

光干渉法による透明膜の測定

北川克一

1. はじめに

我々は、表面形状測定装置 SP-500/700 を利用した透明膜の表面形状や膜厚分布の測定技術を開発している。本資料では、先ず、測定対象が基板のない膜（独立膜）の場合に適用可能な膜厚測定法を述べる。

基板付きの膜（被覆膜）の場合には、以下の2つのケースがある。

(1)裏面反射光が無視できる場合：膜が不透明・半透明の場合や、透明膜と基板の屈折率差が小さい場合である。この場合は、従来の位相シフト法や白色干渉法を使用して、膜の部分的剥離などで形成した段差を測定することで膜厚が求められる。

(2)裏面反射光が無視できない場合：従来の技術では裏面反射が外乱となり、測定できない。この問題を解決するために開発された方法を第3章、第4章に述べる。

2. 透過干渉法

2.1 原理

基板のない「独立透明膜」の場合には、その膜を干渉光路の片側に挿入し、膜による光路差変化を測定することにより、膜厚が求められる。例えば、図1に示すように表面形状測定装置の測定視野の1部に透明膜を挿入して測定基準面を測定し、膜の有無による段差 $(n-1)*t$ から膜厚 t を求める。透明膜は測定基準面から離して、可干渉範囲外におく。この方法は膜厚が薄い場合や多層膜でも適用可能である。また、膜の位置やうねりの影響をうけず、安定した測定ができる。

2.2 測定例

図2は公称膜厚 $0.9\mu\text{m}$ のポリエステル・フィルムの測定結果であり、段差平均値 $0.58\mu\text{m}$ と屈折率 1.65 から、膜厚値 $0.89\mu\text{m}$ が得られた。また、複数のフィルム試料の公称膜厚と測定値の相関を図3に示す。

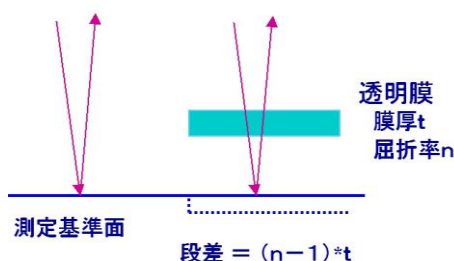


図1 透過干渉法による膜厚測定の原理

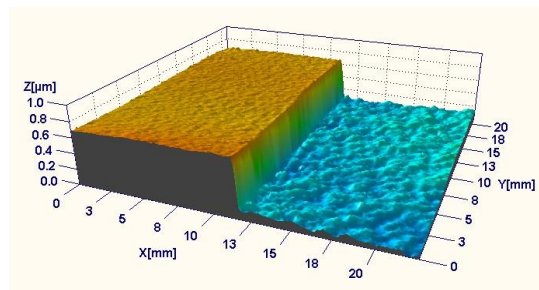


図2 透過干渉法による測定結果

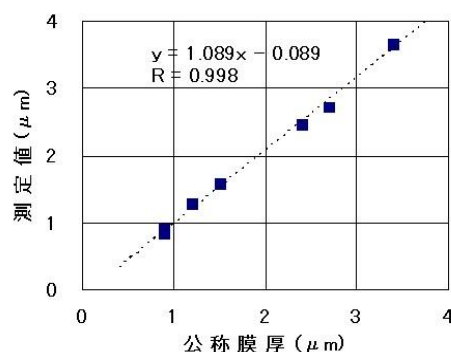


図3 フィルムの公称膜厚と測定値の相関

3. 透明厚膜の膜形状測定

3.1 従来法の問題点

表面に透明膜のある試料を測定すると、膜表面による干渉信号と膜裏面による干渉信号とが重畳し、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が古くから知られている[1]~[5]。

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[1][2]、複雑な計算アルゴリズム[4][5]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かった。当社は、全自動表面・膜厚形状測定を可能とするため、複数のピーク位置を自動的に検出するアルゴリズム (KF アルゴリズム) を開発し、世界初の膜形状測定装置として実用化した。

3.2 KF アルゴリズム^[6]

3.2.1 インターフェログラム

図4はテスト用のインターフェログラムで、Si

ウエーハ上に形成された約 1 μm の膜厚の酸化膜を白色光源で測定して得られた。Z 軸走査速度は 2.4 $\mu\text{m}/\text{sec}$ (標本点間隔=80nm) である。

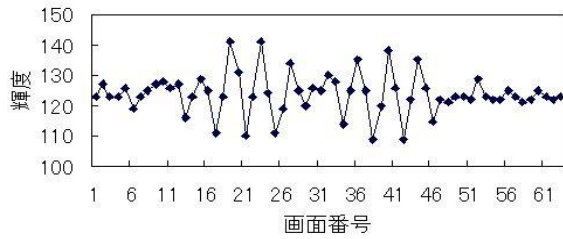


図4 透明膜のインターフェログラム

3.2.2 計算アルゴリズム

(1) 振幅計算

輝度データの AC 成分を求め、それを自乗すると図 5 の棒グラフで示される振幅が得られる

(2) ピーク分離

上記振幅データを、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)^[7] 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

図 5 の振幅データに対する評価関数は折れ線のようになり、データ番号 30 が最適しきい値となる。

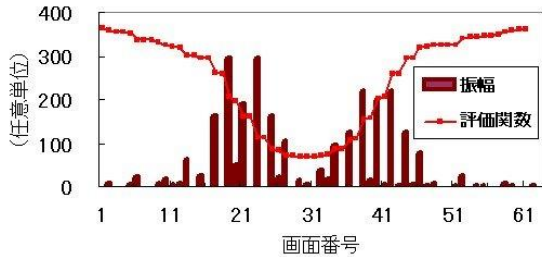


図5 振幅データと、大津の式の評価関数

(3) ピーク位置検出

上記で得られたしきい値を境界として、左右のピーク領域に分け、分離されたピーク領域ごとに、従来と同様のピーク位置検出を行う。

(4) 表裏面高さ と膜厚計算

ピーク位置から換算した高さ z_{p1}, z_{p2} と、膜の屈折率 n とから、次の 3 項目の測定値が求められる。

- ①透明膜の表面高さ = z_{p1}
- ②膜厚 $t = (z_{p1} - z_{p2}) / n$
- ③透明膜の裏面高さ = $z_{p1} - t$

3.3 測定可能膜厚範囲

本アルゴリズムにより測定可能な膜厚下限値を

探索した。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 6 に示す。光学的膜厚は 1.16 μm (物理的膜厚 0.77 μm) と測定され、これがほぼ下限値である。

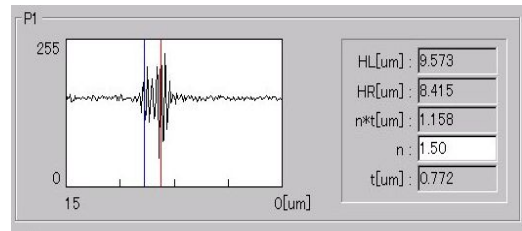


図6 酸化膜のインターフェログラム

3.4 測定例

3.4.1 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7に示す。右方膜厚が4 μm 、左方膜厚が1 μm 、表面段差が3 μm 、裏面が平坦面として正しく測定されている。

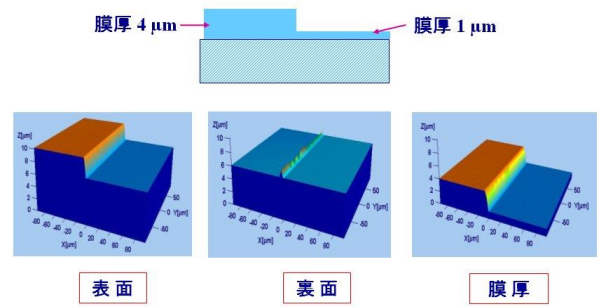


図7 膜厚段差測定結果

3.4.2 膜厚傾斜ウエーハ

視野サイズ 20mm の広視野型干渉光学系を用いて、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 8 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 (1 μm ~1.4 μm) が測定されている。

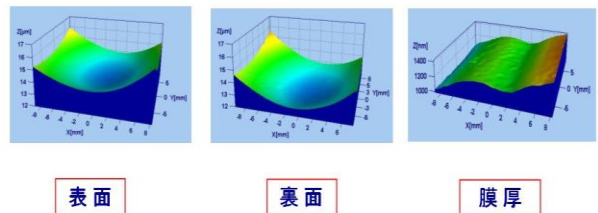


図8 膜厚傾斜ウエーハ測定結果

3.4.3 レジスト膜の膜形状と屈折率の測定

ガラス基板上に塗布されたレジスト膜の膜形状測定を試みた。レジスト膜の屈折率が不明だったので、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 1.6 μm 、光学的膜厚 ($n \cdot t$) は約 3.0 μm であった。これから、屈折率 n は約 1.9 と推測される。

また、正しい屈折率を入力すると、剥離部の基板表面と膜裏面とが同一平面になることを利用して、図

9のように屈折率を変化させて裏面形状を観察し、屈折率 $n=1.90\pm 0.02$ と推測できた。得られた屈折率を用いて測定した表面・裏面形状と膜厚分布の結果を図10に示す。

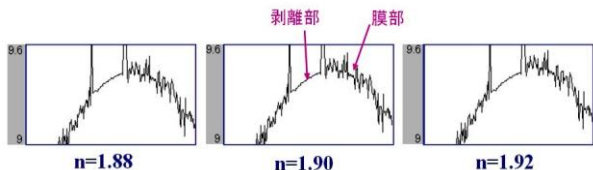


図9 屈折率 n による裏面形状変化



図10 レジストの膜形状測定結果

3.4.4 測定再現性

Siウエーハ上に形成された公称膜厚 $4\mu\text{m}$ の酸化膜サンプルの 100×100 画素平均膜厚値の再現性を図11に示す。平均値 $=4.056\mu\text{m}$ 、標準偏差 $\sigma = 3\text{nm}$ 、CV値 $=0.1\%$ が得られた。

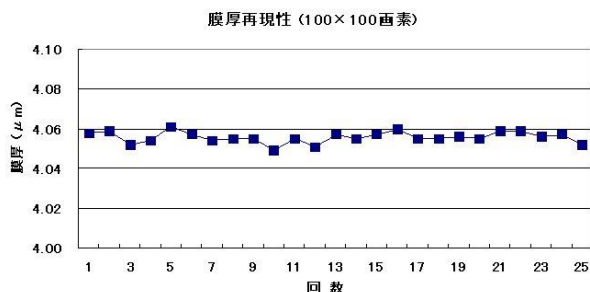


図11 膜厚測定の再現性

3.4.5 断層表示

透明膜の場合、断層構造を表示できる。図12はMEMS試料の表面形状と、ある断面ラインでの断層構造を表示したものである。膜の有無や多層膜構造などが観察可能である。

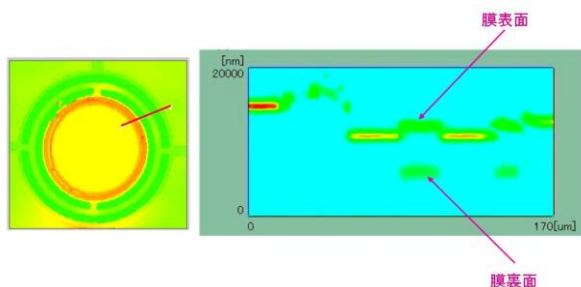


図12 MEMS 試料の表面形状と断層画像

4. 透明薄膜の膜形状測定

4.1 NF アルゴリズム

透明膜の膜厚がコヒーレント長に比べて薄い場合は、2つのピークが重畳し、上記KF法によるピークの分離は困難である。当社は物理モデルをベースとした薄膜測定アルゴリズム (NF アルゴリズム) を開発し^[8]、これを搭載した薄膜対応表面形状測定装置 SP-700 を商品化した。

4.2 測定例

4.2.1 薄膜段差

300nm の Si 酸化膜を部分的に約 200nm エッチングして作成した薄膜段差 (図13) の測定結果を図14に示す。約 200nm の表面段差と、 $300\text{nm}/100\text{nm}$ の膜厚形状が測定できている。

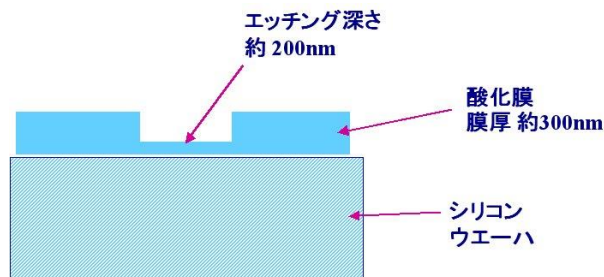


図13 薄膜段差試料断面図

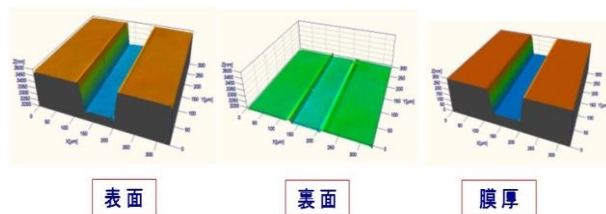


図14 薄膜段差の測定結果

4.2.2 膜厚測定範囲

図15に示すような膜厚傾斜ウエーハを測定した。 10mm 間隔の膜厚測定値は図16のようになり、 50nm 以下の膜厚も測定可能と予想される。

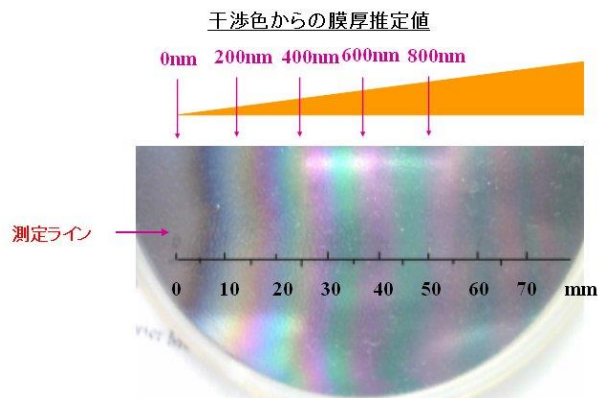


図15 膜厚傾斜ウエーハ

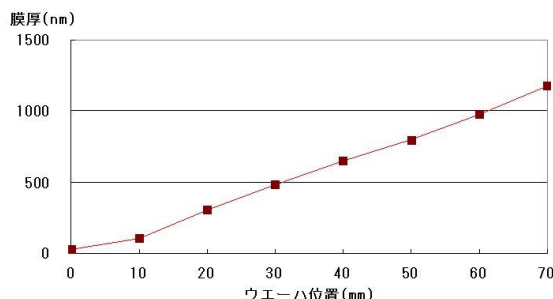


図 16 膜厚傾斜ウエーハの膜厚測定値

4.2.3 測定再現性

薄膜段差試料 (図 13) における 10×10 画素平均膜厚値の再現性を図 17 に示す。平均値は 301.5nm と 99.3nm; 標準偏差σは 0.21nm と 0.30nm であった。

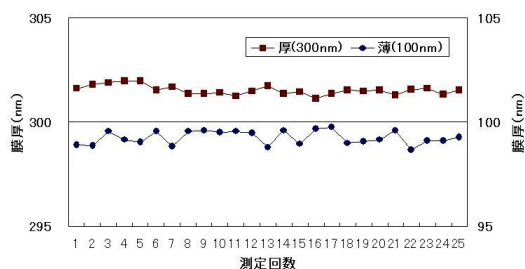


図 17 薄膜段差試料の膜厚測定値再現性

4.2.4 CMP 試料

半導体 CMP プロセスにおける透明膜の形状測定結果を図 18 に示す。研磨時間が 0→20→60sec と進むに従い、表面段差が 300→43→16nm と、中央部膜厚が 1216→709→466nm と、周辺部膜厚が 1206→956→740nm と減少している。一方、290nm の段差のある裏面形状は変化していない。

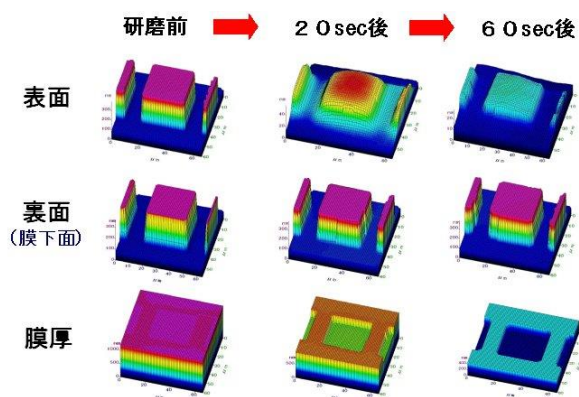


図 18 CMP試料の測定結果

5. おわりに

光干渉法による膜厚や膜形状測定への応用について述べた。

従来は「外乱」として扱われていた膜裏面からの反射信号を積極的に活用して、透明膜に覆われた表面の表面高さ、裏面高さ、膜厚分布を同時測定できる信号処理アルゴリズムを開発した。

(1) KF アルゴリズム: 膜厚が約 1μm 以上の厚膜に適

用可能で、世界初の膜形状測定装置 SP-500F に搭載された^[9]。

(2) NF アルゴリズム: 膜厚が 1μm 以下の薄膜にも適用可能で、世界初の薄膜対応表面形状測定装置 SP-700 に搭載された。

本開発により、透明膜に覆われた物体の表面形状を、裏面反射の影響を受けることなく正確に測定することが可能になった。また、透明膜に覆われた膜下パターン形状の測定も可能である。

さらに、本装置の膜厚測定機能を従来の代表的な膜厚測定法である分光法やエリプソメトリと比較すると、試料や光学系を移動することなく、カメラ視野内の数十万点の膜厚分布を短時間で一括測定できるという特長がある。

半導体、FPD、フィルム、光学部品などのプロセス解析、品質管理ツールとして、広い応用が期待される。

参考文献

- [1] P.A.Flournoy, R.W.McClure and G.Wyntjes: White-Light Interferometric Thickness Gauge, *Appl. Opt.*, 11(9), 1907-1915 (1972)
- [2] 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*, 369-372 (1974)
- [3] B.S.Lee and T.C.Strand: Profilometry with a coherence scanning microscope, *Appl. Opt.*, 29(26), 3784-3788 (1990)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 北川克一: 白色光干渉法による透明膜の形状・膜厚同時測定, 第 20 回センシングフォーラム資料, 169-172 (2003)
- [7] 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)
- [8] 北川克一: 表面形状と膜厚分布計測の最近の話題, 2006 年度精密工学会春季大会シンポジウム資料, 15-16 (2006)
- [9] 現在, SP-500F は, SP-700 に統合されている。

本資料は、下記論文の内容を編集したものである。
北川克一: 「光干渉法による透明膜の三次元形状測定」、光アイアンス、2008 年 7 月号, 7-13 (2008)

【参考図】厚膜と薄膜の定義

