

平成 30 年 4 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03907

研究課題名(和文) 微空間で精密に創成した高安定ナノ熱収支場による次世代超平滑面の非接触高速欠陥評価

研究課題名(英文) Defect detection for next-generation smoothly finished substrates based on a heat balance generated at a tiny gap

研究代表者

清水 裕樹 (Shimizu, Yuki)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70606384

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：半導体/LED向けウエハなど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、ナノ熱収支場を利用した全く新しい非接触欠陥検出原理を提案した。薄膜抵抗体からなるナノ熱収支場生成素子を試作して高感度な熱収支場の変動検知を実現するとともに、プローブ先端変位・チルト検出機能を有するナノ間隙プローブを構築した。さらに、素子-測定面間の接触を高感度に検知して素子-測定面間に安定したナノ間隙を生成する手法を確立するとともに、素子-測定面間のせん断方向に相対変位を与えた際の素子出力変動をモニタすることで、非接触状態で測定面上の凹凸形状を高感度に検出できることを実験的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To realize precision surface defect detection required for the next-generation semiconductor or LED wafers having smooth surfaces, a new defect detection method utilizing a heat flow generated in a tiny gap has been proposed. A prototype micro thermal sensor composed of a thin metal film resistor and a pair of electrodes has successfully been fabricated. In addition, a micro thermal sensor probe, which has a function of detecting the displacement and tilts of the probe tip where the micro thermal sensor is mounted, has been developed. By using the developed micro thermal sensor probe, a method to detect a contact between a measurement surface and the tip of the probe has successfully been established. Furthermore, non-contact detection of micrometric surface patterns have successfully been demonstrated by the developed micro thermal sensor probe.

研究分野：精密計測

キーワード：欠陥検出 精密計測

1. 研究開始当初の背景

LED/半導体向けウエハ、ガラスマスク、磁気ディスク、光学素子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、面上の微小欠陥を極力低減する必要がある。欠陥測定技術はナノ平滑面の高精度化を左右する重要な技術であり、従来は平滑面上の欠陥を検出した後、電子顕微鏡(SEM)や原子間力顕微鏡(AFM)でその詳細を観察・分析してその情報を品質管理にフィードバックしている。そのため、欠陥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、欠陥検出には、レーザ照射時に欠陥から発生した散乱光を検出する手法が用いられており、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欠陥検出実現に有効であるが、散乱光強度が欠陥サイズの6乗で低下するため、サイズ10nm未満のデフェクト(以下、ナノ欠陥または欠陥とする)検出は実現の目途が立っておらず、新しい検出手法が求められている。

これに対し研究代表者は、接触型マイクロ熱検知素子による欠陥検出手法を提案し、微小摩擦熱による欠陥検出の可能性を見出してきた。その一方で、これまで検討の手法では物理的接触に伴う素子摩耗が原理上不可避であり、また、凹形状の検出が原理的に困難であるという課題があった。

2. 研究の目的

本研究では、マイクロサイズの薄膜抵抗体からなる熱収支場生成素子を測定面に近接することで素子-測定面間に生成する熱収支場(ナノ熱収支場)を利用することで、非接触でのナノ平滑面上の欠陥検出を実現するとともに、ナノ熱収支場の安定生成を実現するナノ間隙プローブのプロトタイプを構築し、提案原理の実現可能性を実験的に明らかにすることを研究の目的とする。

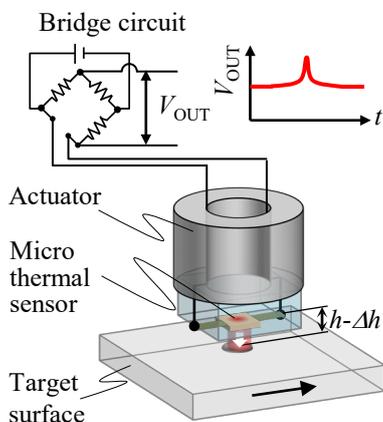


図1 熱収支場を利用した非接触欠陥検出コンセプト模式図

3. 研究の方法

(1) 高感度熱収支場生成素子の試作

露光プロセスをベースとして、薄膜抵抗体からなるナノ熱収支場生成素子を試作する。高感度な熱収支場の変動検出を実現するとともに、光学式センサによる変位・チルト検出を実現するため、従来のシリコン基板に代えてガラス基板上への素子形成を試みるとともに、その感度向上を実験的に検証する。

(2) 欠陥検出分解能の理論的検討

空気の自由分子行程の影響を考慮した、素子-測定面間のエネルギー収支式をもとにナノ間隙における熱収支モデルを構築し、素子サイズと検出可能な欠陥サイズとの間の関係を理論的に明らかにする。

(3) ナノ間隙プローブの構築

熱収支場生成素子を測定面に近接するとともに、素子-測定面間の相対傾斜を高精度に検出・補正する機能を有するナノ間隙プローブのプロトタイプを構築する。

(4) 素子-測定面の高精度接触検知によるナノ間隙の安定生成

構築したナノ間隙プローブのプロトタイプを用い、素子出力をもとに素子-測定面間の接触を高感度に検知し、その結果をもとに素子-測定面間に安定したナノ間隙を生成する手法を確立する。

(5) ナノ間隙プローブのプロトタイプを用いた欠陥検出実験

構築したナノ間隙プローブのプロトタイプを用い、素子-測定面間の接触を高感度に検知して素子-測定面間にナノ間隙を安定生成した状態で、素子-測定面間のせん断方向に相対変位を与えた際の素子出力変動をモニタし、測定面上の凹凸形状を非接触で検出できることを実験的に明らかにする。

4. 研究成果

(1) 露光プロセスをベースとしたナノ熱収支場生成素子作成プロセスを構築した。従来のシリコン基板に代えてガラス基板を採用するとともに、基板端面をリセスした構造とすることで、測定面への近接を可能とした素子の安定作成を実現した(図2)。また、ガラス基板採用に伴う基板への放熱抑制効果により、高感度な熱収支場の変動検出が実現できることを実験的に明らかにした(図3)。

(2) 微小欠陥を球体に見立てた素子-測定面間の熱収支モデルを構築した(図4)。検出対象となる微小欠陥がサブ μm 以下のサイズであることを考慮し、空気の自由分子行程をパラメータとして含むエネルギー収支式を構築した。この理論式をもとに数値解析計算を行い、素子サイズと検出可能な欠陥サイズとの間の関係を明らかにし、サイズ $1\mu\text{m} \times 1$

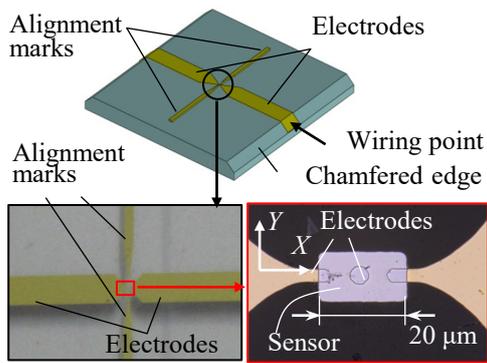


図2 試作した高感度熱収支場生成素子

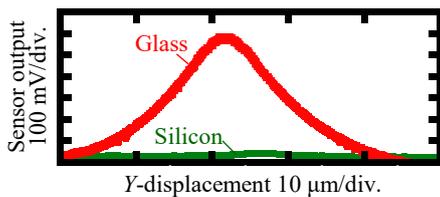


図3 マイクロプローブ近接を利用した素子感度の実験的評価結果

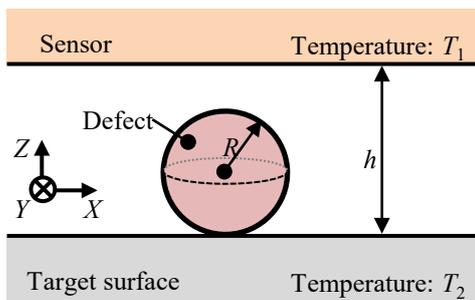


図4 素子-測定面モデル概略図

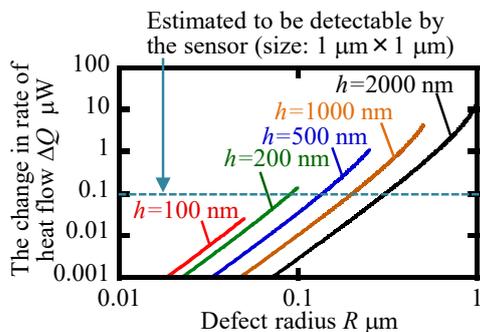


図5 各間隙量における熱流量変化算出結果

μmの素子採用により、10nm級の微小欠陥検出が実現する見通しを得た(図5)。

(3) レーザオートコリメーション法をベースとする光学式角度検出ユニットと、多軸圧電アクチュエータからなるセンサプローブユニットを組み合わせたナノ間隙プローブを設計した(図6)。中空構造の圧電アクチュエータを採用することで、レーザ光による素子-測定面間の相対傾斜を検出可能とするとともに、端面をリセスした構造とした素子ガラス基板の側面に電極を配置したナノ間隙プローブのプロトタイプを構築し、素子を測

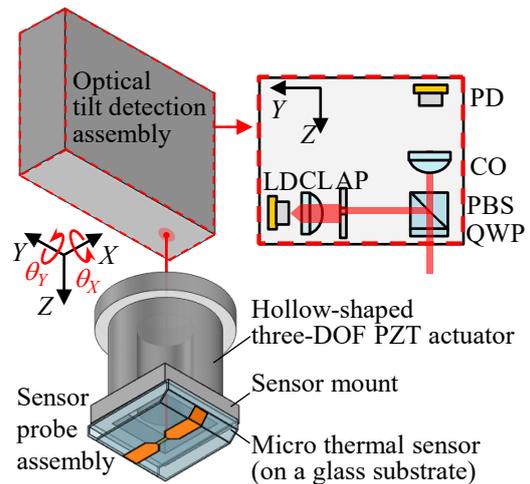


図6 プローブ構成概略図

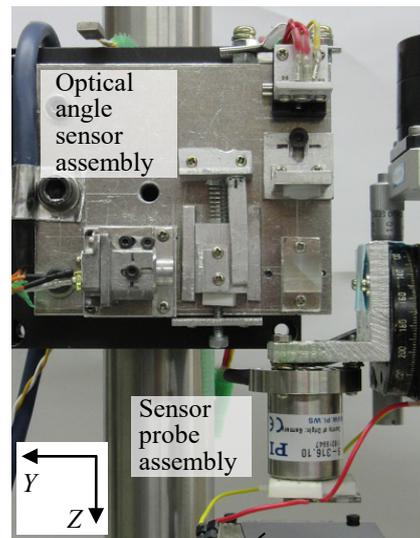


図7 実験装置写真

定面に高精度に近接することを可能とした(図7)。

(4) 構築したナノ間隙プローブのプロトタイプを用い、光学式角度検出ユニットで素子-測定面間の相対傾斜を補正した状態で圧電アクチュエータを駆動して素子を測定面に近接させていった際の素子出力および角度検出ユニットの出力をモニタしたところ、双方の出力変動をもとに、素子-測定面間の接触を高感度に検知できることを実験的に明らかにするとともに(図8)、この結果をもとに素子-測定面間に安定したナノ間隙設定が可能であることを実験的に明らかにした。

(5) 構築したナノ間隙プローブのプロトタイプを用い、素子-測定面間の接触を高感度に検知して素子-測定面間にナノ間隙を安定生成した状態で、素子-測定面間のせん断方向に相対変位を与えた際の素子出力変動をモニタした(図9)。光学式角度検出ユニットによる相対傾斜補正の有効性を明らかにするとともに、非接触での測定面上の凹凸形

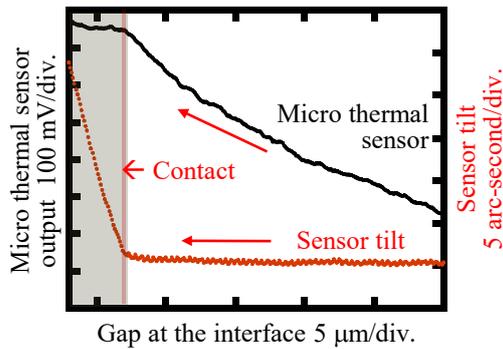


図8 素子-測定面接触時の素子出力変動

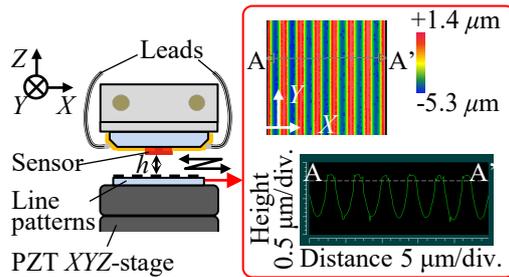


図9 微細パターン検出実験セットアップ

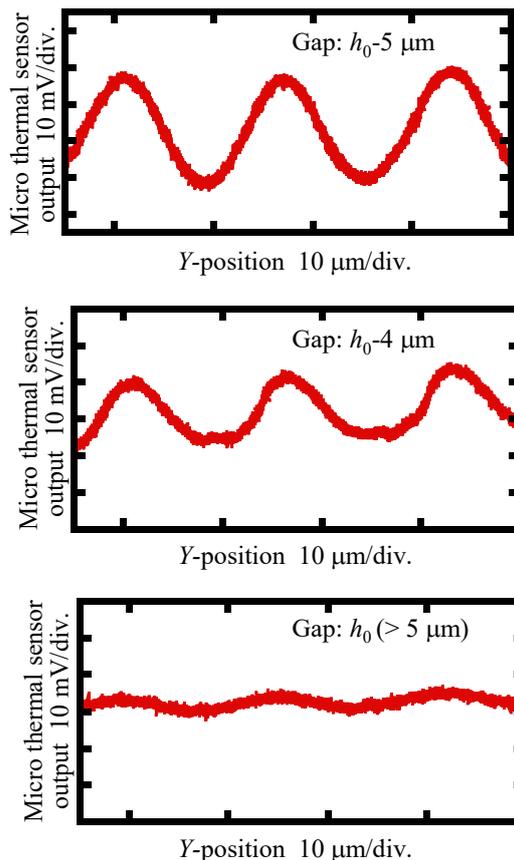


図10 非接触状態での微細パターン検出結果

状検知実現の可能性を確認するため、表面にマイクロサイズの線状レジストパターンを予め形成したシリコンウエハ面を測定面として用いた。その結果、非接触の状態において、試作した素子によりマイクロサイズの線

状パターンを検出できることを実証するとともに、素子-測定面の間隙量を低減することでより高感度な計測が可能になることを実験的に明らかにした(図10)。

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7件)

- ① Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Yuan-Liu Chen, Hiraku Matsukuma, Wei Gao, Design and Testing of a Micro-thermal Sensor Probe for Nondestructive Detection of Defects on a Flat Surface, Nanomanufacturing and Metrology, 査読有, in press.
DOI:10.1007/s41871-018-0007-x
- ② Yuki Shimizu, Taiji Maruyama, Shota Nakagawa, Yuan-Liu Chen, Wei Gao, EVALUATION OF A FOCUSED LASER SPOT DIAMETER FOR AN OPTICAL ANGLE SENSOR, Engineering for a Changing World, 査読有, (2017), (6 pages).
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017iwk-071:8>
- ③ Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Yuan-Liu Chen, Wei Gao, Non-contact detection of surface defects by using a micro thermal sensor, Proceedings of the 13th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII2017), 査読無, (2017), USB (4 pages).
- ④ Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Yuan-Liu Chen and Wei Gao, Design and testing of a micro thermal sensor for non-contact surface defect detection, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol. 11, No. 5 (2017) pp. 781-786.
DOI:10.20965/ijat.2017.p0781
- ⑤ Yuki Matsuno, Yuki Shimizu, Wei Gao, Development of a Non-contact-type Micro Thermal Sensor for Surface Defect Inspection, Proceedings of the 7th International Conference on Positioning Technology (ICPT2016), 査読無, (2016), USB (2 pages).
- ⑥ Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Yuta Ohba, Yuan-Liu Chen, Wei Gao, Characterization of a micro thermal sensor for surface defect inspection, Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE NEMS 2016), 査読無, (2016), USB (2 pages).
- ⑦ Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Yuta Ohba, Wei Gao, Micro thermal sensor for

nanometric surface defect inspection, Proceedings of the 16th International Conference on Nanotechnology (NANO 2016), 査読無, (2016), CD-ROM (2 pages).

[学会発表] (計 10 件)

- ① 清水 裕樹, 松野 優紀, 陳 遠流, 松隈 啓, 高 偉, 微空間での熱収支を利用した平滑面欠陥検出に関する研究 -熱検知センサプローブの構築と基礎特性評価-, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2018 年 3 月 15 日-17 日, 中央大学 (東京) .
- ② Yuki Shimizu, Yuki Matsuno Yuan-Liu Chen and Wei Gao, Non-contact detection of surface defects by using a micro thermal sensor, 13th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII2017), 22-25 September 2017, Xi' an, China.
- ③ Yuki Shimizu, Taiji Maruyama, Shota Nakagawa, Yuan-Liu Chen, Wei Gao, Evaluation of a Focused Laser Spot Diameter for an Optical Angle Sensor, 59th Ilmenau Scientific Colloquium, 11-15 September 2017, Ilmenau, Germany.
- ④ 清水 裕樹, 松野 優紀, 陳 遠流, 高 偉, 微空間での熱収支を利用した平滑面欠陥検出に関する研究 ~生成熱収支場による欠陥検出可能性の実験的検討~, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017 年 3 月 13 日~15 日, 慶應義塾大学 (神奈川) .
- ⑤ Yuki Matsuno, Yuki Shimizu, Wei Gao, Development of a Non-contact-type Micro Thermal Sensor for Surface Defect Inspection, The 7th International Conference on Positioning Technology (ICPT2016), 08-11 November 2016, Seoul, Korea.
- ⑥ Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Yuan-Liu Chen and Wei Gao, A sensitivity-improved micro thermal sensor for surface defect inspection, The 12th China-Japan International Conference on Ultra-Precision Machining Processes (CJUMP2016), 04-06 November 2016, Hunan, China.
- ⑦ Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Yuta Ohba, Wei Gao, Micro thermal sensor for nanometric surface defect inspection, The 16th International Conference on Nanotechnology (NANO 2016), 招待講演, 22-25 August 2016, Sendai, Japan.
- ⑧ Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Yuta Ohba, Yuan-Liu Chen, and Wei Gao, Characterization of a micro thermal

sensor for surface defect inspection, The 11th IEEE Annual International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems (NEMS), 17-20 April 2016, Matsushima, Japan.

- ⑨ 清水 裕樹, 松野 優紀, 大場 優太, 高 偉, 微空間での熱収支を利用した平滑面欠陥検出に関する研究 ~非接触欠陥検出の原理検討~, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2016 年 3 月 15 日~17 日, 東京理科大学 (千葉) .
- ⑩ 松野 優紀, 大場 優太, 清水 裕樹, 高 偉, 微空間での熱収支を利用した平滑面欠陥検出に関する研究 ~10nm 級サイズ欠陥との接触検知シミュレーション実験~, 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2015 年 9 月 4 日~6 日, 東北大学 (宮城) .

[図書] (計 1 件)

- ① Yuki Shimizu, Metrology (Ch. 18: Contact-type micro thermal sensor for surface defect detection), Springer, (2019) in press (24 pages).

[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