

半導体製造プロセスにおける検査・計測のための パターン識別技術の研究

学位論文内容の要旨

半導体デバイスの微細化により、携帯電話、デジタルオーディオ、ゲーム機器など、デジタル機器の小型化、高機能化、記憶容量の大容量化が進んでいる。ここ数年はデジタル・メディア・コンテンツを大量に記憶する必要性からフラッシュメモリの微細化の進展が目覚ましい。かつては DRAM が最先端の微細加工を必要としていたため、その加工寸法が半導体の技術ノードとして定義されていたが、2005 年からはフラッシュメモリが DRAM に替わり微細化を牽引するようになってきている。現在、大容量化が進むフラッシュメモリでは 45nm が量産され、マイコン等のロジックデバイスでは 65nm 世代のデバイスが量産されている。

半導体製造プロセスは数百のプロセスから構成されるが、微細パターンの形成に際して最も重要となる製造プロセスが露光プロセスである。このプロセスではマスクに描画されたパターンを露光光によりウェハ上に転写し、所望の回路パターンを得る。最も微細な加工を要求されるのはトランジスタのゲートに当たる部分であり、ゲート長を短くすることによりデバイスの高速動作が実現される。加工寸法の誤差はデバイスの電気的特性不良に繋がるため、加工寸法を一定に保つために、露光プロセスパラメータ、すなわち露光光の焦点位置、露光量の高精度な管理は極めて重要となる。一方、デバイスの微細化に伴い、従来問題にならなかった微小な寸法の異物や欠陥の管理がますます重要になってきている。このため製造プロセス内の適切な箇所で見視検査を行い、検出した欠陥の観察、解析に基づく迅速な対策の重要性が増している。

本研究では、微細化する半導体製造の検査・計測において重要となる、露光プロセスにおける高精度なプロセスパラメータ推定法と、見視検査工程における高効率な欠陥観察手法の二つについて検討を行なった。

露光プロセスにおいては、従来から SEM(Scanning Electron Microscope:走査電子顕微鏡)で撮像した露光・現像後のレジストの画像からその線幅を計測し、プロセスを監視している。しかしデバイスの微細化に伴い、適切なプロセスパラメータの許容値が狭まる中、寸法管理のみでは安定な露光プロセス管理は困難になることが予測される。本検討では、露光シミュレーション及び、電子線シミュレーションを用いて、露光プロセスパラメータが変化した場合における、レジストの SEM 画像の変化を解析した上で、プロセス変動を適切に表現するための複数の画像特徴量を定めた。この画像特徴量に基づき、各チップで露光量と焦点位置を一定範囲で変化させたウェハを用いてモデルデータを作成しておき、評価対象画像から得た特徴量をモデルデータに照会し、最尤法にて露光量と焦点位置を推定した。130nm ノード以上のデバイスに用いられる KrF プロセスウェハを用いて実

験した結果、露光量で誤差 $0.93\text{mJ}/\text{cm}^2$ (3σ)、フォーカス位置で 75nm (3σ) を確認した。KrF プロセスでは、露光量変動 $\pm 3\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、焦点変動は $\pm 300\text{nm}$ 以下が許容値とされており、初期評価としては妥当な結果を得た。

次に、 90nm ノード以下のデバイスで使用する ArF プロセスウェハへの適用を検討した。ArF プロセスでは、微細パターン形成時のレジスト倒壊防止のためにレジスト塗布の薄膜化が図られており、またレジスト材料の特性から転写パターンの辺縁が粗くなっている。これらの課題に対し、薄膜塗布されたレジストの微小な形状変化を捉えるために、画像特徴量の改良を行なった。また、パターン辺縁の粗さに起因する推定精度の低下を、複数回検出と、特徴量のバラツキをその度合いに応じて抑制する処理にて防止した。ArF プロセスウェハでの評価の結果、露光量で誤差 $0.36\text{mJ}/\text{cm}^2$ (3σ)、フォーカス位置で 42nm (3σ) を確認した。ArF プロセスでは、露光量変動 $\pm 2\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、焦点変動は $\pm 250\text{nm}$ 以下が許容値とされている。評価結果は変動範囲の 10% 以内に収まっており、露光プロセスパラメータを制御するための実用的な手法を確立したと考える。

外観検査工程においては、検査装置で検出された欠陥を効率的に観察 (レビュー) し、欠陥種類に応じた対策を講ずることが重要である。欠陥観察の効率化を目的として、検査装置から出力されるウェハマップ (ウェハ上の欠陥座標マップ) を解析し、レビュー候補点を決定する欠陥点レビューサンプリング技術を開発した。ウェハマップの比較的広い領域に見られる有意な分布パターンは製造プロセスの異常と強い関係がある。この同種の欠陥が集まる有意パターンの領域内と、それ以外のランダムに分布する部分を識別し、レビューのサンプリング方法を変更することで欠陥レビューの効率化が図れる。有意候補パターンの検出は、欠陥点ごとの局所的な稠密度をボロノイ図により定義した上で、ウェハマップを最適な解像度の密度画像に変換し、この密度画像に統計的しきい値処理を適用して行った。検出された候補パターンを、予め登録された半導体プロセスで想定される分布パターンと効率的な照合を行い有意パターンの検出を行った。

レビュー点のサンプリングにおいては欠陥を、広域分布、ランダム分布の他、距離的に局所密集している三種類のクラスに分類した。サンプリング数については、ランダム欠陥では、そこに含まれる欠陥種類別の比率推定誤差とその統計的信頼度に基づき設定し、広域分布欠陥、及び局所密集欠陥については、その分布を占める主モード欠陥の割合を実験的に定めた上で統計的信頼度に基づき設定した。実験では、ランダム欠陥では欠陥種類別の比率の全数レビューとサンプリングレビューの差を、広域分布欠陥、及び局所密集欠陥では、主モード欠陥がサンプリングされた点数の半数以上を占めた場合を正解として、その正解率を評価した。ウェハ 13 枚、合計 4802 欠陥に対して実験を行なった結果、15.4% にあたる 741 欠陥がサンプリングされ、ランダム欠陥における比率推定誤差は 9% 以内、広域分布パターン欠陥における主モード特定は正解率 100% (3/3)、局所密集欠陥においては正解率 86.4% (51/59) を確認し、本提案の欠陥点レビューサンプリング技術により欠陥を全数観察することなく部分的な欠陥観察でウェハ全体の欠陥発生状況を把握できる見通しを得た。

半導体の微細化は進行しており、今後ともより高精度なプロセス制御を可能とする検査、計測技術が求められる。露光工程の計測においてはパターン転写の正確性の検証、外観検査では欠陥観察の自動化などが、パターン認識、画像処理の今後の課題になると考える。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 子 俊 一
副 査 教 授 中 川 泰 夫
副 査 教 授 北 裕 幸
副 査 准教授 田 中 孝 之

学 位 論 文 題 名

半導体製造プロセスにおける検査・計測のための パターン識別技術の研究

半導体の微細化により、デジタル機器の高機能化、記憶容量の大容量化が進んでいる。微細パターンの形成に際して最も重要となる製造プロセスが露光プロセスである。加工寸法の誤差はデバイスの電気的特性不良に繋がるため、加工寸法を一定に保つために、露光プロセスパラメータ、すなわち露光光の焦点位置、露光量の高精度な管理は極めて重要となる。一方、パターンの微細化に伴い、問題となる欠陥数も増加の傾向にある。このため製造プロセス内の適切な箇所で行い、検出した欠陥の観察、解析に基づく迅速な対策の重要性が増している。

本研究では、微細化する半導体製造の検査・計測において重要となる、露光プロセスにおける高精度なプロセスパラメータ推定法と、外観検査工程における高効率な欠陥観察手法の二つについて検討を行なった。

露光プロセスにおいては、従来から走査電子顕微鏡で撮像したレジスト画像からその線幅を計測し、プロセスを監視している。しかしデバイスの微細化に伴い、適切なプロセスパラメータの許容値が狭まる中、寸法管理のみでは安定な露光プロセス管理は困難になることが予測される。本検討では、露光シミュレーション及び、電子線シミュレーションを用いて、露光プロセスパラメータが変化した場合における、レジストの走査電子顕微鏡画像の信号変化を解析した上で、プロセス変動を適切に表現するための複数の画像特徴量を定めた。その上でこの画像特徴量に基づき、各チップで露光量と焦点位置を一定範囲で変化させたウェハを用いてモデルデータを作成しておき、評価対象画像から得た特徴量をモデルデータに照会し、最尤法にて露光量と焦点位置を推定した。90nm ノード以下のデバイスに用いられる ArF プロセスウェハを用いて実験した結果、露光量で誤差 $0.36\text{mJ}/\text{cm}^2$ (3σ)、フォーカス位置で 42nm (3σ) を確認した。ArF プロセスでは、露光量変動 $\pm 2\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、焦点変動は $\pm 250\text{nm}$ 以下が許容値とされている。評価結果は変動範囲の 10% 以内に収まっており、露光プロセスパラメータを制御するための実用的な手法を確立したと考える。

外観検査に関しては、欠陥観察 (レビュー) の効率化を目的として、検査装置から出力される欠陥マップを解析し、レビュー候補点を決定する欠陥点レビューサンプリング技術を開発した。欠陥マップ上の有意な分布パターンは製造プロセスの異常と強い関係がある。この有意パターンの内外を識別し、レビューのサンプリング方法を変更することで欠陥レビューの効率化が図れる。有意分布パターンの検出は、欠陥点ごとの局所的な稠密度をボロノイ図により定義した上で、欠陥マップを最適

な解像度の密度画像に変換し、この密度画像に統計的しきい値処理を適用して行った。

レビュー点のサンプリングは欠陥を前述の有意な分布形状を持つ広域分布、ランダム分布、局所密集の三クラスに分類して行なった。サンプリング数については、ランダム欠陥では欠陥種類別の比率推定誤差を、広域分布欠陥、及び局所密集欠陥では、クラス内の過半数を占める欠陥である主モード欠陥の特定率を統計的信頼度に基づき決定した。13枚のウェハに対する実験の結果、ランダム欠陥ではサンプリング率 15.4% で比率推定誤差 10% 以内、主モード特定は広域分布欠陥において正解率 100%(3/3)、局所密集欠陥において正解率 86.4%(51/59)を確認し、本提案の欠陥点レビューサンプリング技術により欠陥を全数観察することなく効率的に欠陥レビューが実現可能であることを確認した。

本論文で報告された研究内容は既存の情報である SEM 画像や欠陥マップ情報に対しパターン識別技術を導入することで、より高度な計測や効率的な検査が実現可能であることを示すものである。また、報告された手法は実際のデータを基に検証された上で所期の目的を達しており、実用上も意義ある技術開発がなされたと言える。

以上を要するに、著者は、半導体計測においては回路パターンの SEM 画像より露光プロセスパラメータを推定する手法を確立し、製品プロセスウェハによりその有効性を示した。また、半導体検査においては検査装置で検出された欠陥点から観察すべき欠陥点を選出するために、欠陥マップの分布パターン認識手法と分布パターン別の欠陥点サンプリング手法を確立し、欠陥観察の効率を向上させた。これらの結果は、パターン識別技術を以って半導体製造の検査及び計測の発展に寄与するところ大なるものがある。よって、著者は北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。