

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：32682

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870216

研究課題名(和文) レーザの多方向からの集中照射を利用した高水平分解能を有する光形状計測システム

研究課題名(英文) optical profile measurement system with the high horizontal resolution by the collecting laser irradiation

研究代表者

澤野 宏 (Sawano, Hiroshi)

明治大学・理工学部・講師

研究者番号：40514295

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、数10nmの高い水平分解能を有する光形状計測の実現を目的として、レーザの多方向からの集中照射による光形状計測システムを開発した。光学シミュレーションを行った結果、従来の光プローブと比較して、試料の形状に近い傾斜を持つ斜面が測定できており、従来の光プローブと比べて高い水平分解能を持つことを示した。また、原理確認実験の結果から、シミュレーションから決定したデータの処理方法により、形状の計測が可能であることを示した。以上の研究結果より、提案するレーザの多方向からの集中照射光プローブが水平分解能を向上させる方法として有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to realize the profile measurement by the optical probe with a high horizontal resolution, an optical profile measurement system by the collecting laser irradiation. Results of the optical simulation showed that the proposed optical probe had higher horizontal resolution compared with the conventional optical probe. In addition, experimental results confirmed that the profile calculation method determined from the simulation results can measure the specimen shape. From these results, it was shown that the proposed optical probe by the collecting laser irradiation is effective as a method of improving the horizontal resolution of optical probe.

研究分野：精密加工計測

キーワード：形状計測 光プローブ 水平分解能 集中照射 非点収差法 光線追跡法

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体製造装置や超精密切削・研削加工機等に対する加工要求が高度化し、ナノメートルオーダの精度の加工・計測・評価技術の実現が急務となっている。このような形状の計測には従来 SEM (Scanning Electron Microscopy) や SPM (Scanning Probing Microscopy) が用いられる。

SEM は試料に電子ビームを照射することで形状を取得する方法であり、高い垂直分解能および水平分解能を有する一方、試料が導電性を有する必要があるという問題点がある。

SPM は、原子間力(AFM)プローブやトンネル電流(STM)プローブを用いて形状を取得する方法である。研究代表者はAFMプローブやSTMプローブを用いて 1 nm スケールの垂直分解能を実現している。しかしながら、この計測方法はプローブを試測点に数 10 nm まで近づける必要があり、計測の際接触により試料に傷を付ける可能性がある。また、プローブのサイズが水平分解能に直接影響を及ぼすため、水平分解能の向上が困難である。

これに対して、光プローブによる形状計測方法は完全非接触な計測方法であり、試料に傷を付けることなく形状の計測が可能である。研究代表者は非点収差法を応用した光プロビングシステムを開発し、10 nm の垂直計測分解能を実現している。しかしながら、光プローブは水平分解能が低い問題点を有する。図 1 に示すように、光プローブには最小スポット径が存在し、水平分解能は最小スポット径と同程度になる。したがって、光源の波長を短くすることで水平分解能を向上させることはできるものの、波長 400 nm の短波長レーザーを光源に用いた場合でも水平分解能は 800 nm 程度である。そのため、光プローブを微細形状の計測に適用するためには、水平計測分解能を数 10 nm に向上させることが必要不可欠である。

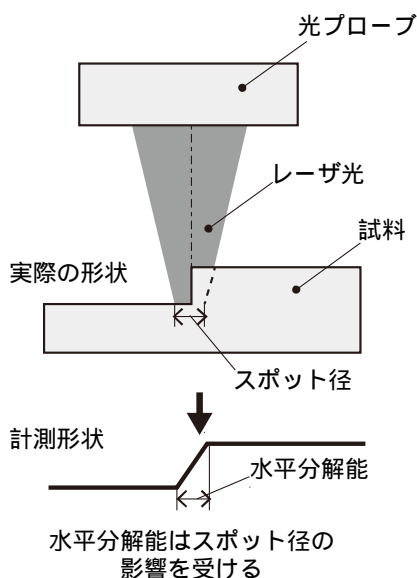


図 1 光プローブの水平分解能に関する問題点

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では、数 10 nm の高い水平分解能を有する光形状計測の実現を目的として、レーザーの多方向からの集中照射による光形状計測システムを開発する。

具体的には、図 2 に示すように計測面に対して、垂直方向および角度 からレーザーを照射し、得られた形状データを統合することで数 10 nm の水平分解能を実現する。

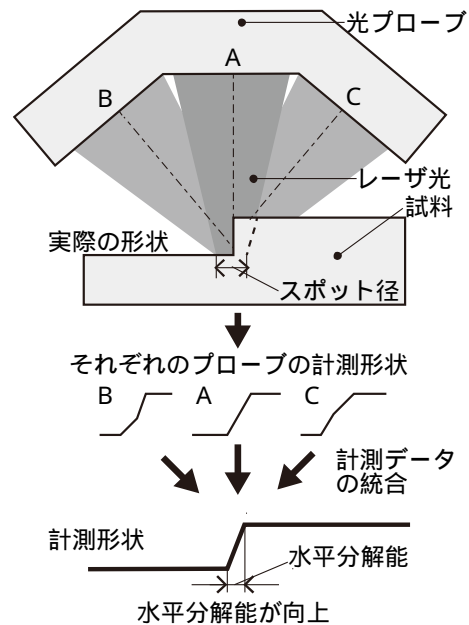


図 2 レーザーの多方向からの集中照射による水平分解能の向上

3. 研究の方法

本研究では、多方向からの集中照射により分解能を向上した光プローブの開発とその評価を行う。具体的には下記の研究項目を遂行する。

(1) 光学シミュレーションによる水平分解能の向上の実現可能性の確認および最適なデータ処理方法の決定

提案する計測方法の水平分解能向上に対する有用性を確認するために、光学シミュレーションをおこなう。また、データの処理方法と計測分解能の関係を解析し、最適なデータの処理方法を決定する。

(2) 原理確認実験装置の製作

405 nm のバイオレットレーザーを用いて 1 軸 3 方向からレーザー照射が可能な構成の原理確認用光プローブを試作する。また、1 軸ステージを用いて 1 軸の水平分解能の評価が可能な原理確認実験装置を構築する。

(3) 提案するレーザーの多方向からの集中照射光プローブの水平分解能向上に対する有用性の評価

原理確認実験装置、焦点検出回路基板、お

よびマルチ入力データ収集システムを用いて提案するレーザの多方向からの集中照射光プローブの水平分解能向上に対する有用性を評価する。

4. 研究成果

(1) 光学シミュレーションによる水平分解能の向上の実現可能性の確認および最適なデータ処理方法の決定

(a) 光学シミュレーションのための光学系

提案する計測方法の水平分解能向上に対する有用性を確認するために、1軸方向についての水平分解能の評価をする。この目的のため、図3に示すようにX方向について3方向からレーザを照射する光学系を構築する。

まず、レーザ光源で発生させたレーザ光を、ハーフミラーを用いて左右および中央の3方向の光路に分割し、ビームスプリッタ、 $\lambda/4$ 波長板を通過させる。左右の光路ではミラーを用いてレーザの照射角度を変化させる。左右の光路のレーザの照射角度は 45° とする。

次に対物レンズを用いてレーザ光を集光し、試料へと照射する。正面の光路では反射波は中央の対物レンズに戻り、左右の光路では反射波は反対側にある対物レンズに戻る。反射光は再度 $\lambda/4$ 波長板を通過することで偏光方向が変化し、ビームスプリッタで反射する。

中央の光路のレーザ光はシリンドリカルレンズを通した後4分割フォトダイオードで出力を検出し、左右の光路のレーザ光はシリンドリカルレンズを通さず直接4分割フォトダイオードで出力を検出する。

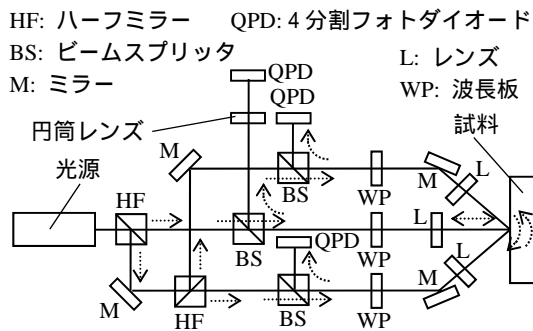


図3 光学系の構成

(b) 光学シミュレーションの方法

(a)で構成した光学系による形状測定シミュレーションを行った。シミュレーションには光線追跡法を用いる。

光線追跡法では、図4に示すように、光源から照射されたレーザをレーザの半径 d と角度 d で微小区間に区切り、微小区間の光線が測定点表面で反射し、ダイオードに照射するまでの挙動を計算する。

シミュレーションで用いる4分割フォトダイオードの寸法を図5に示す。

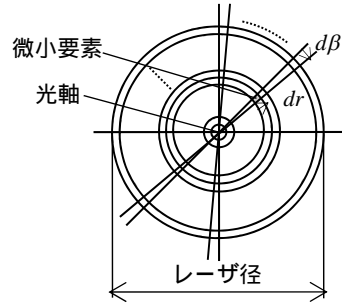


図4 レーザのシミュレーションモデル

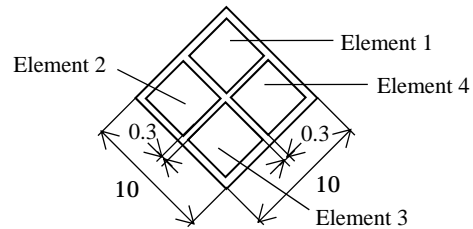


図5 4分割フォトダイオードのシミュレーションモデル

(c) 光学シミュレーション結果

光プローブの位置を固定し、試料の変位および傾きを変化させてシミュレーションをおこない、プローブ出力との関係を調べた。この結果を元に、データの処理方法を決定した。

まず、中央の光路では距離検出に非点収差法を適用し、4分割フォトダイオードの4つの素子で受光するレーザ光の強度 $P_{c1}, P_{c2}, P_{c3}, P_{c4}$ から出力信号 E_c を

$$E_c = \frac{(P_{c1} + P_{c3}) - (P_{c2} + P_{c4})}{P_{c1} + P_{c2} + P_{c3} + P_{c4}}$$

のように求めることにより、レンズから測定点までの距離を算出することができることを示した。次に4分割フォトダイオードの4つの素子で受光する右側の光路のレーザ強度 $P_{r1}, P_{r2}, P_{r3}, P_{r4}$ 、左側の光路のレーザ強度 $P_{l1}, P_{l2}, P_{l3}, P_{l4}$ から出力信号 E_p, E_s を

$$E_p = \frac{(P_{r2} - P_{r4}) - (P_{l2} - P_{l4})}{P_{r2} + P_{r4} + P_{l2} + P_{l4}}$$

$$E_s = \frac{(P_{r2} - P_{r4}) + (P_{l2} - P_{l4})}{P_{r2} + P_{r4} + P_{l2} + P_{l4}}$$

のように求めることにより、 E_p から測定点の変位を、 E_s から傾きをそれぞれ求めることができることを明らかにした。

さらに、段差形状と穴形状に対して、提案する光プローブによる形状測定シミュレーションを行った。その結果、提案する光プローブでは測定形状に乱れが生じており、変位と傾斜の分離方法の見直しや段差により遮られるレーザ光の補正方法の検討が必要で

あることが明らかとなった。しかしながら、従来の光プローブと比較して、試料の形状に近い傾斜を持つ斜面が測定できており、提案する光プローブが従来の光プローブと比べて高い水平分解能を持つことを示した。

(2) 原理確認実験装置の製作

提案するレーザの多方向からの集中照射光プローブの水平分解能向上に対する有用性を評価するために、図6に示す原理確認実験装置を製作した。光源には波長 405 nm の半導体レーザを用い、中央の光路および左右の光路の対物レンズにはそれぞれ焦点距離 30 mm, 60 mm の片凸レンズを用いた。また、光量の計測には4分割フォトダイオード(浜松フォトニクス社製 S4349)を用いた。光量はフォトダイオードによって電流値として検出され、自作の I-V 変換回路によって電圧値に変換、増幅した後、データロガーを用いて収集、記録した。

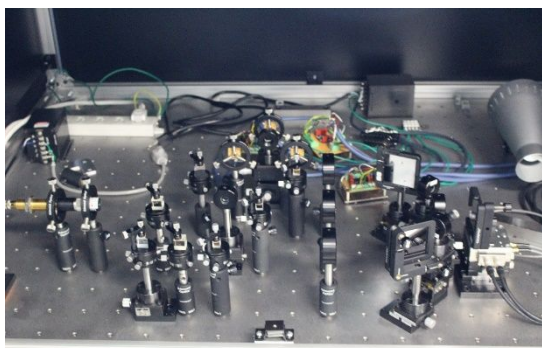


図6 原理確認実験装置の外観

(3) 提案するレーザの多方向からの集中照射光プローブの水平分解能向上に対する有用性の評価

(2)で製作した原理確認実験装置を使用して、提案するレーザの多方向からの集中照射光プローブの水平分解能向上に対する有用性を評価した。

ミラーを用いて試料の変位と出力の関係を調べた結果、中央の光路から求めた出力パラメータ E_c と左右の光路から求めた出力パラメータ E_p から試料の変位を求めることができ、シミュレーションから決定したデータの処理方法により、形状の計測が可能であることを示した。その一方で、左右の光路は中央の光路と比較して変位の計測範囲が狭いことが明らかとなった。このことから、左右の光プローブの出力と中央の光プローブの出力とを用いて、計測範囲を補完し、計測範囲と分解能の両方を向上させることが必要であることを明らかにした。

以上のシミュレーションおよび原理確認実験の結果より、提案するレーザの多方向からの集中照射光プローブが水平分解能を向

上させる方法として有効であることを示した。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤野 宏 (SAWANO, Hiroshi)
明治大学・理工学部・専任講師
研究者番号：40514295