A Visualization Method of Uneven Areas on Single Layer Thin Films

Toshiyuki Kashiwagi Member (Tokushima Prefectural Industrial Technology Center, kasi@itc.pref.tokushima.jp)

Shinji Higaki Non-member (Hamamatsu Metrix co., ltd., s_higaki@metrix.co.jp)

Toshiyuki Miyawaki Non-member (Hamamatsu Metrix co., ltd., miyawaki@metrix.co.jp)

Shunichiro Oe Member (Shikoku University, oe@keiei.shikoku-u.ac.jp)

Keywords : unevenness, visualization, thin film, frequency, interference, silicon wafer

1. Introduction

We propose a visualization method of uneven areas on single layer thin films formed on optical filters or semiconductor materials. High uniformity of the thickness of thin films is required to produce those devices, in spite of the difficulty of visual inspection. Our method visualizes uneven areas on thin films by detecting intensity variances of light interference. This method is based on the original techniques, which have been developed to detect non-uniform color areas using a color histogram.

2. Capturing Method

To capture images, we utilize a fluorescent lamp with 3 lighting spectrum peaks and a high sensitive color line sensor camera. Moreover, we adjust the proper capture angle to get the most sensitive intensity variances about 3 lighting spectra (436nm, 546nm and 610nm). Each lighting spectrum image is captured by 3 CCD color sensors (blue, green and red) respectively. Fig.1 shows an image capturing method. In the taken color image, uneven areas of thickness of thin films are observed as uneven color areas.

3. Detecting Uneven Areas in Color Images

In previous work we have proposed a new feature image of which pixel holds the number of frequency of color vectors. This feature image that we call Frequency Image is made from a special color histogram of an image and presents a distribution of frequency of color. The frequency of the color of uneven areas is lower than that of normal areas in this Frequency Image. Therefore we can distinguish between uneven areas and normal areas using the frequency as a threshold.

4. Visualization

We propose two visualization ways using color and monochrome displays. Color visualization vector of $\mathbf{p}_v$ is defined

by the following equation:

$$\mathbf{p}_v = \mathbf{p}_o + k_c(\mathbf{p} - \mathbf{p}_s) \quad (1)$$

where $\mathbf{p}_o$ is a standard vector of visualization, $\mathbf{p}$ is a color vector of each pixel, $\mathbf{p}_s$ is an average vector of normal area pixels and k_c is a positive emphasis constant. The normal area pixels, of which frequency is higher than the half of others, are selected in a frequency image. This color visualization method is effective to recognize a slight relative difference of thickness in uneven areas.

To understand the film thickness visually, we use a monochrome image in which the brighter pixel has the thicker thickness. We define the brightness Y of the pixel by following equation:

$$Y = Y_o + k_m \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_s\| \quad (2)$$

where Y_o is a standard brightness, $\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_s\|$ is an Euclidian distance between two vectors, and k_m is an emphasis constant. The sign of k_m is determined by the position of $\mathbf{p}$ in color space. If the $\mathbf{p}$ located at thicker thickness position compared to the $\mathbf{p}_s$, the sign is plus. If not, the sign is minus.

5. Experimental Results

In our experiments to visualize uneven areas on a thin oxide layer on silicon wafers, we can discern the uneven area of which height has the difference of 2 nanometers from the normal area.

Fig.2 shows the visualization result of uneven areas on a thin layer of silicon oxide by a monochrome image. In this image, the brighter pixel has the thicker thickness of the oxide layer.

Fig. 1. Image capturing method

Fig. 2. Visualization result of uneven areas on a thin layer of silicon oxide by a monochrome image (film thickness:100nm)

単層薄膜のむらの視覚化手法

正 員 柏木 利幸* 非会員 檜垣 真二**
非会員 宮脇 俊幸** 正 員 大恵俊一郎***

A Visualization Method of Uneven Areas on Single Layer Thin Films

Toshiyuki Kashiwagi*, Member, Shinji Higaki**, Non-member, Toshiyuki Miyawaki**, Non-member,
Shunichiro Oe***, Member

We propose a visualization method of uneven areas on single layer thin films formed on optical filters or semiconductor materials. High uniformity of the thickness of thin films is required to produce those devices, in spite of the difficulty of visual inspection. Our method visualizes uneven areas on the film by detecting intensity variances of light interference. To capture images, we utilize a fluorescent lamp with 3 lighting spectrum peaks and a high sensitive color line sensor camera. In the taken color image, uneven areas of thickness of thin films are observed as uneven color areas. Our method displays the uneven color areas based on the average vector of normal area pixels, which are selected by the original techniques to detect non-uniform color areas using color histogram. In our experiments to visualize uneven areas on a thin oxide layer on silicon wafers, we can discern the uneven area of which height has the difference of 2 nanometers from the normal area.

キーワード：むら，視覚化，薄膜，頻度，干渉，シリコンウェハ

Keywords：unevenness, visualization, thin film, frequency, interference, silicon wafer

1. はじめに

フィルタや平面ディスプレイ材料，半導体材料などに形成された単層薄膜のむらの視覚化手法を提案する。これらの対象製品には膜厚の高い均一性が要求されるが，目視での検査は極めて困難なものである。薄膜は，最近の薄型テレビに用いられている液晶フィルタや半導体製造プロセスで形成されるシリコン酸化膜など，種々の用途で利用されており，薄膜の持つ電気的な機能，光学的な機能，機械的な機能などが最新のデバイスに高次元で利用されている。これらの薄膜は，高精度な膜厚の管理技術が必要で，膜厚に発生するむらは，薄膜の機能に重大な影響を及ぼしている。このため，膜厚を計測するための種々の計測装置が開発されてきた。

膜厚を計測する方法は，プローブによる接触方式，薄膜

の光学的な特性を利用した非接触方式などがあり，膜厚以外の屈折率や吸収係数などの光学定数も計測できる光学方式が高精度薄膜の評価に用いられている。代表的なものは，検査光源の波長を連続的に変化させ，反射光のスペクトルの干渉強度の変化を調べる膜厚測定装置や偏光の偏波面により異なる反射率，位相差を調べることにより計測を行う偏光解析装置（エリプソメーター）などがある。しかし，これらは高精度であるがポイントもしくは小領域計測であるため，広範囲のむら計測には時間がかかり，インライン検査には不向きである。このため，生産現場では目視検査が行われてきたが，これまでに目視検査に代わって，種々の検査装置も考案されてきている。

生産現場で使用される検査装置は，薄膜に照射した光の表面と裏面での干渉による反射強度の変化をカメラで撮影する方式のものが多く，単色光源または狭帯域フィルタを用いて，モノクロカメラで干渉の強度変化を画像として取得している^{(1)~(4)}。また，低反射膜を対象として膜厚差による色の分光反射特性の違いを利用するものもあり，カラーカメラを用いてカラー値（R, G, B）を取得し，R と B の色の差分により検出を行っている⁽⁵⁾。このような画像取得方式に関するこれまでの事例は特許文献の中に多く見られる^{(1)~(5)}。

最近では数ナノメートル以下の膜厚差が問題となる微弱むらがあり，熟練の検査員でも判別が難しく，これまでで

* 徳島県立工業技術センター

〒770-8021 徳島市雑賀町西開 11-2

Tokushima Prefectural Industrial Technology Center

11-2, Nishibari Saika-cho Tokushima-city, Tokushima 770-8021

** 浜松メトリックス（株）

〒431-2103 静岡県浜松市北区新都田 1-4-10-10

Hamamatsu Metrix Co.Ltd.

1-4-10-10, Shinmiyakoda Kitaku Hamamatsu, Shizuoka 431-2103

*** 四国大学

〒771-1192 徳島県徳島市応神町古川

Shikoku University

1-1-1, Hurokawa Ojin-cho Tokushima-city, Tokushima 771-1192

上の検出感度を有する検査装置が望まれている。

本研究では微弱むらのインライン検査への前段階として、検査角度を選択して微弱むらを感度良く検出し、視覚化する手法を提案する。まず、膜厚、検査角度、波長と干渉強度の関係を説明し、3波長狭帯域光源とカラーラインセンサカメラを用いて最適な検出角度を設定して感度良くむらの撮影を行う。3波長それぞれの膜厚による干渉強度の変化は色むらとして観察される。つぎに、取得したカラー画像を用いて、色の出現頻度を表す頻度画像を作成し、頻度画像を利用して検査対象物の均一領域を抽出する^{(6)~(8)}。さらに、この均一領域を基準として、むらの強度分布の視覚化を行う。視覚化はカラー画像と濃淡画像を利用する2つの方法を考案した⁽⁹⁾。

これまでの研究では、検出感度を上げるために、膜厚に応じて複数の検査波長を選択する報告はあるが⁽¹⁰⁾、本研究のように、固定の多波長を利用し、検査膜厚に応じて検査角度を最適に設定し、微弱むらの強度分布を視覚化する報告は無い。

本手法の対象とする膜厚は、吸収のほとんど無い単層の誘電体薄膜とし、膜厚の変動幅は数十ナノメートル以下とする。シリコンウェハに形成された酸化膜 100nm と 1000nm に対してむらの視覚化の実験を行ったところ、計測値と似かよったむらの強度分布を得ることができ、視覚的に微弱むらを確認することができた。

2. 撮像方法

微弱な膜厚変化によるむらを検出するためには、高精度の撮像系が必要である。撮像系は、Fig.1 に示すように照明と 12 ビット 2k 素子のカラーラインセンサカメラ、ワークを搭載できる直線移動テーブル（スライダ）から構成され、検査対象物に照射された入射光を正反射の位置で撮影できる。照明は 3 波長の蛍光灯を使用しているため、カメラの RGB の帯域で 3 つの輝線スペクトル波長に対応する干渉画像を取得することができる。すなわち、3 波長それぞれの干渉画像は、カラーカメラでは色むらとして観測される。

照明とカメラの撮影角度は、むらが最も見やすい位置に設定し、検査対象物を移動させながらスライダの位置に

Fig. 1. Image capturing method.

同期してカラーラインセンサカメラで画像を取得する。なお、画像は無偏光の状態を取得し、撮像前には、標準のワークまたは白色板を使用して RGB 独立にシェーディング補正を実施している。

3. 原理

膜厚むらは、カラーカメラにより色むらとして観測される。本章では、微弱な膜厚むらをどのようにして色むらとして取得するか、また、取得した色むらをどのように視覚化するかを説明する。

〈3・1〉 膜厚むらと干渉 反射方式で薄膜を撮影すると、膜厚により明暗が観察される。また撮影する角度を変えても明暗が変化する。明暗は主に薄膜の表面で反射された光と裏面で反射された光が干渉することにより発生する。今、Fig.2 のように基板の上に薄膜がある場合を考える。空気、薄膜、基板の屈折率を n_1, n_2, n_3 ($n_1 < n_2 < n_3$) とすると、薄膜の表面の境界では、スネルの法則が成り立つから表面の入射角を θ_1 、屈折角（透過角）を θ_2 として、次式の関係が成り立つ。

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{..... (1)}$$

膜厚を t として光路差 l は $(2n_2 \overline{PR} - n_1 \overline{PQ})$ であるから

$$l = 2n_2 \cos \theta_2 = 2t \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1} \quad \text{..... (2)}$$

となる。ところで、二つの波の振幅を A_1, A_2 、二つの波の位相差を α とすると合成された波の振幅 A_0 の 2 乗は

$$A_0^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \alpha \quad \text{..... (3)}$$

と表される。この式の右辺の 1, 2 項は定数項で、第 3 項が干渉項となる。CCD で観測される光の強度は振幅の 2 乗に比例するための、(3)式に比例した強度が観測され、その変動分は干渉項に比例する。

本手法の視覚化対象としている数十ナノメートル以下の膜厚変動範囲では、 α が 2π の整数倍のとき位相が重なって最も明るく見える。これは、点 P と点 R における反射波の位相変化が等しいとすると、光路差が波長の整数倍のときである。光路差 l と α は、波長を λ として、

$$\alpha = \frac{2\pi l}{\lambda} - \phi = \frac{4\pi n_2 \cos \theta_2}{\lambda} t - \phi \quad \text{..... (4)}$$

Fig. 2. Optical path of incident light at uniform planar interfaces of a thin film.

の関係がある。ここで、 ϕ は点Pと点Rにおける反射波の位相変化による初期位相差で、基板が誘電体の場合、 $n_1 < n_2 < n_3$ では $\phi=0$ 、 $n_1 < n_2 > n_3$ では $\phi=\pi$ となる。また、基板が誘電体でない場合は、 ϕ は基板の複素屈折率に基づいた値となり計算により求めることができる。波長と入射角が固定の場合、 α は膜厚 t の一次関数となる。

〈3・2〉 最適撮影角度の設定 数ナノ程度の膜厚の微小変化を捉えるために、膜厚の微小変動で、明るさ変化率ができるだけ大きくなる撮影角度に設定する。

画像取得時には、波長、角度などの条件は固定であるため、(4)式より、膜厚 t の変動は、位相差 α の変動となる。このとき、(3)式を α で微分すると、入射波と反射波の振幅は定数であるため、合成波の振幅の2乗(A_0^2)の変化率、すなわち明るさの変化率は、

$$\frac{d}{d\alpha} A_0^2 = -2A_1 A_2 \sin \alpha \cdots \cdots \cdots (5)$$

となる。したがって、 α が $\pi/2$ または $3\pi/2$ 付近のとき、すなわち $\cos \alpha=0$ 付近で、膜厚の微小変動による明るさの変化量が大きい。

屈折率と薄膜の膜厚設計値が予め分かっている場合には、 $\cos \alpha=0$ となるように θ_2 すなわち θ_1 を調整してむらの変動が最も良く観察できる角度に設定することができる。また、(4)式より θ_2 が小さいほど膜厚による明暗の周期は短くなり、膜厚の微弱変動に対する感度も上がると考えられるためできるだけ小さな θ_1 を選択する。

本手法では、カラーラインセンサカメラで3波長の干渉画像を同時に取得するが、3波長とも感度の高い角度に設定し難い場合がある。しかし、2波長程度であれば比較的簡単に感度の高い角度に設定できる。具体的な θ_1 の求め方は次章にて説明する。

以上の原理は、薄膜の表面と裏面の反射の干渉だけに着目し、薄膜の表面と裏面間で生じる多重繰り返し反射による干渉の影響は少ないと考えている。

〈3・3〉 むらの可視化手順 可視化は、3波長の干渉画像をカラー画像として取得し、色の出現頻度を表す頻度画像を作成した後に、均一領域を抽出する。さらに、この領域を基準として、各画素との空間的な距離を求めることにより行う。手順を以下に説明する。

(1) 干渉画像の取得

カラーラインセンサカメラで取得できる画像は、12ビットの画像であるが、12ビットのカラー画像からカラーヒストグラム空間を構成すると、大きなメモリ空間が必要となり、メモリの使用効率も良くない。そこで、まず、ノイズの影響を避けるため上位10ビットを利用して、3波長10ビットの干渉画像を取得する。さらに、この10ビット画像において、各カラー値の変動部分のみを切り出し8ビットのカラー画像とする。切り出しはRGB独立に行う。具体的には、正常ワークを撮影し、カラーデータの濃度断面である3つのラインプロファイルを得て、このラインプロファイルの平坦部分に近い水平ラインを切り出しの基準として、そ

の上下の7ビット分に相当するデータをRGB独立に取得している。基準は厳密なものでもなくとも良いためマニュアルで設定しており、ワークの種類を変更しない限り切り出し基準の変更を行う必要はない。切り出した部分は、(3)式における干渉項の変化部分を強調して取り出したカラー画像に相当する。以後、この8ビットカラー画像を用いて可視化処理を行う。

(2) 頻度画像の作成

頻度画像は、頻度情報を有するカラーヒストグラム空間を利用して作成する⁽⁷⁾。

カラー画像を、座標を表す2つの独立変数 x, y の関数 $f(x, y)$ によって表現し、 $f(x, y)$ をカラーヒストグラム空間上にプロットしたものを H とする。 H はR, G, Bそれぞれの座標の成分とその座標における頻度を保持している。

元の画像 $f(x, y)$ のカラー値を H より得られる頻度に置き換えると $f(x, y)$ は、カラー値の出現頻度を表す濃淡画像となる。この画像を頻度画像 $g(x, y)$ と呼ぶ。

均一性の高い検査対象物に対しては、頻度画像の頻度の高い部分は均一部分で、頻度の低い部分は不均一部分となる^{(6)~(8)}。頻度画像は複数枚使用することで高いノイズ除去能力が期待できる。

(3) 基準ベクトル検出

RGB空間における基準ベクトルを検査対象物の均一エリアの平均ベクトルと定義しこれを p_s とおく。しかしながら、検査対象物のどこが均一エリアかを特定することは難しく、一般的な方法では p_s を求めることは困難である。そこで、頻度画像を利用して p_s を求める。まず、このような検査対象物では均一部分は少なくとも検査対象エリアの50%以上はあると考えて、頻度画像において頻度の高い画素から順に検査エリアの50%に相当する画素数までを抽出する。その後、抽出したそれらの画素の平均ベクトルを求め、これを基準ベクトル p_s とする。これにより不均一部分を平均値計算から除去でき、均一エリアの信頼性の高い平均ベクトルを取得することができる。

(4) むらのカラー表示

カラー値として取得された干渉画像の各画素のカラーベクトルを p 、可視化基準とするカラーベクトルを p_o とし、表示のためのベクトル p_v を次式で定義する。

$$p_v = p_o + k_c(p - p_s) \cdots \cdots \cdots (6)$$

ただし、 k_c は正の定数

本論文での実験には、 $p_o=(127,127,127)$ を使用した。

微弱なむらの場合、 p_s と p は、近い位置にあるため可視化のためには大きめの k_c の値を設定してむらの強度差を強調する必要がある。本カラー表示方法は微弱な膜厚差の視認に適している。

(5) むらの強度による濃淡表示

前述のカラー表示方法では、検査角度により膜厚変動に対応する色変動が異なっている。このため、色変化がどのように膜厚変化に対応しているか事前知識が無いと分から

Fig. 3. Brightness variations by thickness of a thin film at different wavelengths.

ず、膜厚を視認するには不都合な場合がある。そこで膜厚の厚さに応じて濃淡で表示する方法を提案する。

干渉画像の明るさ変動は $\cos \alpha$ に比例するため、膜厚が増加する時に明るさが増える場合と、その逆の場合がある。これは、使用する波長によっても変わる。

Fig.3 に異なった波長と膜厚による干渉画像の明るさの変動例を示している。膜厚むらによる膜厚変動幅の範囲では、膜厚が増えると、波長 λ_3 では明るさが増え（単調増加）、 λ_2 では明るさが減る（単調減少）。また、 λ_1 では明るさがあまり変動していない。むらの強度を濃淡表示するためには、Fig.3 の p_s を基準として p_s より右側では膜厚が厚くなるほど明るく、左側では膜厚が薄くなるほど暗く表示すると直感的に分かりやすい。基準の明るさを Y_0 として、表示する画素の明るさ Y を次式で定義する。

$$Y = Y_0 + k_m \|p - p_s\| \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 k_m は定数で、Fig.3 で p の値が p_s より左側にある場合が負、右側にある場合が正の値とする。なお、 $\|p - p_s\|$ は、二つのベクトル間のユークリッド距離を表すが、Fig.3 の λ_1 のように、膜厚変動幅内で明るさの変動がほとんどない成分に関しては、その成分を除いて計算を行うものとする。本論文での実験には $Y_0 = 127$ を使用した。

4. 実験と考察

直径 20cm のシリコンウェハ上に形成された、膜厚約 100nm と 1000nm の 2 種類の単層シリコン酸化膜について、その膜厚むらを可視化する実験を行った。使用した蛍光灯の輝線のピーク波長は、436nm (青)、546nm (緑)、610nm (赤) である。

〈4・1〉 撮影角度の検討 空気の屈折率 $n_1=1.0$ 、シリコン酸化膜の屈折率 $n_2=1.47$ 、初期位相差 $\phi=0$ 、膜厚 $t=100\text{nm}$ または $t=1000\text{nm}$ として、撮影角度の検討を行った。各検査波長に対して、入射角度 θ_1 を変化させたときの(3)式における干渉項の $\cos \alpha$ を、(2)式と(4)式を用いて次式により計算する。

$$\cos \alpha = \cos \left(\frac{4\pi t}{\lambda} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1} - \phi \right) \dots\dots\dots (8)$$

この値が 0 に近いとき膜厚変動に対して最も明度変化が

Fig. 4. The variance of $\cos \alpha$ in the interference term. (Film thickness: 100nm)

Fig. 5. The variance of $\cos \alpha$ in the interference term. (Film thickness: 1000nm)

大きく感度が高い。Fig.4 と Fig.5 に膜厚が 100nm と 1000nm の各検査波長の $\cos \alpha$ の変動を示す。これらの図において、入射角度が小さく $\cos \alpha = 0$ のラインに 3 波長とも近い角度を選択できれば膜厚変動を感度良く検出できる。

しかし、膜厚 100nm では、どの波長もあまり感度が良くない。これは、100nm の光学膜厚が可視光の中心である緑の波長の 1/4 波長に相当し、反射防止膜として機能しているためと考えられる。このため、長波長側と短波長側で膜厚変動に対する感度がやや良くなっている。

また、膜厚 1000nm では、20 度と 45 度付近で、赤と緑の波長の感度が良いが青の波長は悪くなる。一方、35 度付近では青の感度が良いが、緑と赤は悪くなる。

以上より、入射角すなわち撮影角度を 20 度として実験を行った。

ところで、繰り返し多重反射の干渉を考慮した薄膜の反射率はフレネル係数を利用して求めることができる⁽¹¹⁾。実験に使用した各波長で、入射角を 20 度として、100nm および 1000nm 付近の反射率の計算結果を Fig.6 と Fig.7 に示す。

膜厚 100nm では青の感度が良く、100nm 近傍で単調増加、膜厚 1000nm では、赤と緑の感度が良く、1000nm 近傍で赤は単調増加、緑は単調減少であることが分かる。

〈4・2〉 実験結果 シリコンウェハに形成された酸化膜 100nm と 1000nm に対してむらの視覚化を行った。

Fig. 6. Thickness and reflectance of interference.
(Angle of incidence:20deg)

Fig. 7. Thickness and reflectance of interference.
(Angle of incidence:20deg)

Fig. 8. Visualization result of uneven areas on a thin layer of silicon oxide by a color image.
($k_c = 3$, Film thickness:100nm)

Fig. 9. Visualization result of uneven areas on a thin layer of silicon oxide by a monochrome image. ($k_m = 1.5$, Film thickness:100nm)

Fig. 10. Frequency image of the sample of Fig.8. (Film thickness: 100nm)

Fig. 11. Measurement result of the sample of Fig.8 using an optical thin film measurement system.

(1) 酸化膜 100nm

Fig.8 に、右上部に膜厚異常箇所のあるサンプルを(6)式によりカラー表示した結果を示す。また、Fig.9 には、同じサンプルを(7)式により膜厚が厚いほど明るくなるように表示した結果を示す。この時、青の波長を単調増加、赤の波長を単調減少とし、緑の波長は使用していない。Fig.8 と Fig.9 を比べると、カラー表示では微少な膜厚差がよく分かるのに対して、モノクロ表示では膜厚の分布状況が直観的に視認し易い。

さらに、Fig.10 には、同じサンプルの8ビットカラー画像より作成した頻度画像を示している。実測では、膜厚異常箇所である図中の右上部が正常部分より 6nm 程度厚く、左エッジ付近の丸い部分は 2nm 程度厚くなっている。頻度画

Fig. 12. Comparison with visualization results and measurement results. (Film thickness:1000nm)

像では、むらの位置は特定できるもののむらの強弱までは視認できない。一方、本手法による表示結果では、むらの強弱まで視認できる。

光学式の計測器を用いて、このサンプル 400 ポイント余りの箇所について膜厚を計測した結果を Fig.11 に示す。Fig.11 で膜厚が厚い部分は、Fig.9 では明るく表示されていることが分かる。

(2) 酸化膜 1000nm

膜厚 1000nm のむらの微弱変化は、100nm のむらよりも感度良く検出できる。Fig.12 に、膜厚異常箇所のあるサンプルと正常サンプルについて、(6)式による視覚化の結果と実測の結果を比較して示す。カラー表示では赤と青の波長は単調増加、緑の波長は単調減少として表示されている。

〈4・3〉 考 察 むらを見やすくするための視覚化係数 k_c 、 k_m と、実測結果による膜厚とむらの強度の関係、基準ベクトル、感度、光源、課題について検討する。

(1) 視覚化係数

(6)、(7)式で用いる視覚化のための係数 k_c 、 k_m は、対象ワークのむらを判別できるように知覚的に決定される。本実験のように 12 ビットのカメラを用いる場合、取得画像の上位 8 ビット表示画像に比べて、 $k_c=1$ では原画像の特定のレベルの変化分を 16 倍に、 $k_c=2$ では 32 倍に拡大して観測していることになる。 k_m に関しては 3 変数の変化量をユークリッド距離として計算しているため、 k_c のさらに 1~1.73 倍程度になる。本実験では、視覚化した画像における欠陥部分が表示レベルの最大値を超えないような値に設定している。

(2) むらの強度と膜厚

むらの強度と膜厚変動の視覚的な一致度を調べるために、計測結果のマップを参考に、むらのモノクロ表示画像に等輝度線を追加した。この画像を Fig.13 に示す。なお、緩やかに輝度が変化している部分は、ノイズなどにより境界線が不安定になるため、モノクロ表示画像にはメディアンフィルタを適用している。Fig.13(a)は、Fig.9 に等輝度線を付加したもの、Fig.13(b),(c)は、Fig.12(a),(c)に対応するモノクロ表示画像にそれぞれ等輝度線を付加したもの、Fig.13(d)は、基準ベクトルを RGB の平均値として、モノクロ表示画像を作成後、Fig.13(b)と同じ輝度レンジで等輝度線を付加し

たものである。

Fig.12(c)および Fig.13(c)とこれに対応する計測結果 Fig.12(d)を比べると、膜厚の変化が緩やかなところではずれが生じている。これはシェーディング補正が膜厚差 1nm 以下のレベルまで厳密に行えていないのが原因であると推測している。一方、膜厚変化の大きな箇所では視覚的によく一致している。本研究の目的は、熟練の検査員でも判別が難しいような微弱むらの視覚化である。このようなむらは、局所的に膜厚差があり、シェーディング補正が不十分であっても視覚化された画像では視認できるため、ずれは実質的には問題とならないレベルであると考えている。

(3) 基準ベクトル

本手法は基準ベクトルの検出に頻度画像を利用していることを特徴としている。Fig.13 の(b)と(d)を比較すると、部分的に等輝度線の間隔が変わっている箇所が見られる。このように、基準ベクトルとして単に RGB の平均を使用した場合には、サンプルごとに正常部分のレベルが変動するだけでなく部分的に輝度変化率が変わる場合もある。

(4) 感 度

検出感度に関しては、(3)式において、干渉項と定数項の比 $2A_1A_2/(A_1^2+A_2^2)$ も考慮する必要がある。この比はフレネルの式⁽¹⁾より計算可能で、比の値が大きいくほど感度が良い。本実験サンプルの場合、比の値は 0~40 度の範囲で差異はあまり見られず、感度の向上はあまり期待できない。

(5) 光 源

本実験ではアパーチャ付きの 3 波長の蛍光灯を使用しており、輝線部分のレベルは高く狭帯域で干渉現象の観察には適していると考えている。しかし、輝線以外の波長では、レベルはかなり低いものの広帯域の発光波長領域もあり感度を低下させる要因になっていると考えられる。

(6) 課 題

本手法は、3 波長を利用し、対象ワークが代わっても、検査角度の変更だけで、高感度に膜厚の変動分を捉えることを特長としている。膜厚の微小変化が明るさのリニアな変動として高感度に検出できる角度を選択しているが、実測値との厳密な相関は十分に検討していない。また、対象ワークの基準膜厚とその変動幅が分かれば、Fig.6, 7 のような 3 波長の反射率の変化から膜厚と明るさのある程度の線形

Fig. 13. Contour map based on the mura (uneven area) intensity. ((a): $k_m=1.5$, (b)-(d): $k_m=1.2$)

性を推定できるが、対象ワークを特定できない状況では推定が難しい。

本手法が、膜厚の計測に利用できるかどうかの検討は今後の課題である。

5. ま と め

3 波長蛍光灯による 3 波長それぞれの干渉画像を、撮影角度を調整することにより、感度良くカラー画像として取得する方法を説明した。3 波長それぞれの膜厚による干渉強度の変化は、色むらとして観察される。さらに、このむらを可視化する方法として、頻度画像を利用して、検査対象物の均一領域を求め、均一領域を基準として、むらの強弱をカラー画像で表示する方法と、むらの強度に合わせて濃淡表示する方法を提案した。シリコンウェハ上に形成された単層シリコン酸化膜のむらを視覚化したところ、実測値と視覚的に似かよった分布を得ることができた。また、2nm 程度の高低差のあるむらを視認することが可能であった。実測に用いたシリコンウェハの膜厚計測器は、ポイント計測であるため、10 分以上の計測時間を要するが、本手法では 30 秒程度の画像の取込時間で視覚化を行うことができる。

本手法は、薄膜に限定されず、一般的な色むらの可視化にも有効である。本技術を応用したむらのオフラインの検査装置は既に実用化されており、薄膜に限らず幅広い用途に対応できる仕様となっている。

本研究は、関東経済産業局の委託により平成 16, 17 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業「高精度な液晶色ムラ検査システムの開発」として実施した研究に基づいて改良研究を行ってきた成果である。ご支援をいただいた関係機関の方々に深く感謝いたします。

(平成 21 年 12 月 10 日受付, 平成 22 年 3 月 28 日再受付)

文 献

- (1) 「透明膜の検査方法」: 特開平 10-38753
- (2) 「膜厚ムラ検査方法」: 特開平 2007-114125
- (3) 「着色膜厚ムラ検査方法および装置」: 特開平 2007-205743
- (4) 「反射防止フィルムの反射防止層の膜厚を測定する方法」: 特開平 2007-10403
- (5) 「膜厚むら検査装置, 膜厚むら検査方法および膜厚むら検査プログラム」: 特開平 2003-166941A
- (6) T. Kashiwagi and S. Oe: "An Evaluation Method of Color Uniformity", VIEW2002, Vol.14, pp.73-78 (2002) (in Japanese)
柏木利幸・大恵俊一郎:「色の均一性評価手法」, 第 14 回外観検査の自動化ワークショップ講演論文集, pp.73-78 (2002)
- (7) T. Kashiwagi and S. Oe: "A Detection Method of Non-uniform Color Area Using Color Histogram", Trans. IEEJ, Vol.124-C, No.3, pp.666-671 (2004-3) (in Japanese)
柏木利幸・大恵俊一郎:「カラーヒストグラムを用いた色の不均一部分検出手法」, 電学論 C, 124, 3, pp.666-671 (2004-3)
- (8) T. Kashiwagi and S. Oe: "Detection Technique of Color Unevenness", Proc. of the 2003 Japan Industry Applications Society Conference, Vol.2, 2-S17-4, pp.285-290 (2003) (in Japanese)
柏木利幸・大恵俊一郎:「色むら検出手法」, 平成 15 電学産業部大講演論文集 [II], 2-S17-4, pp.285-290 (2003-8-26~28)
- (9) T. Kashiwagi, S. Higaki, T. Miyawaki, and S. Oe: "A Visualization Method of Uneven Areas on Thin Films", Proc. of Electronics, Information and Systems Conference Electronics, Information and System Society, IEEJ, TC8-4, pp.195-200 (2009) (in Japanese)
柏木利幸・檜垣真二・宮脇俊幸・大恵俊一郎:「薄膜のむらの視覚化手法」, 平成 21 電学電子・情報・システム部大講演論文集, TC8-4, pp.195-200 (2009)
- (10) K. Taniguchi, K. Ueta, H. Onishi, and S. Tatsumi: "A detection method of mura on a thin layer using interference light", IEE J, IIS06022, pp.17-22 (2006) (in Japanese)
谷口和隆・上田邦夫・大西浩之・辰巳昭治:「干渉光を用いた薄膜のムラ検出手法」, 電学産業システム情報化研, IIS06022, pp.17-22 (2006)
- (11) 小椋山光信:「光学薄膜の基礎理論」, (株) オプトロニクス社発行 (2003-7-23)

柏 木 利 幸

(正員) 1983 年 3 月大阪府立大学工学部電子工学科卒業, 同年 4 月徳島県庁入庁, 工業試験場 (現, 徳島県立工業技術センター) 配属。2000 年 9 月徳島大学大学院工学研究科後期博士課程修了。カラー画像処理, 外観検査の自動化に関する研究に従事。工学博士。

檜 垣 真 二

(非会員) 1996 年 3 月国立佐賀大学電子工学科卒業。2001 年 10 月浜松メトリックス (株) 入社。光学フィルム欠陥検査装置, 形状/外観検査装置, 基板外観検査装置等におけるシステム設計, 電気設計, 機械設計, 画像処理に従事。

宮 脇 俊 幸

(非会員) 2007 年 3 月国立徳島大学知能情報工学科卒業。2007 年 4 月浜松メトリックス (株) 入社。光学フィルム欠陥検査装置, 半導体膜厚異常検査装置等におけるシステム設計, 機械設計, 画像処理に従事。

大 恵 俊 一 郎

(正員) 1968 年 3 月徳島大学工学部電気工学科卒業。1970 年 3 月同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月同大学工学部助手, 講師, 助教授, 教授を経て 2009 年 3 月同大学定年退職, 2009 年 4 月より四国大学経営情報学部教授。時系列解析, コンピュータビジョンに関する研究に従事, 工学博士, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 画像電子学会, 日本リモートセンシング学会の会員。