

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656093

研究課題名(和文) バイオオプティクス形状計測のための静電気力遠接場ナノスコープに関する研究

研究課題名(英文) A new scanning electrostatic force microscope for noncontact surface profile measurement of micro-specimens of bio-optics

研究代表者

高 偉 (GAO, WEI)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70270816

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000 円、(間接経費) 930,000 円

研究成果の概要(和文)：電荷を蓄えられるプローブ探針を用いて、大気中の水分が試料表面に凝着することで生成されるナノスケール厚さの水膜などから発生する静電気力遠接場を高速・高感度に可視化することで探針・試料表面間の絶対距離を自律的に計測する手法を提案し、高アスペクト比で複雑な構造を持つマイクロバイオオプティクス用金型などの微細形状を表面の電気的特性に影響されずに安定して非接触に高精度計測可能な静電気力遠接場走査プローブ顕微鏡を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a new scanning electrostatic force microscope has been developed for noncontact surface profile measurement of micro-specimens of bio-optics. A charged conducting probe tip is oscillated by a tuning fork quartz crystal resonator. The probe tip is scanned over the sample surface by using an XY scanner in such a way that the frequency shift of the tuning fork oscillation, which corresponds to the electrostatic force gradient, is kept constant by controlling the probe Z position with a Z scanner. A dual height method is proposed to accurately obtain the tip to sample distances through removing the influence of the electric field distribution on the sample surface.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：計測 静電気力 プローブ顕微鏡 金型 バイオオプティクス 非接触 絶対距離 マイクロ

1. 研究開始当初の背景

光学素子分野では、従来の球面・非球面形状の高精度化のみならず、昆虫の複眼などの生体器官を模擬したマイクロバイオオプティクスの可能性に高い関心が寄せられている。複雑でアスペクト比の高い微細な構造を有するバイオオプティクスの実現には、その原型である生体器官の微細形状を非接触・高精度に計測することが必要である。また、これらの対象は材質が多様で表面の物性値が複雑に分布しているため、物性値に影響されず表面形状のみを抽出する事も求められる。

3次元微細形状計測には、従来から原子間力顕微鏡(Atomic force microscope: AFM)や走査型トンネル顕微鏡(Scanning tunneling microscope: STM)に代表される走査型プローブ顕微鏡(Scanning probe microscope: SPM)が利用されている。しかしながら、従来の SPM では原子間力やトンネル電流などの近接場の相互作用を利用するため、探針と試料表面間の距離を 1 nm 程度に保ちながら表面走査を行う必要がある。そのため、振動等の外乱に影響されやすく、又マイクロバイオオプティクスのような複雑形状の安定計測ができない。一方で、静電気力遠接場を利用して半導体ウェハなどの表面電荷分布を計測する例があるが、静電気力は試料物性値などに大きく影響されるため、形状計測には不向きという問題があった。

2. 研究の目的

マイクロバイオオプティクスの非接触・高精度形状計測のために、微弱静電気力遠距離場内において探針と試料間の微空間絶対距離を高精度に算出する静電気力遠接場ナノスコープを提案する。また探針と試料表面間距離を 100 nm の超長距離範囲内で高安定かつ高精度に維持した状態において、試料表面の物性値に影響されずに 3次元形状のみを抽出し計測できることを実証する。

3. 研究の方法

(1) 静電気力走査型プローブ顕微鏡の開発
本研究では、比較的大きな探針-試料間距離においても検出可能な遠接場信号である静電気力を利用した走査型静電気力遠接場プローブ顕微鏡(Scanning Electrostatic Force Microscope: SEFM)を開発した(図 1)。探針と試料表面間にバイアス電圧を印加して電位差を加えることにより、探針と試料表面間に作用する静電気力を発生させる。静電気力は原子間力と比較し遥かに大きく、探針-試料間距離が 100 nm を超えても十分に大きな信号が検出できるため、探針と試料間の距離の拡大に有効である。この静電気力を検出するために探針は音叉型の水晶振動子を用いたセンサに取り付けられる。探針は振動子の共振周波数で Z 方向に振動される。探針に静電気力が加わると振動子の振動周波数が変化する。振動子の周波数変化量は各種電子回路に

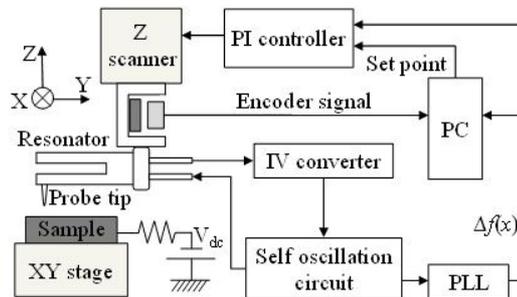


図 1 SEFM の設計と製作

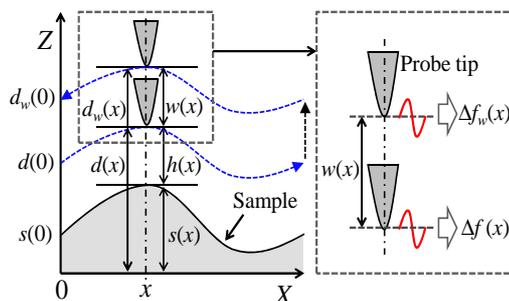


図 2 Dual height 法

より検出される。探針に加わる静電気力は探針-試料表面間距離の二乗に反比例するため、振動子の周波数変化量を一定に維持するように探針-試料間距離をフィードバック制御し走査することにより、探針の Z 方向変位から表面形状を測定することができる。探針-試料表面間距離は静電気力に基づいて制御され非接触状態を維持できるため安定した形状計測を実現できる。また静電気力を検出する探針と Z 方向スキャナ、探針の変位を計測するリニアステージは測定誤差(アッペ誤差)が最小となるように配置が調整され決定される。振動子の振動検出や周波数変化量検出のための電子回路や信号処理に用いるソフトウェアを作成する。

(2) 微空間絶対測距法の提案

静電気力による振動子の周波数変化量を一定に維持するように探針と試料間の距離をフィードバック制御した状態で走査し、探針の Z 方向変位を高精度に検出する事により、探針は試料表面から 100 nm 以上離れた非接触状態で試料表面の形状測定を行うことができる。しかしながら、試料表面の電荷は不均一な分布を持つため、測定中の電場は一様ではない。結果として、探針の軌跡と試料の表面形状とは完全には一致しない。そこで、同じ測定点に対して異なる 2 つの高さにおける静電気力を検出することにより、静電気力に含まれる探針-試料間距離以外の影響をキャンセルできる dual height 法(図 2)を用いて探針-試料表面間の絶対距離を算出する。順方

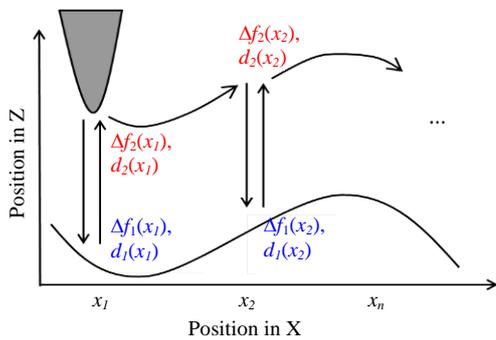


図3 垂直往復駆動方式

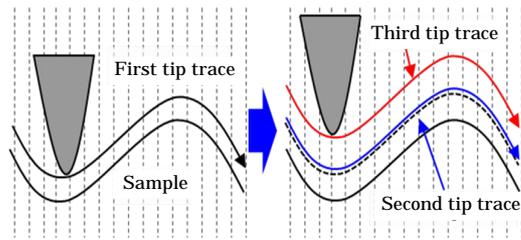


図4 オープンループ走査方式

向と逆方向で探針-試料表面間の高さを変えて往復走査を行う事により、同じ測定点における2つの静電気力を測定する。往復走査によって取得された探針の走査軌跡および走査中の振動子の周波数変化量から、各測定点における探針と試料表面間の絶対距離を算出するアルゴリズムについて検討し、AFM等の他の表面形状測定法と比較することで提案手法の妥当性について評価する。

(3) 3次元形状測定の高精度化

Dual height 法は探針の往復走査によって2つの走査軌跡と振動子周波数変化量を取得し、演算によって静電気力分布の影響を除去して表面形状のみを抽出できるが、その他の誤差要因については除去することが難しい。特に往復走査では、同一測定点における測定時刻の変化が比較的大きく異なるため、時間的に変化するドリフトの影響を受けやすい。その結果、dual height 法ではドリフトの影響を完全に除去することは困難であり、測定の高精度化は困難であり、得られた3次元形状は様々なドリフトの影響による誤差を含んでいる。温度変化による熱膨張や機械的なドリフト、振動子周波数ドリフト等のドリフトが3次元形状計測に与える誤差をシミュレーションにより解析し、測定結果に与える影響を評価する。またドリフトによる測定誤差を低減するための新たな探針走査モードとして垂直往復駆動方式(図3)およびオープンループ走査方式(図4)について検討し、誤差低減の効果を実験的に評価する。

4. 研究成果

(1)探針と試料表面との間に作用する静電気力遠接場を用いる走査型静電気力遠接場プローブ顕微鏡の原理を提案した。試料表面か

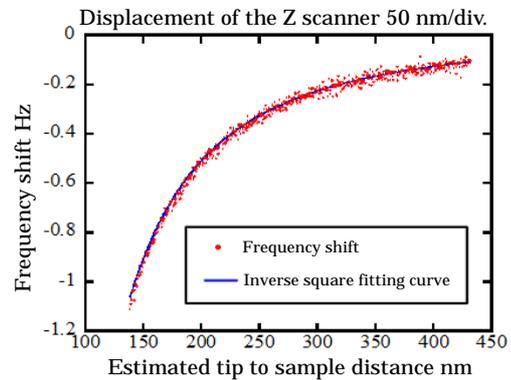
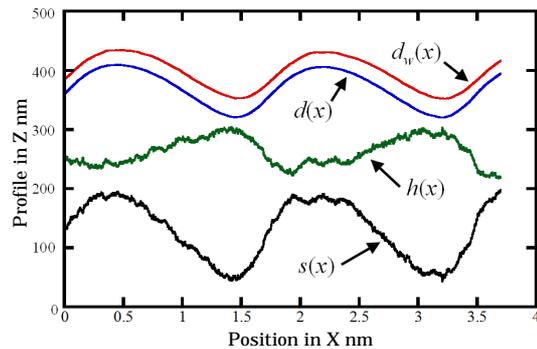
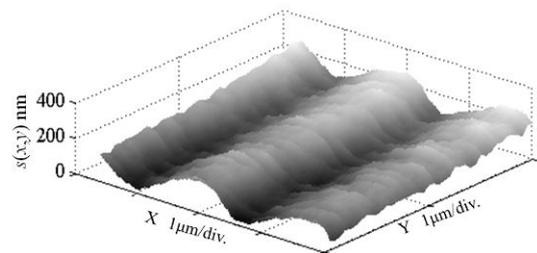


図5 周波数変化量-距離特性



(a) X方向断面の形状測定結果



(b) Dual height 法により得られた形状

図6 SEFMによる回折格子の形状測定

ら100 nm程度離れた高さにおいて静電気力を検出するために、水晶振動子を用いた静電気力検出用探針を作製した。図5に探針-試料間距離と振動子周波数変化量の関係を示す。図5の上横軸は探針のZ方向変位を示し、下横軸はdual height法により算出された探針-試料表面間の絶対距離を示している。これより、静電気力は試料表面から100 nm以上離れた高さにおいても探針により検出可能であることが確認された。

(2)試料表面の不均一な電荷分布の影響を除去するために、dual height法を用いて試料の表面形状の抽出を行った。図6はSEFMを用いた回折格子の形状計測の結果を示している。2回の探針走査軌跡および振動子周波数変化量に基づいて、探針と試料表面間の絶

対距離が算出できる。この探針-試料表面間距離と探針の走査軌跡より、試料表面のプロファイルを取得することが可能であった(図 6(a))。さらに走査中の探針と試料表面間の距離は 200 nm 程度離れた完全な非接触状態であることが確認された。また走査ラインを Y 方向に移動させていく事により、3 次元形状も取得である事が確認された(図 6(b))。形状像より得られた回折格子の振幅および周期は AFM により測定された結果とよく一致している事が確認された。形状測定中の探針は試料表面との非接触状態を維持したまま安定して静電気力を検出できることが実証された。また SEFM はナノメートルオーダーの分解能で表面形状を計測可能であることが確認された。

(3) SEFM の測定精度は静電気力の安定した検出だけではなく、測定システムのドリフトの影響も受けるため、ドリフトが形状測定結果に与える影響についてシミュレーションにより評価された。ドリフトの原因には主に熱膨張に起因する機械的なドリフトと振動子の周波数ドリフトが存在することが実験的に確認された。またこれらのドリフトは同一測定点における 2 回の測定時刻の差が大きくなるほど形状測定結果に大きな誤差として現れることが明らかになった。これらのドリフトによる影響を低減させる探針走査モードとして、垂直往復駆動方式とオープンループ走査方式を提案した。これらの改善した走査方式では、機械的なドリフトを 0.1%まで減少することが可能であり、周波数ドリフトによる影響も 26.6%まで減少できることが確認された。またこれらの走査モードは実際の表面形状計測においても適用可能であり、ドリフトによる誤差を著しく減少させ、測定精度の向上に貢献するものである事が実証された。

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 5 件)

Zhigang Jia, So Ito, Shigeaki Goto, Keiichiro Hosobuchi, Yuki Shimizu, Wei Gao, Drift reduction in a scanning electrostatic force microscope for surface profile measurement, Measurement Science and Technology, 査読有, 2014, In press.

So Ito, Zhigang Jia, Shigeaki Goto, Keiichiro Hosobuchi, Yuki Shimizu, Gaofa He, Wei Gao, An Electrostatic Force Probe for Surface Profile Measurement in Noncontact Condition, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol. 7, 2013-pp. 714-719.

Zhigang Jia, So Ito, Keiichiro Hosobuchi, Shigeaki Goto, Yuki Shimizu, Gaofa He, Wei Gao, Characterization of Electrostatic Force for Scanning Electrostatic Force Microscopy of Micro-structured Surface, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 査読有, 2013, Vol. 14, pp. 1543-1549.

DOI: 10.1007/s12541-013-0208-6

Wei Gao, Shigeaki Goto, Keiichiro Hosobuchi, So Ito, Yuki Shimizu, A noncontact scanning electrostatic force microscope for surface profile measurement, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 査読有, Vol. 61, 2012, pp. 471-474.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.097>

Zhigang Jia, Shigeaki Goto, Keiichiro Hosobuchi, So Ito, Yuki Shimizu, Wei Gao, Modeling and Analysis of a Scanning Electrostatic Force Microscope for Surface Profile Measurement, Proceedings of SPIE, 査読有, 2012, Vol. 8759, 2012, pp. 875914-1-8.

DOI: 10.1117/12.2014460

〔学会発表〕(計 12 件)

細瀨 啓一郎, 賈 志剛, 伊東 聡, 清水 裕樹, 高 偉, 微細形状測定のための非接触静電気力顕微鏡に関する研究 形状測定の拘束・高精度化のための走査方式の検討, 精密工学会 2014 年度春季大会学術講演会, 2014 年 3 月 18 20 日, 東京大学(東京)

賈 志剛, 細瀨 啓一郎, 伊東 聡, 清水 裕樹, 高 偉, 形状測定用静電気力顕微鏡の周波数ドリフトの補正に関する研究, 日本機械学会東北支部 第 49 期総会・講演会, 2014 年 3 月 14 日, 東北大学(仙台)

Zhigang Jia, Keiichiro Hosobuchi, So Ito, Yuki Shimizu, Wei Gao, Surface profile measurement of large amplitude micro-optics by using a scanning electrostatic force microscope, 精密工学会東北支部講演会, 2013 年 12 月 7 日, たざわこ芸術村(秋田)

So Ito, Zhigang Jia, Shigeaki Goto, Gaofa He, Keiichiro Hosobuchi, Yuki Shimizu, Wei Gao, Surface Profile Measurement of Micro-optics by using a Scanning Electrostatic Force Microscope, 5th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2013),

November 12-15, 2013, Taipei, Taiwan.

Keiichiro Hosobuchi, Zhigang Jia, So Ito, Yuki Shimizu, Wei Gao, Measurement of contact potential difference and material distribution by using an SEFM, The 7th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), November 7-8, 2013, Matsushima, Japan.

Gaofa He, Zhigang Jia, So Ito, Yuki Shimizu, Wei Gao, Experiment of Polarization Forces in Scanning Electrostatic Force Microscopy for Measuring Surface Profile of Dielectric, The 7th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), November 7-8, 2013, Matsushima, Japan.

Zhigang Jia, Gaofa He, Shigeaki Goto, Keiichiro Hosobuchi, So Ito, Yuki Shimizu, Wei Gao, Precision Positioning of a Long-stroke Scanning Electrostatic Force Probe for Profile Measurement of Large Amplitude Micro-structured Surface, The 7th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), November 7-8, 2013, Matsushima, Japan.

Gaofa He, Zhigang Jia, So Ito, Yuki Shimizu, Wei Gao, Analysis of the forces in electrostatic force microscopy for profile measurement of micro-structured surface of dielectric, 6th International Symposium of Precision Mechanical Measurement (ISPM2013), August 8-12, 2013, Guizhou, China.

Wei Gao, Surface form measurement of micro-optics, International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology, April 9, 2013, Singapore EXPO, Singapore.

細瀨 啓一郎, 賈 志剛, 伊東 聡, 清水 裕樹, 何 高法, 高 偉, 三次元微細形状測定のための静電気力顕微鏡に関する研究, 日本機械学会東北支部 第48期総会・講演会, 2013年3月15日, 東北大学(仙台)

Zhigang Jia, Shigeaki Goto, Keiichiro Hosobuchi, So Ito, Yuki Shimizu, Wei Gao, A scanning electrostatic force microscope for surface profile measurement, 2012年度精密工学会東北支部学術講演会, 2012年12月1日, 山形大学(山形)

Wei Gao, Measurement of

micro-structures, 2012 Taiwan AOI Forum, November 1, 2012, Hsinchu, Taiwan.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nano.mech.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高 偉 (GAO, WEI)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70270816

(2) 研究分担者

清水 裕樹 (SHIMIZU, YUKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70606384

(3) 連携研究者

()

研究者番号: