白色光干渉法による透明膜の三次元膜形状計測

3-D Profiling of a Transparent Film using White-Light Interferometry

北川克一
Katsuichi KITAGAWA

東レエンジニアリング㈱ ， katsuichi_kitagawa@toray-eng.co.jp

概要： 垂直走査型白色光干渉法において、測定対象面に透明膜が存在すると、干渉波形に２つのピークが現れる。これらのピーク位置を高速・高精度に検出するアルゴリズムを開発し、透明膜の表面・裏面形状と膜厚分布が同時に測定可能な「膜形状測定装置」を実用化した。光学的膜厚が約１μｍ以上の透明膜に適用可能であり、半導体、ＬＣＤ製造工程において有効に利用されている。

1. はじめに

光干渉を利用した表面形状測定法は、高速・高精度な非接触・非破壊の微細表面形状測定方法として産業界で広く使用されている。しかし、測定対象面が透明膜に覆われている場合には、裏面からの干渉光が外乱になり、正確な表面形状が測定できないという問題点があった。

本稿では、白色光干渉法（垂直走査干渉法、*Vertical Scanning Interferometry* とも呼ばれる）において、透明膜に覆われた表面形状測定を実現する信号処理アルゴリズムの検討結果を紹介し、それを内蔵した膜形状測定装置 SP-500F について述べる。

2. 測定原理

光源に可干渉距離の短い白色光を使用して、図１に示すような干渉顕微鏡のＺ軸を垂直走査する。

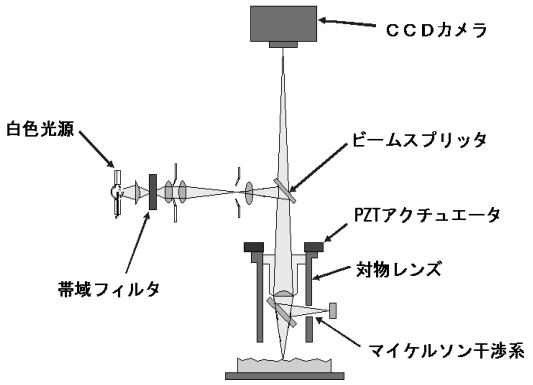


図１ 干渉顕微鏡の光学系

画面内の１点の輝度変化（インターフェログラムと呼ぶ）は、図２のようになり、測定光路と参照光路の光路差がゼロとなる点で干渉縞の変調が最大となる。TV カメラ内各点における干渉縞変調量の最大となる光路差（Ｚ軸高さ）を求めることにより、カメラ視野内の三次元形状が一括して測定できる。

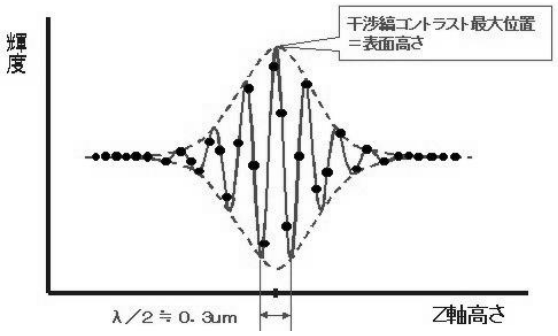


図２ インターフェログラム
（黒点はサンプリング点）

ところで、変調量のピーク位置検出アルゴリズムとして、平滑法[1]、Hilbert 変換法[2]、フーリエ変換-位相法[3]、重心法[4]、波形復元法[5]などが提案されているが、ほとんどが単峰ピークを前提としている。よって、表面に透明膜のある試料を測定すると、表面からの反射光と裏面からの反射光が重畳し、正確な表面形状測定ができない。

透明膜の膜厚がコヒーレント長に比し厚ければ、インターフェログラムに表面反射と裏面反射の２つのピークが現れるので、このピーク位置から、膜厚を測定したり、膜形状を測定できることは、古くから知られている。[6]~[10]

しかし、これまで報告されているものは、目視でピーク位置を決定したり[6][7]、複雑な計算アルゴリズム[9][10]を使用したものであり、実用的な自動測定装置は市場に見あたらない。筆者は全自動での表面・膜厚形状測定を可能とするため、複数個のピーク位置を自動的に検出する実用アルゴリズムを検討した。

3. アルゴリズムと実験結果

3.1 テストデータ

前報告の表面形状測定装置 SP-500[5][11]を用いて、図３のような輝度値（インターフェログラム）を採取した。測定条件は次の通りである。

(1) 照明光：膜表面と裏面のピークを分離するためには、コヒーレント長の短い方が良いので、光源をハロゲンランプとし、フィルタは使用しない。この場合のコヒーレント長は約１μｍである。
(2) Ｚ軸走査速度：2.4μｍ/sec（標本点間隔＝0.08μｍ）とした。この間隔はインターフェログラムの周期のほぼ 1/4 に相当する。
(3) 測定対象：Si ウエーハ上に膜厚約 １μｍの酸化膜を形成したもの。屈折率が約1.5なので、光学的膜厚は約 1.5μｍである。コヒーレント長が約１μｍだから、ピークが分離できる下限値に近いと思われる。また、半導体や LCD プロセスでは、レジスト膜やコート膜など数μｍ の透明膜が多数あり、測定対象として、厚さ数μｍの膜を想定することは実用的な意義がある。
(4) 走査レンジ：5μｍ。画像枚数は、5／0.08＝63 枚となり、30fps の標準カメラ使用時の測定（走査）時間は約２ sec である。

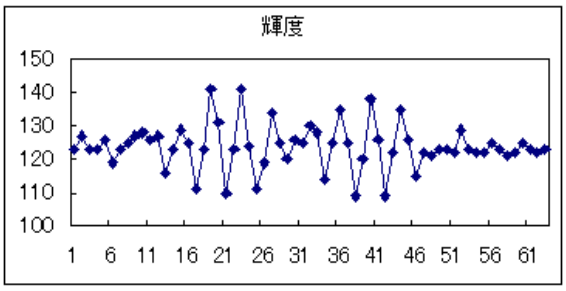


図3 アルゴリズムテスト用のインターフェログラム

3.2 計算アルゴリズムⅠ：ピーク分離法[12]

インターフェログラムから干渉振幅を求め、それを度数分布とみなし、判別分析法により最適しきい値を求めてピーク分離し、分離された個々のピークごとにピーク位置を求める。

3.2.1 計算手順

(1) 第１ステップ：ＡＣ成分計算
輝度データの平均値を求め、(輝度－平均値)により、ＡＣ成分を求めると図４が得られる。

(2) 第２ステップ：振幅計算
整流を目的に、ＡＣ成分を自乗すると、図５が得られる。

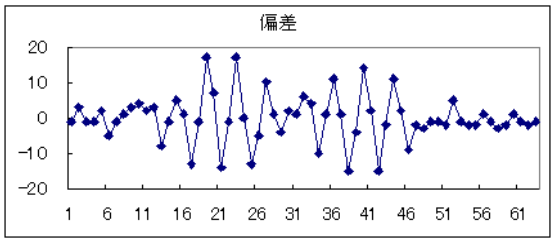


図4 輝度信号のAC成分

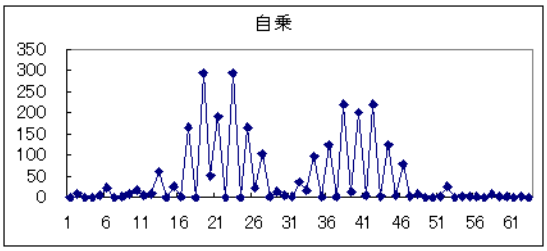


図5 AC成分の自乗値

(3) 第３ステップ：ピーク分離
横軸が高さ、縦軸がＡＣ成分自乗値の波形データを、横軸が観測値、縦軸が頻度値のヒストグラムとみなして、判別分析の手法（大津の式）[8]により、最適なクラス分けしきい値を求める。
すなわち、観測値レベル数Ｌ、観測値レベルｉの頻度値ｎ(i)，(i=1,L)が与えられた時に、次式で表される平均クラス内分散を評価関数として、その値が最小になるｋをしきい値とする。

$$f(k) = \omega_1 \cdot \sigma_1^2 + \omega_2 \cdot \sigma_2^2$$

ただし、ω_1、ω_2：各クラスの頻度
σ_1^2、σ_2^2：各クラスの分散

本実験では、評価関数値が図６の実線のようになり、データ番号 30 がしきい値となる。

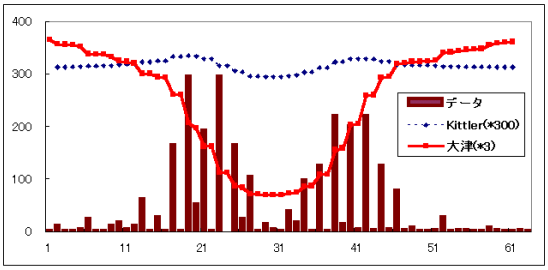


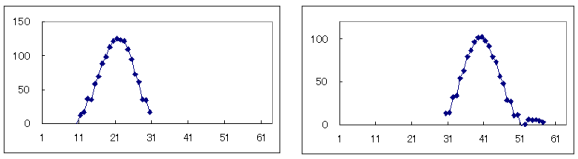
図6 判別分析の手法によるピーク分離
（実線が平均クラス内分散）

(4) 第４ステップ：ピーク位置検出
データ番号 30 を境界として、左右のピーク領域に分ける。分離された各ピーク領域ごとに、従来と同様のピーク位置検出を行う。ここでは、最も一般的なピーク位置検出法である低域フィルタ法を用いて、波形を平滑した。使用した計算式は 19 点の２次多項式平滑法であり、次式で表される。[15]

$y(n)=(1/W)\Sigma w(i)\cdot x(n+i)$

ここで、$i=0,\pm1,\ \pm2,\ldots,\ \pm9$；W は正規化係数で w(i)の総和；w(i)は重み係数であり、19 点法の場合、w(0)から順に、269, 264, 249, 224, 189, 144, 89, 24, -51, -136 である。

この結果、図７のような平滑された曲線が得られ、２つのピーク位置をデータ番号 21、40 と求めることができた。さらに、ピーク近傍のデータ３点に２次曲線を当てはめ、内挿法により標本点間隔より小さい分解能でピーク位置を求めると、それぞれ 21.17、39.61 が得られた。



(a) 左ピーク　　(b) 右ピーク

図7 ピーク分離後の各ピーク平滑結果

(5) 第５ステップ：表裏面高さと膜厚計算

ピーク位置から換算した高さをz_{p1}、z_{p2}とすると、膜の屈折率を n として、

①透明膜の表面高さ ＝ z_{p1}

②膜厚D ＝ $(z_{p1}-z_{p2})/n$

③膜裏面の高さz_p ＝ $z_{p1}-D$

である。

本テストでは、ピーク位置 21.17、39.61、標本点間隔 0.08μm、膜の屈折率 n=1.5 から、表面高さ＝5－21.17×0.08＝3.31μm、膜厚＝(39.61－21.17)×0.08／1.5＝0.98μm、裏面高さ＝2.33μm が得られた。

3.2.2 ピーク分離アルゴリズムの比較

画像処理において、輝度ヒストグラム分布を基準に２値化しきい値を求めるアルゴリズムとして、上記判別分析法のほかに、Kittler らの方法[14]がある。

Kittler 法は、次式で表される評価関数が最小になる k をしきい値とする。

$p(k)=\omega_1\cdot\log(\sigma_1/\omega_1)+\omega_2\cdot\log(\sigma_2/\omega_2)$

ただし、ω_1、ω_2：各クラスの頻度

σ_1^2、σ_2^2：各クラスの分散

いろいろなケースについて、両者を比較した。本実験データの場合は図６に示すように、両者に差がない。図８(a)～(c)にその他の場合の例を示す。Kittler 法は、図８(c)のように２つのピークの分散が異なる場合にメリットがある。しかし、干渉波形の場合、通常、ピークの分散に差がない。よって、図８(b)のような場合でも良好な結果を得ることができる判別分析法を採用した。

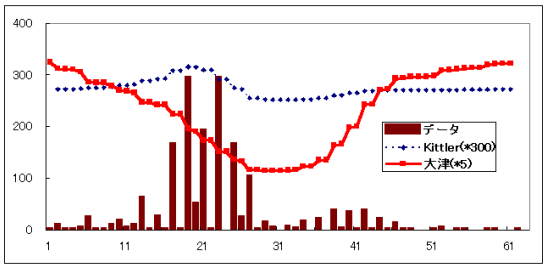


図8(a) 判別分析法と Kittler 法の比較：ピーク高さの差が大きい場合

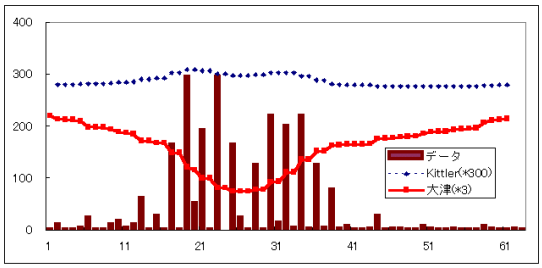


図8(b) 判別分析法と Kittler 法の比較：ピーク間隔が小さい場合

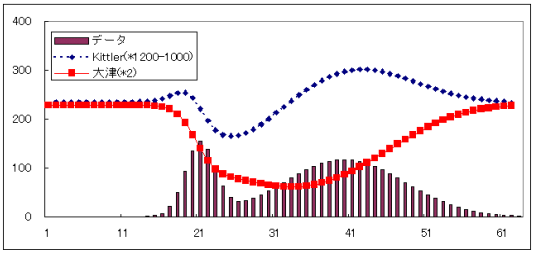


図8(c) 判別分析法と Kittler 法の比較：分散に差がある場合

3.3 計算アルゴリズムⅡ：関数フィット法[12]

干渉振幅データのピークに近似関数をフィッティングしてピーク位置を求める。

3.3.1 透明膜のない場合

ＡＣ成分自乗データを包絡線データと見なし、ガウス関数を最小自乗法でフィッティングする。

ガウス関数は、表面高さ（ピーク位置）x_0、ピーク幅 w、ピーク振幅 a の３個のパラメータを持ち、次式で表される。

$$g(x,x_0,a,w)=a\cdot\exp[-\pi((x-x_0)/w)^2]$$

この時、自乗誤差の総和は次式で表される。

$$f(x_0,w,a)=\Sigma[q_i-g(x_i,x_0,a,w)]^2$$

ここで、q_i＝i 番目の実データ

x_i＝i 番目の位置座標

これが最小となる未知パラメータ３個を求めることは、非線形計画法問題であり、多くの計算アルゴリズムや市販ソフトウエアがある。本実験では、Excel 付属の最適化ソフト Solver を利用した。

未知パラメータの初期値を適切に選ぶ必要があるが、①ピーク位置＝自乗値の最大位置；②ピーク

振幅＝自乗値の最大値／２、とすることにより、安定に最適値を求めることができた。なお、ピーク幅はコヒーレント長として照明光源など光学系でほぼ決まる装置パラメータなので、予め理論的、あるいは実験的に近似値を求めて、それを初期値とする。

3.3.2 透明膜のある場合

物体表面が透明膜に覆われている場合には干渉波形に２つのピークが現れのので、モデル関数として、２個のガウス関数の和 $g(x,x_0,a,w)+g(x',x_0',a',w')$ を採用する。

(1) 第１～２ステップ:計算アルゴリズムＩに同じく、AC 成分の自乗を計算する。

(2) 第３ステップ：関数フィット

２個のガウス関数の和で最小自乗あてはめを行う。本テストの結果を図９と表１に示す。ピーク位置 21.14, 39.84 が得られた。この値はアルゴリズムＩの結果に極めて近い。なお、初期値の求め方は、次節に示す。

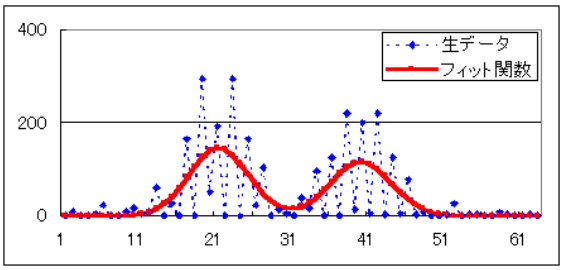


図9　生データと関数フィット結果

表1　パラメータ探索結果

	初期値		収束値	
パラメータ	ピーク1	ピーク2	ピーク1	ピーク2
位置x	21	39	21.14	39.84
振幅a	167	117	147.35	116.98
幅w	13	13	9.69	10.09

(3) 第４ステップ：表裏面高さと膜厚計算

計算アルゴリズムＩの第５ステップに同じ計算式で、高さと膜厚が求められる。

3.3.3 透明膜のある場合の初期値計算法

２つのピークのパラメータ初期値を適切に設定するために、十分滑らかな包絡線を得る方法を検討した。

(1) 自乗値位相シフト加算法：今回の実験の場合、標本点間隔が干渉波形の基本周期の 1/4 に近いので、標本値を１個横にずらすことは、波形の位相を 90°シフトすることに相当する。元の波形と位相シフトされた波形の自乗和は、次式のように近似正弦波形の自乗振幅であり、簡単な演算で包絡線が得られる。本方法は、標本点間隔が周期の 1/4、1/8、1/16、. . . の場合に有効であり、ヒルベルト変換を利用したピーク検出法[2]の簡易版と言えよう。

$$
\begin{aligned}
E^2 &= q(i)+q(i+1) \\
&= f(x)^2+f(x+\pi/4)^2 \\
&= [A\sin(x)]^2+[A\sin(x+\pi/4)]^2 \\
&= [A\sin(x)]^2+[A\cos(x)]^2 \\
&= A^2
\end{aligned}
$$

本テストの結果を図１０に示す。

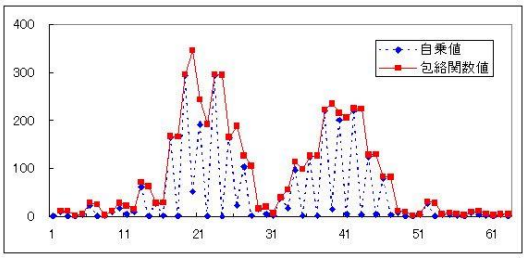


図10　自乗値位相シフト加算による振幅値

(2) 凸包絡：次のような３点近傍演算で、小さな凹点を無くすることができる。

$$q(i)=\max[q(i),\ (q(i-1)+q(i+1))/2]$$

この考え方を５点に拡張し、図１０の振幅値に施した結果を図１１に示す。

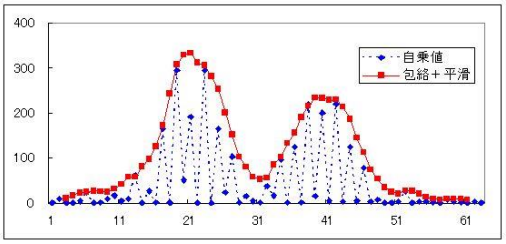


図11　凸包絡結果

(3) 平滑：前節(4)で述べた低域フィルタにより波形を平滑する。５点、２次近似の係数を畳み込んだ結果を図１２に示す。この結果、十分に滑らかな包絡線近似波形を得ることができ、ピークの位置、高さの概略値として、(21, 333) (39, 234) が得られる。これが前節の初期値として用いられた。

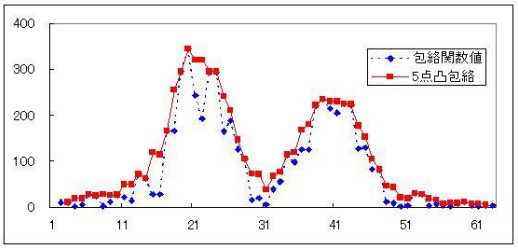


図12　平滑結果

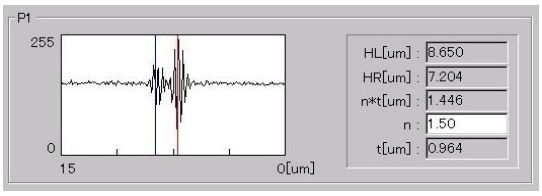
3.4 計算アルゴリズムの比較

上記２つのアルゴリズムを比較すると、安定性、計算負荷、多層膜対応の点でピーク分離法が優位と思われ、以下の実用機に採用した。なお、関数フィット法はピークが重複するような膜厚の薄い場合に優位となる。

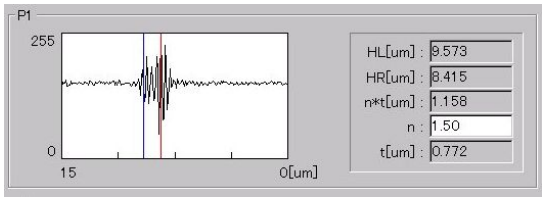
４．測定可能膜厚範囲

本測定方法はインターフェログラムのピークが分離可能であることを前提としているので、測定可能な膜厚の下限値が存在する。

Si ウエーハ上に形成された酸化膜のインターフェログラムと測定例を図１３に示す。光学的膜厚約 1.1μｍ（膜厚 0.77μｍ）は測定可能であり、下限値は約１μｍと推測される。



(a) 光学的膜厚=1.45μｍ



(b) 光学的膜厚=1.16μｍ

図13　酸化膜のインターフェログラム

5. 膜形状測定装置 SP-500F

前報告の表面形状測定装置 SP-500 [11] に上記アルゴリズムＩをベースとする透明膜対応ソフトをインストールした。主な仕様を表２に示す。

表２　膜形状測定装置 SP-500F の主な仕様

測定方式	白色光干渉法
測定機能	透明膜の表面・裏面形状、膜厚分布を同時測定
高さ測定範囲	0～100μｍ［オプション：350μｍ］
膜厚範囲	光学的膜厚(屈折率×膜厚)で、1～100μｍ
測定視野	レンズで可変（max 30mmφ）
測定時間	膜厚に依存するが、数秒／視野
表示単位	1nm
測定再現性	σ＝数 nm～十数 nm
測定画素数	標準 512×480 点／視野
水平分解能	レンズ倍率、カメラ画素数に依存

6. 測定例

6.1 膜厚段差

Siウエーハ上に形成された酸化膜段差を測定した結果を図１４に示す。裏面が平坦面として正しく測定されている。

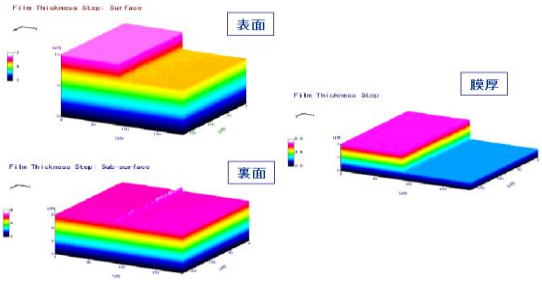


図14　膜厚段差測定結果

6.2 膜厚傾斜ウエーハ

Si ウエーハ上に形成された膜厚傾斜酸化膜を測定した結果を図１５に示す。大きく凹面状に反っている表面、裏面形状と、傾斜した膜厚分布が測定されている。

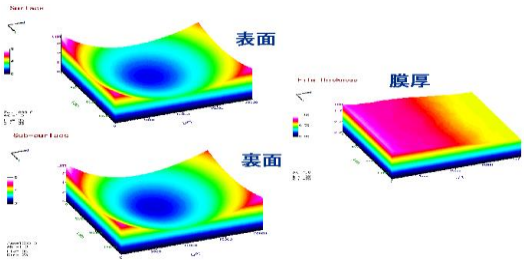
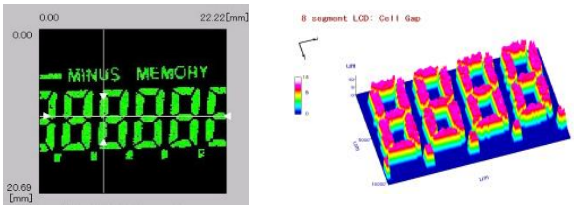


図15　膜厚傾斜ウエーハ測定結果

6.3 LCDセルギャップ

8 セグメント LCD のセルギャップの測定結果を図１６に示す。視野サイズ 20mm の広視野型干渉光学系を用いていて、ガラス基板の間隙（約 8μｍ）の分布が一括測定されている。



(a) 2次元表示　　(b) 3次元表示

図16　セルギャップ測定結果

6.4 屈折率の測定

ガラス基板上に塗布されたカラーレジストの膜厚測定を試みた。レジスト膜の屈折率が不明だったので、塗布膜の一部を剥離して膜形状を測定した。剥離部の段差（＝物理的膜厚 t）は、約 1.6μｍ、光学的膜厚(n*t)は約 3.0μｍであった。これから、屈折率ｎは約 1.9 と推測される。

屈折率の正しさは、剥離部の基板表面と膜裏面とが同一平面になることでも確認できる。屈折率を変更した時の裏面形状を図１７に示す。目視でも、ｎ＝1.90±0.02 と推定できる。

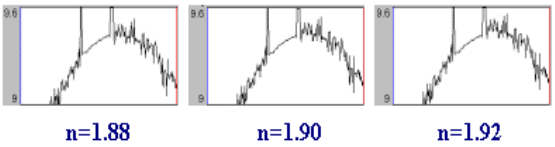


図17　屈折率nによる裏面形状
（中央左が剥離部）

6.5 水滴表面の測定

ガラス基板上に滴下された水滴形状の測定結果を図１８に示す。

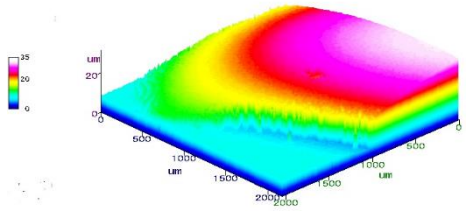


図18　水滴形状測定結果

6.6 測定再現性

Siウエーハ上に形成された酸化膜サンプルを繰り返し測定した結果を図１９に示す。膜厚測定値として、平均値＝4.609μm；標準偏差σ＝0.017μm；CV値＝0.36%が得られた。

なお、実用的には画面内領域の平均値が重要な場合も多く、レジスト膜において、約4000画素領域を平均して、平均値＝1.526μm；標準偏差σ＝3.4nm；CV値＝0.2%が得られている。

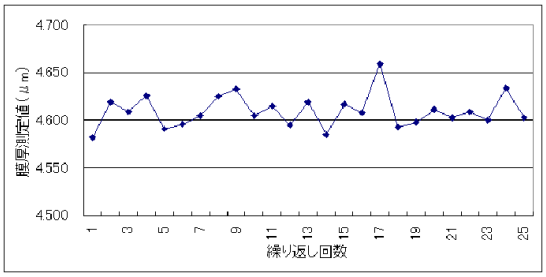


図19　膜厚測定の再現性

7. おわりに

垂直走査型白色干渉法において、透明膜の表面反射による干渉信号と、裏面反射による信号とを自動的に分離するアルゴリズムを考案し、このアルゴリズムを搭載した「光干渉式膜形状測定装置SP-500F」を開発した。テレビカメラ視野内の表面高さ、裏面高さ、膜厚分布を数秒以内に一括同時測定できる。従来困難であった

(1)透明膜に覆われた表面の形状測定

(2)膜厚分布の２次元一括測定

が可能になり、既に、半導体・液晶製造工程で有効に利用されている。

参 考 文 献

[1] P. J. Caber: Interferometric profiler for rough surface, Applied Optics, 32(19),3438-3441 (1993)

[2] S. S. C. Chim and G. S. Kino: Three-dimensional image realization in interference microscopy, Applied Optics, 31(14),2550-2553 (1992)

[3] P. de Groot and L. Deck: Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms, Optics Letters, 18(17),1462-1464 (1993)

[4] R. Dändliker, E. Zimmermann and G. Frosio: Electronically scanned white-light interferometry: a novel noise-resistant signal processing, Optics Letters, 17(9),679-681 (1992)

[5] 北川克一、小川英光、平林晃：信号処理に一般標本化定理を応用した光干渉式高速表面形状測定装置、第 13 回外観検査の自動化ワークショップ論文集、141-146（2001.12.7）

[6] P. A. Flournoy, R. W. McClure and G. Wyntjes: White-Light Interferometric Thickness Gauge, Applied Optics, 11(9), 1907-1915 (1972)

[7] T. Tsuruta and Y. Ichihara: Accurate measurement of lens thickness by using white-light fringes, Proc. ICO Conf. Opt. Methods in Sci. and Ind. Meas., Tokyo, 1974

[8] B. S. Lee and T. C. Strand: Profilometry with a coherence scanning microscope, Applied Optics, 29(26) 3784-3788 (1990)

[9] 中村収、豊田幸司：膜下パターンのコヒーレント・プローブ計測、光学、21(7)481-484(1992)

[10] 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)

[11] 東レ検査機器のホームページ：http://www.scn.tv/corp/torayins/

[12] 特許出願中

[13] 大津展之：判別および最小２乗規準に基づく自動しきい値選定法、電子通信学会論文誌、Vol.J63-D No.4, 349-356(1980)

[14] 高木幹夫, 下田陽久：画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp.503-504(1991)

[15] 南茂夫編著：科学計測のための波形データ処理、CQ出版, p.91(1997)

北川克一：1964 年東京大学工学部計数工学科卒業，同年東レ（株）に入社．1989 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．計測自動制御学会より技術賞（2001 年度）受賞．計測自動制御学会、精密工学会画像応用技術専門委員会の会員．

This material is the final manuscript for:
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
(2003.12.4-5)

This material is the final manuscript for:
Katsuichi Kitagawa: "3-D Profiling of a Transparent Film using White-Light Interferometry", Proc. of Vision Engineering Workshop (ViEW) 2003, 87-92 (Yokohama, Dec. 2003) (in Japanese).