

干渉色による高速膜厚分布測定装置の開発

東レエンジニアリング（株） 北川克一，○坪井辰彦，大槻真左文

Fast Film Thickness Profiler Based on Interference Color

Toray Engineering Co. Katsuichi KITAGAWA, Tatsuhiko TSUBOI, Masafumi OTSUKI

概要：透明膜の膜厚分布測定装置を開発した．RGB3色の単色光を照射して得られる1枚の干渉色画像から，面内140万点の膜厚を0.3秒以下で測定できる．視野サイズは1mm～200mm，対象膜厚は20nm～8 μ mである．「自己校正機能」を備えた独自のアルゴリズムにより，膜厚既知の試料による校正が不要で，照明や試料反射率の変化に影響されない特長がある．

1. はじめに

従来の透明膜の膜厚測定法（分光法やエリプソメトリ）は，基本的に点計測であり，膜厚分布を求めるには，多大な時間を必要とする．また，測定スポットサイズの制約から，水平分解能にも限界がある．

我々は，上記問題を解決するため，新たな透明膜の膜厚分布測定法[1][2]を開発した．3色の単色光を照射して得られる1枚の干渉色画像から，高速・高分解能で膜厚分布が測定できる．

2. 測定原理

測定原理は，シャボン玉の色が膜厚によって虹色に変わる薄膜干渉の原理を利用している．RGB3色の単色光を透明膜に照射し，その干渉色画像を2次元カラーカメラで撮像し，その1枚の画像から各画素毎に膜厚を計算する．カラー画像の撮像系を図1に示す．

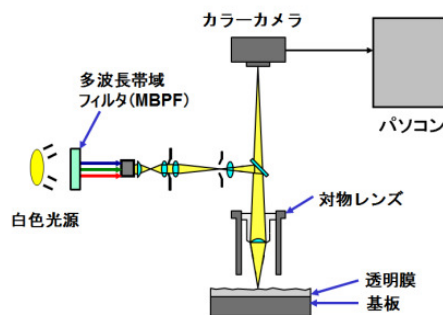


図1 3波長カラー画像撮像系

図2に示すように，光学系と測定対象（基材・膜種）が決まれば，観測される干渉色は膜厚値によって一意に決まる．干渉色を構成するRGB輝度信号は，式(1)または(2)で表される．

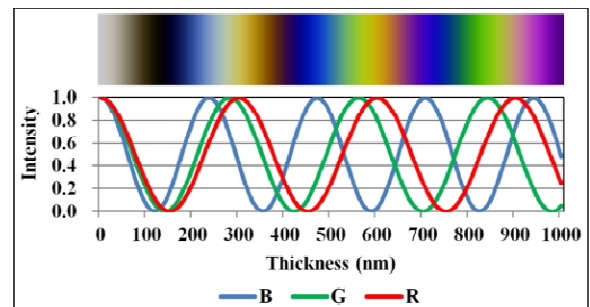


図2 膜厚と干渉色の関係

$$g(i, j) = a(j)[1 + b(j) \cos \{\phi(i, j)\}] \quad (1)$$

$$g(i, j) = a(j)[1 + b(j) \cos \{4\pi(i) / \lambda(j)\}] \quad (2)$$

ここで，干渉縞モデルの輝度を $g(i, j)$ ，画面内の観測点を $i(i=1, 2, \dots, n)$ ，波長番号（今回はRGBの3波長）を $j(j=1, 2, \dots, m)$ ，波長番号 j の平均輝度を $a(j)$ ，波長番号 j の変調度を $b(j)$ ，波長番号 j の点 i の位相を $\phi(i, j)$ ，点 i の光学膜厚を $t(i)$ ，波長番号 j の波長を $\lambda(j)$ で表す．また，膜屈折率が基板屈折率より小さく，平均輝度 $a(j)$ ，変調度 $b(j)$ が画面内で一定であり，波長のみに依存すると仮定している．

このモデルに，複数点の観測輝度値を最小二乗適合することを考える．すなわち，次式の誤差二乗和を最小にする変数 $a(j)$ ， $b(j)$ ， $t(i)$ を求める．

$$J[a(j), b(j), t(i)] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [g(i, j) - g_{ij}]^2 \quad (3)$$

ここで， $g(i, j)$ は式(1)で示されるモデル輝度値， g_{ij} は観測輝度値である．

波長数を m 個，点数を n 個とすると，適合により未知パラメータが求められるための条件は， $mn \geq 2m + n$ であるから，必要な点数 n は，

$$n \geq 2m / (m - 1) \quad (4)$$

となる． $m=3$ の場合は， $n \geq 3$ が必要条件である．

すなわち、3波長、 n 点の適合の場合、観測値 $3n$ 個を用いて、 n 個の膜厚と6個の波形パラメータを推定する。

上記の最小二乗適合は、パラメータ数が大きくなると、計算負荷が高くなる。よって、適合に使用する点数を数個～数十個に制限し、その他の点は、適合で得られた干渉縞モデルのパラメータを利用して、以下のアルゴリズム（ACOS法と呼ぶ）で求めることが实际的である。

式(1)に観測値を代入して、次式により位相を求める。

$$\phi(i, j) = \cos^{-1}[\{g_{ij}/a(j)-1\}/b(j)] \quad (5)$$

ここで、 $\cos^{-1}$ は逆余弦関数であり、その値域は、 $[0, \pi]$ である。

得られた位相から、次式により、点 i における波長 j の膜厚候補 $t(i, j)$ を求める。

$$t(i, j) = [\pm\phi(i, j)/2\pi + N(i, j)](\lambda_j/2) \quad (6)$$

ここで、 $N(i, j)$ は竝次数（整数）である。

上記で得られた膜厚候補から、合致法[3]により、次数 $N(i, j)$ を決定して、各波長の膜厚候補 $t(i, j)$ を求め、それらの平均値を膜厚 $t(i)$ とする。

3. 膜厚分布測定実験

3.1 光学系構成

前述の測定原理で膜厚分布を測定するため、図1に示す光学系の構成で試料の干渉色画像をカラーカメラで撮像する。カメラは、SXGA高精細3CCD方式プログレッシブカラーカメラで、有効画素数約140万画素（1344x1024）である。顕微鏡は、金属顕微鏡（対物レンズ5X）を使用した。照明については、白色光源に3波長帯域フィルタを挿入し、RGB3波長の単色光を得ている。また、使用した3波長帯域フィルタの透過波長は、図3に示すように、B(470nm)、G(560nm)、R(600nm)であり、半値幅は約10nmである。

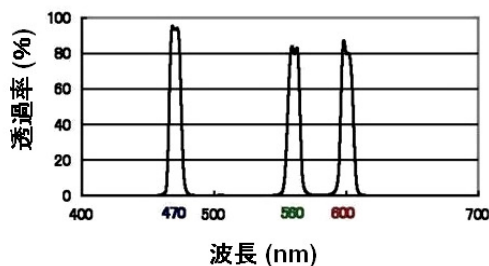


図3 3波長帯域フィルタの特性

3.2 標準薄膜試料測定実験

公称物理膜厚が0, 100, …, 500nmの標準膜厚試料（Mikropack製; 図4(a)）を使用し、前述の光学系で各

膜厚領域を撮像して得られた6枚の画像をつなぎ合わせて、図4(b)に示す画像を得た。提案アルゴリズムを当社表面形状測定装置SP-500に実装した。非線形最小二乗問題の解法には、Davidon-Fletcher-Powell法[4]を使用した。適合には、図4(b)に示すように、各膜厚領域の中心点（計6点）を使用した。膜厚測定値と公称値との相関を図4(c)に示し、全画素の膜厚を計算した膜厚分布測定結果を図4(d)に示す。両図から、ほぼ正しい膜厚推定ができていると判断できる。

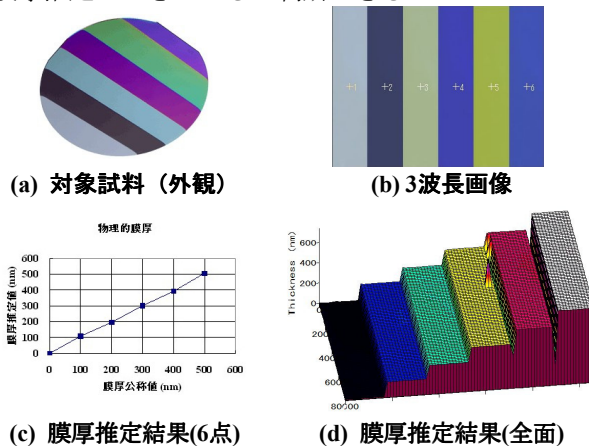


図4 標準膜厚試料の膜厚推定

3.3 厚膜段差試料測定実験

膜厚が4μmと1μmの段差を持つ厚膜段差を測定した。前述の光学系で撮像した干渉色画像を図5(a)に示す。図5(b)に示すように、1μmと4μmの膜厚段差を良好に測定することができた。

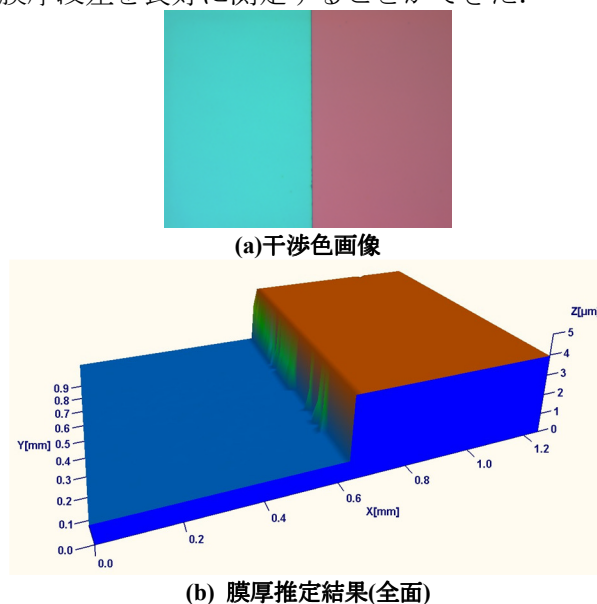


図5 厚膜段差試料の膜厚推定

3.4 測定計算時間

開発した膜厚分布測定法の計算時間を算出した。140万画素の画像に対する計算時間の平均値を表1に示す。なお、全ての計算は、Windows PC(CPU: Intel Core i7 2.5GHz)で実施した。合致法の計算をルックアップテーブルにより高速化することで、面内140万点の膜厚を0.3秒以下で測定できた。

表1 測定計算時間

プロセス		時間 (ms)	
		高速化前	高速化後
位相計算	B	58.2	57.3
	G	61.2	61.0
	R	59.2	59.0
合致法計算		829.4	86.2
合計		1008.0	263.5

4. 広視野タイプでの膜厚分布測定

半導体ウェーハの塗布膜や酸化膜などの面内膜厚分布を測定するために、図6に示す広視野タイプの装置を開発した。視野は100mm角であり4インチウェーハが一括撮像できる。LED面照明で試料に同軸照射し、試料の干渉色画像をカラーカメラで撮像し、ノートパソコンで膜厚分布を計測・表示する。カメラの前に3波長帯域フィルタを挿入し、RGB3波長（単色光）の干渉画像を得ている。

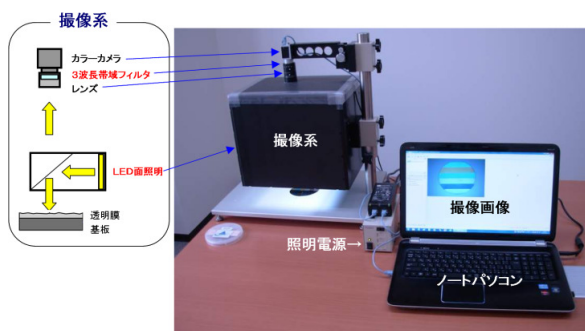
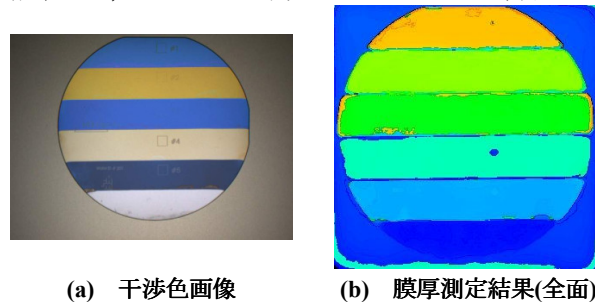


図6 広視野タイプ測定装置

4.1 標準薄膜試料測定実験

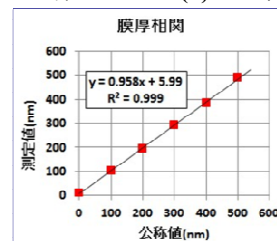
前節で使用した標準膜厚試料（図4(a)）を用いて、4インチウェーハ全面を撮像した干渉色画像を図7(a)に示し、膜厚分布測定結果を図7(b)に示し、膜厚測定値と公称値との相関を図7(c)に示す。図7(c)の相関関係の

結果から、ほぼ正しい測定ができていると判断できる。



(a) 干渉色画像

(b) 膜厚測定結果(全面)

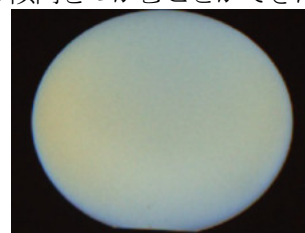


(c) 公称値との相関

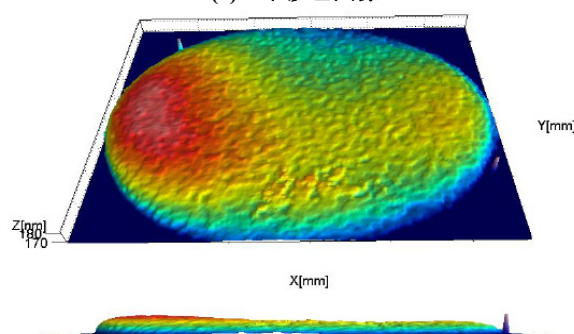
図7 ウェーハ全面のSiO₂膜厚分布測定

4.2 LEDエピ膜の測定実験

LEDエピ膜のサンプルを用いて、膜厚測定を実施した。撮像したLEDエピ膜の干渉色画像を図8(a)に示し、LEDエピ膜の測定結果を図8(b)に示す。この実験で、全体の膜厚の傾向をつかむことができた。



(a) 干渉色画像



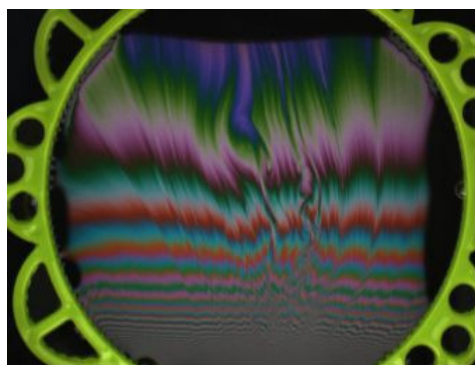
(b) 膜厚測定結果

図8 LEDエピ膜の膜厚分布測定

4.3 シャボン膜の測定実験

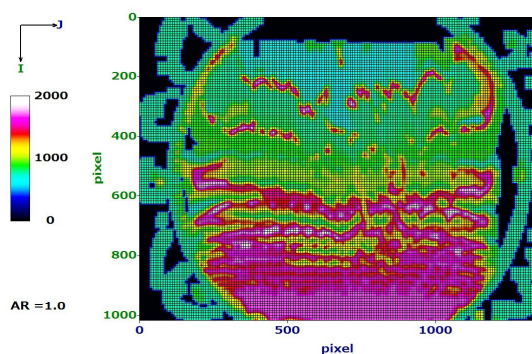
市販シャボン液を用いて、シャボン膜厚の測定を実施した。撮像したシャボン膜の干渉色画像を図9(a)に示し、シャボン膜の測定結果を図9(b)に示す。

シャボン膜は液体であるため、風の影響で膜厚が安定しておらず、合致法での次数飛びの発生が見られるが、全体の膜厚傾向はつかむことができた。



(a) 干渉色画像

Soap Bubble 12/08/14



(b) 膜厚分布測定結果

図9 シャボン膜の膜厚分布測定

参考文献

- [1] 北川克一：3波長干渉を用いた透明膜の膜厚分布測定－広域モデル適合アルゴリズムの応用展開－，精密工学会 2012 年春季大会学術講演会講演論文集，1037- 1038 (2012)
- [2] 北川克一，大槻真左文：3波長干渉を用いた透明膜の膜厚分布測定装置の開発－広域モデル適合（GMF）アルゴリズムの拡張－，精密工学会 2012 年秋季大会学術講演会講演論文集，(2012)
- [3] 北川克一，坪井辰彦，杉原洋樹，杉山将，小川英光：[技術賞解説論文]多波長ワンショット干渉計測技術の開発と実用化，精密工学会誌，78 (2) 112-116 (2012)
- [4] R. Fletcher and M.J.D. Powell: A rapidly convergent descent method for minimization, Computer Journal, **6**, 163-168 (1963) .

5. 結論

高速，かつ高精度な膜厚分布測定装置を開発した．3波長の干渉画像から得られる複数点の輝度値に，干渉信号モデルを最小二乗適合し，膜厚とモデルパラメータを一括して求める．光学系が単純であり，装置校正が不要という特徴がある．各種膜厚標準試料を測定し，本装置で，面内140万点の膜厚を0.3秒以下で測定できることを確認した．

また，広視野の測定装置を開発し，シャボン膜厚の全体の傾向をつかむことに成功した．従来にない特徴を有する膜厚測定法として，今後の発展が期待される．