

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13841

研究課題名(和文) 自律的欠陥探索・分裂型マルチ近接場プローブによる超平滑加工表面ナノ異物一括計測

研究課題名(英文) High Sensitive Optical Detection of Nano Particulate Defects with Autonomous Search-and-Split Liquid Probe

研究代表者

高橋 哲 (TAKAHASHI, SATORU)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号：30283724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：従来半導体プロセスにおいて現場適用されていた光学的散乱型計測法原理では物理的検出限界となっていた超平滑加工表面のナノ付着異物計測法について新概念手法の提案、開発を目指した。具体的には、基板上に滴下した揮発性不活性溶媒の液相界面とナノ異物との近接場における力学的・光学的相互作用を、並列情報処理性、現場適用性の高い遠隔場光学技術で取得することで、非破壊性、高速性を維持したまま、従来異物サイズ検出限界を打破可能な新概念近接場計測プローブ法の開発を目指した。理論・実験の両面から研究推進を行い、提案概念の妥当性、有用性について検証した。

研究成果の概要(英文)：We propose a new optical measurement method, which can be applied to in-process inspection for nano particulate defects on a bare semiconductor wafer surface. The proposed method is uniquely characterized by combining a volatile inert liquid as a special near-field physical response sensing probe and a far-field optical sensing, vertical resolution of which goes beyond the nano-scale. The method can provide not only autonomously detect each nano defect by an inherent property of the volatile liquid but also simultaneously detect all defects located within a viewing field of the optical observation. Both theoretical and experimental analyses verified the basic feasibility of the proposed concept.

研究分野：光製造科学

キーワード：ナノ欠陥 ナノ計測 光計測 シリコンウエハ ナノ異物 欠陥検査

1. 研究開始当初の背景

半導体ベアウエハ、LED 向けサファイア基板、磁気ディスク基板等の表面粗さ（マイクロラフネス）がサブナノメートル以下の超平滑加工表面基板において、基板表面に存在する微小異物欠陥は製品歩留まりを直接支配する。したがって、高い信頼性を持って、それらを基板とする精密機能デバイスを製造するためには、表面微小異物欠陥の出現確率に応じた高度なプロセス制御・管理が重要であり、そのためにはインプロセスでの表面微小異物欠陥検出・評価技術が不可欠となる。特に半導体ベアウエハにおいては、粒径 10nm の極微小な付着異物さえ製品歩留まりを大きく左右するため、次世代高機能半導体デバイス量産のためには、超平滑加工表面上のナノスケールサイズの微小異物欠陥計測開発は緊迫の課題である[①]。これまで、ベアシリコンウエハ加工表面異物計測法としては、光計測特有の非破壊性、高速計測性を利用して、主にレーザー散乱による暗視野散乱光量検出法が有効に適用されてきた[②-④]。しかし、これら微小な異物からの散乱光量は異物サイズの 6 乗に比例するため、粒径減少に応じて取得可能散乱光量は急激に減少する。今日、最新のプロセス検査機器で検出可能な異物サイズは 20nm 程度である[⑤]が、その散乱光量は、レーザー集光スポット内のマイクロラフネスからの極微弱な散乱光総量とほぼ同等の微弱な光量となっており、光源および光検出器のさらなる高性能化によってもさらなる検出感度の改善は物理的に困難な状況となっている。すなわち、計測原理として本質的な限界値となっており、次世代の超平滑加工表面評価のために、従来とは異なった新しい計測原理に基づいた超高感度ナノ異物計測法の確立が強く求められている[⑥]。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、本申請研究は、従来半導体プロセスにおいて現場適用されていた光散乱型計測原理では物理的検出限界となっていた超平滑加工表面のナノ付着異物計測法について新概念手法の提案を行うとともに、提案概念の妥当性ならびに有効性について、理論実験の両面から検証を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

本申請研究にて提案する新概念ナノ異物計測法は、研究対象とするベア Si ウエハ表面に対して、表面性状に悪影響を与えない揮発性不活性溶媒（例えば基板洗浄実績のあるパーフルオロカーボン）を滴下し、揮発時の動的な界面挙動を光学的に計測することで、間接的に基板上ナノ異物の検知を行うものである（図 1）。基板上液相の揮発時界面挙動は、溶媒の表面張力と、基板との相互作用で決定される濡れ性に支配される。濡れ性は表

面物性と表面微細形状に依存することから（Si 単結晶として成長させる）半導体デバイス用ベア Si ウエハ加工表面の場合、界面挙動は、主に微細な表面形状変化に依存することが予想される（図 2）。ここで、Si ウエハ表面はサブナノメートル以下のマイクロラフネスレベルの超平滑加工面であることを考慮すると、従来欠陥検出法で物理的に検出不可能だった 10nm といった超微小異物サイズもマイクロラフネスの形状変動域からは相対的に十分大きく、面内における異常値として、液相界面挙動に反映できる可能性を有していると考えている。

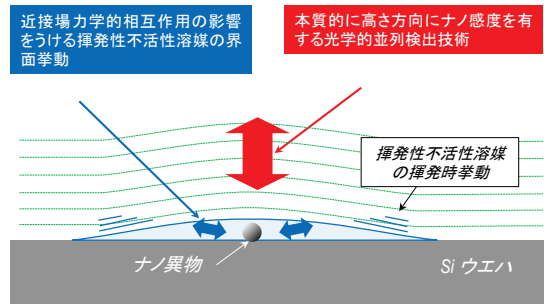


図 1. 揮発性不活性溶媒自体を近接場プローブとして適用し、異物による異常検出は光学的一括並列処理を利用する提案手法の概念図。

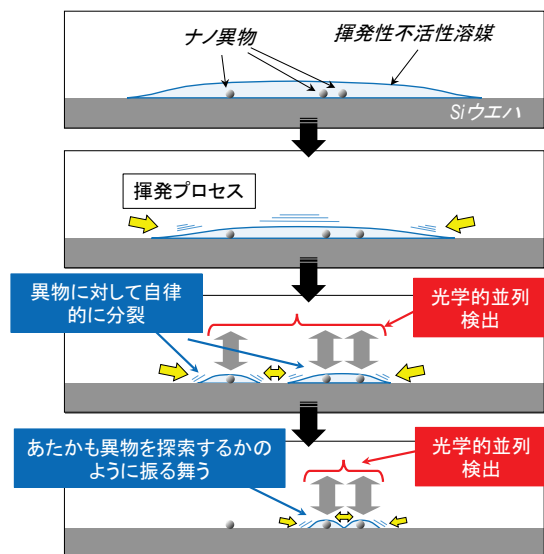


図 2. 提案プローブが自律的に欠陥数に応じて分裂しながら欠陥を探索するかのように振る舞う様子。

すなわち提案手法は、基板上に滴下した揮発性不活性溶媒の液相界面とナノ異物との近接場における力学的・光学的相互作用を、並列情報処理性、現場適用性の高い遠隔場光学技術で取得することで、非破壊性、高速性を維持したまま、従来異物サイズ検出限界を大幅に向上可能な新概念近接場計測プローブ法の開発を目指すものである。

4. 研究成果

(1) 検出感度向上特性の理論解析

提案手法における光学的検出感度特性を理論的に解析するため、FDTD 法を用いた数値

シミュレーションを試みた。図3はシミュレーションモデルの一例である。Si ウエハ基板上にパーフルオロカーボン液膜が異物を含んで存在する際、基板との相互作用の結果、安定接触角となった際の光学応答の検出解析を行った。

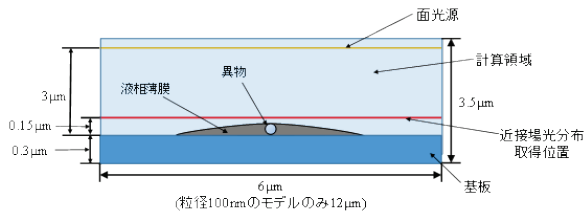


図3. FDTD シミュレーションモデル。

まず、定性的な光学検出信号発生挙動の解明を目的として近接場領域における電場分布の可視化を試みた。図4は、50nm シリカ異物がある際の近接場における光学応答を、従来散乱法(a)と提案手法(b)の両者のケースについて可視化したものである。異物のみ(a)の場合は、微弱な散乱光が等方的に発生し、遠隔場伝搬へ至るのに対し、提案液膜があるとき(b)は、上方に平面波伝搬に近い形で、遠隔場へ至る様子が分かる。

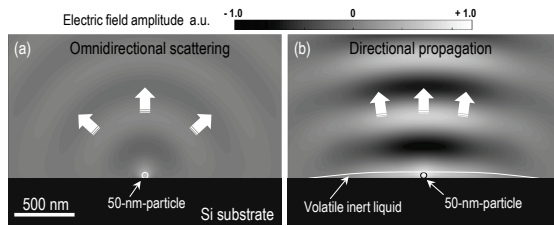


図4. FDTD 法による近接場光の可視化

(a) 異物のみ、(b)提案液相プローブが存在するとき。

次に、実際に検出を行う遠隔場における定量的な検出信号変動に着目した解析を行った。図5は、遠隔場光学系において検査基板面に対して、結像型の一括並列光学観察を行った際に取得される光強度分布を算出した例である。ここでは粒径 20nm シリカ異物を対象に、異物のみ(a)と提案手法(b)の両者を比較している。またここでは、液相プローブと基板との相互作用パラメータとして接触角6度(この値は、基礎実験により、検出感度が悪化する側で設定したものを)を仮定した。

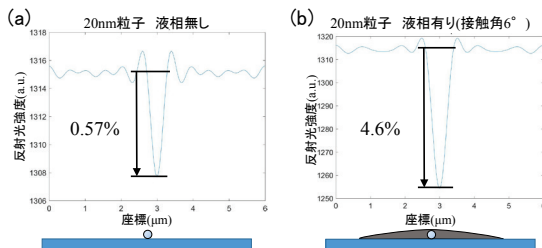


図5. 遠隔場における検出光分布(20nm 異物)

(a) 異物のみ、(b)提案液相プローブが存在するとき。

これより、異物のみからの光学応答の場合、遠隔場では、異物位置において非常に微弱な

光量減少(0.57%)しか生じないが、一方、提案手法においては4.6%の光量減少となっており、約8倍の感度向上となっていることが確認された。図6は、従来散乱型検出法では原理的に検出困難だった10nm 異物(ここではシリカ異物を想定)の提案手法による遠隔場検出光強度分布である。20nm 異物と比較すると光量減少量は小さくなるが、約1%の変動幅(多重干渉算出で1.1%、NA0.95 結像分布算出で0.99%)を有していることが分かった。これより、今後、さらなる液相プローブの光学検出感度の向上法の模索は重要ではあるが、(液相のない異物のみ)の場合は0.091%となることを考慮すると)1%変動が確認されたことから、光学的に最もシンプルな結像型の一括並列光学観察法であっても、10nm 異物の検出可能性を有していることが分かった。

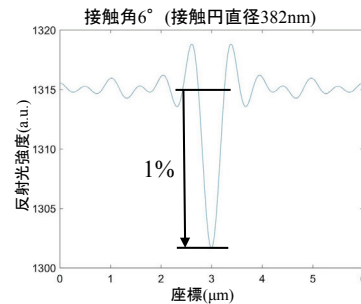


図6. 提案手法による10nm 異物の遠隔場検出光分布

図7は、100nm 異物の検出感度を基準とした際の、粒径変化による感度変動を、従来散乱手法と提案手法の両者についてプロットしたものである。従来手法が粒径減少に伴い、レイリー散乱による粒径の6乗で極端な感度減少するのに対し、提案手法の感度特性は大きく異なり、提案手法が微小ナノ異物領域において親和性の高い検出手法となっていることが分かる。

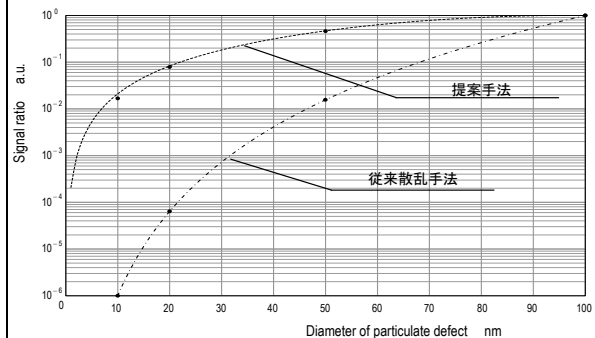


図7. 検出感度特性の比較

(2) 自律的欠陥探索・分裂型マルチ近接場プローブ機能の実験的検証

次に、Si ウエハ基板上に滴下された揮発性不活性溶媒が、提案液相プローブ基本概念である、基板上ナノ異物との近接場力学相互作用により、自律的欠陥探索・分裂型マルチ計測性を発現するのを実験的に検証した。こ

ここでは、電子基板洗浄でも実績のあるパーフルオロカーボン（フロリナート FC72:屈折率 1.251）を揮発性不活性溶媒・近接場液相プローブとして適用した。また遠隔場光学検出システムとして、無限遠補正型顕微光学系を適用し、NA0.80, 倍率 100 倍の対物レンズを用いた落射型光応答観察を試みた。また厳密な考察のため、検査領域は、別途電子顕微鏡観察により異物同定を行った。

図 8 に、40nm-60nm シリカ標準粒子を散布した Si ウェハ基板を対象とした一括光分布検出例を示す。フロリナートの揮発とともに光学応答はダイナミックに変動し、散布された標準粒子に向かって、分裂しながらシュリンクする様子が観察された。また、異物検出箇所に対しては、液相が残存時間のタイムラグが生じることで、周辺部と比べて、暗い光応答となることで、ナノ異物の存在検知が可能であり、光量変動オーダ含めて、前述の数値シミュレーションと整合した結果となることが分かった。

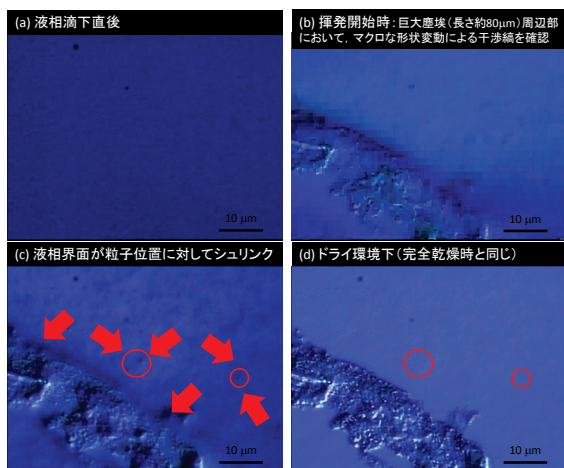


図 8. 提案手法によるシリカ標準ナノ粒子検出実験

<引用文献>

- ① International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS2013edition
- ② P. M. Lonardo: Surface characterization and defect detection by analysis of images obtained with coherent light CIRP Ann. 40(1991)541-4
- ③ K. Takami: Defect inspection of wafers by laser scattering Mater. Sci. Eng. B 44(1997)181-7
- ④ D. Meshulach et.al.: Advanced lithography: wafer defect scattering analysis at DUV Proc. SPIE 7638(2010)76380K
- ⑤ A. Tamura et.al.: Enabling 19 nm-particle detection on Si surfaces by conventional laser scattering, Proc. of ISSM2010, 131-134.
- ⑥ Shimizu Y et.al.: 2011 Nano-scale defect mapping on a magnetic disk

surface using a contact sensor IEEE Trans. Magn. 47 3426-32

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 10 件)

- ① 浅井 祥平, 橋 一輝, 道畑 正岐, 高増 潔, 高橋 哲, 自律的欠陥探索・分裂型マルチプローブによるナノ異物検出に関する研究 (第6報) -数値流体力学を用いた液相プローブの挙動特性に関する解析-, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017年03月13日~2017年03月15日, 神奈川県
- ② 橋 一輝, 浅井 祥平, 道畑 正岐, 高増 潔, 高橋 哲, 自律的欠陥探索・分裂型マルチプローブによるナノ異物検出に関する研究 (第5報) -位相利用高感度観察装置による検出-, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017年03月13日~2017年03月15日, 神奈川県
- ③ Kazuki TACHIBANA, Shohei ASAI, Masaki MICHIHATA, Kiyoshi TAKAMASU, Satoru TAKAHASHI, Optical Detection of Fine Particulate Defects with Autonomous Search-and-split Liquid Probe -Characteristics analysis of optical detection-, 16th International Conference on Precision Engineering (国際学会), 2016年11月14日~2016年11月16日, Hamamatsu, Japan
- ④ Kazuki Tachibana, Shohei Asai, Masaki Michihata, Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi, Optical detection of fine particulate defects by autonomous searching liquid probe: theoretical design of high sensitive phase detection system, International Symposium on Optomechatronic Technology2016 (国際学会), 2016年11月07日~2016年11月09日, Tokyo, Japan
- ⑤ 橋一輝, 浅井祥平, 道畑正岐, 高増潔, 高橋哲, 自律的欠陥探索・分裂型マルチプローブによるナノ異物検出に関する研究 (第4報) -液相プローブ高感度観察装置の検討-, 2016年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2016年09月06日~2016年09月08日, 茨城
- ⑥ Kazuki Tachibana, Shohei Asai, Masaki Michihata, Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi, High-sensitive Optical Detection of Fine Particulate Defects by Autonomous Searching Liquid Probe: Observation of Dynamic Interaction with Defects, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2016) (国際学会), 2016年06月05日~2016年06月10日, San Jose, USA
- ⑦ 浅井 祥平, 橋 一輝, 道畑 正岐, 高増 潔, 高橋 哲, 自律的欠陥探索・分裂型マルチ

プローブによるナノ異物検出に関する研究(第3報) 基板上液相プローブの挙動に関する解析, 2016年度精密工学会春季大会学術講演会, 2016年03月15日~2016年03月17日, 東京

- ⑧ 橘 一輝, 浅井 祥平, 道畑 正岐, 高増 潔, 高橋 哲, 自律的欠陥探索・分裂型マルチプローブによるナノ異物検出に関する研究(第2報) FDTDシミュレーションに基づいた光学的検出特性解析, 2016年度精密工学会春季大会学術講演会, 2016年03月15日~2016年03月17日, 東京
- ⑨ Kazuki TACHIBANA, Masaki MICHIIATA, Satoru TAKAHASHI, Kiyoshi TAKAMASU, High-sensitive optical measurement of fine particulate defects on Si wafer surface with liquid probe, The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (国際学会), 2015年10月18日~2015年10月22日, Kyoto
- ⑩ 橘 一輝, 高橋 哲, 高増 潔, 光学的ナノ異物検出を可能とする高感度液相プローブ計測法の研究, 日本機械学会2015年度年次大会講演論文集, 2015年09月14日, 北海道

[その他]

ホームページ等

<http://www.photon.rcast.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 哲 (TAKAHASHI, Satoru)
東京大学・先端科学技術研究センター・教授
研究者番号: 3 0 2 8 3 7 2 4

(2) 研究分担者

高増 潔 (TAKAMASU, Kiyoshi)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 7 0 1 5 4 8 9 6