研 究

レーザ干渉計を応用した非接触微細形状測定装置*

谷 村 吉 久** 豊 田 幸 司**

Non-contact Measuring Instrument of
Micro-shapes with Laser
Interferometer

Yoshihisa TANIMURA and Kouji TOYODA

Non-contact measuring instrument with laser interferometer is described in this paper, which can measure the coordinates of micro-shapes on a machined surface. When laser beam in the instrument is focused by an objective lens of $40\times$ and N.A. 0.65, the measurable height of micro-shapes is less than $3.5\mu\text{m}$ as a main performance and the measurable inclination is less than $\pm 5.2^\circ$. The linearity is kept between lateral (X -axis) and vertical (Z -axis) displacements. By using the instru-

ment, the following shapes can be measured: cross section of roughness comparison specimen, micro-step height on a silicon wafer and cross section of scratched grooves on aluminum. Their results are compared with the results measured by stylus instrument, interference microscope and scanning electron microscope. The measurement accuracy of the present instrument can be estimated better than $\pm 5\text{ nm}$ in the scattered range of measured values.

Key words: non-contact measurement, micro-shapes, laser interferometer, objective lens, scratched grooves, micro-step height, measurable height, measurable inclination

1. 緒 言

近年の目ざましい精密加工技術の発展により、表面に微細な形状を加工した製品や部品が増えてきた。LSI パターン、回折格子、光ディスク、粗さ標準片などの表面は規則的な微細形状をもった代表例といえる。またシリコンウエハにエッチングして作った段差やアルミニウム表面の溝状の傷の断面、銅材表面を超精密加工した鏡面なども微細形状といえる。これらの製品や部品の多くは商品として仕上っており、傷をつけないで表面の微細形状を詳細に測定できることが望まれる。測定した結果を次の加工や測定の際の参考データとして役立てたり、商品取引上で必要なデータとして利用することも多い。

現在、微細形状測定器として、①触針式粗さ測定器、②二光線干渉顕微鏡、③走査形電子顕微鏡 (SEM) などがある。それぞれ一長一短があり、測定対象に応じて使い分けなければならない。これらの測定器のもつ長所、短所について、微小な凸凹をもつ試料表面の測定を行い、本研究の非接触微細形状測定装置による結果と比較しながら明らかにする。

本研究の装置は Sommargren¹⁾ の装置と似ているが、縦と横の座標を同時にレーザ干渉計からの数値で直接測定する点で異なる。以下に本装置の構成とその性能を示し、各種の試料について測定した結果を報告する。

2. 測定原理と構成

本研究の装置はヘテロダイン方式のレーザ干渉計により、横方向 (X 軸) と縦方向 (Z 軸又は高さ方向) の微細形状の座標を数値で直接測定するものである。その感度は X 軸が $\lambda/4$ ($0.16\mu\text{m}$) 又は $\lambda/40$ ($0.016\mu\text{m}$)、 Z 軸が $\lambda/400$ (1.6 nm) である。図 1 は試作した装置の構成図及び外観の写真である。波長 $0.633\mu\text{m}$ の He-Ne レーザは、ビームスプリッタにより反射光 : 透過光の強度比が 1:3 として分割され、それぞれ X 軸及び Z 軸の干渉計の入射光となる。 X 軸の干渉計は X 軸ステージの横方向の移動量を測定するためにある。 Z 軸の干渉計は表面の微細形状の高さ又は深さを測定するためにあり、40 倍、N.A. 0.65 の対物レンズで絞って被測定面に投光し、その反射光が干渉計の信号光となる。 Z 軸の干渉計は $1/4$ 波長板とビームスプリッタの偏光特性を利用した単光路の干渉計である。

Z 軸の干渉計の奥には、これと一体で動く顕微鏡 (100 倍) が取り付けられている。これは測定開始前に、あらかじめ試料の測定箇所を選択するためにあり、 Z 軸の干渉計と交互にスライドして切り換えることができる。

3. 測定器の基本性能

試作した測定器の基本性能を確認するため、次の特性を調べた。対物レンズは 40 倍、N.A. 0.65 のものである。

3.1 測定可能な微細形状の高さと装置の線形性

* 原稿受付 昭和 59 年 4 月 26 日。昭和 58 年度精機学会春季大会学術講演会 (昭和 58 年 3 月 28 日) にて発表

** 正 会 員 計量研究所 (茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4)

Fig. 1 Non-contact measuring instrument to measure micro-shapes

理想に近い平面をもっているシリコンウエハをステージ上に固定し、任意の傾きを与えてステージを送ったときの X 軸と Z 軸の座標値を調べ、図 2 の結果を得た。図 2 の結果によれば、測定可能な高さの範囲は、試料の傾きによらず、ほぼ一定で $3.5 \mu\text{m}$ である。レンズの焦

Fig. 2 Measurable height of a specimen along Z -axis to X -axis displacement and linearity between both axes
Object lens: $40\times$, N. A. 0.65

点深度を、光軸上の強度が焦点での強度の 80% になる範囲、と定義すれば、 $1.5 \mu\text{m}$ となる。従って計算上の焦点深度よりも 2 倍以上広い測定可能な範囲が得られることになる。

X 軸方向の移動量に対し、 Z 軸座標値はほぼ直線的に比例して変化することから、両者の間には線形性が保たれ、形状測定が可能である。直線からのずれは $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 程度ある。この変動は主に X 軸方向の微動台の運動性能による。

3.2 測定可能な微細形状の傾き

ねじの有効径測定用三針は理想に近い円筒形状を有する。この円筒形状の一部を利用し、測定可能な傾きの範囲を調べ、図 3 の結果を得た。

試料とした円筒の直径は称呼寸法で $\phi 1.0227 \text{ mm}$ である。傾きがある範囲を越えると、測定可能な高さの範囲 ($3.5 \mu\text{m}$ 以下) にあるにもかかわらず、信号光が検出されず、座標測定が不可能となる。結果から計算して、測定可能な傾きの限界は約 $\pm 5.2^\circ$ である。直径の小さい $\phi 0.5196 \mu\text{m}$ の試料についても同様の測定を

行ったが、測定可能な傾きの範囲は同じであった。

3.3 X ステージの運動性能

試料を X 軸方向へ移動して測定するので、 X 軸ステージの運動性能は重要である。平面度のよいシリコンウエハを水平に調整したうえで X 軸ステージを約 $0.3 \mu\text{m/s}$ の速度で $100 \mu\text{m}$ 移動する。このとき Z 軸座標の変化を往復で測定し、図 4 の結果を得た。 X 軸ステージの往きと帰りで高さ方向に 8 nm の差が見られ、 X ステージの

Fig. 3 Measurable inclination of a specimen to X -axis displacement
A part of cylindrical surface of 1.023 mm in diameter is applied to the measurement.

Fig. 4 Movement characteristic of X stage
Reference surface; silicon wafer

(a) By the present instrument
Objective lens; 40 $\times$, N. A. 0.65

(b) By a stylus instrument

Fig. 5 Cross section of a roughness comparison specimen

運動の履歴特性を表す。上下の変動は往復とも 5 nm 程度ある。X 軸ステージを 5 $\mu\text{m}/\text{s}$ の速度で 1.2 mm 移動した場合には往復の運動で 15 nm の履歴変動が見られる。

4. 微細形状の測定例

いくつかの試料についてその表面の微細形状を本研究の装置により測定し、触針式粗さ測定器、二光線干渉顕微鏡、走査形電子顕微鏡 (SEM) による結果と比較した。

4.1 周期的な微細形状

図 5 は比較用表面粗さ標準片の断面形状を測定した結果である。図 5 (a) は本研究の装置による結果、同図 (b) は触針式粗さ測定器による結果である。(a) の結果には高さ方向の詳細な変化が記録されているが、(b) の結果は全体に滑らかである。ただし両結果は、試料表面の互いに異なる場所を測定し、得られたものである。

4.2 段差形状

図 6 は、シリコンウエハの表面をエッチング加工して作った約 0.1 μm の段差をもつ試料について、触針式粗さ測定器及び二光線干渉顕微鏡で測定した結果と比較したものである。二光線干渉顕微鏡による結果では、横方向の分解能不足から、あたかも急峻な段差をもっているかのように観察される。また横方向には、信頼できる長さの目盛がなく、別に長さの校正が必要である。

4.3 溝状の傷の形状

(a) By the present instrument
Objective lens; 40 $\times$, N. A. 0.65

(b) By a stylus instrument

(c) By an interference microscope

Fig. 6 Shape of the micro-step on a silicon wafer surface

アルミニウムなどの柔らかい材料表面をダイヤモンドの触針でなぞると傷がつく。その溝状の傷の断面形状を本研究の装置で測定したところ、図 7 (a) の結果を得た。この傷は光学フラット上のアルミニウム蒸着層を先端半径 2 μm と称するダイヤモンド触針 (測定圧 0.7 mN) でなぞって作られたものである。少なくとも 3 回以上繰り返して作られたものであり、傷はより深く、より広くなり、また少しずつなぞる位置がずれた履歴がうかがえる。

比較のため、図 7 (b) に同じ試料を走査形電子顕微鏡で観察した結果を示す。写真の濃淡像は二次電子によるものである。画面上の信号波形はこの二次電子による濃淡像の電気信号であり、図 7 (a) と似てはいるが、本質的に断面形状を表すものではない。また溝の深さ方向 (縦方向) には目盛がなく、横方向の 10 μm マーカの正確さも $\pm 5\%$ 程度といわれている。

同じ試料を二光線干渉顕微鏡で観察すると、図 7 (c) のようになる。横方向 (溝に直角方向) には高分解能が得られないため、詳細な断面形状の測定はできない。

図 8 は硬い材料といわれているシリコンウエハの表面でさえ、数回ダイヤモンド触針でなぞれば溝ができてしまう、という例である。約 13 μm の間隔で 2 条の傷が見られる。右の深い方の溝は約 0.3 mN の測定力で 7~8

(a) By the present instrument

(b) By SEM

The photograph shows a secondary electron image and a wave form of the intensity.

(c) By an interference microscope (Linnik type)
Fig. 7 Cross section of a scratched groove made on aluminum layer

Objective lens; 100 $\times$, N. A. 0.9, Total magnification; 640 $\times$, Light source; Na 589 nm

Fig. 8 Cross section of two scratched grooves on a silicon wafer

回繰り返したぞってできたもので、約 15 nm の深さがあり、左の溝は数回なぞってできたもので、約 7 nm の深さが観察される。

4.4 超精密加工した銅の表面粗さ

図 9 は、超精密加工して仕上げた銅の表面粗さについて、本研究の装置で測定した結果 (a) と触針式粗さ測定器で測定した結果 (b) を比較して示したものである。いずれの測定結果にも 0.5 mm の間隔で 20~30 nm の加

(a) By the present instrument

(b) By a stylus instrument

Fig. 9 Roughness of a copper material surface manufactured by a mirror cutting machine tool

Table 1 Measurable height and inclination of micro-shapes by different kinds of objective lenses

Lens (N. A.)	Depth of focus μm	Measurable height μm	Measurable inclination
10 $\times$ (0.25)	9.8	55	$\pm 5.1^\circ$
20 $\times$ (0.40)	3.6	10	$\pm 5.4^\circ$
40 $\times$ (0.65)	1.1	3.5	$\pm 5.2^\circ$
60 $\times$ (0.80)	0.6	1.5	$\pm 5.5^\circ$

工時の送りマークと思われる段差が見受けられる。互いに試料表面の測定箇所が異なるので一致した波形は得られていない。

5. 考 察

5.1 測定可能な高さや装置の線形性について

微細形状の測定可能な高さは試料面の傾きによらず、対物レンズの焦点深度に依存する。倍率 40 倍、N. A. 0.65 の対物レンズの場合、計算上の焦点深度 1.5 μm より 2 倍以上広い範囲で測定可能である。

対物レンズを種々変えると測定可能な高さの範囲が変わる。実験によれば表 1 のように、高倍率になるにつれ、測定可能な高さの範囲は狭くなる。逆に、傾きの範囲は広がる傾向にあるが、明確ではない。

以上の結果より、倍率 60~10 倍の対物レンズに対し、測定可能な高さの範囲は 1.5~55 μm 、傾きの範囲は $\pm 5^\circ$ ~ $\pm 6^\circ$ といえる。表面の凸凹がこの範囲にあり、反射光強度が十分であれば、一般の機械加工した表面の粗さ測定が可能である。

5.2 横方向の分解能

試料表面を照明するレーザは対物レンズの焦点近傍で有限の広がりをもち、その直径は 40 倍の対物レンズの場合、エアリーディスクで $1.22\lambda/\text{N. A.}$ から約 1.2 μm と

なる。縦方向（高さ）の座標値には、この範囲の表面形状が何らかの寄与していると考えられる。X 軸の干渉計の感度は 16 nm ($\lambda/40$) と高いが、実際にはこのエアリーディスクで制限される。しかし、レーザの強度分布がエアリーディスク内で一様ではなく、試料表面からの反射光のうち、中心部分の比較的強い部分だけが干渉信号として有効に働くと思われる。従ってエアリーディスクの直径より実際上の横分解能は高い、と考えられる。

5.3 微動とクランプ

本研究に使用した X 軸の微動ステージは市販の V 溝と鋼球による機構で案内されている。図 4 に示すように、微動送りの性能はこの案内と駆動機構によって左右される。

nm オーダの微細形状を再現性よく測定するには、さらに高精度のステージに交換する必要がある。Z 軸の調整も、正しい形状測定を行う観点から、対物レンズの超微動とクランプが確実に行える機構を採用する必要がある。

6. 結 言

本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) レーザ干渉計を応用した非接触微細形状測定装置を試作した。その基本的性能として、測定可能な微細形状の高さと傾きの範囲及び横変位に対する縦変位の関係を調べ、装置の線形性を確かめた。倍率 40 倍、N. A. 0.65 の対物レンズの場合、試料面の凸凹が $3.5 \mu\text{m}$ 以下、傾きが $\pm 5.2^\circ$ 以下で反射光が十分に

に得られる面であれば、微細形状が測定できる。

- (2) 比較用粗さ標準片の断面形状、シリコンウエハ上の段差、アルミニウム蒸着面上のひっかけ傷の断面形状、超精密加工した銅表面の粗さなどを本研究の装置で測定した。各測定結果を触針式粗さ測定器、二光線干渉顕微鏡及び走査形電子顕微鏡で測定した結果とそれぞれ比較対比し、従来からの測定器の得失を検討した。本研究の装置は特に銅やアルミニウムなどの柔らかい材料表面の微細形状を非接触測定できるものとして役立つ。
- (3) いくつかの試料表面の微細形状を測定した結果から判断し、本研究の装置の測定精度は、測定値のばらつきで $\pm 5 \text{ nm}$ と見積ることができる。また、縦横の座標測定における非線形性は $\pm 0.02 \mu\text{m}$ といえる。

謝 辞

本研究の遂行において、計量研究所・栗田良春課長の御支援をいただいた。また同所・酒井泉氏（現在、退職）並びに石川県工業試験場・坂谷勝明氏の熱心な協力があった。さらに顕微鏡写真ではシベル機械(株)の塩見氏の協力を得た。ここに記して謝意を呈する。

参 考 文 献

- (1) G. E. Sommargren: Optical Heterodyne Profilometry, Appl. Opt., 20, 4, (1981) 610.

情 報

通産省、セラミックスガスタービンに 130 億円投入
通産省は次世代技術として注目されているセラミックを使ったガスタービンエンジンの開発・実用化を目指す方針を固めた。セラミックスガスタービンは自動車の燃料効率を現行の水準から 20~30% も飛躍的に向上させ、次代の自動車エンジンの主流になるといわれ、米国の GM 社やフォード社、さらに DOE（エネルギー省）が 80 年代後半の実用化に向けて開発研究に力を入れている。こうしたことから、通産省では 60 年度のムーンライト（省エネルギー技術開発プロジェクト）計画の新規テーマにセラミックスガスタービンを取り上げ、7 年計

画で 130 億円の開発費を投じ、自動車および産業用の 2 機種の開発に取り組むことにしたものである。

ところで、セラミックスガスタービンについて通産省工業技術院の調査委員会（委員長・松木正勝氏＝日大教授）は、このほど 1 年間かけて行った調査報告書をまとめた。これはセラミックスガスタービンの可能性について調べたものだが、それによるとガスタービンの実用化により自動車の燃料消費効率を現行水準から 20~30% 向上させ、次代の自動車エンジンの主流になるとしている。（p. 1664 へ続く）