

先端半導体デバイスの製造を支える マスク欠陥検査装置技術

Mask Inspection Technologies for Manufacturing of Advanced Semiconductor Devices

磯村 育直 土屋 英雄 菊入 信孝

■ ISOMURA Ikunao ■ TSUCHIYA Hideo ■ KIKUIRI Nobutaka

半導体デバイスの高集積化及び大容量化に伴い、縮小投影リソグラフィ用の微細パターンを描画したマスクの検査性能の向上が重要度を増している。東芝は1980年代初頭からマスクパターン検査技術の開発を進めてきたが、最先端デバイス世代に適した性能を持つマスク欠陥検査装置をいち早く開発し生産ラインへ投入することが、いっそう求められている。

今回、当社は(株)ニューフレアテクノロジーと共同で、マスク欠陥検査装置NPI-7000を開発した。ハーフピッチ (hp) 20 nm以下のデバイスに適用でき、スループットも従来機に比べて2倍程度改善している。また、将来のリソグラフィ技術として期待されている極端紫外光 (EUV: Extreme Ultraviolet) リソグラフィ用の、マスク検査機能も世界に先駆けて搭載した。今後、この装置が効率的なマスク保証ラインの一翼を担えるようにするとともに、リソグラフィの更なる進展に合わせて改良を続けていく。

With the progressively higher integration and capacity of semiconductor devices in recent years, improvement of the performance of mask inspection technologies for reduction projection lithography has become increasingly important. Demand has been growing for the early development of a mask defect inspection system with appropriate performance for advanced device node sizes.

Toshiba has been developing mask inspection technologies since the 1980s. In cooperation with NuFlare Technology, Inc., we have now developed the NPI-7000 mask defect inspection system that can handle cutting-edge devices of less than 20 nm half-pitch node with almost double the throughput compared with conventional systems. The NPI-7000 is also equipped with a mask inspection function for extreme ultraviolet (EUV) lithography for the first time in the world, and is playing a role in the advancement of our semiconductor manufacturing technologies in parallel with the development of lithography technologies.

1 まえがき

半導体デバイスの高集積化及び大容量化に伴い、縮小投影リソグラフィ用の微細パターンが形成された原版となるマスクには、無欠陥であることの保証が極めて重要になっている。マスクパターンの微細化により、これまで問題とならなかった寸法誤差や、座標位置誤差、欠陥が、ウェーハ上では問題のある欠陥として転写されてしまい、歩留りの低下を発生させる。このため、微細化技術で最先端戦略をとる東芝にとっては、先端デバイスの世代に合わせたマスク欠陥検査装置の獲得が不可欠である。

当社は、2002年に東芝機械(株)から分社化した(株)ニューフレアテクノロジーとともに、1980年初頭からマスクの無欠陥を保証するマスクパターン検査技術の開発を進め、デバイス世代に適した性能を持つマスク欠陥検査装置を開発し、マスク製造ライン(図1)に投入してきた。

今回当社は、(株)ニューフレアテクノロジーと共同で、hp 20 nm以下のデバイスに適用できるマスク欠陥検査装置NPI-7000を開発した。ここでは、マスク欠陥検査装置を構成する先端技術とNPI-7000の搭載技術について述べる。

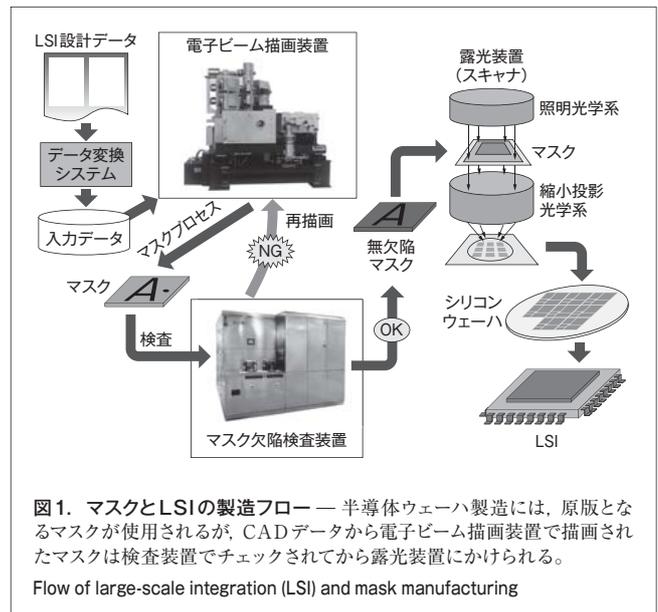


図1. マスクとLSIの製造フロー — 半導体ウェーハ製造には、原版となるマスクが使用されるが、CADデータから電子ビーム描画装置で描画されたマスクは検査装置でチェックされてから露光装置にかけられる。

Flow of large-scale integration (LSI) and mask manufacturing

2 マスク欠陥検査装置を構成する先端技術

マスクの欠陥を検査する方式は、大別すると二通りある。

一つは、マスクに実際に描画されたパターン（実画像）とマスク上に描画されるべきパターン（参照画像）の差分を欠陥として検出するDie to Database検査（DB検査）と呼ばれるもので、マスク全面の欠陥を検出できることから主にマスク生産ラインで用いられる。もう一つの方式は、マスク上に配置される同一の設計データから描画されたDie画像の差分を欠陥として検出するDie-to-Die検査（DD検査）で、描画データを必要としないことから、露光工程前の確認などに広く用いられている。今回開発したNPI-7000は、その両方の検査方式を持っており、柔軟な装置運用に対応できる。

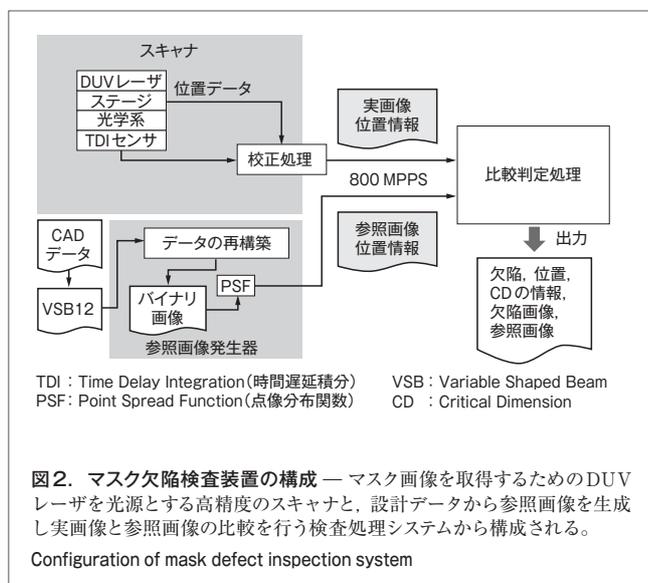
検査の原理はシンプルであるものの、先端マスク用欠陥検査装置として実現するためには多くの先端技術が必要であり、また、大規模なシステムインテグレーション技術が要求される。

ここで、NPI-7000を例にマスク欠陥検査装置の構成と主要な技術を図2に示す。装置は、マスクの実画像を取得するためのDUV（Deep Ultraviolet：遠紫外光）レーザを光源とするスキャナと、設計データから参照画像を生成し実画像と参照画像の比較を行う検査処理システムから構成される。

マスクを高精度ステージに載置し、光源から導かれる光を照射して透過像と反射像それぞれをセンサに撮影させ、設計データどおりにパターンが形成されているかを高速で、かつ適切な比較判定処理を行う。

hp 20 nm以下のデバイスに対するマスク欠陥検査性能を持たせるためには、リソグラフィに用いられる193 nmに近い波長の光源と、60 nm以下の画素分解能を持った検査光学系が必要である。更に、60 nm以下の画素分解能で撮像されたマスク画像を例えば2時間で高速に検査するためには、600 MPPS（Megapixel per Second）以上の速度を持つデータ処理システムが必要であり、開発には大きなリスクが見込まれる。

当社は、2001年から次世代半導体材料・プロセス基盤



(MIRAI) プロジェクトの開発「DUV連続発振レーザ光源と高感度センサ」に研究員として参加した。また、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）助成事業として高性能スキャナ・微細欠陥検出アルゴリズム（2001年度～2004年度）を開発し、更に、(株)半導体先端テクノロジーズ（Selete, 2011年6月解散）及び日本電気（株）と共同で、検査装置システム技術を開発してきた。これらの技術を統合することで、世界初^(注1)の199 nm光学系を持つ検査装置の開発に成功し、2007年に45 nm-32 nmデバイス世代対応の検査装置（NPI-5000）として当社マスクショップで稼働を開始させた（図3）。更に2011年には、hp 20 nm以下のデバイス世代に対応し、次世代リソグラフィ技術と言われる極端紫外光（EUV：Extreme Ultraviolet）リソグラフィ用DB検査技術を搭載した検査装置NPI-7000を世界に先駆けて開発した。

次に、NPI-7000とそれを支える先端要素技術について述べる。

3 NPI-7000と搭載技術

開発したNPI-7000の主な仕様を表1に示す。

NPI-7000は、NPI-5000の後継機であるNPI-6000に対して、スキャナと検査処理システムのプラットフォームを改良し、検査時間及び感度の大幅な向上を実現した。また、EUVマスク検査機能を強化し、これまで対応できなかったDB検査を可能にしている。

3.1 スキャナ技術

NPI-7000のスキャナの構成を図4に示す。

hp 20 nm以下のデバイス世代に対応するために、波長のばらつきの少ないメガヘルツオーダーのパルス光源及び、199 nm波長光に感度を持つTDI（Time Delay Integration）センサ、収差を λ （波長）/50まで抑えた高NA（Numerical Aperture）

(注1) 2006年6月時点、当社調べ。

表1. NPI-7000の主な仕様

Main specifications of NPI-7000 and NPI-6000 systems

		NPI-7000		NPI-6000		
フォトマスク検査	検査モード	透過・反射検査		透過・反射検査		
	検査時間 (マスクサイズ100×100 mm)	85分		120分		
	検査感度	主パターン: 150 nm (hp 2X-1X, DP)* ¹		主パターン: 160 nm (hp 2X, DP)* ²		
			DD検査	DB検査	DD検査	DB検査
		ピンホール欠陥 (nm)	25	25	35	35
ピンホール欠陥 (nm)	25	25	35	35		
CD誤差 (nm)	10	10	15	15		
EUVマスク検査	検査モード	偏光照明検査		通常照明検査		
	検査時間 (マスクサイズ100×100 mm)	120分 (画素分解能が60 nmのとき)		360分 (画素分解能が50 nmのとき)		
	検査感度	主パターン: 100 nm		主パターン: 160 nm		
			DD検査	DB検査	DD検査	DB検査
		ピンホール欠陥 (nm)	30以下	35	40	-
ピンホール欠陥 (nm)	30以下	35	40	-		

DP: Double Patterning

*1: hpが20 nm台から10 nm台に対応

*2: hpが20 nm台に対応

対物レンズと欠陥検出光学系を開発し搭載している。

マスクを検査する場合、マスクの透過照明検査と、反射照明検査の両方を用いないと、目標とする感度で欠陥を検出できない。そこで、マスクを上下から照明し、透過と反射の検出画像を同時にセンサに導くことができる光学系⁽¹⁾を開発し、高感度と短時間検査の両立を図っている。反射型のEUVマスク検査においては、通常照明 (円偏光照明) では検出画像のコントラストが得られにくいことが知られている。この問題に対して、いくつかの偏光照明がEUVマスクの画像コントラストと欠陥検出感度を向上させることを見いだした。NPI-7000に複数の偏光照明技術を導入している。

3.2 検査処理システム技術

スキナによって取得したマスク画像は、60 nm/画素、又は50 nm/画素のデジタル画像として比較判定処理部に導かれる。欠陥の有無を判定するための画像処理フローを図5に示す。800 MPPSの並列型画像処理システムとそれに対応した参照画像生成システムを独自に開発し、100×100 mmのマスク全面を60 nm/画素で85分で処理できる。

3.2.1 参照画像生成システム

マスクパターンデータから、スキナで取得するマスク実画像と同等の画像を生成する仕組みが参照画像生成システムである。

実画像は、パターン描画分解能や検査光学系解像度の関係から、マスクデータ画像とは異なる。そのため、パターンエッジのプロファイル合わせ込み補正を施す必要がある。これらのデータ処理は、高速処理が要求されるため、フィルタ演算のパイプライン処理を応用した専用回路を開発した。

また、NPI-7000は、あらゆるマスクパターンデータフォーマットでもデータ変換によりDB検査を実行できる。東芝グループが採用しているVSB12フォーマットデータ (電子ビーム描画装置と同一フォーマット) に対しては、検査装置に直接入

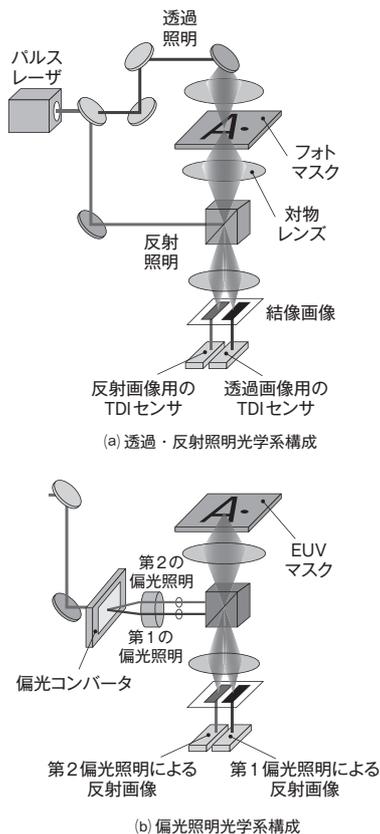


図4. NPI-7000のスキナ - マスクを上下から照明し、透過と反射の検出画像を同時にセンサに導くことができ、高感度と短時間での検査を両立させた。また、複数の偏光状態の光学画像を取得できる。

Configurations of scanner in NPI-7000

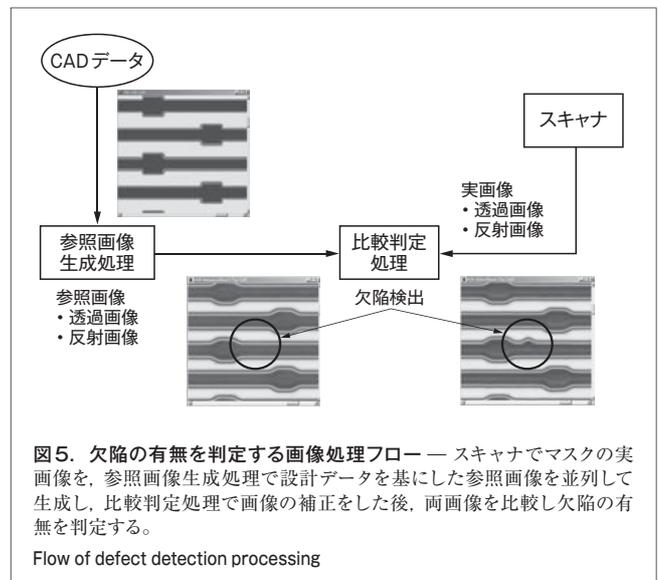


図5. 欠陥の有無を判定する画像処理フロー - スキナでマスクの実画像を、参照画像生成処理で設計データを基にした参照画像を並列して生成し、比較判定処理で画像の補正をした後、両画像を比較し欠陥の有無を判定する。

Flow of defect detection processing

力できる装置構成としたことで、データ変換なしで描画装置から検査装置までを一貫して扱える。

3.2.2 比較判定処理 実画像と参照画像を比較するためには、画像どうしの位置合せと、階調やひずみ、伸縮誤差の補正が必要である。NPI-7000では、画像のエリアごとに補正係数の重み付けを変えた、フィッティングアライメント技術を搭載し、前述の補正を効率的にかつ正確に行うことができる。

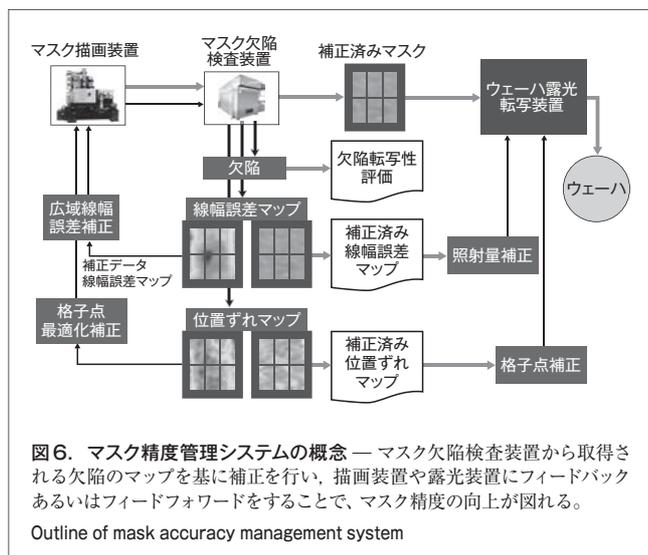
マスクに描画されるパターンは、OPC (Optical Proximity Correction: 光近接効果補正)^(注2)やアシストパターンなどの様々なSRAF (Sub-Resolution Assist Feature) パターンが付加されている。非常に複雑なパターン形状となるため、真欠陥と許容できる擬似欠陥の区分けが難しく、欠陥判定のアルゴリズムを頻繁に更新して対処している。このため、比較判定処理部は、CPUによるソフトウェア処理とロジック化したハードウェア処理の組合せで実用的なシステムを構築している。

4 マスク欠陥検査の高付加価値機能

今後いっそうの微細化が必要になるリソグラフィ技術としては、EUVリソグラフィが期待されているものの、一方では、光リソグラフィの延命を模索する動きが活発化している。検査装置では、超解像技術や側壁プロセスの適用、及びCD (Critical Dimension) エラーをいっそう抑制できる技術の開発が必要である。そのためのソリューションとして、NPI-7000を核としたマスク精度管理システムを検討している(図6)。

4.1 マスク面内誤差分布解析

マスク上のパターン線幅誤差マップ(CDマップ)や位置ずれマップ(POS (Position) マップ)を取得し、マスク面内の誤差分



(注2) パターン転写の解像力を高める技術の一つ。ウェーハ像での変形を見越してあらかじめマスクパターンに図形を付加したり、パターンサイズを補正したりすること。

布を解析して補正し、描画や露光プロセスにフィードバックあるいはフィードフォワードをすることで、マスク精度の改善やウェーハ露光条件の緩和ができる。NPI-7000にはマスク欠陥検査中にCDマップを測定できる機能を搭載しており、POSマップについての開発も行っている。

4.2 転写性考慮検査

転写性考慮機能とは、NPI-7000で取得したマスクパターン欠陥が、ウェーハ上でどのように転写されるかを推定し、問題であるか否かの判定を行う技術であり、特に超解像技術を用いたマスクの検査への適用が期待されている。NPI-7000ではひずみの少ない高精度なマスク画像が取得できることから、高精度なウェーハ転写推定による判断の可能性がある。既にhp 28 nmでの推定判断は実現できており、今後の実用化に向けた検討を行っている。

5 あとがき

hp 20 nm以下に対応する100×100 mm領域のマスクを85分で検査できるマスク欠陥検査装置NPI-7000を開発した。この装置は、これまで東芝グループが培ってきた検査装置技術だけでなく、MIRAI、技術研究組合 超先端電子技術開発機構 (ASET)、NEDO助成事業、更にはSeleteの開発成果を統合したもので、いわば、わが国の技術の集大成である。この装置をベースにして、更なる微細化への対応、及びEUVリソグラフィや光ナノインプリントリソグラフィなどの次世代リソグラフィマスクへの対応を行い、マスク保証の一翼を担い続けていく。

文献

(1) Hirano, R. et al. Development of Advanced mask inspection optics with transmitted and reflected light image acquisition. Proc. SPIE. 6518. 2007, p.65181U.1 - 65181U.8.



磯村 育直 ISOMURA Ikunao

研究開発センター デバイスプロセス開発センター部長附。
マスク検査装置の開発に従事。電子情報通信学会会員。
Device Process Development Center



土屋 英雄 TSUCHIYA Hideo

研究開発センター デバイスプロセス開発センター部長附。
マスク検査装置の開発に従事。電気学会会員。
Device Process Development Center



菊入 信孝 KIKUIRI Nobutaka

研究開発センター デバイスプロセス開発センター部長附。
マスク検査装置の開発に従事。日本機械学会、精密工学会会員。
Device Process Development Center