

Title	光散乱パターンを用いたシリコンウエハ加工表面欠陥の検出・識別に関する研究
Author(s)	高橋, 哲
Citation	
Issue Date	
Text Version	none
URL	<a href="http://hdl.handle.net/11094/44405">http://hdl.handle.net/11094/44405</a>
DOI	
rights	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/>

氏名	高橋 哲 <small>たかはし さとる</small>
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 17258 号
学位授与年月日	平成 14 年 7 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文名	光散乱パターンを用いたシリコンウエハ加工表面欠陥の検出・識別に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 三好 隆志  (副査) 教授 花崎 伸作 教授 伊東 一良 助教授 高谷 裕浩

### 論文内容の要旨

本研究では、インプロセス計測への適用を考慮したプロセス制御ならびにプロセス管理を行うことができるような、シリコンウエハ加工表面欠陥計測法の開発を目的として、光散乱パターンに基づく新しい測定原理の微小欠陥計測法を提案し、その有効性について理論・実験の両面から検証した。

第 1 章では、本研究の背景、従来の研究についてまとめ、本研究の目的を述べた。

第 2 章では、LMT (ローレンツ・ミー理論; Lorenz-Mie Theory) をガウシアンビームに拡張した散乱理論である GLMT (一般化ローレンツ・ミー理論; Generalized Lorenz-Mie Theory) に基づいた理論展開を行い、計算機内で光散乱パターンの生成を試みることで、その生成メカニズムについて検討を行った。

第 3 章では、提案手法の有効性について実験的に検討を行うための、Si ウエハ加工表面欠陥計測システムの設計・開発を行った。

第 4 章では、第 3 章で開発した計測システムを用いて、歩留まりへの影響が大きいとされる粒子状付着異物に注目した欠陥検出実験を試み、実験的に光散乱パターンの生成を確認した。そして、理論解析で仮定した光散乱パターン生成メカニズムの妥当性の検証を行うとともに、粒径や欠陥形態の違いが光散乱パターンへ及ぼす影響を調べた。さらに検出が困難とされる  $0.1\mu\text{m}$  以下の微小欠陥検出が可能であることを明らかにした。

第 5 章では、付着異物同様に、半導体デバイスの製品歩留まりに大きな影響を与える COP (Crystal Originated Particle) 欠陥を対象として、光散乱パターン検出実験を試みた。そして、特に識別が求められている付着異物との散乱機構の違いに注目し、光散乱パターンを定量評価することで、COP 欠陥、付着異物両者の識別が可能であることを示した。

第 6 章では、実際の欠陥位置が未知な場合を想定し、走査実験による欠陥位置検出と検出欠陥識別の検証実験を試みた。そして、光散乱パターンに基づく提案手法の優れた欠陥識別能力を活かしながら、従来手法同様の高速性を達成するために、二段階高速欠陥計測法を提案し、その有効性の確認を行った。

第 7 章では、本手法の持つ広角度照明機能を活かしつつ、感度の向上を図った暗視野検出法を提案し、その検出特性を解析した。そして、ベアウエハ同様に表面性状管理が必要とされている多層膜層間絶縁膜への適用性について論じた。

第 8 章では得られた結論を総括した。

## 論文審査の結果の要旨

半導体集積回路の製造工程において、その基板となるシリコンウエハ加工表面に存在するサブマイクロメートル以下の微小欠陥は製品歩留まりを直接支配する。したがって、製造デバイスの信頼性を確立し、歩留まりの向上を図るためには、様々な形態で存在している微小表面欠陥の出現確率に応じた高度なプロセス制御ならびにプロセス管理が不可欠であると考えられる。この際、特に重要な技術となるのが、微小欠陥がどのような形態で存在しているのかをインプロセスで検知する技術、つまり、ウエハ表面に確率的に存在している微小欠陥の高速検出技術と検出欠陥の形態評価技術である。本論文は、様々な形態を持つ微小欠陥から異なった分布で散乱する光波とウエハ表面から反射される光波のフーリエ変換型オン軸干渉現象に基づく光散乱パターン (LSDP) を用いて、インプロセス計測法として適用可能な、微小欠陥の高速検出と形態評価両者の実現を目指したものである。主な成果を要約すると次の通りである。

- (1) サブマイクロメートルサイズの微小欠陥の存在により、どのような形態の LSDP が生成されるのかを理論解析により明らかにしている。同解析は、直線偏光した平面単色波による球形粒子の散乱形態を近似を用いず厳密に記述したローレンツ・ミー理論 (LMT) をガウシアンビームに拡張した一般化ローレンツ・ミー理論 (GLMT) に基づいて理論展開を行うもので、ガウシアンビーム照明下の基板上付着異物による散乱形態理論モデルを構築し、計算機シミュレーションにより、LSDP の生成を試みている。検証実験で用いるポリスチレンラテックス (PSL) 標準粒子を想定したシミュレーション結果から、その LSDP は同心リング状の明暗分布となること、また、ウエハ表面正反射光強度分布を参照パターンとして減算処理を施すことで、欠陥情報の抽出が可能であることを示している。
- (2) 提案手法の有効性について実験的に検討を行うために、上述の理論解析に基づいて Si ウエハ加工表面欠陥計測装置の設計・開発を行っている。具体的には、フーリエ変換光学系を拡張し、一つの高 NA 対物レンズを投光・受光の両者に用いた LSDP 検出光学系を提案・設計している。これにより、1) 多光束全方位入射、2) 小スポットサイズ、3) 遠方散乱角度受光、4) 散乱光広角度受光、5) 二次元強度分布検出、といった微小欠陥高感度検出・詳細評価の観点から求められる 5 つの光学特性すべてを満足することを示している。そして、LSDP 検出光学系に、高精度デフォーカス量調整機構、ウエハ走査機構、LSDP 解析 PC システムを組み合わせ、Si ウエハ加工表面欠陥システムの構築を行っている。本システムは、レーザ光源の遠隔設置ならびにクリーンベンチ (クラス 10) の適用を行うことで、熱変動や環境塵埃の影響は排除した厳密な検証実験が可能な構成となっている。
- (3) 粒径および光学定数が既知な PSL 標準粒子に対する検出実験を行い、実験的に LSDP の生成を確認している。また、これにより、理論解析で仮定した LSDP 生成メカニズムが妥当であることを明らかにしている。そして、実異物、フィルム状付着物、スクラッチ欠陥の検出実験を行い、PSL 標準粒子だけでなく、実プロセスで存在している様々な種類の微小欠陥も LSDP として検出可能であることを示し、検出 LSDP の形態変化から欠陥種類識別の可能性があることを示唆している。さらに、粒径 88 nm PSL 標準粒子の検出実験から、デフォーカス量を調整することで、大きさが  $0.1 \mu\text{m}$  をきるような微小欠陥の検出も可能であることを示し、さらなる高感度化の可能性を示唆している。
- (4) 付着異物同様に、半導体デバイスの製品歩留まりに多大な影響を与える COP (Crystal Originated Particle) 欠陥を対象とした LSDP 検出実験を試み、得られた LSDP を定量評価することで、従来困難であった付着異物との識別が可能であることを示している。具体的には、まず、COP 欠陥と付着異物の欠陥形態の違いによる散乱機構について定性的に解析し、LSDP の中央明部 (0 次明部) と 1 次明輪部の強度比で定義される識別因子を提案している。そして、同程度の散乱光量となるため従来法では識別が困難となる  $0.2 \mu\text{m}$  PSL 標準粒子との識別検証実験を試み、それらの識別因子 (PSL 標準粒子 : 0.89、COP サンプル-A : 1.22、COP サンプル-B : 1.32) から、両者の識別が可能であることを実験的に明らかにしている。
- (5) 提案手法の優れた欠陥識別能力を活かしながら、従来手法同様の高速性を達成するため、二段階高速欠陥計測法

を提案している。これは、高速サンプリングが可能な検出光強度変化のみに着目して LSDP の微小領域における光強度の変化から欠陥位置の特定を行い、その後、位置が特定された欠陥に限定して LSDP を取得するものである。3 種類の異なった粒径 (0.21、0.61、1.16  $\mu\text{m}$ ) の PSL 標準粒子を微小欠陥モデルとし、それらの付着位置、付着状態が未知なサンプルウエハ表面に対して二段階高速欠陥計測法の検証実験を試みている。その結果から、本手法がインプロセスにおいて全数検査が可能な高速欠陥検出機能と、プロセス管理に適用可能な欠陥形態評価機能の両機能を併せ持っており、インプロセス計測技術として適用できる可能性があることを示している。

- (6) 本手法の持つ広角度照明機能を活かしつつ、感度の向上を図った暗視野検出法を提案し、その検出特性について解析している。ここでは、明視野欠陥検出装置をベースに暗視野輪帯光学系と高感度冷却式 CCD エリアセンサを組み込んだ暗視野欠陥検出装置を試作している。そして、FIB (Focused Ion Beam) 加工観察装置により作製した疑似マイクロクラッチ欠陥に対する基礎検出実験から、微小欠陥の方向性に因らず安定して欠陥検出が可能であることを示している。さらに、実プロセスの CMP (Chemical Mechanical Polishing) 加工で導入された P-TEOS 膜上の微小マイクロクラッチ (深さ 9 nm) の検出実験から、提案手法の有効性を示している。

以上のように、本論文は、インプロセス計測への適用を考慮したプロセス制御ならびにプロセス管理を行うことができるような、シリコンウエハ加工表面欠陥計測法の開発を目的として、光散乱パターンに基づく新しい測定原理の微小欠陥計測法を提案し、その有効性について理論・実験の両面から検討している。本論文によって得られた成果は、半導体デバイス製造ラインを効率的に立ち上げ、信頼性を高水準に保った製品デバイス量産が可能になるため、次世代半導体デバイス製造において、求められている多品種少量生産を実現する際に極めて有効であり、生産システム工学ならびに機械工学の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値のあるものと認める。