

3波長干渉法による透明膜の表面形状と膜厚分布の同時測定

Simultaneous Measurement of Film Surface Topography and Thickness Variation

using Three-Wavelength Interferometry

北川 克一

Katsuichi KITAGAWA

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

概要： 白色干渉法に代表される光干渉方式の表面形状測定法は，測定対象が透明膜に覆われていると，裏面反射光が外乱となり，正確な測定ができない．また，分光法に代表される光学的膜厚測定法は，基本的に点計測で速度が遅く，水平分解能も低い．我々は，3波長干渉法による表面形状と膜厚分布の同時測定アルゴリズムを開発した．3波長照明系とカラーカメラにより得られる3波長インターフェログラムを波形分離し，各画素の表面高さ，裏面高さ，膜厚を推定する．計算機実験と実サンプル測定により，提案手法の妥当性を確認した．

<キーワード> 干渉計測，透明膜，表面形状，膜厚分布，3波長，波形分離，モデル適合

1. はじめに

ナノメートル・オーダの高精度三次元形状測定法として，白色干渉法に代表される光干渉法が広く用いられている．しかし，測定対象が透明膜に覆われていると，裏面反射光が外乱となり，正確な形状測定ができない．

我々は，上記問題を解決するため，光干渉法による多くの透明膜測定アルゴリズムを開発し[1-7]，一部は実用化してきた．これらの手法の大半は，白色干渉法のインターフェログラム（輝度波形）を表面反射成分と裏面反射成分に分離するものであり，光学膜厚が $1\mu\text{m}$ を越えるような厚膜の場合には，ピーク波形が重畳せず，比較的容易に分離できる．しかし，膜厚が数百nm以下の薄膜の場合には，波形が重畳し，分離は容易ではない．

この問題の他の解決法としては，白色干渉波形のフーリエ変換法[8]，波長走査法[9,10]が提案されているが，前者は計算が複雑であり，後者は光学系が複雑になる欠点がある．

また，透明膜の光学的膜厚測定法として，分光法やエリプソメトリがあるが，基本的に点計測であり，面計測による高速膜厚分布測定のニーズがある．

一方，我々は，低コストで小型の3波長カラー撮像系を開発し，キャリア縞導入方式によるワンショット干渉計測法[11,12]，干渉色解析によるワンショット干渉計測法[13,14]，膜厚分布計測法[15,16]を開発してきた．

本報告では，3波長干渉法による新たな表面，裏面，膜厚分布の同時測定法を提案する．計算機実験と実サンプル測定により，提案手法の妥当性を確認した[17]．

2. 測定原理

市販の干渉顕微鏡をベースに，図1に示すような3波長干渉光学系を構成する．光源部に3波長帯域フィルタ（中心波長 470 nm, 560 nm, 600 nm；帯域幅 10nm）[11]を挿入し，カラーカメラにより干渉画像を撮像することにより，カメラの

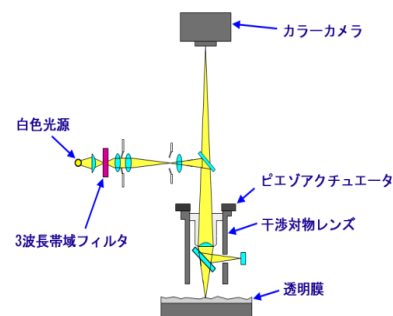


図1 3波長干渉光学系

BGR信号から3波長単色光照明下の画像を得ることができる¹.

白色干渉法の場合と同様に、ピエゾアクチュエータにより対物レンズを垂直走査して、各画素の輝度信号波形（インターフェログラム）を求めると、図2(a)のような波長の異なる3本の正弦波が得られる². この輝度信号は、膜の表面反射光成分と裏面反射光成分の和であり、次式で表現できる（式の導出過程は、補足1参照）.

$$g(i, j) = a(j) + b_1(j) \cos 4\pi \left(\frac{z(i) - z_1}{\lambda(j)} \right) + b_2(j) \cos 4\pi \left(\frac{z(i) - z_2}{\lambda(j)} \right) \quad (1)$$

ここで、 i は画面番号、 j は波長番号(B,G,R)、 a はバイアス成分、 b_1 は表面干渉信号振幅、 b_2 は裏面干渉信号振幅、 λ は波長、 z は高さ方向位置、 z_1 は表面高さ、 z_2 は光学的裏面高さ³である.

このモデル関数と観測輝度データとを最小二乗適合する（次式の誤差二乗和SSEを最小にすることにより未知変数を求めることを考える）.

$$SSE = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^N [g(i, j) - g_{i,j}]^2 \quad (2)$$

ここで、 g_{ij} は観測輝度値、 N は観測画面数である.

しかし、この最小二乗問題は未知変数が $a(j)$, $b_1(j)$, $b_2(j)$, z_1 , z_2 の11個であるのに対し、有意な観測情報は各波長の正弦波の3パラメータ（バイアス、振幅、位相）の計9個しかなく、解くことができない.

そこで、未知変数の削減を考える. 11個の未知変数の中で、 $a(j)$ は入射光量にも試料にも依存し、既知とすることができない. また、 z_1 , z_2 は求めたいパラメータである. 一方、表裏面振幅 $b_1(j)$, $b_2(j)$ は、入射光量と試料に依存するが、その比 $\alpha (\equiv b_1/b_2)$ は、入射光量への依存性が無く、試料に依存するパラメータになる. すなわち、膜内多重反射光成分を無視すれば、理論的には次式で表される（式の導出過程は、補足2参照）.

$$\alpha = \frac{(n-1)(n+1)}{4n} \sqrt{\frac{(n+n_B)^2 + \kappa_B^2}{(n-n_B)^2 + \kappa_B^2}} \quad (3)$$

ここで、 n は膜の屈折率、 n_B , κ_B は基板の屈折率と消衰係数である.

我々の使用する3波長(470 nm, 560 nm, 600 nm)の帯域において、産業界で使用される多くの膜、基板の屈折率の波長依存性は小さいので、表裏面振幅比 α が波長に依存しない定数（補足3参照）と仮定すると、

$$b_1(j) = \alpha b_2(j) \quad (4)$$

が成立し、次式が得られる.

$$g(i, j) = a(j) + \alpha b_2(j) \cos 4\pi \left(\frac{z(i) - z_1}{\lambda(j)} \right) + b_2(j) \cos 4\pi \left(\frac{z(i) - z_2}{\lambda(j)} \right) \quad (5)$$

このモデル関数の未知変数は、 $a(j)$, $b_2(j)$, z_1 , z_2 , α の9個であり、適合問題が解ける（求解の必要条件の考察は補足5参照）. 得られた z_1 , z_2 と屈折率 n から、次式により、膜厚 t と物理的裏面高さ z_b を求める.

$$t = (z_1 - z_2) / n \quad (6)$$

$$z_b = z_1 - t \quad (7)$$

3. 計算機実験

3.1 実験方法

以下の条件で、理論インターフェログラムを作成した.

- 波長：470 nm, 560 nm, 600 nm
- 表面信号パラメータ： $a_1(B) = a_1(G) = a_1(R) = b_1(B) = b_1(G) = b_1(R) = 1$
- 裏面信号パラメータ： $a_2(B) = a_2(G) = a_2(R) = b_2(B) = b_2(G) = b_2(R) = 0.5$
- 表面・裏面高さ： $z_1 = 0$ nm, $z_2 = -200$ nm
- 観測データ間隔：5 nm
- 観測データレンジ：±500 nm
- 付加ノイズ：レンジ $[-0.03, 0.03]$ の一様雑音

付加したノイズは信号レンジ ($2b_1 + 2b_2 = 3$) の±1%に相当し、通常のカメラノイズレベルに近似している. 得られた波形を図2(a)に示す.

最小二乗法適合は、MS Excel の最適化ツールで

¹ カメラのクロストークが無視できない場合はソフトウェアにより補正する[18]

² 帯域フィルタの半値幅が10 nmなので、コヒーレンス長は約20 μmであり、数μmの範囲内では干渉信号がほぼ正弦波となる.

³ 表面高さから光学膜厚を引いた高さを光学的裏面高さ z_2 と呼び、物理的裏面高さ z_b と区別する.

ある Solver を使用した．初期値は， $z_1=50$ nm， $z_2=-250$ nm， $\alpha=2.5$ ， $a(j)=$ 輝度平均値， $b(j)=$ 輝度レンジ/2(1+ α)とした．

3.2 実験結果

結果を表 1 に示す．未知変数 9 個の推定誤差は小さく，表面高さ・裏面高さの誤差は 1 nm 以下であった．また，適合抽出された表面，裏面の信号波形と適合波形を図 2(b)(c)(d)に示す．図 2(b)の表面輝度波形では， $z=0$ が光路差ゼロの干渉ピーク（以下，0 次縞ピークと呼ぶ）になっており，図 2(c)の裏面輝度波形では， $z=-200$ が 0 次縞ピークになっていることに注目されたい．また，図 2(d)の適合輝度波形は，図 2(a)の観測輝度波形に良く適合している．

表 1 計算機実験の適合結果

変数	真値	初期値	推定値	誤差
a (B)	1.50	1.57	1.50	0.00
a (G)	1.50	1.42	1.50	0.00
a (R)	1.50	1.44	1.50	0.00
b_2 (B)	0.50	0.39	0.49	-0.01
b_2 (G)	0.50	0.30	0.48	-0.02
b_2 (R)	0.50	0.25	0.48	-0.02
a	2.00	2.50	2.04	0.04
z_1	0.0	50.0	0.6	0.6
z_2	-200.0	-250.0	-200.7	-0.7
t	200.0	300.0	201.3	1.3

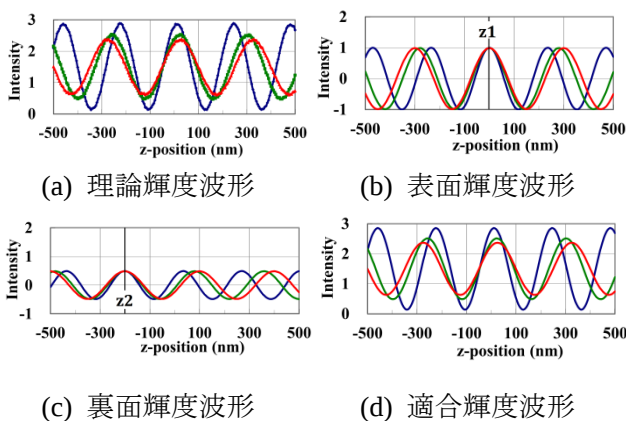
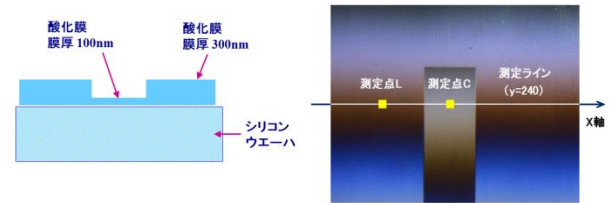


図 2 計算機実験結果

4. 実試料実験

4.1 実験方法

図 3(a)に断面を示す膜厚段差試料 (SiO_2/Si ；膜屈折率 $n=1.46$ ；公称膜厚 100 nm/300 nm) を測定対象とした．図 1 の光学系により，垂直走査画像を撮像した．カラーカメラは，市販の単板 CMOS カメラ (658×492 画素；BGR 各 8bit) で，パソコ



(a) 断面図

(b) 干渉画像

図 3 実試料実験対象：薄膜段差試料

ンとは LAN 接続した．撮像速度を 15 fps とし，ピエゾ機構の走査速度を 150 nm/s としたので， z 軸の 10 nm ピッチで画像取得することになる．走査レンジを約 1 μm とし，約 100 枚の画像が得られた．得られた画像（図 3(b)）の中央ライン（白線）上の画素を測定対象点とし，インターフェログラムを求め，あらかじめ求めたクロストーク係数を使用して，クロストーク補正を実施した．さらに，輝度値の 3 波長間での誤差評価のバランスを取るため， $[(\text{輝度値}-\text{平均値})/(\text{最大値}-\text{最小値})/2]+1$ により正規化し，ほぼ[0, 2]の範囲に収めた．

計算ソフトは，計算機実験と同じく，MS Excel を使用した．初期値は，インターフェログラムと予想膜厚値から，以下の方法で計算した．

- $a(j)=$ 輝度平均値 ≈ 1.0
- $b(j)=$ 輝度レンジ/2(1+ α) ≈ 0.67
- $\alpha=0.5$ ．これは，式(3)に依る．
- $z_2=$ インターフェログラムの 0 次縞ピーク位置．この位置は，BGR 輝度値の和の最大個所として検出する．表面より裏面の振幅が大きいのので，裏面ピーク位置が観測ピーク位置に近いと仮定している．
- $z_1=z_2+$ 予想光学膜厚．ここで，光学膜厚とは，物理膜厚と屈折率の積である．

4.2 実験結果

先ず，図 3(b)の画面に示す測定点 L(膜厚 300 nm) と測定点 C (膜厚 100 nm) の 2 点における測定結果を図 4，図 5，表 2 に示す．

図 4(a)は L 点の観測輝度波形（クロストーク補正，正規化後）であり，本提案手法により，表面信号（図 4(b)）と裏面信号（図 4(c)）に波形分離された．図 4(d)は両者の和信号であり，観測輝度波形に良く適合している．図 5(a)(b)(c)(d)は，C 点の同様の結果である．

両点の測定結果を表 2 に示す．変数の最初の 9 行が適合で得られたパラメータで，その結果から，式(6)(7)により，膜厚 t と裏面高さ z_b が得られている．

得られた膜厚は，295 nm と 101 nm であり，メーカー公称値に近似している．また，両点の裏面高さがほぼ同一で，表面段差が 193 nm と測定され，妥当な結果である．

次に，図 3(b)の中央ライン上の点の測定結果を図 6 に示す．表面高さ z_1 ，裏面高さ z_b ，膜厚 t が安定して測定され，振幅比 α も 0.45 付近で安定している．誤差二乗和 SSE は，エッジ部を除き小さく，適合が安定していることを示している．

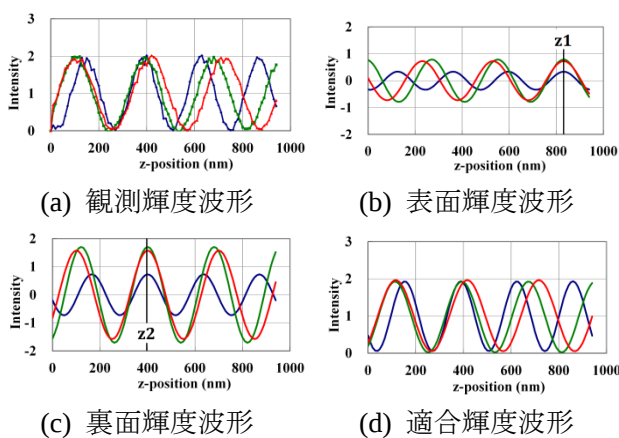


図 4 L 点(膜厚 300nm)の測定結果：波形グラフ

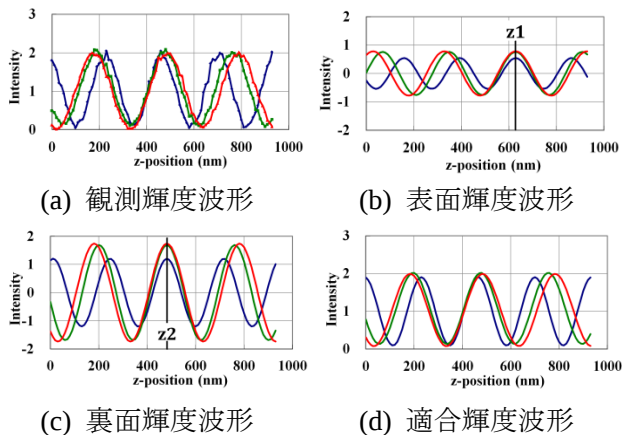


図 5 C 点(膜厚 100nm)の測定結果：波形グラフ

5. 実装上の課題と対策

5.1 局所解問題

本手法の最小二乗適合は，モデルに周期関数を含むため，多数の局所解を持っている．よって，通常，非線形最適化手法では初期値により正しい解が得られないことがある．たとえば，3 章の

表 2 実試料実験結果：画面内 2 箇所の測定結果

位置	左(L)		中央(C)	
変数	初期値	推定値	初期値	推定値
a (B)	1.00	0.99	1.00	1.00
a (G)	1.00	0.98	1.00	1.08
a (R)	1.00	1.01	1.00	1.04
b_2 (B)	0.67	0.73	0.67	1.20
b_2 (G)	0.67	1.71	0.67	1.68
b_2 (R)	0.67	1.58	0.67	1.74
α	0.50	0.46	0.50	0.45
z_1	868	821	606	628
z_2	430	391	460	481
t	300	295	100	101
z_b	568	527	506	528

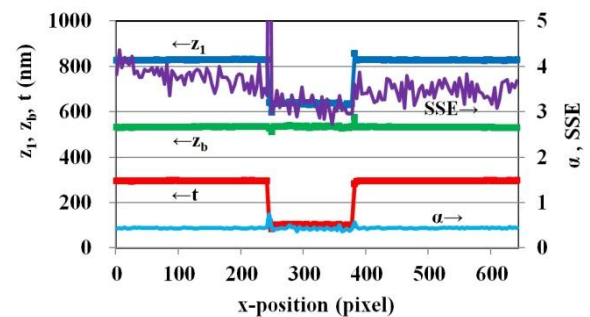


図 6 薄膜段差のライン測定結果

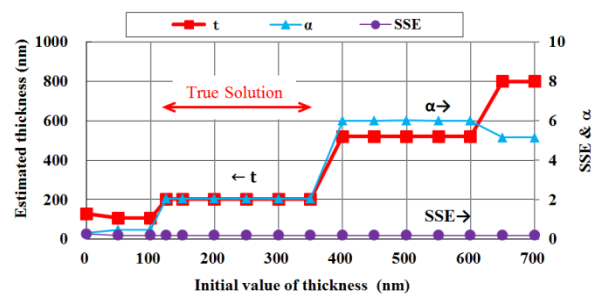


図 7 膜厚初期値依存性

計算機実験において，膜厚の初期値を変更した場合の推定結果を図 7 に示す．膜厚初期値が 125 ～ 350 nm の場合は正しい膜厚（200 nm）に収束するが，それ以外では初期値の近傍の局所解に陥ってしまう．この問題は，局所解をもつ大域最適化問題に使用されるマルチ・スタート法で解決できる．すなわち，複数の初期値を用いて適合を行い，大域最適解を選択する．本提案手法の場合，図 7 のように，評価関数値 SSE には差がないことがあるので，未知変数（たとえば α ）の収束値も判定に使用する．

5.2 計算時間

本報の実験では，MS Excel の最適化ツールである Solver を使用した．計算時間は，Windows PC

(cpu: 3.4GHz) を用いて、1 点あたり約 1.6 s であった。高速化のために、C++言語を使用した実装置搭載用ソフトウェアを開発中である。初期テスト結果では、約 3 ms/点の速度が得られているが、並列演算化など、さらなる高速化は今後の課題である。

6. まとめ

3 波長干渉法による表面形状、裏面形状、膜厚分布の一括同時測定法を提案した。3 波長のインターフェログラム（輝度波形）に、干渉信号モデルを最小二乗適合し、表面ピーク位置と裏面ピーク位置と波形パラメータを一括して求める。本アルゴリズムは、2 つの同一周波数の重畳正弦波信号を個別に分離するものであり、一般的には解けない問題であるが、いくつかの前提により、求解可能にしている。

計算機実験と実サンプル測定により、提案手法の妥当性を確認した。

本手法は、従来の白色干渉測定装置に 3 波長フィルタを挿入し、カメラをカラーカメラに切り替えるだけで装置化が可能で、実用性が高い。今後、アルゴリズムの改良などによりロバスト性を向上し、実用化を図りたい。

補足 1 式(1)の導出過程を以下に示す。

図 1-1 に示すような干渉計において、参照面、膜表面、膜裏面からの反射光強度をそれぞれ I_R , I_1 , I_2 とすると、それらの合成強度 I は、次式で表される[19]。

$$I = I_1 + I_2 + I_R + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + 2\sqrt{I_R I_1} \cos(\varphi_R - \varphi_1) + 2\sqrt{I_R I_2} \cos(\varphi_R - \varphi_2) \quad (1-1)$$

ここで、 φ は各光束の位相である。

垂直走査干渉法では、参照面と試料との相対距離を変える。この時、変化するのは右辺第 5～6 項のみであり、右辺第 1～4 項は一定なので、

$$a = I_1 + I_2 + I_R + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1-2)$$

$$b_1 = 2\sqrt{I_R I_1} \quad (1-3)$$

$$b_2 = 2\sqrt{I_R I_2} \quad (1-4)$$

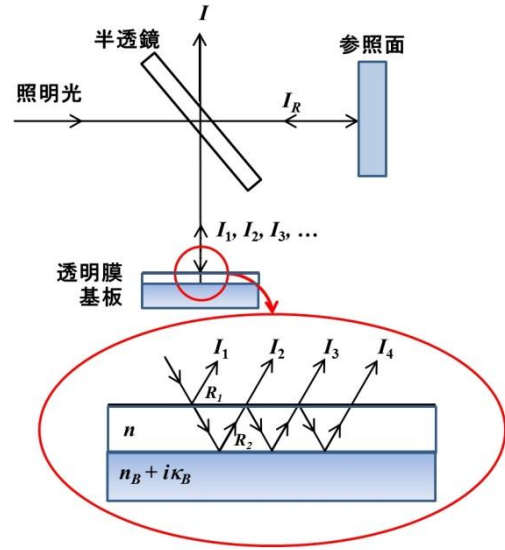


図 1-1 干渉光学系説明図

とおけば、

$$I = a + b_1 \cos(\varphi_R - \varphi_1) + b_2 \cos(\varphi_R - \varphi_2) \quad (1-5)$$

となる。

参照面と膜表面、膜裏面の位相差は、それらの相対距離に依存し、参照面高さを z とすると、

$$\varphi_R - \varphi_1 = \frac{2\pi(z - z_1)}{\lambda/2} \quad (1-6)$$

$$\varphi_R - \varphi_2 = \frac{2\pi(z - z_2)}{\lambda/2} \quad (1-7)$$

で表されるので、次式が得られる。

$$I = a + b_1 \cos\left(\frac{4\pi[z(i) - z_1]}{\lambda}\right) + b_2 \cos\left(\frac{4\pi[z(i) - z_2]}{\lambda}\right) \quad (1-8)$$

補足 2 式(3)の導出過程を以下に示す。

補足 1 の式(1-3)、式(1-4)から、表裏面振幅比 α は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \alpha &\equiv b_1 / b_2 \\ &= (2\sqrt{I_R I_1}) / (2\sqrt{I_R I_2}) \\ &= \sqrt{I_1 / I_2} \end{aligned} \quad (2-1)$$

さらに、多重反射光を無視し（補足 4 参照）、表面の強度反射率を R_1 、裏面の強度反射率を R_2 とすると、式(4-1)を用いて、

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_1}{(1 - R_1)^2 R_2}} \quad (2-2)$$

となる。

一方、空気（屈折率=1）から、透明膜（屈折率 n ）に覆われた基板（屈折率 n_B 、消衰係数 κ ）に垂直入射する光の強度反射率は、フレネル公式の拡張より

$$R_1 = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (2-3)$$

$$R_2 = \frac{(n-n_B)^2 + \kappa_B^2}{(n+n_B)^2 + \kappa_B^2} \quad (2-4)$$

と表される．これを式(2-2)に導入すると，式(3)が得られる．

補足 3 代表的な膜構造における振幅比 α の波長依存性を表 3-1 に示す．一般に膜の屈折率分散は小さく，基板の分散が支配的であり，シリコン(Si)が比較的に大きい， α は $\pm 5\%$ の範囲に入っている．

表 3-1 振幅比 α の波長依存性

膜構造	波長	n	n_B	κ	α
SiO ₂ / Si	470	1.46	4.52	0.12	0.38
	560	1.46	4.05	0.04	0.41
	600	1.46	3.95	0.03	0.42
SiN/ Cr	470	2.05	2.50	3.25	0.67
	560	2.03	3.20	3.30	0.68
	600	2.03	3.20	3.30	0.68

補足 4 代表的な膜構造における多重反射光（膜の上下面での繰り返し反射光）の割合を求め，無視可能なことを示す．図 1-1 において，各反射波の強度は，入射光量を 1 とし，表面と裏面の強度反射率をそれぞれ R_1 ， R_2 とすると，

$$\begin{aligned} I_1 &= R_1 \\ I_2 &= R_2(1-R_1)^2 \\ I_3 &= R_2(1-R_1)^2(R_1R_2) \\ I_4 &= R_2(1-R_1)^2(R_1R_2)^2 \\ &\vdots \end{aligned} \quad (4-1)$$

となる． I_2 以降の和を $I_{2\infty}$ とすると，

$$\begin{aligned} I_{2\infty} &= R_2(1-R_1)^2[1+(R_1R_2)+(R_1R_2)^2 \\ &\quad + (R_1R_2)^3 + \cdots] \\ &= \frac{R_2(1-R_1)^2}{1-R_1R_2} \end{aligned} \quad (4-2)$$

となる．多重反射光を無視した場合と考慮した場合の差 ΔI_2 は，

$$\begin{aligned} \Delta I_2 &= I_2 - I_{2\infty} \\ &= -\frac{R_1R_2^2(1-R_1)^2}{1-R_1R_2} \end{aligned} \quad (4-3)$$

となり，その相対誤差 ε は，

$$\begin{aligned} \varepsilon &\equiv \Delta I_2 / I_{2\infty} \\ &= -R_1R_2 \end{aligned} \quad (4-4)$$

となる．

代表的な膜構造における誤差を表 4-1 に示す．膜裏面反射率の大きいクロム (Cr) 基板の場合においても，多重反射成分は裏面反射光の 4% 以下であり，一般に多重反射光を無視できることが分かる．

表 4-1 多重反射光の割合 ($\lambda=560\text{nm}$)

膜構造	n	n_B	κ	R_1	R_2	I_2	$\varepsilon(\%)$
SiO ₂ / Si	1.46	4.05	0.04	3.5	22.1	20.6	-0.8
SiN/ Cr	2.03	3.20	3.30	11.6	32.0	25.0	-3.7
SiO ₂ / Cr	1.46	3.20	3.30	3.5	42.7	39.8	-1.5
SiO ₂ / BK7	1.46	1.52	0	3.5	0.0	0.0	-0.0

補足 5 同一周波数の 2 個の正弦波の和⁴を観測して，2 つの波に分解する問題（一種の逆問題）が解ける必要条件を考察する．単純化のために，バイアス成分を無視すると，1 個の正弦波のパラメータは，振幅と位相の 2 個である．観測される正弦波が m 個の場合，得られるパラメータ（逆問題の観測データ数）は $2m$ 個である．一方，未知変数は，分解後の 2 個の正弦波の振幅 $b_1(j)$ ， $b_2(j)$ と位相 $\phi_1(j)$ ， $\phi_2(j)$ であるから， $4m$ 個になり，解くことができない．

ここで，本提案手法のように， m 個の波長で同時に干渉波形を観測した場合，分解後の 2 個の正弦波の位相を支配する高さ z_1 ， z_2 は波長に依存せ

⁴ 2 個の $\cos$ 波の和は，次の式で表される．

$$\begin{aligned} A\cos(\alpha t + \alpha) + B\cos(\alpha t + \beta) &= C\cos(\alpha t + \Phi) \\ C &= \sqrt{(A\cos\alpha + B\cos\beta)^2 + (A\sin\alpha + B\sin\beta)^2} \\ \Phi &= \tan^{-1}[(A\sin\alpha + B\sin\beta)/(A\cos\alpha + B\cos\beta)] \end{aligned}$$

ず共通であるので、未知変数は、 $2m+2$ 個になる。

さらなる未知変数削減のために、本提案手法の仮定（振幅比 $\alpha \equiv b_1(j)/b_2(j)$ が一定）を用いると、未知変数は、 $m+3$ 個になる。

よって、求解必要条件は、

$$\begin{aligned} 2m &\geq m+3 \\ \therefore m &\geq 3 \end{aligned} \quad (5-1)$$

となる。

参考文献

- [1] 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 講演論文集，87-92 (2003)
 - [2] K. Kitagawa: Simultaneous Measurement of Film Surface Topography and Thickness Variation using White-Light Interferometry, Proc. of SPIE 6375, 637507 (2006)
 - [3] K. Kitagawa: Thin Film Thickness Profile Measurement using an Interferometric Surface Profiler, Proc. of SPIE 6716, 671607 (2007)
 - [4] 小川英光，下山賢一，福永正和，北川克一，杉山将：白色光干渉法による透明膜に覆われた物体の膜厚と表面形状の同時測定，計測自動制御学会論文集，43(2) 71-77 (2007)
 - [5] K. Kitagawa: Film surface and thickness profilometry, in "Handbook of Optical Metrology -Principles and Applications-", Edited by Toru Yoshizawa, CRC Press, 677-691 (2009)
 - [6] 小川英光，中野渡祥裕，北川克一，杉山将，内藤卓人：単色光干渉法による透明膜に覆われた物体の膜厚と表面形状の同時測定，計測自動制御学会論文集，45 (2) 73-82 (2009)
 - [7] 内藤卓人，杉山将，小川英光，北川克一，鈴木一嘉：透明膜で覆われた物体のワンショット干渉計測法，精密工学会誌，75 (11) 1315-1322 (2009)
 - [8] S. W. Kim and G. H. Kim: Thickness profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry, Appl. Opt. 38, 5968-5973 (1999)
 - [9] D. Kim, S. Kim, H. Kong and Y. Lee: Measurement of the thickness profile of a transparent thin film deposited upon a pattern structure with an acousto-optic tunable filter, Opt. Lett. 27, 1893-1895 (2002)
 - [10] H. Akiyama, O. Sasaki, and T. Suzuki: Sinusoidal wavelength-scanning interferometer using an acousto-optic tunable filter for measurement of thickness and surface profile of a thin film, Opt. Express 13, 10066-10074 (2005)
 - [11] 北川克一，杉原洋樹，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によるインクジェット方式カラーフィルタの膜厚測定，精密工学会誌，78 (1), 86-91 (2012)
 - [12] 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) 112-116 (2012)
 - [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 講演論文集，456-463 (2011)
 - [14] K. Kitagawa: Single-shot surface profiling by multiwavelength interferometry without carrier fringe introduction, J. Electron. Imaging 21, 021107 (2012)
 - [15] K. Kitagawa: Thin-film thickness profile measurement by three wavelength interference color analysis, Appl. Opt. 52 (10), 1998-2007 (2013)
 - [16] 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) (2013) [掲載予定]
 - [17] 北川克一：3 波長干渉を用いた透明膜の表面形状・裏面形状・膜厚分布の同時測定ーモデル適合法による重畳正弦波信号の分離アルゴリズムー，精密工学会 2012 年秋季大会学術講演会講演論文集，619-620 (2012)
 - [18] 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)
 - [19] 山口一郎：「応用光学」，119，オーム社 (1998)
- 北川克一：東レエンジニアリング（株）専門主幹．情報理工学博士（東京大学）．画像処理応用・光干渉計測の技術開発に従事．計測自動制御学会技術賞，ViEW2003 小田原賞，手島記念財団発明賞，精密工学会技術賞，精密工学会論文賞を受賞．計測自動制御学会認定計測制御エンジニア． <http://www.scn.tv/user/torayins/>