

氏名	志村 啓			
学位の種類	博士 (工学)			
学位記番号	博 甲 第 7666 号			
学位授与年月日	平成 28 年 3 月 25 日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	Development of an optical height sensor and key optical components for wafer inspection systems (ウエハ検査装置のための光学式高さセンサと主要光学部品の開発)			
主査	筑波大学教授	工学博士	伊藤 雅英	
副査	筑波大学教授	理学博士	服部 利明	
副査	筑波大学准教授	博士 (理学)	加納 英明	
副査	筑波大学講師	博士 (理学)	渡辺 紀生	
副査	(株)日立製作所	工学博士	島野 健	

論 文 の 要 旨

半導体ウエハ検査装置でキーとなる光学技術の研究開発を行い、ウエハ検査装置の性能とCoO(Cost of Ownership)の改善を図った。

ウエハ検査装置は、2つのカテゴリに分類される。ひとつは、電子ビームを用いた検査装置、もう一つは光学式検査装置である。電子ビームを用いた検査装置は、ウエハ表面に形成されたパターンの寸法の検査や、光学式検査装置で検出された欠陥の識別や分類に用いられている。光学式検査装置は、ベアウエハやパターン付きウエハ上の異物、スクラッチ、パターン不良などの検出に用いられている。

両方のタイプの検査装置において、光学技術が用いられている。光学式高さ検出器は、両方のタイプの検査装置で、ウエハ表面の画像を取得する際の焦点合わせに使用されている。また、高出力の深紫外レーザと高 NA の光学系は、光学式検査装置において高感度で高スループットの検査を実現するために必要とされている。

光学式高さ検出器では、電子ビームを用いた検査装置の検査スループットの向上、あるいは、光学式検査装置の検査感度の向上のために、精度(accuracy)の改善が必要とされている。ウエハ検査向けの高さ検出器としては、単一スリットあるいは複数スリットをウエハ上に斜めから投影し、その像の位置ずれを一次元の位置検出器あるいはラインセンサで検出する高さ方式が開発されており、ウエハ上のパターンに依存した検出誤差を減らすことで精度を向上が進められてきた。しかし、パターンによる大きな反射率差の影響を抑制し、検査に必要な精度を実現するのは困難であった。電子ビームを用いた検査装置で

は、光学式高さ検出器の誤差の補正が検査スループットを制限する一因となっており、スループットの向上のために精度向上が必要とされている。光学式検査装置では、焦点調節の誤差が検査感度に大きく影響するため、精度向上が必要とされている。

本研究では、簡略な構成で正確なウエハ検査装置向けの光学式高さ検出器を開発した。まず、従来の方式で課題となっていたパターンに依存した測定誤差の原因を分析した。誤差要因となるのは、反射率差の大きな変動で、投影するパターンをスポットからスリットにすることで誤差低減が図れ、さらにマルチスリットにすることで改善が図れることは従来から知られていた。本研究では、さらに分析を進め、スリット像の大部分が反射率の低い領域に存在し、スリットの端に反射率の高い領域がかかった場合には、誤差が残ってしまうことを明らかにした。また、投影されたスリット像をレンズとミラーを用いてウエハ上に再投影する方式についても検討し、この方式が高いアライメント精度を必要とすること、ウエハの高さを変えて焦点を合わせる制御方式の場合には、誤差低減の効果が十分に得られないという課題を持っていることを明らかにした。これらの検討を受けて、パターン依存誤差を低減する方法として、マルチスリット法に基づいた新たな方式を提案した。提案した方式では、8本のスリットをウエハに投影し、その反射像をイメージセンサで検出し、取得した画像中のスリット像の位置座標の平均をとってウエハ表面の高さを検出した。ライン毎にスリット位置座標を検出し、その座標のライン間平均をとることにより、スリット像上の明るさ分布の影響を受けずに位置検出することが可能になり、パターン依存の誤差を低減することが可能となった。開発した高さ検出器を単体の評価系に搭載し、スリット像の反射率差が10倍程度あるパターン付きウエハを用いてその効果を検証した。ウエハが基準高さにある場合と、基準高さから±0.1mmの高さにある場合の全てにおいて、パターンに依存した誤差を0.35 μm以下に低減できることを示した。さらに、この高さ検出器を電子ビームを用いたウエハ検査装置に組み込み、同じパターン付きウエハを用いて精度評価を実施した。ウエハの吸着の影響と予想されるたわみ成分を除くと、パターンに依存した誤差を0.20 μm以下にできることを示した。高速で正確な自動焦点合わせを実現できる見通しを示した。

光学式検査装置では、デザインルールの縮小に伴って欠陥の検出感度の向上が必要とされている。暗視野式検査装置では、継続した検出感度向上のために、短波長の高出力レーザーが求められてきた。これは、検出すべき異物等の欠陥が波長に比べて小さいため、これらで散乱される光の散乱光強度がレーリ散乱で近似でき、粒径の6乗と照明光強度に比例し、波長の4乗に反比例するためである。2000年代には、0.1W級の連続発振の266nmレーザーが開発され、さらに2010年からはW級のレーザーが製品化され、ウエハ検査に適用可能となった。しかし、一方で検査に使えるレーザーパワーが、ウエハ上の異物の破壊されるレベルによって制限される場合が生じてきた。これは照射されたレーザー光によって、ウエハ上の異物が爆発すると、かえってウエハ上を汚染してしまうからである。そこで、次世代の検査装置では、266nmより波長の短いレーザーが必要とされている。さらに、レーザーに加え、より高感度の検出を実現する新しい検査光学系、あるいは、多様な欠陥を検出できる検査光学系を適切なコストで実現することが、暗視野式検査装置に必要とされている。

本研究では、暗視野式検査装置向けの波長213nmのレーザーと斜方検出結像光学系を開発した。

レーザーの開発では、波長213nmで、高い出力と狭スペクトル線幅を両立させる方式を検討し、モードロックレーザーの波長変換が有効な方法である可能性を示した。これを実験実証するために、近赤外のモードロックレーザーを基本波として波長変換によって213nmを発生させるレーザーを設計製作し、ウエハ検査装

置への適用可能性を検証した。レーザの設計では、波長変換光学系の設計に S.A.Self の提案したビーム伝搬計算法を用い、ウォークオフのある場合のビーム系を簡易的なモデルで算出する方法を用いた。また、波長変換後のビーム整形光学系の設計では、製造性を考慮した光学設計を行った。続いてレーザを製作し、その特性を評価した。基本波出力 11W の場合に、213nm の出力として 110mW が得られることを確認した。また、この出力で、20pm 以下のスペクトル線幅と $M^2 < 1.7$ の良好なビーム品質が実現できることを示した。さらに、出力 68mW で安定性を評価し、25 時間の安定動作と、この間の出力安定性が $\pm 1.5\%$ と光学式ウエハ検査に適用可能な性能を持つことを確認した。これらの開発を通し、暗視野検査に適した狭線幅の高出力深紫外レーザがモードロックレーザの波長変換で実現可能であることを明らかにした。

検査用の結像光学系の開発では、低仰角方向に強い散乱光を生じるような欠陥の検出を可能とする深紫外対応の斜方検出結像光学系を設計・製作した。波長 266nm 対応で、仰角 20 度で $NA=0.25$ 、空間フィルタリングが可能な 3 倍率対応の結像光学系を設計製作した。中間像を形成し、リレーするとともに光路を 1 回折り返す構成とすることで、性能仕様と装置への実装制約を満足する解を得た。また、暗視野検査に用いる結像光学系(以下検出レンズと呼ぶ)の評価に適した点像評価方式とその評価装置を開発し、製作した検出レンズの評価に適用した。評価装置は、評価対象の検出レンズの物体面に点光源を形成し、その光源の評価対象検出レンズによる像を顕微鏡で拡大撮像する構成である。撮像した点像の評価の際にウエハ検査で用いる検査画素サイズを考慮した評価指標を用いることにより、検出レンズの結像性能とコストとの最適なバランスをとることが可能となった。暗視野検査に適した性能が実現できることを示した。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

半導体ウエハ検査装置は、LSI デバイスの開発と量産に必須であり、開発フェーズでは歩留りの改善に、量産フェーズでは歩留りの維持に用いられる。生産の歩留りは、最終的に LSI チップのコストを決めるため、量産の際に最も重要なファクターである。開発時に高い歩留りを実現し、量産において維持するためには、生産システムや生産プロセスのパラメータの問題を可能な限り早急に検出し、修正することが必要になる。こうした社会からの強い要請が本研究の背景となっている。

本研究では、ウエハ検査装置で必要とされる多様な光学技術の研究開発を行っている。光学式高さ検出器は、電子ビームを用いた検査装置に適用され、これを用いることで、検査スループットの向上が期待される。この技術は、光学式検査装置にも適用可能で、検査画像取得時の焦点誤差低減による検査感度の向上に直結すると思われる。また、波長 213nm のモードロックレーザ、深紫外対応の斜方検出結像光学系とその評価技術は、次世代検査装置の検査感度向上の開発に不可欠なものといえる。こうした観点から、本論文は、光学的半導体ウエハ検査装置の発展に大きく寄与したと認められ、その学術的、産業応用的な価値は高く評価される。

〔最終試験結果〕

平成28年2月15日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、

著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。