



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	検出面を傾けたエリブソ干渉法による結像特性の改善
Author(s)	三島, 瑛人; Mishima, Teruhito; 桜庭, 一郎 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 116, 61-70
Issue Date	1983-10-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41810
Type	departmental bulletin paper
File Information	116_61-70.pdf



検出面を傾けたエリプソ干渉法 による結像特性の改善

三島 瑛人 桜庭 一郎
(昭和58年6月30日受理)

Improvement of Ellipso-Interferometric Image by Tilted Detecting Plane

Teruhito MISHIMA and Ichiro SAKURABA

(Received June 30, 1983)

Abstract

Effects of defocusing are described in ellipso-interferometry with the optical arrangement that was used. The effects limit the field-of-view of the system. In order to eliminate the effects, the tilted detecting plane is proposed and the image characteristics are discussed by means of paraxial ray approach. An experiment is performed with a part of a FET wafer as a sample in order to demonstrate that the system works well in obtaining a clearer image in a wider field-of-view.

However, there are some problems with the new system. The lateral magnification factors and the incident angle are practically limited, the lateral magnification factors change point by point on the image plane, and a large flat detector is required for a good image.

1. ま え が き

エリプソメトリ(楕円偏光解析法)¹⁻³⁾は単分子層などの非常に薄い膜の厚さと光学定数とを測定する方法として知られている。このエリプソメトリから発展したエリプソ干渉法⁴⁾はこれらの被測定量の2次元分布を走査を用いずに測定できるという特長を有し、原理上の横方向分解距離が632.8nmの光を用いても1 μ mのオーダーという高解像度⁵⁾のため、集積回路上の膜のように微細なパターンを有する膜の測定に利用できる。また非破壊検査法のため製造工程の途中での全数検査も、原理上、可能になると考えられる。

エリプソ干渉法の原理が公表される以前に2つの興味を引く実験報告がなされている。第1は1971年に発表されたEllipsometric microscope⁶⁾による半導体表面の観察結果である。この報告では半導体表面上の幅20 μ mのストライプが完全に識別されている。しかし原理についての記述はなく、また原理を充分把握していなかったためか、焦点はずれによるぼけが大きくなるような光学系を用いている。そのため大面積の試料の測定には適していなかったものと推察される。

第2は1979年に発表されたMicroscopy with ellipsometric arrangement⁷⁾と称されるもので、

エリプソ干渉法にこれまで用いられてきた光学系とほぼ同一の光学系を用い、GaAs 表面上の厚さ 0.3 nm の native oxide を観察している。しかしこのような光学系では焦点はずれによるぼけを除去できない⁸⁾。またその著者は楕円偏光を用いる理由として、顕微鏡による像に、より強いコントラストを付加するためであると説明している。

いずれにせよ上記 2 つの実験報告は、エリプソメトリと顕微鏡とを結合すると物質表面の微細な光学的変動の分布をはっきりと観察できることを示したが、像の各微細部分にも楕円偏光解析が適用できること、すなわち微細部分の膜厚と光学定数の分布を決定できることには気づいていないようである。またそのため光学系の解像度を高めることが重要であることを痛切には認識していなかった。

1981 年、エリプソ干渉法の原理⁴⁾ が明らかにされ、得られる像の各部分にも楕円偏光解析が適用できることが明らかになった。その後、試料表面の光学的変動によって生ずる回析効果を除去するために結像用レンズを反射光の電磁界中に配置することが提案された⁹⁾。これにより回析効果は除去できるようになったが、今度は焦点はずれによるぼけが生じるため大面積の試料の測定には不適であることが、理論的かつ実験的に示された⁸⁾。

この焦点はずれによるぼけは、ある細長い領域で小さくなり、その領域に入るような小さな部分のみを観察する場合には問題とならない。しかし 1 mm × 1 mm 程度の大きな面積を持つ半導体チップを高倍率で観察するには不都合である。したがって、この焦点はずれによるぼけを除去し、大面積の試料の測定をも可能にする新しい光学的配置を提案する。また簡単な近軸光近似を用いてこの系を解析し、実験によって確認することとする。

2. エリプソ干渉法における従来の結像系と焦点はずれによるぼけ

エリプソ干渉法においては反射光の偏光状態を被測定膜と周囲媒質との境界面で観測すれば、被測定膜の空間分布によって生ずる回析効果に無関係に測定できることになる⁴⁾。しかし入射光をさえぎらずに膜面上で偏光状態を測定することは反射光を利用する限り不可能である。したがってレンズにより膜の像をつくり、レンズの光軸に垂直に平面光検出器を配置して偏光状態を観測していた(図 1 参照)。通常、膜厚感度の良好な大入射角を用いるため、レンズの光軸は反射光の伝搬方向の中心と一致するよう配置されている。この配置は入射角 ϕ_0 を変化させる際にも、レンズ、検光子および検出器を一体として回転させれば良く光軸調整が容易になる利点がある。しかしレンズの光軸が試料面に垂直ではないため、およびレンズの焦点深度が浅いため、試料中心に焦点を合わせると試料のレンズに近い部分と遠い部分とにおいて焦点はずれによるぼけが生じてしまう。横方向解像度を高めようとしてより大きな開口数のレンズを用いると、焦点深度がより浅くなるためこのぼけは更に大きくなる。したがって試料中央部のぼけの小さな領域の幅はより狭くなる。したがって、このぼけを除去することは、大面積の試料を高解像度で測定する場合には非常に重要となる。

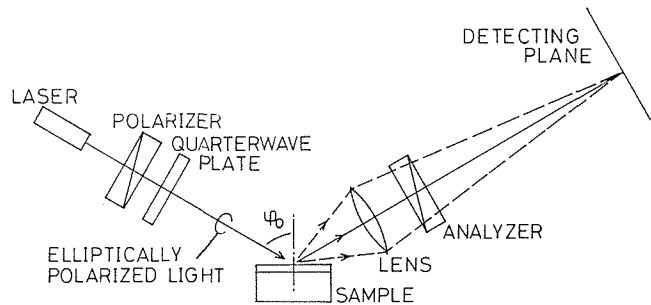


図 1 エリプソ干渉法における従来の光学系

3. 結像面を傾けて像面に沿わせる光学系

前節で述べた焦点はずれによるぼけを除去するため試料面のレンズによる像を求め、この像面に沿って検出器を配置することを考える。図2にその結像系と用いる座標軸を示す。試料面に入射するまでの光学系および検光子は簡単のため省略した。直交座標軸 xyz を、原点が薄肉レンズの中心、 z 軸がレンズの光軸、 yz 平面が入射面となるように定める。物面（試料面）は $z = z_{00}$ ($z_{00} < 0$) で z 軸と交わり、その表面法線は z 軸と ϕ_0 の角をなすものとする。ただし ϕ_0 は試料面への光の入射角とする。また、すべての角は鋭角を用いて表わし、 z 軸に一致させるよう回転したとき時計回りであれば正、反時計回りであれば負とする。今、近軸光近似を用いてこの結像を考えるなら、 x 軸方向（紙面に垂直な方向）には一様であるから、解析は yz 平面内の物点と像点の関係について行なうこととする。

物面上に直交座標軸をとり、 u 軸は yz 平面内にあるものとすれば、物面上の1点 O (y, z) = (y_0, z_0) の u 座標を u_0 、 v 座標を v_0 とすると

$$z_0 - z_{00} = -u_0 \sin \phi_0 \quad (1)$$

$$y_0 = u_0 \cos \phi_0 \quad (2)$$

が成立する。薄肉凸レンズの焦点距離を f ($f > 0$) とすると点 O の像 O' の座標 (y'_0, z'_0) は次式から求められる。

$$1/z'_0 = 1/z_0 + 1/f \quad (3)$$

$$y'_0 = (z'_0/z_0)y_0 \quad (4)$$

式 (1)～(4) より u 、 u_0 および y_0 を消去すると、像点の軌跡すなわち像面と yz 平面との交線が次式のように求められる。

$$y'_0 = -\cot \phi_0 \left(1 + \frac{z_{00}}{f}\right) \left\{z'_0 - \left(\frac{1}{z_{00}} + \frac{1}{f}\right)^{-1}\right\} \quad (5)$$

上式は像 O' (y'_0, z'_0) が直線上にあることを示しており、したがって像面は上記直線と紙面に垂直な直線とで決まる平面である。この平面の法線と z 軸のなす角 ϕ'_0 は式 (5) の係数を用いて

$$(\tan \phi'_0) [-\cot \phi_0 \{1 + (z_{00}/f)\}] = -1 \quad (6)$$

より求められる。要約すると、近軸光近似によれば像面は平面であり $z = \{(1/z_{00}) + (1/f)\}^{-1}$ で z 軸と交差し、その法線と z 軸とのなす角 ϕ'_0 は式 (6) より求められることになる。したがって平面光検出器をこの像面に沿って配置すれば、近軸光近似が成立する限り、焦点はずれによるぼけは生じないことになる。ところでパラメータ M を次のようにおくと、

$$M = f / (z_{00} + f) \quad (7)$$

M は x 方向の倍率の z 軸上での値である（詳細は後述）。この M を用いて式 (5) および (6) を書き換えると次のような簡潔な表現が得られる。

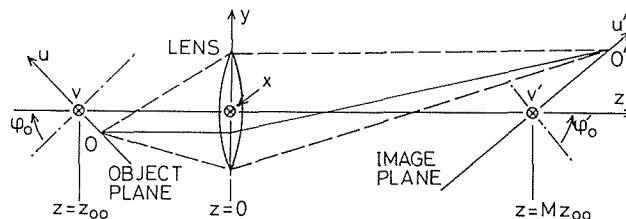


図2 検出面を像面に沿わせたエリプソ干渉法の結像系

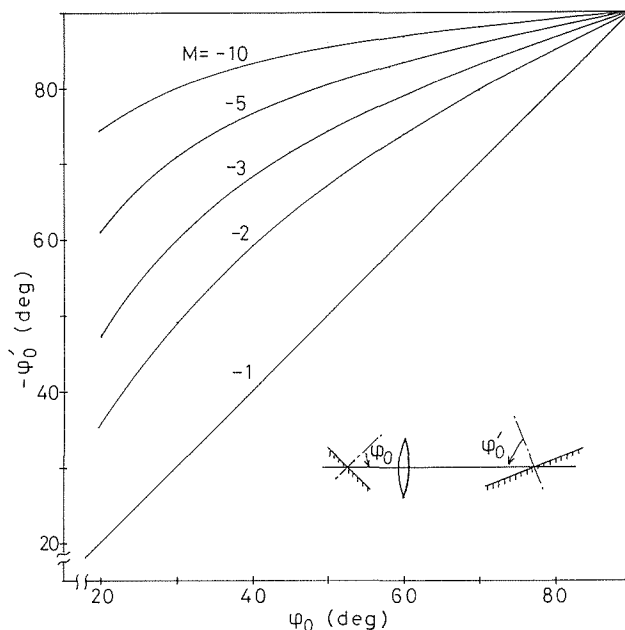


図3 像面法線の傾き

$$y'_0 = -(\cot \phi_0 / M)(z'_0 - Mz_{00}) \quad (8)$$

$$\tan \phi'_0 = M \tan \phi_0 \quad (9)$$

像面法線の傾き ϕ'_0 を計算した結果を、 M をパラメータ、物面法線の傾き（入射角） ϕ_0 を横軸として、図3に示す。入射角 ϕ_0 および倍率 M の絶対値 $|M|$ が大きくなれば、像面法線の傾き ϕ'_0 も大きくなり、 90° に近づくことがわかる。あまり 90° に近いと、平面検出器の平面度や凹凸の影響が大きくなるから、実用上の限度があるであろう。 $-\phi'_0$ の実用限度を 85° と仮定すると、 $\phi_0 = 70^\circ$ では $-M \sim 4$ 程度、また $\phi_0 = 45^\circ$ では $-M \sim 10$ 程度以下でなければならない。

4. 横 倍 率

このようにレンズの光軸に対して物面および像面が垂直でない場合には近軸光近似の範囲内でも物点の位置により、また方向により横倍率が異なるので以下に考察する。像面上に直交座標軸 $u'v'$ をとり、 u' は yz 平面内にあるものとする（図2参照）。物面上の1点0の像 $0'$ は $u'v'$ 平面内にあるはずだから、その座標を $(u', v') = (u'_0, v'_0)$ とする。物点0の v 座標 v_0 と像点 $0'$ の v' 座標 v'_0 との関係は、近軸光近似を用いているので、比例関係にあり、その倍率を m_v とおくと

$$m_v \equiv \frac{dv'_0}{dv_0} = \frac{z'_0}{z_0} \quad (10)$$

となる。上式に式(1)および(3)を代入し、式(7)を用いると

$$m_v = \left(\frac{1}{M} - \frac{u_0 \sin \phi_0}{f} \right)^{-1} \quad (11)$$

が得られる。上式に $u_0 = 0$ を代入することにより z 軸上における x 方向 (v' 方向) の横倍率が得られ、その値は M であることがわかる。

次に u_0 と u'_0 との関係を考える。像点 $0'$ の座標 (x'_0, y'_0, z'_0) を $u'v'$ 座標で表現し (u'_0, v'_0)

とすると

$$z'_0 - Mz_{00} = -u'_0 \sin \phi'_0 \quad (12)$$

$$y'_0 = u'_0 \cos \phi'_0 \quad (13)$$

$$x'_0 = v'_0 \quad (14)$$

となる。ただし式 (12) の左辺の Mz_{00} は像面と z 軸との交点の z 座標である。式 (12) に $\sin \phi'_0$, (13) に $\cos \phi'_0$ を乗じ、辺々減算することによって次式を得る。

$$u'_0 = -(\sin \phi'_0)(z'_0 - Mz_{00}) + (\cos \phi'_0)y'_0 \quad (15)$$

ここで u' 方向の倍率 m_u を

$$m_u \equiv \frac{du'_0}{du_0} \quad (16)$$

と定義すれば、式 (15) を用いて

$$m_u = -\sin \phi'_0 \frac{\partial z'_0}{\partial u_0} + \cos \phi'_0 \frac{\partial y'_0}{\partial u_0} \quad (17)$$

を得る。式 (1), (3) および (4) を用いると

$$\frac{\partial z'_0}{\partial u_0} = -\frac{f^2 \sin \phi_0}{(f + z_{00} - u_0 \sin \phi_0)^2} \quad (18)$$

および

$$\frac{\partial y'_0}{\partial u_0} = \frac{(z_{00} + f)f \cos \phi_0}{(f + z_{00} - u_0 \sin \phi_0)^2} \quad (19)$$

が得られるので、これらを式 (17) に代入し、式 (7), (9) および (11) を用いると m_u の簡潔な表式が得られる。

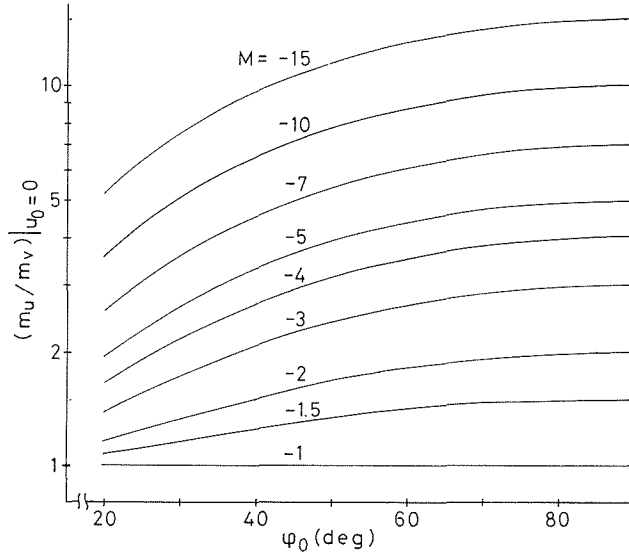
$$m_u = -m_v \sqrt{\sin^2 \phi_0 + \left(\frac{\cos \phi_0}{M}\right)^2} \quad (20)$$

z 軸上 ($u_0 = 0$) においては m_v が M になることを用いると、 z 軸上での u' 方向の横倍率と v' 方向の横倍率の比は次式となる。

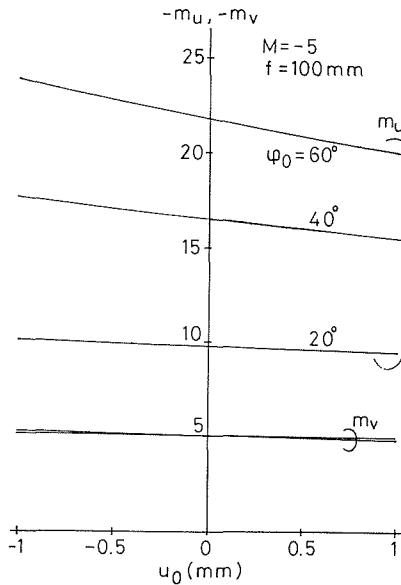
$$\left. \frac{m_u}{m_v} \right|_{u_0=0} = -M \sqrt{\sin^2 \phi_0 + \left(\frac{\cos \phi_0}{M}\right)^2} \quad (21)$$

上式の右辺は ϕ_0 が 0° に近づくとき 1 に近づき、 ϕ_0 が 90° に近づくとき $-M$ となる。ただし M は負の数であることに注意されたい。したがって ϕ_0 と $-M$ が大きいとき横倍率の比は非常に大きくなり、望ましくない。 $-M$ が 10 以下で、 ϕ_0 が 60° 以上では、上式の右辺は -15% 以内の誤差で $-M$ となる。したがって膜厚および屈折率に対して敏感な ϕ_0 の領域 (試料によって異なるが、ほぼ $60^\circ \sim 70^\circ$) においては上記横倍率の比が大略 $-M$ であると考えて良い。この数値計算例を図 4 に示す。横倍率の比があまり大きくない領域が実用性があるものと考えられるから、 $-M$ と ϕ_0 の両者ともあまり大きくならないように測定条件を選ぶことが必要である。この結果は前節で述べた結像面の傾きから生ずる制限と定性的に一致する。

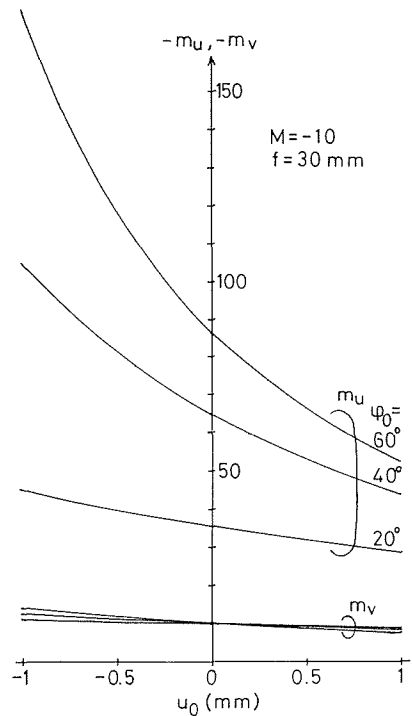
次に m_u および m_v が物点 0 の u 座標 u_0 の変化に対してどのように変化するかを考察する。まず、 u_0 の変化に対する m_u および m_v の変化の例を式 (11) および (20) より計算して図 5 に示す。同図 (a) は横倍率の変化が比較的少ない場合を示しており、 $-M$ が小さく、 f が大きく、 ϕ_0 が小さい程、横倍率 m_u と m_v の変化は少ない。また同図 (b) は横倍率の変化が比較的大きい場合である。特に $\phi_0 = 60^\circ$ のときの m_u は u_0 の $\pm 1 \text{ mm}$ の変化に対して -52 から -171 まで変化



第4図 z 軸上における横倍率の比



(a) 横倍率の変化が小さい場合の例



(b) 横倍率の変化が大きい場合の例

第5図 物点の位置による横倍率の変化の数値計算例

しており像の歪がかなり大きいことを示している。今、小さな正数を ϵ ($0 < \epsilon < 1$) として、 u_0 の変化に対する m_u および m_v の変化をそれぞれの z 軸上 ($u_0=0$) での倍率 $m_u|_{u_0=0}$ および $m_v|_{u_0=0}$ に比較して ϵ まで許容するとする。

m_u は m_v^2 に比例するから、 m_u の変化の割合は m_v の変化の割合より常に大きいので、 m_v の変化の割合が ϵ より小さければ、 m_u の変化の割合も m_v の変化の割合も共に ϵ 以下となる。したがって

$$\left| \frac{m_u}{m_u|_{u_0=0}} - 1 \right| \leq \epsilon \tag{22}$$

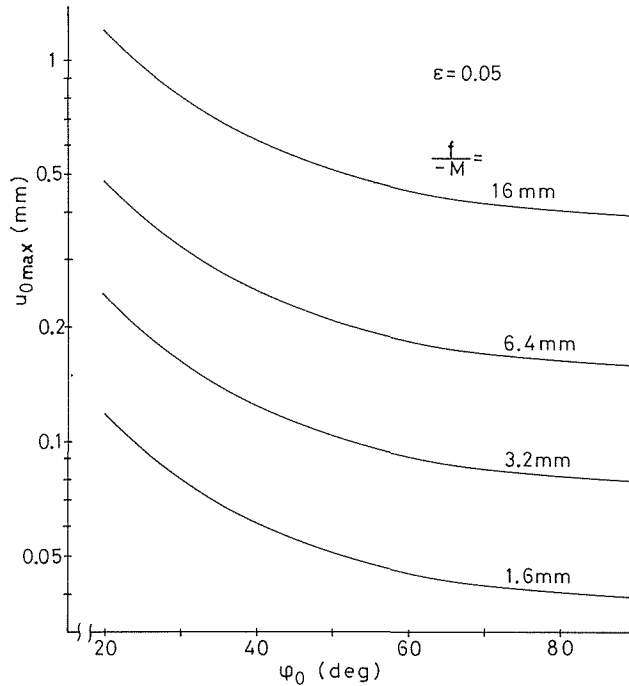


図6 倍率の変化を制限した場合の物点の位置の範囲

とすると、式 (11) および (20) を用いて

$$1/(1+\epsilon) \leq \{1 - u_0(M/f) \sin \phi_0\}^2 \leq 1/(1-\epsilon) \quad (23)$$

となるが、この解は、近似式

$$(1 \pm \epsilon)^{-1/2} = 1 \mp (\epsilon/2) \quad (24)$$

を用いると次のようになる。

$$-\frac{\epsilon}{2} \cdot \frac{f}{-M \sin \phi_0} \leq u_0 \leq \frac{\epsilon}{2} \cdot \frac{f}{-M \sin \phi_0} \quad (25)$$

または

$$-\left(2 + \frac{\epsilon}{2}\right) \cdot \frac{f}{-M \sin \phi_0} \leq u_0 \leq -\left(2 - \frac{\epsilon}{2}\right) \cdot \frac{f}{-M \sin \phi_0} \quad (26)$$

式 (26) の範囲には $u_0=0$ が含まれていないので視野中心から離れた所にあるものとしてここでは考慮しないことにし、以後、式 (25) で示される範囲のみを考慮する。ここで

$$u_{0 \max} \equiv \left| \frac{\epsilon}{2} \frac{f}{M \sin \phi_0} \right| \quad (27)$$

とおくと式 (23) は

$$-u_{0 \max} \leq u_0 \leq u_{0 \max} \quad (28)$$

となり、この範囲に u_0 があれば、 u_0 の変化に対する像面上の倍率の変化の割合は u' 方向、 v' 方向とも ϵ 以下になる。図6に $u_{0 \max}$ の数値計算例を示す。同図によれば、レンズの焦点距離 f が大きく、 v' 方向の z 軸上での倍率の絶対値 $|M|$ が小さく、かつ入射角 ϕ_0 が小さい程、 $u_{0 \max}$ は大きくなり、歪の少ない像が試料面の広い範囲で得られることになる。今、入射角 $\phi_0=45^\circ$ において $\epsilon=0.05$ すなわち横倍率の変化を $\pm 5\%$ 以内に制限するとすれば、 $f=16 \text{ mm}$ 、 $M=-10$ ($-f/M=1.6 \text{ mm}$) では $2u_{0 \max} \sim 0.12 \text{ mm}$ となり試料面の狭い領域のみが測定に耐えることに

なるが、 $f=32\text{ mm}$ 、 $M=-5$ ($-f/M=6.4\text{ mm}$) では $2u_{0\text{ max}}\sim 0.45\text{ mm}$ となる。したがって長焦点距離のレンズを低倍率で用いることが必要である。

5. 実 験

図7に実験に用いた光学系を示す。光源として633 nmで発振する H_e-N_e レーザを用い、偏光子と1/4波長板とにより楕円偏光にし、試料に入射角 $\phi_0=45^\circ$ で入射させた。試料からの反射光を顕微鏡対物レンズにより平面光検出器上に拡大・投影する。顕微鏡対物レンズと平面光検出器の間には、反射光の偏光状態を知るための検光子と写真撮影のためのシャッタを配置した。偏光子、1/4波長板および検光子の方位角を調整して消光状態を得るとそれらの方位角から膜厚と屈折率を計算できるが、ここではそれらを求めることが目的ではないので、只単に像にコントラストを付加するために用いた。平面光検出器として、調整用に白い紙片、記録用にポラロイドフィルムを用いた。試料としては、FETウェーハの電極を酸で除去した物を用いた。図8に、同一の部分ではないが、走査型電子顕微鏡による表面の写真を示す。表面に凹凸があり、表面上に存在する膜の厚さが階段状に変化しているのがよくわかる。また図中に見える文字“F”の上下は約50 μm であり線幅は約10 μm である。

ここで用いた顕微鏡対物レンズは、組み合わせレンズであり、薄肉レンズでもないから、正確には前節までの理論的解析には従わない。しかし、定性的には前節までの理論に一致し、定量的に

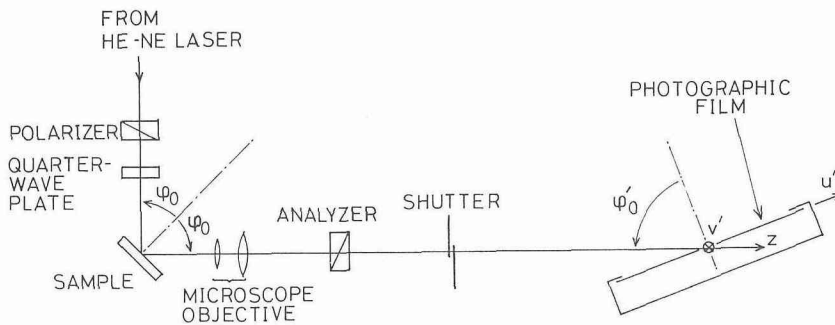


図7 実験に用いた結像系

はほぼ一致するものとして以下の議論を進める。

この実験系により撮影された試料の写真を引き伸ばしたのが図9である。同図(a)はフィルムをレンズの光軸にほぼ垂直に配置して撮影したものである。すなわち、エリプソ干渉法において従来用いられていた光学系(図1参照)によって撮影されたものである。コヒーレント光を用いているため、焦点はずれによるぼけは干渉縞となって現われるが、図中ほぼ中央で焦点が合い、左右に離れるに従って焦点はずれによるぼけが大きくなる。画面下側の水平な線を見るとよく了解される。数本の線が平行に存在する所では干渉縞と隣の線とが一致するなどのことがあるため焦点はずれによるぼけの大きな所の方がよりはっきりと線が識別されるかのように錯覚することがあるので注意されたい。文字Fの下の水平

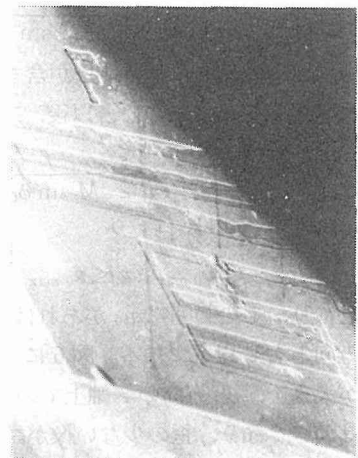
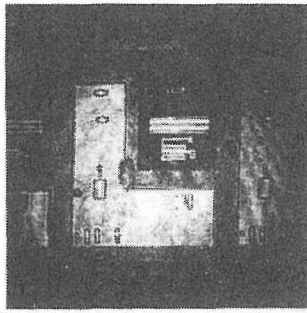
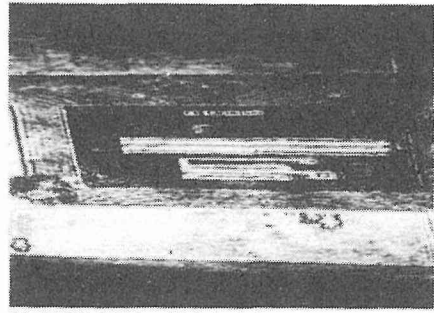


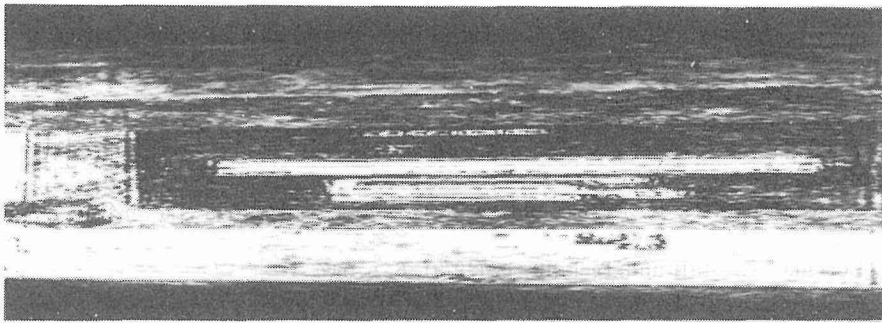
図8 走査型電子顕微鏡による試料の表面写真



(a) 検出面法線が z 軸となす角 ϕ_0 が 0° の場合
(従来用いられていた結像系による像)



(b) 検出面法線が z 軸となす角 ϕ_0 が -79° の場合



(c) 検出面法線が z 軸となす角 ϕ_0 が -84° の場合

図9 検出面の傾きの変化による像の変化の例 ($M = -12$, $\phi_0 = 45^\circ$)

な数本の平行線の実長は約 $450 \mu\text{m}$ 程であるが、この長さ全体にわたり $10 \mu\text{m}$ 程度の幅の縞を測定できないことは明らかである。半導体集積回路の1つのチップの大きさは $1 \text{mm} \times 1 \text{mm}$ のオーダと考えられるが、これまでの光学系ではこの面積を一度に測定できなかったことになる。

図9 (a) のネガフィルム上の長さと同様の顕微鏡写真上の長さを比較することにより、 v' 方向の倍率は約12倍であることがわかった。したがって $M \sim -12$ である。この M の値と入射角 $\phi_0 = 45^\circ$ とを式(9)に代入して $\phi_0' \sim -85^\circ$ を得る。検出面をほぼこの面まで傾けて撮影したのが図9 (c) である。画面の左端から右端までほぼ焦点が合い、焦点はずれによるぼけが生じていないことが了解される。この図(c)は水平方向(u' 方向)に非常に拡大されている。水平方向と垂直方向(v' 方向)の倍率の比は約9である。したがって $M = -12$ なら u' 方向に 1mm の長さの領域を測定するためには、 $1 \text{mm} \times 12 \times 9 = 108 \text{mm}$ もの長さの検出面が必要ということになる。これでは通常の 35mm ロールフィルムは利用できない。また、画面の左右両端で明らかに倍率が異なることにも注意されたい。このことは図5に示されている m_u および m_v の u_0 依存性からも定性的に理解される。図9 (b) は (c) よりも検出面の角度を約 5° だけ故意にずらした場合である。左端では焦点が合っているが、右端では焦点はずれによるぼけ(干渉縞)が現われている。

6. 結 論

エリプソ干渉法において従来用いられてきた光学系においては、焦点はずれによるぼけ(干渉縞)が生じ、比較的大きな面積の試料を測定する場合には問題となることを説明し、その対策として検出面をレンズの光軸に対して傾ける方法を提案した。この新しい結像系における結像特性を近軸光近似の範囲内で考察し、傾けるべき角度、横倍率等を明らかにした。これらの理論的解

析により、この方法は高倍率、大入射角の場合に応用するには、いくつかの難点があることも指摘した。また実験を試み、検出面を傾けることによって、焦点はずれによるぼけを比較的広い面積にわたって除去できることを確認した。しかし同時に、大きな面積を有する光検出器が必要なこと、検出面上の位置によって横倍率が異なること、検出面の平面度が重要であることを指摘した。

謝 辞

FET ウェーハを提供して下さったカナダ・マニトバ大学の H. C. Card 教授に感謝する。また走査型電子顕微鏡の操作を助けて頂いた S. Major 氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) B. M. A. Azzam and N. M. Bashara: *Ellipsometry and polarized light* (1977), North Holland
- 2) 河村守康: 応用物理, 46 (1977), 9, p. 887
- 3) 梅野正義: 応用物理, 46 (1977), 9, p. 889
- 4) T. Mishima and K. C. Kao: *Appl. Opt.*, 20 (1981), 21, p. 3719
- 5) 三島瑛人: 信学論 (c), J66-C (1983), 4, p. 328
- 6) Y. A. Kontsevoi, R. R. Rezvyi and V. M. Gololobov: *Industrial Laboratory*, 37 (1971), 2, p. 232
- 7) K. Lösckke: *Kristall und Technik*, 14 (1979), 6, p. 717
- 8) T. Mishima and K. C. Kao: *Opt. Engin.*, 21 (1982), 6, p. 1074
- 9) T. Mishima and K. C. Kao: *Appl. Opt.*, 21 (1982), 6, p. 1101