

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2019

課題番号：16KK0119

研究課題名（和文）ナノ熱収支場によるナノサイズ表面欠陥検出実現と新原理超小型ナノ変位スケールの共創（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Nanometric surface defect inspection based on the heat flow detection and the collaborative development of a compact scale for measurement of a nanometric displacement(Fostering Joint International Research)

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） 11,600,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：本共同研究では、基課題で検討中のマイクロ熱検知素子による微小欠陥検出の高精度化実現に向け、熱検知素子-測定面間の間隙量検出技術の開発を目的として、モード同期フェムト秒レーザを光源に用いた2面間高精度変位検出技術について検討するとともに、パルスレーザ周波数安定制御システムの開発を試みた。また、熱検知素子でスケール目盛を読み取り位置検出する、全く新たな原理に基づく「熱収支場検知式リニアスケール」の実現に必須となる、素子-測定面間隙のチルト検出手法の確立を目指し、光学式角度センサ技術に立脚したチルト検出手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本共同研究で海外の共同研究先と開発を進めたマルチ波長ヘテロダイン干渉計による高精度変位計測技術は、ノーベル物理学賞を受賞した光周波数コム技術を研究・生産現場における絶対長さ計測に展開するもので、学術的意義が大きく、また関連分野を含む産業的科学的波及性が高い。また、今回の研究で開発した光学式の2面間チルト角精密計測技術により、同一基板上に配置した複数の熱検知素子によるパターン読み取りが実現するなど、本研究で提案の熱収支場検知式リニアスケールの実現可能性が高まった。

研究成果の概要（英文）：In this study, aiming to achieve a high resolution surface defect detection based on a micro thermal sensor through realizing the precise control of a gap between the sensor surface and the surface under inspection, a technique for measurement of the gap between two facing surfaces based on a mode-locked femtosecond laser source has been investigated, as well as the technique for stable control of the pulse repetition rate of the mode-locked femtosecond laser. In addition, a technique for measurement of a tilt angle of the two facing surfaces has also been developed to realize a newly proposed linear scale based on the micro thermal sensor, in which a heat flow between the micro thermal sensor and a scale grating is utilized to read the pattern structures on the scale.

研究分野：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：精密計測 熱検知素子 フェムト秒レーザ

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

(1) LED/半導体向けウエハ、ガラスマスク、磁気ディスクなどのナノ平滑面では、微小欠陥の低減による高精度化のため、欠陥検出技術の検出分解能向上が求められている。従来の散乱光検出手法では、散乱光強度が欠陥サイズの6乗で低下するため、サイズ10 nm未満のナノ欠陥検出は実現の目途が立っておらず、次世代のナノ平滑面実現に向けた新しいナノ欠陥検出手法の確立が強く求められている。超解像技術など、光の回折限界を超えた分解能を実現する光計測技術の開発が活発だが、次世代ウエハ等に求められるサイズ10 nm以下の微小欠陥検査は実現の目途が立っていない。

(2) これに対し本開発遂行者は、ナノ浮上磁気ヘッドにおける接触発熱現象を利用したナノ欠陥検出の実現可能性を実験的に明らかにしている^①。この経験をもとに、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いる。さらに、熱検知素子の試作プロセスと熱検知感度評価手法を確立し10 nm級の検出対象との接触を検知できることを実証した。一方で、上記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る。また、欠陥サイズ・形状判別が困難で、かつ凹形状が原理的に検出できなかった。

そこで本開発遂行者は、素子-ナノ平滑面間に安定した熱収支場を生成し、かつナノ平滑面をデータム(基準)とした高精度ナノ間隙制御でナノ欠陥を高感度に検知する、「ナノ間隙プローブ」^②を開発している(図1)。一方、その検討過程において、測定面に対する素子の位置・姿勢制御の重要性が明らかになってきており、ナノ欠陥検出高感度化に向けた技術的ボトルネックとなっている。

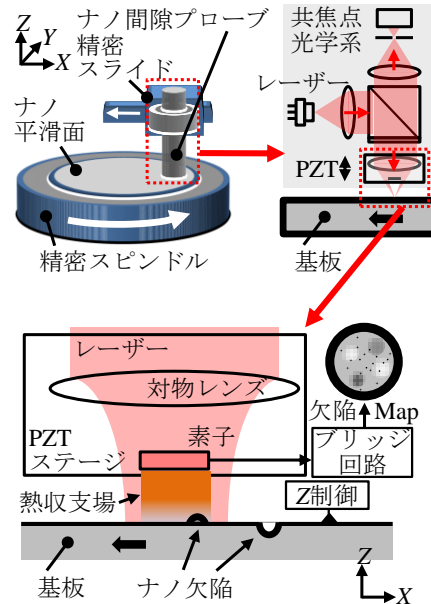


図1 マイクロ熱検知素子を用いた「ナノ間隙プローブ」によるナノ欠陥検出

2. 研究の目的

(1) 本共同研究では、ナノレベル間隙制御実現に向け、熱検知素子-測定面間の変位・姿勢センシング技術を開発することを第一の目的として、モード同期フェムト秒レーザーを光源に用いた2面間高精度変位検出技術について検討するとともに、レーザー光源の安定化に向けてパルスレーザー繰り返し周波数制御システムの開発を試みる。

(2) また、熱検知素子の特性を生かし、熱検知素子でスケール目盛を読み取り位置検出する、全く新たな原理に基づく「熱収支場検知式リニアスケール」の実現に必須となる、熱検知素子-測定面間隙のチルト検出手法の確立を目指し、光学式角度センサ技術に立脚したチルト検出手法を開発する。

(3) これらの検討を通じて、「熱を利用して形状情報を得る」、全く新しい超精密計測の概念を発信するとともに、「熱応用超精密計測・制御」という新学術分野の開拓を目指す。

3. 研究の方法

(1) 熱検知素子基板-測定面間の間隙量検出の実現を目指して、安定レーザーによる絶対距離計測技術で知られるドイツ・物理工学研究所 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt: PTB) とともに共同研究を行い、モード同期フェムト秒レーザー光源を用いた、マルチ波長レーザー絶対距離計測技術の開発に取り組む。

(2) レーザオートコリメーション法^③をベースとする光学式角度センサを開発し、熱検知素子基板面と測定面間の相対角度の高精度検出を試みる。熱検知素子基板背面から測定コリメートレーザー光を入射する構成とし、熱検知素子基板上にレーザー反射用の反射膜を構成するとともに、角度センサ内で測定レーザー光を平行移動する機構を付与することで、熱検知素子基板面および測定面の角度位置を各々検出し、相対角度検出を実現する。

(3) また、モード同期フェムト秒レーザー光源の光周波数安定化を目指して、超高精度多軸位置決め技術で知られるドイツ・イルメナウ工科大 (Technische Universität Ilmenau) とともに共同研究を行い、プログラマブルロジックデバイスの1種であるFPGA (field-programmable gate array) ベースのPLL回路システム構築を試みる。さらに、研究室レベルでも構築が可能とされる光ファイバベースのモード同期フェムト秒レーザー光源の構築を試み、上記間隙量検出システムを含む測定システムの光源確保を試みる。

4. 研究成果

(1) 平成 30 年度 4 月から 8 月にかけてドイツに渡航し, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (ドイツ物理工学研究所: PTB)において, 主たる海外共同研究者の一人である Dr. Florian Pollinger がグループリーダーを務める研究グループとともに, フェムト秒レーザを光源として用いるマルチ波長ヘテロダイン干渉計による高精度変位計測技術^④の検討を進めた. 検討にあたっては, パルスレーザ技術の専門家である Dr. Florian Pollinger が光学系の理論的検討および光学系デザインを担当し, 本報告者は光学系機構の構築, 受光部・信号処理系の構築および基礎特性評価を担当した. 1 つのフェムト秒レーザ光源からのレーザ光を分岐し, 各々を Pound-Drever-Hall (PDH) 法で安定化したキャビティ長の異なる 2 つのキャビティに通すことで(図 2), 繰り返し周波数の異なる 2 つのモード同期フェムト秒レーザ光源とし, これら 2 本のビームを用いることでマルチ波長による絶対位置検出の実現可能性を見出すことに成功した.

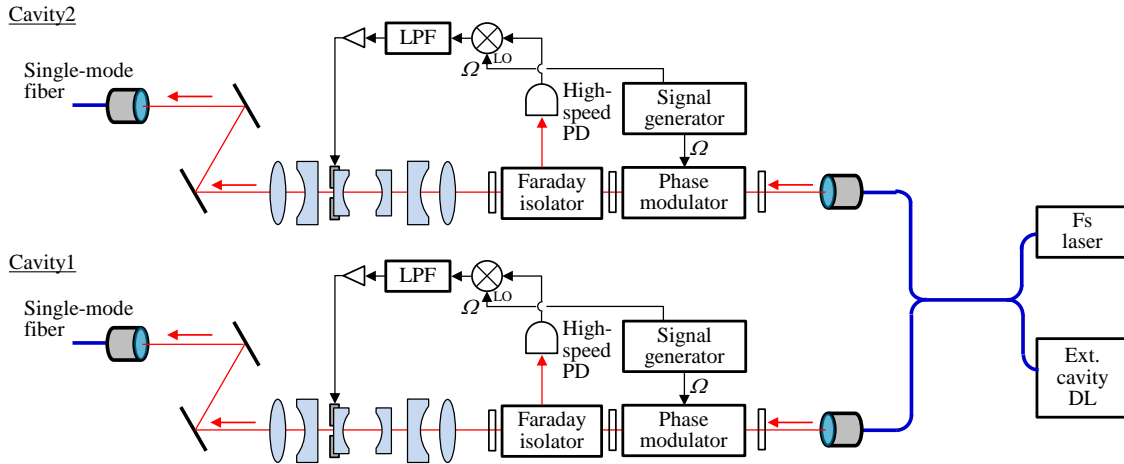


図 2 PDH 法によるデュアルコムレーザ生成光学系

(2) また, エルビウム添加ファイバをレーザ媒質として用いる光ファイバベースのフェムト秒レーザ光源の開発を進めた. 発振波長 970 nm の半導体レーザを励起レーザ光源として用い, 偏光子, 1/2 波長板, 1/4 波長板の組み合わせによる非線形偏波回転を利用した受動的モード同期による方法を採用した光学系を構築(図 3)し, 繰り返し周波数 103.3 MHz, 平均出力 3.5mW を有するフェムト秒レーザの発振を実現した. これにより, 今後, モード同期フェムト秒レーザを光源として用いる光学式計測システムを低コストで構築できる見通しを得ることができた.

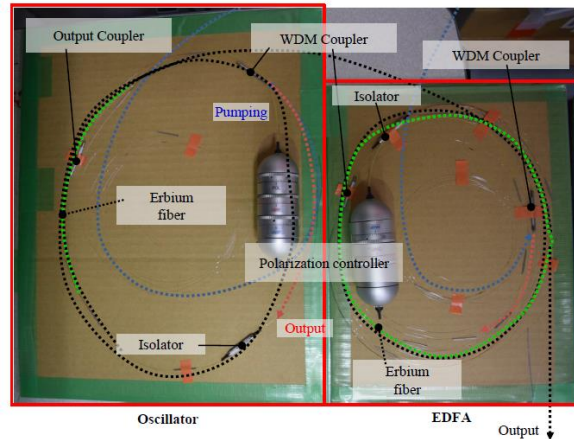


図 3 光ファイバベースで構築したフェムト秒レーザ光源システム写真

(3) 令和元年 6 月から 8 月にかけてドイツに渡航し, Technische Universität Ilmenau (イルメナウ工科大学)において, 主たる海外共同研究者の一人である Prof. Eberhard Manske がグループリーダーを務める研究グループとともに, フェムト秒レーザを光源として用いる光計測における計測安定化技術の検討を進めた. 図 4 に示すような, 高速フォトダイオードで捕捉したフェムト秒レーザのパルス繰り返し周波数を信号発生器からの基準信号とミキサで重畳して得られたダウンコンバージョン信号をもとに, フェーズロックループ (PLL) 回路および PID 制御回路を用いてフィードバックしてフェムト秒レーザ繰り返し周波数を制御するシステムを想

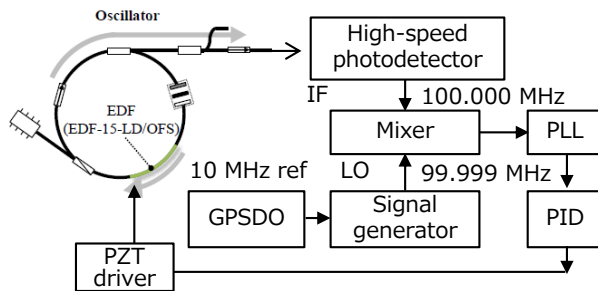


図 4 フェムト秒レーザ繰り返し周波数制御システムのブロックダイアグラム

定し、FPGA ベースの位相同期（Phase Lock Loop : PLL）回路システム構築を構築し（図 5）、その有効性を実験的に明らかにした。これにより、従来は構築に時間を要していたモード同期フェムト秒レーザの周波数制御系を迅速に構築できる見通しを得るとともに、その安定デジタル制御の実現に向けた布石とすることができた。

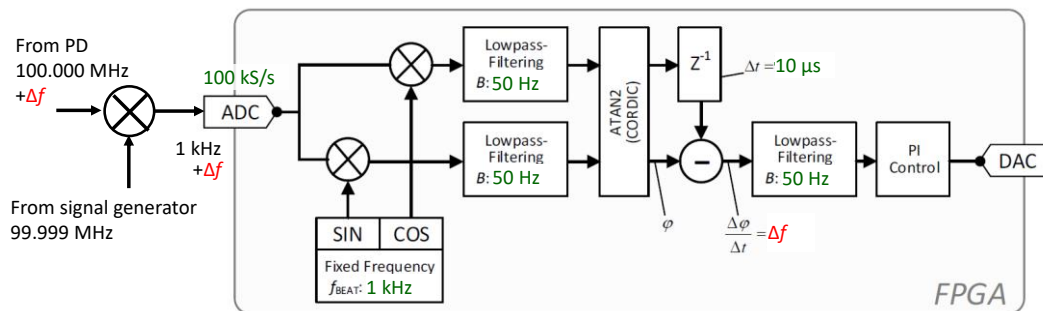


図 5 構築した FPGA ベースの位相同期回路システム模式図

(4) また、熱収支場検知式リニアスケールの原理確立に向け、熱検知素子-リニアスケール間の相対傾斜を検出する光学式角度センサ装置プロトタイプ設計に取り組んだ。帰国後は、前年度に構築した光ファイバベースのフェムト秒レーザ光源についてその安定化に向けて GPSDO(GPS 同期型周波数発振器)ユニットも試作するとともに、光学式角度センサ装置プロトタイプを試作して（図 6）、熱収支場検知式リニアスケールに組み込んで原理検証実験を行い、熱検知素子-スケール間の相対傾斜補正に対する角度センサ適用の有効性を実験的に明らかにした。

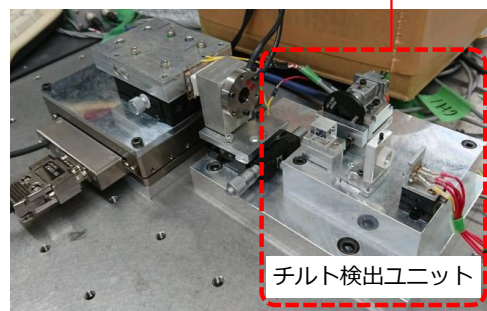
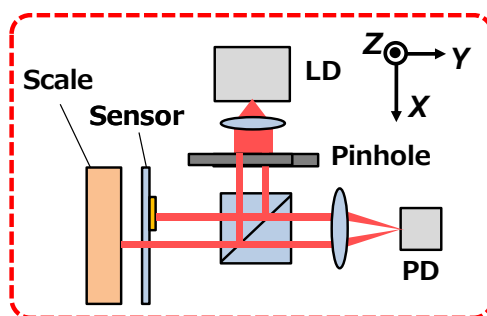


図 6 チルト検出ユニット

<引用文献>

- ① 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, 25, 2014, 064006.
- ② 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 11-5, 2017, 781-786.
- ③ A. E. Ennos, M. S. Virdee, High accuracy profile measurement of quasi-conical mirror surfaces by laser autocollimation. Precision Engineering, 1982, 4, 5-8.
- ④ Jutta Mildner, Karl Meiners-Hagen and Florian Pollinger, Dual-frequency comb generation with differing GHz repetition rates by parallel Fabry-Perot cavity filtering of a single broadband frequency comb source, Measurement Science and Technology, 27-7, 2016, 074011.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuki Shimizu, Hiraku Matsukuma, Wei Gao	4. 巻 19-23
2. 論文標題 Optical Sensors for Multi-Axis Angle and Displacement Measurement Using Grating Reflectors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 5289
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s19235289	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yuki Shimizu, Ayaka Ishida, Yuki Matsuno, Hiraku Matsukuma, Wei Gao	4. 巻 -
2. 論文標題 A Design Study of a Heat Flow-Type Reading Head for a Linear Encoder Based on a Micro Thermal Sensor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanomanufacturing and Metrology	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41871-019-00037-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuki Shimizu, Masaya Furuta, Yuan-Liu Chen, Xiuguo Chen, Hiraku Matsukuma, Wei Gao	4. 巻 75
2. 論文標題 Uncertainty analysis of a six-degree-of-freedom surface encoder for a planar motion stage	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Procedia CIRP	6. 最初と最後の頁 355-360
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.procir.2018.04.041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Hiraku Matsukuma, Wei Gao	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a prototype micro thermal sensor probe for non-destructive surface defect inspection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 6th International Conference on Nanomanufacturing, nanoMan2018	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 清水 裕樹
2. 発表標題 国家標準にトレーサブルな精密ナノ計測の実現に向けて
3. 学会等名 (公社)精密工学会「ナノ精度機械加工専門委員会」第48回委員会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水 裕樹, 高園 翔太, 神田 悠利, 松隈 啓, 稲場 肇, 高 偉
2. 発表標題 フェムト秒レーザ光源を用いた角度センサによる形状計測に関する研究 -マルチビーム角度センサの設計-
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Shimizu, Masaya Furuta, Yuan-Liu Chen, Xiuguo Chen, Hiraku Matsukuma, Wei Gao
2. 発表標題 Uncertainty analysis of a six-degree-of-freedom surface encoder for a planar motion stage
3. 学会等名 The 15th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, CIRP CAT 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Hiraku Matsukuma, Wei Gao
2. 発表標題 Development of a prototype micro thermal sensor probe for non-destructive surface defect inspection
3. 学会等名 The 6th International Conference on Nanomanufacturing, nanoMan2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水 裕樹, 松野 優紀, 石田 彩華, 松隈 啓, 高 偉
2. 発表標題 マイクロ熱検知センサを利用したエンコーダに関する研究
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東北大学大学院工学研究科 高・清水・松隈研究室ホームページ http://web.tohoku.ac.jp/nanometrology/ 高・清水研究室 / 精密ナノシステム研究センター http://web.tohoku.ac.jp/nanometrology/</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ポリンジャー フローリアン (Pollinger Florian)	ドイツ 物理工学研究所 (PTB) ・ Working Group 5.42 ・ Head of Working Group	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	マンスク エバハート (Manske Eberhard)	ドイツ イルメナウ工科大学 ・ Department of Precision Engineering ・ Dean of the department	