

論文題目 変調照明シフトによる光学式超解像欠陥計測に関する研究

氏名 臼杵 深

(本文)

半導体デバイスの微細化に伴う製造コストの増大の主要因は生産ラインにおける歩留り低下にあり、これを防止するために、欠陥検査技術が重要な役割を果たしてきた。しかしながら、半導体検査業界においても、検査技術の微細化への追従が困難となっているのが現状である。これは、微細化に伴うキラー欠陥サイズ縮小による欠陥検出能力の低下、ウエハの大口径化による検査スループットの低下、に起因する。また、多層配線化や新材料の導入がなされ、欠陥が多様化したことにより、欠陥の有無の検出以外に、欠陥レビューが強く求められている。更に、生産ラインにおける検査には非破壊性が要求される。つまり、高解像力、高速計測性、非破壊性、全てを有する欠陥計測技術を開発することが急務である。

従来、100nmスケールの欠陥レビューはSEM(走査型電子顕微鏡)によって行われる。しかし、SEMは高解像力を有する反面、検査対象の汚染という問題を抱えている。更に、高速化の研究が活発になされているとはいえ、ウエハのインライン検査の観点でいうと、光学式検査技術に対してスループットの面で劣る。また、光学式検査技術は高いスループットを有する反面、解像力は、光源波長や対物レンズのNAにより制限され、100nmスケールといった微細構造の解像は困難である。

そこで、本論文では、従来技術では困難である項目(高解像性と高速計測性の両立)に対して、超解像技術からアプローチする。これにより、光学式計測法が本質的に有する非破壊性・高速計測性に加えて、波長や結像NAにとらわれない高い解像力を有する計測技術の実現が期待できる。超解像といっても、短波長化や高NA化といった単なる解像力向上の意味での超解像ではなく、本質的に波長や結像NAを超えた解像を達成する技術を提案・開発し、次世代欠陥計測技術として確立することを目指す。

半導体欠陥計測に対する要求として、高解像性、高速計測性、非破壊性があることは既に述べたが、様々な外乱が想定される生産現場における計測技術であることを考慮すると、ノイズに対するロバスト性が要求項目の1つとして挙げられる。そこで我々は、これらの要求項目全てを満たす手法として、変調照明シフトによる光学式超解像欠陥計測手法を提案する。

本手法は、試料に変調照明(空間的に変調された照明)を行い、照明光の位相シフトと共に複数の画像を取得し、それらを計算機により後処理することで試料分布を解像する手法である。変調照明を微小シフトさせることによって得られた複数画像には、通常

の結像情報以外に、照明の空間周波数帯域情報、微小シフトの情報が含まれるため、超解像が期待できる。更に、複数情報取得によるノイズ抑制効果の観点から、様々な外乱ノイズが想定される製造現場における半導体欠陥計測への適用が期待できる。

本研究の最終的な目的は、半導体欠陥計測において従来法では困難である項目（非破壊、高解像力かつ高スループット）を実現する新しい光学式計測技術を開発することである。具体的には、提案手法である変調照明シフトによる超解像欠陥計測法を半導体生産現場における有効なアプリケーションとして確立することを目的とする。

この目的を達成するためには、提案手法が以下の要件を満たすことが不可欠である。

- ①レイリー限界以上の解像力、すなわち光学的超解像を達成すること。
- ②様々な外乱が想定される生産現場において適用可能な計測法を開発すること、すなわちノイズに対する高いロバスト性を有する手法を開発すること。
- ③超解像欠陥レビューが可能な手法を開発し、レイリー限界以下のサイズである 100nm スケールの解像力および欠陥検出能力を達成すること。

本論文では、①～③の要件の検証を軸として研究を進めた。行った研究内容と得られた知見を以下に示す。

## 第 2 章において

- (1)変調照明による超解像の原理を、空間周波数領域における帯域拡大の観点から理論的に説明した。
- (2)変調照明による超解像の解像力に関してレイリー限界値を指標として定式化した。
- (3)変調照明の帯域情報を解像結果に反映させることにより、解像力をレイリー限界のおよそ 2 倍まで高めることが可能であることを示した。
- (4)変調照明による超解像は低 NA (深い焦点深度) においてもレイリー限界を超えた解像が実現できる可能性があり、計測対象の振動に強く、高速走査が可能となり、高いスループットの計測技術の開発が期待できることを示した。
- (5)デジタル超解像の原理、デジタル超解像を実現するための反復的アルゴリズムの説明を行った上で、生産現場への適用性について考察した。
- (6)提案手法である、変調照明シフトによる超解像法の原理に関して、変調照明による超解像とデジタル超解像の 2 つの側面から考察した。

## 第 3 章において

- (1)解像アルゴリズムの構築にあたって、変調照明による光学結像式を示し、光学結像式の行列表現について説明した。
- (2)変調照明シフトによる超解像を実現するために、変調照明シフトにより取得された画像 1 枚毎に結像方程式の解を再構成してゆく解像アルゴリズムを新たに構築した。

- (3)構築アルゴリズムによる解像計算例を示し、アルゴリズムの機能確認を行った結果、試料分布が再構成され、通常の光学結像では解像できない構造が解像されることを確認した。

#### 第4章において

- (1)変調照明シフトによる複数像に対して構築したアルゴリズムを適用した結果、レイリー限界を超えた解像、すなわち一様照明による光学結像では判別不能な二点物体の超解像を確認した。
- (2)変調照明の複数シフトによるノイズに対するロバスト性向上をノイズ混入時の複数像を用いた二点物体の解像シミュレーションで検証し、独立なシフト回数を多くすることにより、ノイズに対するロバスト性が向上することを示した。
- (3)解像結果に影響する入力パラメータの検討を行い、理想条件における構築アルゴリズムによる解像限界について検討した結果、構築アルゴリズムによる限界解像力を達成するためには、可能な限り変調照明ピッチを小さくすること（変調照明周波数を高く設定すること）の他、位相条件が揃った状態で独立なシフト回数を多くすること（シフトステップサイズを小さくすること）が要件となることがわかった。理想条件の下、現実的な光学条件を用いて提案手法により得られる限界解像力は20nmであった。
- (4)ノイズ混入時の構築アルゴリズムによる限界解像力は、理想条件下での条件に加え、可能な限り変調照明周波数を高く設定することで達成できることがわかった。更に、
- ①提案手法により100nmの解像力が得られること
  - ②30%のノイズの下、現実的な光学条件を用いて提案手法により得られる限界解像力は50nmであること
- を確認した。
- (5)提案手法による超解像を関連超解像と比較した。その結果、提案手法（変調照明シフトによる方法）は、
- ①変調照明による超解像に対して解像力の面で優位性が期待できること
  - ②ノイズ混入時において一様照明下でのデジタル超解像に対し、二点物体の識別性、二乗誤差関数の収束性の面で優位であること
- がわかった。

#### 第5章において

- (1)変調照明シフトによる超解像法の実験的検討を目的として、定在波照明シフト光学系の構築、暗視野散乱光検出光学系の構築を行い、変調散乱光検出のための基礎実験装置の開発を行った。

(2)更に、開発装置の基本機能確認として、定在波照明生成実験および変調散乱光検出実験を行った。その結果以下の事項を確認した。

- ①開発した装置を用いて周期的な強度分布を有する定在波照明が生成可能であること
- ②開発した実験装置を用いて定在波の周期的強度分布に対応した散乱光の変調が可能であり、これを暗視野検出可能であること

#### 第6章において

開発した装置、構築アルゴリズムを用いて超解像実験を行い、以下の事項を確認した。

- (1)提案手法により、一様照明かつ結像 NA(0.46)ではぼやけて判別不能であった標準粒子の2点並列構造および3点並列構造が明確に分離されるということが確認出来た。
- (2)比較的低い NA0.46 の対物レンズを用いたラインアンドスペースの超解像実験を行い、レイリー限界 (647nm) を超えて 500nm 間隔のラインエッジの解像が可能であることを確認した。
- (3)定在波照明のシフトの回数をおおよそ変調照明 1 ピッチ分とすることで、実験におけるノイズを抑制可能なことを実験的に確認できた。
- (4)開発装置および構築アルゴリズムにより、レイリー限界 313nm の条件下で 150nm の超解像が達成できることがわかった。

#### 第7章において

ラインアンドスペース上に欠陥が存在するサンプルに対して解像実験を行い、解像結果を高解像観察手法である AFM や SEM による像と比較することにより以下の事項を実験的に確認し、提案手法の超解像欠陥検出に対する実験的な有効性を示した。

- ①レイリー限界 647nm の結像系および超解像処理によって 500nm 間隔のラインエッジに影響を及ぼす欠陥を検出可能ということ
- ②レイリー限界 313nm の結像系および超解像処理を用いて、250nm 間隔のラインエッジを埋めるように存在する異物欠陥を検出可能ということ

本論文の結論を総括すると以下のようなになる。

提案手法によって、ノイズに対する高いロバスト性の下、100nm スケールの解像力を有する光学式欠陥計測手法が実現可能と考えられる。