

光学式ウェーハ欠陥検査シミュレーション技術

Optical Simulation Technology for Wafer Defect Inspection Systems

藤井 孝佳 芳野 公則

■ FUJII Takayoshi ■ YOSHINO Kiminori

半導体デバイスの製造工程では、回路パターンの微細化に伴い検出すべきウェーハ上の欠陥サイズも小さくなっている。これに対して、ウェーハ欠陥検査で用いる光学式欠陥検査装置の検出感度を上げるため、光源の短波長化など様々な技術の導入が進んでいる。方式の異なる検査装置が増え、光学条件も複雑化しているため、最適な検査装置や光学条件の選定に多大な時間を要するようになった。

この問題を解決するため東芝は、光学系ごとの欠陥検出感度を予測する欠陥検査シミュレーション技術を開発した。デバイス試作前に、プロセスばらつきによる欠陥検出感度の変動リスクも考慮して、適切な検査工程、検査装置、及び検査光学条件を絞り込むことで、デバイスの開発期間を短縮している。

With the recent advancements in miniaturization of semiconductor device design rules, there is growing demand for optical inspection systems that can detect smaller defects of interest (DOI) in semiconductor devices. The performance of inspection systems has been improved by the introduction of complex optical conditions in illumination and collection systems, including the use of shorter wavelengths and polarization filters. However, a great deal of effort is required to adjust the optical conditions to the optimal levels.

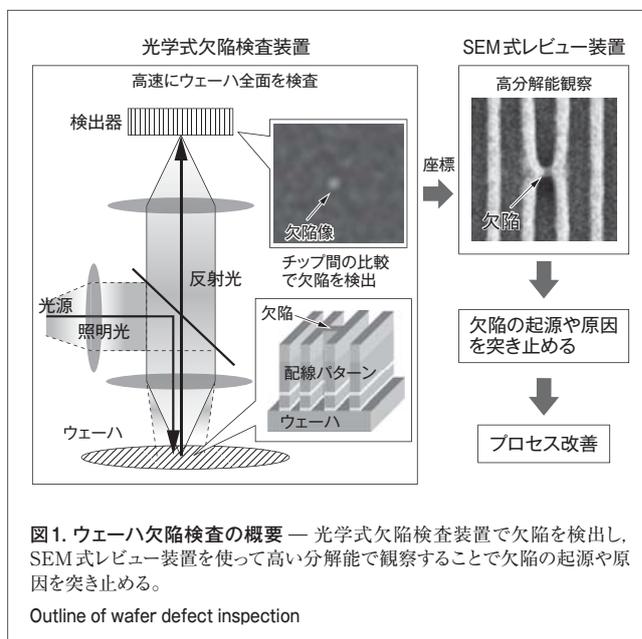
In order to overcome these problems, Toshiba has developed a simulation technology to estimate the magnitude of defect signals for given optical conditions of an inspection system. This simulation makes it possible to shorten the period of product development by preparing candidate optical conditions without the risk of signal reduction caused by variations in the process before trial production.

1 まえがき

半導体デバイスの製造工程では、ウェーハ欠陥検査により欠陥の起源や原因を突き止めプロセスを改善することで、歩留まりを向上させている。ウェーハ欠陥検査の流れを図1に示す。まず、高スループット（単位時間当たりの高い処理能力）の光学式欠陥検査装置でウェーハ全面の欠陥を検出し、次にこれを電子線を用いた走査型電子顕微鏡（SEM）式レビュー装置を使って高い分解能で観察して、欠陥を分類し管理する。各工程のウェーハ欠陥検査結果を突き合わせることで、欠陥の起源や原因を特定することができる。

一方、半導体デバイスの回路パターンの微細化は56 nm, 43 nm, 32 nmと急速に進んでおり、これに伴い検出すべき欠陥のサイズも小さくなってきている。これに対応して、光学式欠陥検査装置の検出感度を上げるために、光源は可視から紫外線、深紫外線へと短波長化が進み、輪帯照明などの変形照明や、偏光フィルタ、フーリエフィルタ^(注1)といった技術の導入が進んでいる。これにより、半導体デバイス製造ラインには方式の異なる検査装置が増え、それぞれの検査装置で選択でき

(注1) ウェーハ上のパターンの周期成分（繰返しパターン）と非周期成分（欠陥や孤立パターン）を光学的に分離するために、光学系のフーリエ変換面（ひとみ面）に置く空間フィルタ。



る光学条件も複雑化している。技術者は、デバイスや工程ごとに最適な検査装置と光学条件を選定するのに、多大な時間を要するようになった。

この問題を解決するため東芝は、光学系ごとの欠陥検出感度を予測する欠陥検査シミュレーション技術を開発した。

ここでは、この技術の概要と適用例について述べる。

2 欠陥検査シミュレーション技術

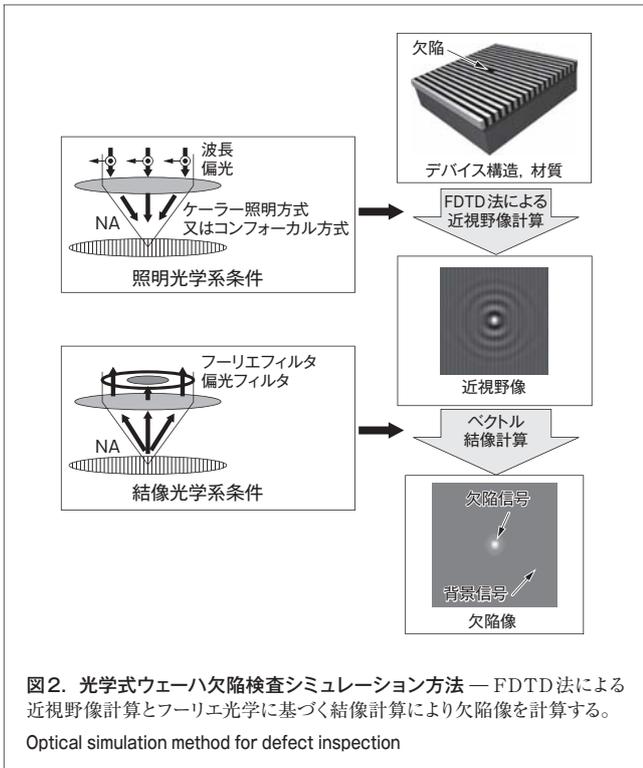
2.1 シミュレーション方法

開発した光学式ウェーハ欠陥検査シミュレーション方法を図2に示す。このシミュレーションツールは、汎用のFDTD法 (Finite-Difference Time-Domain Method) シミュレータと、当社で開発した結像計算プログラムから構成される。

まず、汎用のFDTD法シミュレータで、デバイスとその欠陥の構造をモデル化し、それぞれの材質の光学定数を波長ごとに設定する。次に、波長、偏光、照明方式に応じた入射電磁界を設定後、デバイスと欠陥からの反射近視野像を計算する。最後に、結像側開口数 (NA: Numerical Aperture)^(注2) や、フーリエフィルタ、偏光フィルタなどを考慮したベクトル結像計算⁽¹⁾を行い、検出器上における欠陥像を得る。

このシミュレーションツールでは、入射電磁界の設定によってケーラー照明方式とコンフォーカル方式のシミュレーションが、結像光学条件の設定によって明視野検査装置と暗視野検査装置のシミュレーションができる。

明視野検査は、欠陥と背景の画像の濃淡を欠陥コントラストという指標で評価する。暗視野検査は、欠陥信号強度という指標で評価する。



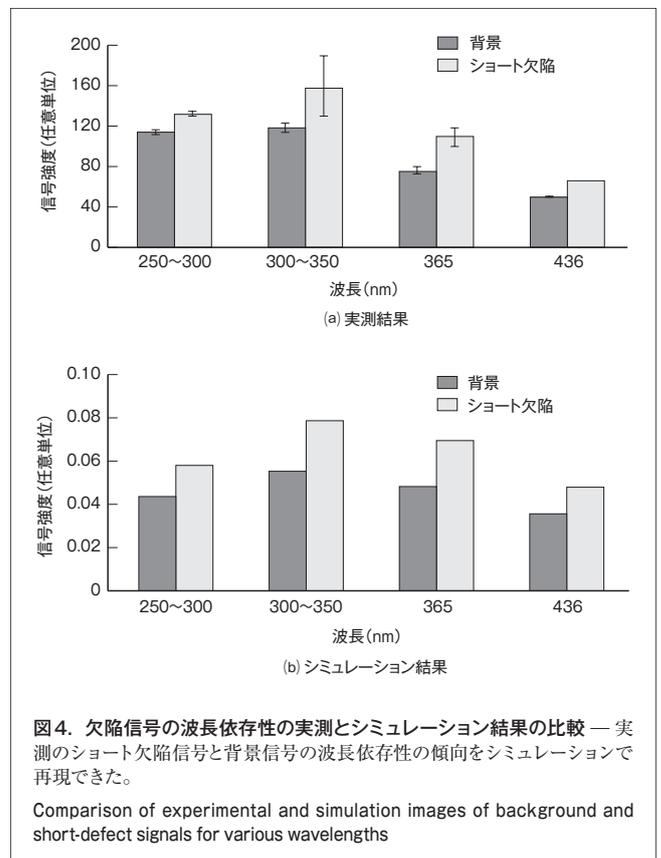
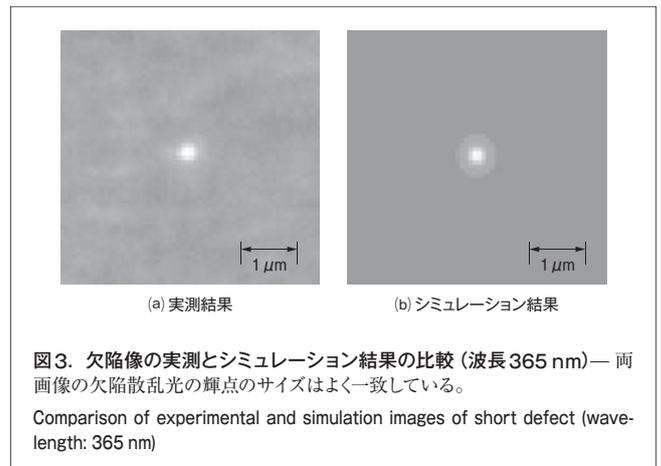
(注2) レンズの性能 (分解能, 焦点深度, 明るさなど) を求めるための指数。物体から見たレンズに入射する光線の、光軸に対する最大角度を θ 、物体とレンズ間の媒質の屈折率を n として $NA = n \sin \theta$ で表される。

欠陥コントラストは以下に示す(1)式から計算され、欠陥からの信号強度が背景より大きい場合 (白欠陥) は正の値を、小さい場合 (黒欠陥) は負の値をとる。

$$\text{欠陥コントラスト} = \frac{\text{欠陥信号強度} - \text{背景信号強度}}{\text{欠陥信号強度} + \text{背景信号強度}} \quad (1)$$

2.2 シミュレーション結果の妥当性確認

このシミュレーションツールの計算結果の妥当性を確認するため、45 nm 世代のレジストパターン上のショート欠陥を使った実測とシミュレーション結果の比較を行った。



ケーラー照明方式の明視野検査装置で取得した欠陥像を図3(a)に示す。光源波長365 nmでは、幅45 nmの配線及びサイズ45 nmの欠陥はもはや解像されず、画像上では欠陥からの散乱光が輝点として表れる。図3(b)はシミュレーション結果で、欠陥散乱光の輝点のサイズは実測とよく一致している。

この画像から算出したショート欠陥と背景の信号強度を、波長ごとに比較した結果を図4に示す。図4(a)のエラーバーは、複数の同一サイズのショート欠陥を実測した信号強度のばらつきを表している。図4(b)はシミュレーション結果で、実測での信号強度の波長依存性の傾向をほぼ再現している。

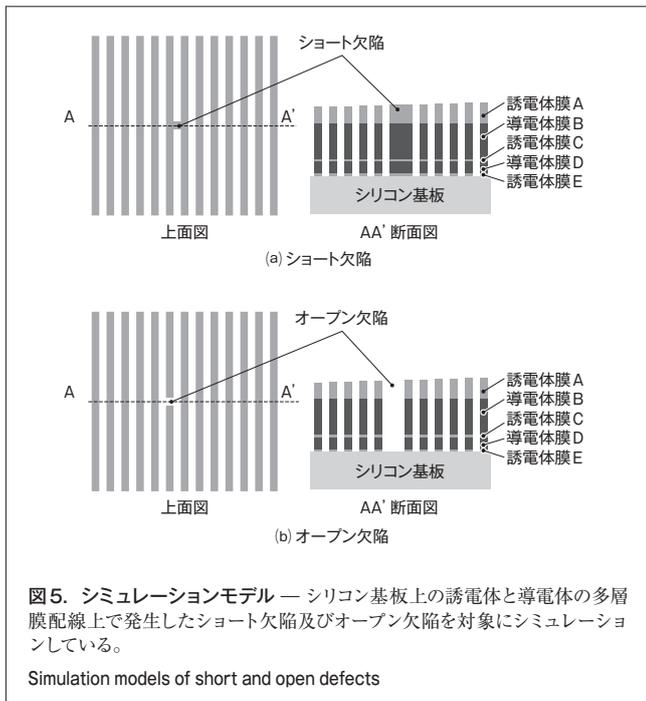
これらにより、このシミュレーションツールが欠陥信号強度を予測するツールとして有効であると判断した。

3 シミュレーションの適用例

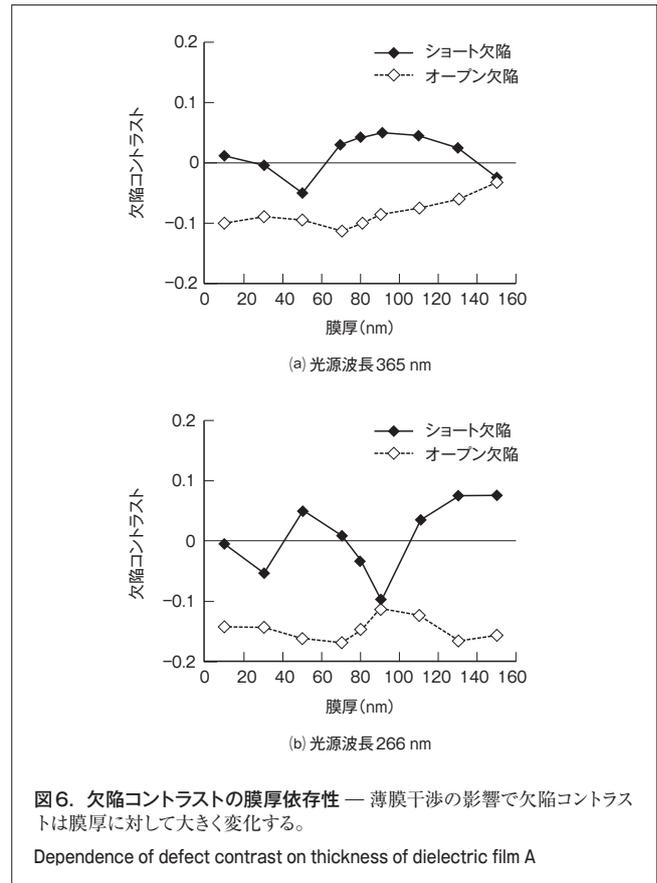
ここでは、2章で紹介した欠陥検査シミュレーション技術を適用した三つの例について述べる。これらは、図5に示す45 nm世代の配線パターンに発生したショート欠陥及びオープン欠陥を対象にシミュレーションしている。

3.1 成膜プロセスのばらつきが欠陥検査に与える影響の評価

ケーラー照明方式の明視野検査装置における、欠陥コントラストの下地膜厚(図5に示す構造で誘電体膜Aの厚さ)依存性を図6に示す。光源波長として水銀ランプのi線(365 nm)とNd:YAGレーザー^(注3)の第4高調波(266 nm)を用いてシミュレーションした。



(注3) Nd(ネオジウム)を含むイットリウム-アルミニウム-ガーネット結晶を用いたレーザー。



ショート欠陥の欠陥コントラストは膜厚によって大きく変化し、欠陥コントラストが正になったり負になることが図6からわかる。欠陥コントラストは正弦波状に変化し、その周期は光源波長365 nmより266 nmのほうが短いことから、この変化は薄膜干渉によるものと推定される。また、欠陥コントラストは特定の膜厚で0になる。これは、特定の膜厚では欠陥を検出できないことを示している。更に、光源波長365 nmと266 nmを比較すると、266 nmのほうが欠陥コントラストが大きい傾向がある。これは、微小欠陥の検出には短波長化が有効であることを示している。

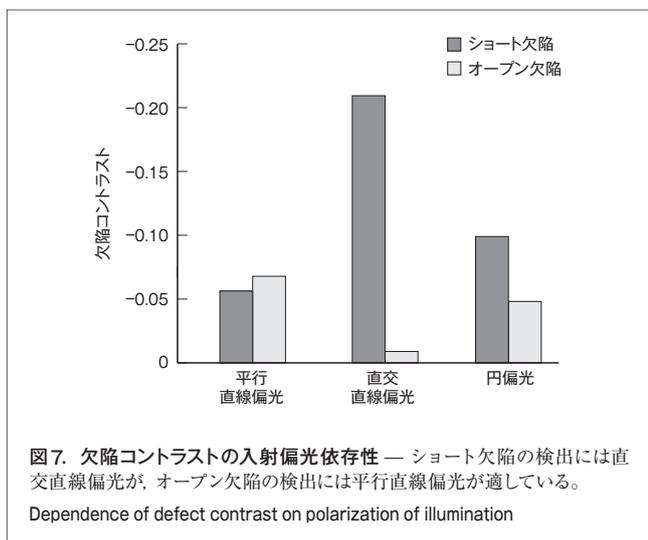
欠陥コントラストは成膜プロセスのばらつきの影響を大きく受けることから、これを考慮して光学条件を選定する必要がある。すなわち、デバイスの設計膜厚で欠陥コントラストが十分に得られ、かつ、成膜時に膜厚がばらついても欠陥コントラストの低下が小さい波長を選択する必要がある。例えば、設計膜厚及び成膜時の膜厚ばらつきが100 nm ± 10 nmの場合、光源波長が266 nm(図6(b))では、欠陥ショートの欠陥コントラストが0になる可能性がある。一方、光源波長が365 nm(図6(a))では、ショート欠陥、オープン欠陥とも欠陥コントラストのばらつきは小さく、266 nmより安定して検査ができる。プロセスばらつきによる欠陥検出感度の変動リスクも考慮すると、必ずしも短波長が有利とはならない例である。

3.2 入射偏光制御の効果の評価

光源波長が266 nmのコンフォーカル方式の明視野検査装置における、欠陥コントラストの入射偏光依存性を図7に示す。配線に対し平行な直線偏光、配線に直交する直線偏光、及び円偏光を用いてシミュレーションした。

ショート欠陥に対しては直交直線偏光が、オープン欠陥に対しては平行直線偏光がよく、いずれも円偏光より欠陥コントラストは向上していることが図7からわかる。一方、直交直線偏光で検査する場合には、ショート欠陥とオープン欠陥のコントラスト差が大きい、すなわち欠陥検出感度が異なることから、オープン欠陥を見逃す危険性がある。

このように、入射偏光を制御できる検査装置は、歩留まりを大きく落とす原因となる重要な欠陥だけに注目したい場合など、特定の欠陥を検出するのに効果がある。



3.3 微細化時の欠陥信号強度の予測

光源波長が266 nmの暗視野検査装置における、デバイス微細化と欠陥信号強度の関係についてシミュレーションした結果を図8に示す。欠陥サイズは、それぞれのデバイス微細化世代の最小配線幅と同じサイズに設定した。

欠陥信号強度は微細化に従い単調に低下しており、15 nm世代の欠陥信号強度は45 nm世代に比べ、ショート欠陥で1%以下に、オープン欠陥で約2%に低下することがわかった。

更なる微細化に対しては、大幅な欠陥検出感度の向上が必要であり、これを実現する光学系の検討にもこのシミュレーション技術を活用している。

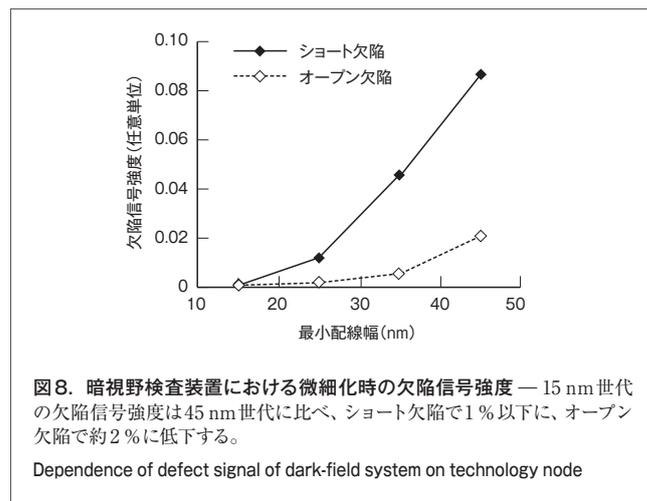


図8. 暗視野検査装置における微細化時の欠陥信号強度 — 15 nm世代の欠陥信号強度は45 nm世代に比べ、ショート欠陥で1%以下に、オープン欠陥で約2%に低下する。

Dependence of defect signal of dark-field system on technology node

4 あとがき

半導体デバイスの微細化に伴い光学式ウェーハ欠陥検査条件が複雑化するなかで、最適な検査装置及び光学条件を選定するための時間短縮を目的として欠陥検査シミュレーション技術を開発した。

このシミュレーション技術を適用し、デバイスの製造時に発生するプロセスばらつきによる欠陥検出感度の変動リスクも考慮して、デバイス試作前に適切な検査工程、検査装置、及び検査光学条件を絞り込むことで、デバイスの開発期間を短縮している。

更にこの技術を利用して、次世代デバイスの光学式欠陥検査の課題を早期に見極め、欠陥検出感度向上のための施策を検討していく。

文献

- (1) 渋谷真人, ほか. 回折と結像の光学. 朝倉書店, 2005, 226p.



藤井 孝佳 FUJII Takayoshi

生産技術センター 光技術研究センター研究主務。
光学部品、光学システム、及び光学検査の研究に従事。
Optical Technology Research Center



芳野 公則 YOSHINO Kiminori

研究開発センター デバイスプロセス開発センター研究主務。
半導体デバイスの検査・計測技術の開発に従事。
Device Process Development Center