白色光干渉法による透明膜に覆われた物体の膜厚と表面形状の同時測定

小 川 英 光*・下 山 賢 一**・福 永 正 和***

北 川 克 一*・杉 山 将***

Simultaneous Measurement of Film Thickness and Surface Profile of Film-Covered Objects by Using White-Light Interferometry

Hidemitsu OGAWA*, Ken-ichi SHIMOYAMA**, Masakazu FUKUNAGA***,
Katsuichi KITAGAWA* and Masashi SUGIYAMA***

In semiconductor and LCD manufacturing processes, film thickness and surface profile of film-covered objects are needed to be measured simultaneously. By using the vertical scanning white-light interferometry, an algorithm is developed that enables such simultaneous measurement. It works well for objects covered with not only thick film but also thin film. Experimental results are presented for film-covered surfaces consisting of approximately 70nm SiO₂ film on silicon substrate.

Key Words: white-light interferometry, surface profiler, transparent film, thickness

1. はじめに

微細加工された物体表面の凹凸形状を測定する方法の一つに、白色光の干渉を用いる方法がある^{1)~7)}。干渉顕微鏡を上下に動かすことによって得られる干渉光の強度変化、すなわち、インターフェログラムから、物体表面の高さを推定する方法である。この方法は、サブミクロンの精度で高速に測定でき、ダイナミックレンジが広いという特徴をもっている。

ところで、半導体ウエハや液晶パネルなどの多くは、表面が透明膜で覆われており、膜厚、および、膜の表面形状と裏面形状を同時に測定したいという要望が急速に膨らんできている。これら3種類の量のどれか2種類がわかれば、ほかの1種類の量もわかることになる。まずは、膜厚だけを測定する方法が提案された^{8)~12)}。また、透明膜が厚い場合は、インターフェログラムに、膜の表面からの反射と裏面からの反射による2つの山が明瞭に現れる。これらの山の位置から膜厚や表面形状を測定する方法が提案されてきた^{13)~19)}。しかし、膜厚が約1 μ m以下の場合には、2つの山を峻別することが出

来ないので、これらの方法を適用することが困難であった。そこで本論文では、透明膜の厚さによらず、膜厚と表面高さを同時に測定できる新しい方法を提案する。

2. インターフェログラムの理論モデル

本節では、透明膜に覆われた物体を観測して得られるインターフェログラムの理論モデルを導く。

干渉顕微鏡を用いた光学系の概要と各種記号をFig. 1に示す。測定する物体は、上部が透明膜、下部が不透明層であるものを考える。物体表面の点Pにおける透明膜の膜厚をDで表わす。光線と2種類のビームスプリッタの交点を、それぞれO₁、O₂で表わし、O₂から参照鏡までの距離をLで表わす。O₂からLだけ下にある仮想的な面をEで表わす。任意に固定した基準面z=0からEまでの高さをz、基準面z=0から物体表面上の点Pまでの高さをz_pで表わす。物体表面上からEまでの距離をdで表わす。すなわち、d=z-z_pである。

光の波長を λ で表わし、角波数をkで表わす。すなわち、 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ である。角波数に対する光源の振幅分布をa(k)で表わす。中心波長が λ_c であり、中心から $\lambda_c \pm \lambda_b$ までの波長成分をもつ光源を用いることにする。したがって、a(k)はつぎの性質をもつ。

$$a(k) = 0 \quad (0 < k < k_l, k_u < k) \quad (1)$$

$$k_l = \frac{2\pi}{\lambda_c + \lambda_b}, \quad k_u = \frac{2\pi}{\lambda_c - \lambda_b}$$

CCDカメラの1つの画素に入射してくる光の経路をFig. 1(a)に点線と鎖線で示す。点線は、参照鏡から反射し

* 東レエンジニアリング (株) エレクトロニクス事業本部
大津市大江 1-1-45

** (株) 東芝研究開発センター 川崎市幸区小向東芝町 1 番地

*** 東京工業大学大学院情報理工学研究科 東京都目黒区大岡山
2-12-1

* Electronics Division, Toray Engineering Co., Ltd., Otsu

** Corporate R & D Center, Toshiba Corporation, Kawasaki

*** Graduate School of Information Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo

(Received March 3, 2006)

(Revised October 31, 2006)

てくる光の経路であり、経路 r と呼ぶ。鎖線は、物体表面に達し、透明膜の中で N 重反射してくる光の経路であり、経路 N ($N = 0, 1, 2, \dots$) と呼ぶ。

各経路では、CCD カメラに入射するまでに、透過や反射を繰り返すことにより、光が減衰する。Fig. 1(b) のように、ビームスプリッタの振幅透過係数と振幅反射係数、および、参照鏡の振幅反射係数をそれぞれ $\eta_o(k), \eta_r(k), \eta_m(k)$ で表わす。これらのパラメータを装置係数と呼ぶ。 $\eta_o(k)$ は正の値であるが、 $\eta_r(k), \eta_m(k)$ は負の値をとる。これは、反射時に光の位相が反転することに対応している。

また、Fig. 1(c) のように、空気層から入射してくる光の、空気と透明膜の間の振幅透過係数と振幅反射係数、および、透明膜と不透明層の間の振幅反射係数をそれぞれ $\eta_t(k), \eta_a(k), \eta_s(k)$ で表わす。透明膜の屈折率を n で表わす。これらのパラメータを試料係数と呼ぶ。 $\eta_t(k)$ は正の値であるが、 $\eta_a(k), \eta_s(k)$ は負の値をとる。なお、透明膜から空気層へ向かう光の振幅透過係数と振幅反射係数は、フレネルの公式より、それぞれ $n\eta_t(k), -\eta_a(k)$ となる。これらの係数も、Fig. 1(c) に示してある。

経路 $r, 0, N$ ($N = 1, 2, \dots$) を経由してくる光の CCD カメラへの到達率を $\gamma_r(k), \gamma_N(k)$ で表わせば、

$$\gamma_r(k) = \{\eta_r(k)\}^2 \eta_m(k) \quad (2)$$

$$\gamma_0(k) = \eta_a(k) \{\eta_o(k)\}^2 \quad (3)$$

$$\gamma_N(k) = n \{-\eta_a(k) \eta_s(k)\}^{N-1} \times \{\eta_t(k)\}^2 \eta_s(k) \{\eta_o(k)\}^2 \quad (4)$$

となる。

ところで、透明膜が SiO_2 で不透明層が Si の典型的な設定では、3 重反射以上の光の到達率は、0.1 重反射の光の到達率の 2% 以下になっている。そこで本論文では、2 重反射までを考慮し、3 重反射以降を無視することにする。

Fig. 1(a) の鎖線で囲んだ部分、すなわち、対物レンズと参照鏡を上下に動かすことにより、 z が変化し、干渉の影響で CCD カメラに到達する光の強度が変化する。CCD カメラの各素子に対するこの変化はインターフェログラムと呼ばれる。それを $g(z; z_p, D)$ で表わせば、つぎの結果を得る。

定理 1 (インターフェログラムの 2 重反射モデル) 2 重反射までを考慮したインターフェログラム $g(z; z_p, D)$ は、 z に依存する振動成分 $f(z; D)$ と、 z に依存しない直流成分 $C(D)$ を使って、次式で表わすことができる。

$$g(z; z_p, D) = f(z - z_p; D) + C(D) \quad (5)$$

ここで

$$\begin{aligned} f(z; D) = & 2 \int_{k_l}^{k_u} \{a(k)\}^2 \gamma_r(k) [\gamma_0(k) \cos(2kz) \\ & + \gamma_1(k) \cos\{2k(z + nD)\} \\ & + \gamma_2(k) \cos\{2k(z + 2nD)\}] dk \end{aligned} \quad (6)$$

(a) Basic set up of an optical system

(b) System parameters

(c) Sample parameters

Fig. 1 Notations used in this paper

$$\begin{aligned} C(D) = & \int_{k_l}^{k_u} \{a(k)\}^2 [\{\gamma_r(k)\}^2 + \{\gamma_0(k)\}^2 \\ & + \{\gamma_1(k)\}^2 + \{\gamma_2(k)\}^2 \\ & + 2\gamma_1(k) \{\gamma_0(k) + \gamma_2(k)\} \cos(2knD) \\ & + 2\gamma_0(k) \gamma_2(k) \cos\{4knD\}] dk \end{aligned} \quad (7)$$

である。

3. 膜厚と表面高さ同時測定の原理

本論文で提案する膜厚 D と表面高さ z_p の同時測定法の基本的な考え方について述べる。

3.1 測定により得られるデータ

干渉顕微鏡を用いてインターフェログラムを測定するときの標本点間隔を Δ で表わし、標本点 $\{z_m\}_{m=1}^N$ を $z_m = (m-1)\Delta$ で定義する。各標本値には観測雑音が含まれる。その雑音を ε_m で表わせば、観測されるデータ $\{g_m\}_{m=1}^N$ は

Fig. 2 Interferogram $g(z; z_p, D)$

$$g_m = g(z_m; z_p, D) + \varepsilon_m \quad (8)$$

となる。

3.2 膜厚 D の測定原理

観測データ $\{g_m\}_{m=1}^N$ を用いて、インターフェログラムの直流成分 $C(D)$ を次式の $\hat{C}$ により推定する。

$$\hat{C} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N g_m \quad (9)$$

(7) 式の左辺に $\hat{C}$ を代入すると、膜厚 D に関する方程式となるので、それを解くことにより膜厚を求める。この手法を DC(Direct Current) 法と名付ける。本論文では、DC 法をさらに拡張した多点 DC 法という測定法も提案する。

3.3 表面高さ z_p の測定原理

膜厚 D を前節の方針で測定した結果、インターフェログラム $g(z; z_p, D)$ およびその振動成分 $f(z - z_p; D)$ は、表面の高さ z_p だけが未知の関数となる。そこで以降は、 D を省いて、 $g(z; z_p), f(z - z_p)$ と表わす。Fig. 2 からわかるように、 $g(z; z_p)$ は唯一の点で最大値をとる。そこで、 $g(z; z_p)$ および $g(z; 0)$ が最大値をとる点を、それぞれ z_{pg}, z_{pg0} で表わす。透明膜がない場合、 z_{pg} は表面高さ z_p に一致する⁶⁾。一方、透明膜がある場合には、 z_{pg} は z_p からずれてくる。しかし、 z_{pg} と z_{pg0} の差は、

$$z_p = z_{pg} - z_{pg0} \quad (10)$$

となり、 z_p と一致するのである。

ところで、文献 6), 7) では、透明膜がない場合に対して、インターフェログラムの包絡線を二乗した関数が最大値をとる点を、高速に精度良く求める方法が提案されている。本論文では、この方法を、透明膜がある場合に適用して z_{pg}, z_{pg0} を求め、(10) 式により z_p を求めることにする。

これが表面高さ z_p を測定するための基本的な考え方である。この方法を、DSE(Difference between Squared Envelopes) 法と名付ける。

Fig. 3 Graph of $C(D)$ function

4. 膜厚 D の測定 (DC 法)

(9) 式で得られる推定値 $\hat{C}$ を (7) 式の左辺に代入した方程式を直接解くことは困難である。そこで、(7) 式の右辺を D の 1 次多項式で近似して、1 次方程式を解くことにより推定解 $\hat{D}$ を求める。

膜厚の設計値を D_i で表わし、推定区間の幅を決めるパラメータを ϵ で表わす。 $C(D)$ の近似多項式 $C_1(D)$ の、区間 $[D_i - \epsilon, D_i + \epsilon]$ における推定誤差を、

$$\max_{D_i - \epsilon \leq D \leq D_i + \epsilon} |C_1(D) - C(D)| \quad (11)$$

で定義する。 $C_1(D)$ としてチェビシェフ多項式を用いることにより、(11) 式の値を最小にすることができる²⁰⁾。

すなわち、(7) 式の右辺を 1 次のチェビシェフ多項式で近似したものを $\hat{C}_1(D)$ で表わせば、つぎようになる。

$$\hat{C}_1(D) = c_0(D_i) + \frac{c_1(D_i)}{\epsilon}(D - D_i) \quad (12)$$

ここで

$$c_0(D_i) = \frac{1}{2} \left[C(D_i + \frac{\epsilon}{\sqrt{2}}) + C(D_i - \frac{\epsilon}{\sqrt{2}}) \right] \quad (13)$$

$$c_1(D_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[C(D_i + \frac{\epsilon}{\sqrt{2}}) - C(D_i - \frac{\epsilon}{\sqrt{2}}) \right] \quad (14)$$

である。(12) 式の左辺に (9) 式の $\hat{C}$ を代入して得られる 1 次方程式を解くことにより、つぎの結果を得る。

膜厚 D の測定法 1 (DC 法とその誤差) 膜厚 D を、

$$\hat{D} = \frac{\hat{C} - c_0(D_i)}{c_1(D_i)} \epsilon + D_i \quad (15)$$

により推定する。膜厚の推定誤差 $|\hat{D} - D|$ の許容値を e_0 で表わし、 $C(D)$ の m 回微分 ($m = 1, 2$) を $C^{(m)}(D)$ で表わす。

$$e_0 = \sqrt{\frac{4|C^{(1)}(D_i)|e_0}{|C^{(2)}(\frac{\lambda_c}{2n})|}} \quad (16)$$

とおき、 ϵ として

$$0 < \epsilon \leq e_0 \quad (17)$$

Table 1 Measured T_j and $(\lambda_c/(4n))j$
($\lambda_c = 605.9\text{nm}$, $n = 1.458$)

j	0	1	2	3	4
T_j	0.0000	0.1034	0.2063	0.3092	0.4121
$(\lambda_c/(4n))j$	0.0000	0.1039	0.2078	0.3117	0.4156

を満たす値を採用すれば、区間 $[D_i - \epsilon, D_i + \epsilon]$ において、推定誤差は許容値 e_0 以下に抑えられる。

この測定法は、(17) 式を満たす ϵ を用いれば、推定誤差の最大値が許容値 e_0 を超えることはないことを保証している。そこで、 $[D_i - \epsilon, D_i + \epsilon]$ を DC 法の有効範囲と呼ぶことにする。

ϵ の上限値 e_0 は、(16) 式より、 e_0 と D_i に依存している。ところで **Fig. 3** に示すように、 z に関する直流成分 $C(D)$ は D に関して周期的に振動している。したがって、 $C(D)$ が極値をとる点、すなわち $C^{(1)}(D) = 0$ を満たす点が存在する。以下では、このような点を $C(D)$ の極値点と呼ぶことにする。膜厚の設計値 D_i が極値点に近いとき、(16),(17) 式より、有効範囲はほぼ 0 になり、精度よく推定できる区間が非常に狭くなる。この問題に対する解決法が、次節で与える多点 DC 法である。

なお、(7) 式の右辺には透明膜の屈折率 n が含まれているので、その値を知る必要がある。産業応用では、ほとんどの場合、透明膜の材質がわかっているため、その屈折率はあらかじめわかっている。また、材質がわからない場合でも、膜剥離などで段差を作り、屈折率を推定することができる¹⁶⁾。

5. 膜厚 D の測定 (多点 DC 法)

$C(D)$ の極値点を $T_j (j = 1, 2, 3, \dots)$ で表わす。区間 $[T_{j-1}, T_j]$ では $C(D)$ が単調になる。したがって、膜厚 D がどの区間に入っているかが事前知識としてわかっているならば、 D の推定値は、方程式 $C(D) = \hat{C}$ の解として一意に定まることになる。

ところで、 T_j の値そのものを解析的に求めることは困難である。しかし、つぎのようにすれば、そのよい近似値を求めることができる。たとえば、透明膜として SiO_2 を使い、光学フィルタとして中心波長 $\lambda_c = 605.9\text{nm}$ のフィルタを使った場合を考える。このとき、 T_j の値は **Table 1** の上段のようになる。一方、この波長帯に対する SiO_2 の屈折率は $n = 1.458$ であるから、 $(\lambda_c/(4n))j$ の値は **Table 1** の下段のようになる。この表からわかるように、 $(\lambda_c/(4n))j$ は極値点 T_j の値とよく一致している。そこで、 T_j を $(\lambda_c/(4n))j$ で近似することにする。このとき、区間 $[T_{j-1}, T_j]$ は次式で近似できる。

$$\left[\frac{\lambda_c}{4n}(j-1), \frac{\lambda_c}{4n}j \right] \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (18)$$

事前知識として、膜厚 D が (18) 式のどの区間に入っているかがわかっているとき、 D の推定値は、方程式 $C(D) = \hat{C}$ の解として一意に定まる。こうして、つぎのアルゴリズムを

Table 2 Determination of i^*

	$c_1(D_{i_0}) > 0$	$c_1(D_{i_0}) < 0$
$C(D) \leq C(\frac{D_{i_0} + D_{i_0+1}}{2})$	$i^* = i_0$	$i^* = i_0 + 1$
$C(D) > C(\frac{D_{i_0} + D_{i_0+1}}{2})$	$i^* = i_0 + 1$	$i^* = i_0$

得る。

膜厚 D の測定法 2 (多点 DC 法)

(1) D に関する事前知識をもとに、 j を次式によって求める。

$$\frac{\lambda_c}{4n}(j-1) \leq D \leq \frac{\lambda_c}{4n}j \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (19)$$

(2) 区間 $[\frac{\lambda_c}{4n}(j-1), \frac{\lambda_c}{4n}j]$ をもとに、逐次探索によって正確な区間 $[T_{j-1}, T_j]$ を求める。

(3) DC 法を適用する区間の幅 ϵ を、 $[0.0050, 0.0075]$ の中から用途に応じて適切に選ぶ。

(4) $M = \left\lfloor \frac{T_j - T_{j-1}}{2\epsilon} \right\rfloor$ によって、区間 $[T_{j-1}, T_j]$ を M 分割する。ここで、 $\lfloor c \rfloor$ は c 以下の最大の整数である。

(5) $D_0 = T_{j-1} + \epsilon$ とする。さらに、 $\{D_i\}_{i=1}^M$ を次式によって求める。

$$D_i = D_0 + \frac{i-1}{M}(T_j - T_{j-1}) \quad (20)$$

(6) $x_i = C(D_i) - \hat{C}$ により $\{x_i\}_{i=1}^M$ を計算し、 x_i の符号が反転するか $x_i = 0$ となる i を、 i_0 で表わす。

(7) $C(\frac{D_{i_0} + D_{i_0+1}}{2})$ の値を求める。

(8) i^* を **Table 2** に従って決める。この i^* に対して、真の膜厚 D は区間 $[D_{i^*} - \epsilon, D_{i^*} + \epsilon]$ に入っている。

(9) 膜厚 D を

$$\hat{D} = \frac{\hat{C} - c_0(D_{i^*})}{c_1(D_{i^*})}\epsilon + D_{i^*} \quad (21)$$

により推定する。

この方法は、膜厚 D が存在することがわかっている区間を M 分割し、それぞれの区間に対する DC 法の中心点 D_i の中から適切な点を選ぶアルゴリズムになっている。そこで、この方法を多点 DC 法と呼ぶことにする。

この方法によれば、(21) 式に現れる中心点 D_{i^*} が $C(D)$ の極値点と重なることはない。すなわち、(16) 式の D_i として D_{i^*} を採用しても、 e_0 が零になることはない。こうして、前節の終わりに述べた問題が解決されるのである。

なお、**Table 1** からわかるように、 $C(D)$ の極値点は光源の中心波長 λ_c によって異なってくる。したがって、中心波長を変えることによって、この問題を解決することも可能である。

6. 表面高さ z_p の測定 (DSE 法)

表面高さ z_p を高速に、かつ安定して推定するために、実際の振動成分 $f(z - z_p)$ と、 $z_p = 0$ の場合の振動成分 $f(z)$ を用いることにする。以下にその具体的な方法を説明する。

文献 6), 7) と同様にして、(6) 式の振動成分 $f(z)$ は、任意

に固定した正の実数 k_0 を用いてつぎのように表わすことができる。

$$f(z) = \sqrt{r(z)} \cos\{2k_0 z - \alpha(z)\} \quad (22)$$

ここで、

$$r(z) = \{m_{c1}(z) + m_{s2}(z)\}^2 + \{m_{c2}(z) - m_{s1}(z)\}^2 \quad (23)$$

$$\alpha(z) = \tan^{-1} \frac{m_{c2}(z) - m_{s1}(z)}{m_{c1}(z) + m_{s2}(z)} \quad (24)$$

$$m_{ci}(z) = \int_{k_l}^{k_u} \psi_i(k) \cos\{2(k - k_0)z\} dk \quad (25)$$

$$m_{si}(z) = \int_{k_l}^{k_u} \psi_i(k) \sin\{2(k - k_0)z\} dk \quad (26)$$

$$\psi_1(k) = 2\{a(k)\}^2 \gamma_r(k) \{\gamma_0(k) + \gamma_1(k) \cos(2nkD) + \gamma_2(k) \cos(4nkD)\} \quad (27)$$

$$\psi_2(k) = -2\{a(k)\}^2 \gamma_r(k) \{\gamma_1(k) \sin(2nkD) + \gamma_2(k) \sin(4nkD)\} \quad (28)$$

$$+ \gamma_2(k) \sin(4nkD)\} \quad (29)$$

であり、(25),(26) 式の i は、 $i=1,2$ を表わす。

$r(z)$ は、 $f(z)$ の包絡線を 2 乗した関数であるから、 $f(z)$ の 2 乗包絡線関数と呼ぶことにする。

2 つの 2 乗包絡線関数 $r(z - z_p)$, $r(z)$ は、それぞれある唯一点 z'_p, z'_{p0} で最大値をとる。ところで、 $r(z - z_p)$ は $r(z)$ を z_p だけ平行移動した関数であるから、 z'_p と z'_{p0} の間には、 $z'_{p0} = z'_p - z_p$ という関係が成立する。したがって、次式により z_p を求めることができる。

$$z_p = z'_p - z'_{p0} \quad (30)$$

すなわち、 z_p を求める問題は、 z'_{p0} と z'_p を求める問題になる。

まず、 z'_{p0} の求め方を示す。 $r(z)$ は、(23)~(29) 式からわかるように、 D が決定された後では、未知のパラメータをもたない関数となる。よって、 $r(z)$ が最大値をとる点 z'_{p0} を反復法の探索を用いて求める。反復法のアルゴリズムには、2 分探索を拡張したもの⁶⁾を用いる。

つぎに z'_p を求める。 $r(z - z_p)$ は未知のパラメータ z_p を含んでいるので、(23) 式から直接求めることはできない。そこで、振動成分の標本値 $\{f_m\}_{m=1}^N$ から 2 乗包絡線関数 $r(z - z_p)$ を推定し、その関数が最大値をとる点を z'_p の推定値とする。

ところで、(1) 式により振動成分 $f(z - z_p)$ の帯域は制限されているので、帯域通過型標本化定理を用いることができる⁶⁾。

J を、不等式

$$0 \leq J \leq \frac{\lambda_c - \lambda_b}{2\lambda_b} \quad (31)$$

を満たす整数とすると、標本点間隔 Δ は、

$$\frac{\lambda_c + \lambda_b}{4} J \leq \Delta \leq \frac{\lambda_c - \lambda_b}{4} (J + 1) \quad (32)$$

の範囲で自由にとることができる⁶⁾。たとえば、実際に使われている $\lambda_c = 605.9\text{nm}$, $\lambda_b = 37.5\text{nm}$ のフィルタでは、 $(\lambda_c - \lambda_b)/2\lambda_b = 7.58$ となり、(31) 式を満たす整数 J が確かに存在する。

(32) 式を満たす標本点間隔 Δ に対して、2 乗包絡線関数 $r(z - z_p)$ は、 $f(z - z_p)$ の標本値からつぎのように求めることができる。

定理 2 (2 乗包絡線関数に対する標本化定理) 2 乗包絡線関数 $r(z - z_p)$ は、振動成分の標本値 $\{f(z_m - z_p)\}_{m=-\infty}^{\infty}$ を用いて、

1. z が偶数番目の標本点のとき、すなわち $z = z_{2j}$ のとき、

$$r(z_{2j} - z_p) = \{f(z_{2j} - z_p)\}^2 + \left\{ \frac{2}{\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{f(z_{2m-1} - z_p)}{2(j-m)+1} \right\}^2 \quad (33)$$

2. z が奇数番目の標本点のとき、すなわち $z = z_{2j+1}$ のとき、

$$r(z_{2j+1} - z_p) = \{f(z_{2j+1} - z_p)\}^2 + \left\{ \frac{2}{\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{f(z_{2m} - z_p)}{2(j-m)+1} \right\}^2 \quad (34)$$

3. z が標本点以外のとき、

$$r(z - z_p) = \frac{2\Delta^2}{\pi^2} \left[(1 - \cos \frac{\pi z}{\Delta}) \times \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{f(z_{2m-1} - z_p)}{z - z_{2m-1}} \right\}^2 + (1 + \cos \frac{\pi z}{\Delta}) \times \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{f(z_{2m} - z_p)}{z - z_{2m}} \right\}^2 \right] \quad (35)$$

と表わすことができる。

実際には標本値は有限個しか使えないので、無限級数を有限項で打ち切る。また、標本値 $f(z_m - z_p)$ として、 $f_m = g_m - \hat{C}$ を用いる。こうして得られた 2 乗包絡線関数 $r(z - z_p)$ の推定関数を $r_N(z - z_p)$ で表わすと、つぎようになる。

1. z が偶数番目の標本点のとき、すなわち $z = z_{2j}$ のとき、

$$r_N(z_{2j} - z_p) = (f_{2j})^2 + \left\{ \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\lceil \frac{N}{2} \rceil} \frac{f_{2m-1}}{2(j-m)+1} \right\}^2 \quad (36)$$

2. z が奇数番目の標本点のとき、すなわち $z = z_{2j+1}$ のとき、

$$r_N(z_{2j+1} - z_p) = (f_{2j+1})^2 + \left\{ \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} \frac{f_{2m}}{2(j-m)+1} \right\}^2 \quad (37)$$

3. z が標本点以外のとき、

Table 3 Measurement errors of $\hat{D}$ and $\hat{z}_p$

Sample #	D	Mean of $\hat{D}$	Standard deviation of $\hat{D}$	Mean standard deviation of $\hat{z}_p$
1	103nm	96.8nm	0.24nm	163nm
2	304nm	294.8nm	0.25nm	171nm
3	750nm	738.0nm	0.24nm	162nm

$$r_N(z - z_p) = \frac{2\Delta^2}{\pi^2} \left[\left(1 - \cos \frac{\pi z}{\Delta}\right) \left\{ \sum_{m=1}^{\left[\frac{N}{2}\right]} \frac{f_{2m-1}}{z - z_{2m-1}} \right\}^2 + \left(1 + \cos \frac{\pi z}{\Delta}\right) \left\{ \sum_{m=1}^{\left[\frac{N}{2}\right]} \frac{f_{2m}}{z - z_{2m}} \right\}^2 \right] \quad (38)$$

ここで, $[c]$ は c 以上の最小の整数である. この推定関数 $r_N(z - z_p)$ が最大値を取る点を反復法の探索を用いて求め, $\hat{z}_p$ の推定値とする.

7. 実サンプルの測定結果

Fig. 4 に示す表面形状測定装置 SP-500 に, 本論文で提案した手法を実装した. SP-500 はハロゲンランプの光源を用いているので, 中心周波数 $\lambda_c = 605.9\text{nm}$, 半値幅 37.5nm の干渉フィルタを使って, (1) 式で示される帯域制限白色光を実現した. なお, 対物レンズは倍率 $5\times$ のレンズを用いた.

透明膜が SiO_2 で, 不透明層が Si のさまざまな試料を使って, つぎの 2 種類の実験を行なった. 膜厚の測定には多点 DC 法を用い, インターフェログラムに対する標本点間隔は $\Delta = 1.425\mu\text{m}$ とした. まず, 膜厚が $103\text{nm}, 304\text{nm}, 750\text{nm}$ の一定値をとり, 表面形状も平坦な 3 種類の試料を測定した. 各試料面上の $0.33\text{mm} \times 0.31\text{mm}$ の領域を 100×100 に区切り, 各部分に対して D と z_p を 10 回測定した.

Table 3 にはつぎの値が示してある. まず D に関しては, 1 回の測定で得られる $100 \times 100 = 10,000$ 個のデータ $\hat{D}$ の平均を求める. この平均値 10 個に対する平均と標準偏差を示す. z_p に関しては, 1 回の測定で得られる 10,000 個のデータ $\hat{z}_p$ に対して平面の当てはめを行ない, その平面からの $\hat{z}_p$ のずれの標準偏差を求める. この標準偏差 10 個に対する平均を示す. Table 3 では, これらの値をそれぞれ, Mean of $\hat{D}$, Standard deviation of $\hat{D}$, Mean standard deviation of $\hat{z}_p$ と表現してある.

つぎに, 透明膜が一定の傾斜をもち, 不透明層が平坦な試料の膜厚を測定した. 結果を Fig. 5 に示す.

これらの結果から, 本手法が十分実用に耐えるものであることがわかる.

8. む す び

表面を透明膜で覆われた物体の膜厚, および, 膜の表面形状と裏面形状を, 白色光干渉を利用して同時に測定する方法を提案した. まず, 膜内の 2 重反射まで考慮したインターフェログラムの理論モデルを導き, z 軸に依存しない直流成分と z 軸に依存する振動成分の和による表現を与えた. そして,

Fig. 4 Photograph of a surface profiler SP-500

Fig. 5 Measured film thickness of sloped sample: The x-y axis is scaled with the label of pixels. One pixel corresponds to $1.5\mu\text{m}$ in width on the surface of objects to be measured.

この直流成分から膜厚を推定する方法 (DC 法, 多点 DC 法) を与えるとともに, この推定結果と振動成分を用いて膜の表面形状を求める方法 (DSE 法) を与えた. また, これらの方法を表面形状測定装置 SP-500 に実装して, 有効性を確認した. その結果, 薄膜から厚膜まで, 数ナノメートルの精度で測定出来ることがわかった.

参 考 文 献

- 1) G.S. Kino and S.S.C. Chim: The Mirau correlation microscope, Appl. Opt., **29**, 3775/3783 (1990)
- 2) T. Dresel et.al.: Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar, Appl. Opt., **31**-7, 919/925 (1992)
- 3) P.J. Caber: Interferometric profiler for rough surfaces, Appl. Opt., **32**-19, 3438/3441 (1993)
- 4) P. de Groot and L. Deck: Three-dimensional imaging by

sub-Nyquist sampling of white-light interferograms, Opt. Lett. **18**-17, 1462/1464 (1993)

- 5) L. Deck and P. de Groot: High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry, Appl. Opt., **33**, 7334/7338 (1994)
- 6) 平林, 小川, 水谷, 永井, 北川: 帯域通過型標本化定理を用いた白色光干渉による表面凹凸形状の高速測定, 計測自動制御学会論文集, **36**-1, 16/25 (2000)
- 7) A. Hirabayashi, H. Ogawa and K. Kitagawa: Fast surface profiler by white-light interferometry by use of a new algorithm based on sampling theory, Appl. Opt., **41**-23, 4876/4883 (2002)
- 8) P.A. Flournoy, R.W. McClure and G. Wyntjes: White-light interferometric thickness gauge, Appl. Opt., **11**-9, 1907/1915 (1972)
- 9) T. Tsuruta and Y. Ichihara: Accurate measurement of lens thickness by using white-light fringes, Japn. J. Appl. Phys., Suppl., **14**-1, 369/372 (1975)
- 10) T.M. Merklein: High resolution measurement of multilayer structures, Appl. Opt., **29**, 505/511 (1990)
- 11) M. Itoh, R. Yamada, R. Tian, M. Tsai and T. Yatagai: Broad-band light-wave correlation topography using wavelet transform, Optical Review **2**-2, 135/138 (1995)
- 12) S. Diddams and J.C. Diels: Dispersion measurements with white-light interferometry, J. Opt. Soc. Am. A, **13**, 1120/1129 (1996)
- 13) B.S. Lee and T.C. Strand: Profilometry with a coherence scanning microscope, Appl. Opt., **29**-26, 3784/3788 (1990)
- 14) 中村, 豊田: 膜下パターンのコヒーレンス・プローブ計測, 光学, **21**-7, 481/484 (1992)
- 15) S.-W. Kim and G.-H. Kim: Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry, Appl. Opt., **38**-28, 5968/5973 (1999)
- 16) 北川克一: 白色光干渉法による透明膜の三次元膜形状計測, ViEW2003 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, 87/92 (2003)
- 17) K. Kitagawa: 3-D profiling of a transparent film using white-light interferometry, 計測自動制御学会学術講演会, TAI-7-2, 585/590 (2004) (CD ROM)
- 18) 北川克一: 光干渉法による膜形状測定装置 “SP-500F” とその応用, 電子材料, **7**, 77/80 (2005)
- 19) 北川克一: 東レエンジニアリングの膜形状測定装置 SP-500F, 光アライアンス, **11**, 42/46 (2005)
- 20) 赤坂 隆: 数値計算, コロナ社, 応用数学講座 7 (1969)

福 永 正 和

2004年東京工業大学工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院情報理工学研究科修士課程在学中。光計測に関する研究に従事。

北 川 克 一 (正会員)

1964年東京大学工学部計数工学科卒業。同年東レ(株)に入社。89年より画像処理・レーザ光学を応用した半導体およびFPD用検査機器の研究開発に従事。2000年より東レエンジニアリング(株)技監。本会より2001年度技術賞受賞。計測制御エンジニア。精密工学会会員。

杉 山 将

2001年東京工業大学大学院情報理工学研究科博士課程修了。同年、同大学院助手。現在、同助教授。統計的機械学習、および光計測に関する研究に従事。工博。

[著 者 紹 介]

小 川 英 光 (正会員)

1965年東京工業大学理工学部電子工学科卒業。通産省電子技術総合研究所, 東京工業大学教授を経て, 2005年より東レエンジニアリング(株)顧問。信号・画像処理, 学習理論, パターン認識の研究に従事。本会より2001年度技術賞受賞。工博。

下 山 賢 一

2003年東京工業大学大学院情報理工学研究科修士課程修了。同年、(株)東芝に入社。現在、研究開発センターにて、コンピュータービジョン、高速度画像による画像処理, ITS画像処理の研究に従事。在学中, 光計測に関する研究に従事。