

研究速報**膜下パターンのコヒーレンス・プローブ計測**

中村 収・豊田 幸司

計量研究所力学部 〒305 つくば市梅園 1-1-4

(1992年3月9日受付, 1992年4月22日受理)

Coherence Probing of the Patterns under Films

Osamu NAKAMURA and Kouji TOYODA

National Research Laboratory of Metrology, 1-1-4, Umezono, Tsukuba 305

(Received March 9, 1992; Accepted April 22, 1992)

We describe a principle and experimental results for measuring the fabricated surface pattern of a silicon wafer under photoresist-films by using a coherence probe microscope (CPM). The resolution and the accuracy in the measurement including the effects of surface reflectance and thickness of a photoresist-film are discussed through computer simulation of the CPM imaging. As a result, the accuracy from 10^{-2} to 10^{-3} is theoretically verified for a typical case. The developed method is applicable to accurate position-determination between the succeeding two processes in a multiple-process photo-lithographic fabrication.

1. はじめに

LSI 製造における光リソグラフィ過程では、目的とするパターンの複雑化、多機能化にともない、パターンの形成工程が多くの段階から構成されるようになってきている。各工程においては、レジスト膜が塗布された、製作途中の凹凸パターンの正確な位置決めが必要とされている。レジスト下パターンを光により検出する際には、膜下のシリコンなどの表面からの反射光にレジスト表面からの反射光が混ざってくる。レーザーなどの単色光を用いた干渉法による位置決めでは、反射光は膜内で複雑に多重干渉するので、基板面をうまく検出できない。白色光を用いたパターン検出による方法では、多重干渉の効果は低減するが、干渉測長ではないので位置決め分解能が低下する。

この問題を解決するには二つのアプローチが考えられる。一つは、レーザー干渉による方法において、光学系の奥行き分解能を向上させ、レジスト表面での反射光と膜下パターンからの反射光を分離検出することである。この目的に対し、共焦点レーザー顕微鏡が有効であることが報告されている¹⁾。

もう一つは、多重反射干渉による影響が少ない、白色

光を用い、なおかつ干渉測長で位置決めを行う方法である。第一の方法が共焦点ピンホールによって焦平面以外の光を制限するのに対し、第二の方法では、白色光のコヒーレンス長により制限を加える。

この白色顕微干渉による方法の原理は、一様な厚さを有する薄膜の膜厚測定的光学系として 1972 年に Flournoy らにより提案され²⁾、Tsuruta らはその系の顕微光学系への改良を行い、光学レンズの厚さ計測を行っている³⁾。

しかしながら、この方法で表面形状を求めるには、各測定点での白色インタフェログラムからゼロ光路差位置を求める計算が必要であり、膨大なメモリおよび計算量が必要であるという理由から、従来、一点あるいは数点での測定系で用いられていた。最近、アレイ検出器と精密なアクチュエータおよび高性能コンピュータを結合し、高速・高精度な表面形状の測定が可能となってきた⁴⁻⁷⁾。この顕微鏡はコヒーレンス・プローブ顕微鏡 (coherence probe microscope: CPM) あるいはコリレーション顕微鏡 (correlation microscope) と呼ばれており、奥行き方向の位置決め分解能は、共焦点レーザー顕微鏡を上回ることが確認されている。

本報告では、この CPM を用いてレジスト膜下のシリ

コン加工パターンを計測する手法およびその実験について述べる。また、本手法における測定精度、分解能などについて、コンピュータ・シミュレーションにより検討する。

2. コヒーレンス・プローブ顕微鏡の原理

CPM は、基本的には、白色光源を用いた干渉顕微鏡において、サンプルあるいは参照ミラーを高さ方向に微小させる系となっている。Fig. 1 に、われわれが用いた CPM の原理図を示す。空間的に拡がりを持つタングステン・ハロゲンランプからの白色光は、ミラー干渉対物レンズ内のビーム・スプリッターで二分割され、一方は試料表面へ、他方は参照ミラーへと導入され、それぞれの面で反射する。Fig. 1 では照明はクリティカル照明になっているが、試料面における空間コヒーレンスが同程度であれば、他の照明法を用いてもよい。二つの反射光はビーム・スプリッター内で再結合し、結像面に設置された CCD カメラでその干渉強度が検出される。この構成で、試料を高さ方向に走査すると結像面の各画素において時系列データとしてのインタフェログラムが得られる。そのインタフェログラムのゼロ光路位置から表面形状が得られる。加工面上にレジストなどの透明膜が塗布されている場合には、膜表面、および加工面での反射光による二つのゼロ光路差ピークが現れる。

3. 膜下パターンの計測実験

試料として、シリコンウェハに $0.5\ \mu\text{m}$ の段差パターンを加工し、その上に $1\ \mu\text{m}$ 程度の厚さを持つレジスト (OEBR 100) を塗布したものを作製した。Fig. 2 に、作製した試料を Fig. 1 の系で測定したときに、カメラ面上の一画素で得られる 200 点のインタフェログラムを

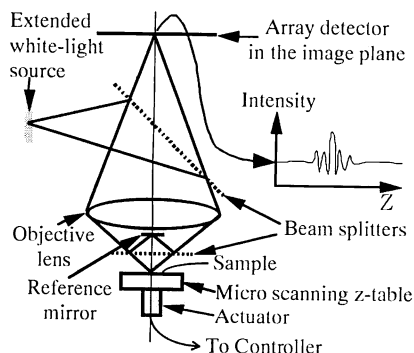


Fig. 1 The principle of a coherence probe microscope.

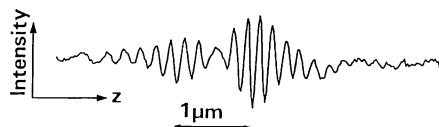


Fig. 2 A time-series interferogram at a pixel in the image plane of the coherence probe microscope.

示す。ここで、 z 方向の全測定長は $5.22\ \mu\text{m}$ であった。膜表面およびシリコン表面での反射による二つの 0 次フリンジが認められる。このインタフェログラムの 0 次フリンジの位相が表面の高低を、振幅が反射率を表している。

このインタフェログラムから表面形状を求める際の計算手順を Fig. 3 に示す。まずインタフェログラムをフーリエ変換し、得られるスペクトルのピークからキャリア周波数を見つける。そのキャリア周波数分だけ、スペクトルを周波数シフトし、逆フーリエ変換を行う。こうして、もとのインタフェログラムの包絡線が求まる。包絡線の二つのピークから膜表面の位置、シリコン面の位置が得られる。この処理を全画素について行えば膜下の表面形状および膜表面の形状が測定できる。

膜表面での反射光による干渉成分と膜内からの反射光による干渉成分では、膜と空気の屈折率分散の差によりキャリア周波数が異なっている。各ピークの検出に際し、それぞれ適当なキャリア周波数を用いねばならない。

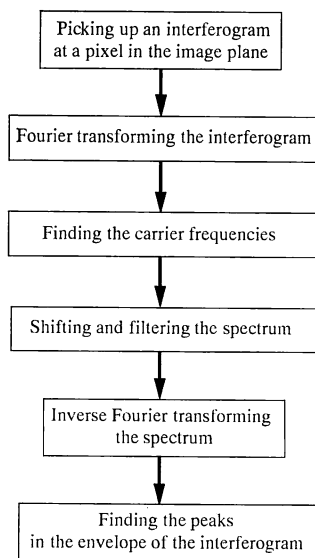


Fig. 3 The surface reconstruction from the interferograms given with the coherence probe microscope.

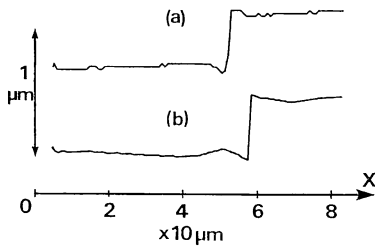


Fig. 4 The surface profiles reconstructed with the coherence probe microscope for (a) Si without resist-film and (b) Si with resist-film of 1 μm thickness.

このようにして求めた段差形状を **Fig. 4** に示す。Fig. 4 (a) はレジストを塗布する前に測定したシリコンの段差形状であり、Fig. 4 (b) は同じ試料にレジストを塗布した後に得られた形状である。二つの測定箇所は厳密には同一位置ではないが、段差の形状、高さの違いは数パーセント以内であることが確認されている。対物レンズの N. A. は、ミロー対物レンズの収差⁷⁾、厚さの測定精度を考慮すると、小さいほうが望ましく、実際には 0.18 のものを使用した。Fig. 4 (b) の縦軸に関しては、レジストの屈折率 ($n=1.64$) で高さを補正している。約 1 μm の厚さのレジスト膜に対しては、ほとんど影響されずに膜下のパターンが計測できているのがわかる。ただし、エッジ近傍ではレジスト膜が不均一になっているので、反射光の干渉成分が低減し、測定誤差が大きくなっている。レジストの膜厚は平坦部で 0.86 μm 、段差は 0.45 μm であった。

4. 精度・分解能の検討

本手法において、測定精度はどの程度なのか、どこまで薄い膜に対して適用できるのか、についてコンピュータ・シミュレーションによって検討する。

Fig. 5 に、透明膜を伴う加工表面を CPM で測定する際の光反射の模式図を示す。図内の媒体 1, 2, 3 は、

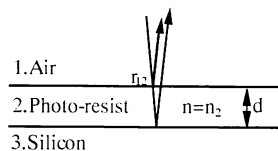


Fig. 5 Schematic diagram of the reflection at resist-surface and at silicon-surface. r_{12} , n_2 , and d denote the reflection coefficient in the air-resist boundary, the refractive index of the resist-film, and the thickness of the resist-film.

実験においては、それぞれ、空気、レジスト、シリコンに対応している。通常の薄膜内の多重干渉では斜め入射の光も干渉に寄与するが、CPM では試料面上は空間的にインコヒーレントに近い状態で照明されており、斜め光の多重反射成分は干渉に寄与せず単にバイアス成分となる。

媒体 1, 2 の境界面の反射率を r_{12} 、媒体 2, 3 の境界面での反射率を r_{23} 、膜厚を d とすると、ある波長 λ の光に対するこの試料の複素反射率は、

$$r = \frac{r_{12} + r_{23} \cdot \exp(-2j\phi)}{1 + r_{12} \cdot r_{23} \cdot \exp(-2j\phi)} \quad (1)$$

で与えられる⁸⁾。ここで、

$$\phi = 2\pi d n_2 / \lambda \quad (2)$$

であり、 n_2 は波長 λ におけるレジストの屈折率である。

簡単のため参照光の方に、試料走査による位相変化を含めると、参照光の位相は、

$$r' = \exp(j4\pi z / \lambda) \quad (3)$$

となる。ここで、 z は走査長であり、それによって光路長 $2z$ だけの変化が生じる。

結局、像面で検出される光強度は、

$$I(z) = \int |a \cdot r'(z) + b \cdot r|^2 \cdot s(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

と表される。ここで、 a , b は、参照光と信号光の振幅比であり、 $s(\lambda)$ は光源のパワースペクトルである。

Fig. 6 に、 $a=b=1$, $r_{12}=0.5$, $r_{23}=1$ のとき、膜厚 $=0.5 \mu\text{m}$, $0.75 \mu\text{m}$, $1.0 \mu\text{m}$ の試料に対して (4) 式に基づき計算した $I(z)$ を示す。光源のスペクトルは、3 節の実験で得られたインタフェログラムから求めた。○および ▼ は、それぞれ、レジスト表面からの反射光による

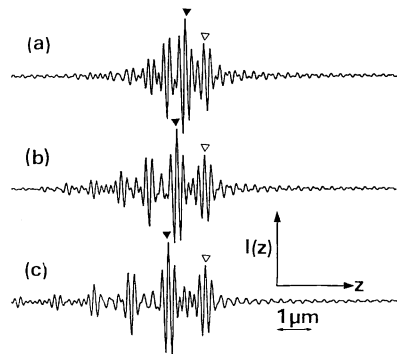


Fig. 6 Interferograms calculated based on Eq. (4) for (a) $d=0.5 \mu\text{m}$, (b) $d=0.75 \mu\text{m}$, and (c) $d=1.0 \mu\text{m}$ samples. For all cases, $a=b=1$, $r_{12}=0.5$, and $n_2=1.68$. ▼ and ▽ represent the fringe caused by the reflection at silicon-surface and that at the resist-surface.

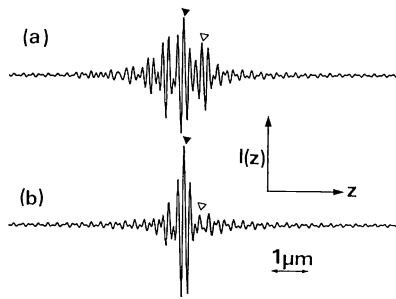


Fig. 7 Interferograms calculated based on Eq. (4) for (a) $r_{12}=0.5$ and (b) $r_{12}=0.1$ samples. For the two samples, $n_2=1.68$, $d=0.5\mu\text{m}$, and $a=b=1$. ▼ and ▽ represent the fringe caused by the reflection at silicon-surface and that at the resist-surface.

0次ピーク、シリコン表面からの反射光による0次ピークを示している。シリコン表面およびレジスト表面を表す二つのピーク間の距離は、(a), (b), (c)いずれも約1/300程の誤差(絶対値で(a) 1.5 nm, (b) 2.5 nm, (c) 3.4 nm)を生じた。

次に膜表面の反射率の影響について考察する。Fig. 7 (a), (b)は、 $a=b=1$, 膜厚 $=0.5\mu\text{m}$, $r_{23}=1$ のとき、それぞれ、膜表面での反射率が $r_{12}=0.5$, および $r_{12}=0.1$ の場合に得られる $I(z)$ である。(b)では表面反射光による0次ピークが内部反射光によるサイドローブに影響され、そのピーク位置が著しく移動している。この例では膜表面の位置検出には64 nmもの誤差が生じている。しかしながら、膜下パターンからの反射光によるフリンジの振幅は十分大きいので、膜下面の検出には問題がない。したがって、この場合でも膜下パターンの計測としては本手法は有効である。

5. 結 論

コヒーレンス・プローブ顕微鏡を用いたレジスト膜下

パターンの計測法およびその測定精度や適用範囲などについて述べた。膜厚および膜表面の形状の測定精度として数 nm 程度を保証するには、膜表面での反射率が0.5のときで、膜厚約0.7から0.8 μm 以上が必要であることがわかった。また、膜下パターンの測定に限れば、0.5 μm 程度の膜厚でも同程度の測定精度が得られることが明らかとなった。

本文中でも述べたとおり、透明膜下のパターンの計測法には、他に共焦点顕微鏡を用いてZ分解能を高める手法がある。本稿で述べた、コヒーレンス長で奥行き分解能を向上させる方法に、共焦点系を組み合わせれば、より薄膜、低い段差を測定できるだろう。

本論文に関連する研究・文献についてご指摘いただいた電気通信大学武田光夫教授に感謝いたします。試料作製にあたり協力いただいた計量研究所初沢毅氏、土井琢磨氏に感謝いたします。

文 献

- 1) 川村直毅, 峯岸一茂: “共焦点走査レーザー顕微鏡によるレジスト膜下パターンの検出”, 光学, 20 (1991) 92-97.
- 2) P. A. Flournoy, R. W. McClure and G. Wyntjes: “White-light interferometric thickness gauge,” Appl. Opt., 11 (1972) 1909-1915.
- 3) T. Tsuruta and Y. Ichihara: “Accurate measurement of lens thickness by using white-light fringes,” Jpn. J. Appl. Phys., 14 (1975) 369-372.
- 4) M. Davidson, K. Kaufman, I. Mazor and F. Cohen: “An application of interference microscopy to integrated circuit inspection and metrology,” Proc. SPIE, 775 (1987) 233-247.
- 5) G. S. Kino and S. S. C. Chim: “Mirau correlation microscope,” Appl. Opt., 29 (1990) 3775-3783.
- 6) B. S. Lee and T. C. Strand: “Profilometry with a coherence scanning microscope,” Appl. Opt., 29 (1990) 3784-3788.
- 7) S. C. Chim, P. A. Beck and G. S. Kino: “A novel thin film interferometer,” Rev. Sci. Instrum., 61 (1990) 980-983.
- 8) P. Yeh: *Optical Waves in Layered Media* (Wiley Interscience, New York, 1988) Chap. 4.