

令和 5 年 5 月 13 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20953

研究課題名（和文）透過フェムト秒レーザー熱検知プローブによる非接触・非破壊サブサーフェス評価への挑戦

研究課題名（英文）Challenges in Non-Contact and Non-Destructive Surface Evaluation Using a Focused Femtosecond Laser Thermal Sensing Probe

研究代表者

清水 裕樹（Shimizu, Yuki）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：70606384

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：微小薄膜抵抗体で構成するマイクロ熱検知センサと、集光フェムト秒レーザーで構成した共焦点光学系とを融合して、試料面の局所加熱とそれに伴う微小熱応答の高精度検知を両立する「フェムト秒レーザー熱検知プローブ」の基礎原理を提案した。熱検知プローブに組み込むマイクロ熱検知センサ、この熱検知センサを試料面に近接する際の間隙変化量を検出する集光フェムト秒レーザー共焦点光学系、およびフェムト秒レーザー光源を試作して原理検証実験を行い、その実現可能性を実験的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案する「フェムト秒レーザー熱検知プローブ」は、マイクロ熱検知素子およびフェムト秒集光レーザープローブをもとに、素子-測定面間に生成した安定熱収支場を生成し、測定試料面の性状変化に伴う熱的平衡状態の変化を、センサ出力変化を通じて検知することを試みるものである。今回の検討により、フェムト秒集光レーザープローブと熱検知センサとの高精度位置合わせ実現の可能性が見いだせたこと、およびセンサと測定面との近接状態変化を検出できる可能性が見いだせた。「熱」を積極的に精密計測に援用する本手法をさらに発展させると、学術的にもより意義があるものになると期待される。

研究成果の概要（英文）：The basic principle of a “femtosecond laser thermal sensing probe”, which combines a micro thermal sensor composed of a micro thin-film resistive element and a confocal optical system composed of a focused femtosecond laser, is proposed to achieve both local heating of the sample surface and highly accurate detection of the accompanying micro thermal response. The feasibility of the probe has been experimentally demonstrated by fabricating a micro thermal sensor to be incorporated in the probe, a focused femtosecond laser confocal optics system to detect the gap change when the thermal sensor is placed close to the sample surface, and a femtosecond laser light source.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：熱収支場 フェムト秒レーザー 精密位置決め

1. 研究開始当初の背景

(1) 超精密加工分野においては既にサブ nm 級の表面形状加工が実現されており、超精密計測分野においても、原子間力顕微鏡に代表される走査型プローブ顕微鏡や、光学式干渉顕微鏡などの光学的手法により、高さ方向にサブ nm の分解能を有する高精度計測が実現されている。その一方で、加工面の機能性の観点から、加工面の表層下に存在する加工変質層など、いわゆるサブサーフェスの計測評価技術への需要が高まってきている^①。

(2) 従来は測定対象を集光イオンビームで切り出して薄膜切片とし、透過型電子顕微鏡でその断面状態を観察する手法が用いられている^②。電子顕微鏡の高い2次元分解能を享受できる一方で、破壊検査であり測定スループットが低いことから、非破壊でスループットの高いサブサーフェス計測評価技術の確立が望まれている。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、微小薄膜抵抗体で構成するマイクロ熱検知センサと、集光フェムト秒レーザーで構成した共焦点光学系とを融合して、試料表層下(サブサーフェス)の局所加熱とそれに伴う微小熱応答の高精度検知を両立する「フェムト秒レーザー熱検知プローブ」を構築し、非接触・非破壊サブサーフェス高精度評価を実現する手法の確立に挑戦することを目的としている。

(2) 試料に対して高い透過特性を有するフェムト秒レーザーを集光してサブサーフェスを局所的に安定加熱するとともに、集光フェムト秒レーザー内にマイクロ熱検知センサを配置し、試料面に対して近接させて熱応答を取得することで、サブサーフェスの熱特性をピンポイントで高精度検出する非接触・非破壊かつ迅速なサブサーフェス検査の実現を目指す。

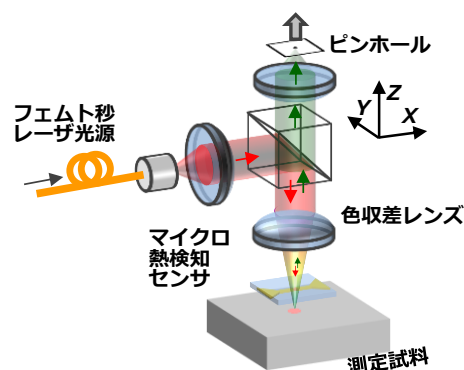


図1 フェムト秒レーザー熱検知プローブの構想図

(3) 提案手法の実現に向けては、熱検知プローブに組み込むマイクロ熱検知センサ、この熱検知センサを試料面に近接する際の間隙変化量を検出する集光フェムト秒レーザー共焦点光学系、およびフェムト秒レーザー光源などの要素技術が必要である。本研究ではこれら要素技術についてプロトタイプ試作を行い、実験によりそれらの基礎特性を評価した。

3. 研究の方法

(1) 共焦点光学系に用いるフェムト秒レーザー光源を構築する。波長 980 nm の半導体レーザーを励起レーザーとして用い、これにエルビウム添加ファイバを有する光ファイバベースの共振器を組み合わせることで中心波長 1560 nm 程度のレーザー光源とする。さらに、半導体レーザーとエルビウム添加ファイバからなる増幅器(EDFA)と高非線形ファイバを組み合わせることでその波長帯域の拡大も図る。

(2) フェムト秒レーザー熱検知プローブに用いるマイクロ熱検知センサの試作を進める。センサ素子に被るように電極パターンを併せて形成することで電氣的アクセスを実現するとともに、これらをガラス基板上に形成することで、センサ素子背面からレーザー光でアクセスできるようにする。なお、歩留まりを考慮して同一基板上に複数のセンサ素子および電極パターンを配置する。また、センサ素子の測定対象面への近接を妨げないように、電極パターンはリセスしたガラス基板の端面まで形成し、基板側面からの電氣的アクセスを実現する。

(3) マイクロ熱検知センサ向けの信号増幅回路を設計・試作してその基礎特性を評価する。複数センサ出力を利用した差動信号処理によるノイズ低減を試みるとともに、マイクロ熱検知センサを信号増幅回路に直接搭載できる基板構成も検討する。なおこの際、レーザー光によるセンサ素子へのアクセスを妨げないように電子回路基板中央には開口を設ける。

(4) フェムト秒レーザー熱検知プローブに用いる共焦点光学系を構築する。なるべくシンプルな光学系構成となるよう、光ファイバサーキュレータを用いることで、測定レーザー導入開口を、センサ/測定対象面からの反射測定レーザー光の検出開口として共有する構成とする。色収差レンズの焦点面近傍にマイクロ熱検知センサ基板を配置し、光軸方向に基板をシフトした際の反射測定レーザー光を光スペクトラムアナライザで捕捉し、その挙動を観察する。また、このときの熱検

知センサ出力を併せて捕捉し、レーザ照射に伴うセンサ出力変動を評価する。さらに、測定試料面をマイクロ熱検知センサに近接した際のセンサ出力を捕捉し、フェムト秒レーザ熱検知プローブの基礎特性を評価する。

4. 研究成果

(1) 共焦点光学系に用いる光ファイバベースのフェムト秒レーザ光源を構築した。繰り返し周波数が 100 MHz 程度となるよう共振器長を約 2 m に設定し、中心波長 1560 nm、帯域幅約 40 nm のフェムト秒レーザ発振を確認した。また、増幅器(EDFA)により約 100 mW まで増幅した後に、高非線形ファイバを用いて帯域拡大を試みた。光スペクトラムアナライザ(OSA)による観察の結果、スーパーコンティニューム光が得られていることが実験的に確認された(図2)。

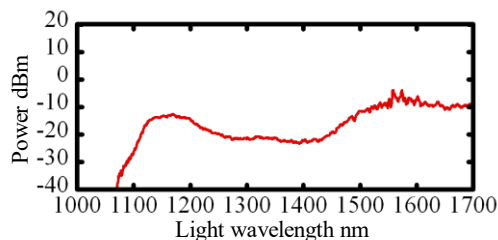


図2 構築したフェムト秒レーザ光源により得られた短パルス光の光スペクトル確認結果

(2) フェムト秒レーザ熱検知プローブに用いるガラス基板マイクロ熱検知センサの試作を進めた。電極パターンに金薄膜を採用し、かつセンサ素子の測定対象面への近接を妨げないようにリセスしたガラス基板の端面まで形成し、基板側面からの電気的アクセスを試みた。当初はハンダ付けによる導通確保を試みたが、接合時の熱による電極パターン損傷が確認されたことから、導電性ペーストを採用した(図3)。

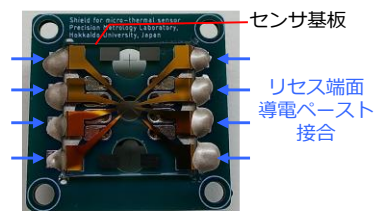


図3 導電性ペーストによるガラス基板マイクロ熱検知センサと回路基板の導通確保

(3) マイクロ熱検知センサ向けの信号増幅回路を設計・試作してその基礎特性評価を評価した。センサ出力に周波数 50 Hz の電源ノイズ成分およびその高調波成分が含まれることが実験的に確認されたことから、同一基板上に配置した複数センサ出力間の差動信号の利用を試みた。その結果、当該ノイズ成分の低減が図れることを実験的に確認した(図4)。

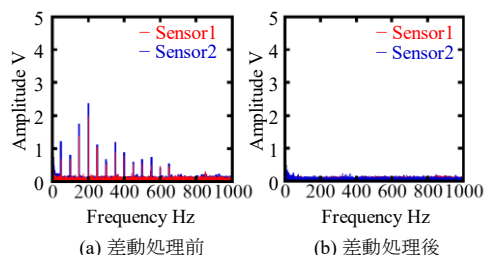


図4 差動処理によるセンサ出力ノイズ低減効果検証結果

(4) マイクロ熱検知センサの基礎特性評価として、平面上に配置した間隔 20 μm のラインパターンにセンサ基板を近接した状態で、ラインパターン上を 0.5 μm ステップで水平方向に走査し、センサ出力の変化を観察した。この結果、マイクロ熱検知センサとラインパターンのオーバーラップ面積変化に伴うセンサ出力変化を検出可能であることが実験的に明らかになった(図5)。この結果は、試作したマイクロ熱検知センサによる間隙量検出実現の可能性を示唆する結果である。

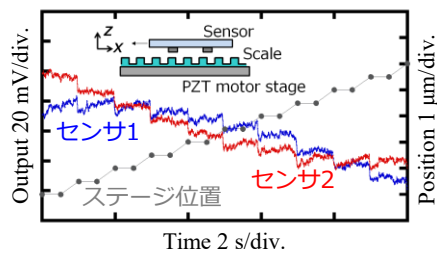


図5 ラインパターン走査時のマイクロ熱検知センサ出力変化確認結果

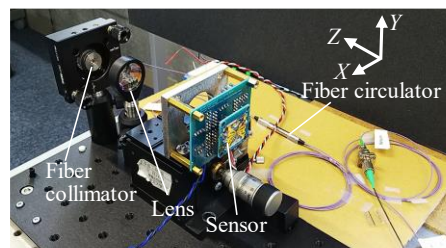
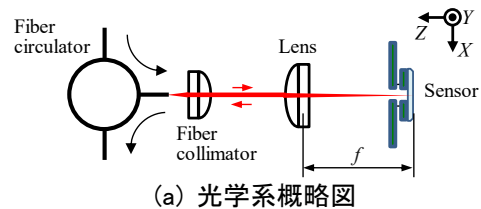
(5) センサ出力ノイズ低減に向け、信号処理回路基板に直接熱検知センサ基板を搭載する新たな装置レイアウトを検討した。ブリッジ回路と信号増幅回路を同一基板上に含み、かつマイクロ熱検知センサ基板を搭載可能とする信号処理回路基板を設計・試作した。レーザ光によりマイクロ熱検知センサにアクセスできるよう基板中心部には開口を設ける構成とした(図6)。



図6 試作した信号処理回路基板

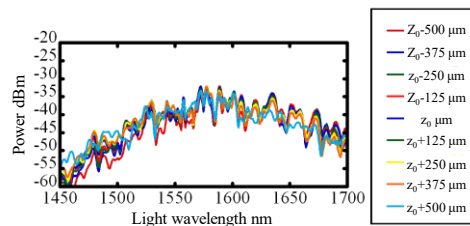
(6) 試作したフェムト秒レーザ光源/スーパーコンティニューム光源をもとに、共焦点光学系を設計・構築した。光学系をコンパクトに構成するため、光ファイバサーキュレータとファイバコリメータを用いることで、測定レーザ光を射出する微小開口と、反射測定光を捕捉する微小開口を共通化する構成とし、当初適用予定であったビームスプリッタを省いた構成とした。なお、マイクロ熱検知センサを信号処理回路基板に直接搭載する構成としたことから、色収差レンズには焦点距離 100 mm の平凸レンズを採用することとした(図7(a))。

(7) 共焦点光学系に、信号処理回路基板を含む熱検知センサを組み込んで、フェムト秒レーザー熱検知プローブのプロトタイプを構築した(図 7(b)). 光源には自作したフェムト秒レーザー/スーパーコンティニューム光を用い、ファイバサーキュレータの出力ポートからファイバコリメータを用いて導入し、径 2 mm のコリメートレーザ光とした. これを焦点距離 $f=100$ mm のレンズを用いて集光し、レンズ焦点面近傍にマイクロ熱検知センサを配置した. なお、集光レーザー光をマイクロ熱検知センサ素子に照射できるように、信号処理回路を含むマイクロ熱検知センサは手動の 3 軸精密位置決めステージ上に配置した. センサからの反射光がファイバサーキュレータの出力ポートに再帰反射するように、ファイバコリメータをマウントする 2 軸チルトステージを調整した.



(a) 光学系概略図
(b) 装置プロトタイプ写真
図 7 フェムト秒レーザー熱検知プローブ

(8) マイクロ熱検知センサ裏面にレーザー光を照射した状態でセンサに光軸方向の変位を与え、センサ変位に伴う捕捉反射光のスペクトル変動を確認した. 焦点距離の比較的大きいレンズを適用したことから、軸上色収差が少ないこともあり、スペクトル形状には大きな変化は確認されなかったが、センサ変位に伴い反射光の光量が増加することが実験的に確認された(図 8).



(a) 反射光スペクトル変動



(b) センサ変位と反射光光量の関係

図 8 光軸方向センサ変位に伴う捕捉反射光挙動変化の確認結果

(9) 同様に、センサ面内方向変位を付与した際の捕捉反射光を確認したところ、X 方向変位、Y 方向変位ともにスペクトルと光量に変化が確認された(図 9). この結果は、集光レーザーを熱検知センサ素子に精度良く位置決め可能であることを示唆するものである.

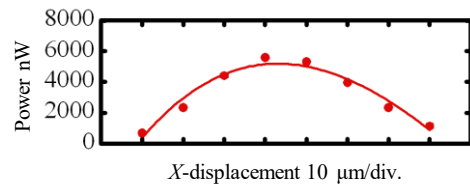
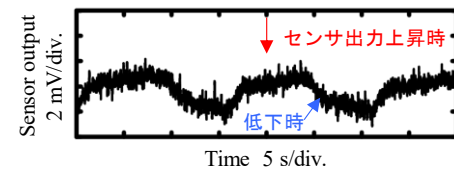
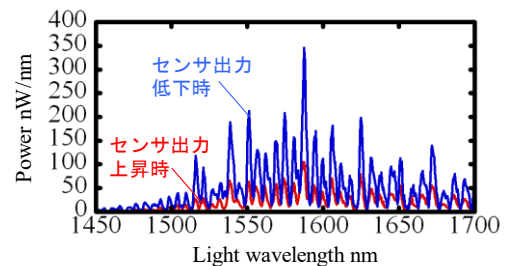


図 9 面内方向センサ変位に伴う捕捉反射光光量変化の確認結果

(9) マイクロ熱検知センサ裏面にレーザー光を照射し、その捕捉反射光が最大となる軸上位置にセンサ基板を配置した後、薄膜ラインパターンを表面に有する測定対象面をセンサ表面に近接させた状態で、センサ-測定対象面間に面内変位を与えた際のセンサ出力および捕捉反射光の変化を確認した結果を図 9 に示す. ラインパターンにより熱検知センサの出力が変化するとともに、センサ出力と連動して捕捉反射光のスペクトル変動が確認された. この結果は、測定面性状の変化を熱検知センサ出力および反射光スペクトル変動から検出できる可能性を示唆するものである.



(a) 熱検知センサ出力の変化



(b) 捕捉反射光スペクトルの変化

図 10 ラインパターン走査時の熱検知センサ出力と捕捉反射光スペクトルの変化

(10) 以上の結果から、本研究で提案するフェムト秒レーザー熱検知プローブが、熱検知センサ-測定対象面間の間隙量を検出し、さらに測定面のパターン検出を実現できる可能性を有することが実験的に明らかとなった.

<引用文献>

- ① 青山藤詞郎, 梅田和昇, 小野里雅彦, 国枝正典, 厨川常元, 新野秀憲, 武田稔, 諸貫信行, 山内和人, 精密工学会誌, 84 (2018) 1-6.
- ② J. Yan, T. Asami, H. Harada, T. Kuriyagawa, Precision Engineering, 33 (2009) 378-386.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shimizu Yuki	4. 巻 4
2. 論文標題 Laser Interference Lithography for Fabrication of Planar Scale Gratings for Optical Metrology	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomanufacturing and Metrology	6. 最初と最後の頁 3~27
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41871-020-00083-2	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 清水 裕樹, 石田 彩華, 高 偉
2. 発表標題 熱収支場式リニアエンコーダの開発に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会IIP2022 情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水裕樹, 石田彩華, 松隈啓, 高偉
2. 発表標題 熱収支場式エンコーダの開発に関する研究-試作ヘッドの基礎特性評価
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Shimizu, Ayaka Ishida, Wei Gao
2. 発表標題 Improvement of the signal quality of a heat flow-type reading head for a linear encoder based on a micro thermal sensor
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 清水 裕樹, 高 偉	4. 発行年 2022年
2. 出版社 一般社団法人日本オプトメカトロニクス協会	5. 総ページ数 6
3. 書名 光技術コンタクト 「モード同期フェムト秒レーザー共焦点プローブの開発とその高精度化」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

北海道大学大学院工学研究院 精密計測学・ロボティクス研究室
<https://ird.eng.hokudai.ac.jp/top-shimizu.html>

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------