

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820030

研究課題名(和文) ナノ間隙におけるマイクロ熱収支を利用したナノ平滑面微小欠陥検出に関する研究

研究課題名(英文) Defect detection method utilizing micro-thermal balance at the nanometric gap for nanometric-smooth surface inspection

研究代表者

清水 裕樹 (Shimizu, Yuki)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70606384

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：半導体/LED向けウエハ等の次世代ナノ平滑面に要求される微小欠陥の高精度検出実現に向けて、ナノ間隙での微小熱収支変化を利用した全く新しい欠陥検出原理を提案した。μWオーダの微小摩擦熱を高感度に検知するマイクロ熱検知素子を作成するプロセスを構築してプロトタイプ素子を設計・試作し、その基礎特性を評価した。検出対象との接触インパクト及び軽微な摩擦に伴い発生した微小熱を検知することで、先端径40 nmの接触子との接触を検知できることを実証するとともに、マイクロ熱検知素子-測定面間に温度勾配を設定して熱収支場を生成することで、摩擦熱に依らずに素子と欠陥との近接を検知できる可能性を実験的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To realize precision defect detection required for next-generation semiconductor or LED wafers having nanometric-smooth surfaces, a new defect detection method utilizing a heat balance in-between a nanometric gap has been proposed. Fabrication process for the contact-type thermal sensor was established, and μm-sized prototype sensors were successfully fabricated. Experimental results revealed that the fabricated sensor could detect a contact with an object having a tip radius of 40 nm in such a way that the thermal sensor detected its temperature change due to the frictional heat as a deviation of its electric resistance. Furthermore, it was also found in the experiments that a large temperature gradient between the thermal sensor and the measurement surface had a possibility of detecting the approach of the thermal sensor to the surface defect regardless of the frictional heat.

研究分野：超精密計測

キーワード：欠陥検出 摩擦熱 熱検知素子 精密計測

1. 研究開始当初の背景

半導体/LED 向けウエハ、超大容量磁気ディスク、タッチパネルディスプレイなどに用いられるナノメートルレベルの平滑さ、表面粗さが要求される面(ナノ平滑面)では、その歩留まり向上のため、面上の微小欠陥(デフェクト)を極力低減する必要がある。従来は平滑面上のデフェクトを検出した後、SEM や AFM でその詳細を観察・分析してその情報をフィードバックしている。そのためデフェクト検出技術はナノ平滑面の高精度化を左右する重要な技術で、その検出分解能向上が求められている。

従来、デフェクト検出には、レーザ照射時にデフェクトから発生した散乱光を検出する手法が用いられている。用いる測定光の短波長化、受光素子の高感度化がより小さな表面欠陥検出に有効であるが、散乱光強度が欠陥サイズの6乗で低下するため、サイズ16 nm以下のデフェクト検出は実現の目途が立っておらず、新しい検出手法が検討されている。

2. 研究の目的

本研究では、ウエハ等の次世代のナノ平滑面に要求されるナノサイズ欠陥を、微小熱収支変化を利用して検出する、全く新しい欠陥検出原理を提案する。薄膜プロセスで形成するマイクロ熱検知素子をナノ平滑面に近接し、ナノメートル級のギャップ(ナノ間隙)における熱検知素子の $\mu\text{W}$  オーダ熱収支変化を検知してのデフェクト検出実現を目指す。また、ナノ間隙における熱収支変化を検知することで、非接触での測定対象面形状情報及びナノ間隙量変化検出の実現可能性を模索する。

3. 研究の方法

(1) マイクロ熱検知素子のプロファイル最適化設計および試作プロセスの検討

マイクロ熱検知素子を用いて素子-デフェクト間の接触で発生する微弱な摩擦熱を検知することで測定面上のデフェクトの存在を検出する本手法では、検出可能なデフェクトのサイズはマイクロ熱検知素子表面-測定面間のギャップにより決まることになるため、熱的に高い感度を有する部分が最上面となるようマイクロ熱検知素子プロファイルを設定する必要がある(図1)。本研究では、最適化した3次元プロファイルを有するマイクロ熱検知素子を試作するためのフォトリソグラフィプロセスを検討し、実際の試作を通してその有効性を検証する。

(2) マイクロ熱検知素子の接触センサとしての基礎特性評価

試作したマイクロ熱検知素子を実際に接触センサとして用いる場合、その熱検知感度および接触検知感度を評価する必要があるが、実際に測定面上に存在するデフェクトを

対象とした実験ではその定量的評価が困難である。そこで本研究では、数十 nm レベルの先端径を有する AFM プローブを検出対象であるデフェクトに見立てたシミュレーション実験を行い、試作したマイクロ熱検知素子の接触センサとしての感度を評価する。高い接触検知感度を有する AFM プローブを比較用の接触センサとして用い、ナノメートル級の精度を有する精密ピエゾ3軸ステージで AFM プローブ-マイクロ熱検知素子間の相対位置決め制御を行うことで、マイクロ熱検知素子上での接触箇所、接触荷重、摩擦速度等を制御した状態での定量的な接触検知実験を実施する。

(3) ナノ間隙における熱検知素子の $\mu\text{W}$  レベル熱収支モデルの検討

デフェクト-マイクロ熱検知素子間の接触によって発生した微小摩擦熱に依らない、ナノ間隙間の微小熱収支変化を利用したデフェクト検出実現の可能性を模索する。接触子として数十 mm 級の径を有するガラス球プローブを選択して接触検知実験を行い、AFM プローブを用いた場合との比較から、ナノ間隙における熱収支モデルを検討する。

4. 研究成果

(1) 微小デフェクト検出のために最適化した3次元プロファイルを有するマイクロ熱検知素子を試作するためのフォトリソグラフィプロセスを検討した。マイクロ熱検知素子は、マイクロサイズの間隔を空けた1対の電極を覆うようクロム(Cr)薄膜を配置して構成しているが、電極間に電極より厚いダミー層を導入することで、最も温度変化に感度の高い部分(素子実効領域)の一部をセンサ最上面に配置した素子プロファイルが実現した(図2)。また、リソグラフィプロセスにリフトオフの手法を導入することで、エッチング時間に依らず歩留まりの良いマイクロ熱検知素子を作成するプロセスが確立できた。

(2) 40nm の先端径を有する AFM プローブを接触子として用い、試作したマイクロ熱検知素子の接触センサとしての基礎特性を実験的に評価した。3軸ピエゾ精密ステージを導入した精密摩擦評価システムを構築し(図3)、

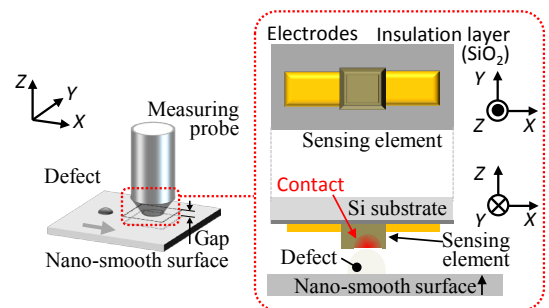
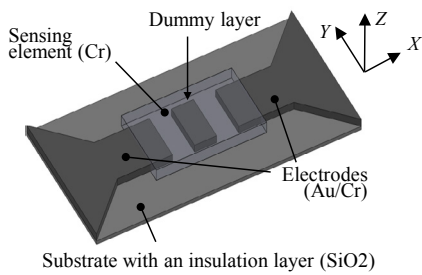
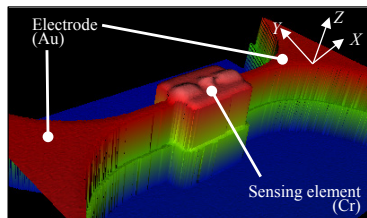


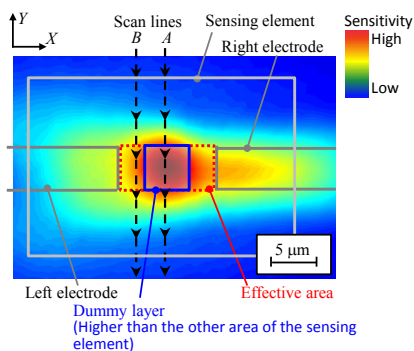
図1 マイクロ熱検知素子によるナノ平滑面上デフェクト検出



(a) 模式図



(b) 3次元プロファイル測定結果



(c) 感度評価結果

図2 試作した熱検知素子の3次元プロファイル測定結果

センサフィードバックにより接触時の荷重および摩擦速度を精度よく制御した状態での定量的な接触摩擦実験を実施した。その結果から、試作したマイクロ熱検知素子が、先端径 40 nm の AFM プローブとの接触を検知できることを実証できた (図 4)。更に実験結果を詳細に分析したところ、接触開始時など、マイクロ熱検知素子と接触子との接触開始時のインパクトによって大きなセンサ反応が得られることが明らかとなった。また、マイクロ熱検知素子に印加するバイアス電圧を高く設定して素子感度を向上することで、連続摩擦時に発生する微小な摩擦熱に伴うマイクロ熱検知素子の温度上昇を十分に検知可能であることも明らかとなった (図 5)。マイクロ熱検知素子-測定面間の精密ギャップ制御に課題はあるものの、この実験結果から、提案の手法による平滑面上の微小デフェクト検出の実現可能性を見出すことができた。

(3) 50μm の先端径を有するガラス球プローブを接触子として用い、試作したマイクロ熱検知素子による接触検知実験を実施した (図 6)。3 軸ピエゾ精密ステージを導入した精密摩擦

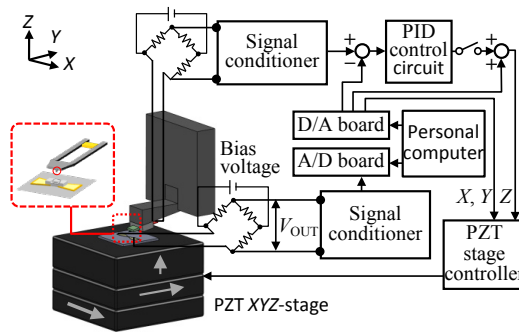
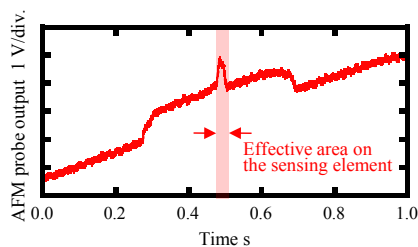
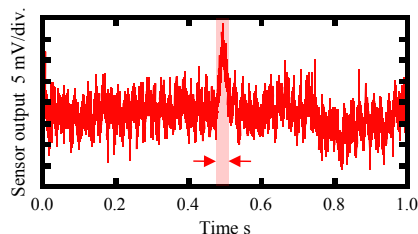


図3 構築した精密摩擦評価システム概略



(a) 素子プロファイル測定結果



(b) 熱検知素子出力

図4 試作した熱検知素子による AFM プローブ (先端径 40 nm) 接触検知実験

システムによって摩擦箇所および接触子押し込み量を精度よく制御した状態で実験を繰り返し行った結果、ガラス球との接触開始直後には熱検知素子からの出力が負方向に変動することが明らかとなった (図 7)。これはガラス球との接触開始直後に熱検知素子の温度が低下していることを意味する結果であり、AFM プローブを接触子として用いた実験の結果と異なる挙動である。接触子押し込み量を増やしたところ、増大した摩擦熱に伴うものと考えられる熱検知素子の正方向出力変動が見られたことから、接触開始前後のマイクロ熱検知素子-プローブ間の熱収支メカニズムを考案した (図 8)。この結果は、

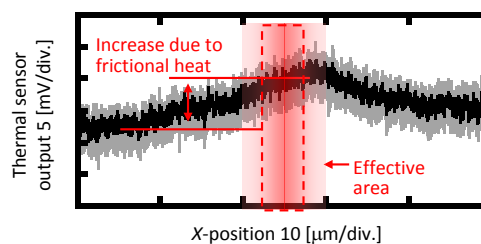


図5 試作した熱検知素子による微小摩擦熱検出結果

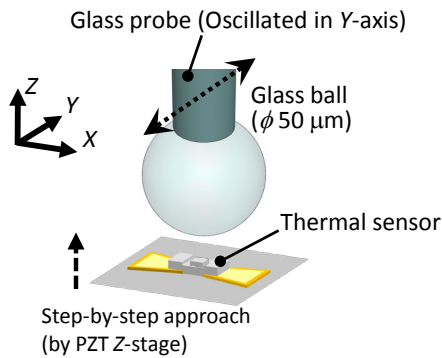


図6 ガラス球プローブによる摩擦実験

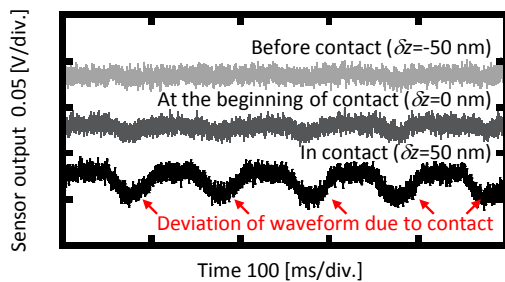


図7 試作した熱検知素子による微小摩擦熱検出結果

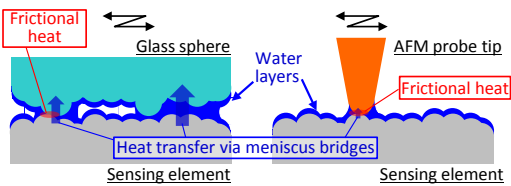


図8 マイクロ熱検知素子-プローブ間の熱収支メカニズム

マイクロ熱検知素子-測定面間に温度勾配を設定して熱収支場を生成することで、接触摩擦熱に依らずにマイクロ熱検知素子とデフェクトの近接を検知できる可能性を示すものである。また、マイクロ熱検知素子-測定面間の精密 nm 級ギャップ制御が実現すれば、凹形状を有するデフェクトの検出も実現できる可能性を示唆するものである。

以上の結果から、本研究で提案したマイクロ熱検知素子による微小デフェクト検出の実現可能性が示された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Yuki Shimizu, Yuta Ohba, and Wei Gao, Investigation on Sensitivity of a Contact-Type Thermal Sensor for Surface Defect Inspections, Int. J. of Automation Technology, 査読有, Vol. 9 (2015) pp. 291-296.  
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode>

=present&inputfile=IJATE000900030009.xml

- ② Yuki SHIMIZU, Yuta OHBA and Wei GAO, Design of fabrication process of a thermal contact sensor for surface defect inspection, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol. 8 (2014) pp. 14-00099(14pages).  
DOI: 10.1299/jamdsm.2014jamdsm0052
  - ③ Yuki Shimizu, Wenjian Lu, Yuta Ohba and Wei Gao, Feasibility study on the concept of thermal contact sensor for nanometre-level defect inspections on smooth surfaces, Measurement Science and Technology, 査読有, Vol. 25 (2014) pp. 064006(11pages).  
DOI: 10.1088/0957-0233/25/6/064006
  - ④ Yuki Shimizu, Wenjian Lu, Yuta Ohba, Wei Gao, Development of a Micro-Sized Thermal Contact Sensor for Inspection of Surface Defects, Int. J. of Automation Technology, 査読有, Vol. 7 (2013) pp. 1-6.  
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode>  
=present&inputfile=IJATE000700060013.xml
- [学会発表] (計8件)
- ① Y. Shimizu, Y. Ohba and W. Gao, Design and testing of a contact-type micro thermal sensor for defect inspection on nanometric smooth surfaces, 38th International MATADOR Conference on Advanced Manufacturing (MATADOR), 28-30 March 2015, Yunlin, Taiwan.
  - ② 清水裕樹, 大場裕太, 高偉, 接触型マイクロ熱検知センサによるナノ平滑面微小陥検出に関する研究—素子プロファイル改善と接触検知感度の検討—, 2014年精密工学会秋季大会学術講演会, 2014年9月16-18日, 鳥取大学(鳥取)。
  - ③ Yuki SHIMIZU, Yuta OHBA and Wei GAO, Investigation on the contact detection sensitivity of thermal contact sensor for surface defect inspections, The 15th International Conference on Precision Engineering (ICPE2014), 22-25 July 2014, Hotel Nikko Kanazawa, Kanazawa, Ishikawa, Japan.
  - ④ 大場裕太, 清水裕樹, 高偉, 平滑面微小陥検出向け接触型熱検知センサに関する研究, 精密工学会東北支部学術講演会, 2013年12月7日, たざわこ芸術村(秋田)。
  - ⑤ Yuki Shimizu, Yuta Ohba, Wenjian Lu and Wei Gao, Characterization of a Prototype Thermal Contact Sensor for Surface Defect Inspections, 5th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2013), 12-15 November 2013, Taipei, Taiwan.
  - ⑥ Yuta OHBA, Yuki SHIMIZU, Wenjian LU and Wei GAO, Design of fabrication process of thermal contact sensor for surface defect

inspections, The 7th international conference on leading edge manufacturing in 21st century (LEM21), 7-8 November 2013, Hotel Taikanso, Sendai, Miyagi, Japan.

- ⑦ 清水裕樹, 大場裕太, 盧文劍, 高偉, 接触型マイクロ熱検知センサによるナノ平滑面微欠陥検出に関する研究-試作素子による熱検知感度の実験的検討-, 2013年精密工学会秋季大会学術講演会, 2013年9月13日, 関西大学(大阪).
- ⑧ Yuki Shimizu, Wenjian Lu, Yuta Ohba and Wei Gao, Feasibility study on the concept of thermal contact sensor for nanometer-level defect inspections on smooth surfaces, THE 11th International symposium of measurement technology and intelligent instruments (ISMTII2013), 1-5 July 2013, Aachen, Germany.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://www.nano.mech.tohoku.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

清水 裕樹 (SHIMIZU, YUKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号： 70606384

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：