

# 干渉色画像解析による透明膜の広視野膜厚分布測定装置の開発\*

北川 克一\*\* 大槻 真左文\*\*

## Wide-view Transparent Film Thickness Measurement System by Interference Color Analysis

Katsuichi KITAGAWA and Masafumi OTSUKI

Conventional transparent film thickness measurement methods such as spectroscopy are essentially capable of measuring only a single point at a time, and their spatial resolution is limited. We have developed a wide-view film thickness measurement system based on an extended global model-fitting algorithm developed for three-wavelength interferometric surface profiling. It estimates the film thickness distribution from an interference color image captured by a color camera with three-wavelength illumination. The basic performance was experimentally proved, and the system was successfully applied to measure the air gap thickness of Newton's rings and the thickness of a vertical flowing soap film. Its key features are: (1) high spatial resolution, (2) high-speed measurement, (3) low cost and simple optics, and (4) no preliminary calibration required.

**Key words:** Thickness measurement, thin film, interference color, three-wavelength, color analysis, model-fitting, soap film

### 1. 緒 言

代表的な透明膜の膜厚測定法として、分光法とエリプソメトリがある。これらの方法は、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、測定スポットのサイズの制約から、水平分解能にも限界がある。この問題を解決するために、テレビカメラを利用するいろいろな面計測手法が提案されている。たとえば、分光イメージング方式<sup>1)2)</sup>や偏光イメージング方式<sup>3)4)</sup>である。しかし、これらの手法は高価なカメラや複雑な機構を必要とする。

一方、白色照明（または、多波長照明）を用いて干渉縞の色彩解析により膜厚や高さを求める方法が提案されている。薄膜の干渉色は、シャボン膜や油膜で観察されるもので、色と膜厚の関係は、ニュートン以来、古くから研究されている。この関係を利用して、半導体の膜厚<sup>5)6)</sup>、磁気ヘッド浮上量<sup>7)</sup>、潤滑油膜厚<sup>8)9)</sup>、表面形状<sup>10)11)</sup>などの測定が提案されている。たとえば、Eguchiら<sup>9)</sup>は、カラーカメラで撮像した画像を色相に変換し、あらかじめ求めた校正データから、潤滑油の膜厚を求めている。

しかし、干渉色から膜厚や高さへの変換テーブルをあらかじめ求めておくこと、すなわち、校正が必要であり、その関係が照明系、光学系、撮像系、対象表面など多くの要因で変化すること、また、色空間の中で近接した色相が周期的に顕れ、識別が困難なことなどが問題であり、実用性に乏しい。

我々は、上記問題を解決するため、3波長ワンショット干渉法のために開発した広域モデル適合（Global Model Fitting; GMF）アルゴリズム<sup>12)~15)</sup>を拡張展開し、新たな膜厚分布測定法（GMFT; Global Model Fitting for Thickness）<sup>16)~19)</sup>を開発した。この方法は、3波長照明下の薄膜干渉色画像をカラーカメラで撮像し、その輝度データを干渉色モデルに適合することにより、各画素の膜厚を推定する。本方法の妥当性は、計算機シミュレーションと、顕微鏡を用いた実試料実験により確認さ

れている<sup>18)19)</sup>。本報では、産業界においてニーズの高い広視野膜厚分布測定装置の開発と、実試料による実験結果を報告する。

### 2. 測 定 装 置

#### 2.1 装置構成

開発した広視野型装置の外観と光学系の構成を図1(a)(b)に示す。面状白色LEDにより測定対象を同軸落射照明し、カラーカメラ（単板；640×480画素）の直前に多波長帯域フィルタ<sup>20)</sup>を挿入することにより、3波長干渉色画像の撮像系を実現した。多波長帯域フィルタの分光透過率は、図2に示すように、中心波長が470 nm(B), 560 nm(G), 600 nm(R)であり、その帯域幅は約10 nmである。光学系が顕微鏡ではなく、通常のカメラ撮像系であるので、より広い視野（約120×100 mm）の画像を撮像できる。

図3は、使用したカメラの分光感度特性と、上記3波長を示す。カメラのBGR信号にはクロストークが生じるが、2.3.2節で述べるように、ソフトウェアで補正する。

#### 2.2 基本アルゴリズム

筆者らの開発したアルゴリズム（GMFT法）<sup>16)~19)</sup>の概要を述べる。

##### 2.2.1 膜厚と干渉色の関係

薄膜の表面反射光と裏面反射光による干渉を考える。多重

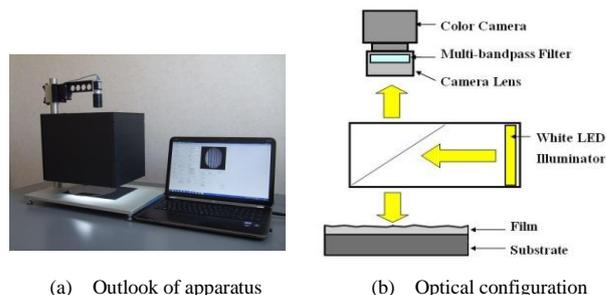


Fig.1 Wide-view thickness profiler

\* 原稿受付 平成25年5月1日

\*\* 正会員 東レエンジニアリング(株)(滋賀県大津市大江1-1-45)

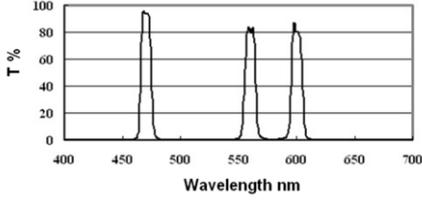


Fig.2 Spectral transmittance of the multi-bandpass filter

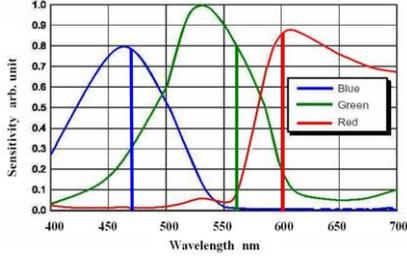


Fig.3 Spectral sensitivity of camera and three wavelengths

反射を無視すれば、反射光の和は次式で表される。

$$I(\lambda) = I_1(\lambda) + I_2(\lambda) \pm 2\sqrt{I_1(\lambda)I_2(\lambda)} \cos\{\delta(\lambda)\} \quad (1)$$

ここで、 $I_1$ 、 $I_2$  は両反射波の強さ、 $\lambda$ は波長、 $\delta$ は位相差である。また、 $\pm$ 符号は裏面反射光の位相反転の有無に依存し、膜屈折率  $n$  が基板屈折率  $n_B$  よりも小さければ+、大きければ-である。物理膜厚を  $t$ 、膜屈折率を  $n(\lambda)$  とし、垂直入射を仮定すると、両反射光の光路差は、 $2n(\lambda)t$  となる。よって、位相差は  $\delta(\lambda) = 4\pi n(\lambda)t/\lambda$  となる。この式を式(1)に代入し、屈折率の波長依存性が無い (すなわち、 $n(\lambda) = n$ ) と仮定すると、次式が得られる。

$$I(\lambda) = I_1(\lambda) + I_2(\lambda) \pm 2\sqrt{I_1(\lambda)I_2(\lambda)} \cos(4\pi nt/\lambda) \quad (2)$$

照明が3波長 (B, G, R) で、それらの波長が、 $\lambda_B = 470$  nm,  $\lambda_G = 560$  nm,  $\lambda_R = 600$  nm であり、 $I_1 = I_2 = 1/4$  である場合の反射光量と膜厚の関係を表す式(2)により求めて図示すると、図4(a)(b)のグラフが得られる。図4(a)は  $n < n_B$  の場合であり、図4(b)は  $n > n_B$  の場合である。また、グラフの上のカラーチャートは、得られた BGR 光量値から合成した干渉色と膜厚の関係である。

なお、図4の横軸の膜厚値は、物理膜厚  $t$  と屈折率  $n$  の積である光学膜厚であり、以下、本報では特に記載がない限り、膜厚は光学膜厚を意味する。

### 2.2.2 GMFT アルゴリズム

画面内の観測点  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) における波長番号  $j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) の干渉縞モデルの輝度  $g(i, j)$  は、式(2)を変形して、次式で表される。

$$g(i, j) = a(j)[1 + b(j)\cos\{\phi(i, j)\}] \quad (3)$$

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

ここで、 $a(j)$ 、 $b(j)$  は平均輝度と変調度(modulation)、 $\phi(i, j)$ は位相、 $t(i)$ は光学膜厚、 $\lambda_j$ は波長である。また、平均輝度  $a(j)$ 、変調度  $b(j)$ が画面内で一定と仮定している。対象面の膜構成が同一であれば、一般に成立する仮定である。

このモデルに、複数点の観測輝度値を最小二乗適合して、未知変数  $a(j)$ 、 $b(j)$ 、 $t(i)$ を求める。すなわち、次式の誤差二乗和を最小にするパラメータ  $a(j)$ 、 $b(j)$ 、 $t(i)$ を求める。

$$J[a(j), b(j), t(i)] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [g(i, j) - g_{ij}]^2 \quad (5)$$

ここで、 $g(i, j)$ は式(4)で示されるモデル輝度値、 $g_{ij}$ は観測輝度

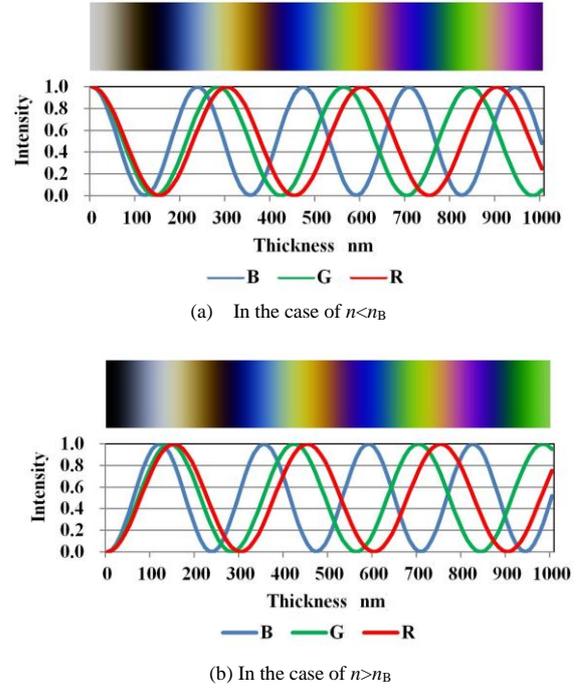


Fig.4 BGR intensities and synthesized color chart as a function of film thickness

値である。

次に、上記の未知パラメータが求められる条件を考える。波長数を  $m$  個、点数を  $n$  個とすると、未知パラメータ数は、 $2m+n$  個となる。1点から  $m$  個の輝度信号が得られるので、必要条件は、

$$n \geq 2m/(m-1) \quad (6)$$

となり、3波長の場合、 $n \geq 3$  となる。

図5は、波長数が3で、点数が  $n$  の場合の本アルゴリズムの計測原理を説明するものである。 $3n$  個の観測輝度値から、 $n$  個の膜厚と6個の波形パラメータを推定する。

この非線形最小二乗問題は、最急降下法に代表される反復法により解くことができ、筆者らは、Davidon-Fletcher-Powell法<sup>22)</sup>を使用した。反復法による解法には初期値が必要であり、平均輝度  $a(j)$ の初期値は観測輝度値の最大値と最小値の平均とし、変調度  $b(j)$ の初期値は観測輝度値のレンジ(最大と最小の差)を  $2a(j)$ で除した値とする。各点の膜厚の初期値は、予想される膜厚とする。しかし、本アルゴリズムの最小二乗適合は、周期関数である  $\cos$  関数を含むため、局所的極小解が多数存在する。よって、初期値を適切に設定することが重要である。その必要精度や問題の回避策は、5(4)節で考察する。

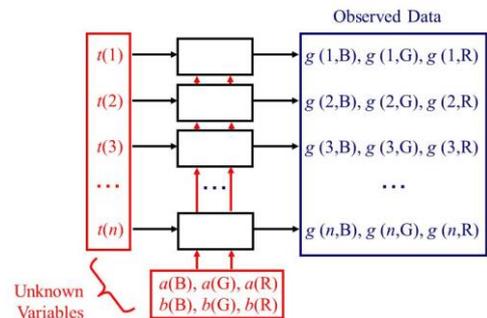


Fig.5 Principle of the GMFT method in the case of three wavelengths and  $n$ -point fitting

### 2.2.3 ACOS アルゴリズム

上記の最小二乗適合は、パラメータ数が多くなると、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、以下の方法（ACOS 法と呼ぶ）で求める。

まず、式(3)を変形して得られる次式により、輝度から位相を求める。

$$\phi(i, j) = \cos^{-1}[(g_{ij}/a(j) - 1)/b(j)] \quad (7)$$

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。

$$t(i, j) = \{\pm\phi(i, j)/2\pi + N(i, j)\}(\lambda_j/2) \quad (8)$$

ここで、 $N(i, j)$ は繰り回数（整数）である。

得られた膜厚候補から、合致法<sup>20)</sup>により、次数  $N(i, j)$ と位相の正負を決定し、 $t(i)$ を求める。図6は合致法の説明図であり、各波長の膜厚候補がプロットされている。この例では合致誤差最小解として、510 nm が選ばれる。

## 2.3 実装ソフトウェア

### 2.3.1 計算フローチャート

本提案アルゴリズムを、C 言語を用いて、Windows PC に実装した。計算フローチャートを図7に示す。撮像したカラー画像を B, G, R 成分に分解し、クロストーク補正、シェーディング補正を施す。次に、適合点を選択し、GMFT 法により、適合点の膜厚と波形パラメータを求める。このパラメータは同一光学条件で撮像された他の画像にも適用できる。よって、これをレシピと呼ぶ。

さらに、得られたレシピを利用して、ACOS 法により、全点の膜厚をその輝度値から求める。以下、フローの順に各ステップの詳細を述べる。

### 2.3.2 クロストーク補正

カラーカメラの分光感度曲線は、図3のように、各色間でオーバーラップしているため、B, G, R 信号間にはクロストークがある。そこで、観測輝度( $B', G', R'$ )が、真の輝度( $B, G, R$ )とクロストークの強度を表す係数  $a, b, c, d, e, f$  により

$$\begin{cases} B' = B + aG + bR \\ G' = cB + G + dR \\ R' = eB + fG + R \end{cases} \quad (9)$$

と表されると仮定して、クロストーク補正を行う<sup>21)</sup>。係数は、各波長の単波長帯域フィルタをカメラ前に挿入して3枚の画像を撮像し、B, G, R 輝度の相関から求める。

図8は、本装置のクロストーク係数推定結果を示す。3枚の画像から、輝度間の相関を求め、図8(a)(b)(c)を得た。これらから、図8(d)のクロストーク係数を得た。

### 2.3.3 シェーディング補正

顕微鏡型の場合に比べ、広視野型の場合には、視野内の照明ムラ（シェーディング）が大きく、その補正が必須である。筆者らは、白色基準画像と黒色基準画像を使用して、各点の輝度値を以下の式で補正した。

$$g'(i, j) = k(i, j)\{g_w(i, j) - g_b(i, j)\} \quad (10)$$

ここで、 $g(i, j)$ ,  $g'(i, j)$ は補正前後の輝度、 $g_b(i, j)$ は黒色基準画像輝度、 $k(i, j)$ は補正係数であり、

$$k(i, j) = \frac{\max\{g_w(i, j) - g_b(i, j)\}}{\max\{g_w(i, j) - g_b(i, j)\}} \quad (11)$$

である。ここで、 $g_w(i, j)$ は白色基準画像輝度、 $\max\{g_w(i, j) - g_b(i, j)\}$ は画面内での最大値である。白色基準画像は、市販の平面ミラーを複数箇所撮像し、その平均画像とした。

## 3. 性能評価実験

### 3.1 実験方法

実試料として、公称物理膜厚が 0, 100, ..., 500 nm の標準膜厚試料（Mikropack 社製 100 mm ウェーハ；SiO<sub>2</sub>/Si 膜；膜屈折率  $n=1.46$ ）を使用し、図9(a)に示す画像を得た。適合には、同図に白数字で示した各膜厚領域の中心部2点（計12点）を使用した。なお、ノイズ除去のために画像には9×9画素メディアンフィルタをかけた。

### 3.2 実験結果

#### 3.2.1 精度と再現性

12点の適合により得られた膜厚値とパラメータを図9(b)に示す。また、画面内全点の膜厚分布を図9(c)に示す。得られた結果から、各領域中央部の50×50画素の平均値を求め、膜厚推定値とした。膜厚推定値とメーカー校正値との相関を図9(d)と表1に示す。誤差は最大6.3 nm であり、高い相関が得られた。なお、50×50画素領域内の測定値変動は、0.6~1.4 nm (rms) であった。

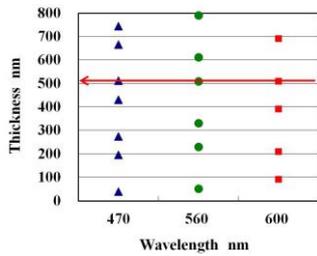


Fig.6 Phase unwrapping by the coincidence method

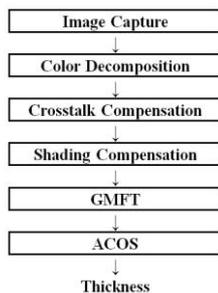
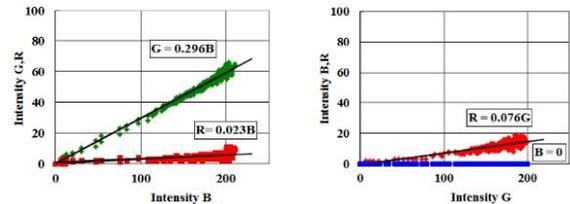
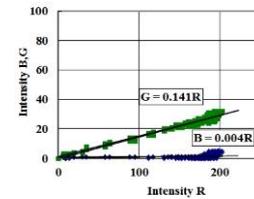


Fig.7 Flowchart of thickness measurement



(a) Illumination B

(b) Illumination G



(c) Illumination R

		To		
		B	G	R
From	B	1	0.30	0.02
	G	0.08	1	0
	R	0	0.14	1

(d) Crosstalk coefficients

Fig.8 Correlation among the BGR values and the estimated crosstalk coefficients

また、公称膜厚が 100 nm の個所を対象とした繰り返し再現性テスト結果を図 10 に示す。標準偏差  $\sigma$  は 0.11 nm であり、サブナノメートルの再現性が得られた。

### 3.2.2 測定速度

640×480 画素の画像全面に対する計算時間は、Windows PC(CPU: Intel Core i7 2.5 GHz)において、GMFT 法が 0.5 ms, ACOS 法が 165 ms で、その他の処理を含め、合計 220 ms であった。

### 3.2.3 照明変動の影響

照明の明るさを変えて公称膜厚 100 nm の領域の膜厚を測定した。結果を図 11 に示す。毎回、レンビを作成すれば、照明光量が低下しても膜厚測定に影響のないことが分かる。

## 4. 応用実験

### 4.1 ニュートン・リングの間隙測定

市販ニュートン・リング板 (図 12(a)) を測定対象とした。空気間隙を膜とみなすことになるので、膜厚 0 が暗環となるモデル (図 4(b)参照) に適合する。撮像した干渉色画像を図 12(b)に示し、測定結果を図 12(c)に示す。0~1200 nm の凹面状の間隙変化が測定できていて、各色の縞回数からの推定値と一致している。

### 4.2 シャボン膜の膜厚測定

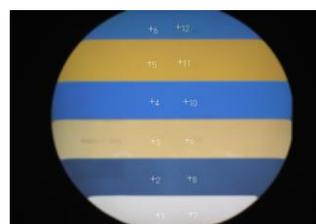
測定装置を横倒して垂直面を測定可能とし、シャボン玉遊び用の円形枠内を垂直流下するシャボン膜のリアルタイム膜厚分布測定を試みた。150 s 間隔の時系列干渉色画像と、それから得られた膜厚分布マップを図 13 に示す。画面中央の膜厚は 860 nm から次第に減少し、破裂直前には 220 nm に達している。次数推定ミスによるノイズの発生があるが、0~1200 nm の膜厚変化を測定できている。測定速度は、160×120 画素/視野の分解能で 10 fps であった。

## 5. 考察

本提案手法の特質を考察する。

### (1) 水平分解能

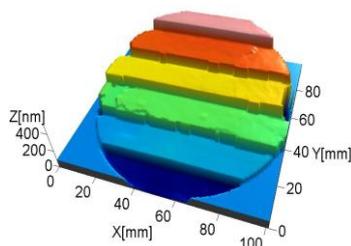
各点での膜厚をその点の色情報だけから推定しており、原理的な水平分解能は画素サイズに等しい。



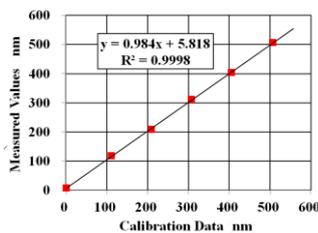
(a) Color image

Variable	Estimated	Variable	Estimated
$t(1)$	0	$a(B)$	160
$t(2)$	117	$a(G)$	85
$t(3)$	208	$a(R)$	135
$t(4)$	306	$b(B)$	0.49
$t(5)$	403	$b(G)$	0.53
$t(6)$	506	$b(R)$	0.58
$t(7)$	0		
$t(8)$	118		
$t(9)$	208		
$t(10)$	307		
$t(11)$	403		
$t(12)$	506		

(b) Result of GMFT fitting



(c) Obtained thickness distribution



(d) Correlation between measured thicknesses and calibration data

Fig.9 Measurement of thickness step wafer

Table 1 Comparison of calibration data and measured thicknesses (nm)

Nominal	Calibration data*	Measured	Error
0	1.4	6.8	5.4
100	111.9	118.2	6.3
200	209.7	208.4	-1.3
300	307.5	311.3	3.8
400	405.2	403.1	-2.1
500	507.1	505.5	-1.6

\* The calibration data are from the vender's calibration data sheet

### (2) 膜厚分解能

筆者らの GMF 法に関する解析<sup>14)</sup>によれば、膜厚分解能は、ほぼ、その点の輝度値の分解能に依存し、輝度データが 8 ビットで、ノイズが数濃淡レベルであれば、数 nm の精度が期待できる。実試料による測定実験 (3.2 節) では、膜厚平均値の繰り返し再現性として、 $\sigma < 1$  nm が得られた。

### (3) 膜厚測定レンジ

GMFT 法においては、理論的には膜厚レンジに上限はない。

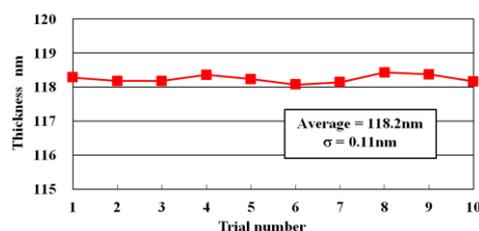


Fig.10 Repeatability test results

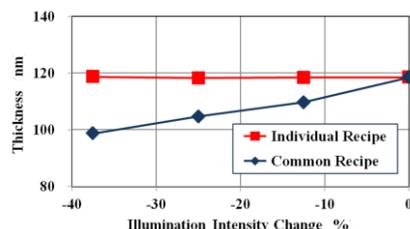
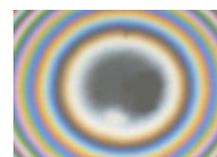


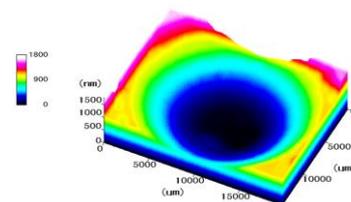
Fig.11 Effect of illumination intensity variation



(a) Newton's ring apparatus



(b) Color image



(c) Measured thickness

Fig.12 Air gap thickness measurement of Newton's rings

Elapsed time	0 s	150 s	300 s	450 s	455 s
Color image					
Measured thickness map					
Center thickness	860 nm	400 nm	260 nm	220 nm	0 nm

Fig.13 Time-series thickness measurement of a vertical flowing soap film

ただし、次項で述べるように、膜厚推定は初期値に依存する。

ACOS法の膜厚は3波長の位相の波長アンラッピングにより求められるので、測定レンジは、キャリア縞導入による3波長ワンショット法<sup>20)</sup>の場合と同じである。レンジは、ノイズや光学的誤差など多くの要因に依存するが、本報告に用いた470-560-600nmの波長組み合わせは、市販カラーカメラを使用する前提で最適波長として選定されたもので、レンジ8 $\mu\text{m}$ が期待できる<sup>20)</sup>。実試料による測定実験では、4 $\mu\text{m}$ の膜厚が測定できている<sup>23)</sup>。

一方、膜の表面反射光と裏面反射光の干渉が観察されるためには、膜厚が使用する光のコヒーレンス長以下の必要がある。本装置の場合、フィルタの帯域幅が10nmであるので、コヒーレンス長は約30 $\mu\text{m}$ である。

#### (4) 初期値問題とその対策

GMFT法の評価関数はcos関数を含んでいるため、局所解が存在する。最小二乗法の解法に通常の勾配法を使用する場合、真の解を得るためには、適切な初期値から出発する必要がある。筆者らのGMF法に関する解析<sup>14)</sup>によれば、初期膜厚誤差は、 $\pm 100\text{nm}$ 以内である必要がある。これを満足する初期値推定が不能な場合は、初期値を変更しながら大域最適解を求めるマルチ・スタート法が有効である。

## 6. 結 言

新しい原理の膜厚分布測定アルゴリズム(GMFT法)を使用して、広視野膜厚分布測定装置を開発した。白色光源、3波長帯域フィルタ、カラーカメラにより薄膜干渉色画像を撮像し、その複数点の輝度値に干渉信号モデルを最小二乗適合して、膜厚とモデルパラメータを一括して求める。膜厚標準ウエーハを使用して装置性能を評価し、約120 $\times$ 100mmの視野全面の膜厚をサブナノメートルの再現性で測定可能なことを確認した。また、ニュートン・リングの間隙測定とシャボン膜の膜厚測定に成功した。本装置には、光学系が単純であり、装置校正が不要で、640 $\times$ 480点の膜厚を約200msで高速に測定できるという特長がある。

## 参 考 文 献

- 1) T. S. Hyvarinen, E. Herrala, and A. Dall'Ava: Direct sight imaging spectrograph: a unique add-on component brings spectral imaging to industrial applications, Proc. SPIE, **3302** (1998) 165.
- 2) M. Ohlidal, V. Cudek, I. Ohlidal, and P. Klapetek: Optical characterization of non-uniform thin films using imaging spectrophotometry, Proc. SPIE, **5963** (2005) 596329.

- 3) G. Jin, R. Jansson, and H. Arwin: Imaging ellipsometry revisited: developments for visualization of thin transparent layers on silicon substrates, Rev. Sci. Instr., **67** (1996) 2930.
- 4) T. Sato et al.: Compact ellipsometer employing a static polarimeter module with arrayed polarizer and wave-plate elements, Appl. Opt., **46** (2007) 4963.
- 5) S. Parthasarathy, D. Wolfe, E. Hu, S. Hackwood, and G. Beni: A color vision system for film thickness determination, Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, **4** (1987) 515.
- 6) D. Birnie: Optical video interpretation of interference colors from thin transparent films on silicon, Materials Letters, **58** (2004) 2795.
- 7) 久保雅裕, 大坪康郎, 川島教嗣, 丸茂斉: カラー画像処理技術によるスライダ浮上量の測定, 日本機械学会論文集. C編, **54**, 503 (1988) 1401.
- 8) M. Hartl, I. Krupka, R. Poliscuk, and M. Liska: Computer-aided evaluation of chromatic interferograms, Fifth International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization, (1997) 45.
- 9) M. Eguchi and T. Yamamoto: Film thickness measurement using white light spacer interferometry and its calibration by HSV color space, Proc. of the 5th International Conference on Tribology, (2006) 20.
- 10) S. Toyooka, N. Hayasaka, M. Kataguchi and F. Kobayashi: Spectral based estimation of optical path difference of interference colors, Optical Review, **5**, 4 (1998) 207.
- 11) 木村大地, 秦清治, 林純一郎, 石丸伊知郎, 岩本昌克, 森本茂明, 小林宏明: 多波長LED光干渉縞の色彩解析による微小形状計測, 動的画像処理実用化ワークショップ2010講演論文集, (2010) 187.
- 12) 北川克一: 広域モデル適合による多波長ワンショット干渉測定, 精密工学会2010年秋季大会学術講演会講演論文集, (2010) 777.
- 13) 北川克一: キャリア縞導入の不要なワンショット干渉計測法, ViEW2011 ビジョン技術の実用ワークショップ講演論文集, (2011) 456.
- 14) K. Kitagawa: Single-shot surface profiling by multi-wavelength interferometry without carrier fringe introduction, Journal of Electronic Imaging, **21** (2012) 021107.
- 15) K. Kitagawa: Single-shot interferometry without carrier fringe introduction, SPIE Newsroom (August 21, 2012). <http://spie.org/x88848.xml>. DOI: 10.1117/2.1201207.004360
- 16) 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, (2012) 1037.
- 17) 北川克一, 大槻真左文, 坪井辰彦: 干渉色画像解析による透明膜の高速膜厚分布測定, ViEW2012 ビジョン技術の実用ワークショップ講演論文集, (2012) IS2-A6.
- 18) 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) 621.
- 19) K. Kitagawa: Thin-film thickness profile measurement by three wavelength interference color analysis, Appl. Opt., **52**, 10, (2013) 1998.
- 20) 北川克一, 坪井辰彦, 杉原洋樹, 杉山将, 小川英光: 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 (2012) 112.
- 21) 北川克一: 3波長干渉計測のためのクロストーク補正, 計測自動制御学会産業論文集, **8**, 14 (2009) 113.
- 22) R. Fletcher and M.J.D. Powell: A rapidly convergent descent method for minimization, Computer Journal, **6**, (1963) 163.
- 23) 東レ検査機器ホームページ, <http://www.scn.tv/user/torayins/TP.html> 2013.6.20 アクセス

This material is the final manuscript for:

Katsuichi KITAGAWA and Masafumi OTSUKI, "Wide-view Transparent Film Thickness Measurement System by Interference Color Analysis ", Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 79, No. 11, p. 1078-1082 (2013).

The paper received the JSPE Numata Memorial Paper Award 2013.

This material is the final manuscript for:

北川克一, 大槻真左文, "干渉色画像解析による透明膜の広視野膜厚分布測定装置の開発", 精密工学会誌 79 (11), 1078-1082, 2013.

本論文は、2013 年度 精密工学会 沼田記念論文賞を受賞しました。