

[別紙2]

審査の結果の要旨

論文提出者指名 白杵 深

本研究は、半導体欠陥計測において、非破壊性、高解像力、高速計測性、を兼備する新しい光学式計測技術を開発することを目的とした研究である。この目的を達成するために、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し、提案手法が以下の要件を満たすことを理論的かつ実験的に検証している。

- 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。

本論文の具体的な内容を以下に記す。

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が示された。
- (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が示された。
- (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可能であることが確認された。

第 4 章において

- (1)離散的散乱体のモデル化を行い、FDTD 法を用いて構築モデルを検証した。その結果、変調照明ピッチに対して十分小さい散乱体を設定することで、散乱体の形状によらず理想的な照明強度分布に対

応した散乱光量が結像されることを示した。この条件のもとで、照明強度に線形な応答を示す散乱光結像を扱うことが可能であることを確認した。

- (2)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が確認された。
- (3)解像特性を定量的に評価するために、解像結果において二点物体の識別性を指標として与えた。二点物体識別性に影響を与える入力パラメータに関して考察し、理想条件下での解像特性について検討した結果、位相条件が揃った状態で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）により、構築アルゴリズムによる限界解像力が達成できることを明らかにした。理想条件下、現実的な光学条件を用いてシミュレーション検討した結果、20nmの限界解像力が達成可能であることを明らかにした。
- (4)生産現場におけるノイズに関して考察し、ノイズを付加させた複数像を用いて二点物体の解像シミュレーションを行いノイズ混入下での解像特性の検討を行った。結果、変調照明の複数シフトによるノイズ抑制効果を確認した。更に、ノイズ混入下での入力パラメータの影響を評価し、解像特性について検討した結果、変調照明ピッチを小さくすることと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）により、限界解像力が達成できることが明らかになった。更に、変調照明ピッチ 300nm、シフト回数 10 回の条件の下では、像に混入するノイズを 20%に抑えることで、提案手法により、目標解像力である 100nm が達成可能であることが示された。
- (5)提案手法による超解像を関連超解像と比較した。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
 - ③ノイズ混入時において、GPM と比較して、同等の解像力が得られること、二乗誤差関数の収束性の面で優位であることが明確となった。

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、以下の事項が確認された。
 - ①開発した装置を用いて周期的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

- (1)提案手法の解像特性を実験的に検討するために、標準粒子を用いた離散的散乱体の解像実験を行った。結果、1200nm ピッチの定在波照明をシフトすることにより得られた NA0.46 の対物レンズによる複数像を用いて超解像処理することにより、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 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された。
- (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った。結果、1750nm

ピッチの定在波照明をシフトすることにより得られたNA0.46の対物レンズによる複数像を用いて超解像処理することにより、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確認された。

(3)ノイズに対するロバスト性の実験的検討を行った。結果、定在波照明のシフトの回数をおおよそ変調照明1ピッチ分の20回程度とすることで、実験におけるノイズに対応することが可能であり、複数シフトによりロバスト性が向上することが実験的に確認された。

(4)高NA0.95対物レンズを用いた微細ラインアンドスペースの超解像実験を行った。結果、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の超解像が確認された。

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、以下の事項が実験的に確認され、提案手法の超解像欠陥検出に対する実験的な有効性が示された。

- 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

以上から、提案手法によって、「光学的超解像が実現すること」、「ノイズに対する高いロバスト性を有する計測技術が実現すること」、「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であること」が明確となった。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。