



光学定数の表面形状測定に与える影響

土井 琢磨・豊田 幸司・谷村 吉久

計量研究所 〒305 つくば市梅園 1-1-4

(1991年4月19日受付, 1991年7月8日受理)

Influence of Optical Constants of Sample on Surface Profile Measurement

Takuma DOI, Kouji TOYODA and Yosihisa TANIMURA

National Research Laboratory of Metrology,
1-1-4, Umezono, Tsukuba 305

(Received April 19, 1991; Accepted July 8, 1991)

It is experimentally confirmed that the inhomogeneity of optical constants (n, k) in objects makes errors in optical surface profilometry. The sample consisting of two kinds of metals in the same plane is made and its surface profile is measured by interferometry. In spite of the flat surface, the virtual step height (max. value=33 nm) is measured at the boundary of two adjacent metals. The difference of optical constants between metals causes phase difference on reflection and gives rise to this step height. In combination among metals of Au, Al and Cr, this step height is measured and compared with the theoretical value.

1. 緒 言

近年、半導体素子の高集積度化、X線光学素子の開発、光電気素子の開発等の場面で、ナノメートルオーダーの加工がなされている。このような微細な表面形状の測定は、触針、光、電子線、STM等によって行われるが、非接触、非破壊、高速、高精度などの特徴より光計測が最も多く用いられる。また、その分解能もヘテロダイン干渉法、縞走査法など位相を正しく読みとる技術を利用した干渉測定法によって、ナノメートル以下に及んでいる^{1,2)}。一方、光は金属など複素屈折率を持つ試料での反射において位相変化を受けることが知られている³⁾。この値を干渉測長における長さに換算すると、大きなもので数十ナノメートルに及ぶ。したがって、複素屈折率の変化する試料の微細な表面形状測定では、光の位相変化は見逃すことのできない誤差要因となる。このような位相変化は、ブロックゲージの測定において補助ゲージを用いた方法で補正されるが⁴⁾、その補正値はリンギングを一樣に行うことが困難であるため、一般性がなくナノメートルオーダーでの信頼性に欠ける⁵⁾。そこ

で、位相変化を引き起こす試料の複素屈折率による測定誤差を明らかにし、光学定数の形状測定に与える影響を補正する必要がある⁶⁾。

本報告では、同一平面上に異なる金属を蒸着することによって作られた試料の測定より、試料の複素屈折率の違いによる位相変化の差を測定し、理論値と比較した。

2. 光の位相変化

光が屈折率 n_0 を持つ透明な物質から金属のような複素屈折率 $n_1 - ik_1$ を持つ物質に入射する場合、その界面で光は反射しその反射光は位相変化を受ける。このときの位相変化 ρ と反射率 R はフレネル反射の公式より計算され、

$$\rho = \tan^{-1} \{2n_0k_1 / (n_0^2 - n_1^2 - k_1^2)\} \quad (1)$$

$$R = \{(n_0 - n_1)^2 + k_1^2\} / \{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2\} \quad (2)$$

で表わされる³⁾。試料が固体である場合、位相変化 ρ の符号は負であり位相が遅れることを示す。以後の議論においては ρ は(1)式の絶対値を示すものとし、 ρ の大きさだけ位相が遅れるものとして取り扱う。

この現象は、光波干渉による表面形状測定において実

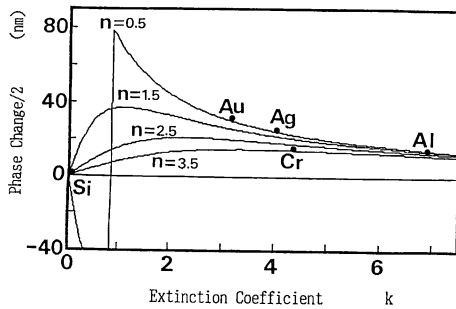


Fig. 1 Half value of the phase change of light on reflection calculated from n (refractive index) and k (extinction coefficient).

際、試料表面より $\rho/2$ だけ中で反射されたことと等価となる。したがって、干渉による形状測定において、光の位相変化は試料が均一である場合問題にならないが、試料の複素屈折率が試料表面上で変化した場合、 $\rho/2$ の差だけの測定誤差を引き起こす。空気 ($n_0=1$) から入射した光が各種の物質で反射される時の位相変化 $\rho/2$ を計算し **Fig. 1** に示す。物質間の $\rho/2$ の差は金属と誘電体の間で最も大きく 50 nm にも及ぶ。

3. 光学式形状測定装置

測定に用いた表面形状測定装置の概略図を **Fig. 2** に示す⁷⁾。この装置はゼーマンレーザーを用いたヘテロダイン干渉により形状を求める。ゼーマンレーザーは、偏光面が互いに直交し周波数の約 1.7 MHz だけ異なる二つの光を発振する。この二つの光は、偏光ビームスプリッターにより f_2 の周波数を持つ参照光と f_1 の周波数を持つ測定光に分けられ、それぞれ、参照用コーナキューブと試料に向かう。試料に向かった光は対物レンズ ($\times 20$, $NA=0.4$) によって絞られ、試料上に集光さ

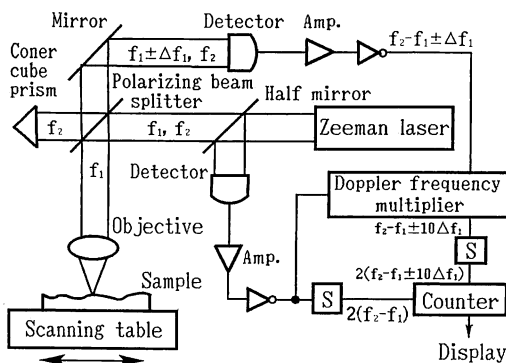


Fig. 2 Schematic diagram of surface profiling instrument.

れる。試料ステージはステッピングモーターと歯車による減速機構によって最小 0.01 μm 間隔で走査される。走査される試料が凹凸を持つために、測定光の反射位置が垂直方向に速度 v で変化したとすると、反射光はドップラーシフト $\Delta f_1 = 2vf_1/c$ (c : 光速) を受ける。この光が再び偏光ビームスプリッターで参照光と合わされ、 $f_2 - f_1 \pm \Delta f_1$ のビート光を生じる。また、ゼーマンレーザーを出た直後のビームスプリッターによってドップラーシフトを受けていない基準ビート光 $f_2 - f_1$ が取り出される。フォトディテクタで電気信号に変えられた各ビート信号は、飽和状態まで増幅することにより信号の立ち上がりを急峻にされた後、インバータ回路を経てパルス信号に変換される。二つのパルス信号は、PLL (phase-locked loop) を利用した差周波数通倍器に導かれ、測定用パルス信号のドップラーシフト Δf_1 のみ 10 倍される。微分回路によって、この信号と基準パルス信号の周波数が 2 倍され、カウンタによってその差 $20\Delta f_1$ のみが積算計数される。カウンタの計数值 I は、

$$I = \int 20\Delta f_1 dt = 40f_1/c \int v dt = 40\Delta h/\lambda \quad (3)$$

Δh : 試料の高さの変化量

λ : 波長 (633 nm)

で表わされる。したがって、試料の高さの変化量 Δh は計数值 I に $\lambda/40$ を乗算することによって得られる。この装置では、パルス間を電気的に 1/10 に挿し、分解能 $\lambda/400 = 1.6 \text{ nm}$ で試料の高さが求められる。

4. 実験結果とその検討

4.1 測定試料

Fig. 3 は試料の形状の影響を受けずに光の位相変化の差を測定するために作製した試料である。 $\lambda/4$ の面精度を持つ 20 mm 角の平行平面ガラス基板の片面にマスクを通して金をラインパターンに蒸着した後、全面にアルミを蒸着したものである。各金属は光学的振舞いが基板として扱えるだけの膜厚 ($> 0.2 \mu\text{m}$) を持っている。ガラス-金属境界面はガラス平面にならっているので平

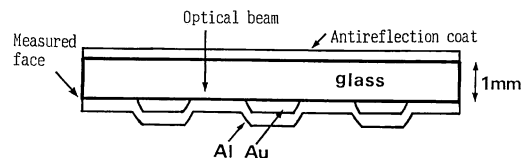


Fig. 3 Cross section of the sample to measure the phase difference on reflection from two kinds of metals. Boundary between glass and metals is measured.

面と考えることができるが、金属の屈折率は蒸着金属の境界で階段状に変化する。したがって、ガラス裏面よりパターンと垂直方向にガラス-金属境界面の形状を干渉測定することにより、反射物質の複素屈折率による光の位相変化の差のみを測定することができる。ガラス-金属境界面以外からの信号であるガラス裏面での反射光とガラス内での多重干渉を防ぐ目的で、ガラス裏面には反射率 0.4% 以下の反射防止膜が施されている。

4.2 測定結果と検討

金-ガラス境界面を測定することによって得られた単一金属面の形状測定結果を Fig. 4(a)に示す。平面からのずれは、0.5 mm の走査範囲において 13 nm 以下である。この値にはガラス基板の表面粗さ、うねり、試料走査の誤差が含まれており、金属-ガラス境界面は十分平面と見なすことができる。Fig. 4(b)は金とアルミの蒸着試料をパターンと垂直に測定した結果を示す。光の反射する物質が金からアルミに変化する点で明らかに屈折率の変化によると考えられる 25 nm の見かけ上の

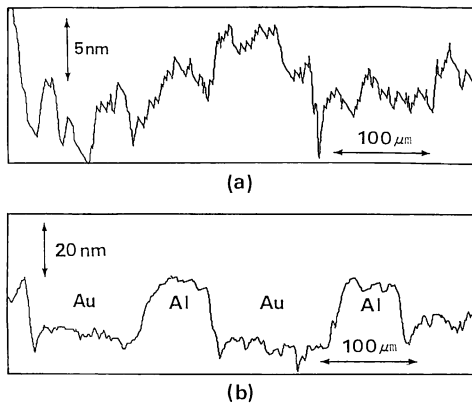


Fig. 4 Results of profiling the boundary between glass and metals. (a) Boundary between glass and evaporated Au. Indicating smoothness of the glass surface. (b) Boundary between glass and evaporated metals (Au or Al). Indicating the virtual step height.

段差が測定される。金、アルミ、クロムの3種の金属の組合せで同様の試料を作製し、測定を行った。6本のラインパターンの測定で得られた段差値の平均値とその標準偏差を Table 1 に示す。同時に、式(1)、(2)に光学定数を代入して求められる各金属組合せでの $\rho/2$ と反射率の差の計算値も示す。このとき、ガラスの光学定数には、 $n_0=1.515$ を、金属の光学定数には文献値^{3,8)} から内挿によって求めた波長 633 nm での値を使用した。このとき実験から得られた見かけ上の段差値と計算値は、金-アルミの組合せではほぼ一致し、クロム-金の組合せとクロム-アルミの組合せで 10 nm 程度実験値の方が大きい。

理論値と実験値の差の原因として、隣接する金属の反射率の差による影響、および実験で用いた蒸着金属の屈折率が理論計算で用いた文献値と異なることによる見積誤差が考えられる。

試料の反射率の変化は、その平方根に比例する測定ビート光の強度振幅の変化を引き起こす。この変化は、フォトディテクタ後の増幅器のゲインが十分でない場合、インバータ回路のスレショルド値に達するビート信号の位相変化となり、測定に誤差を引き起こす。そこで、ビート光の強度振幅を変化させて、増幅器後の信号を記録した。走査を行わないアルミミラーの測定において、フォトディテクタ前の光路に ND フィルタを挿入

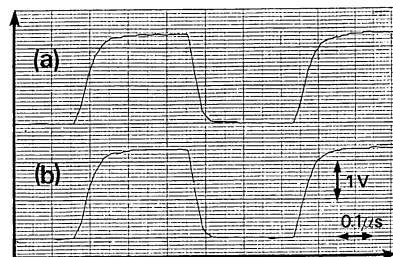


Fig. 5 Amplified beat signals. The intensity of the beam is attenuated by ND filter. a) 100% transmitted, b) 10% transmitted.

Table 1 Measured virtual step heights and differences of the phase change and the reflectance calculated from n, k of metals. The metal at the left has an upper surface in profiling.

Combination of metals	Measured virtual step height (nm)	Standard deviation (nm)	Difference of calculated phase change (nm)	Difference of calculated reflectance (%)
Al-Au	24.6	2.8	23.2	2
Cr-Au	32.8	1.4	22.9	30
Cr-Al	12.6	1.9	-0.3	28

Table 2 Optical constants (n, k) of evaporated metals and half values of the phase change calculated from them. $\rho/2$: half value of the phase change, $\Delta n, \Delta k$: difference of measured optical constants between two times of evaporations. Two kinds of optical constants at 633 nm (calculated from handbook data^{3,8)} and measured by ellipsometry) are listed.

Metal	Data of handbook			Measured data				
	n	k	$\rho/2$ (nm)	n	k	$\rho/2$ (nm)	Δn	Δk
Au	0.162	3.212	44.3	0.229	2.998	47.0	0.176	0.460
Al	1.213	6.926	21.1	1.289	6.596	22.0	0.054	0.042
Cr	3.530	4.361	21.4	2.059	1.995	40.1	0.424	0.409

することによって、光の強度振幅を変化させた。Fig. 5 (a) は ND フィルタを挿入しないとき、Fig. 5(b) は 10% 透過の ND フィルタを挿入したときの増幅器後の信号を示す。1/10 までのビート光の強度振幅の減衰では、増幅器後の信号に変化は見られない。したがって、今回の実験の場合のような 30% 程度の反射率の変化による測定誤差は、理論値と実験値の差である 10 nm 程度に比べて無視できると考えられる。

Table 2 に文献値より求めた n, k の値と蒸着直後に大気中でエリプソメータによって測定された各金属の n, k の値、およびそれから計算される位相変化の値 $\rho/2$ を示す。クロムは、文献値と実験値が著しく異なり、2回の蒸着での値の差 $\Delta n, \Delta k$ が大きい。エリプソメータによって厚さ 1 mm のガラスを介して金属の光学定数を測定することは不可能であるので、測定された n, k の値は問題となるガラスに接した金属面側ではなく、蒸着後大気中にさらされた後の金属面のものである。したがって、クロムの光学定数の大きな変化は金属表面の酸化の影響であると考えられる。一方、ガラスに接した金属面は酸化されず、測定された n, k の値ほど文献値との差はないと考えられる。しかしながら、この結果は他の金属と比較してクロムの光学定数が変化しやすいことを示唆しており、クロムの光学定数の変化が実験値と理論値との差の原因であると考えられる。

5. 結 言

ナノメートルオーダーの微細形状測定において重大な誤差要因となる試料の光学定数 (n, k) に依存する反射の際の位相変化の影響を実験的に明らかにし、理論値と比較した。試料は面精度の良いガラスに異なった金属を

蒸着したもので、このガラス-金属境界面の形状の干渉測定により位相変化の差を測定した。実験結果は、光の反射する金属が異なることによる位相変化の違いが、最も大きな金とクロムの組合せで形状測定に 33 nm もの誤差を引き起こすことを示している。測定された位相変化の差と光学定数より予想される理論値との差は 13 nm 以内であった。理論値との差は、実際の n, k の値と文献値の間の違いのためであると考えられる。厳密な位相変化の評価には、試料の光学定数を正確に求めることが必要である。今後、多波長の光を使うことなどにより試料の光学定数の推定と形状測定を同時に行い、光の位相変化の正しい補正を行う。

文 献

- 1) G.E. Sommargren: "Optical heterodyne profilometry," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 610-618.
- 2) B. Bhushan, J.C. Wyant and C.L. Koliopoulos: "Measurement of surface topography of magnetic tapes by Mirau interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 1489-1497.
- 3) G. Hass and L. Hadley: "Optical properties of metals," *American Institute of Physics Handbook*, 3th ed., ed. D.E. Gray (McGraw-Hill, New York, 1972) chapter 6, pp. 118-138.
- 4) 川田裕郎, 増井俊郎: "端面基準国際比較用ブロックゲージの中央計量検定所における測定についての報告", 中央計量検定所報告, **2** (1953) 5-11.
- 5) 諸岡 肇, 宮下芳雄, 蓮沼 宏: "鋼面の光学定数について", *応用物理*, **26** (1957) 534-538.
- 6) 土井琢磨, 豊田幸司, 谷村吉久: "表面形状測定における光学定数の影響", 応用物理学会学術講演会(春季)講演予稿集 (1991) p. 839.
- 7) 谷村吉久, 豊田幸司: "レーザ干渉計を応用した非接触微細形状測定装置", *精密機械*, **50** (1984) 1617-1621.
- 8) J.H. Weaver: "Optical properties of metals," *Handbook of Chemistry and Physics*, 65th ed., ed. R.C. Weast (CRC Press, Florida, 1984) p. E-364.