

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03808

研究課題名（和文）微細形状測定用ファブリ・ペロー干渉計内蔵小径光ファイバスタイラスの開発

研究課題名（英文）Development of a stylus with a Fabry-Perot interferometer built into an optical fiber tip for microstructure measurement

研究代表者

村上 洋（Murakami, Hiroshi）

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号：00416512

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ファブリ・ペロー干渉計を光ファイバスタイラス先端部に組み込んだ接触式スタイラスを用いることにより、微細三次元形状を非破壊にて測定可能な装置の開発を目的として研究を実施した。スタイラス設計パラメータを最適化後、スタイラス製作について検討した。製作したスタイラスの分解能測定実験を実施した結果、約30nmの分解能を得られることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状で寄せられている高アスペクト比（穴の場合、穴深さ/穴径）での穴・溝の形状や側壁粗さ測定のニーズは、半導体TSV、各種ノズル、マイクロニードル用の微細金型やマイクロリアクターの流路や側壁の計測など半導体・自動車・微細金型・バイオ・医療分野まで広きにわたる。本技術は、従来の三次元計測方法では対応できない測定を可能にするため、社会におけるマイクロシステムテクノロジーの応用領域の拡大に寄与できるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the stylus with a Fabry-Perot interferometer embedded in the optical fiber stylus tip was used to develop the measurement system capable of nondestructively measuring the microstructures. The stylus design parameters were optimized, and stylus fabrication was investigated. Experiments were conducted to measure the resolution of the stylus, and it was confirmed that the measurement resolution was approximately 30 nm.

研究分野：微細形状測定，加工モニタリング，異常検知

キーワード：微細形状測定 光ファイバ スタイラス ファブリ・ペロー干渉

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、微細金型、各種ノズル穴、半導体等の分野において、立体的で微細な三次元形状部品が増加しており、これらの計測技術の進展なしでは微細加工技術の高度化は実現できないことから、これらを精密に測定する重要性・ニーズは増加している。例えば、半導体チップの内部を垂直に貫通する電極用の微細穴である TSV では、エッチングによる微細穴加工条件や、穴あけ後のめっき条件最適化のため、その側壁粗さや穴内部形状の非破壊での測定が要求されている。現状では、上記要求を満たす直径が数 μm 以下の微小径穴や溝、側壁粗さの測定に対応可能な微細形状の計測技術は確立されておらず、特に深穴や深溝を有する形状になると測定は極めて困難となる。

2. 研究の目的

そこで、本課題では、ファブリ・ペロー干渉計を光ファイバスタイラス先端部に組み込んだ接触式スタイラスを用いることにより、微細三次元形状を非破壊にて測定可能な装置の開発を目的とする。スタイラス先端部をセンサ化することで、微細径で剛性が低いスタイラスでも接触を検知でき、様々な微細形状の測定ニーズに対応することが可能となる。図 1 に、ファブリ・ペロー方式光ファイバプローブおよびその光学系の概略図を示す。広帯域の SLD 光源から照射された光 I_{in} はシングルモードファイバ、サーキュレータを經由して光ファイバプローブに入射する。プローブの先端部は金ハーフミラー、弾性樹脂、金ハーフミラーがコーティングされたプローブ接触子の順に構成されている。先端部のハーフミラー間はファブリ・ペロー干渉計となっており、ハーフミラー 1 で反射した光 I_1 と接触子にコーティングされたハーフミラー 2 で反射した光 I_2 の干渉光 I_{out} は、再度サーキュレータを介してスペクトラムアナライザ (OSA) で受光する。このスペクトラムアナライザで受光する干渉光のスペクトルは弾性樹脂の厚みにより変化する。つまり、プローブ接触子が測定対象面に接触すると弾性樹脂層の厚みが変化するため、反射光のスペクトル (例：ピーク波長のシフト量) を測定することにより、接触を検知することが可能となる。

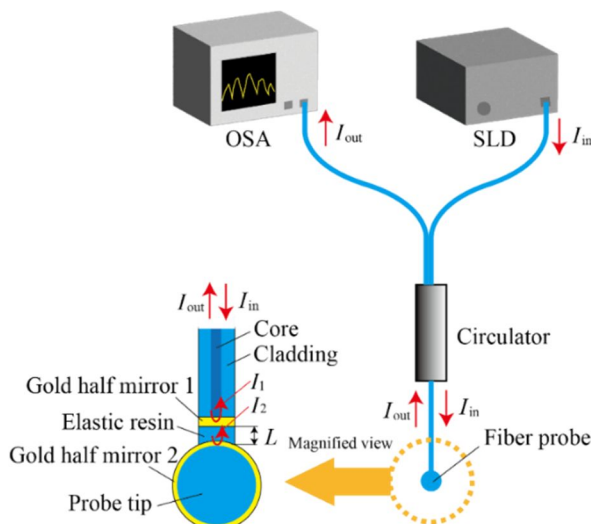


図 1 光ファイバプローブ概略図

3. 研究の方法

(1) スタイラス設計パラメータの最適化

有限要素解析および Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法 (Maxwell 方程式を時間的、空間的に離散化し陽的な時間進行法を用いて経時的な電磁界強度を求める手法) により、スタイラスの測定感度が最大となるよう弾性樹脂の厚み・材料、金ハーフミラー膜厚などのスタイラス設計パラメータの最適化を行う。

(2) スタイラス製作方法

エッチングによる小径化手法を検討する。また、接着による接触子の製作方法や CO_2 レーザ加工による接触子の製作方法について検討する。

(3) スタイラスの性能試験

スタイラスの測定分解能評価実験を実施する。

4. 研究成果

(1) スタイラス設計パラメータの最適化

有限要素解析およびFinite-Difference Time-Domain (FDTD)法(電磁界解析)により, スタイラスの測定感度が最大となるよう弾性樹脂の厚み・材料, 金ハーフミラー膜厚などのスタイラス設計パラメータの最適化した. 例えば直径が10 μm のプローブの場合, 金ハーフミラーの膜厚は10 nmの際に感度が最大になる.

(2) スタイラス製作方法

図2にプローブの製作方法を示す. 最初に光ファイバをウエットエッチングにより小径化する. 図3に示すように温調器にエッチング液が入っている容器を設置し, 光ファイバの先端を浸漬してエッチングにより設計寸法まで小径化する. その後, シャフト端面に金ハーフミラーを蒸着し, 弾性樹脂を塗布する. その後, 金ハーフミラーをコーティングしたガラス球を逆側(下方)に配置した状態で光を上方のファイバに入射し, その反射光をモニターしながら干渉スペクトルの振幅が最大となるようにハーフミラー間の距離を調整する. 調整後, 弾性樹脂を硬化させる. 図4に製作したプローブの写真を示す.

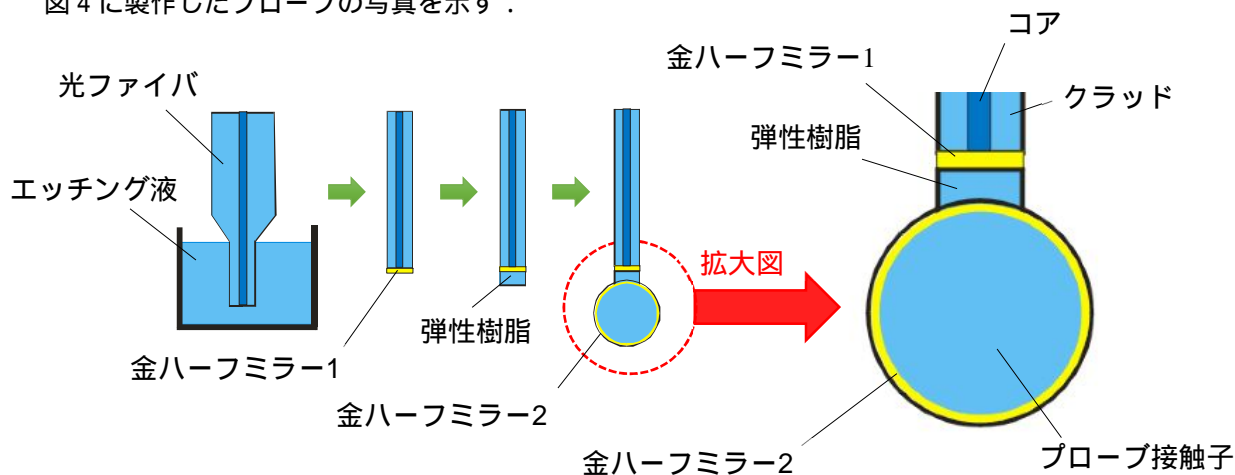


図2 接着によるプローブの製作手順

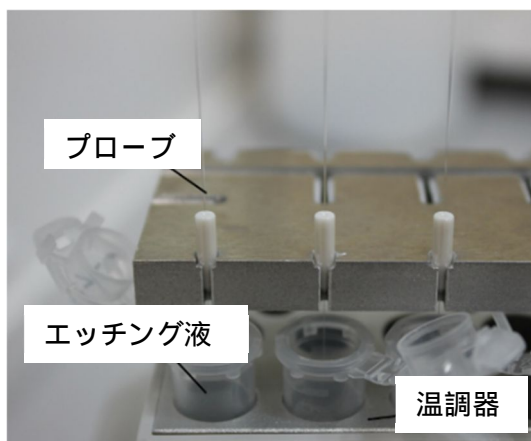


図3 エッチング装置

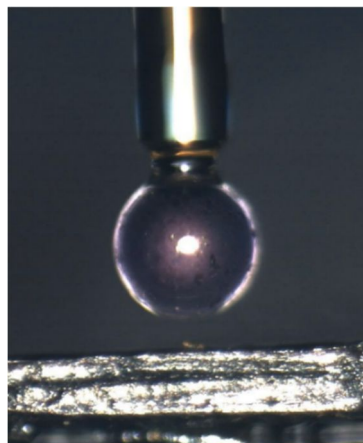


図4 接着により製作したプローブ

次にレーザー加工による製作方法について検討した. 前項記載のエッチング方法で小径化した光ファイバの端面に図5に示すように金ハーフミラーを蒸着し, 弾性樹脂を塗布する. その後, 金コーティングしたもう1本のファイバを逆側(下方)に配置した状態で反射光をモニタリングしながらハーフミラー間の距離を調整する. 調整後, 弾性樹脂を硬化させる. 最後に下方のファイバを適当な長さにCO₂レーザーを用いて切断し, 再度先端部にCO₂レーザーを照射し, 先端部を溶融させて表面張力により球形状に成形する. 図6に製作したプローブの写真を示す. 弾性樹脂とプローブ接触子の距離が短くなるとレーザー加工の際の熱の影響により弾性樹脂が溶融してしまうため, この製作方法では弾性樹脂とプローブ接触子の距離を短くすることは難しい. そこで以降の実験では図4に示す接着により製作したプローブを用いる.

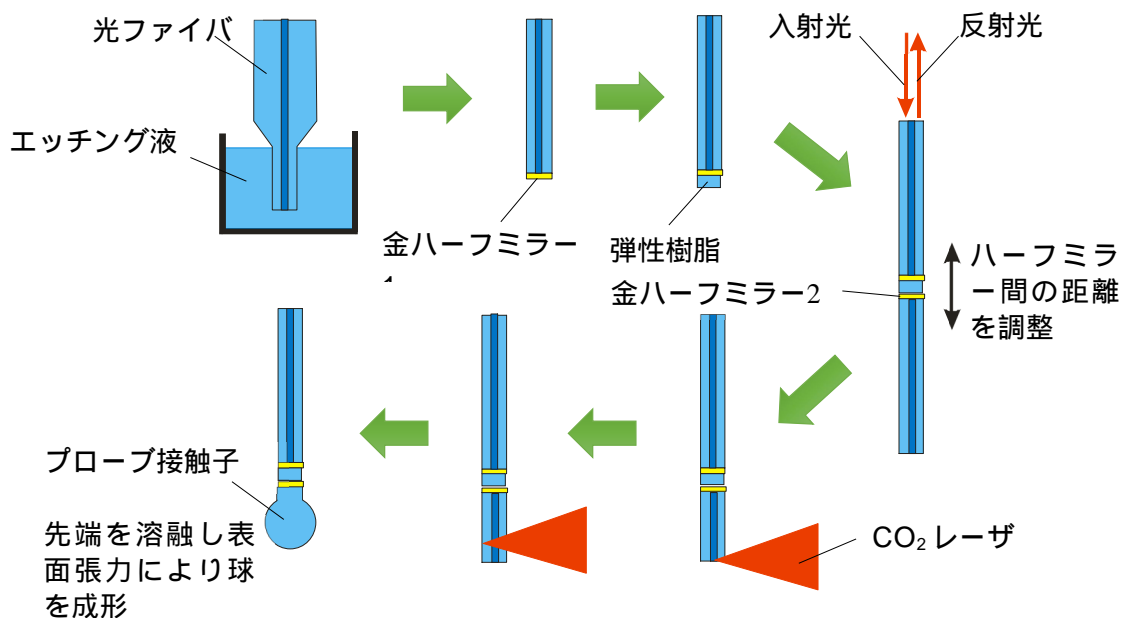


図5 レーザ加工によるプローブの製作手順

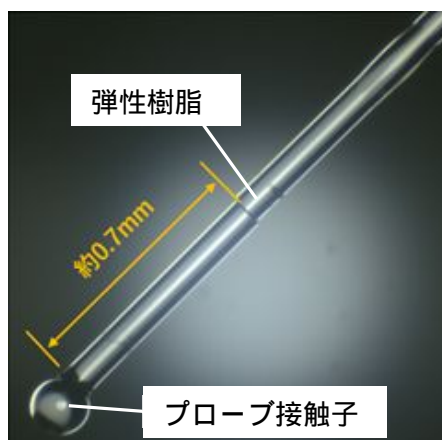


図6 レーザ加工により製作したプローブ

(3) スタイラスの性能試験

プローブ先端の接触子を測定対象面上方から 30 nm ピッチで接触させた際の接触子移動量とピーク波長のシフト量との関係を図7に示す。青線が生データのピーク波長シフトを示すが、スタイラスの移動量とピーク波長シフト量が線形の関係ではなく、分解能が低いことが確認できる。そこで、スペクトル生データのピーク付近に近似曲線をフィッティングし、そのフィッティング曲線のピーク波長シフト量を検出することにより、スペクトル波形のノイズの影響を低減する。図7の赤線がフィッティング後のピーク波長シフトを示し、プローブの移動量とピーク波長シフト量が線形の関係にあり、約 30nm の分解能を得られることが確認できる。接触検知した際の XYZ 座標を記録していくことで微細三次元形状の測定が可能となる。

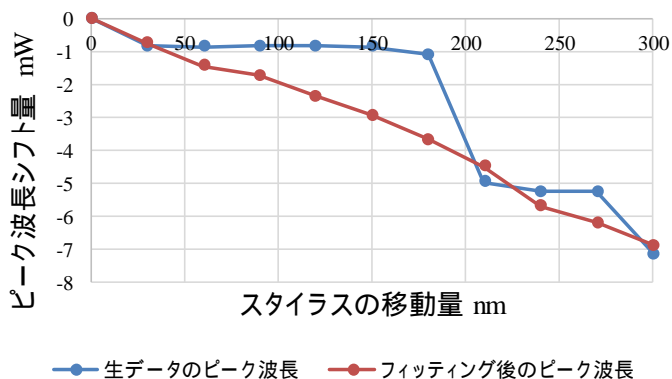


図7 接触後の接触子移動量と波長ピークのシフト量との関係

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 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Murakami Hiroshi, Murakami Hiroki, Katsuki Akio, Sajima Takao, Uchiyama Kosuke	4. 巻 80
2. 論文標題 Development of a two-step stylus with elastic hinge for microstructure measurement to improve sensitivity and vibration characteristics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 72 ~ 81
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.precisioneng.2022.11.015	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 Murakami Hiroshi, Uchiyama Kosuke, Katsuki Akio, Sajima Takao, Fujiyoshi Kunitaka	4. 巻 13
2. 論文標題 Development of a High-Function Fiber Stylus for Microstructure Measurement with Water-Repellent and Antistatic Coatings	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1260 ~ 1260
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app13031260	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 村上 洋	4. 巻 88
2. 論文標題 微細形状測定機用マイクロファイバスタイラスの製作技術	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 678-683
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 -

1. 著者名 Uchiyama Kosuke, Murakami Hiroshi, Katsuki Akio, Sajima Takao, The University of Kitakyushu 1-1 Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka 808-0135, Japan, Kyushu University, Fukuoka, Japan	4. 巻 16
2. 論文標題 Development of a Sharp-Tipped L-Shaped Stylus for Measurement of Nanoscale Sidewall Features	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 489 ~ 496
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2022.p0489	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 村上 洋, 甲木 昭雄, 佐島 隆生, 服部 佑美
2. 発表標題 ファブリ・ペロー方式微細形状測定用光ファイバプローブの開発 試作および性能評価
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Murakami, Akio Katsuki, Takao Sajima, Yumi Hattori
2. 発表標題 Development of a Micro Contact Sensor with a Fabry-Perot Interferometer Built into an Optical Fiber Tip
3. 学会等名 27th International Conference on Optical Fiber Sensors (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上洋, 甲木昭雄, 佐島隆生, 内山晃介
2. 発表標題 微細形状測定用ファブリ・ペロー干渉計内蔵小径光ファイバスタイラスの開発
3. 学会等名 光計測シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部佑美, 村上洋, 甲木昭雄, 佐島隆生, 内山晃介
2. 発表標題 ファブリ・ペロー方式微細形状測定用光ファイバプローブの試作および性能評価
3. 学会等名 2021年度精密工学会中国四国支部・九州支部共催岡山地方講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上洋, 甲木昭雄, 佐島隆生, 服部佑美
2. 発表標題 ファブリ・ペロー方式微細形状測定用光ファイバプローブの開発ー試作および性能評価ー
3. 学会等名 2022年度精密工学会精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

北九州市立大学 国際環境工学部 機械システム工学科 村上研究室 http://www.env.kitakyu-u.ac.jp/~muraka16/
--

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