

令和 3 年 6 月 19 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03879

研究課題名(和文)小径穴・溝形状および側壁粗さ測定用極小径ファイバスタイラス製作技術の確立

研究課題名(英文) Fabrication method of an L-shaped stylus with a sharp tip and a standard type stylus for measuring micro hole and wall roughness

研究代表者

村上 洋 (Murakami, Hiroshi)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

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)：近年、立体的で微細な三次元形状測定の要求が増加している。例えば、半導体チップの内部を垂直に貫通する電極用微細深穴ではエッチングによる穴加工条件最適化のため、その側壁粗さや穴内部形状の測定が要求されている。本課題ではCO<sub>2</sub>レーザ加工とウェットエッチングを用いることで溝や穴を有する微細形状および側壁粗さの両方が測定可能な2種類(先端が球形状のスタイラスとL型先鋭化スタイラス)のスタイラスを開発し、測定実験によりその有用性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微細形状測定のニーズは、例えば各種ノズル、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、半導体からバイオ・医療分野まで多岐にわたり必要とされている。このような背景から、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(環境、医学、バイオ、光通信、MEMS技術など)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)：Recently, there has been an increase in the demand for precision measurement methods for characterizing micro-structures. For example, in the case of Through-Silicon Vias, the measurement of the wall roughness from nanometer to micrometer order is required for optimization of the processing parameters. In this study, we developed two kind of styli, such as an L-shaped stylus with a sharp tip and standard type stylus, for measuring nanoscale surface roughness of wall and microhole. The usefulness of these styli was confirmed by measurement experiment.

研究分野：微細形状測定および加工モニタリング

キーワード：微細形状 測定 光ファイバ スタイラス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 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 (直径  $10\ \mu\text{m}$  以下、深さ  $100\sim 500\ \mu\text{m}$ ) 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。

### 2. 研究の目的

上記要求に応えるためには、極小径のスタイラス (測定対象物と接触する触針のこと) の製作技術およびスタイラスと測定対象面との接触を検知するセンシング技術の開発が必要となる。センシング技術は過去の研究で開発済みである。そこで、本課題では  $\text{CO}_2$  レーザ加工とウェットエッチングを用いることで  $1\ \mu\text{m}$  以下の溝や穴を有する微細形状および粗さの両方が測定可能な 2 種類 (先端が曲り鋭利な L 型先鋭化スタイラス (微細壁面粗さ測定用) や極小径の先端が球形状のスタイラス (形状測定用)) の極小径ファイバスタイラス製作技術の確立を目標とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 形状測定用スタイラス (先端が球形状のスタイラス) の開発

スタイラスシャフトの小径化

ウェットエッチングにより直径  $125\ \mu\text{m}$  の光ファイバを小径化する。

先端球 (スタイラス接触子) の製作

$\text{CO}_2$  レーザをスタイラス先端部に照射し、溶融させ表面張力により球形状に成形する。

#### (2) 微細壁面粗さ測定用スタイラス (先端が曲り鋭利な L 型先鋭化スタイラス) の開発

エッチングによる小径化と先鋭化

ウェットエッチングにより直径  $125\ \mu\text{m}$  の光ファイバの先端を先鋭化する。

$\text{CO}_2$  レーザ加工によるスタイラスシャフトの L 字型加工方法

光ファイバに対して直交方向から、曲げたい位置に集束  $\text{CO}_2$  レーザを照射し L 字型に加工する。

### 4. 研究成果

#### (1) 形状測定用スタイラス (先端が球形状のスタイラス) の開発

スタイラスシャフトの小径化

スタイラスシャフトはウェットエッチングにより直径  $125\ \mu\text{m}$  の光ファイバを小径化し製作した。光ファイバ先端をエッチング液 ( $40^\circ\text{C}$ )、室温 ( $23^\circ\text{C}$ ) でエッチングを行った。図 1 および 2 にエッチング液温を制御可能なエッチング装置およびエッチング過程の概略図を示す。エッチング後は水およびアセトンで洗浄した。図 3 に実験結果を示す。横軸はエッチング時間、縦軸はスタイラスシャフト直径を示す。また、図 4 にエッチング後のスタイラス先端部の写真を示す。 $1\ \mu\text{m}$  以下 (約  $0.4\ \mu\text{m}$ ) に加工できているのが確認できる。

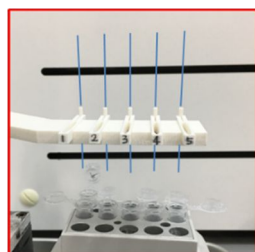


図 1 液温制御エッチング装置

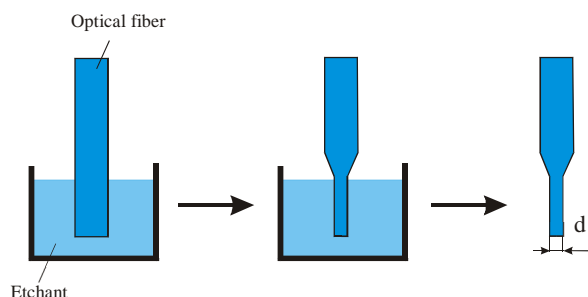


図 2 エッチングによるファイバ小径化

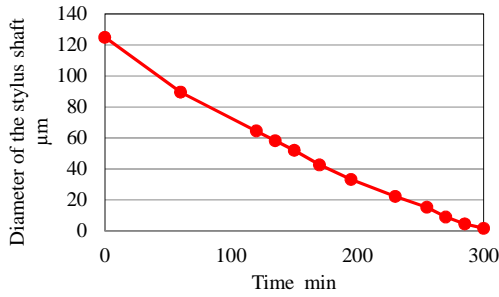


図3 エッチング時間と直径の関係

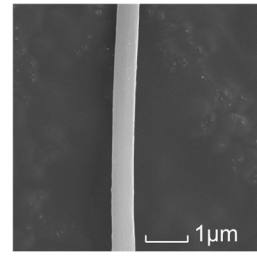


図4 小径化スタイラス

先端球（スタイラス接触子）の製作

次に、CO<sub>2</sub> レーザを用いたスタイラス接触子の製作方法について検討した。図5に示すようにスタイラス先端部にレーザを照射し、熔融させ表面張力により球形状に成形する。レーザの波長10.6 μm、出力8 W、対物レンズの焦点距離は50 mmである。図6は加工後の写真であり、スタイラスシャフト直径約0.4 μm、接触子直径約1.2 μmである。直径約0.4 μmの極小径のスタイラスシャフトでもCO<sub>2</sub> レーザを用いることで球形状に成形可能であることを確認した。しかし、最終目標値であるシャフト直径0.2 μmに関しては、光学顕微鏡ではレーザ加工時の観察が難しいことから達成が難しく、引き続き今後観察方法などを検討していく予定である。レーザ出力が8 W以上の場合、直径約0.4 μm以上のスタイラスシャフトを加工可能である。出力が3.3 Wの場合、直径約0.6 μm以上、出力が1.7 Wの場合、直径約0.8 μm以上のスタイラスシャフトが加工可能であった。レーザ出力8 Wでの焦点位置におけるスポットサイズの理論値（ガウス形ビームで収差のないレンズの場合）は約37 μmであり、集光点の中心部の最高パワー密度は $1.4 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup>となる。出力3.3 Wおよび1.7 Wの場合の最高パワー密度はそれぞれ、 $6.0 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup>、 $3.1 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup>となる。

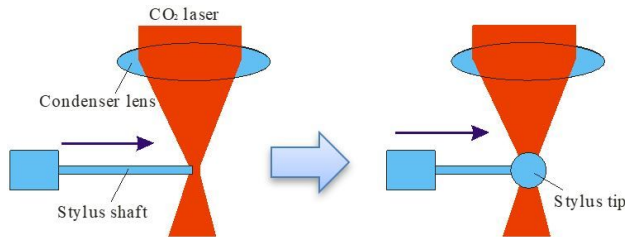


図5 先端球レーザ加工概略図

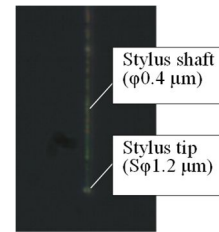


図6 レーザ加工後のスタイラス

(2) 微細壁面粗さ測定用スタイラス（先端が曲り鋭利なL型先鋭化スタイラス）の開発  
エッチングによる小径化と先鋭化

前節のスタイラスでは光ファイバを小径化し、先端部を球状化（直径1～数10μm）したものをスタイラスとして使用している。しかし、先端部の直径がマイクロメートルオーダの球状であるため、モルフォロジカルフィルタの影響により壁面等のナノメートルオーダの微細な粗さの測定は難しい。そこで、先端部をナノメートルオーダに先鋭化することにより、ナノメートルオーダの壁面粗さの測定を可能とするスタイラスの開発を行った。最初に先鋭化L字スタイラスの製作方法を説明する。今回用いたマルチモードの光ファイバはコアとクラッド層の2層

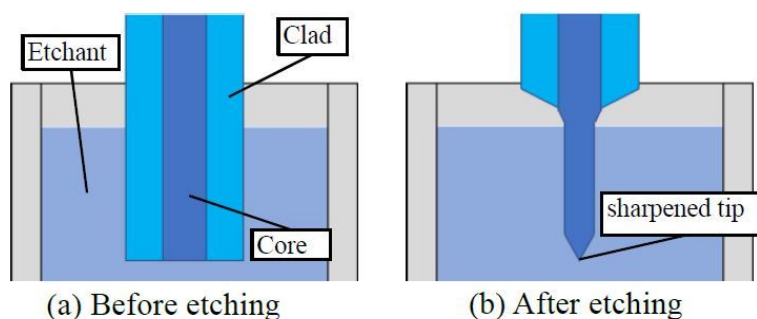
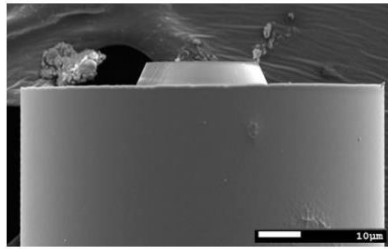
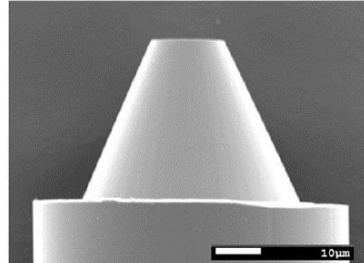


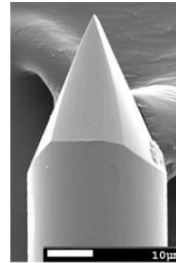
図7 ファイバ先端部のエッチングによる先鋭化



(a) 25 minutes



(b) 40 minutes



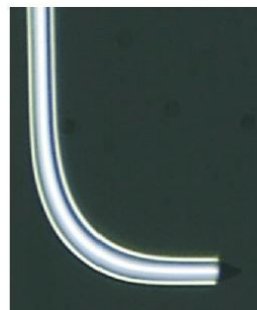
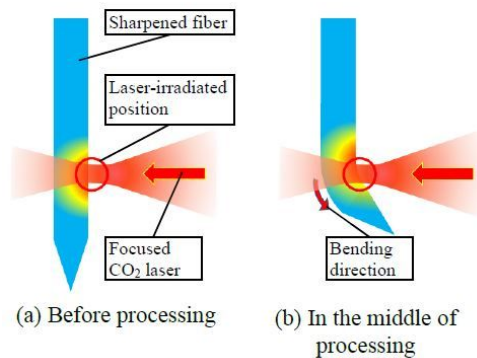
(c) 60 minutes

図8 エッチング時間経過による先鋭化の過程

構造となっている。この光ファイバの先端部を図7(a)の様にエッチング液に浸漬させる。すると、浸漬時間に応じて図7(b)の様に浸漬部が小径化すると共にコア部が先鋭化する。図8(a), (b), (c)にエッチング時間が25分、40分、60分の場合の光ファイバ先端の写真を示す。この先鋭化された先端部の角度はコアとクラッドの材質や直径によって決定される。エッチング後の先端部の角度を測定すると、今回用いたファイバの先端部の角度は約53度である。微細な表面粗さの谷部へ到達することができるように、かつ先端部の強度を考慮して、今回は直径約10 $\mu\text{m}$ 、先端角度約53度の先鋭化スタイラスを製作した。

#### CO<sub>2</sub> レーザ加工によるスタイラスシャフトのL字型加工方法

上記のエッチング工程によって小径化および先鋭化された光ファイバに対して、CO<sub>2</sub> レーザを用いた曲げ加工を行うことでL字スタイラスを製作する。まず図9(a)に示すように光ファイバに対して直交方向から、曲げたい位置に集束CO<sub>2</sub> レーザを照射する。すると、レーザ照射位置において図の左側より右側の方が高温(図9(b))となり溶融することでレーザ照射部位方向に曲げることが可能である。製作したスタイラスの写真を図9(c)に示す。



(c) L-shaped stylus with a sharp tip after processing

図9 CO<sub>2</sub> レーザ加工によるスタイラスシャフトのL型加工

次に、製作した先鋭化L字型スタイラスの有用性を評価するため、粗さ標準片 ( $R_y 1.7 \mu\text{m}$ ) の繰り返し測定を行った。標準片表面に図 10(a)に示すようにスタイラス先端を接触させ、そこから表面形状の溝部までスタイラス先端が入り込めるように図 10(b)の様にスタイラスを数  $\mu\text{m}$  たわませた。そのまま+z方向にスタイラスを走査し、表面形状をスキャン測定した。この時のX方向の先端変位量を測定し、この測定を10回繰り返した。図 11(a)に10回測定した形状を重ね合わせて表示した結果を示す。このグラフより、10回の測定によって得られた  $R_y$  の平均値は  $1.64\mu\text{m}$  であり、標準粗さ片の校正値と近い値であることを確認した。また、図 11(b)に10回の測定の平均値からの差を重ね合わせた結果を示す。この結果より、測定の繰り返し性は  $\pm 0.3\mu\text{m}$  以下であることが分かった。

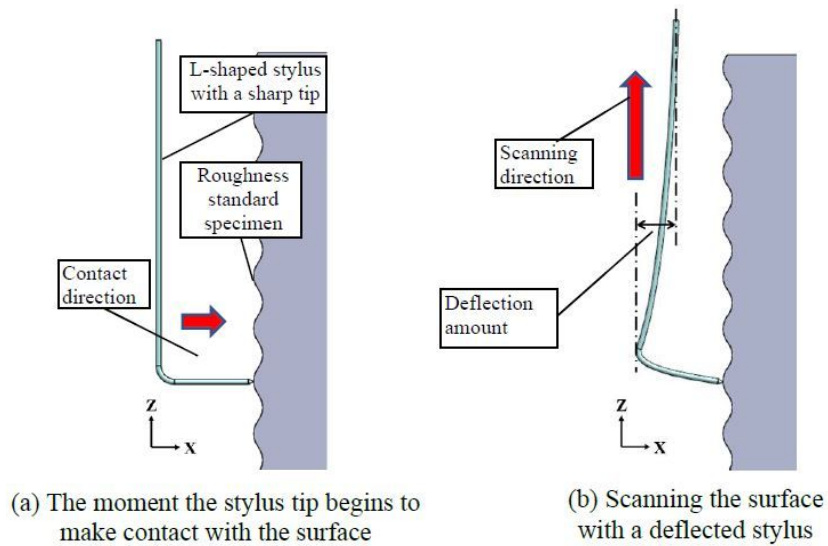


図 10 先鋭化L字型スタイラスを用いた壁面粗さの測定方法

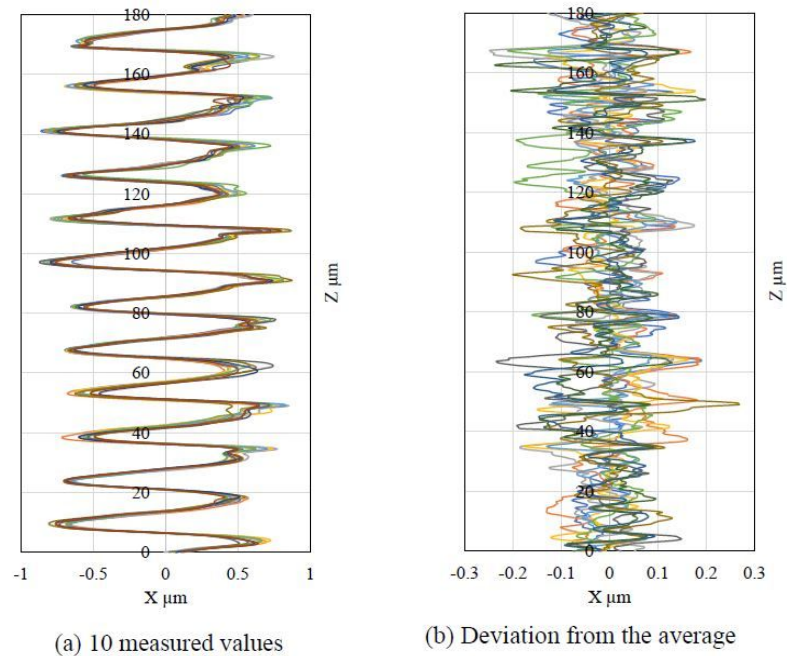


図 11 壁面粗さ (標準粗さ片) の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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, Katsuki Akio, Sajima Takao, Uchiyama Kosuke, Yoshida Ichiro, Hamano Yasuo, Honda Hiroshi	4. 巻 31
2. 論文標題 Development of measurement system for microstructures using an optical fiber probe: improvement of measurable region and depth	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 075902 ~ 075902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ab7efc	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, Katsuki Akio, Sajima Takao, Uchiyama Kosuke, Yoshida Ichiro, Hamano Yasuo, Honda Hiroshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Investigation of Factors Affecting Sensitivity Enhancement of an Optical Fiber Probe for Microstructure Measurement Using Oblique Incident Light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 3191 ~ 3191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10093191	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Uchiyama Kosuke, Hiroshi Murakami, Akio Katsuki, Takao Sajima, Yamamoto Takahiko, Nagata Ryosuke, Fujiyoshi Kunitaka
2. 発表標題 Fabrication of a fiber probe using a CO2 laser for microstructure measurement: High functionality and durability test
3. 学会等名 8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山力也, 村上洋, 甲木昭雄, 佐島隆生, 吉田一朗, 浜野康雄, 本田裕, 内山晃介
2. 発表標題 極小径光ファイバプローブを用いた微細三次元形状精度測定システムの開発 イオナイザの性能試験
3. 学会等名 2018年度精密工学会精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内山晃介, 村上洋, 甲木昭雄, 佐島隆生, 山本隆彦, 永田良介, 藤吉国孝
2. 発表標題 測定対象面への付着防止を目的としたスタイラス接触子への帯電防止および撥水コーティングの効果
3. 学会等名 2018年度精密工学会精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Murakami, Akio Katsuki, Takao Sajima, Kosuke Uchiyama, Takahiko Yamamoto, Ryosuke Nagata, Kunitaka Fujiyoshi
2. 発表標題 High functionality of an optical fiber stylus for micro metrology
3. 学会等名 Laser Metrology and Machine Performance XIII (Lamdmap2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Uchiyama Kosuke, Hiroshi Murakami, Akio Katsuki, Takao Sajima, Yamamoto Takahiko, Fujiyoshi Kunitaka
2. 発表標題 Improvement of an optical fiber stylus for microstructure and surface roughness measurement
3. 学会等名 euspen 's 20th International Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内山晃介, 村上洋, 甲木昭雄, 佐島隆生, 山本隆彦, 本田裕, 浜野康雄
2. 発表標題 微細形状測定用2段階弾性ヒンジ付きスタイラスの開発
3. 学会等名 2020年度精密工学会精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村上洋, 甲木昭雄, 佐島隆生, 内山晃介, 佐田雄大
2. 発表標題 ディープラーニングを用いた微細形状測定用光ファイバプローブの自由曲面接触検知手法の開発
3. 学会等名 2020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 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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