

方式の投影光学系の露光フィールドの比較

ステップ&スキャン方式である NSR-S201A の場合、同じ露光面積を得るのに必要な露光フィールド径は約 1/1.5 倍、必要な硝材量はその 3 乗の約 1/4 倍で済む。

## 3.2 ステップ&スキャン投影露光装置の要素技術の組織化（ステップ2）

### 3.2.1 静止露光とスキャン露光における要素性能の影響の違い

スキャン露光においては、マスクとウエハが投影倍率比を保ちながら時々刻々と変化してスリット状の照野の短手方向を横切ることで露光を完了する。そのため、スリット状照野を横切る時間（露光時間）内に空間像は重畳され、重畳空間像はスリット状照野を横切る時間（露光時間）内の空間像の形状ばらつきの影響を受けると共に、その重心が露光位置となる。ここで露光時間内変動を高周波、露光時間より長い周期の変動を低周波と呼ぶことにする。3.1.3項にて触れたように最小露光時間は0.1秒となるため、この場合には高周波と低周波の境目は10 Hzとなる。スキャン露光時に空間像がばらつく要因として、光軸に垂直な方向についてはマスク&ウエハステージの同期制御精度と投影光学系の異なる光路を通ることによるディストーションが、光軸方向についてはウエハのフォーカス・レベリング制御精度、投影光学系に異なる光路を通ることによる総合焦点差が挙げられ、露光時間の長短に応じてスキャン露光後の結像性能や重ね合わせ精度に影響することになる。また、スリット状照明領域をスキャン方向への積算後の照度均一性（非スキャン方向成分）が結像性能に影響し、ウエハステージの速度安定性がスキャン方向の照度均一性に影響する。これらをまとめたものが表3.1である。

第2章の図2.4にて、ステップ&リピート投影露光装置（静止露光）の主要性能と要素性能の関係を説明したが、ステップ&スキャン投影露光装置（スキャン露光）の場合には表3.1で示した内容に対応した変更が必要である。それを図3.2に示す。変更箇所は、要素性能の中でマスク&ウエハステージ系・位置計測系の一要素として「マスク&ウエハステージ同期制御精度」が追加され、主要性能の結像性能および重ね合わせ精度との間に太線が加わっていること、「ウエハステージ速度安定性」が追加され、主要性能の結像性能との間に太線が加わっていること、投影光学系の一要素であるディストーションから結像性能との間にも太線が加わっていることである。

ステップ&スキャン投影露光装置の特徴や、ステップ&リピート投影露光装置との特徴比較については、H. Swell が反射縮小投影装置にて触れ[4]、また M. van den Brink が投影レンズを用いたステップ&スキャン投影露光装置にて触れている[5]が、著者らの検討はそれらの発表に比べ先行していた。

### 3.2.2 システム・コンセプトとユニット構成

3.2.1項で述べたように、ステップ&スキャン投影露光装置を実現するためには、



ステップ&リピート投影露光装置に対して、マスク&ウエハステージ系、ウエハのオートフォーカス&レベリング系の改良が必要になる。更に、第4章で詳述する露光量制御系も改良が必要である。開発が必要な主なユニット技術は、

- 1) マスクステージ、ウエハステージの構成と制御
- 2) マスクステージとウエハステージの対応取りの方法
- 3) ウエハの高さ、傾斜センシングと補正制御
- 4) 露光量制御（第4章にて説明）
- 5) ブラインドの構成と制御

である。これらは開発スケジュールの観点からも実現可能と判断した。

まず、図 3.3 を用いて、ステップ&スキャン投影露光装置のシステム構成を説明する（この図中では「Mask」の代わりに「Reticle」を用いている）。この図において、装置の左右方向を X 方向、前後方向を Y 方向、上下方向を Z 方向としたとき、マスクステージ、ウエハステージのスキャン方向は Y 方向となっている。マスクステージ、ウエハステージともに、スキャン方向（Y 方向）のアクチュエータにはリニアモータを採用し、スキャン露光中の等速性を図っている。露光光は照明光学系により X 方向が長手、Y 方向が短手の長方形のスリット照明領域を形成しマスクを照明する。マスク上のパターンにて回折した露光光は投影レンズを介してウエハ上に結像することで投影露光される。マスク上のパターンとウエハ上での像の向きが 180 度逆なので、マスクステージとウエハステージが同期スキャンする時、正負逆向きになっている。

図 3.4 には、マスクステージ、ウエハステージの構成を示した（この図中では「Mask」の代わりに「Reticle」を用いている）。マスクステージは粗動（coarse）と微動（fine）の2段から成っていて、スキャン露光時に等速スキャンは粗動ステージで行うが、X, Y,  $\theta$  干渉計によるマスク微動ステージの位置計測結果に基づき、補正動作は質量が軽く応答性がよい微動ステージで行っている。マスク上の露光フィールドの長手の端の両外側に配されるマスクアライメントマーク位置（マスク上の照野の長手 100 mm + 遮光帯の外側で投影光学系の露光フィールドの最外周の内側に入る位置、およびウエハステージ上のフィデュシャルマーク板（後述）上に配されたマスク上のマークに対応した位置のマーク）を計測するマスクアライメント顕微鏡が両側から張り出している。ウエハステージには各軸に複数の干渉計用レーザビームが配されていて、X, Y 並進、回転、直交度を計測し、補正ができるようになっている。投影光学系の前方にはウエハアライメント顕微鏡があり、2.1 節や表 2.1 で触れたように、He-Ne レーザを光源したもの、白色

光源を用いたものが組み込まれている。ウエハステージの左奥にはフィデュシャルマーク板が設置され、マスクアライメントマークとウエハアライメントマークの位置をマスクアライメント顕微鏡、ウエハアライメント顕微鏡にて同時に計測できるようにマークが配されている（後述の図 3.6 にて詳しく説明）。同時計測の実現により、マスクの位置（露光フィールドの位置）とウエハアライメント顕微鏡の計測ビームの位置の差（ベースライン）を、干渉計光路の空気揺らぎが影響しない形で再現性よく計測することができる。

図 3.5 には、スキャン露光時のステージ同期制御のブロック図を示した（この図中では「Mask」の代わりに「Reticle」を用いている）。スキャン露光に必要な速度プロファイルによりウエハステージとその4倍の速度でマスク粗動ステージが制御される。干渉計で計測されたマスク微動ステージの位置が 1/4 にされ、ウエハステージ位置との差が同期制御誤差としてマスク微動ステージの位置にフィードバックされ、位置補正に必要な速度が微動ステージに与えられる。

図 3.6 は、フィデュシャルマーク（図 3.4 にて前述）を用いたマスクアライメント顕微鏡によるマスク位置のウエハステージ干渉計による計測、それと同時に行われるフィデュシャルマーク板上のウエハアライメントマークのウエハアライメント顕微鏡による計測を、マスクのスキャン方向（Y 方向）に沿った複数点で行う様子を示したものである（この図中では「Mask」の代わりに「Reticle」を用いている）。まず、前者のマスクアライメント顕微鏡による多点の計測結果から、マスク設置位置の誤差（並進、回転）、マスクステージとウエハステージのスキャン方向のずれ誤差（直交度）、X 方向、Y 方向のスケージングの校正ができ、ウエハ上の露光フィールドの歪（ディストーション）の線形成分が補正される。また、後者のウエハアライメント顕微鏡の計測ビーム位置と露光フィールドの位置の差の計測（ベースライン計測）をスキャン方向に沿った多点で行うことにより計測再現性が向上し、より正確なベースライン値を使って重ね合わせ露光を行うことができる。

図 3.7 は多点のウエハ高さセンサを用いたフォーカス、レベリング制御を示す図である。ニコンが採用している高さセンサは、レジストを感光させない波長域（600 nm より長波長域）でブロードバンドの照明光を使ってウエハ面への入射角を 80° 近辺に大きく取ること常態にレジスト表面を検出するようにしている。ウエハ上の照明形状はスリット状で斜め 45° になっていてウエハ上のデバイスパターンによる検出誤差の影響を抑えている。このような高さセンサのビームが、ウエハ上のスリット状の照野に沿

って3列並んでいる。また、これに平行して、同様のビーム列がスキャン方向前後にも配されている。ウエハ上のスリット照野内に検出点がある3列の高さセンサのビーム群により露光域のウエハ面の高さ<sub>と</sub>傾き情報が得られ、これを投影光学系の結像面に合わせるためにウエハテーブルの3か所のZ方向アクチュエータが制御される。また、スキャン露光における制御の応答性向上のため、ウエハ上のスリット照野外に<sub>一</sub>列ずつ配された高さセンサのビーム群は「先読みセンサ群」であり、露光箇所のウエハ面のZ方向の情報をスリット照明領域に入る前に検知して上記Z方向アクチュエータの制御にフィード・フォワードをかけて制御応答を高めている。この図のようにウエハが紙面の上から下に向かってスキャン露光する場合には一番上の列のセンサ群が先読みを行う。また、ウエハが下から上に向かってスキャン露光する場合には、一番下の列のセンサ群が先読みを行う。

最後にステップ&スキャン投影露光装置におけるブラインド機能について触れる。マスク上のパターンは1つのデバイスに対応したものと<sub>は</sub>限らず、パターン領域をA領域、B領域の2つにわけ、それぞれ別々に露光を行う場合もある。その場合に片方を遮光して露光するためにブラインド機能がある。ステップ&リピート投影露光装置において、このようなブラインド機能は古くはマスク・パターン近辺に配されたが、マスク上のパターン領域のまわりの遮光帯の幅をブラインドの半影の幅より大きく取る必要があった。そのため、照明光学系内にマスクのパターンと共役な面を作り、そこにブラインドを配して細い遮光帯幅を実現する、結像式ブラインド機能が登場していた。ステップ&スキャン投影露光装置の場合、この照明光学系内のマスク・パターン面に対する共役面にはスリット状の視野絞りを配する必要がある。ブラインド機能をステップ&スキャン露光装置に導入する場合、前者のマスク・パターン近辺に配する場合にはマスクステージの重量が増加しステージ応答性が悪くなるが、スキャン露光中にブラインドはマスクステージ上で静止していればいい。一方、結像式ブラインドを採用する場合には、まず視野絞りと<sub>の</sub>スペース干渉を避ける設計が必要なこと、更にブラインドの前羽根は露光開始時にスリット状の照野に入ってくる側の遮光帯に同期して移動し、後ろ羽根は露光終了時にスリット状照野から出て行く側の遮光帯に同期して移動するという複雑な機構系と制御系が必要になる。その様子を図示したものが図3.8である。結論としては、マスクステージの応答性確保と細い遮光帯幅が可能な結像式ブラインドを採用し、スリット状の視野絞りの方は共役面から故意に少しずらした配置とすることで露光量制御精度を確保するという著者の発明を採用した[6]。(第4章で詳述する。)

表 3.1; スキャン露光特有の主要性能と要素性能の関係

ステップ&リピート(静止露光)		ステップ&スキャン(スキャン露光)	
主要性能	要素性能	主要性能	要素性能
結像性能	フォーカス・レベリング制御精度	結像性能	ウエハステージ速度安定性 (スキャン方向照度均一性)
		結像性能	フォーカス・レベリング制御精度 (高周波) (Z振動)
結像性能	照明光学系 照度均一性	結像性能	フォーカス・レベリング制御精度 (低周波) (ダイナミック像面湾曲)
		重ね合わせ精度	マスク&ウエハステージ同期精度 (高周波) (XY振動)
重ね合わせ精度	投影光学系 総合焦点差(非点収差、像面湾曲)	重ね合わせ精度	マスク&ウエハステージ同期精度 (低周波) (デイスーション)
		結像性能	スキャン方向積算後の非スキャン方向照度均一性
重ね合わせ精度	投影光学系 ディストーション	結像性能	スキャン方向重畳時焦点ばらつき (高周波) (Z振動)
		重ね合わせ精度	スキャン方向重畳時焦点平均値 (低周波) (総合焦点差)
重ね合わせ精度	投影光学系 ディストーション	結像性能	スキャン方向重畳時デイスーションばらつき (高周波) (XY振動)
		重ね合わせ精度	スキャン方向重畳時デイスーション平均値 (低周波)

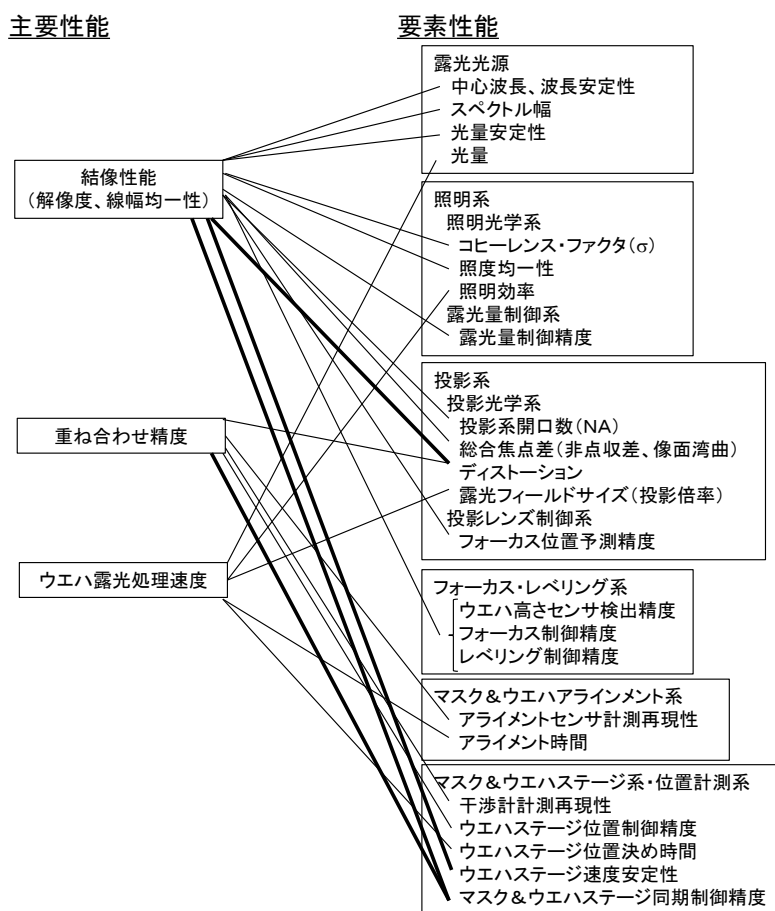


図 3.2; ステップ&スキャン投影露光装置の主要性能と要素性能の関係

ステップ&リピート投影露光装置の場合 (図 2.4) に比べ、太線部分が追加される。

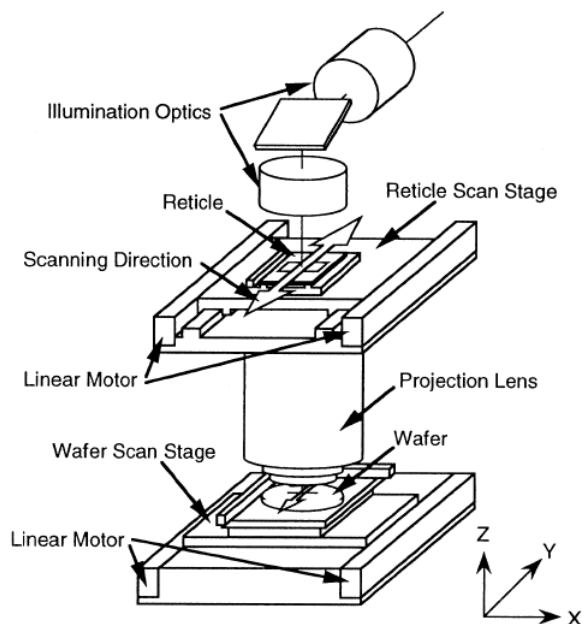


図 3.3; ステップ&スキャン型投影露光装置のシステム構成図 [3]  
 マスク（レチクル）とウエハは投影倍率比で Y 方向の逆方向に同期スキャンされることで、走査露光が実現する。

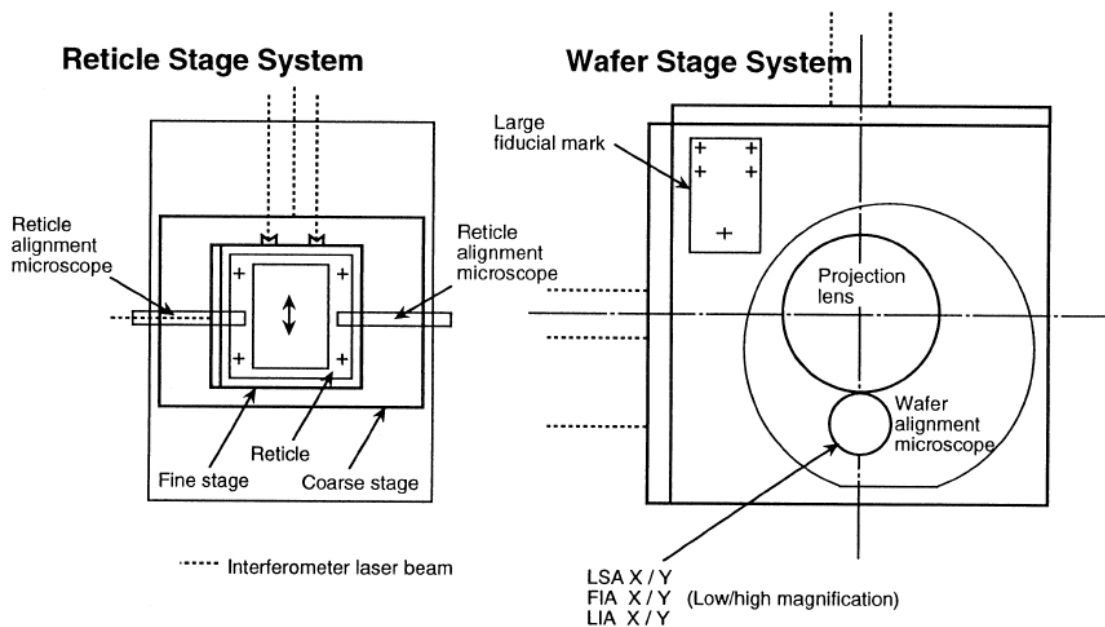


図 3.4; ステップ&スキャン型投影露光装置のマスク&ウエハステージ・システム図 [3]  
 マスク（レチクル）ステージは粗動ステージと制御性に優れた微動ステージから成る。

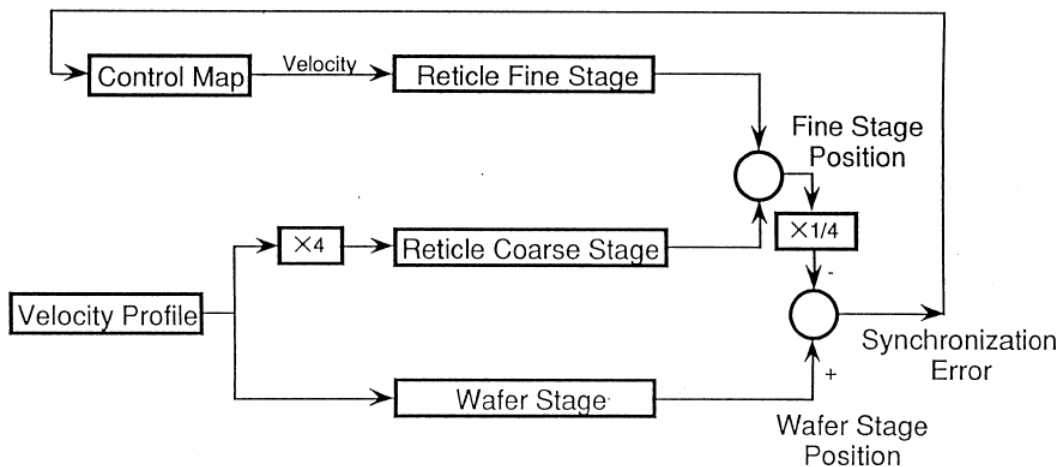


図 3.5: スキャン露光時のステージ同期制御のブロック図 [3]

マスク（レチクル）微動ステージとウエハステージの位置誤差をフィードバック制御。

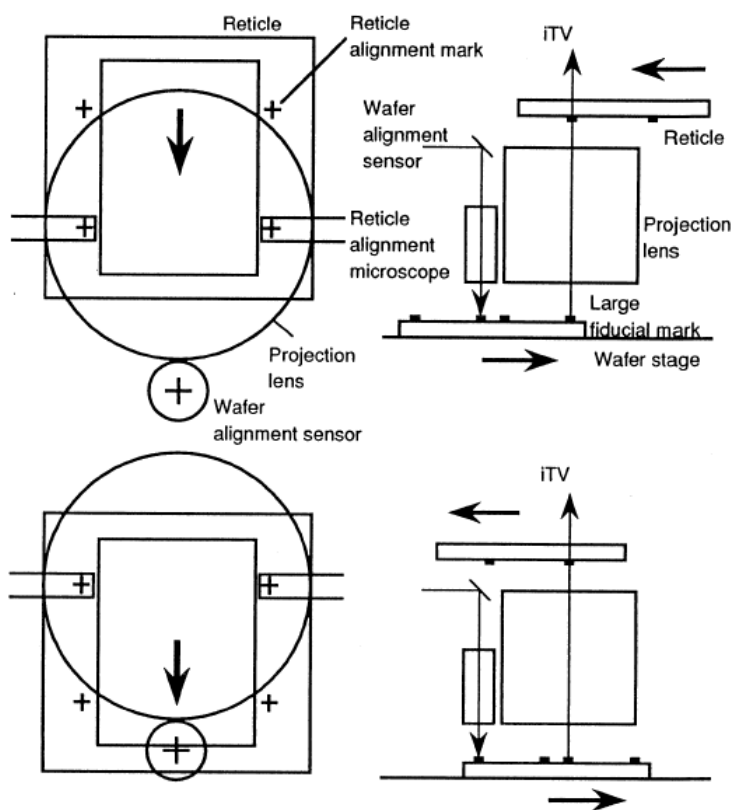


図 3.6: 多点マスク位置計測、同時ベースライン計測のコンセプト図 [3]

ステージスキャン方向の複数位置にて、露光フィールドの位置とウエハアライメントビームの同時位置計測が行われる。

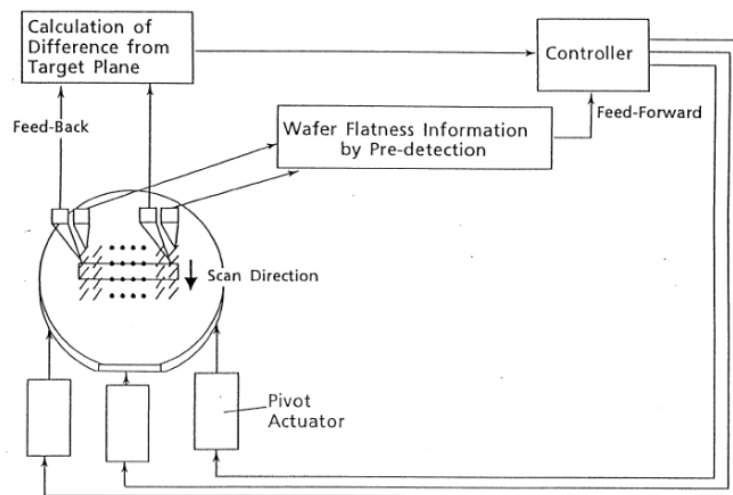


図 3.7; 多点高さセンサのコンセプト図 [3]

多点の高さセンサを備え、露光前にウエハ面の高さと傾きを計測してフィードフォワード制御すると共に、露光領域内のセンサでの計測結果からフィードバック制御を行う。

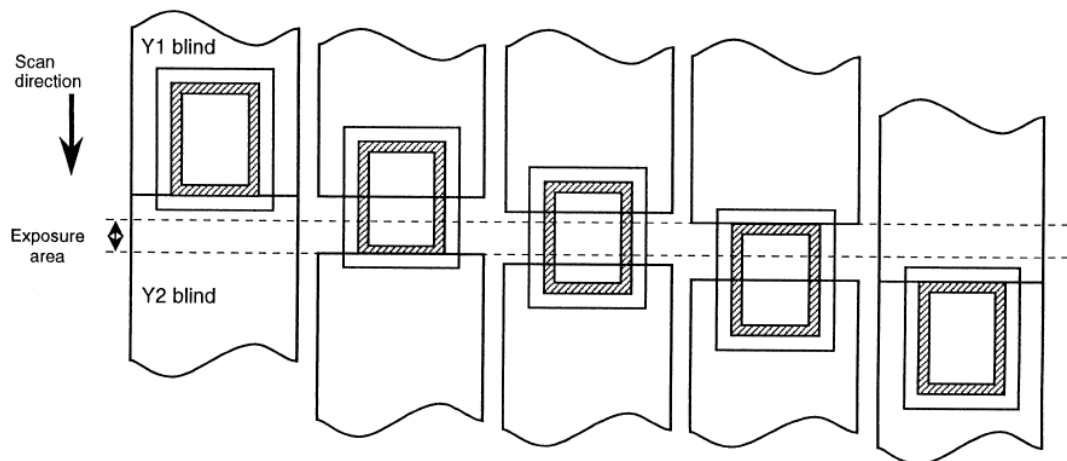


図 3.8; スキャン露光でのブラインドの同期スキャン動作 [3]

マスクの遮光帯（斜線部）に同期してブラインドの前羽、後ろ羽が同期制御されることで、遮光帯幅を細くすることができる。

### 3.3 結像バジェットによるシステム設計手法（ステップ3）

250 nm ハーフピッチ対応のステップ&スキャン投影露光装置における結像性能は、3.1.1 項に記したように、標準解像度 250 nm、線幅制御精度 10% ( $3\sigma$ ) (25 nm ( $3\sigma$ )) とした。これを実現するために必要な結像条件を明確化し、関連する要素技術に要求される精度について考察する。

#### 3.3.1 投影光学系の開口数 (N.A.) と照明条件 ( $\sigma$ ) の最適化 (光学系への要求)

第2章で述べたように投影光学系の開口数(N.A.)と照明系のコヒーレンス・ファクタ ( $\sigma$ ) は空間像の形状を決める基本的なパラメータである。また、露光量誤差、焦点誤差が空間像の強度や形状を変え、縁減り値に影響することを述べた。今、レジスト像の底面の線幅を線幅制御精度を論じる際の対象とすると、図 2.16 にてレジストが現像後に抜けきる露光量 ( $E_{TH}$ ) にて空間像をスライスした長さ  $L_B$  がレジスト像の線幅と言えることになる。そこでライン&スペースパターンの空間像にて、所望の線幅が得られる空間像強度を  $I_{optimum}$  とおくと、デフォーカスや露光量が変わり空間像の形状が変化すると  $I_{optimum}$  でスライスした線幅  $L_B$  も変化することになる。今、縦軸をデフォーカス量、横軸を露光量として、線幅制御精度の最小と最大をそれぞれ  $-10\%$ 、 $+10\%$  とおいて、それらを与えるデフォーカスと露光量をプロットしていくと一つの領域が囲まれる。同じことを孤立ライン、孤立スペースに計算しプロットし、それぞれの囲まれた領域を得る。そして3領域の共通領域を求める。ここで、許容露光量精度 (例えば  $\pm 5\%$ ) を横軸方向に指定すると、得られた共通領域にて許容されるデフォーカス量が縦軸方向に求まる (これを E-D ダイアグラムと呼ぶ[7])。この許容デフォーカス量の2倍が投影光学系の開口数 (N.A.) と照明系のコヒーレンス・ファクタ ( $\sigma$ ) が与えられた時の焦点深度の値になる。

今、250 nm ライン&スペース、250 nm 孤立ラインおよび 250 nm 孤立スペースの空間像から求めた線幅が 250 nm に対して線幅制御精度  $\pm 10\%$  に同時に入るための共通焦点深度の等高線マップを露光量均一性が  $\pm 3\%$ 、 $\pm 5\%$  の2つの場合について求めたものが図 3.9 である。等高線の数値は  $\mu\text{m}$  単位であり、等高線ピッチは  $0.05 \mu\text{m}$  となっている。露光量均一性がどちらの場合も、投影光学系の開口数 (N.A.) が  $0.45 \sim 0.60$ 、照明系のコヒーレンス・ファクタ ( $\sigma$ ) が  $0.75$  近辺にて共通焦点深度が大きい。そこで、様々なパターンにも対応するため、投影光学系の最大開口数 (N.A.) を  $0.60$  とし、 $0.40 \sim 0.60$  で可変 (光彩絞り) にすることにした。また、照明系のコヒーレンス・ファ



クタ ( $\sigma$ ) の最大値 (最大 N.A. に対して) を 0.75 とし、0.30~0.75 で選択可能 (照明系内の  $\sigma$  絞りの切り替え) にすることとした。最大開口数 0.60、最大コヒーレンス・ファクタ 0.75 にて得られる焦点深度は、露光量均一性が  $\pm 3\%$  の時には 850 nm、露光量均一性が  $\pm 5\%$  の時には 800 nm 程度である。

### 3.3.2 許容振動量の設定 (機構系、制御系への要求)

振動の空間像に与える影響については、A. W. Lohmann 等の 1965 年の研究報告がある [8]。ここでは、光軸に対し垂直方向 (transversal) の振動に対し、光軸方向 (longitudinal) の振動は像劣化に対する効きが弱いことが示されている。そしてリソグラフィの観点からは、B. J. Lin により transversal な振動の空間像に対する影響が初めて議論された [9]。著者は、この知見を 250 nm ハーフピッチ用ステップ&スキャン型投影露光装置に適用、拡張した。露光中のマスクステージとウエハステージの同期精度は XY 平面内の振動で transversal な振動、露光中のフォーカス&レベリングの制御誤差は Z 方向の振動で longitudinal な振動と言えるからである。ここで、投影光学系の開口数 (N.A.) が 0.60、照明系のコヒーレンス・ファクタ ( $\sigma$ ) が 0.75 の条件の下、X,Y 平面内の振動、Z 方向の振動の、250 nm ライン&スペース・パターンの空間像コントラストに与える影響のシミュレーションを実施し、その結果を図 3.10 に示した。振動による位置ずれの頻度分布を三角形分布と仮定して、空間像を三角形分布で畳み込んで振動による重畳像を求めている。尚、第 5 章で紹介するように製品での実測データは概略三角形分布を示しており、仮定の妥当性が確認されている。各グラフにおいて縦軸が空間像コントラスト、横軸が三角形分布の像振動の Root Mean Square (RMS) で標準偏差 ( $1\sigma$ ) に対応している。曲線のパラメータはデフォーカス量であり、ベストフォーカスおよびデフォーカス量 100 nm~500 nm (100 nm ピッチ) について求めている。今、振動による 250 nm ライン&スペース・パターンのコントラスト劣化の許容量を XY 振動では  $-2.5\%$ 、Z 振動では  $-0.5\%$  と設定すると、それに対応する XY 振動の許容量として 25 nm ( $1\sigma$ )、Z 振動の許容量として 60 nm ( $1\sigma$ ) が得られる。これらの振動量を限界解像度近辺の 200 nm ライン&スペースのパターンに対し与えると、そのコントラスト劣化は XY 振動で  $-3\%$ 、Z 振動で  $-1\%$  程度と予想され、振動がほとんどない静止露光での限界解像度との差は顕著には現れないと期待できる。

### 3.3.3 結像バジェット

第2章の図2.4において、ステップ&リピート投影露光装置の主要性能と要素性能の関係を示したが、ステップ&スキャン投影露光装置では、3.2.1項にて表3.1や図3.2を用いて説明したように、要素性能としてマスク&ウエハステージ系の同期制御精度が加わり、主要性能のひとつである結像性能と結び付けられる。

結像性能のうち、投影系開口数 (N.A.) と照明系のコヒーレンス・ファクタ ( $\sigma$ ) については、3.3.1項にて述べたように、図3.9の焦点深度マップから、それぞれ最大0.60、最大0.75に決定し、期待できる焦点深度は、(N.A.,  $\sigma$ ) = (0.60, 0.75) の時、850 nm (露光量均一性 $\pm 3\%$ 時) または 800 nm (露光量均一性 $\pm 5\%$ 時) であった。精度を達成する上では、露光量の方にやや余裕があるため、精度バジェット作成では前者を採用することとする。次に、限界解像度の観点から3.3.2項にて200 nm ライン&スペースに対する振動許容量をXY振動で25 nm ( $1\sigma$ )、Z振動で60 nm ( $1\sigma$ )に設定した。ここで、実際の線幅制御に許容されるフォーカス誤差、露光量誤差を設定する際、マスク・パターンの持つ線幅誤差や、上記の振動による許容量の目減り分を考慮する必要がある。その結果、露光量制御精度 2.5% ( $3\sigma$ )、フォーカス誤差 730 nm (オフセット $+3\sigma$ ) を結像バジェット上の総合誤差として設定することにした。

表3.2に、著者が作成した250 nm ハーフピッチ対応のステップ&スキャン投影露光装置の結像バジェット表を示す。結像バジェットは、限界解像度 (200 nm) の劣化を防ぐ限界解像度バジェット、標準解像度 (250 nm) での線幅制御精度を維持するための線幅制御精度バジェットから成っている。

まず、限界解像度バジェットについて説明する。投影光学系収差 (球面収差、コマ収差、色収差、等) は投影像の点像ぼけとなるが、設計上十分小さく抑えられており、コントラスト低下は $-3\%$ 以下である。そこにステップ&スキャン露光時の振動が加わってコントラスト低下が誘発される。XY振動の許容値25 nm ( $1\sigma$ ) の影響によるコントラスト低下 $-3\%$ 、Z振動の許容値60 nm ( $1\sigma$ )の影響によるコントラスト低下 $-1\%$ を合成すると、振動による許容コントラスト低下は $-3.2\%$ となる。ここでXY振動25 nm ( $1\sigma$ )はマスク&ウエハステージの追従性22 nm ( $1\sigma$ )と投影光学系のディストーションの平均化10 nm ( $1\sigma$ )という2つの個別要因に分解される。また、Z振動60 nm ( $1\sigma$ )はフォーカス・レベリングの追従性50 nm ( $1\sigma$ )と、投影光学系の像面湾曲の平均化25 nm ( $1\sigma$ )という2つの個別要因に分解される。

次に、線幅制御バジェットについて説明する。まず、電子ビーム直接描画装置によ

るマスク・パターン寸法精度をマスク上で 60 nm ( $3\sigma$ )とすると、投影倍率が $\times 1/4$ であることから、ウエハ上で 15 nm ( $3\sigma$ )となる。次に、この結像バジェットの表の説明に入る直前に述べたように、上記振動がある条件下では、許容される露光量誤差は 2.5% ( $3\sigma$ )、フォーカス誤差は 730 nm (offset +  $3\sigma$ )である。露光量、フォーカス、振動など露光装置に関係した要因の線幅制御精度への影響は 20 nm ( $3\sigma$ )を許容値とし、マスク・パターン寸法精度と合わせた総合性能として、標準解像度 250 nm の 10%にあたる 25 nm ( $3\sigma$ )を達成可能とする。フォーカス誤差は、オフセットとして効く要因としてフォーカス・レベリング面設定精度 50 nm、投影光学系の総合焦点差 100 nm、デバイス段差 400 nm とし、再現性の中でばらつきを持って効く要因として非スキャン方向のウエハおよびホルダの平坦度 100 nm ( $3\sigma$ )、フォーカス制御精度 100 nm ( $3\sigma$ )、レベリング制御精度 100 nm ( $3\sigma$ )、フォーカス位置予測精度 50 nm ( $3\sigma$ )とした。デバイス段差 400 nm はデバイスのトポグラフィとしてユーザーの取り分となっているが、許容フォーカス誤差の半分以上を占めてしまい、非常に大きな値である（その後、数年を経て、Chemical Mechanical Polishing (CMP) などを用いた平坦化プロセスが採用され、焦点深度のうち大きな部分をデバイス段差が占めてしまうような状況は改善されている）。各々の要素の誤差がこの数値内に収まるように各要素設計を進めることになる。次に、露光量誤差については、主にダイナミック照度均一性 (2% ( $3\sigma$ )) が主要因であるが、スキャン方向の露光量制御精度と非スキャン方向の照度均一性に分解される。前者についての制御方法の詳細については第 4 章で述べる。また、後者はスタティックな照明均一性をスキャン方向に平均化したものであり、照明光学系起因のものである。前者、後者ともに 1% ( $3\sigma$ )ずつに配分しておくことが妥当である。その他、露光量の目標値精度を 0.5% ( $3\sigma$ ) とし、レジスト膜厚ムラの影響は無視できるとした。

以上のように、結像バジェットを組むことにより、各要素技術に必要とされる性能が明らかにされ、光学設計、機械設計、電気・制御設計、ソフトウェア設計、など、後続の各種設計を連携させることができるようになった。

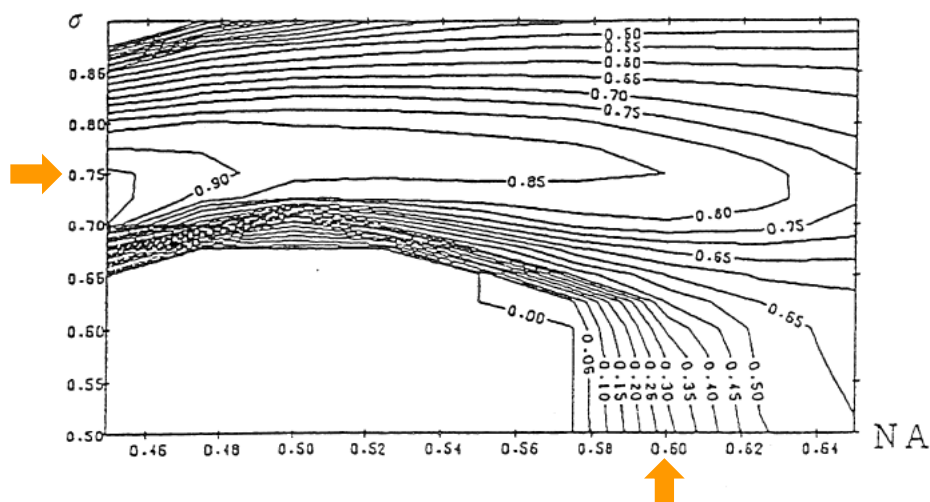
### 3.3.4 結像性能に関するシステム設計手法のまとめ

- 1) 標準解像度 250 nm のパターンの露光において最適な投影光学系の開口数 (N.A.) と照明光学系のコヒーレンス・ファクタ ( $\sigma$ ) を考察することで、未定だった結像性能に関する装置の主要仕様の数値を決定することができた。
- 2) ステップ&スキャン投影露光装置に特有なスキャン露光中の振動について、標

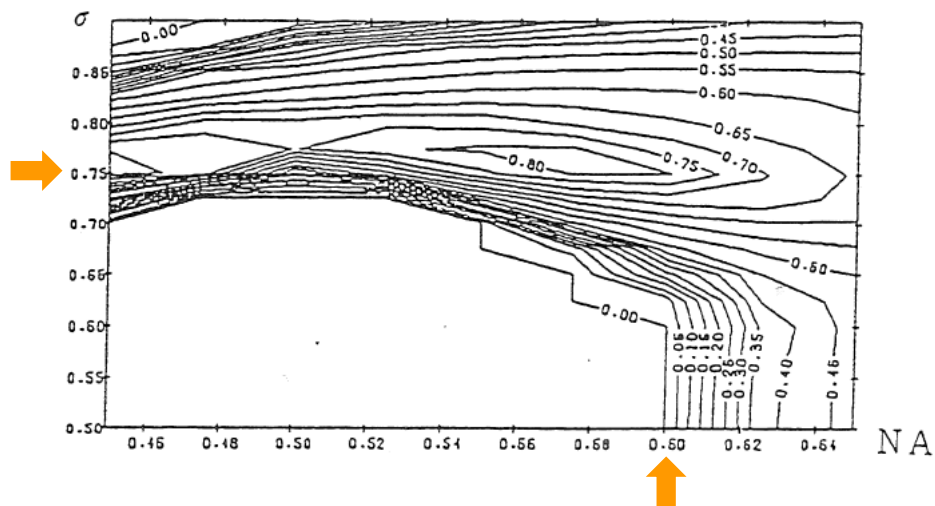
準解像度、限界解像度での空間像コントラストの劣化が顕著に現れないレベルになるよう、許容量を設定した。

- 3) 限界解像度バジェットと線幅制御精度バジェットからなる結像バジェットを考案した。限界解像度バジェットは、上記の許容振動量を規定するものである。一方、線幅制御精度バジェットは、標準解像度にて要求される線幅均一性を実現するためのものあり、限界解像度バジェットで設定された許容振動誤差の条件下、露光量誤差バジェットとフォーカス誤差バジェットから構成されている。露光量誤差とフォーカス誤差は更に個別要因に分解され、各々の個別要因に要求される精度を明らかにした。

表 3.3 に 250 nm ハーフピッチ対応のステップ&スキャン投影露光装置の主要仕様の表を示す。一番右の欄に、各要素仕様の決定段階が 1.6.1 項で定義を再確認したシステム設計の各段階(1), (2), (3)のどれに該当するかを示した。多くの仕様が(1)のニーズ分析の段階と(3)の要素性能明確化の段階で決定されている。(2)の要素技術組織化の段階で決定されるのは、方式の選択や、サプライヤから供給される要素技術の主要仕様に関するものである。



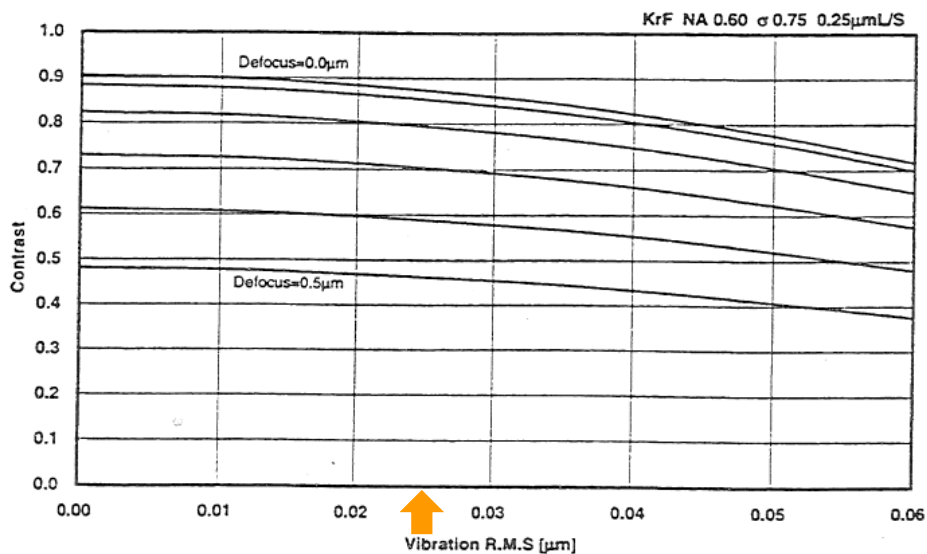
(a) Dosage tolerance  $\pm 3\%$



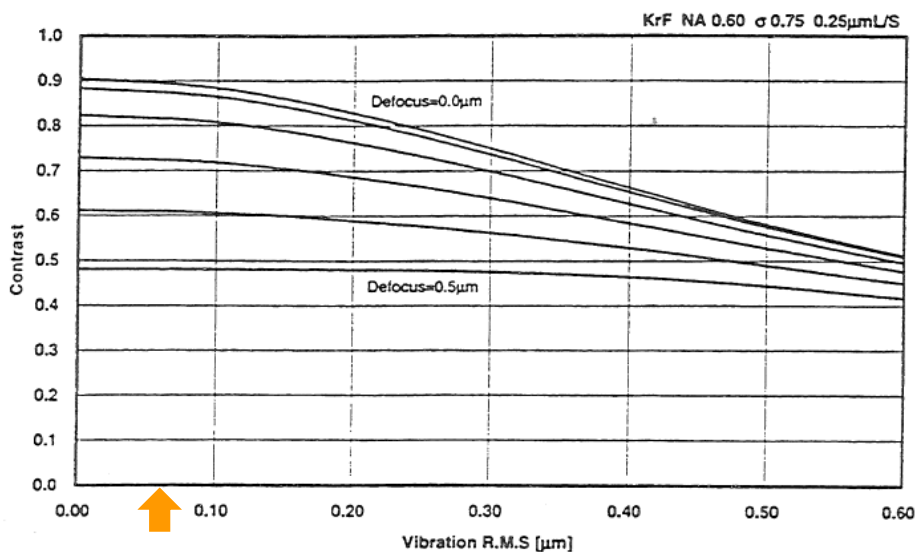
(b) Dosage tolerance  $\pm 5\%$

図 3.9; 開口数 N.A., 照明系  $\sigma$  に対する 250 nm パターン(ライン&スペース、孤立ライン、孤立スペース)が線幅精度 10%を満たす共通焦点深度の等高線マップ (等高線の数値の単位は  $\mu\text{m}$ 、等高線の間隔は  $0.05 \mu\text{m}$ ) (波長 248 nm)  
 (a) 許容露光量誤差  $\pm 3\%$ 、(b) 許容露光量誤差  $\pm 5\%$  [1,2]

最大開口数 0.60、最大照明系  $\sigma$  0.75 に決定。許容露光量誤差  $\pm 3\%$  を採用すると、共通焦点深度 850 nm 程度が期待できる。



(b) Transversal vibration (XY)



(a) Longitudinal vibration (Z)

図 3.10; 250 nm ライン&スペースにおける三角形頻度分布振動とコントラストの関係 (波長 248 nm、投影系開口数 0.60、照明系コヒーレンス・ファクタ 0.75) [2]

許容 XY 振動を 25 nm、許容 Z 振動を 60 nm に設定。ベストフォーカスにおける 250 nm ライン&スペース・パターンのコントラスト低下量は、それぞれ -2.5%、-0.5%程度である。(200 nm ライン&スペース・パターンに対しては、それぞれ -3%、-1%程度と予想)

表 3.2: ステップ&スキャン投影露光装置の結像バジェット

結像バジェットは、限界解像度バジェット、線幅制御精度バジェットから構成される。

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 ( $\sigma$ )	マスク&ウエハステージ追従性	22 nm ( $\sigma$ )
		ディストーション平均化	10 nm ( $\sigma$ )
	Z振動 60 nm ( $\sigma$ )	スキャン方向フォーカス・レベリング追従性	50 nm ( $\sigma$ )
スキャン方向像面平均化		25 nm ( $\sigma$ )	
線幅制御精度 (250 nm) $\Delta L=25$ nm ( $3\sigma$ )	フォーカス誤差 730 nm (offset + $3\sigma$ )	非スキャン方向ウエハ&ホルダ平坦度	100 nm ( $3\sigma$ )
		フォーカス制御精度	100 nm ( $3\sigma$ )
		レベリング制御精度	100 nm ( $3\sigma$ )
		フォーカス位置予測精度	50 nm ( $3\sigma$ )
		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)
		デバイス段差	400 nm (offset)
	露光量誤差 2.5 % ( $3\sigma$ )	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	2 % ( $3\sigma$ )
		露光量目標値精度	0.5 % ( $3\sigma$ )
		レジスト膜厚ムラ	0 % ( $3\sigma$ )
	マスク・パターン寸法精度	$\Delta L=15$ nm ( $3\sigma$ )	

注 1) 限界解像度バジェットは限界解像度でのコントラスト劣化を抑えるためのもので、もとの投影光学系の収差によるコントラスト劣化 ( $-3\%$ 以下) に対し、XY 振動によるコントラスト劣化の追加分を  $-3\%$ 、フォーカス振動によるコントラスト劣化の追加分を  $-1\%$  に設定した。これに対応した許容振動量が図 3.10 の説明で述べた XY 振動 25 nm ( $\sigma$ )、Z 振動 60 nm ( $\sigma$ ) である。振動量の計測データは rms (Root Mean Square;  $1\sigma$  に相当) 値で評価されることが多いため、 $1\sigma$  の値で規定する。

注 2) 線幅制御精度バジェットでは、所望の線幅制御精度 10% ( $3\sigma$ ) を、露光装置要因分 8% ( $3\sigma$ )、マスク・パターンの寸法精度分 6% ( $3\sigma$ ) に分解した。露光装置要因分については、限界解像度バジェットで定めた XY 振動、Z 振動の許容値の条件下、フォーカス誤差と露光量誤差の許容値を定め、更に個別要因毎に許容値を分解した。

表 3.3; ステップ&スキャン投影露光装置の主要仕様

	仕様項目	仕様値	仕様決定段階 (1)ニーズ分析 (2)要素技術組織化 (3)要素性能明確化
結像系 (投影系、照明系)	露光光源波長	248 nm (KrFエキシマレーザ)	(1)
	標準解像度	250 nm	(1)
	線幅制御精度	±10% (250 nmパターン)	(1)
	開口数 (N.A.)	0.40 ~ 0.60	(3)
	コヒーレンスファクタ( $\sigma$ )	0.30 ~ 0.75 (最大N.A.にて)	(3)
	投影倍率	× 1/4	(1)
	露光フィールドサイズ	25 mm × 33 mm	(1)
	マスクサイズ	6 インチ × 6 インチ	(1)
	像面パワー(最大N.A.時)	370 mW/cm <sup>2</sup>	(3)
	ダイナミック照度均一性 (露光量再現性含む)	±2.0% (0.5 mJ/cm <sup>2</sup> ~)	(3)
	露光量設定範囲	0.1 mJ/cm <sup>2</sup> ~	(1)
アライメント系	重ね合わせ精度	≤ 50 nm ( x +3 $\sigma$ )	(1)
	アライメント・センサ	LSA FIA LIA (オプション)	(2)
	方式	オフアクシス	(2)
処理速度	スループット(40 mJ/cm <sup>2</sup> )	60 wafers/hour	(3)
	ウエハサイズ	Φ 200 mm	(1)
エキシマレーザ	発振出力	≥ 6 W	(2)
	発振周波数	500 pps または 600 pps	(2)
	スペクトル幅(FWHM)	≤ 0.8 pm	(3)
	波長安定性	± 0.1 pm	(3)
	パルスエネルギー安定性	7% (3 $\sigma$ )	(3)



### 3.4 第3章のまとめ

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への移行は投影露光装置にとって大きなパラダイム・シフトであった。その背景は、露光フィールドサイズ拡大に伴う投影光学系の肥大化からの回避であった。

ステップ&スキャン投影露光装置のシステム設計においては、1.6.1 項で再確認した本博士論文でのシステム設計の定義に沿って、

- 1) ニーズ分析によりアプライオリに決定できる主要仕様の決定、ステップ&スキャン投影露光方式の採用、
  - 2) ステップ&スキャン投影露光装置に必要な新しい要素技術（ステージ同期制御、スキャン対応フォーカス&レベリング制御、露光量制御、など）の考案、
  - 3) 250 nm ハーフピッチに対する (N.A.,  $\sigma$ ) 最適化と振動の影響評価、結像バジェット作成による各要素技術への要求精度の明確化、要素技術の組み合わせで達成できる性能の見極め、
- を行った。

ここで、結像バジェットとは、焦点深度減少に伴って考慮され始めてい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（例えば露光線幅の 10% ( $3\sigma$ ) 以内）を達成し、限界解像度（例えば振動による像コントラスト劣化 3.2%以下）を維持するためのバジェットから成っている。第2章で説明したものと同様な光学結像理論によるシミュレーションを用いて、許容されるフォーカス誤差、露光量誤差、および許容振動量を規定した。次に、誤差発生の要因分解をし、各要因への要求精度を明確化した。従来は、要素誤差の積み上げというボトムアップで最終性能が決まっていたが、結像バジェットによるシステム設計手法により、結像性能の要求仕様にに基づき、それを達成するための各要素精度の仕様がトップダウンで決められるようになった。

第3章の参考文献：

- [1] 鈴木一明, “256MDRAM 量産対応スキャン形エキシマレーザーステップ  
「NSR-S201A」”, 電子材料 3 月号, pp.107-111 (1995).
- [2] J.D. Buckley and C. Karatzas, “Step and scan: A system overview of a new  
lithography tool”, *Proc. of SPIE*, **1088**, pp.424-433 (1989).
- [3] K.Suzuki, S.Wakamoto and K.Nishi, “KrF step and scan exposure system using higher  
N.A. projection lens”, *Proc. of SPIE*, **2726**, pp.767-779 (1996).
- [4] H. Swell, “Step and Scan: the maturing technology”, *Proc. of SPIE*, **2440**, pp.49-60  
(1995).
- [5] M. van den Brink, et al., “STEP-AND-SCAN AND STEP-AND-REPEAT, a technology  
comparison”, *Proc. of SPIE*, **2726**, pp.734-753 (1996).
- [6] 鈴木一明, “露光装置” (1993 年 9 月 21 日出願), 日本特許第 3377053 号, (2002).
- [7] B.J. Lin, “The Paths to Subhalf-Micrometer Optical Lithography”, *Proc. of SPIE*, **922**,  
pp.256-269 (1988).
- [8] A.W. Lohmann and D.P.Paris, “Influence of Longitudinal Vibrations on Image Quality”,  
*Appl. Opt.*, **4**, pp.393-397 (1965).
- [9] B.J. Lin, “Vibration Tolerance in Optical Imaging”, *Proc. of SPIE*, **1088**, pp.106-114  
(1989).

## 第4章 露光量制御

第2章ではステップ&リピート投影露光装置の概要および結像性能に露光量制御精度が影響することに触れ、第3章ではステップ&スキャン投影露光装置のシステム設計の説明の中でスキャン露光に対応した露光量制御方法が必要であることに触れたが、どちらにおいても露光量制御の詳細には触れなかった。本章では、エキシマレーザのようなパルス毎エネルギーばらつきをもつ光源を露光光源とした場合の露光量制御方法、精度について、ステップ&リピート投影露光装置、ステップ&スキャン投影露光装置両方の場合について述べる。

### 4.1 エキシマレーザのパルス毎エネルギーばらつき

解像度の向上に伴って、露光装置の露光波長が連続光である水銀ランプの*i*線（波長 365nm）からパルス光である KrF エキシマレーザ（波長 248nm）に移行する際、大きなパルス毎のエネルギーばらつきに対し、積算エネルギーのばらつきをどう抑制するかが課題となった。

KrF エキシマレーザを使った実験装置、プロトタイプ露光機の報告は 1980 年代前半から半ばに欧米の半導体デバイスメーカ、研究機関から報告がある。そこでは、露光量精度向上のためには発振周波数を高くして数百パルスで露光することが望ましく [1-3]、積算値が目標値に達したら露光を完了することが述べられている [1]。また、1987-1988 年には、米国の複数の露光機メーカから、エキシマレーザのパルス毎エネルギーばらつきが大きいために所望の露光量制御精度を得るためには多数のパルスでの露光が必要ということ [4]、パルス毎エネルギーの頻度分布は正規分布的な形状をしており、そのばらつきは KrF エキシマレーザで 8% ( $3\sigma$ 相当) (ガス交換直後)、ArF エキシマレーザで 30% ( $3\sigma$ 相当)、であることが報告されている [5]。一方、著者は 1980 年代半ばから KrF エキシマレーザを露光光源に採用したステップ&リピート投影露光装置の開発に携わったが、パルス毎のエネルギーばらつきの量は、表 2.1 に示したように当初は  $\pm 45\%$ 、その次の世代では  $\pm 15\%$  であった [6]。1980 年代後半には海外、国内とも多数のサプライヤーがリソグラフィ光源用の KrF エキシマレーザの開発を試行していた経緯もあり、大きなパルス毎エネルギーばらつきに備えておく必要があった。

さて、エネルギーばらつきを  $(\Delta p/p)$ 、所望の露光量制御精度を  $A_t$  とおく時、オープン制御による積算露光量の統計的平均化時に必要となる露光パルス数  $N$  は、

$$N \geq \left( \frac{(\Delta p/p)}{A_t} \right)^2, \quad (4.1)$$

で与えられる[7, 8]。パルス毎エネルギーばらつきを 45% ( $3\sigma$ )とし、所望の露光量制御精度を 1% ( $3\sigma$ )とすると、2025 パルス以上が必要になる。初期のリソグラフィ用 KrF エキシマレーザの発振周波数は 100 pps または 200 pps であったので、ひとつの露光フィールドの露光にそれぞれ 20 秒または 10 秒を要することになってしまい、露光処理能力が低くなってしまふことが予想された。

#### 4.2 ステップ&リピート投影露光装置での露光量制御

4.1 節で述べたような露光処理能力の観点からも、エキシマレーザのガス寿命の延長というランニング・コストの観点からも、露光に要するパルス数の減少が切望されていた。そこで、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[9, 10]。以下にその概要と実験データを紹介する。

まず、ウエハ面上のパルスエネルギー量との関係が校正済みの光量モニタが照明系に載置され、パルス毎にウエハ面上に照射されるエネルギー量  $p$  ( $\text{mJ}/\text{cm}^2\text{pulse}$ )が測定可能であるとする。所望の露光量を  $S$  ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )とおくと、露光に必要なパルス数  $N$  は、

$$N = \text{int} \left( \frac{S}{p} \right). \quad (4.2)$$

今、積算パルスエネルギーの目標露光量に対する比を  $R$  とおき、次のパルスを発光すると、パルスエネルギーばらつきの範囲内で最もエネルギーの大きなパルスが来た場合に積算エネルギーが所望の露光量制御精度  $A_t$  をオーバーしてしまう可能性があるレベルを、粗露光終了判定レベル  $R_c$  として、

$$R_c = 1 + A_t - \frac{1 + \left( \frac{\Delta p}{p} \right)}{N}, \quad (4.3)$$

式(4.3)で与えられる  $R_c$  が、所望の露光量制御精度の下限 ( $1 - A_t$ ) より大きい場合には、そこで露光を終了すればよい (カット・オフ制御)。その条件を満たす最小の露光パルス数を  $N_{co}$  とおくと、

$$N \geq \frac{1 + \left(\frac{\Delta p}{p}\right)}{2A_t} \quad , \quad (4.4)$$

$$\therefore N_{co} = \text{int} \left[ \left\{ 1 + \left(\frac{\Delta p}{p}\right) \right\} / 2A_t \right] + 1 \quad , \quad (4.5)$$

パルス毎エネルギーばらつきを 45% (3 $\sigma$ )とし、所望の露光量制御精度を 1% (3 $\sigma$ )とすると  $N_{co}$ として 73 パルスが得られる。式(4.1)で与えられる単なるオープン制御時に必要だった 2025 パルスに比べ著しい改善である。ところで、式(4.3)は  $N$  が大きくなると所望の露光量制御精度のプラス側の上限値に漸近してしまうので、 $R_c$  が 1.0 を越える露光パルス数  $N_{tg}$  以上のパルス数での露光時には、

$$R_c = 1.0 \quad , \quad (N \geq N_{tg}) \quad , \quad (4.6)$$

とすればよい。ここで、 $N_{tg}$  は、

$$N \geq \frac{1 + \left(\frac{\Delta p}{p}\right)}{A_t} = N_{tg} \quad , \quad (4.7)$$

$$\therefore N_{tg} = \text{int} \left[ \left\{ 1 + \left(\frac{\Delta p}{p}\right) \right\} / A_t \right] + 1 \quad , \quad (4.8)$$

で表され、パルス毎エネルギーばらつきを 45% (3 $\sigma$ )、所望の露光量制御精度を 1% (3 $\sigma$ )とすると 145 パルスとなる。

次に、式(4.4)で示されるカット・オフ制御が可能な露光パルス数よりも少ないパルス数で露光する方法を説明する。粗露光が終了した時点で、目標エネルギー値に対し更に露光すべきエネルギー量が一番大きくなるのは、粗露光がちょうど式(4.3)で与えられる粗露光終了判定レベルで終了した時である。よって修正露光量  $q$  は、

$$q \leq Np(1 - R_c) = p \left\{ 1 + \left(\frac{\Delta p}{p}\right) - NA_t \right\} \quad . \quad (4.9)$$

図 4.1 に示すように、元のパルスエネルギーに対し同じ減光度をかけた  $n$  パルスの修正露光をオープン制御により行った場合、修正露光量のばらつき  $\Delta q$  は、

$$\Delta q \leq \left\{ 1 + \left(\frac{\Delta p}{p}\right) - NA_t \right\} \frac{\Delta p}{\sqrt{n}} \quad . \quad (4.10)$$

よって、修正露光後の露光量制御精度  $A$  は、

$$A = \frac{\Delta q}{Np} \leq \frac{1}{\sqrt{n}} \left[ \frac{1}{N} \left\{ 1 + \left(\frac{\Delta p}{p}\right) \right\} - A_t \right] \left(\frac{\Delta p}{p}\right) \quad . \quad (4.11)$$

$A$  が所望の露光量制御精度  $A_t$  以下である条件  $A \leq A_t$  から、式(4.11)を代入して整理し、修正露光が可能な最小露光パルス数を  $N_{ad}$  とすると、

$$N \geq \frac{1}{A_t} \left( \frac{\Delta p}{p} \right) \frac{1 + \left( \frac{\Delta p}{p} \right)}{\sqrt{n} + \left( \frac{\Delta p}{p} \right)}, \quad (4.12)$$

$$\therefore N_{ad} = \text{int} \left\{ \frac{1}{A_t} \left( \frac{\Delta p}{p} \right) \frac{1 + \left( \frac{\Delta p}{p} \right)}{\sqrt{n} + \left( \frac{\Delta p}{p} \right)} \right\} + 1. \quad (4.13)$$

ここで、修正露光パルス数  $n$  を 2 パルスとし、パルス毎エネルギーばらつきを 45% ( $3\sigma$ )、所望の露光量制御精度を 1% ( $3\sigma$ ) とすると、修正露光採用時の粗露光パルス数は式(4.13)より 36 パルス以上ということになる。式(4.4)で述べたカット・オフ制御での最小露光パルス数  $N_{co}$  が 73 パルスだったのに対し、更に少ないパルス数の露光で所望の露光量制御精度が得られることが示された。次に、修正露光後の積算露光量が許容精度の上限をオーバーしないように、修正露光パルス数  $n$  に対しては、減光度  $a$  によってパルスエネルギーが  $ap$  になったとする。このとき、 $n$  と  $a$  のペアがカバーする粗露光終了時の積算エネルギーの目標露光量に対する比の上限  $R_U$  と下限  $R_L$  は、 $n$  パルスの修正露光終了後に積算値が許容制御精度に入るために、

$$R_U = 1 + A - \frac{n + \sqrt{n} \left( \frac{\Delta p}{p} \right)}{N} a, \quad (4.14)$$

$$R_L = 1 - A - \frac{n - \sqrt{n} \left( \frac{\Delta p}{p} \right)}{N} a, \quad (4.15)$$

となる。

以下、実験データを紹介する。図 4.2 は本実験を実施したステップ&リピート投影露光装置の露光量制御系のブロック図である[9, 11]。照明系には 2ヶ所に減光手段を設置した。1 段目は、目標露光量が小さい場合にパルス光のエネルギーを露光全体にわたって一律に減衰させ、露光パルス数を最小露光パルス数以上にするための減衰手段である。切り替え動作に高速性は要求されない。その透過率の実測値は 0.373 (設計値 0.50)、0.109 (設計値 0.25)、0.025 (設計値 0.050)、など大きなステップ間隔にし、複数種類

の減光フィルタ（金属メッシュ）をターレット状の回転板に配置した。次に、2段目は、更に修正露光にてパルス光のエネルギーを小さくさせるための減衰手段であり、やはり複数種類の減光フィルタをターレット状の回転板に配置した。一露光中の切り替えが必要となるため切り替え高速性が要求される。透過率の実測値は、0.215（設計値 0.25）、0.144（設計値 0.20）、0.098（設計値 0.15）、などであり、小さなステップで準備した。この高速減光部を透過したパルス光は後述する振動ミラーで反射した後、フライアイ・レンズに入射する。フライアイ・レンズでは、複数のレンズ・エレメントに入射したビーム（即ち、入射ビーム断面のいろいろな箇所）が重畳され、フライアイ・レンズ出口ではエネルギー強度が均一なビームとなって射出する。次に、ビームの一部がハーフミラーで反射し、ウエハ面でのパルスエネルギー量に対して校正された光量モニタにてパルス毎にエネルギー値が計測される。エネルギー値はパルス光毎に主制御系にて積算され、目標エネルギー値と比較される。そして、次の発光のトリガの是非の判断、減光部への動作指示が行われる。今、パルス毎エネルギーばらつきを 45% ( $3\sigma$ )、所望の露光量制御精度を 1% ( $3\sigma$ ) の場合、修正露光でのパルス数と高速減光部の透過率の組み合わせとして、 $(n, a) = (2, 0.215)$  ,  $(3, 0.215)$  ,  $(7, 0.144)$  の 3 通りを考慮しておけば、図 4.3 のような露光量制御ダイヤグラムができる。この制御ダイヤグラムを用いて、複数の目標露光量に対し、最小露光パルス数を 3 通りに設定して所得した露光量制御データを図 4.4 に示す。最小露光パルス数 36、目標露光量が  $1 \text{ mJ/cm}^2$  の時（平均パルスエネルギーが  $0.24 \text{ mJ/cm}^2$  なので、1 段目の減光手段で透過率 10.9% のフィルタが自動挿入され、一律減光により露光パルス数を 36 以上にしている）に 2 つのデータがわずかに露光アンダーになった以外は、非常によく露光量が制御されていることがわかる。尚、目標露光量  $1 \text{ mJ/cm}^2$  のような低露光量は、レジスト膜減り曲線のデータ取得時に必要とされる程度であり、厳しい露光量精度が要求される領域ではない。

上記の要素確認実験を行った露光量制御システムは、著者が開発に加わった KrF エキシマレーザを露光光源とした第 1 世代のステップ&リピート投影露光装置に組み込まれた[6, 12]。ところで、露光光源として採用した KrF エキシマレーザの持つ空間的コヒーレンスが強い場合にはウエハ面上で干渉縞が発生する。この干渉縞に対しては、照明系中のミラーの角度を変化させることによりウエハ面上での干渉縞の位相を変化させることによって、平滑化を行うことができる[13]。そこで、干渉縞の低減が必要な場合には、粗露光パルス数を修正露光不要領域になるように大き目に設定し、露光が照明系中のミラー振動の半周期または一周で終了するようにした。

後年になって、欧米の露光機メーカーからも2段階の修正露光をかける制御方式[14]やカット・オフ制御方式[15]が発表されているが、前者については減光手段の切り替え時間が1回分増える欠点があり、また数式を用いた制御ロジックの詳しい説明を欠いている。また後者については式(4.4)と等価なカット・オフ制御の式を紹介し、制御精度データの報告もあるが修正露光制御への言及はなかった。



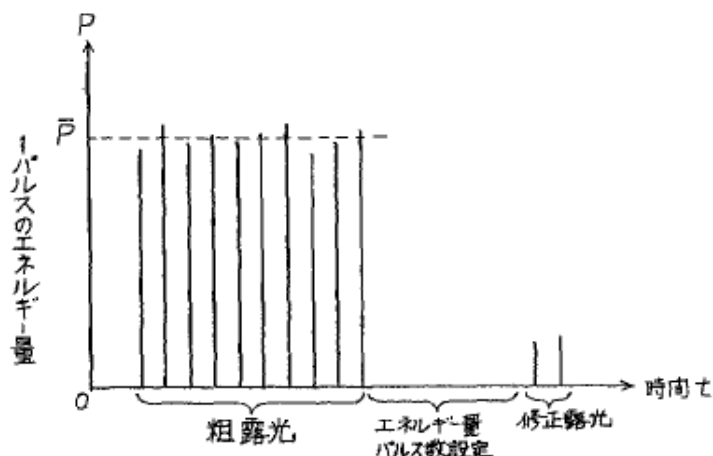


図 4.1; 粗露光と修正露光のパルスエネルギーを示す図 [9]

ひとつの露光の末尾にパルスエネルギーを大きく下げた修正露光を加えることで、総パルス数を減少させることができる。

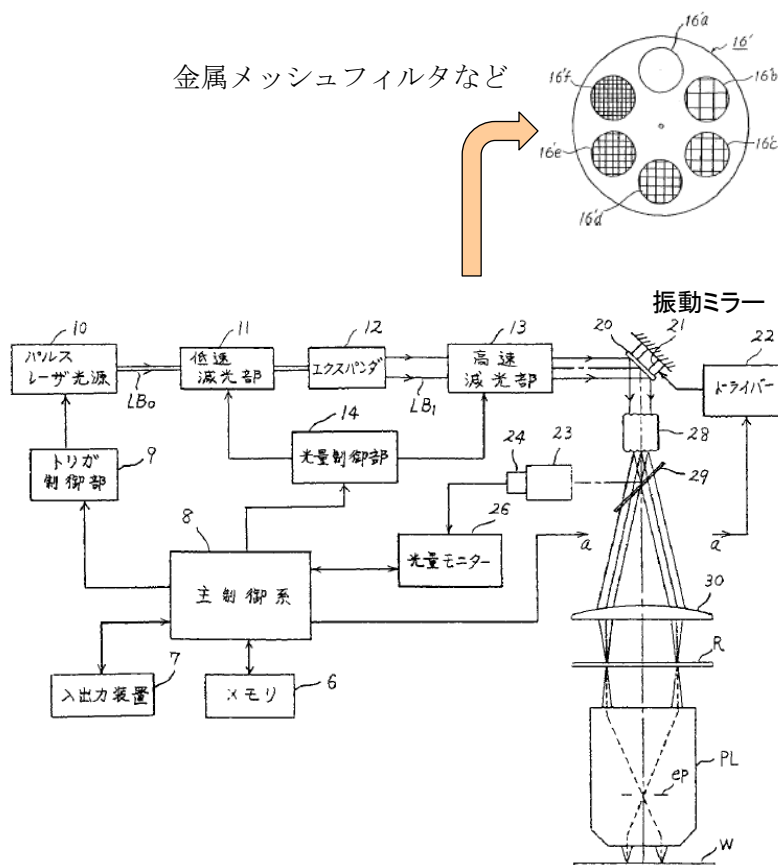


図 4.2; ステップ&リピート投影露光装置の露光量制御系のブロック図 [11] と減光部のターゲット状の回転板 [9]

振動ミラーの角度によりウェハ面上での干渉縞の位相が変化することを利用し、干渉縞の平滑化が必要な場合には、露光パルス数を大きく取り振動ミラーを動作させつつ修正露光不要領域で露光量制御。

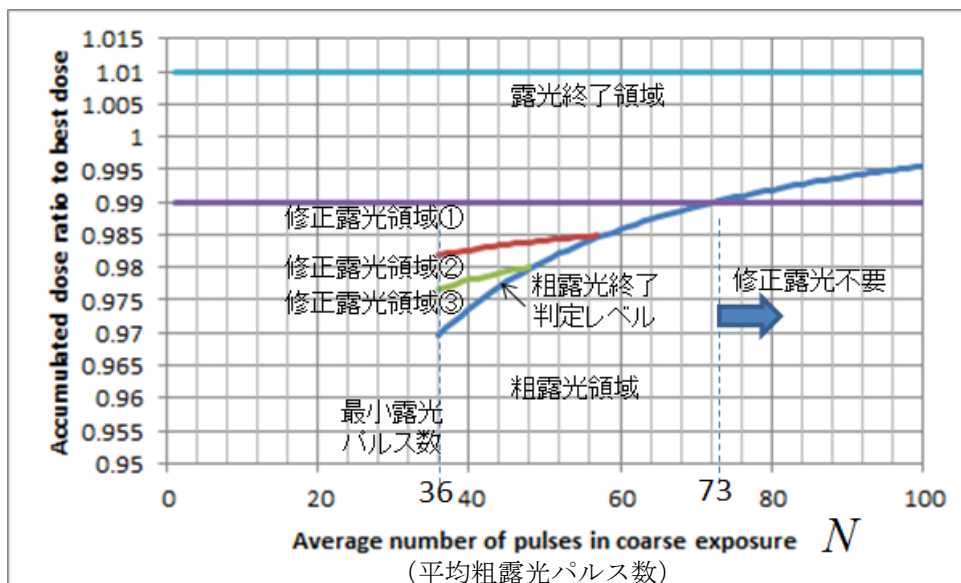


図 4.3: 露光量制御ダイヤグラム

制御精度 1%(3 $\sigma$ ), パルス毎エネルギーばらつき 45%(3 $\sigma$ )

修正露光領域①; 修正露光パルス数 2、透過率 0.215

修正露光領域②; 修正露光パルス数 3、透過率 0.215

修正露光領域③; 修正露光パルス数 7、透過率 0.144

領域①と領域②の境界は領域①の下限線

領域②と領域③の境界は領域②の下限線

粗露光終了判定レベルを越えた時点での積算露光量精度の値により、所定の透過率と所定の修正露光パルス数にて、補正露光を行う。

#### Accumulated Dosage Accuracy (%)

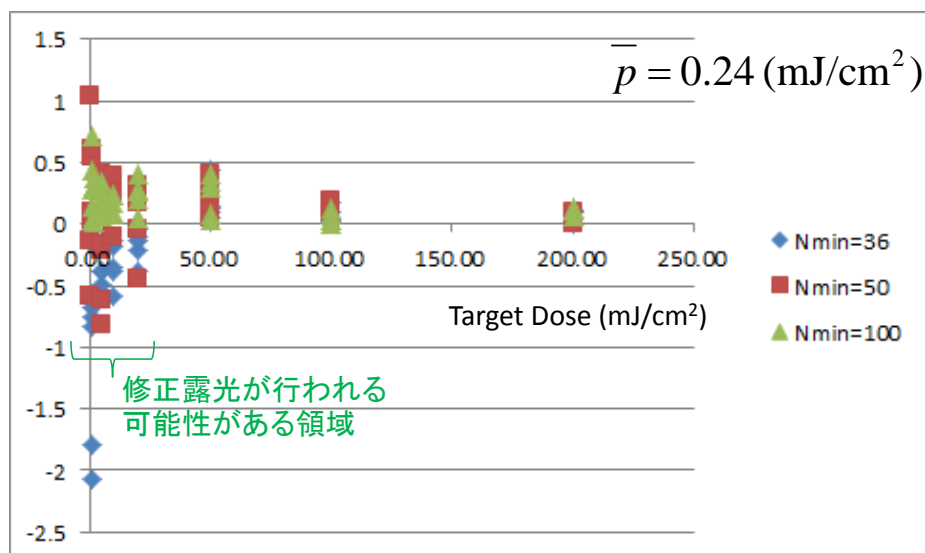


図 4.4: 露光量制御精度データ (3通りの最小露光パルス数、複数の目標露光量に対するデータ)

修正露光が行われる可能性があるのは 20 mJ/cm<sup>2</sup> 以下の場合である。Nmin=36 にて露光量制御精度が -1.8%、-2.1% のデータは目標露光量 1mJ/cm<sup>2</sup> の場合であり、レジスト膜減り曲線用データ取得時の低露光量領域であり、厳しい露光量制御は要求されないため、問題とはならない。

### 4.3 ステップ&スキャン投影露光装置での露光量制御

本節では、ステップ&スキャン投影露光装置のシステム・コンセプトの一要素である露光量制御について詳細に説明する。

#### 4.3.1 ダイナミック露光量制御精度のモデル式の導出

エキシマレーザをスキャン露光に用いた場合の露光量制御精度については、反射縮小投影スキャン露光機の開発を進めていた米国のメーカーからの先行研究が挙げられる [5]。そこでは、

- 1) 良好な露光量制御精度を得るためには、ウエハ上のスリット幅 ( $W$ )、スキャン露光中のウエハステージの速度 ( $v$ )、エキシマレーザの発振周波数 ( $f$ ) の間の関係が、

$$Wf/v = \text{integer} \quad , \quad (4.16)$$

を満たすことが望ましいこと（この関係からはずれると、スリット領域内の場所によってパルス数が1パルス異なる状況が発生する）、

- 2) スリット照明のスキャン方向断面の強度分布はエッジがステップ関数で変化する一様分布よりも、三角形に近い分布の方が上記量子化誤差が和らぐこと、が報告されている。

著者は、上記の式(4.16)を満たしつつ、スリット照明のスキャン方向断面の強度分布として台形を想定してスキャン露光後のダイナミック照度均一性のモデル式を導出し、実際の露光装置での計測データとの比較を行った [10]。台形分布の妥当性については後述する。

まず、図 4.5 は露光量制御系のブロック図である。KrF エキシマレーザからのパルス光（通常、断面形状は矩形）は、シリンダリカル・レンズなどのビーム整形光学系によって後段のフライアイ・レンズ入口に合致するようにビーム形状が調整される。ビーム減衰器は、パルス光を減光して、ウエハ上の一点への露光パルス数を最小露光パルス数より大きくする。ステップ&リピート投影露光装置用の露光量制御の開発時は、ビーム減衰器には金属メッシュ・フィルタを使用していたが、高い透過率の実現が難しいことや実測値が設計値に比べ数%小さかったことにより、金属メッシュ・フィルタの代わりに誘電体コートミラーを減光フィルタとして複数種類準備した。エネルギー微調整器は、目標露光量の1/整数にパルス・エネルギーを微調整するものである。これにより積算露光量の目標値に対するバイアスを除去することができる。具体的手段としては2重

格子の片方を横シフトさせることとした。その後、パルス光はフライアイ・レンズに入射する。フライアイ・レンズの役割は 4.2 節の図 4.2 にて説明した。フライアイ・レンズの出口位置はマスク面に対し瞳の位置になっており、コヒーレンス・ファクタの大きさを決める  $\sigma$  絞りがここに載置される。照明系内には、マスク面と共役な面が設けられており、この近傍にスリット照野を決める視野絞りが設置される。3.2.2 項で触れたように、スリット状の視野絞りはマスク面と共役な面から故意に少しずらして設置することで、台形分布を実現する。上記  $\sigma$  絞りを通過したパルス光の一部はミラーで反射され、露光量制御用の光量モニタにより、パルス毎のエネルギー量の検出が可能になっている。光量モニタは、ウエハ面上に設置されている照度モニタを用いて、ウエハ面でのパルスエネルギーとの対応取りがなされる。

第 3 章で紹介した式(3.3)は、最小露光パルス数にてウエハステージ速度が最高速の場合のものであったが、一般の露光パルス数  $N$ 、ウエハステージ速度  $v$  についても成立する。ここで、スリット幅は均一とは限らないので、非スキャン方向  $y$  の関数  $W(y)$  とし、その平均値を  $W_m$  とおくと、

$$W_m f / v = N \quad , \quad (4.17)$$

と書ける。速度  $v$  で移動するウエハに対し周波数  $f$  でパルス発光が行われるので、ウエハは距離  $X_s$  進む毎にパルスエネルギーを蓄積することになる。

$$X_s = v / f = W_m / N \quad . \quad (4.18)$$

この幅  $X_s$  の領域を部分領域と呼ぶことにするが、スリット状の照明領域をスキャン方向に  $N$  分割した幅  $X_s$  の短冊状照明分布がパルスエネルギーばらつき分の強度ばらつきを持って  $N$  パルス分を重畳して、ウエハ上のひとつの部分領域の照度分布を形成している。同一部分領域内は同じ連続した露光パルスが対応していて、例えば、 $N$  パルスで露光する場合、或る部分領域は  $i$  番目から  $i+N-1$  番目のパルスが積算され、隣の部分領域は  $i+1$  番目から  $i+N$  番目のパルスの積算となり、1 パルス分ずれる。図 4.6 に露光フィールドに対する部分領域を示した。

スキャン方向を  $x$  方向とし、非スキャン方向に対するスリット幅の非一様性  $\Delta L(y)$  を、

$$\Delta L(y) = W(y) - W_m \quad , \quad (4.19)$$

で表すこととする。

ここで、台形分布の基本パラメータを図 4.7 を用いて説明する。台形分布の半値幅が、ウエハ上のスリット幅  $W$  に対応する。台形分布の 2 つの斜辺部の幅を  $2\Delta W_1$ 、 $2\Delta W_2$

とおくことにする。

今、露光パルス数  $N$  は、パルスエネルギー微調整により整数化が施されているので、

$$N = \text{int}(S/p) = S/p . \quad (4.20)$$

斜辺の半分の長さ  $\Delta W_1$ 、 $\Delta W_2$  にて露光されるパルス数を、それぞれ  $N_1$ 、 $N_2$  とおくと、

$$N_1 = \text{int}\left(\frac{N\Delta W_1}{W_m}\right) , \quad (4.21)$$

$$N_2 = \text{int}\left(\frac{N\Delta W_2}{W_m}\right) , \quad (4.22)$$

台形分布は、ほぼ等脚台形とすると、

$$\Delta W_1 \approx \Delta W_2 \approx \Delta W_{12} , \quad (4.23)$$

$$N_1 \approx N_2 \approx N_{12} = \text{int}\left(\frac{N\Delta W_{12}}{W_m}\right) , \quad (4.24)$$

式(4.17)～(4.24)を用いて、部分領域内の点  $(x, y)$  ( $-X_s/2 \leq x \leq X_s/2$ ) でのスキャン後の積算露光量  $I(x, y)$  を求めると、式(4.25)、式(4.26)のように表すことができる。尚、 $x$  の原点は、 $N$  が偶数の時には、スリット照野のスキャン方向中心で露光される点とし、 $N$  が奇数の時には、スリット照野の中心から  $X_s/2$  ずれた点とした。尚、 $\delta_i$  は  $i$  番目のパルスの露光位置オフセットである。

$$I(x, y) = \sum_{i=N/2-N_1}^{N/2+N_1} p_i \left( \frac{x + W(y)/2 + \Delta W_1 - iX_s - \delta_i}{2\Delta W_1} \right) + \sum_{i=-(N/2-N_2-1)}^{N/2-N_1-1} p_i \\ + \sum_{i=-(N/2+N_2)}^{-N/2-N_2} p_i \left( 1 - \frac{x - (W(y)/2 - \Delta W_2) - iX_s - \delta_i}{2\Delta W_2} \right) , (N; \text{even}),$$

$$I(x, y) = \sum_{i=(N+1)/2-N_1}^{(N+1)/2+N_1} p_i \left( \frac{x + X_s/2 + W(y)/2 + \Delta W_1 - iX_s - \delta_i}{2\Delta W_1} \right) + \sum_{i=-(N+1)/2-N_2-1}^{-1} p_i + \sum_{i=1}^{(N+1)/2-N_1-1} p_i \\ + \sum_{i=-(N+1)/2+N_2}^{-((N+1)/2-N_2)} p_i \left( 1 - \frac{x - X_s/2 - (W(y)/2 - \Delta W_2) - iX_s - \delta_i}{2\Delta W_2} \right) , (N; \text{odd}),$$

$$\left( |x| \leq \frac{X_s}{2} \leq \Delta W_{12} \right) \text{ or } \left( 0 \leq |x| \leq \Delta W_{12} < \frac{X_s}{2} \right) , (4.25)$$

$$I(x, y) = \sum_{i=-N/2+1}^{N/2} p_i , (N; \text{even}) \text{ or } \sum_{i=-(N+1)/2+1}^{(N+1)/2} p_i , (N; \text{odd}), \left( \Delta W_{12} < |x| \leq \frac{X_s}{2} \right) . (4.26)$$

以下、ステップ&スキャン投影露光装置におけるスキャン露光での露光量制御精度について述べる。ステップ&リピート方式で考案した静止露光での修正露光方式は、ステップ&スキャン方式では採用できない。理由は、修正露光によって或る部分領域で良好な制御精度を得ても、他の部分領域では制御精度が保証できなくなってしまうからである。そこで、ここでは一番単純な、統計的平均化の場合の精度について解析する。

露光量制御精度を考える上で、静止露光の時にはパルスエネルギーばらつきのみを考えればよかったが、スキャン露光ではそれに加えて露光位置のばらつきの影響も考える必要がある。式(4.25)に現れる露光位置オフセット  $\delta$  のばらつきを  $\Delta\delta$  とおく。その原因はエキシマレーザの発光タイミングのジッターや、ウエハステージの速度むらである。

式(4.25)、式(4.26)のパルスエネルギー  $p_i$  と露光位置オフセット  $\delta$  にばらつき  $\Delta p$  と  $\Delta\delta$  をそれぞれ与え、各々のばらつきが独立に発生する場合の誤差の伝搬からスキャン露光後の部分領域内のダイナミック露光量制御精度  $U(x, y)$  が求まる。ここで、位置オフセットの平均値は 0 としても影響ない。更に、台形の斜辺部の幅  $2\Delta W_1$ 、 $2\Delta W_2$  はほぼ等しく、式(4.23)、式(4.24)が成り立っているとすると、

$$\begin{aligned}
 U(x, y) = & 1 \pm \frac{1}{N} \sqrt{N - \frac{2N_{12} + 1}{2} + \left( \frac{X_s}{2\Delta W_{12}} \right)^2 \frac{2N_{12}(N_{12} + 1)(2N_{12} + 1)}{3} \left( \frac{\Delta p}{p} \right)} \\
 & + \frac{1}{N} \frac{2N_{12} + 1}{2\Delta W_{12}} \Delta L(y) \pm \frac{1}{N} \sqrt{\frac{2N_{12} + 1}{2\Delta W_{12}} \Delta L(y) + \frac{2N_{12} + 1}{(2\Delta W_{12})^2} \frac{\Delta L(y)^2}{2}} \left( \frac{\Delta p}{p} \right) \\
 & + \frac{1}{N} \frac{2N_{12} + 1}{2} \left( \frac{1}{\Delta W_1} - \frac{1}{\Delta W_2} \right) x \\
 & \pm \frac{1}{N} \sqrt{\frac{2N_{12} + 1}{2} \left( \frac{1}{\Delta W_1} - \frac{1}{\Delta W_2} \right) x + 2 \frac{2N_{12} + 1}{(2\Delta W_{12})^2} \left( x^2 \left( \frac{\Delta p}{p} \right)^2 + (\Delta\delta)^2 \right)} \\
 & \pm \frac{1}{N} \sqrt{\left( \frac{1}{\Delta W_1} - \frac{1}{\Delta W_2} \right) \frac{2N_{12} + 1}{2\Delta W_{12}} \Delta L(y) x} \left( \frac{\Delta p}{p} \right), \\
 & \left( |x| \leq \frac{X_s}{2} \leq \Delta W_{12} \right) \text{ or } \left( 0 \leq |x| \leq \Delta W_{12} < \frac{X_s}{2} \right), \quad (4.27)
 \end{aligned}$$

$$U(x, y) = 1 \pm \frac{1}{\sqrt{N}} \left( \frac{\Delta p}{p} \right), \quad \left( \Delta W_{12} < |x| \leq \frac{X_s}{2} \right), \quad (4.28)$$

が得られる。式(4.27)の右辺の第2項は部分領域全体での露光量再現精度に関係した項、第3項と第4項は非スキャン方向の照度の一様性に関係した項、第5項と第6項は台形分布の両側の斜辺の対称性に関係した項および露光位置のばらつきに関係した項、第7項は非スキャン方向の照度一様性と斜辺の対称性のクロス項である。 $N_{12}$ が大きいときには、式(4.24)を用いて右辺第3項を書き換えると、

$$\frac{1}{N} \frac{2N_{12}+1}{2\Delta W_{12}} \Delta L(y) \approx \frac{1}{W_m} \Delta L(y) \quad , \quad (4.29)$$

と書けることから、この項が非スキャン方向の照度不均一性を示していることがわかる。露光位置のばらつき $\Delta\delta$ は右辺第6項にのみ入っているが、スキャン露光での露光量制御精度において露光位置のばらつきも考慮したモデル式を導出し、その影響を考察したのは、著者らの研究が初めてであった。また、パルスエネルギーばらつきと露光位置ばらつきの両方の影響に対応した露光量制御システムの発明は著者に依るものである[16]。

尚、部分領域の幅がエッジ部の斜辺より長い場合には、式(4.26)、式(4.28)が成立する領域では斜辺部による露光は行われず、常に台形分布のトップ部で露光されることになる。

### 4.3.2 実機データでの検証

まず初めに、4.3.1項にて、スリット照野の強度分布のスキャン方向断面を台形近似したことの妥当性について述べる。図4.5で示したように、照明系内のマスク面（およびウエハ面）と共役な面に対し、スリット状視野絞りはずらして設置することにしたが、そのずらし量を $d$ とおく。また、照明系内のこの共役位置からウエハ面への投影倍率を $M$ とおく。スリット状視野絞り上の1点は、ずらし量 $d$ に応じてウエハ上で半径 $\Delta r$ でほぼ一様にぼける。投影光学系のウエハ面に対する開口数 $\rho_0$ 、照明系のコヒーレンス・ファクタ $\sigma$ を用いると、ウエハ面上でのぼけ半径 $\Delta r$ は、

$$\Delta r = Md \tan \left[ \sin^{-1} (M\sigma\rho_0) \right] \quad , \quad (4.30)$$

となる。次に、一様強度のぼけ半径 $\Delta r$ をスリット照野のエッジ近辺で積分してやると、ウエハ面上のスリット照野の強度分布の断面のエッジ部の形状がわかる。今、積分後の強度分布の最大値を1として規格化し、エッジ部の中心位置を $x=0$ とおくと、エッジ部の強度分布関数 $H$ は、

$$H\left(\frac{x}{\Delta r}\right) = \frac{1}{\pi} \left[ \cos^{-1}\left(\frac{x}{\Delta r}\right) - \left(\frac{x}{\Delta r}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{x}{\Delta r}\right)^2} \right], \quad (-1 \leq \frac{x}{\Delta r} \leq 1) \quad (4.31)$$

$$\approx \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \left(\frac{x}{\Delta r}\right), \quad \left|\frac{x}{\Delta r}\right| \ll 1, \quad (4.32)$$

で表現できる。図 4.8 に式(4.31)をプロットしたが、概して言えば、台形近似が成り立っていると言える。台形斜辺を示す式(4.32)の左辺が 0 になる  $x$  の値を  $\Delta W$  と見做せるので、

$$\Delta W \approx \frac{\pi}{4} \Delta r. \quad (4.33)$$

以下、実験データを示して行く。実験に用いた装置では、 $M \cong 0.55$ 、 $d = 1.6$  (mm) であり、ウエハ上 (8+ぼけ) mm×25 mm のスリット照野を実現している。投影光学系の投影倍率は 1/4 倍、最大の開口数 (N.A.) は 0.60、最大開口数に対する照明系のコヒーレンスファクタ ( $\sigma$ ) は 0.54, 0.6, 0.67, 0.75 で離散的に可変である。KrF エキシマレーザの発振周波数  $f$  は 500 pps であり、パルス毎エネルギーばらつき ( $\Delta p/p$ ) は 7% ( $3\sigma$ ) である。最小露光パルス数  $N_{\min}$  を 50 パルスとすると、露光後の積算エネルギーのばらつきは 0.99% ( $3\sigma$ ) 以下になる。一方、露光位置ばらつきは、ウエハステージの最高速にて  $\Delta\delta$  は 1.0  $\mu\text{m}$  ( $3\sigma$ ) である。

ここで、ウエハ面での投影系開口数 (N.A.) ( $\rho_0$ ) に照明系のコヒーレンスファクタ ( $\sigma$ ) を乗じたウエハ面での照明系開口数を  $NA_{ill}$  と定義する。即ち、

$$NA_{ill} = \sigma \rho_0. \quad (4.34)$$

図 4.9 にウエハ上で測定したスリット照野のエッジ部の強度分布を示す。図 4.5 で説明したウエハステージ上の照度モニタを用いて測定した。 $NA_{ill}$  の最大値 0.45 は、第 3 章で定めた仕様である投影系開口数 0.60、最大コヒーレンス・ファクタ 0.75 の時に対応しているが、 $NA_{ill}$  が大きい程、ぼけが大きくなって、エッジ部のスロープが緩やかになっていることがわかる。表 4.1 にて、式(4.30)によるぼけの予測値と実測値の比較を示す。ぼけの実測値は、予測値とよく一致をしており、また両サイドのエッジのぼけの非対称性はほとんどない。

図 4.10 にはウエハ上 (8+ぼけ) mm × 25mm のスリット照野内のスタティックな照度均一性のデータを示す ( $NA_{ill} = 0.45$  時)。同じくウエハステージ上の照度モニタを用いて測定した。エッジ部はどこもほぼ同量のぼけが形成され、トップ部は  $\pm 1\%$  の均一性に入っている。表 4.2 には、スリット幅と非一様性の実測値を示した



( $NA_{III} = 0.36$ 時)。スリット幅は設計値である 8 mm よりもやや細いが、スリット幅の均一性は良好である。

式(4.27)の右辺第 3 項から第 7 項までは座標( $x, y$ )を含んでおり、スタティック照度均一性との合成が部分領域内のダイナミック露光量均一性を表すことになる。表 4.1、表 4.2 に挙げたスリット照野の実測データを用いて評価した式(4.27)の右辺各項の値を表 4.3 に示す。パルス毎エネルギーばらつき ( $\Delta p/p$ ) は 7% ( $3\sigma$ )、露光位置ばらつき  $\Delta\delta$  は 1.0  $\mu\text{m}$  ( $3\sigma$ )、露光パルス数は精度が最も厳しくなる最小露光パルス数 (50 パルス) を仮定した。また、表 4.1 のぼけ量実測値  $\Delta r$  から台形近似の斜辺幅の半分  $\Delta W$  への換算は式(4.33)を用いた。式(4.27)の右辺第 3 項から第 7 項では第 6 項の影響が比較的大きい。図 4.10 からスタティック照度均一性は  $\pm 1\%$  以内なので、表 4.3 より部分領域内のダイナミック照度均一性は 1.46% と見積もられる。

図 4.11 には、 $NA_{III} = 0.45$  時に、ウエハステージが露光用の最高速である 80 mm/sec でスキャンした場合の部分領域のダイナミック露光量均一性のデータを示した。ウエハステージ上の照度モニターを用いて測定した。部分領域の幅  $X_s$  は式(4.18)からわかるようにスリット幅 8 mm を最小露光パルス数  $N_{\min}$  (50 パルス) で割った値 160  $\mu\text{m}$  であるので、160  $\mu\text{m} \times 25000 \mu\text{m}$  が部分領域の大きさである。ダイナミック露光量均一性  $\pm 1\%$  が得られており、表 4.3 から予想される 1.46% 以内の値になっている。

式(4.27)の右辺第 2 項、または式(4.28)の右辺第 2 項に示された、パルスエネルギーばらつきに起因するダイナミック露光量均一性 (部分領域間の露光量再現性) データを図 4.12 に示した。先にも説明したように、パルス毎エネルギーばらつき ( $\Delta p/p$ ) は 7% ( $3\sigma$ ) なので、最小露光パルス数  $N_{\min}$  を 50 パルスとすると、露光後の積算エネルギーのばらつきは 0.99% ( $3\sigma$ ) 以下になると予想される (表 4.3)。実データは  $\pm 0.4\%$  に入っており、予想値以内の値である。

以上、台形近似によるモデル式と実データから、図 4.5 に示されたシステムでスキャン露光に対応した露光量制御が可能となること、第 3 章の表 3.2 の結像バジェットからのダイナミック照度均一性に要求値 (2% ( $3\sigma$ )) を満たせることが示された。

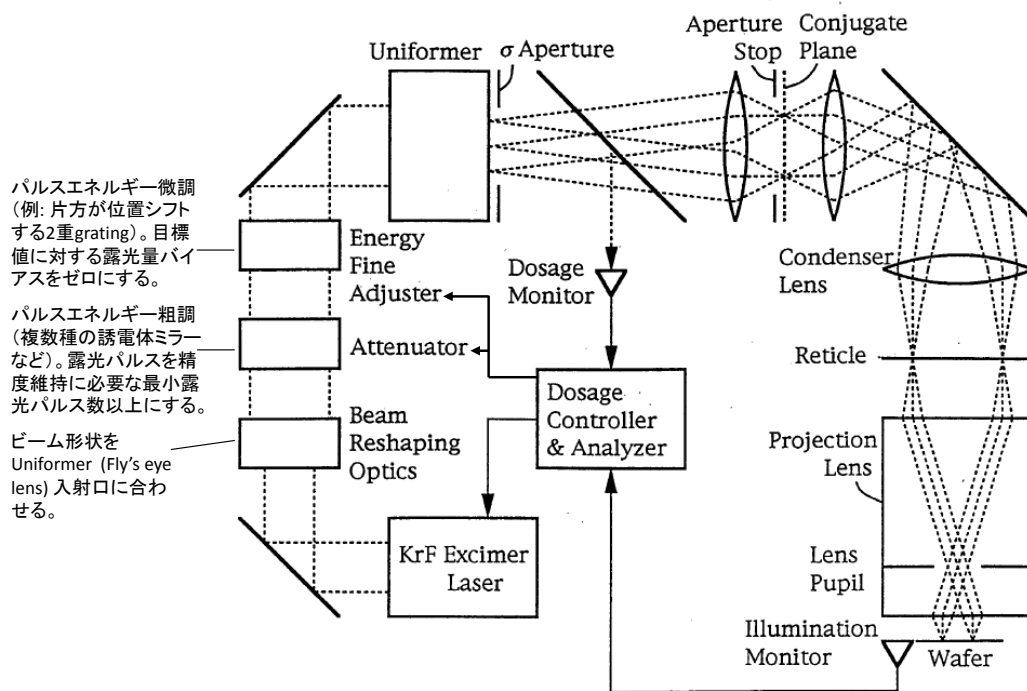


図 4.5: ステップ&スキャン投影露光装置の露光量制御系のブロック図  
(reproduced from [10]. Copyright(1995) The Japan Society of Applied Physics)

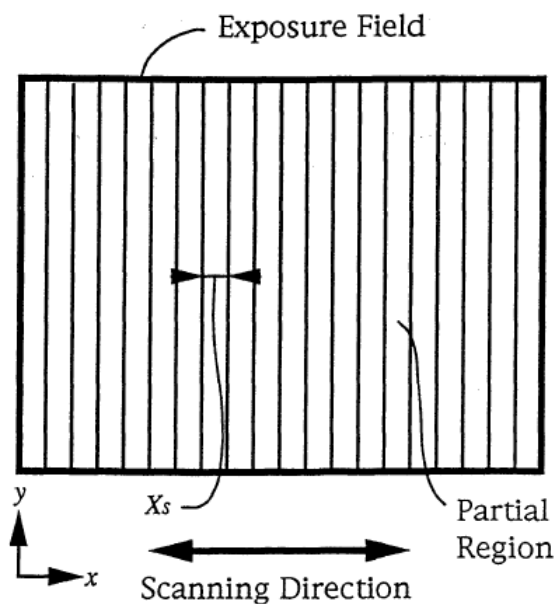


図 4.6: 露光領域 (Exposure Field) と部分領域 (Partial Region)  
(露光領域の大きさは 33 mm (スキャン方向  $x$ )  $\times$  25 mm ( $y$ ).  
露光パルス数が 50 の時は、部分領域の大きさは 0.16 mm  $\times$  25 mm。)  
(reproduced from [10]. Copyright(1995) The Japan Society of Applied Physics)

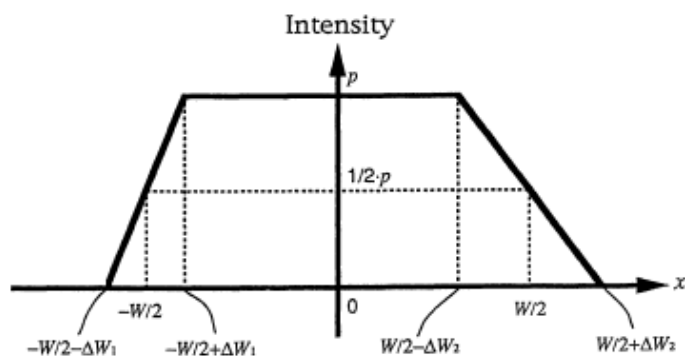


図 4.7; スリット状照野のスキャン方向の強度分布 (台形近似)  
(reproduced from [10]. Copyright(1995) The Japan Society of Applied Physics)

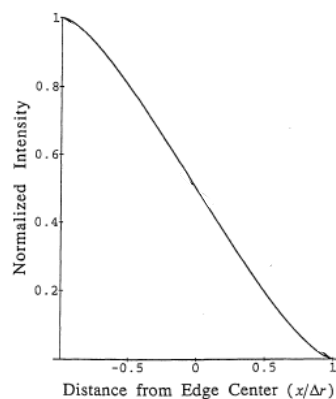


図 4.8; スリット照野のスキャン方向断面エッジ部の強度分布モデル  
(reproduced from [10]. Copyright(1995) The Japan Society of Applied Physics)

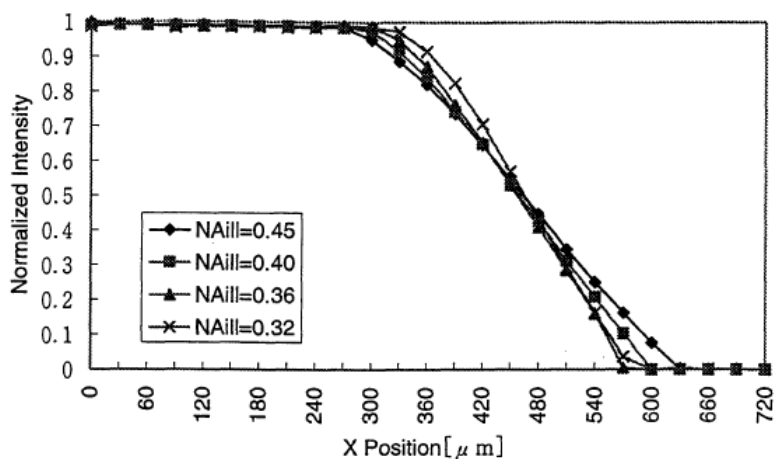


図 4.9; スリット照野のスキャン方向断面エッジ部の強度分布  
( $NA_{ill}$  はウエハ面での投影系開口数に照明系  $\sigma$  を乗じた数字)  
エッジ部強度分布はモデルでよく説明できる。  $NA_{ill}$  が大きい方がエッジ部のぼけが大きい。  
(reproduced from [10]. Copyright(1995) The Japan Society of Applied Physics)

表 4.1; スリット照野のスキヤン方向断面エッジ部の強度分布実測値 (reproduced from [10]. Copyright(1995) The Japan Society of Applied Physics)

$NA_{ill}$	Designed $\Delta r$ ( $\mu\text{m}$ )	Actual $\Delta r_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta r_2$ ( $\mu\text{m}$ )	Average $\Delta r_{12}$ ( $\mu\text{m}$ )	Asymmetry $(1/\Delta r_1 - 1/\Delta r_2)$ ( $\mu\text{m}^{-1}$ )
0.45	224.8	221.1	225.9	223.5	$0.961 \times 10^{-4}$
0.40	198.5	194.6	198.7	196.7	$1.060 \times 10^{-4}$
0.36	177.8	179.7	183.1	181.4	$1.033 \times 10^{-4}$
0.32	157.3	156.4	162.1	159.3	$2.248 \times 10^{-4}$

表 4.2; スリット照野のスキヤン方向スリット幅の一様性実測値 ( $NA_{ill} = 0.36$  時) (reproduced from [10]. Copyright(1995) The Japan Society of Applied Physics)

	Designed	Actual
$W_m$	8000 $\mu\text{m}$	7973 $\mu\text{m}$
$\Delta L(y)/W_m$	0	0.12% ( $3\sigma$ )

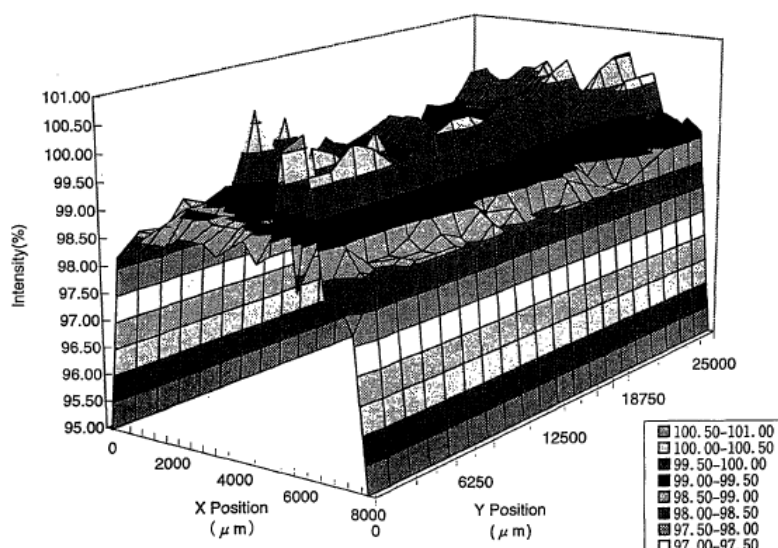


図 4.10; スリット照野内のスタティック照度均一性 ( $NA_{ill}=0.45$  時) (reproduced from [10]. Copyright(1995) The Japan Society of Applied Physics)

表 4.3; スリット照野の測定値から予測されるダイナミック照度均一性  
(最小露光パルス数 50 パルスで評価)

(4.27)式	各項の意味	オフセット or 再現性	評価値
(4.27)式 第2項	部分領域間 露光量再現性	再現性 (3 $\sigma$ )	<b>0.99%</b>
(4.27)式 第3項	非スキャン方向 照度均一性	オフセット	0.12%
(4.27)式 第4項	第3項の再現性	再現性 (3 $\sigma$ )	0.04%
(4.27)式 第5項	エッジぼけ 対称性	オフセット	0.03%
(4.27)式 第6項	第5項の再現性 + 露光位置ば らつきの影響	再現性 (3 $\sigma$ )	0.3%
(4.27)式 第7項	非スキャン方向 照度均一性と エッジぼけ対称 性のクロス項	再現性 (3 $\sigma$ )	0.004%
(a) (4.27)式 第3, 5項オフセット合計			0.15%
(b) (4.27)式 第4, 6, 7項再現性 (3 $\sigma$ ) 合計			0.31%
(スタティック照度均一性 ( $\pm 1\%$ ) + (a) + (b))合計			<b>1.46%</b>

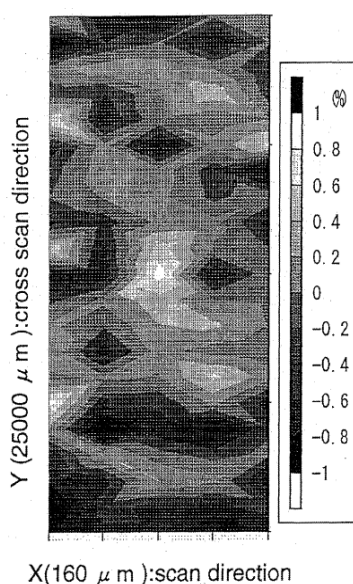


図 4.11; 部分領域内のダイナミック  
照度均一性 (NAill=0.45 時)  
(reproduced from [10]. Copyright(1995)  
The Japan Society of Applied Physics)

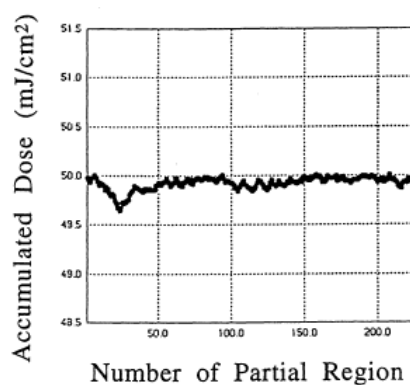


図 4.12; 露光フィールド内のダイナミック照度  
均一性  
(最小露光パルス数 50 での積算露光量)  
(reproduced from [10]. Copyright(1995)  
The Japan Society of Applied Physics)

#### 4.4 ステップ&スキャン露光での露光量変調制御

ここまで、いかに露光量を安定に保つか、という課題に対する解決策を論じて来たが、ここでは、露光量を故意に変調制御するためのロジックについて論じる。

デバイスの微細化に対応した光リソグラフィ露光装置の開発の試みは、より短波長である ArF エキシマレーザ（波長 193nm）の採用、更には、ArF 用液浸レンズによる開口数(N.A.) >1.0 の実現、偏光の積極利用、マスク・パターンに最適な照明形状を作り出す Programmable 照明の実現、と続いて行く。ハイエンドの半導体デバイスに要求される解像度が小さくなるにつれ、解像度の 1/10 が必要とされる線幅均一性の許容値も小さくなり、現在は線幅均一性が 5nm (3 $\sigma$ ) 未満の時代になった（第 1 章の表 1.1 参照）。そのため、AEC(Advanced Equipment Control)として、第 1 章の図 1.1 で説明したように、リソグラフィ工程の次のレジスト現像後またはパターン・エッチング後に再現性を持って発生するウエハ内線幅不均一性分布を補正するため、ウエハ露光時に意図的な補正制御をかける研究がなされて来た。早くには、線幅誤差を露光量制御で補正するもので、非スキャン方向は照明系内の透過率分布フィルタにて、スキャン方向は ArF エキシマレーザのエネルギーの変調にて行う方式が欧州の露光機メーカーとデバイスメーカーの共著として報告されている[17]。更に近年ではレジスト像質の 2 パラメータ（例えばパターン上面線幅と下面線幅、またはパターン上面下面平均線幅とパターン高さ、またはパターン上面下面平均線幅と縁減り値）の不均一性分布を同時に補正するため、ウエハ露光時の露光量制御とフォーカス制御に意図的な補正制御をかけることができるようになって来た[18]。図 4.13 にその一例を示す。補正前には 300 mm 径ウエハ面内の 50 nm パターンの線幅均一性（上面下面平均線幅）が 3.36nm (3 $\sigma$ )であったが、露光量制御とフォーカス制御による同時補正により 1.28 nm(3 $\sigma$ )に改善している。

上記のような投影露光装置の性能向上に合わせて、光源であるエキシマレーザの性能も向上し、一パルス毎に目標値を変化させて露光することが可能になっている。そこで、著者は、スキャン露光において積算露光量に対して所望の変調をスキャン方向にかかけたい時に、エキシマレーザにはどのようなパルス毎変調をかけたらよいかの考察を行い、良好な制御精度を実現できる方法を導出した。

今、積算露光量の所望の変調関数を  $m$  次多項式（ $m$  は正の整数）と仮定するとパルス毎のエネルギー制御に必要な変調関数は、その微分の  $(m-1)$  次多項式になると一見予想される。ところが、試行錯誤の検討の結果、パルス毎のエネルギー制御に必要な変調関数も  $m$  次多項式になることを発見したのである[19]。図 4.14 に、積算露光

量の所望の変調関数とパルス毎エネルギー制御の変調関数の関係の模式図を示す。

以下、その証明を行う。積算露光量の所望の変調を表す多項式を、

$$D(x) = \sum_{i=0}^m D_i x^i, \quad (4.35)$$

とおく。一方、パルス毎エネルギー変調を表す多項式を、

$$P(x) = \sum_{j=0}^m d_j x^j, \quad (4.36)$$

とする。 $D(x)$ は、 $P(x)$ を $N$ パルス積算した露光量なので、

$$D(x) = \sum_{k=1}^N P(x-(k-1)) = \sum_{k=1}^N \left[ \sum_{j=0}^m d_j \{x-(k-1)\}^j \right], \quad (4.37)$$

式(4.37)に式(4.35)を代入して整理すると、

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^m D_i x^i = & Nd_0 - \frac{N(N-1)}{2} d_1 + \frac{(N-1)N(2N-1)}{6} d_2 - \left\{ \frac{N(N-1)}{2} \right\}^2 d_3 + \cdots + (-1)^m \sum_{i=1}^{N-1} (N-i)^m d_m \\ & + Nd_1 x - N(N-1)d_2 x + \frac{(N-1)N(2N-1)}{2} d_3 x + \cdots + (-1)^{m-1} {}_m C_1 \sum_{i=1}^{N-1} (N-i)^{m-1} d_m x \\ & + Nd_2 x^2 - \frac{3N(N-1)}{2} d_3 x^2 + \cdots + (-1)^{m-2} {}_m C_2 \sum_{i=1}^{N-1} (N-i)^{m-2} d_m x^2 \\ & + Nd_3 x^3 + \cdots + (-1)^{m-3} {}_m C_3 \sum_{i=1}^{N-1} (N-i)^{m-3} d_m x^3 \\ & \vdots \\ & + Nd_m x^m. \end{aligned} \quad (4.38)$$

$x$ の冪乗の各次数の係数は左辺と右辺で等しいので、

$$\begin{pmatrix} D_0 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & -\frac{N(N-1)}{2} & \frac{(N-1)N(2N-1)}{6} & -\left\{ \frac{N(N-1)}{2} \right\}^2 & \cdots & (-1)^m \sum_{k=1}^{N-1} k^m \\ 0 & N & -N(N-1) & \frac{(N-1)N(2N-1)}{2} & \cdots & (-1)^{m-1} {}_m C_1 \sum_{k=1}^{N-1} k^{m-1} \\ 0 & 0 & N & -\frac{3N(N-1)}{2} & \cdots & (-1)^{m-2} {}_m C_2 \sum_{k=1}^{N-1} k^{m-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & N & \cdots & (-1)^{m-3} {}_m C_3 \sum_{k=1}^{N-1} k^{m-3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_m \end{pmatrix}. \quad (4.39)$$

方程式である式(4.39)の右辺の行列は上三角行列であり、一意的に解析解が求まる。

$$\left\{ \begin{array}{l} d_m = \frac{1}{N} D_m \quad , \\ d_{m-1} = \frac{1}{N} \left\{ D_{m-1} - (-1)^m \frac{N(N-1)}{2} d_m \right\} = \frac{1}{N} \left\{ D_{m-1} + \frac{m(N-1)}{2} D_m \right\} \quad , \\ \vdots \\ d_{m-k} = \frac{1}{N} \left\{ D_{m-k} - \sum_{k'=1}^k (-1)^{k'} C_{m-k} \sum_{i=1}^{N-1} i^{k'} d_{m-k+k'} \right\} \quad . \end{array} \right. \quad (4.40)$$

式(4.40)によれば、任意の  $m$  次多項式に対し、解を求めることができる。例えば、

$m=1$  の時、

$$d_0 = \frac{1}{N} \left\{ D_0 + \frac{(N-1)}{2} D_1 \right\}, \quad d_1 = \frac{1}{N} D_1 \quad , \quad (4.41)$$

$m=2$  の時、

$$\left\{ \begin{array}{l} d_2 = \frac{1}{N} D_2, \quad d_1 = \frac{1}{N} \{ D_1 + (N-1) D_2 \} \quad , \\ d_0 = \frac{1}{N} \left\{ D_0 + \frac{(N-1)}{2} D_1 + \frac{(N-1)(N-2)}{6} D_2 \right\} \quad , \end{array} \right. \quad (4.42)$$

$m=3$  の時、

$$\left\{ \begin{array}{l} d_3 = \frac{1}{N} D_3, \quad d_2 = \frac{1}{N} \left\{ D_2 + \frac{3(N-1)}{2} D_3 \right\}, \quad d_1 = \frac{1}{N} \left\{ D_1 + (N-1) D_2 + \frac{(N-1)(N-2)}{2} D_3 \right\} \quad , \\ d_0 = \frac{1}{N} \left\{ D_0 + \frac{(N-1)}{2} D_1 + \frac{(N-1)(N-2)}{6} D_2 - \frac{(N-1)^2}{4} D_3 \right\} \quad , \end{array} \right. \quad (4.43)$$

$m=4$  の時、

$$\left\{ \begin{array}{l} d_4 = \frac{1}{N} D_4, \quad d_3 = \frac{1}{N} \{ D_3 + 2(N-1) D_4 \}, \quad d_2 = \frac{1}{N} \left\{ D_2 + \frac{3}{2} (N-1) D_3 + (N-1)(N-2) D_4 \right\} \quad , \\ d_1 = \frac{1}{N} \left\{ D_1 + (N-1) D_2 + \frac{(N-1)(N-2)}{2} D_3 - (N-1)^2 D_4 \right\} \quad , \\ d_0 = \frac{1}{N} \left\{ D_0 + \frac{(N-1)}{2} D_1 + \frac{(N-1)(N-2)}{6} D_2 - \frac{(N-1)^2}{4} D_3 + \frac{1}{2} (N-1)^4 D_4 - \frac{(N-1)(2N-1)(8N^2-18N+9)}{30} D_4 \right\}, \end{array} \right. \quad (4.44)$$

となる。

式(4.40)は、ステップ&スキャン露光装置での露光量変調制御を実現する上で有用な公式である。図 4.13 にて紹介したウエハ内での線幅不均一性補正データは、式(4.40)



を用いて、高次の多項式補正を残差の大きな露光フィールドに適用することで更に改善できる可能性がある。

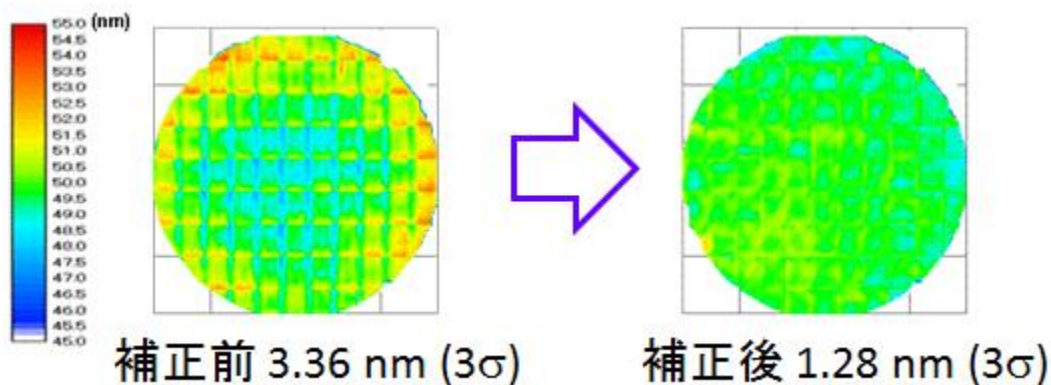


図 4.13; 露光量変調とフォーカス変調の同時制御による 300mm 径ウエハ内での 50 nm パターン線幅均一性の向上 [18]

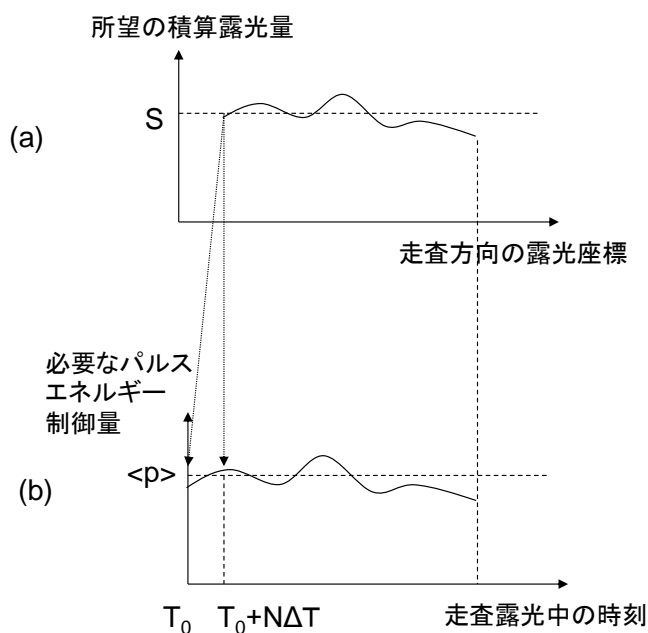


図 4.14; 所望の積算露光量の変調とそれに対応したパルス毎エネルギー制御の関係図 [19]

$N$ パルスでの積算露光量に所望の変調をかけたい場合、パルス毎にかけるべきエネルギー変調量を決定することが必要になる。

#### 4.5 第4章のまとめ

本章では、結像バジレットの一要因である露光量精度に関して、露光光源がパルスエネルギーばらつきを持つ場合について、ステップ&リピート投影露光装置（静止露光）、ステップ&スキャン投影露光装置（スキャン露光）について詳述した。特に、以下の点について述べた。

- 1) 静止露光での露光量制御方法としてカット・オフ方式、修正露光方式について、制御方法と期待できる積算露光量制御精度を理論と実験データを用いて説明した。単純な統計的平均化に比べ、著しく少ないパルス数で所望の積算露光量制御精度が得られ、その有効性を示した。
- 2) スキャン露光での露光量制御方法として、スリット照明のスキャン方向強度分布を台形に近似してダイナミック露光量均一性のモデル化を行い、台形近似が成り立つ系で実験データを取得した。モデルは実験データをよく説明でき、その有効性を示した。また、結像バジレットからの要求値が満たされることを示した。
- 3) スキャン露光での積算露光量のスキャン方向への変調制御方法のひとつとして、光源のパルスエネルギーの変調方法を示す公式を導いた。現像、エッチングなどの後工程で再現性ある線幅誤差が発生する場合には、予め逆補正をかけておく手段として有用である。

以上を表にまとめると表 4.4 になる。

表 4.4: 各種積算露光量制御方法の有効性

積算露光量制御方法	静止露光	スキャン露光
統計的平均化	有効	有効
カットオフ制御	少パルス化に非常に有効	適用不可
修正露光	少パルス化に更に非常に有効	適用不可
露光フィールド内変調	パルス光源制御では不可	パルス光源制御にて可能

第4章の参考文献：

- [1] G.M. Dubroeuq and D. Zahorsky, “KrF excimer laser as a future deep UV source for projection printing”, *Proc. of Microcircuit Engineering*, pp.73-78 (1982).
- [2] V. Pol, et al., “Excimer laser-based lithography: a deep ultraviolet wafer stepper”, *Proc. of SPIE*, **633**, pp.6-16 (1986).
- [3] K. Jain, “Advances in Excimer Laser lithography”, *Proc. of SPIE*, 710, pp.36-42 (1986).
- [4] D. Markle, “Deep UV Lithography: Problems and Potential”, *Proc. of SPIE*, **774**, pp.108-114 (1987).
- [5] D. H. Tracy and F. Y. Wu, “Exposure Dose Control Techniques for Excimer Laser Lithography”, *Proc. of SPIE*, **922**, pp. 437-443 (1988).
- [6] 鈴木一明, “エキシマレーザステッパ”, 電子材料 3 月号, pp.76-80 (1992).
- [7] 鈴木一明, “パターン露光装置(I)”, ULSI 製造装置実用便覧 (サイエンス・フォーラム), pp. 370-377 (1991).
- [8] A. Miyaji, K. Suzuki and A. Tanimoto, “Excimer lithography for ULSI”, *Optical and Quantum Electronics*, **25**, pp.297-310 (1993).
- [9] 鈴木一明 : “露光装置及び露光方法” (1987 年 6 月 19 日出願), 日本特許第 2773117 号, (1998).
- [10] K.Suzuki, K.Ozawa, O.Tanitsu and M.Go, “Dosage Control for Scanning Exposure with Pulsed Energy Fluctuation and Exposed Position Jitter”, *Jpn.J.Appl.Phys.*, **34**, pp.6565-6572 (1995). (申請論文 2)
- [11] 鈴木一明, 谷元昭一, 郷勝人, “露光制御装置及び該装置による露光方法” (1988 年 4 月 7 日出願), 日本特許第 2569711 号, (1996).
- [12] A. Tanimoto, A. Miyaji, Y. Ichihara, T. Uemura, and I. Tanaka, “Excimer Laser Stepper for Sub-half micron Lithography”, *Proc. of SPIE*, **1088**, pp. 434-440 (1989).
- [13] Y. Ichihara, S. Kawata, I. Hikima, M. Hamatani, Y. Kudoh, and A. Tanimoto, “Illumination system of an excimer laser stepper”, *Proc. of SPIE*, **1138**, pp.137-143 (1989).
- [14] S. Wittekoek, M. van den Brink, H. Linders, J. Stoeldrayer, J.W.D. Martens and D. Ritchle, “DEEP UV Wafer Stepper with Through The Lens Wafer to Reticle Alignment”, *Proc. of SPIE*, **1264**, pp. 534-547 (1990).

- [15] R.F. Hollman, F. Cleveland, E.M. Da Silveira, R.W. McCleary, and R.W. Strauten, “Design and Performance of a Production-Oriented Deep UV Wafer Stepper”, *Proc. of SPIE*, **1264**, pp. 548-555 (1990).
- [16] 鈴木一明：“露光制御方法、走査露光方法、露光制御装置及びデバイス製造方法” (1993年3月15日出願)，日本特許第3296448号, (2002).
- [17] J. van Schoot, et al., “CD Uniformity Improvement by Active Scanner Corrections”, *Proc. of SPIE*, **4691**, 304 (2002).
- [18] 鈴木一明, “露光装置の性能を最大限活用する APC/AEC”, *O plus E*, Vol.32, pp.1079-1083 (2010).
- [19] 鈴木一明、土岐剛史、田中大士：“露光量演算方法、並びに露光方法及び装置” (2010年7月14日出願)，日本特許公開 P2012-23215A (2012).

## 第5章 製品への展開

第3章では、ステップ&スキャン投影露光装置の設計における、結像バジェットによるシステム設計手法について論じた。また、第4章では、特に露光量制御について、制御方法の検討、制御精度のモデル式の導出、モデルの検証データを紹介した。本章では、5.1節において、スキャン露光に伴う要素性能データ、総合性能としての結像性能データを紹介する。

5.2節では、電子ビーム投影露光装置のシステム・コンセプトと結像バジェットを概説し、結像データを紹介する。

### 5.1 ステップ&スキャン投影露光装置での要素性能データと結像データ

第3章で論じたシステム設計に基づいた製品がNSR-S201Aであり、ニコンにとって第1世代のステップ&スキャン投影露光装置であった。図5.1にその外観写真を示す[1]。その結像バジェットと主要性能は、既に表3.2、表3.3で説明済みであるが、結像性能仕様とそれに関連する要素性能を選び出して表5.1に改めて示す。

ステップ&スキャン投影露光装置におけるウエハステージとマスクステージの同期制御について図3.5を用いて説明したが、ここで、ウエハステージがパターン露光での最高速度80 mm/secでy方向にスキャンしている時の、y方向の同期制御誤差を図5.2に示す[2]。上段が生データ、中段が露光時間0.1 secでの移動平均値、下段が移動平均を取る際のRMS値(Root Mean Square ;  $1\sigma$ )である。生データは $\pm 50$  nmで変動している。移動平均は概ね $\pm 3$  nmに入っているが、6 nm近いところもあり、ダイナミック・ディストーションに影響している。RMS値は25 nm~35 nmであり、表3.2、表5.1に示した結像バジェットでの要求値22 nmより、やや大きい。NSR-S201Aは第1世代のステップ&スキャン投影露光装置であったため、マスクの粗動ステージにはエア・ガイドを採用したものの、開発スケジュールの制約からウエハステージにはV-フラットを用いた機械接触式ガイドを採用していたため、やや振動が多いシステムであった。第2世代からはウエハステージでもエア・ガイドが採用され、同期精度は改善されている。

図5.2の上段の同期精度の生データを頻度分布にしたものが図5.3である[2]。概していうと三角形をしており、第3章で仮定した振動のヒストグラムが妥当であることが示された。

図 5.4 は、図 5.2 のデータと同時所得したウエハステージの速度一定性（露光位置ばらつき）のデータである[2]。縦軸は露光位置のオフセットを示していて、 $\pm 0.6 \mu\text{m}$  に入っている。4.3.2 項で露光位置ばらつきとして  $1.0 \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ )を挙げたが（表 5.1 にも記載）、許容誤差内であることが確認された。

図 5.5 は、ウエハステージが  $80 \text{ mm/sec}$  でスキャン中のフォーカス、レベリング制御の再現性データである[3]。縦軸は多点のオートフォーカスビーム検出値から決定した制御目標面からの制御誤差を示している。露光中のフォーカス制御誤差はプラス側に偏っているが $\pm 100 \text{ nm}$  に入っている。Tilt-X の値は $\pm 5 \mu\text{rad}$  に入っており、スリット照野の長手  $25 \text{ mm}$  に対し幅 ( $6\sigma$ )で  $125 \text{ nm}$  に入っている。Tilt-Y の値は $\pm 10 \mu\text{rad}$  であるが、スリット幅  $8 \text{ mm}$  に対し幅 ( $6\sigma$ )で  $80 \text{ nm}$  に入っている。Tilt 成分は X, Y 方向を合わせて  $75 \text{ nm}$  ( $3\sigma$ )となる。表 3.2、表 5.1 に示した結像バジレットの要求値のフォーカス制御精度  $100 \text{ nm}$  ( $3\sigma$ )、レベリング制御精度  $100 \text{ nm}$  ( $3\sigma$ )を満たすデータとなっている。

図 5.6 は第 4 章で説明したダイナミック照度均一性の露光フィールド全面でのデータである。 $1.0 \%$  ( $3\sigma$ ) に入っている[2]。図 5.7 は複数の露光フィールドを含んだダイナミック露光量制御精度のデータである[2]。ここでも  $1.0 \%$  ( $3\sigma$ )に入っている。表 3.4、表 5.1 の結像バジレットでの  $2 \%$  ( $3\sigma$ )という要求値を満たしている。

以上で、線幅制御精度に影響するフォーカス、露光量が結像バジレットを満たし、ステージの同期精度も概ね満たしていることが確認できた。

図 5.8 に静止露光とスキャン露光でのレジスト像の SEM 写真を示す[3]。  $250 \text{ nm}$  のパターンにて縦線、横線とも両方式の露光で差が見られないことがわかる。

図 5.9 は、(a)  $250 \text{ nm}$  と (b)  $200 \text{ nm}$  のライン&スペースパターンの線幅データを横軸をフォーカスオフセット値、縦軸をレジスト像のボトム線幅でプロットしたものである[2]。(a)  $250 \text{ nm}$  のパターンでは、厚さ  $820 \text{ nm}$  のレジストを露光し、露光フィールド内 9 点の縦線、横線に対して線幅均一性  $10 \%$  ( $3\sigma$ )を与えるフォーカスの共通深度は  $1,000 \text{ nm}$  前後となった。また、(b)  $200 \text{ nm}$  のパターンでは、厚さ  $700 \text{ nm}$  のレジストを露光し、露光フィールド内 5 点の縦線、横線に対して線幅均一性  $10 \%$  ( $3\sigma$ )を与えるフォーカス深度は  $900 \text{ nm}$  前後が得られた。

図 5.8、図 5.9 に示したデータから、システム設計での結像バジレットで目論んだ性能が達成されていることが確認できた。



図 5.1; ステップ&スキャン投影露光装置  
NSR-S201A の外観図 [1]

表 5.1; NSR-S201A の仕様、許容誤差量

性能項目	仕様値、許容誤差量
標準解像度	250 nm
線幅制御精度	±10 % (±25 nm)
限界解像度	200 nm
マスク&ウエハステージ追従性	22 nm (σ)
ウエハステージ露光位置ばらつき	1 μm (3σ)
フォーカス制御精度	100 nm (3σ)
レベリング制御精度	100 nm (3σ)
ダイナミック照度均一性	2 % (3σ)
露光時の最大ウエハステージ速度	80 mm/s

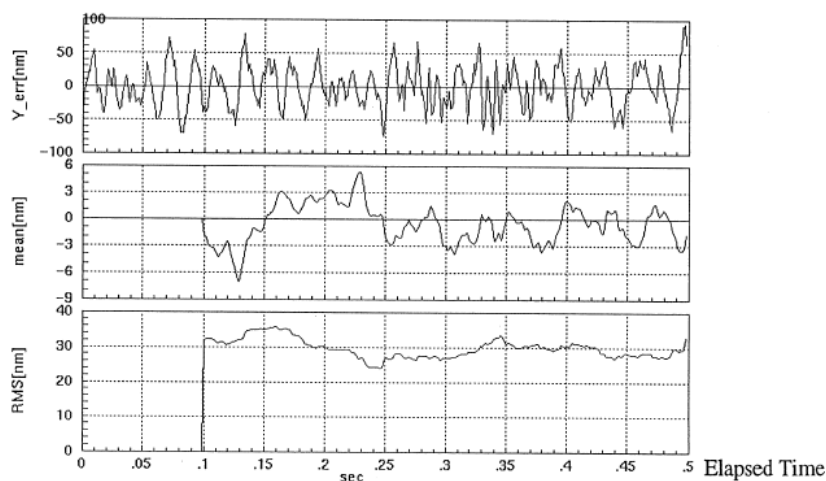


図 5.2; マスク&ウエハステージのスキャン方向の同期制御誤差 [2]  
ウエハステージ速度 80 mm/sec。

(上段 ; 生データ、中段 ; 0.1 sec 移動平均、下段 ; RMS 値)

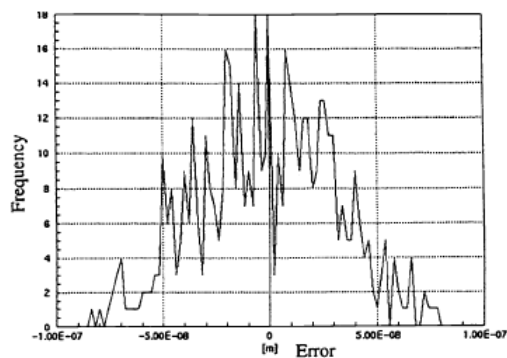


図 5.3: 同期制御誤差のヒストグラム [2]  
(図 5.2 上段のデータの頻度分布)

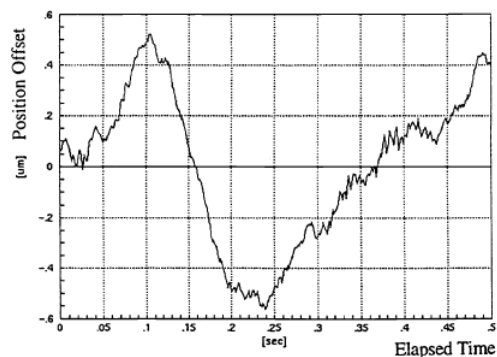


図 5.4: ウエハステージのスキャン方向の速度安定性 (露光位置ばらつき) [2]  
(図 5.2 上段のデータと同時取得)

図 5.5: フォーカス&レベリング

制御精度[3]

(ウエハステージ 80 mm/sec)

縦軸は多点オートフォーカスビーム検出器から決定した、制御目標面からの制御誤差を表す。Tilt-X, Tilt-Yの縦軸のスケールを Z 方向換算すると、25 mm×8 mm のスリット照野の幅の半分を乗じて Tilt-X 8 μrad が 100nm、Tilt-Y 25 μrad が 100 nm である。露光は 200~600 msec 間に行われた。

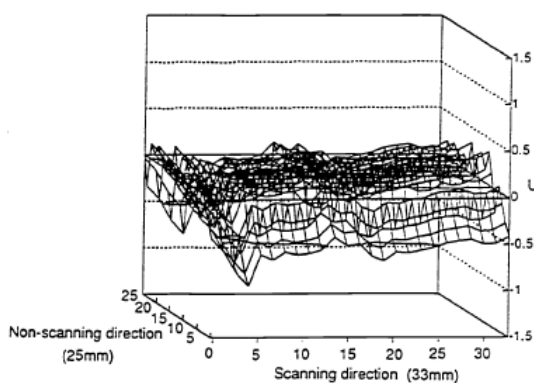
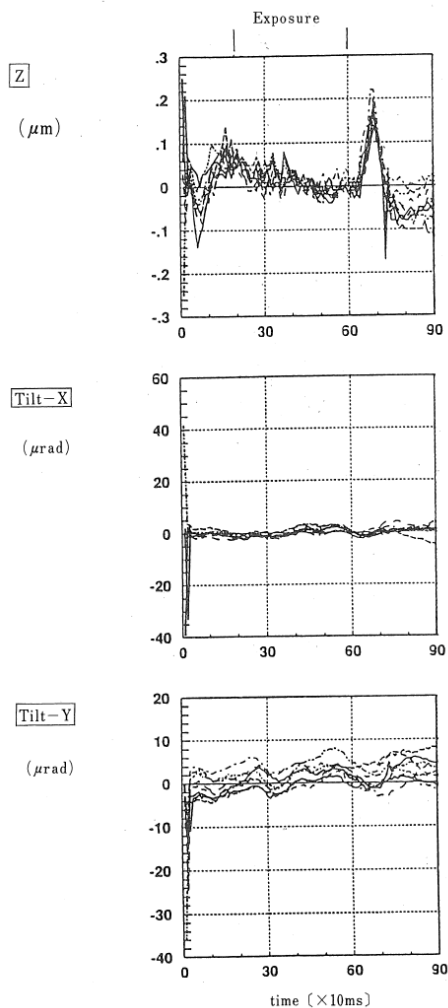


図 5.6: 露光フィールド内  
ダイナミック照度均一性 [2]  
(横方向がスキャン方向)

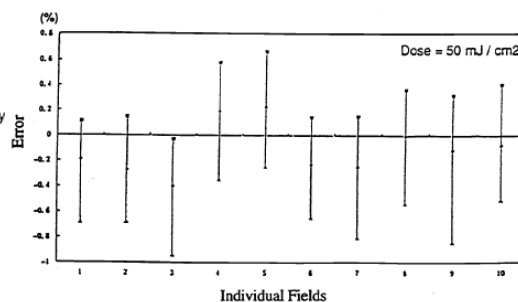


図 5.7: ダイナミック露光量制御精度 [2]  
(複数の露光フィールド、  
開口数 0.60、 $\sigma=0.75$  時)



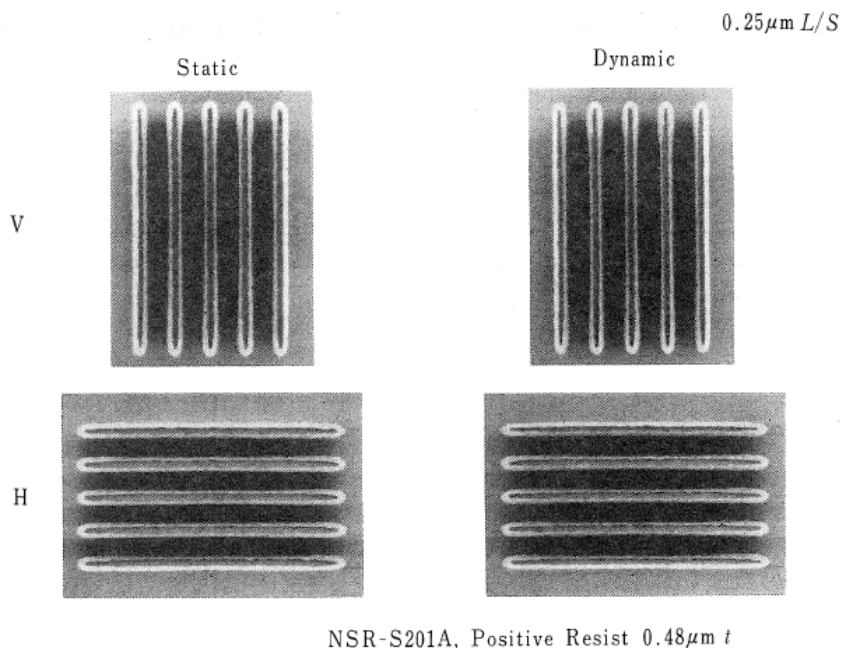


図 5.8: 静止(static)露光とスキャン(dynamic)露光によるポジレジスト像の SEM 写真 [3]  
250 nm ライン&スペースパターンが良好に解像している。

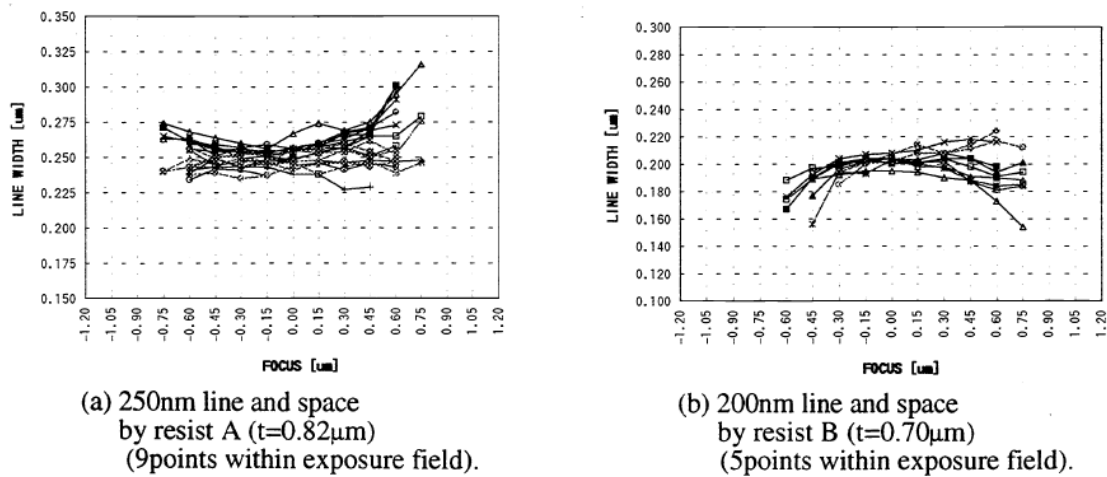


図 5.9: ライン&スペースパターンの線幅データ [2] (開口数 0.60、照明系  $\sigma=0.75$  時)  
露光フィールド内の(a) 9 点、250 nm 縦線、横線、(b) 5 点、200 nm 縦線、横線、のデータにて線幅均一性 10% ( $3\sigma$ ) を与えるフォーカス共通深度は、それぞれ 1,000 nm、900 nm 前後である。

## 5.2 電子ビーム投影露光装置でのシステム設計と結像データ

本博士論文では、第2章～第5章の5.1節まで、光リソグラフィ用投影露光装置での結像バジェットを用いたシステム設計手法について論じて来たが、5.2節ではこのシステム設計手法の適用例として、著者がシステム設計者としてリードした電子ビームリソグラフィ用投影露光（EPL; Electron Projection Lithography）装置の場合について述べる。

波長が 193 nm である ArF エキシマレーザを光源とした投影露光装置では、投影光学系の開口数 (N.A.) を 0.9、 $k_1$ ファクタを小さめの 0.5 としても、式(2.4)から解像度は 107 nm 程度までである。1990 年代後半には、ポスト ArF を担うリソグラフィとして標準解像度 100 nm 以下を目指した露光技術の開発が進められた。その候補のひとつが電子ビーム投影露光(EPL)方式であり、米国のグループおよび著者が属するニコンにて独自に製品化が進められた。その後、ArF 液浸がデバイス量産用の露光技術として開発が進むに従い、後者の EPL 製品 (NSR-EB1A) についてはコンソーシアムにてプロセス評価が実施されたところで、プログラムが終了した。

電子ビーム投影露光(EPL)方式の最大の特徴は、電子ビームとしては非常に大きな面積 (ウエハ上 0.25 mm×0.25 mm) を一度に露光できることと、電子ビームの断面積が大きいことから同じ解像度を得るための電流値を大きく注入でき、結果として 100 nm 以下の解像度と 1 時間当たり 20 枚程度のウエハ ( $\phi$  200 mm) の露光が期待できることであった。そこで、EPL のシステムの説明の前に、5.2.1 項にてまず電子ビームでの解像度を説明し、光の結像との違いを明らかにする。

### 5.2.1 電子ビーム投影露光装置での解像度と近接効果

光リソグラフィ投影露光装置では、屈折レンズや反射面を使用して投影光学系の収差は良好に補正されているので、解像度は回折限界で決まっている。一方、電子ビームリソグラフィでは、数 10～100 keV のエネルギーの電子ビームを用いるため、そのド・ブロイ (de Broglie) 波長は数 pm と非常に小さく、回折限界は極小となる。一方、電子光学系の制約の多さから収差補正の自由度が少なく残収差による blur (ぼけ) が大きい。また、ウエハ処理能力向上のために電流値を上げると、電子同志のクーロン反発力でエネルギー幅が広がったり (バルシェ効果)、ビーム自身の拡がりも大きくなるという特徴がある。更に、レジストを透過した電子がシリコン・ウエハ内で多重散乱してレジスト内に逆戻りする作用 (近接効果) が発生する。以上をまとめたものが表 5.2

である。今、電子ビームのウエハ面上での開き半角を  $\alpha$  とおくと、収差は  $\alpha$  の冪乗に比例する（収差の種類によって冪乗の次数は異なる）。一方、電子間の相互作用の影響は  $\alpha$  に逆比例する。よって、使用予定の電流値の条件下で、収差と電子間相互作用の影響がバランスする開き半角  $\alpha$  で、blur が最も小さくなり解像度が最もよくなる。EPL では、25  $\mu\text{A}$  を最大電流とすると、6~8 mrad が最適値である。

今、電子ビームの加速電圧を  $E$  (keV) とすると、電子の静止質量を  $m_e$ 、真空中の光速を  $c$ 、電子の速度を  $v$  として、

$$\beta = v/c = \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{E}{m_e c^2}\right)^2}} \quad (5.1)$$

ここで、 $m_e c^2$  は 511 keV である。電子のド・ブローイ波長  $\lambda$  は、プランク定数  $h$  を電子の運動量  $p$  ( $m_e v$  をローレンツ・ファクタ  $\sqrt{1-\beta^2}$  で割ったもの) で割ったものなので、

$$\lambda = h/p = h\sqrt{1-\beta^2} / (m_e c \beta), \quad (5.2)$$

である。よって、ド・ブローイ波長は 10 keV で 12.2 pm、100 keV で 3.9 pm となる。ビーム開き半角を光の開口数と同様に扱い 6-8 mrad とすると、100 keV にて  $\lambda/\alpha$  は 1 nm 未満となり、効かないことがわかる。一方、電子間相互作用によるビーム blur (ビームの進行方向に垂直断面方向) の半値幅(FWHM)  $d_c$  の解析式は、単レンズ系にて、 $q$  を素電荷、 $\epsilon_0$  を真空の誘電率として、

$$d_c = \frac{1}{6\sqrt{2\pi\epsilon_0}} \left(\frac{m_e}{q}\right)^{1/2} \frac{LI}{\alpha V^{3/2}} = 1.0 \times 10^4 \frac{LI}{\alpha V^{3/2}}, \quad (5.3)$$

が導出されている ([4] を参考に著者が導出)。ここで、 $\alpha$  はビーム半角、 $V$  は加速電圧、 $I$  はビームの電流値、 $L$  は電子ビーム進行方向の系の長さである。EPL の電子光学系に対しては、更に 2 つのパラメータ ; 投影倍率  $M$  およびサブフィールド・サイズ  $SF$  を加え、モンテカルロ・シミュレーション結果に対して 6 パラメータの指数部を決めるフィッティングがなされ [5-7]、決めたパラメータの実数値に近い分数を使って、ビーム blur の半値幅として次の式が導出されている [8]。  $k_c$  を比例定数として、

$$d_{c, EPL} = 12.82 \frac{I^{0.83} L^{1.26} M}{\alpha^{0.6} SF^{0.55} V^{1.54}} \approx k_c \frac{I^{5/6} L^{5/4} M}{\alpha^{3/5} SF^{1/2} V^{3/2}} \quad (5.4)$$

ここで、EPL でのパラメータ値として、 $\alpha$ 、 $V$ 、 $I$ 、 $L$ 、 $M$ 、 $SF$  にそれぞれ 6 mrad、100 keV、20  $\mu\text{A}$ 、609.6 mm、1/4 および 0.25 mm を仮値として与えると、 $d_{c, EPL}$  とし

て 60.0 nm が得られる[6]。収差による blur とバランスが取れている時には、合成された blur は両者の二乗和の平行根になるため、blur の総量は 84nm となる。

このように解像度と電流値が密接に関係していることが電子ビーム露光機の特徴である。感度  $S$  ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ) のレジストが塗布された  $\phi 200$  mm のウエハ全面を露光することを考える。この時、ウエハ露光にかかる時間  $T_{e, total}$  は、

$$T_{e, total} = \frac{S}{I} \times 314, \quad (5.5)$$

今、レジスト感度を  $10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  とすれば、上記の電流値  $20 \mu\text{A}$  では、157 秒になる。第 2 章の式(2.1)にて紹介したスループットの式にて、分母の  $nT_e$  を  $T_{e, total}$  に置き換えて、

$$Th = \frac{3600}{T_{ex} + T_{al} + nT_{step} + T_{e, total}}, \quad (5.6)$$

なので、右辺分母の最初の 3 項目まで (ウエハ交換時間、アライメント時間、露光フィールド間のステージ移動時間) を加味すると、スループットは約 20 枚/時が見込まれる。スループットを上げるためには電流値を大きくする必要があり、その時は解像度が損なわれるというトレード・オフがある。また、レジスト感度を上げるとやはりスループットが向上するが、単位面積当たりに入射してレジストと相互作用を起こす電子の数の揺らぎから来るショット・ノイズにより、露光パターン・エッジのラフネスに影響が出て来る、という懸念があり、レジスト・プロセスも加味して、最適化が図られる[8]。

次に、表 5.1 の最下段の近接効果補正について説明する。シリコンウエハに塗布されたレジストに入射した電子は、前方散乱を受けてビーム blur がやや広がる。前方散乱の拡がりの標準偏差  $\sigma$  ( $\mu\text{m}$ ) は、次の近似式により与えられる[9]。

$$\sigma = \left( \frac{9.64z}{V} \right)^{1.75}. \quad (5.7)$$

ここで、加速電圧  $V$  (kV)、レジスト厚  $z$  ( $\mu\text{m}$ ) であり、それぞれが 100 kV, 0.5  $\mu\text{m}$  の時には、 $\sigma$  は 5 nm となり、十分に小さい数字である。

次に、シリコン基板に入射した電子は、入射経路に沿って二次電子を発生させながら、電離損失に関する Bethe の公式に従って徐々にエネルギーを失うとともに、シリコン原子核によりラザフォード散乱を受けて方向を変える。両者を示す式はそれぞれ、

$$-\left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{coll}} = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left( \frac{2\pi e^4 N_e}{m_e v^2} \right) \left\{ \ln \frac{m_e v^2 E}{2I_p^2 (1-\beta^2)} - \left( 2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2 \right) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8} \left( 1 - \sqrt{1-\beta^2} \right)^2 \right\}, \quad (5.8)$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left( \frac{e^2 Z}{2m_e v^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}, \quad (5.9)$$

となる。ここで、 $N_e$  は基板の電子密度であり物質密度に元素番号  $Z$  を掛けたもの、 $I_p$  は基板物質のイオン化ポテンシャルで 10～数 10 eV である。ラザフォード散乱の式において、 $\theta$  は電子の進行方向から計測した散乱角である。シリコン基板内で多重散乱された電子のうち、シリコンウエハの表面に戻ってレジストに再突入する電子を後方散乱電子 (Backscattered Electron) と呼び、その後方散乱の拡がりの標準偏差を  $\sigma_b$  ( $\mu\text{m}$ ) とする。電子ビーム入射点からの距離を  $r$  とし、注入電荷量を  $Q$ 、レジスト通過時の電子エネルギーの損失を  $\Delta E_f$ 、レジスト厚を  $z$  とすると、レジスト内でのエネルギー分布  $\varepsilon(r)$  は、次の近似式により与えられる[10]。

$$\varepsilon(r) = \frac{Q\Delta E_f}{z} \left[ \frac{1}{2\pi\sigma_f^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_f^2}\right) + \frac{\eta_e}{2\pi\sigma_b^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_b^2}\right) \right], \quad (5.10)$$

ここで、100 keV の入射電子に対し、 $\sigma_b$ 、 $\eta_e$  の値としてそれぞれ 22.1  $\mu\text{m}$ 、0.74 という値が紹介されている[10]。 $\sigma_f$  は式(5.7)より 5 nm であり、その拡がりは無視できる。

一方、100 keV の入射電子 30,000 に対し、後方散乱電子の分布をモンテカルロ・シミュレーションした結果が図 5.10 である[11]。この図からは、概して言うと、後方散乱電子半径は約 50  $\mu\text{m}$  強 ( $3\sigma$ ) なので、 $\sigma_b$  は約 17  $\mu\text{m}$  となり、先の論文値のよりやや小さめである。このように露光したいパターンの線幅よりはるかに大きな散乱半径のため、所望の線幅を得るには、露光量自身を調整するか、投影露光の場合には予めパターン線幅にバイアスをのせて補正することが必須となる。

### 5.2.2 システム設計と結像バジェット

まず、電子ビーム投影露光 (EPL) のコントラスト生成原理について説明する。光リソグラフィにおいてはマスク上のクロム・パターンが露光光をほぼ 100% 吸収することによる吸収コントラストを利用している。これに対し、電子ビームにおける散乱コントラストは、透過型電子顕微鏡で用いられていたものをリソグラフィの分野に応用したものであり、字消し板のようにパターン部に開口があいているステンシル・パターンを感光フィルム上に投影転写したのが最初の報告である[14]。図 5.11 は散乱コントラストによる結像原理を説明したもので[11]、ステンシル・マスクの開口を通過した電子はコントラスト・アパーチャの中心を通過してウエハ面上に達するが、ステンシル・マスクのシリコン薄膜部に入射した電子はそのほとんどがラザフォード散乱されて進行方

向を変えるためコントラスト・アパーチャにてカットされてウエハ面には達しない（この図中では「Mask」の代わりに「Reticle」を用いている）。得られるコントラストは、コントラストのアパーチャの半径（ウエハ面への見込み半角に対応）とシリコン・ステンシルの厚さで決まる。図 5.12 は見込み半角とシリコン・ステンシルの厚みを変数に、100 keV 電子ビームのコントラストの曲線を描いたものである[11, 13]。ビーム開き半角は 6 - 8 mrad なので、コントラスト・アパーチャの見込み半角は 10 - 20 mrad が望ましい。今、見込み半角 10 mrad、厚み 2  $\mu\text{m}$  とすると、99.9%以上のコントラストが得られる。ステンシルの散乱マスクは、マスクでの吸収熱がないというメリットもある。

ステンシル・マスクの欠点は、宙に浮いたパターンで電子ビームを遮ることができないことである。一般には、宙に浮いたパターンを避けるために所望のパターンを 2 分割して、2 重露光にて転写する必要がある。この 2 重露光を不要とするため、米国の研究所では薄膜（メンブレン）の上に散乱パターンを配したメンブレン・マスクを標準とする露光システムの開発が試みられた[15]が、メンブレン部を電子が透過する際に電子の一部が吸収されること、更に電子のエネルギー幅が広がり、ウエハ上でのビーム blur が少し劣化する欠点がある[12]。

ニコンでの電子ビーム投影露光装置は、まず標準解像度 100 nm の装置をめざして 1990 年代後半から開発が進められた（第 1 章の表 1.1 の半導体技術ロードマップ参照）。システム設計の第 1 ステップとして、パターン一般に対する線幅均一性の要求値は標準解像度の 10%の 10 nm ( $3\sigma$ )と設定した。ウエハサイズは 200 mm、マスクは 200 mm ウエハから作成することとし、後述するように  $\times 1/4$  の投影系とウエハ上 5 mm の偏向幅により、20 mm  $\times$  25 mm のウエハ領域を露光可能とした。

システム設計の第 2 ステップの一項目として、マスクの設計がある。まず、解像度を重視してステンシル・マスクの採用を決定した。マスク上の 1 回の照明領域を  $\square 1$  mm 強とし、ウエハ上にて  $\square 0.25$  mm の領域を露光するとして、これをサブフィールドと呼ぶこととする。マスクは図 5.13 のようにシリコンウエハを深堀エッチングして作成した井桁構造に障子紙のように厚さ 2  $\mu\text{m}$  の薄膜部を残したものとした[8, 11, 13]。露光中のマスク & ウエハステージのスキャン方向を Y 方向にとると、電子ビームの 1 回の偏向にて X 方向に 20 個分のサブフィールドを露光（X 方向幅は 5 mm）、1 回のマスク & ウエハステージの走査で Y 方向に 100 個分のサブフィールドを露光（Y 方向幅は 25 mm）する。この 5 mm  $\times$  25 mm の領域をストライプと呼ぶ。これを Y 方向ステージのターンを繰り返して順次露光することで、最終的に 1 枚のステンシル・マスクか

ら 20 mm×25 mm が露光できる。ところで、マスク上で隣り合うサブフィールド間にある 0.3 mm 分の非パターン領域（ストラット＋スカート）はウエハ上では偏向を用いて詰めて露光する必要がある。図 5.14 に、ウエハ上でのパターン継ぎの様子について示した。図 5.15 には電子ビーム投影露光をマスクステージとウエハステージの走査露光により行う場合の装置全体の動きを示した[16]。ウエハ上のサブフィールドのピッチは 0.25 mm であるが、マスク上でのサブフィールド・パターンのピッチは 1.3 mm であるため、ウエハステージはマスクステージに対し、1/5.2 の速度比で走査される。この比率は投影倍率 1/4 と異なるため、露光中に電子ビームはウエハステージのスキャン方向にトラッキングする必要がある。しかも隣り合うサブフィールド露光において、ウエハステージ座標系での電子ビームの中心位置はスキャン方向にずらす必要がある。図 5.16 にビーム偏向の様子を示した。ウエハステージ座標系では 8 の字形の偏向だが、ウエハ上では一行ずつ順次サブフィールドが露光される。同期制御としてはマスクステージ、ウエハステージの予定位置からのずれは干渉計で計測され、ウエハ面上換算のズレの差分をウエハ上での電子ビームの偏向制御にて補正することにした。

次に、システム設計の第 3 ステップとして結像バジレットの検討に入る。電子ビームリソグラフィにおいては、5.2.1 項で述べたように電子光学系の収差と電子間相互作用が解像度を定める blur の主要因であった。フォーカス誤差も blur の一要因であるが、ビーム開き半角  $\alpha$  が小さいために、フォーカス誤差  $\Delta Z$  の blur への寄与は  $2\alpha\Delta Z$  であり、blur の主要因にはならない（仮にビーム開き半角を 6 - 8 mrad, フォーカス誤差を 500 nm とし、blur への寄与  $2\alpha\Delta Z$  は 6 - 8 nm）。そこで著者は blur 均一性バジレットを導入し、その中の要因としてフォーカス誤差やビーム投影位置の同期誤差を組み入れた。また、5.2.1 項で述べた近接効果補正は、マスクのパターン線幅補正にて行うこととした[12]。表 5.3 に構築した線幅 100 nm パターンに対する結像バジレットを示す（この表の中では「Mask」の代わりに「Reticle」を用いている）。パターン継ぎ部を含む場合の線幅均一性は 10 nm ( $3\sigma$ )、継ぎ部を除いた場合の線幅均一性は 7 nm ( $3\sigma$ )として、露光量均一性 3% ( $3\sigma$ )、と blur 均一性 10 nm ( $3\sigma$ )からなるバジレットを構築した[11]。

更に、サブフィールド間にオーバーラップ領域（Fuzzy Boundary）を設けて線幅制御精度が厳しいパターン部の分割&継ぎ露光を回避することを可能なようにした [11]。

### 5.2.3 実機データ

以上に述べたシステム設計によって開発したのが電子ビーム投影露光装置 NSR-EB1A である。図 5.17 にユニット構成図を示した（この図中では「Mask」の代

わりに「Reticle」を用いている)。電子銃から発生した電子ビームは正方形に整形され、偏向器によってマスク上のサブフィールドのパターンを照明する。マスクの開口部を通過した電子はコントラスト・アパーチャを通過し、偏向器によってウエハ面上の目標位置に投影される。電子銃からウエハまで、そしてマスク&ウエハステージ周辺は真空が保たれ、マスク&ウエハ搬送系もロードロックを介して真空部を持つ。マスクは剛体とは言えないため、マスク・パターンの高さセンサを備える。ウエハステージ上には電流値計測センサ（ファラディ・カップ）、空間像計測センサ（ナイフ・エッジ）、照度均一性計測センサ（ピンホール）が載置され、また、投影光学系下面には反射電子検出器が備わる。その他は、光リソグラフィ用投影露光装置と同様である。

以下、NSR-EB1A で取得したデータを紹介する。まず、パターン投影位置の同期制御精度を図 5.18 を用いて説明する[16]。ウエハステージ上の空間像計測センサのナイフ・エッジ上にマスク・パターンで形成した矩形ビームが投影される。スキャン露光中に投影ビームの位置がずれると、空間像計測センサの開口部を通過する電子ビームの断面積が変化し、信号出力の変化として計測できる。図 5.18 に示したように、マスクステージとウエハステージの位置誤差を電子ビーム偏向により補正しない場合には-40 nm~+100 nm のビーム位置ずれが発生していたのが、補正制御を効かせると-20 nm~+20 nm（10 nm (3 $\sigma$ )程度）に収めることができる。

次に、電子ビームにおける照明均一性データを図 5.19 を用いて説明する[17]。マスク上 30  $\mu$ A の電流を与えた時、ウエハ面上では、1.71 % (3 $\sigma$ )が得られており、表 3.2 の結像バジェットに示した露光量均一性 3 % (3 $\sigma$ )を満たす値が得られている。

最後に、スキャン露光時の総合性能データの例として、レジスト像のデータを示す。図 5.20 は、ウエハ上 5 mm の偏向幅の 20 サブフィールドのうち、左右のサブフィールド（1 番目と 20 番目）と中心のサブフィールド（10 番目）の 70 nm パターンチャートの SEM 写真である。縦、横、斜めのライン&スペースパターン、孤立パターンともに解像している[17]。図 5.21 は、ウエハ上 5 mm の偏向幅（X 方向）、25 mm のステージスキャン長（Y 方向）の領域（ストライプ）において、サブフィールド内 9 点、偏向幅内 5 サブフィールド、スキャン長の中で 3 偏向の箇所計測した縦、横の 100 nm ライン&スペースパターンの線幅均一性データである[17]。線幅均一性として 5.1 % (3 $\sigma$ )が得られている。表 5.3 で意図したパターン継ぎ部を含まない領域でのレジスト像の線幅均一性 5.1 nm (3 $\sigma$ )とマスク線幅均一性 3.5 nm (3 $\sigma$ )の二乗和の平方根 6.1 nm (3 $\sigma$ )に比べ、実データは小さくなっており、システム設計で意図した性能が出ている。



表 5.2; 光と電子ビームの解像度の違い

種類	パラメータ	光	電子ビーム
回折限界	波長 (電子:ド・ブロイ波長) $\lambda$ 開口数 $\rho$ または開き半角 $\alpha$	大	小
光学系収差	開口数 $\rho$ または開き半角 $\alpha$ 波長幅 $\Delta\lambda/\lambda$ またはエネルギー幅 $\Delta E/E$	小	大
電子間相互作用 (クーロン効果)	電流値 $I$ 電子加速電圧 $V$ ビーム径 $SF$ 開き半角 $\alpha$ 倍率 $M$ 系の長さ $L$	無	大
基板からの反射	電子エネルギー $E$ 基板種類	小 (反射防止コートにて)	大 (近接効果と呼ばれる)

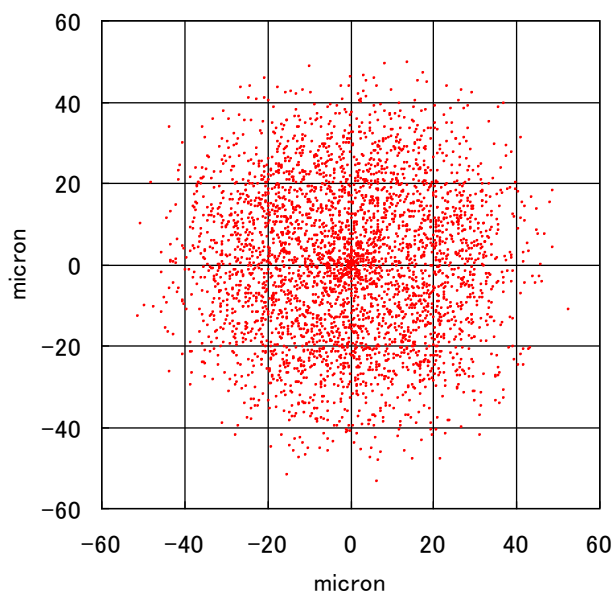


図 5.10; シリコン基板からの反跳電子分布[11]  
(モンテカルロ・シミュレーションにて  
100 keV 電子を 30,000 粒子入射)

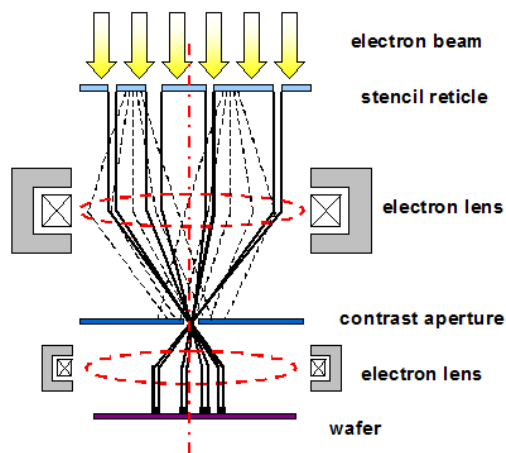


図 5.11; 散乱コントラストによる結像原理[11]

マスクのシリコン部での散乱電子はコントラスト・アパーチャで止まり、ウエハには達しない。

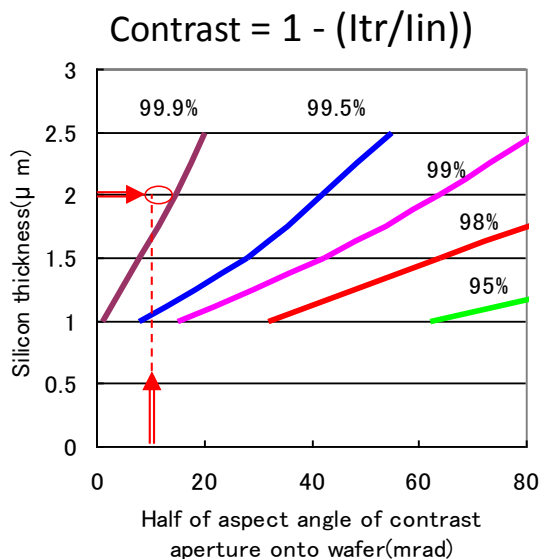


図 5.12; 100 keV 電子ビームに対するシリコン・ステンシルマスクの散乱コントラスト [11, 13]  
マスクのシリコン厚 2 μm、アパーチャの見込み半角 10-20 mrad にて 99.9%以上のコントラストが得られる。

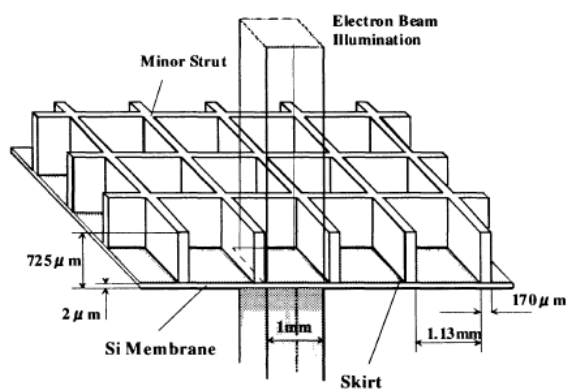


図 5.13; シリコン・ステンシルマスクの構造[8, 11, 13]

シリコン・メンブレンは井桁構造（ストラット）に支えられており、ステンシル・パターンはマスク上で分割されている。

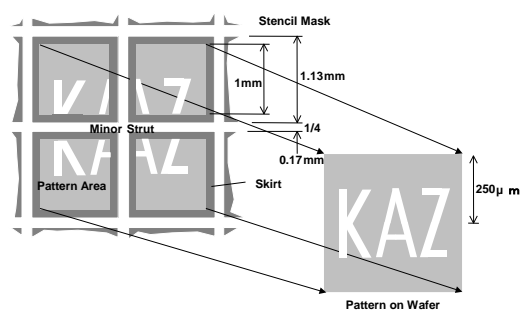


図 5.14; ウエハ上での投影パターンの継ぎ  
マスク上で分割されたパターンは、電子ビームの偏向制御により、ウエハ上ではパターンが継がれて露光される。

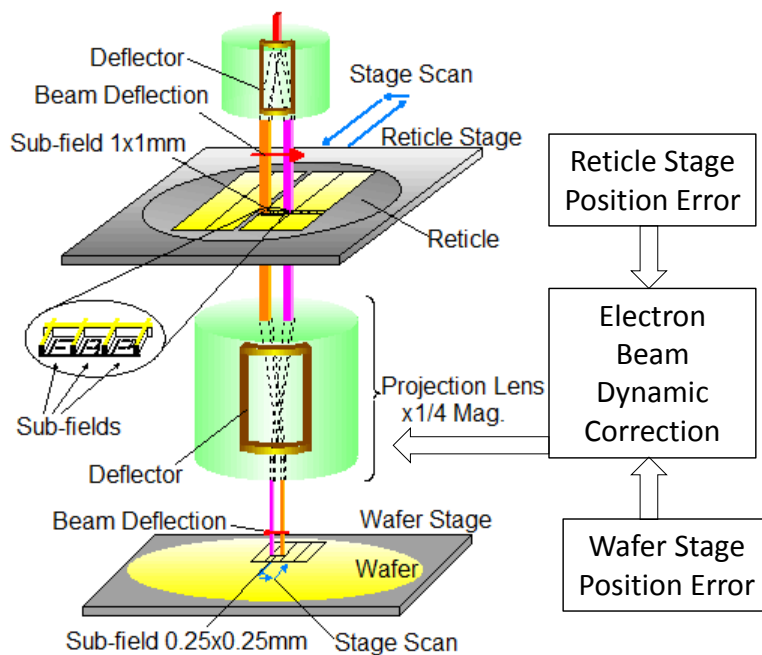


図 5.15: 電子ビーム投影露光装置での露光動作 [16]

電子ビームの偏向制御とステージ・スキャン制御により、マスク上のサブフィールドのパターンが順次ウエハに転写されていく。

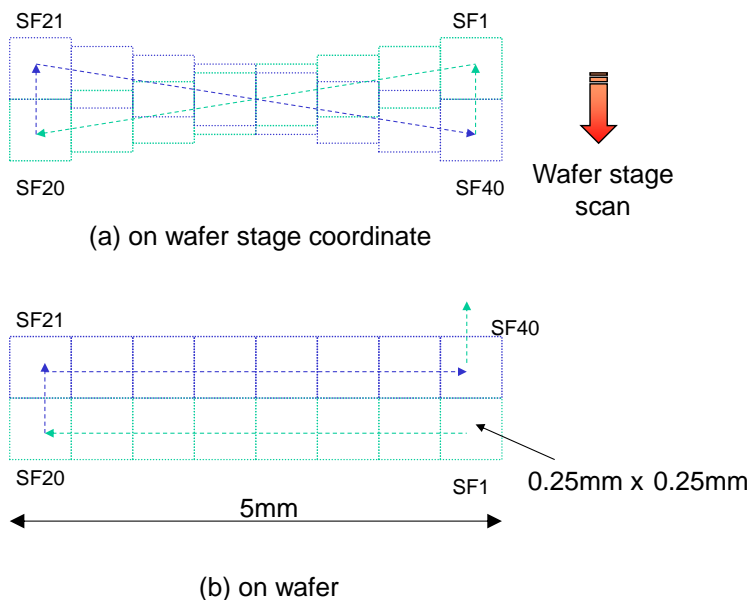


図 5.16: 電子ビームの偏向制御 [16]

ウエハステージ座標系では8の字形の偏向制御だが、ウエハ上では1行ずつ順次サブフィールドが露光される。

表 5.3; 電子ビーム投影露光装置での線幅 100 nm パターンに対する線幅均一性バジェット

(数字は 3σ) [11]

パターン継ぎ部を含む線幅均一性を 10 nm (3σ)、継ぎ部を除いた線幅均一性を 7 nm (3σ) に対し、露光量均一性 3% (3σ)、blur 均一性 10 nm (3σ) なる結像バジェットを構築。

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

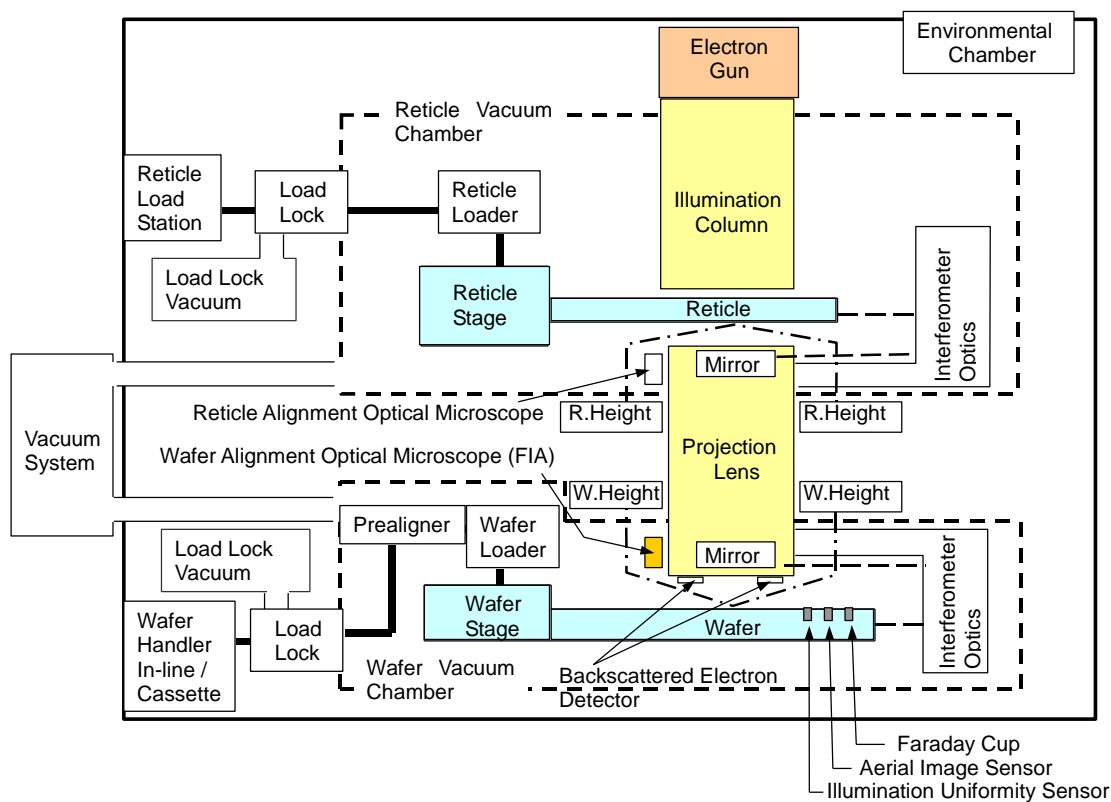


図 5.17; 電子ビーム投影露光装置 NSR-EB1A のユニット構成図[17]

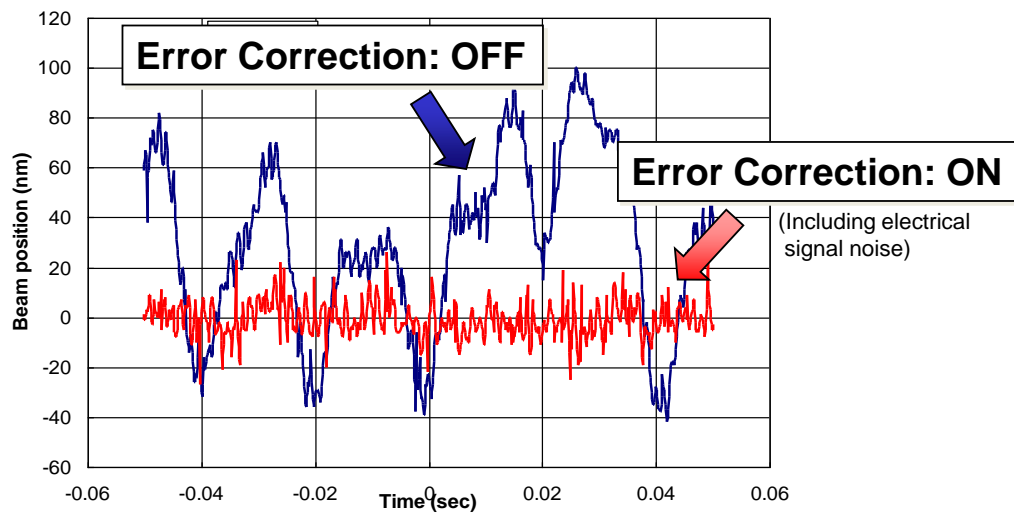


図 5.18; ステージ位置誤差のビーム偏向制御による補正[16]

補正制御を効かせると、位置誤差は  $-20\text{ nm} \sim +20\text{ nm}$  ( $10\text{ nm}$  ( $3\sigma$ ) 程度) に収まる。

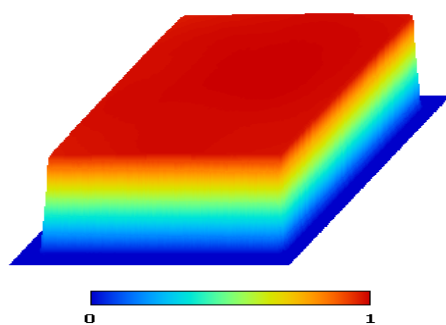


図 5.19; サブフィールド内照度均一性[17]

マスク上電流値  $30\text{ }\mu\text{A}$  時、 $1.71\%$  ( $3\sigma$ )。

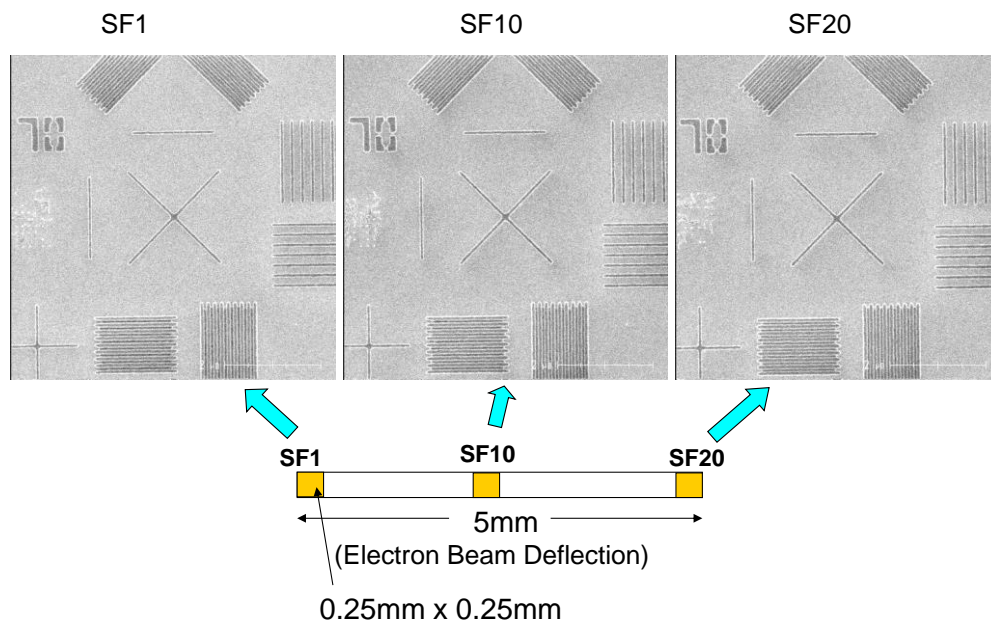


図 5.20; 70 nm パターンのレジスト像 [17]

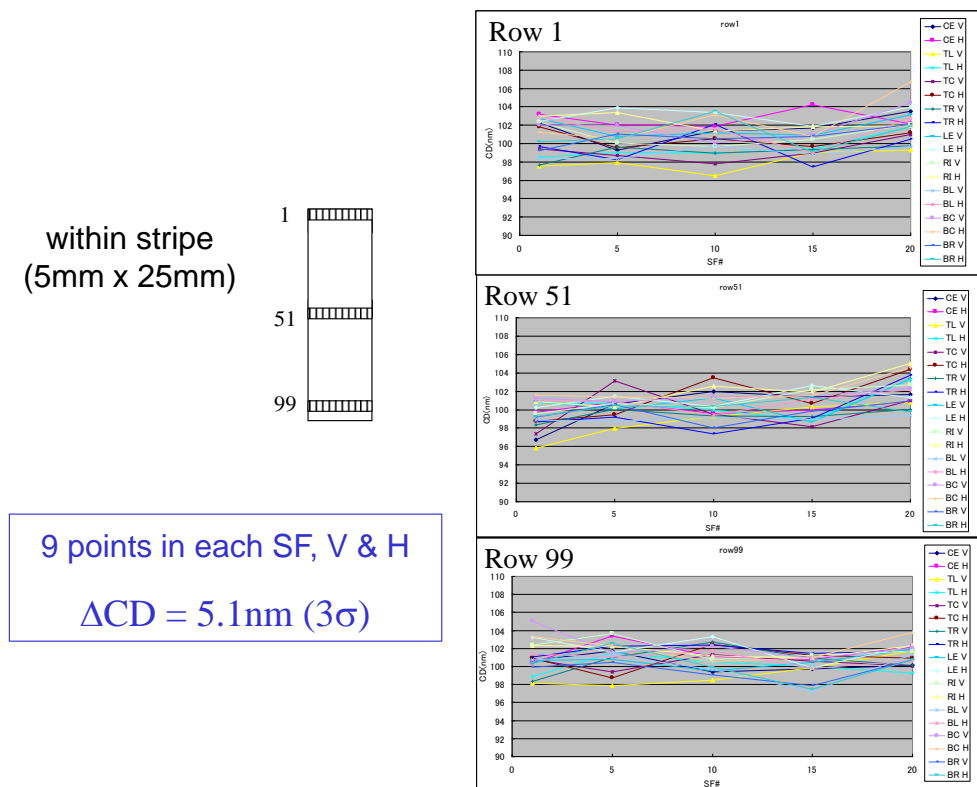


図 5.21; 線幅均一性データ (100 nm ライン&スペース) [17]

2 (縦横) × 9 か所 × 20 サブフィールド/行 × 3 行 = 1,080 データから線幅均一性 5.1 nm (3σ) が得られ、結像バジェットからの要求値 7 nm 以下を達成。

### 5.3 第5章のまとめ

本章では、結像バジェットを用いたシステム設計手法の効果を確認するために、製品でのデータを紹介した。

5.1 節においては、第3章、第4章でシステム設計を論じて来た光リソグラフィでのステップ&スキャン投影露光装置による要素性能として、ステージ同期制御精度 (22 nm ( $3\sigma$ ))、フォーカス制御精度 (100 nm ( $3\sigma$ ))、レベリング制御精度 (100 nm ( $3\sigma$ ))、ダイナミック照度均一性の許容誤差量 (2% ( $3\sigma$ )) をレビューし、それらのデータと比較した。また、総合性能として標準解像度での線幅均一性の評価結果と限界解像度のデータを紹介した。これらのデータから、標準解像度 250 nm のパターンに対し十分な焦点深度を保ちつつ線幅均一性 10% ( $3\sigma$ ) が得られていること、限界解像度でもパターンニングが出来ていることが確認され、露光装置として所望の性能が出ていることが示された。

5.2 節では、電子ビーム投影露光装置のシステム設計を概説し、線幅 100 nm パターンに対する線幅均一性バジェット (要求精度 7 nm ( $3\sigma$ ))、パターン継ぎ部では 10 nm ( $3\sigma$ ) を示した。このバジェットは露光量均一性と著者が導入した blur 均一性から成り立っていて、それぞれ 3% ( $3\sigma$ )、10 nm ( $3\sigma$ ) と設定した。これに対するデータとして照度均一性 1.71% ( $3\sigma$ )、電子ビーム偏向の同期制御精度 10nm ( $3\sigma$ ) 程度を示し、所望の要素性能が出ていることを確認した。また、総合性能として解像度 (70 nm パターン解像) と線幅均一性データ (100 nm ライン&スペースパターンの線幅均一性 5.1 nm( $3\sigma$ )) を紹介した。これらのデータから標準解像度 100 nm の露光装置として所望の線幅均一性の性能 7 nm ( $3\sigma$ ) が出ていることを確認した。

上記により、両方式の装置において、結像バジェットによるシステム設計手法の有効性が確認できた。

第5章の参考文献：

- [1] ニコン・ホームページ <http://www.nikon.co.jp/100th/history> (2017.3.9 現在)
- [2] K.Suzuki, S.Wakamoto and K.Nishi, “KrF step and scan exposure system using higher N.A. projection lens”, *Proc. of SPIE*, **2726**, pp.767-779 (1996).
- [3] 鈴木一明, “256MDRAM 量産対応スキヤン形エキシマレーザステッパ「NSR-S201A」”, 電子材料 3月号, pp.107-111 (1995).
- [4] T. Sasaki, “Study of space-charge effect by computer”, *J.Vac.Sci.Technol.*, **21**, pp.695-706 (1982).
- [5] W. Stickel, “Simulation of Coulomb interactions in electron beam lithography systems – A comparison of theoretical models”, *J.Vac.Sci.Technol.*, **B16**, pp.3211-3214 (1998).
- [6] W. Stickel and G.O. Langner, “PREVAIL: Theory of the proof of concept column electron optics”, *J.Vac.Sci.Technol.*, **B17**, pp.2847-2850 (1999).
- [7] H.C. Pfeiffer, et al., “Projection reduction exposure with variable axis immersion lenses: Next generation lithography”, *J.Vac.Sci.Technol.*, **B17**, pp.2840-2846 (1999).
- [8] K.Suzuki and S.Shimizu, “Development Status of EPL Technology”, *J.Photopolym. Sci.Technol.*, **15**, pp.395-402 (2002). (申請論文3)
- [9] A. N. Broers, “Resolution, Overlay, and Field Size for Lithography Systems”, *IEEE Trans.*, **ED-28**, pp.1268-1278 (1981).
- [10] G. Owen, “Methods for proximity effect correction in electron beam lithography”, *J.Vac.Sci.Technol.*, **B8**, pp. 1889-1892 (1990).
- [11] K.Suzuki, et al., “Nikon EB stepper: its system concept and countermeasure for critical issues”, *Proc. of SPIE*, **3997**, pp.214-224 (2000).
- [12] K.Suzuki, et al., “Nikon EB stepper: the latest development status”, *Proc. of SPIE*, **4343**, pp.80-87 (2001).
- [13] K.Suzuki, “EPL Technology Development”, *Proc. of SPIE*, **4754**, pp.775-789 (2002).
- [14] W.H.P. Koops and J. Grob, “Submicron Lithography for Demagnifying Electron-Beam Projection” in *Springer Series in Optical Sciences Vol. 43: X-ray Microscopy* (G. Schmahl and D. Rudolph, Ed. (Springer, Berlin), pp.119-128 (1984).
- [15] S.D. Berger and J.M. Gibson, “New approach to projection-electron lithography with demonstrated 0.1  $\mu\text{m}$  linewidth”, *Appl.Phys.Lett.*, **57**, pp.153-155 (1990).
- [16] K.Suzuki, et al., “First dynamic exposure results from an electron projection lithography tool”, *J.Vac.Sci.Technol.*, **B21**, pp.2686-2690 (2003).
- [17] K.Suzuki, et al., “Full-field exposure performance of electron projection lithography tool”, *J.Vac.Sci.Technol.*, **B22**, pp.2885-2890 (2004).



## 第6章 結論

本博士論文の目的は、1.6.1 項で定義を再確認したシステム設計を具体的に光リソグラフィ用投影露光装置の設計にて展開し、その中で結像バジェットを用いた設計手法の有効性を確認することであった。

まず、第2章においてステップ&リピート投影露光装置について概説し、主要性能と要素性能の関係を明らかにした。そして結像性能に大きな影響を及ぼすパラメータとして規格化空間周波数（露光波長、パターンピッチ、投影系開口数の関数）、照明系コヒーレンス・ファクタ、デフォーカス量、露光量が挙げられることを説明した。この中で、レジストパターンのトップとボトムの間幅比である縁減り値が空間像コントラストと良い相関を持ち、実験データから上記のパラメータが結像性能に敏感に影響していることを示した。

次の第3章において、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において具体的にシステム設計を実施し、その中で、「像振動量」が新たなパラメータとして結像性能に影響を及ぼすことを説明した。そして、所望の間幅均一性を確保するにおいて、許容露光量誤差、許容フォーカス誤差が大きく確保できるよう投影系開口数や照明系コヒーレンス・ファクタの最適化、許容振動量の設定、そしてその振動の存在下、許容フォーカス誤差や許容露光量誤差を規定し、更に要素技術に誤差を配分して行くという結像バジェットによるシステム設計手法を考案した。

第4章においては、エキシマレーザのようなパルス毎エネルギーばらつきを持った露光光源を用いる際の露光量制御法の詳細をステップ&リピート投影露光装置の場合、ステップ&スキャン投影露光装置の場合について説明し、後者において、第3章の結像バジェットで規定される露光量精度が要素技術として達成されることを理論と実験データから説明した。

第5章においては、ステップ&スキャン投影露光装置における要素性能データが精度バジェットを満たしており、総合性能である間幅均一性も 10% ( $3\sigma$ ) が実現出来ていることをレジストの間幅データから確認した。

また、第5章においては、電子ビーム投影露光装置においてシステム設計を説明した。その中で Blur と露光量からなる結像バジェットを考案し、それに基づいたシステム設計を遂行した。その結果、間幅均一性の実データにおいて 10% ( $3\sigma$ ) が実現出来た。

以上から、1.6.1 項にて定義を再確認したシステム設計を具体的にリソグラフィ用

投影露光装置の設計にて展開し、その中で結像バジェットを構築して要素技術の許容精度を設定して行く設計手法の有効性を確認する、という本論文の目的は達成された。

尚、KrF 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のシステム設計について詳しく論じたが、結像バジェットを用いたシステム設計は、ニコン内において、その後 ArF エキシマレーザを光源としたステップ&スキャン投影露光装置に引き継がれ、更には ArF 液浸ステップ&スキャン投影露光装置でも踏襲されている。昨今では、光リソグラフィの延命策としてダブル・パターンニング（2重露光）が採用され、重ね合わせ精度が線幅均一性に影響するようになったため、結像バジェットが複雑化している。また、通常照明、輪帯照明、2つ目開口だけでなく、露光パターンに最適化された複雑な照明形状も採用されている。一方、EUVL 露光機では、光学系を形成している多層膜ミラーからのフレアを考慮した結像バジェットが必要となっている。現在設計に着手している露光装置や今後開発したい露光装置において、本博士論文で述べたシステム設計手法に従って、結像バジェットにおける要素性能分解や誤差見積りモデル化を再確認することは、製品完成時の結像性能実現に極めて有効である。

本博士論文からの類推で、最終性能を物理的、数学的にモデル化し、必要とされる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は、広く応用できる。著者は、近年の英国出向中に、精度を要求される X 線 CT の設計において、英国の若手設計者を指導して、精度バジェット構築によるシステム設計を進めた経験がある。

また、本博士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エネルギーを制御する場合には、一般に広く応用できる。

## 謝辞

著者は、(株)ニコンの事業部において、半導体露光装置の要素技術設計、製品のシステム設計の経験を積んだ。特に、次世代露光技術と呼ばれる、まだ業界にコンセンサスやインフラが整っていない露光技術の開発を長く担当して来た。また、Nikon Metrology 出向時には、X線CT装置を含む非接触3次元計測装置の開発、設計に関わる経験も積んだ。近年では、研究部門に属し、より幅広いテーマに接する機会を得ている。

著者に様々な機会を与えてくれた(株)ニコンの関係者の方々に感謝致します。露光装置の設計、性能検証を共に進めた多くの設計者、製造・品証の方々には大変お世話になりました。既に退職されている諏訪恭一氏、谷元昭一氏、村上成郎氏、山口武氏には、システム設計を進める上で種々のアドバイスを頂くとともに、3件の申請論文の執筆、投稿についてご理解を頂きました。この3件の申請論文の計6名の共同研究者の方々のうち、松本由佳子、村山正幸の両氏には、レジスト像の縁減り値のデータ取得において共同で実験を進めて頂きました。小澤謙、谷津修、郷勝人の各氏には、ステップ&スキャン型露光装置での露光量制御について、精度データ取得、照明系設計、電気系設計にそれぞれ参加して頂きました。清水澄人氏には電子ビーム投影露光装置でのレジスト関連データ取りに参加して頂きました。この場で改めて謝辞を述べたいと思います。また、本博士論文を執筆するに当たり、ご理解を頂いた研究開発統括部、半導体装置事業部、知的財産本部の関係者の方々にも感謝致します。

半導体露光装置関連の仕事では、社外の方々との協業や頂戴した叱咤激励が研究遂行のモチベーションになった場合も多々ありました。外からの刺激は常に重要です。私に課題克服への起爆剤をインプットして下さった国内、国外の様々な方々にこの場でお礼申し上げます。

本博士論文の執筆、審査において、東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻の高増潔教授(指導教員、主査)、鈴木宏正教授、高橋哲教授、木下裕介講師、東京電機大学工学部先端機械工学科の堀内敏行教授(以上、副査)の各氏には、貴重なお時間を割いて頂き、具体的なご指導、アドバイスを多々頂きました。心からお礼申し上げます。

最後に、本博士論文の準備、執筆は、主に夜間や週末に自宅において作業を進めることになったため、それに理解を示してくれた家族にも感謝の意を表します。

## 業績リスト

### 主著者論文 (査読付き論文) :

- 1) K.Suzuki, Y.Matsumoto and M.Maruyama, “The Method of Measuring Optical Performance in KrF Excimer Lithography”, *Jpn.J.Appl.Phys.*, **31**, pp.4167-4173 (1992).
- 2) K.Suzuki, K.Ozawa, O.Tanitsu and M.Go, “Dosage Control for Scanning Exposure with Pulsed Energy Fluctuation and Exposed Position Jitter”, *Jpn.J.Appl.Phys.*, **34**, pp.6565-6572 (1995).
- 3) K.Suzuki and S.Shimizu, “Development Status of EPL Technology”, *J.Photopolym.Sci.Technol.*, **15**, pp.395-402 (2002).
- 4) K.Suzuki, et al., “First dynamic exposure results from an electron projection lithography tool”, *J.Vac.Sci.Technol.*, **B21**, pp.2686-2690 (2003).
- 5) K.Suzuki, et al., “Full-field exposure performance of electron projection lithography tool”, *J.Vac.Sci.Technol.*, **B22**, pp.2885-2890 (2004).

### 編纂リソグラフィ教科書 :

- 1) K.Suzuki and B.Smith (Editors), “Microlithography – Science and Technology –”  
(2nd edition, 848 pages), (CRC Press) (2007).  
& K.Suzuki, “Chap.6; Electron Beam Lithography Systems”, pp. 329-359.
- 2) B.Smith and K.Suzuki (Editors), “Microlithography – Science and Technology –”  
(3rd edition, approx. 950 pages), (CRC Press) (to be published in the first half of 2018).  
& K.Suzuki, “Chap.11; Maskless Lithography”, (approx. 40 pages);  
K.Suzuki and E.Amit, “Chap.13; Metrology for Nanolithography”, (approx. 100 pages).

### 主著者論文 (査読無し論文) :

- 1) K.Suzuki, S.Wakamoto and K.Nishi, “KrF step and scan exposure system using higher N.A. projection lens”, *Proc. of SPIE*, **2726**, pp.767-779 (1996).
- 2) K.Suzuki, T.Fujiwara, K.Hada, N.Hirayanagi, S.Kawata, K.Morita, K.Okamoto, T.Okino, S.Shimizu, and T.Yahiro, “Nikon EB stepper: its system concept and countermeasure for critical issues”, *Proc. of SPIE*, **3997**, pp.214-224 (2000).
- 3) K.Suzuki, T.Fujiwara, K.Hada, N.Hirayanagi, S.Kawata, K.Morita, K.Okamoto, T.Okino, S.Shimizu, T.Yahiro and H.Yamamoto, “Nikon EB stepper: the latest development status”, *Proc. of SPIE*, **4343**, pp.80-87 (2001).
- 4) K.Suzuki, “EPL Technology Development”, *Proc. of SPIE*, **4754**, pp.775-789 (2002).

解説記事、Symposium、Workshop、研究会（主著者文献のみ）

- 1) 鈴木一明：“パターン露光装置（I）”，ULSI 製造装置実用便覧（サイエンス・フォーラム），pp. 370-377 (1991).
- 2) 鈴木一明，“エキシマレーザステッパ”，電子材料 3 月号，pp.76-80 (1992).
- 3) 鈴木一明，“256MDRAM 量産対応スキャン形エキシマレーザステッパ「NSR-S201A」”，電子材料 3 月号，pp.107-111 (1995).
- 4) 鈴木一明，“電子ビームリソグラフィ技術”，電気学会誌，Vol. 120, No. 6, pp.348-351 (2000).
- 5) 鈴木一明，“EPL 技術の特徴と今後の展望”，電気学会光応用・視覚研究会資料，LAV-00-18, pp.23-28 (2000).
- 6) K. Suzuki, “Nikon’s lithography roadmap and the development status of EB Stepper”, SEMI Technology Symposium (Chiba, Japan), pp. 3-37 – 3-43 (Dec., 2000).
- 7) 鈴木一明，“EPL 技術”，OPTRONICS, Vol.22, No.4, pp.141-145 (2003).
- 8) 鈴木一明，“電子線投影露光装置(EPL)”，応用物理学会 NGL ワークショップ予稿集，pp.7-10, (2003 年 7 月 10 日).
- 9) 鈴木一明，“EUV リソグラフィの最新状況と高エネルギーリソグラフィに対する一考察”，第 155 回有機エレクトロニクス材料研究会講演要旨集 (2006 年 7 月 25 日).
- 10) 鈴木一明，“露光装置の性能を最大限活用する APC/AEC”，O plus E, Vol.32, pp.1079-1083 (2010).

リソグラフィ以外の分野の主著者論文、記事：

- 1) K.Suzuki and I.Haig, “Investigation of the application of phase contrast imaging using a point X-ray source to industrial non-destructive testing”, Phil.Trans.R.Soc. A **372**, 20130036 (2014). (X 線 CT 分野の査読付き論文)
- 2) 鈴木一明，“X 線 CT 技術”，O plus E, Vol.39, pp.38-41 (2017).
- 3) K.Suzuki, M.Matsuoka, H.Inoue, K.Mitsuda, T.Ohashi, Y.Tanaka, T.Hirano, and S.Miyamoto; “Detection of Iron K-Emission Lines from Low-Mass Binary X-ray Sources; Scorpius X-1 and 4U 1608-52”, Publ. Astron. Soc. Japan, **36**, pp.761-767 (1984). (X 線天文分野の査読付き論文)
- 4) K.Suzuki, T.Ikegami, H.Inoue, K.Koyama, M.Matsuoka, T.Ohashi, Y.Tanaka and I.Waki; “The Characteristics of Gas Scintillation Proportional Counters on board TENMA”, 宇宙科学研究所報告第 30 号, pp.1-29 (ISSN0285-2853) (1985 年 12 月).

登録特許 (2017年4月30日現在) :

オリジナル出願国、単独発明または筆頭発明のみでカウント

日本 : 48 件

英国 : 1 件

- 1) 鈴木、馬込 : “4波混合による像形成装置”, 日本特許第 1990948 号(1995).
- 2) 鈴木 : “投影露光装置”, 日本特許第 1991007 号(1995).
- 3) 鈴木、川井、水谷 : “投影露光方法及び装置”, 日本特許第 2053852 号(1996).
- 4) 鈴木 : “照度分布測定装置”, 日本特許第 2072722 号(1996).
- 5) 鈴木、谷口、柿崎 : “投影露光方法及び装置”, 日本特許第 2503451 号(1996).
- 6) 鈴木 : “露光装置及び露光方法”, 日本特許第 2503572 号(1996).
- 7) 鈴木、鈴木 (博)、小沢 : “露光装置及び露光方法”, 日本特許第 2551391 号(1996).
- 8) 鈴木、鈴木 (博)、小沢 : “露光方法”, 日本特許第 2569441 号(1996).
- 9) 鈴木、谷元、郷 : “露光制御装置及び該装置による露光方法”, 日本特許第 2569711 号(1996).
- 10) 鈴木、近藤、田中 : “投影露光装置及び投影露光方法”, 日本特許第 2590478 号(1996).
- 11) 鈴木、諏訪、松浦、松本 : “露光方法及びフォトリソグラフィ装置”, 日本特許第 2129872 号(1997).
- 12) 鈴木、松浦、諏訪、松本 : “露光方法及びフォトリソグラフィ装置”, 日本特許第 2131229 号(1997).
- 13) 鈴木 : “投影露光装置”, 日本特許第 2138744 号(1998).
- 14) 鈴木 : “露光装置及び露光方法”, 日本特許第 2773117 号(1998).
- 15) 鈴木 : “アライメント方法”, 日本特許第 2805827 号(1998).
- 16) 鈴木、谷口 : “投影露光装置及び方法”, 日本特許第 2828226 号(1998).
- 17) 鈴木 : “露光装置及び露光方法”, 日本特許第 2890413 号(1999).
- 18) 鈴木 : “露光方法、半導体素子製造方法及び露光装置”, 日本特許第 2979472 号(1999).
- 19) 鈴木 : “露光制御装置、露光装置及び方法”, 日本特許第 2985089 号(1999).
- 20) 鈴木 : “露光装置及び露光方法”, 日本特許第 3039542 号(2000).
- 21) 鈴木、松浦、諏訪、松本 : “投影露光装置、または投影露光方法、及びその投影露光方法を用いたデバイス製造方法、及びそのデバイス製造方法により製造されたデバイス”, 日本特許第 3068785 号(2000).
- 22) 鈴木 : “位置検出装置”, 日本特許第 3106544 号(2000).
- 23) 鈴木 : “露光装置及び露光方法”, 日本特許第 3121567 号(2000).
- 24) 鈴木 : “露光装置及び露光方法”, 日本特許第 3125307 号(2000).
- 25) 鈴木 : “露光装置”, 日本特許第 3209294 号(2001).
- 26) 鈴木 : “投影露光装置及び方法、並びに素子製造方法”, 日本特許第 3230101 号(2001).

- 27) 鈴木：“走査露光方法、露光制御装置、走査型露光装置、及びデバイス製造方法”，日本特許第 3235078 号(2001).
- 28) 鈴木：“走査露光方法及びデバイス製造方法”，日本特許第 3244075 号(2001).
- 29) 鈴木：“露光装置及び露光方法”，日本特許第 3255096 号(2001).
- 30) 鈴木：“露光装置及び半導体素子の製造方法”，日本特許第 3259222 号(2001).
- 31) 鈴木：“露光方法及び装置”，日本特許第 3262138 号(2001).
- 32) 鈴木、谷口、柿崎：“集積回路製造方法、集積回路用のパターンが形成されるウエハ、および投影露光装置”，日本特許第 3265531 号(2002).
- 33) 鈴木、谷口、柿崎：“集積回路製造方法、および投影露光装置”，日本特許第 3265533 号(2002).
- 34) 鈴木：“露光方法、走査露光装置、及びデバイス製造方法”，日本特許第 3282167 号(2002).
- 35) 鈴木：“走査露光方法及び該方法を用いるデバイス製造方法”，日本特許第 3282178 号(2002).
- 36) 鈴木、松本、村山：“結像特性の測定方法”，日本特許第 3287017 号(2002).
- 37) 鈴木：“露光制御方法、走査露光方法、露光制御装置、及びデバイス製造方法”，日本特許第 3296448 号(2002).
- 38) 鈴木：“走査露光方法、走査型露光装置、及びデバイス製造方法”，日本特許第 3296484 号(2002).
- 39) 鈴木：“投影露光方法及び装置”，日本特許第 3308063 号(2002).
- 40) 鈴木：“エネルギー量制御装置”，日本特許第 3316850 号(2002).
- 41) 鈴木：“投影露光方法及び投影露光装置”，日本特許第 3322274 号, (2002).
- 42) 鈴木：“走査露光方法及び該方法を用いるデバイス製造方法”，日本特許第 3344476 号(2002).
- 43) 鈴木：“走査露光方法、レーザ装置、走査型露光装置、及びデバイス製造方法”，日本特許第 3344477 号(2002).
- 44) 鈴木：“走査露光方法、走査型露光装置、及び露光量制御装置”，日本特許第 3348928 号(2002).
- 45) 鈴木：“露光装置”，日本特許第 3377053 号(2002).
- 46) 鈴木：“露光装置”，日本特許第 3412627 号(2003).
- 47) 鈴木：“走査露光装置”，日本特許第 3711586 号(2005).
- 48) 鈴木：“マーク位置検出装置及びそれを備えた投影露光装置、及びマーク位置検出装置”，日本特許第 3777709 号(2006).
- 49) K. Suzuki and D. Hilton: “Enclosed X-ray Imaging System”, GB2514125 (2016).

## 略歴

- 1977年4月 東京大学理科I類入学
- 1981年3月 東京大学理学部物理学科卒業（プラズマ物理学）
- 1983年3月 東京大学理学系研究科物理学専門課程修士課程修了（X線天文学）
- 1984年3月 東京大学理学系研究科物理学専門課程博士課程中退（X線天文学）
- 1984年4月 日本光学工業株式会社（現（株）ニコン）に入社
- 1984年4月 精機事業部配属
- 1984年～1996年 光リソグラフィ露光装置開発
- 1996年～2004年 電子ビーム投影露光装置開発
- 2004年～2007年 EUV 露光装置開発  
(2007年10月～2009年10月 開発本部長付)
- 2009年11月 研究開発本部所属 非接触3次元計測、X線CT技術開発  
(2010年12月～2011年9月 研究開発本部長補佐)
- 2011年9月 Nikon Metrology UK に出向 Chief Strategy Officer  
技術開発戦略、X線CT開発担当
- 2014年7月 研究開発統括部所属 光、X線、電子ビーム技術全般