

審査の結果の要旨

氏名 工藤 良太

本研究は、工学的機能を持つ微細加工構造の計測において、非破壊性、高解像力、高速計測性、を兼備する新しい光学的超解像計測技術を実用化することを目的とした研究である。変調照明による帯域拡大効果を利用した超解像手法は、バイオイメージングの分野において、製品化がなされ有効に活用されている。しかしながら同手法はインコヒーレント結像を前提としており、蛍光試料等のインコヒーレントな光応答を示す対象のみに適用可能である。半導体微細構造などの一般の散乱体に対して、変調照明利用による超解像効果を及ぼす手法として、変調照明シフトによる超解像法が提案された。この手法は従来、二光束干渉定在波照明シフトとインコヒーレント結像を前提とするアルゴリズムを利用したものであった。定在波照明をコヒーレントな光を用いて生成しているため、半導体などの一般の散乱体に対してはコヒーレント結像条件となる。一方、再構成アルゴリズムはインコヒーレント結像を前提としている。ここに従来手法の問題点がある。そのため、従来手法においては、超解像を実現するために定在波ピッチを $1\mu\text{m}$ 程度以上に大きくしなければならないという適用条件が存在する。帯域拡大の効果を有効に利用するためには、定在波ピッチを小さく設定することが望ましいが、従来手法においては、 $1\mu\text{m}$ 程度以下の定在波ピッチでは、良好な解像特性を得ることが困難であった。本研究では、変調照明シフトによる超解像法を、上記のような適用条件によらず、実現する手法を提案している。コヒーレント結像を前提とする逐次再構成アルゴリズムを提案し、アルゴリズムを適用可能な、新たな照明分布を提案している。新たな手法においては、上記適用条件が必要にならず、変調照明のピッチを可能な限り小さくすることによる、帯域拡大効果の有効利用が実現可能となることを、理論的かつ実験的に検証している。また変調照明シフトによる超解像法の実用化のための技術として、必須技術である二次元超解像法、応用技術である設計値利用型超解像法の理論的特性の検討を行っている。

第2章、第3章において

二光束干渉定在波シフトとインコヒーレント結像逐次再構成型アルゴリズムを用いた従来手法は，半導体微細パターンなどの散乱体試料に対する適合性が悪いことが示された．インコヒーレント結像とコヒーレント結像の差異の影響で，従来手法においては正確な再構成結果が得られない例があることが示された．

第 4 章において

- (1) コヒーレント結像条件で，干渉の影響を考慮して，振幅レベルでの逐次再構成を行う反復的アルゴリズムが示された．
- (2) 上記のコヒーレント結像逐次再構成型アルゴリズムを適用可能である，位相の正負反転の存在しない照明分布として，①三光束干渉位相同符号型定在波照明，②ガウシアンスポット照明の利用が提案された．
- (3) ①三光束干渉位相同符号型定在波照明を利用する手法において，従来手法において再構成不可能な条件，対象の再構成が可能であることを示した．小さい定在波ピッチにより帯域拡大の効果を十分に活かすことのできると思われる条件が，新手法では適用可能である．
- (4) 目標分解能 100 nm を超える 50 nm の分解が可能であることを示した．
- (5) 複数の取得画像を利用することにより，ノイズを軽減可能であること（ロバスト性）を示した，
- (6) ②ガウシアンスポット照明を利用する手法の検討により，高分解能かつ高 SN 比の観察結果がえら得る手法であることを示した．

第 5 章において

- (1) 定在波のピッチ，位相に誤差が存在する場合の影響について示された．この検討に基づき，実験における許容される誤差が決定された．
- (2) 光学系の遮断周波数以上の周波数をカットする数値的ローパスフィルタの導入により，ノイズの影響を軽減可能であることを示した．
- (3) ピクセル分割処理を行う場合に，数値的ローパスフィルタが有効であることを示した．

第 6 章において

- (1) 三光束干渉位相同符号型定在波生成のための実験装置が示された．三光束の強度・偏光の制御により三光束干渉定在波を生成可能な装置であることが示された．
- (2) 上記実験装置において，PZT の制御により，落射照明の位相シフト，定在波の空間シフトを行うことが示された．

第 7 章において

- (1) 定在波照明と既知の周期構造との間に生成するモアレ縞を観察することにより、間接的に二光束干渉定在波と三光束干渉定在波の生成を確認した。
- (2) モアレ縞を利用して落射照明の垂直入射度を調整可能であることを示した。
- (3) モアレ縞のシフトから、間接的に二光束干渉定在波のシフトを確認した。
- (4) 落射照明位相シフト用 PZT, 定在波空間シフト用 PZT の同期駆動し, 三光束干渉定在波のシフトを確認した。
- (5) モアレ縞の情報を用いて, 定在波に関するピッチ, シフトステップサイズ, 位相を同定することが可能であることが示された。

第 8 章において

NA0.80 の暗視野光学顕微鏡において分解できない, 230 nm 間隔の構造の超解像実験を行った。定在波ピッチを小さくし, 帯域拡大の効果を十分に利用することを指向した実験条件である。

- (1) 従来手法において, 再構成不能であることを示した。
- (2) 新手法において, 試料の構造の再構成が可能であることを示した。

提案手法の従来手法に対する優位性を確認した。かつレイリー限界 541 nm の条件で 230 nm の構造を, 帯域拡大およびデジタル超解像の効果により, 解像可能であるとする光学的超解像性を実験的に実証した。

第 9 章において

二次元超解像法において, 二次元の等方的な構造再構成を行うために, 八方以上の方向での定在波シフトが望ましいことが示された。

設計値利用型超解像法において, 設計値を初期値として利用しても欠陥検出が可能であり, また離散化誤差の影響を抑えて, 良好な解像特性が得られることが示された。

以上から, 提案手法によって, コヒーレント結像条件での一般の条件において, 定在波ピッチを小さく設定した場合にも, 光学的超解像が実現できることが理論・実験から示し, 変調照明シフトによる超解像法の適用範囲が拡張されたことが明確となった。また, 二次元超解像法実現の必要条件が明らかにされ, 設計値利用型超解像法の有効利用の可能性も示された。実用化の先鞭をつける成果と言える。

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。