

光干渉法による三次元計測

北川 克一*

* 東レエンジニアリング(株) エレクトロニクス開発センター
滋賀県大津市大江 1-1-45
* Electronics Division, Toray Engineering Co., Ltd.
Oe 1-1-45, Otsu, Shiga, Japan
* E-mail: katsuichi_kitagawa@toray-eng.co.jp

キーワード：光干渉(interferometry), 三次元計測(3D profiling), 位相シフト(phase-shift), 白色(white-light), 透明膜(transparent film), ワンショット(single-shot), 3波長(three-wavelength)

CN 0000/00/0000-0000 © 2002 SICE (016_コピーライト-タイトル系)

1. はじめに

数百 nm の微細な凹凸が付与されたフィルムやガラス、微細で複雑な形状の MEMS、高さが数 μm のマイクロバンプ、深さが数 μm の半導体トレンチなど、ナノテク時代を迎えて、微細な表面形状を計測するニーズは、ますます高まっている。このような微細表面形状を広視野で一括計測可能な光干渉法は、非接触、超高精度、高速という特徴から、産業界において最も注目すべき計測手法の一つである。

光干渉を利用した三次元計測には、ニュートンリングやマイケルソン干渉計に代表されるように、測定面からの反射光と参照面からの反射光を干渉させた時に、波長の 1/2 の光路差ごとに明暗の縞が観測されることを利用している。縞の計数ではなく、位相を求めることにより、サブナノメートルの高さ測定精度が得られ、面形状計測法としては最も高精度である。光波という安定で、かつトレーサビリティの取れる物差しを使用するので、基準的な測定装置としても使用される。また、最近のエレクトロニクス技術やコンピュータ計算能力の飛躍的な向上により、より高度なアルゴリズムが実用化され、顕著な成果が得られている。

本解説では、光干渉法による三次元計測の原理、応用、最近のトピックスを紹介する。

2. 干渉光学系

干渉光学系には、多くの種類があるが、産業界で標準的に使用されるのは、以下に述べる顕微鏡型と、フィゾー型である。

2.1 顕微鏡型

顕微鏡型の干渉光学系は、2 光束干渉計と呼ばれるもので、通常金属顕微鏡に干渉対物レンズを装着することで容易に実現できる。対物レンズの倍率が低倍 (2.5X, 5X) の場合はマイケルソン型、高倍 (10X~50X) ではミラウ型が一般的である (図 1)。いずれの場合も、照明光が対物レンズ内で 2 光束に分離され、片方は試料面へ、他方は参照面に照射される。両者からの反射光が再統合されて干渉画像を形成し、カメラで撮像される。さらに高倍(100X)の場合や特殊な場合には、2 本の対物レンズで構成するリニーク型が使用される。

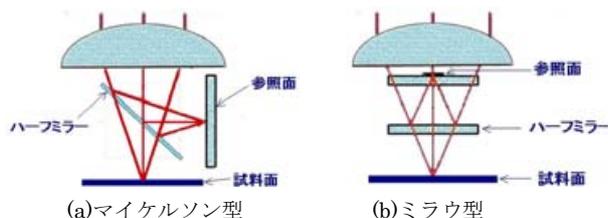


図 1 干渉対物レンズ

通常の金属顕微鏡に装着すると、試料面からの反射光と参照面からの反射光との光路差により干渉像が生成される。

2.2 フィゾー型

ウエーハやレンズ面のような大型サイズの面形状測定用には、フィゾー干渉計が使用される (図 2)。大部分が共通光路となるため光学系の収差が相殺され、振動にも強いが、可干渉長 (コヒーレンス長) の長い光源 (レーザー) が必要である。

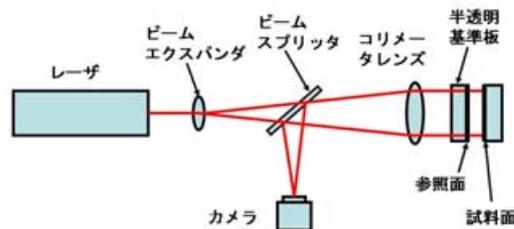


図 2 フィゾー干渉計

参照面と試料面の光路差が波長に比べて大きいので、可干渉長の長い光源 (レーザー) が必要になる。

3. 表面形状測定装置

顕微鏡型の例として、筆者らの開発した表面形状測定装置 SP-700²⁾を紹介する。装置の外観を図 3 に、構成を図 4 に示す。

干渉光学系は干渉対物レンズを組み込んだ無限焦点系の顕微鏡である。Z 軸走査系は、ピエゾ機構により対物レンズを移動させる構造で、ピエゾの位置は、内蔵の精密位置検出センサーによりフィードバック制御される。



図3 顕微鏡型装置の例
東レエンジニアリング(株)製
表面形状測定装置 SP-700 で、
光学系は防振台上に搭載されて
いる。

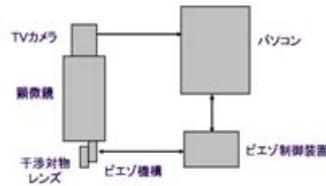


図4 装置の構成
顕微鏡の対物レンズは、ピエゾ機
構により垂直方向に移動可能で
ある。

照明光源として顕微鏡の標準ランプ(ハロゲンランプ)を用い、必要により照明系に帯域フィルタを挿入する。

テレビカメラはモノクロ CCD カメラである。画像信号はデジタル変換され、標準カメラの場合、1画面が 512×480 画素×8 ビットのデータとしてメモリに取り込まれる。また、210 フレーム/sec の 7 倍速カメラや、1画面を約 1400×1000 画素で撮像する高精細カメラも利用可能である。画像処理演算は、パソコンの CPU により行われる。

近年、デジタル画像処理技術を利用して、縞の周期よりも遙かに高い分解能で、表面形状を自動計測することが可能になった。その代表的な手法が、位相シフト法(PSI 法: Phase-Shift Interferometry)³⁾と垂直走査法(VSI 法: Vertical Scanning Interferometry)⁴⁾である。

4. 位相シフト法

4.1 原理

照明光として単色光を用いるが、顕微鏡型のような 2 光束干渉計の場合、レーザ光源の必要はなく、白色光源と帯域フィルタによる近似的な単色光が使用される。測定対象の表面から反射された光と、参照面からの反射光の位相差 ϕ を求めれば、参照面を基準とした測定対象面の高さ h は、波長を λ とし、

$$h = (\lambda / 4\pi) \phi \quad (1)$$

により求められる。

位相シフト法では、干渉顕微鏡内の参照面(あるいは、対物レンズ)をピエゾ(PZT)機構により駆動し、光路差を既知量だけ変化させた時に得られる複数枚の干渉画像から位相 ϕ を求める。

理論的には最低 3 枚の画像が良いが、一般には計算が簡単な 4 ステップ法が用いられる。この方法では、位相シフト量単位を $\pi/2$ とし、0, $(1/2)\pi$, π , $(3/2)\pi$ の 4 回変化させる。これは、光源の波長を λ とし、0, $(1/8)\lambda$, $(1/4)\lambda$, $(3/8)\lambda$ の移動を意味する。ある画素における 4 画面の輝度をそれぞれ a , b , c , d とすると、位相 ϕ は次式のような簡単な式によって得られる。

$$\phi = \text{atan}[(b-d)/(c-a)] \quad (2)$$

この 4 点法の他に、様々な位相シフト量とステップ数の組み合わせが考えられ、多くのアルゴリズムの提案がある。たとえば、ステップ数を N とし、位相シフト量を $2\pi/N(\text{rad})$ とした場合は、各輝度を g_i とし、次式により位相が求められる。

$$\phi = \text{atan} \left[\frac{\sum_{i=1}^N g_i \sin(2\pi i / N)}{\sum_{i=1}^N g_i \cos(2\pi i / N)} \right] \quad (3)$$

位相シフト量が $\pi/2$ の場合の代表的なアルゴリズムを表 1 に示す。

表 1 代表的な位相シフトアルゴリズム

ステップ数	位相 $\phi = \text{atan} [\]$	文献
3	$(-a+2b-c)/(c-a)$	5)
4	$(b-d)/(c-a)$	
5	$2(b-d)/(-a+2c-e)$	6) 7)
7	$(-a+3c-3e+g)/(2(-b+2d-f))$	8)
9	$(-4b+12d-12f+4h)/(a-8c+14e-8g+i)$	9)

注: 輝度を a, b, c, \dots で表している。

本方法で求められる位相 ϕ には、 $2\pi N$ (N は整数) の任意性があるので、高さが連続的に変化しているという仮定を用いて位相接続(アンラッピング)処理を行う。

位相接続法には多くのアルゴリズムが提案されている。最も単純な近傍接続法では、隣の画素との位相差が $\pm\pi$ 以内に収まるように整数 N を調整することを、画面左上からスタートして、画面内の各画素で繰り返す。この方法は計算負荷が軽い、ノイズの影響を受けやすい。計算時間はかかるが非常にロバストなアルゴリズムも実用化されていて、たとえば MST(Minimum Spanning Tree)法^{10) 11)}は、干渉縞振幅も考慮しながら、信頼性の最も高い方向にアンラップの枝を伸ばしていく。

図 5 は凹レンズを試料とした場合に得られる 4 枚の干渉画像であり、図 6 はそれから得られる位相画像と、位相接続後の高さ画像である。

4.2 特徴

- ①サブナノメートルの高さ分解能がある。
- ②試料の場所による反射率変化に無関係に測定できる。
- ③4~5枚の画像を取り込むだけで、画面内の全点の高さ測定が1秒以内に可能である。
- ④測定対象面が平滑面(具体的には、隣接画素間の段差が $\pm\lambda/4$ 以内)に限定される。

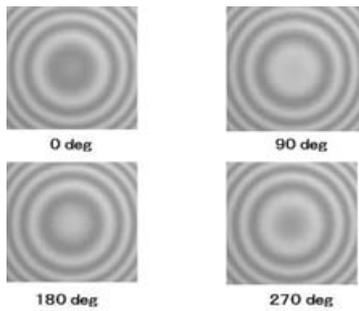


図5 位相シフト法における干渉画像
位相を90°刻みで4回シフトした画像。

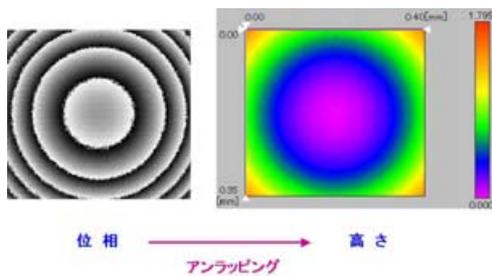


図6 位相画像と高さ画像
[0,2π)の区間に畳み込まれている位相を位相接続して高さに換算している。

4.3 測定例

(1) 50nm 標準段差

位相シフト法により標準段差(公称50nm)を測定した結果を図7に示す。段差測定再現性(σ)は、0.05nm程度である。

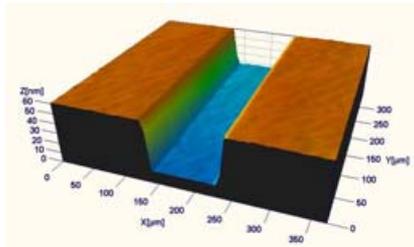


図7 位相シフト法の測定例：50nm 標準段差

(2) ウェーハ表面

位相シフト法によりウェーハ表面を測定した結果を図8に示す。サブナノメートルの表面粗さが測定されている。

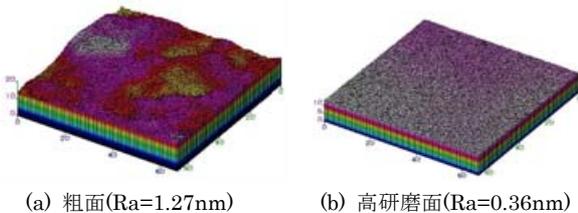


図8 位相シフト法の測定例：ウェーハ表面
サブナノメートルの粗さが測定できる。

5. 垂直走査法

位相シフト法のような制約がなく、測定面に段差があっても測定可能な手法として、垂直走査法(低コヒーレンス干渉法、白色干渉法とも呼ばれる)がある。産業界で広く利用されている方法であり、近く Coherence Scanning Interferometry (CSI) という名称で ISO 規格化される予定である。

5.1 原理

干渉光学系は位相シフト法と同じである。照明光にある程度の帯域を持つ白色光を用いて、試料面と参照面の光路差を連続的に変化(対物レンズ位置をZ軸方向に走査)させると、図9のように、試料面と参照面との光路差がゼロとなる箇所でもコントラスト最大の干渉画像が撮像される。白色光は可干渉長(コヒーレンス長)が短く、数μm程度しかないためである。可干渉長Lは光の帯域幅に反比例し、 $\lambda = \text{中心波長}$ 、 $n = \text{媒体屈折率}$ (空気の場合は1)、 $\Delta\lambda = \text{帯域幅}$ として、 $L = (2\ln 2/\pi) \lambda^2 / (n \Delta\lambda)$ で表される。たとえば、 $\lambda = 650\text{nm}$ 、 $\Delta\lambda = 200\text{nm}$ の場合、 $L \cong 1\mu\text{m}$ となる。

垂直走査で撮像された複数枚の画像の各点の輝度に注目すると、図10に示すような干渉波形(インターフェログラム)が得られる。このピーク位置が試料表面の高さに対応しているため、画面内の各画素における高さ、すなわち表面の三次元形状を一括して求めることができる。なお、図10のような波形が顕微鏡の焦点深度の浅さに由来するものではなく、白色干渉のためであることが共焦点顕微鏡との違いである。共焦点顕微鏡は焦点深度の浅いことを利用しているため、高さ測定精度が対物レンズ倍率に依存する。白色干渉法は、動作が良く似ているが、精度はレンズ倍率に依存せず、低倍率でも高精度である。

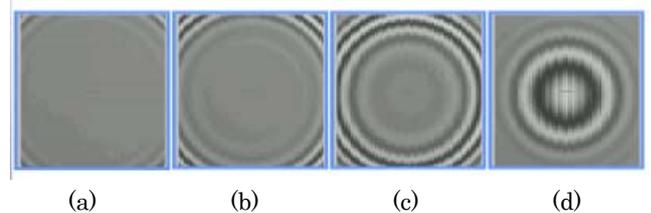


図9 垂直走査法の干渉画像

凹面レンズを測定対象として、対物レンズの位置を上から下へ連続走査した時の画像。白色干渉では、光路差がゼロ近傍の箇所では、干渉縞が観測されない。

実際の測定で得られる干渉データは、図10の連続波形ではなく、同図に●で示すような離散的なものである。この離散的なデータから干渉波形の最大位置を求める場合、精度を上げるためには標本点間隔を狭くするのが有効であるが、そうすると走査速度が遅くなり、また、データ数も多くなって計算負荷が増大する。すなわち、精度と速度がト

レードオフの関係にある。精度向上や高速化のために、多くのアルゴリズムが提案されている。以下は代表的なアルゴリズムである。

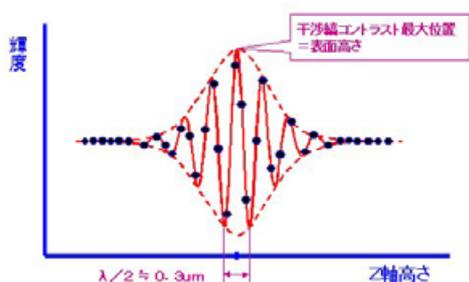


図10 インターフェログラム

光路差がゼロの位置をピークとする干渉波形で、ピーク位置から高さが求められる。黒点は標本点を示す。

- (1) 低域フィルタ法：輝度値のAC成分を二乗し、低域フィルタにより包絡線を求め、そのピーク位置を検出する¹²⁾。
- (2) 重心法：輝度値のAC成分を二乗し、得られた波形の重心位置を求める¹³⁾。
- (3) 周波数領域(FDA)法：干渉波形をフーリエ変換し、振幅スペクトルのピーク付近で、波数 k に対する位相 ϕ の勾配 ($d\phi/dk$) を求める。位相 ϕ 、高さ h 、波数 k には、 $\phi = kh$ の関係があるので、 $h = d\phi/dk$ から高さ h が得られる¹⁴⁾。
- (4) 一般標本化定理による方法 (SEST 法)^(注1)：ナイキスト間隔よりも遥かに広い間隔で (すなわち、サブナイキスト間隔で) サンプルされた観測値から干渉波形のピーク位置を求める方法として開発された^{15) 16)}。このアルゴリズムは、白色光の波長が帯域制限されていることを利用していて、帯域が狭いほど有効であるが、照明光の帯域は顕微鏡の照明部にバンドパス・フィルタを挿入することで任意に設定できる。図11に本手法の概念を示す。干渉波形の周波数帯域は、照明光の波長帯域に対応して制限されているので、サブナイキスト間隔の観測データから帯域通過型標本化定理¹⁷⁾を用いて元の干渉波形を復元する。復元された波形の二乗包絡線関数を求め、そのピーク位置を探索すれば、高さが得られる。実際の装置では、復元波形は不要なので、観測データ y_j (j は $1 \leq j \leq M$ の整数) から $z = z_j$ における二乗包絡線関数 $r(z)$ を次式により直接計算し、計算時間を短縮している。

$$r(z_j) = (y_j)^2 + \frac{4}{\pi^2} \left\{ \sum_{m=1}^M \frac{y_m}{j-m} \right\}^2 \quad (4)$$

(注1) 原波形であるインターフェログラムの標本値から、別の関数である二乗包絡線関数を復元する点が通常の標本化定理と異なる。SESTは、Square Envelope function estimation by Sampling Theoryの頭文字。

ここで、 $\sum_{m=1}^M$ は、 j が偶数の場合には m が奇数の点の和、 j が奇数の場合には m が偶数の点の和を示す。

包絡線関数 $r(z)$ が最大となる z は、式(4)により標本点における $r(z_j)$ を求め、その最大値付近でピークを内挿探索することにより求められる。

5.2 特徴

垂直走査法は、測定時間が PSI 法に比べ長い、以下のような特長がある。

- ① ナノメートルオーダーの高さ分解能がある。
- ② 試料の場所による反射率変化に無関係に測定できる。
- ③ 表面凹凸に制限がない (大きな段差も測定可能)。
- ④ 測定レンジも任意に拡大可能。

5.3 測定例

7倍速カメラと SEST アルゴリズムを使用し、走査速度 $214 \mu\text{m}/\text{sec}$ にて高さ約 $40 \mu\text{m}$ のバンプを測定した結果を図12に示す。急峻で高い段差が測定できている。また、全面の測定時間は数秒以内と高速である。

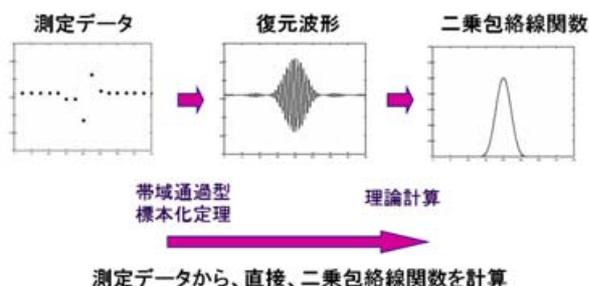


図11 SEST アルゴリズムの概念

サブナイキスト・サンプルされた輝度値から帯域通過型標本化定理を用いて二乗包絡線関数を直接推定する。

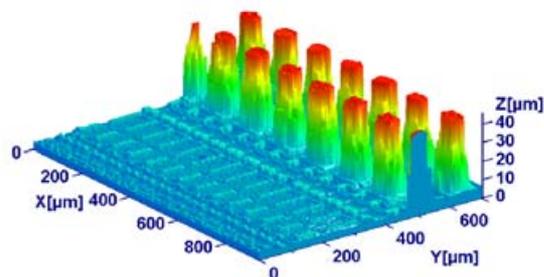


図12 SEST 法によるバンプ測定結果

垂直走査速度 $214 \mu\text{m}/\text{sec}$ で高さ約 $40 \mu\text{m}$ の IC バンプを測定した。干渉波形のピーク検出は SEST 法による。

6. 白色位相シフト法

従来の垂直走査法 (VSI 法) ではインターフェログラムの包絡線ピーク位置から高さを求めていて、PSI 法に比べ精度が劣っていた。しかし、位相情報を利用して精度を上げることが提案されている¹⁸⁾。この方法は“白色 PSI 法”とも

呼ばれ、従来の PSI 法の特長を生かしつつ、測定レンジを広げ、アンラッピングを不要化している。以下に、筆者らの開発したアルゴリズム (WSI 法と名付けた) と、測定例を示す¹⁹⁾。

6.1 計算アルゴリズム

包絡線ピークの画面番号 N_p と、その位置での相対的位相 ϕ_r を求め、次式により高さ z を計算する。

$$z = N_p \cdot \Delta - (\lambda/4\pi)\phi_r \quad (5)$$

ここで、 Δ は標本点間隔、 λ は等価的な照明波長である。

標本点間隔を干渉波形のほぼ 90° 相当にすれば、位相は従来の PSI 法の計算式を利用して求められる。表 2 は従来法と WSI 法を比較したものである。

表 2 WSI 法と従来法の比較

項目	VSI	PSI	WSI
照明光	白色	単色	白色
原理	ピーク検出	位相検出	ピーク&位相
対象面	汎用	平滑面限定	汎用
精度	Δ (~数 nm)	\odot (~0.01nm)	\circ (~1nm)
走査速度	任意	—	2.4 μ m/sec
計算時間	Δ	\odot	\circ

6.2 測定例

1 μ m 標準段差を VSI 法と WSI 法で測定した結果を図 13 に示す。使用した輝度データは同一であり、WSI アルゴリズムの優位性が明確である。

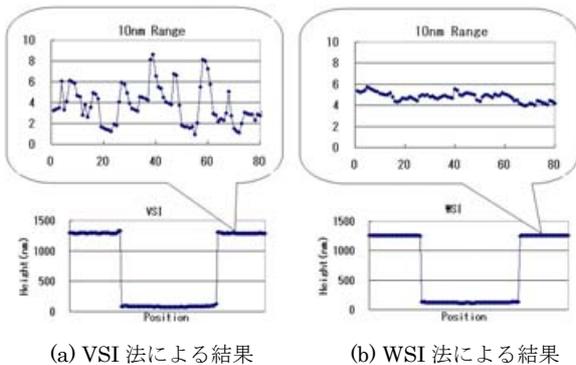


図 13 VSI 法と WSI 法の測定結果比較

1 μ m 段差標準試料を従来法(VSI 法)と WSI 法で測定した結果。

7. 透明膜計測

従来、測定対象表面に透明膜が存在すると、膜裏面からの反射光が外乱となり、正確な表面形状が測定できなかったが、筆者らは、以下のような各種アルゴリズムを開発し、透明膜測定を実用化した。

7.1 厚膜対応アルゴリズム (KF 法)²⁰⁾

透明膜が存在すると、図 14 に示すように、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。透明膜の膜厚がコヒーレント長に比し厚ければ、すなわち、光学的膜厚が約 1 μ m 以上の場合には、膜表面ピークと裏面ピークが分離して観察され、厚膜と呼ぶ。これ以下の膜厚 (薄膜と呼ぶ) では、ピークが重畳して目視では分離不能である。厚膜対応アルゴリズム (KF 法と名付けた) は、インターフェログラムから、図 15 の棒グラフに示すような干渉振幅を計算する。さらに、画像処理における自動 2 値化しきい値決定法である大津の式²¹⁾を用いて、ピーク分離の最適しきい値を求める。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ようにピークを分離する。

$$f = \omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2 \quad (6)$$

ただし、 ω_1, ω_2 は各クラスの頻度、 σ_1^2, σ_2^2 は各クラスの分散である。

評価関数は図 15 の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。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。

得られたピーク位置から、①膜の表面高さ、②膜の裏面高さ、③光学的膜厚 (nt) が求まる。さらに、膜の屈折率 n を既知として、膜厚 t が得られる。測定可能な膜厚下限値は約 1 μ m である。

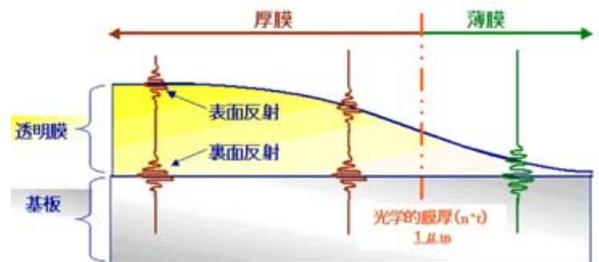


図 14 透明膜試料のインターフェログラム

光学的膜厚が約 1 μ m 以上の場合、膜表面ピークと裏面ピークが分離して観察され、厚膜と呼ぶ。これ以下の膜厚 (薄膜) では、ピークが重畳して目視では分離不能である。

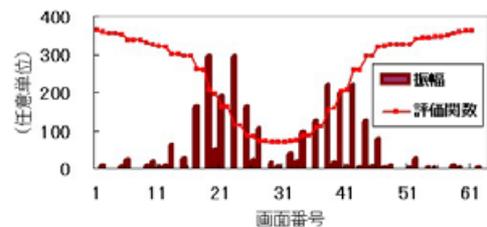


図 15 判別分析法によるピーク分離

評価関数の最小位置を 2 つの干渉ピークを分離する最適しきい値とする。

Si ウェーハ上に形成された酸化膜段差を測定した結果を図 16 に示す。左方膜厚が $4\mu\text{m}$ 、右方膜厚が $1\mu\text{m}$ 、表面段差が $3\mu\text{m}$ 、裏面が平坦面として正しく測定されている。

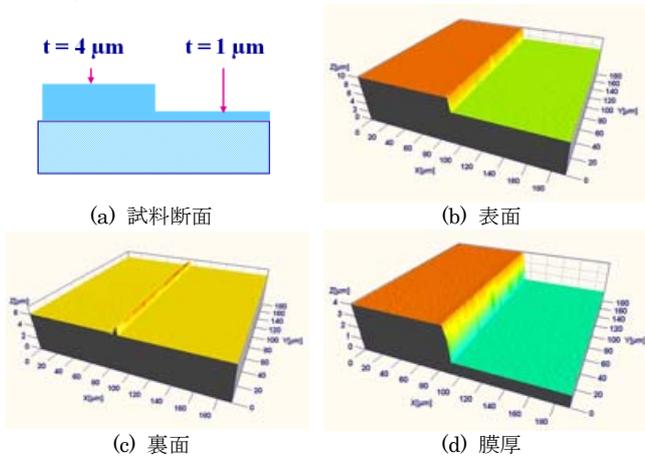


図 16 膜厚段差の測定結果

左が $4\mu\text{m}$ 、右が $1\mu\text{m}$ の膜厚段差試料を測定した。表面形状、裏面形状、膜厚分布が同時測定できている。

7.2 薄膜対応アルゴリズム (NF 法)

透明膜の膜厚がコヒーレント長に比べて薄い場合は、図 14 に示すように、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。筆者ら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) を開発した¹⁹⁾。測定可能な膜厚下限値は、Si 酸化膜で約 50nm である。約 $300\text{nm}/100\text{nm}$ の Si 酸化膜段差の測定結果を図 17 に示す。

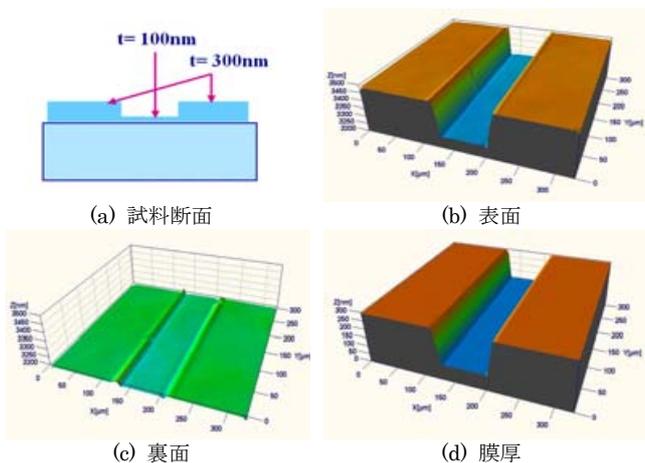


図 17 NF 法による薄膜段差の測定結果

左右が 300nm 、中央が 100nm の膜厚段差試料を測定した。表面形状、裏面形状、膜厚分布が同時測定できている。

7.3 透過干渉法による膜厚分布測定

測定対象が独立透明膜の場合には、表面形状測定装置を利用する透過干渉によって膜厚分布を測定する方法 (TF 法)²²⁾がある。別途用意した平坦面を測定基準面とし、干

渉系の測定光路に測定対象の透明膜を挿入して、測定基準面の測定高さに変化から膜厚を求める。

たとえば、図 18 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平坦な測定基準面を測定すると、膜の有無による光路差のために、段差 $D=[(n-1)t]$ が発生する。屈折率を n とすると、膜厚 t は

$$t = D / (n - 1) \quad (7)$$

により得られる。膜の位置やうねりの影響を受けず、安定した測定ができる。図 19 にフィルム (公称膜厚 $0.9\mu\text{m}$) の測定結果を示す。透明膜の存在によって、約 $0.5\mu\text{m}$ の段差が生じている。

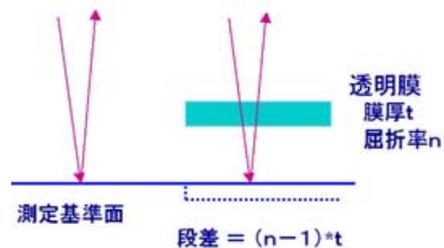


図 18 透過干渉 (TF) 法の原理

空気と透明膜の光路差の差により、平坦な基準面に表面段差が観測される。

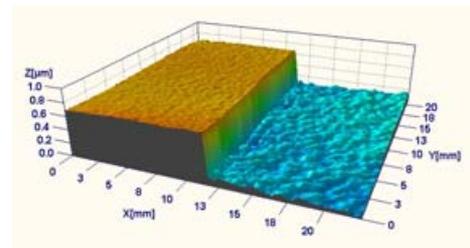


図 19 透過干渉 (TF) 法によるフィルム測定結果
右側がフィルムの存在によって発生した表面段差である。

7.4 膜厚と屈折率の同時測定法²³⁾

透明膜試料を測定するに際し、KF 法により光学膜厚を求め、TF 法により段差を求め、両方法により得られた情報を組み合わせると、膜厚 t と屈折率 n を分離して測定することができる。すなわち、光学膜厚を T 、段差を D とすると、

$$T = nt, \quad D = (n-1)t \quad \text{より、}$$

$$t = T - D \quad (8)$$

$$n = T / (T - D) \quad (9)$$

を得る。図 20 はポリエステル (PET) フィルム (公称膜厚 $1.5\mu\text{m}$; 公称屈折率 1.65) の測定結果である。

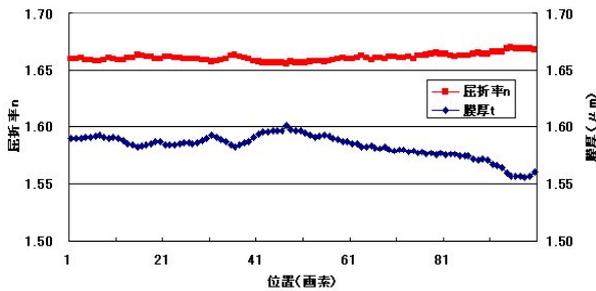


図 20 PET フィルムの膜厚と屈折率分布測定結果
KF 法と TF 法の測定結果から、膜厚と屈折率の分布が同時に求められる。

8. ワンショット計測

従来の干渉計測法は複数の干渉縞画像を必要とするため、振動に弱く、また、移動物体の測定は困難であった。この問題の解決のために、1枚の干渉縞画像から高さを測定するワンショット計測法²⁴⁾が研究されていて、光学的に4枚の位相シフト画像を生成する方法²⁵⁾や、参照面を傾斜させてキャリア縞を導入する方法(図 21)²⁶⁾が実現されている。しかし、装置コスト、測定レンジ、水平分解能などの面で問題があった。筆者らは、以下のような技術開発により、この問題を解決した。

8.1 局所モデル適合法—LMF アルゴリズム—

従来の縞解析法²⁶⁾では、測定対象面の凹凸周波数が縞の周波数より十分低いという仮定のもとで導出されているため、高周波成分が鈍ってしまうという問題があった。そこで筆者らは、局所モデル適合法(Local Model Fit 法)²⁷⁾という新しい縞解析法を開発した。この方法は、局所輝度データに縞モデル関数

$$g(x, y) = a + b \cos(\phi + 2\pi f_x x + 2\pi f_y y) \quad (10)$$

を最小二乗適合させることで位相を求める。ここで、 $g(x, y)$ は座標 (x, y) の輝度、 f_x, f_y は x, y 方向の縞周波数で既知とし、直流成分 a 、振幅 b 、位相 ϕ を未知パラメータとして、最小二乗問題を解くが、変数変換により線形化することができるので、計算負荷は低い。

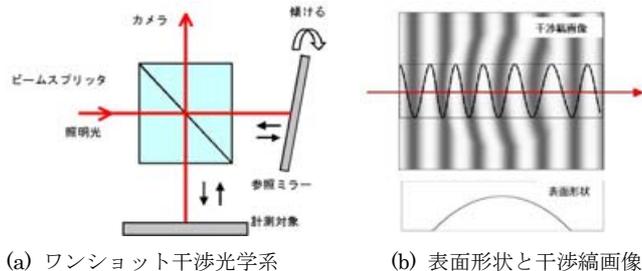


図 21 キャリア縞導入方式

参照面を傾斜させて、キャリア縞を導入し、輝度信号の位相から表面形状を求める。

8.2 3 波長ワンショット法

上記の方法を含め、従来のワンショット法では、干渉信号から位相を求める手法のため、位相シフト法同様、位相アンラッピングを必要とする。すなわち、隣接画素間の位相差が π (通常の反射型干渉計では波長の 1/4 に相当する) を超えると正確な測定ができない。この問題の解決法として多波長干渉法²⁸⁾が知られている。

筆者らは、3 波長混合照明装置とカラーカメラによる 3 波長同時撮像系(図 22)を利用して、3 波長ワンショット法²⁹⁾³⁰⁾を開発した。図 23 は、カラーカメラの分光感度特性と、照明装置のピーク波長を示す。カラーカメラで撮像した画像をクロストーク補正³¹⁾すると、カメラの B フレームから 470nm の画像、G フレームから 560nm の画像、R フレームから 600nm の画像が得られる。3 波長の位相値から、 $4\mu\text{m}$ 以上のレンジで干渉次数を推定できる³²⁾。図 24 は $4\mu\text{m}$ の段差の測定結果である。

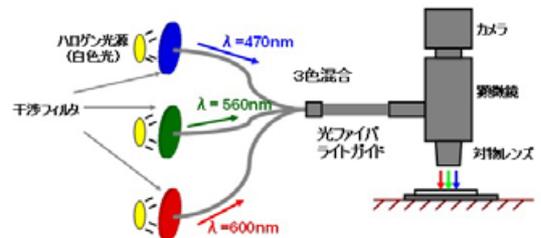


図 22 3 波長同時撮像系

3 波長の照明光を混合して干渉計に入射し、干渉画像をカラーカメラで撮像する。

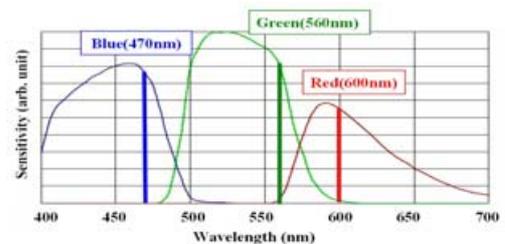
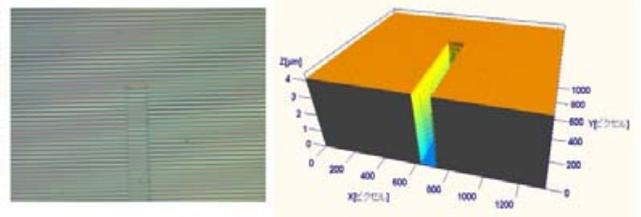


図 23 カラーカメラの分光感度と 3 光源ピーク波長
RGB 信号間のクロストークは無視できる程度に小さく、カメラの RGB 画像が各波長の干渉画像にほぼ一致している。



(a) カラー干渉画像 (b) 測定結果

図 24 3 波長ワンショット計測法による $4\mu\text{m}$ 段差計測結果
3 波長の位相情報を利用するアンラッピングにより、 $4\mu\text{m}$ 段差の測定ができています。

9. おわりに

非接触、非破壊、高精度、広視野という優れた特長を持つ光干渉計測法は、最近のコンピュータ計算能力の飛躍的向上により、より高度な測定アルゴリズムが実用化されつつあり、「光干渉計測の第2世代」に入ったと言える。特に、測定の高速度化と、透明膜対応アルゴリズムの開発により、ナノテク時代の三次元計測装置として、ますます広い用途が期待される。

(2010年10月31日受付)

参考文献

- 1) 北川克一：光干渉法，最新光三次元計測（吉澤徹編著），66/73，朝倉書店（2006）
- 2) 表面形状測定装置 SP-700/500，<http://www.toray-eng.co.jp/lcd/inspection/lineup/sp-500.html>，東レエンジニアリング（株）
- 3) J. H. Brunning et al.: Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses, *Appl. Opt.*, **13**, 2693/2702 (1974)
- 4) N. Balasubramanian: Optical system for surface topography measurement, *USP* 4,340,306 (1982)
- 5) B. Bhushan, J. C. Wyant, and C. L. Koliopoulos: Measurement of surface topography of magnetic tapes by Mirau interferometry, *Appl. Opt.*, **24**, 1489/1497 (1985)
- 6) J. Schwider et al.: Digital wave-front measuring interferometry: Some systematic error sources, *Appl. Opt.*, **22**, 3421/3432 (1983)
- 7) P. Hariharan, B. F. Oreb, and T. Eiju: Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation, *Appl. Opt.*, **26**, 2504/2506 (1987)
- 8) K. Hibino et al.: Phase shifting for nonsinusoidal waveforms with phase-shift error, *J. Opt. Soc. Am. A*, **12**, 761/758 (1995)
- 9) D. W. Phillion: General methods for generating phase-shifting interferometry algorithms, *Appl. Opt.*, **36**, 8098/8115 (1997)
- 10) J. T. Judge, C. Quan, and P. J. Bryanston-Cross: Holographic deformation measurements by Fourier transform technique with automatic phase unwrapping, *Opt. Eng.*, **31**, 533/543 (1992)
- 11) M. Takeda and T. Abe: Phase unwrapping by a maximum cross-amplitude spanning tree algorithm: a comparative study, *Opt. Eng.*, **35**, 2345/2351 (1996)
- 12) P. J. Caber: Interferometric profiler for rough surfaces: *Appl. Opt.*, **32**, 3438/3441 (1993)
- 13) R. Dändliker, E. Zimmermann, and G. Frosio: Electronically scanned white-light interferometry: a novel noise-resistant signal processing, *Optics Letters*, **17**, 679/681 (1992)
- 14) P. de Groot and L. Deck: Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency, *J. Mod. Opt.*, **42**, 389/401 (1995)
- 15) 平林晃，小川英光，水谷竜也，永井健，北川克一：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)
- 16) 北川克一，平林晃，小川英光，水谷竜也：狭帯域白色光干渉による高速表面形状測定装置の開発，第39回計測自動制御学会学術講演会予稿集，103D-4 (2000)
- 17) A. Kohlenberg: Exact interpolation of band-limited functions, *J. of Applied Physics*, **24**, 1432/1436 (1953)
- 18) P. Sandoz: An algorithm for profilometry by white-light phase-shifting interferometry, *J. of Mod. Optics*, **43**, 1545/1553 (1996)
- 19) 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)
- 20) 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)
- 21) 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，**J63-D** (4) 349/356 (1980)
- 22) 北川克一：透過干渉法による透明フィルムの膜厚分布測定，DIA2007 動的画像処理実利用化ワークショップ講演論文集，137/140 (2007)
- 23) 北川克一：白色干渉法による透明膜の膜厚と屈折率の同時計測，2007年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，461/462 (2007)
- 24) 加藤純一：実時間干渉じま解析とその応用，精密工学会誌，**64** (9) 1289/1293 (1998)
- 25) R. Smythe and R. Moore: Instantaneous phase measuring interferometry, *Opt. Eng.*, **23** (4) 361/364 (1984)
- 26) M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi: Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry, *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 156/160 (1982)
- 27) M. Sugiyama, H. Ogawa, K. Kitagawa, and K. Suzuki: Single-shot surface profiling by local model fitting, *Appl. Opt.*, **45**, 7999/8005 (2006)
- 28) Y. Y. Cheng and J. C. Wyant: Two-wavelength phase-shifting interferometry, *Appl. Opt.*, **23**, 4539/4543 (1984)
- 29) 北川克一：3波長ワンショット形状計測法，2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，179/180 (2008)
- 30) K. Kitagawa: Fast surface profiling by multi-wavelength single-shot interferometry, *International Journal of Optomechatronics*, **4** (2) 136/156 (2010)
- 31) 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) 113/116 (2009)
- 32) 北川克一，坪井辰彦，鈴木一嘉，大槻真左文：3波長ワンショット干渉計測を利用したインクジェット方式カラーフィルタの自動膜厚測定装置，2010年度精密工学会春季大会学術講演会論文集，881/882 (2010)

本資料は、下記解説論文の原稿である。

北川克一：「光干渉法による三次元計測」、計測と制御、**50** (2)、97-104 (2011)