



Title	最近のエリブソ・インタフェロメトリの研究 : 薄膜の膜厚および光学定数分布の新しい測定法
Author(s)	三島, 瑛人; Mishima, Teruhito
Citation	北海道大學工學部研究報告, 112, 47-55
Issue Date	1983-01-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41775
Type	departmental bulletin paper
File Information	112_47-56.pdf



最近のエリプソ・インタフェロメトリの研究 ——薄膜の膜厚および光学定数分布の新しい測定法——

三 島 瑛 人

(昭和57年9月30日受理)

Recent Trends of Studies on Ellipso-Interferometry ——A New Techique for the Determination of Two Dimensional Distributions of Thickness and Optical Constants of Thin Films——

Teruhito MISHIMA

(Received September 30, 1982)

Abstract

Studies on ellipso-interferometry are surveyed. The principle, the lateral resolutions, the thickness sensitivity and some relating experimental results of the technique are summarized. The technique is promising for the analysis of bulk surfaces, thin film, and interface layer because of its high lateral resolutions and high thickness resolution.

A simple method derived from the technique for the sample which is fabricated on a low absorbing substrate is also described.

1. 緒 言

薄膜の厚さ測定および屈折率測定は古くから種々考案され、薄膜の物理的性質の理解、界面状態の解析、特性改善などと深いつながりがある。膜厚分布や屈折率分布を問題にする場合には、いくつかの測定法が一般に用いられている。第1は鋭い針状の金属で試料面上をなぞり試料面上の凹凸を記録するものである。この方式による膜厚分布測定器は市販され¹⁾ 半導体製造工程等に用いられているが、針先が鋭く、またその先端に圧力がかかるため試料を破壊する恐れがある。第2は Fizeau 干渉計²⁾ を用いるものである。これは高反射率の膜 (例えば、金属の蒸着膜等) を試料上面につける必要があり、非破壊検査法とはいえない。以上2つの測定法においては膜厚分布の測定は可能であるが、屈折率分布の測定は不可能である。Michelson 干渉計などの多くの干渉計は非破壊的であり、膜厚分布および屈折率分布の測定にも利用可能であるが、膜厚と屈折率の両者を同時に求めることは不可能で、一方を別の方法によって求める必要がある²⁾。

エリプソメトリは膜厚と光学定数を同時に、非破壊的に求めることが出来、また膜厚分解能が0.1nmのオーダーという素晴らしいものであるため、良く知られている。またこのような特長を利用して、固体表面、薄膜、ガス分子等の吸着、半導体および金属の酸化、たん白質の分子層等の研究に広く用いられている³⁾。ところが、このエリプソメトリでは、原理上、光を照射した領

域全体の平均値しか知ることが出来ない⁴⁾。この短所を克服するため、照射ビームをレンズにより集光し⁵⁾ 走査を併用して膜厚や屈折率の分布を求める方法が考案されたが、走査を用いるため電子計算機と連動させる高価なものとなる。また、その膜に沿っての分解能（横方向分解能）もあまり良いものではない⁶⁾。一方、分布を測定せずに、膜表面の粗さ等の統計量をエリプソメトリを用いて測定しようとする試みもある⁷⁾。

Kontsevoi ら⁸⁾ は1971年、laser ellipsometric 顕微鏡についての実験を発表し、 $10\mu\text{m}$ より良い横方向分解能を得たことを報告している。しかしこの報告は原理には触れず、また膜厚や光学定数を決定できるか否かについて触れなかったため、それ以上の発展はなかった。

1981年、Kontsevoi らとは独立に、時間的・空間的にコヒーレントな光をエリプソメトリに用いると膜厚および光学定数の横方向分布が測定可能であり、更にその横方向分布の分解能の推定値が $1\mu\text{m}$ のオーダーであることが理論的に示された⁴⁾。これにより、エリプソメトリが有する高い膜厚分解能・光学定数分解能と光学顕微鏡の持つ高い横方向分解能とを合せ持つ新しい測定法の可能性が示された。なお、この新しい測定法では走査を用いないので、集光と走査、更に電子計算機を併用するエリプソメトリに比較して、大きな利点があると考えられる。以下ではこの新しい測定法、エリプソ・インタフェロメトリ(ellipso-interferometry) の特徴・性能等について考察する。

2. エリプソ・インタフェロメトリとエリプソメトリ

従来のエリプソメトリにおいては、1つの入射光路が膜の上面での反射・屈折により、いくつもの出射点の異なる光路に分割され、それらの光路が再び集められて干渉する。膜内での多重反射による位相遅れ、膜の上下両界面における反射および膜物質による光の吸収が光の位相と振幅を変化させる。干渉の結果、P偏光成分（電界ベクトルが入射面に平行）とS偏光成分（電界ベクトルが入射面に垂直）の振幅と位相が変化し、P偏光成分とS偏光成分とを合成した楕円偏光の楕円率（ellipticity）と方位角（azimuth）とが変化する。この楕円偏光の状態（elliptic state）の変化から膜厚と光学定数を求めるのが従来のエリプソメトリである。干渉する光路はすべて1つの光路から分割されたものであるから、入射光には時間的コヒーレンスのみが要求され、空間的にはインコーヒレントな入射光でも良いことになる。また、出射点の異なる光を干渉させるため、集光し、それらの光路を1点に集めなければならないから、横方向分布に関する情報は全く失なわれる。

エリプソメトリを用いて横方向分布を求めるためには、入射光をレンズ等で集光し走査を併用すれば良い。ところが大きな開口数のレンズで集光するとスポットサイズは小さくなるが、偏光に大きな影響を与え、その解析は、一般に、困難である⁵⁾。したがって、小さな開口数のレンズを用いなければならないが、コヒーレンスの良い光源（レーザ）を用いてスポットサイズの極小化を企てる。このようにして得られるスポットサイズは、市販のエリプソメータでは $20\mu\text{m}$ ⁶⁾ 程度が限度である。エリプソメトリにおいては、その膜厚感度の良い $60^\circ\sim 80^\circ$ 程度の大きな入射角を用いるが、この入射角の影響を考慮すると、膜面上での光の照射領域は $20\mu\text{m}\times 60\mu\text{m}$ 程度の楕円状のものとなる。この大きさが、集光と走査をエリプソメトリと併用して測定できる最小の領域である。また試料上の膨大な数の点における情報を処理するため、電子計算機も必要となるので、装置全体に要する費用も高価なものになる。

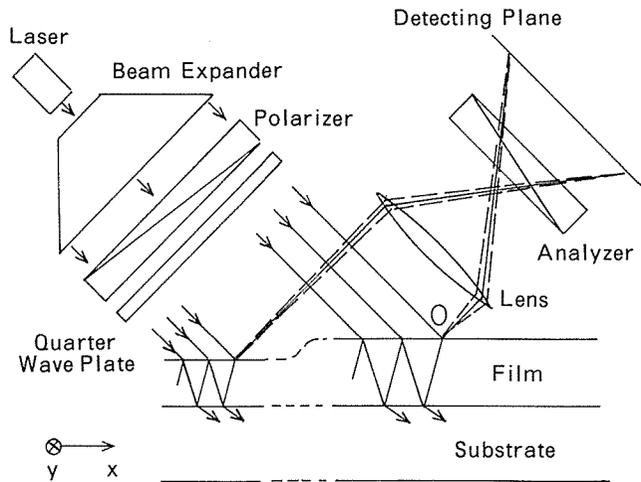


図1 エリプソ・インタフェロメトリの概念図

一方、図1に示されたエリプソ・インタフェロメトリにおいては、膜上のある1点Oで出射するいくつもの光路の干渉を用いる。もし入射光に空間的コヒーレンスが全くなければ、このようないくつもの光路を通る光には特定の位相関係がないから干渉は生じない。したがって多重反射による位相遅れの情報を失ってしまう。しかし入射光に時間的・空間的コヒーレンスがあれば、ここに示されたいくつもの光路は出射点Oで干渉し、その振幅と位相の情報は出射光の楕円偏光のパラメータに反映される。すなわち、入射光としてレーザ光を用いると、図1のような光路の干渉によっても楕円偏光のパラメータから膜厚と光学定数を知ることが出来る⁴⁾。

ところで図1に示された各光路の光の進行方向を逆向きにすると、エリプソメトリにおいて用いられている多重反射の光路と全く同一になる。故に、エリプソメトリとエリプソ・インタフェロメトリでは多重反射による位相遅れ、界面での反射、膜内での吸収など反射光の楕円偏光の状態(elliptic state)に変化を与える機構は全く同一であり、したがって、膜厚および光学定数の計算法は全く同一であることが了解出来る。この事実は、従来のエリプソメトリ用に開発された解析法および電子計算機プログラムがエリプソ・インタフェロメトリによって得られたデータの解析に利用できる⁹⁻¹⁰⁾ことに帰結する。

更に、図1に示された光学系においては反射光を集光しなくとも、各々の出射点で干渉するため、試料面からの反射光をレンズ等により集光する必要がない。このことは横方向の2次元情報を保存できることを示している。図中のレンズは後記するように、エリプソメトリに用いられる集光用のレンズとは全く異なる目的で付け加えられたものであり、横方向の2次元情報は保存される。

3. 結像用レンズを用いたエリプソ・インタフェロメトリ

エリプソ・インタフェロメトリにおいては横方向分布が測定できることを前述したが、集積回路等に見られるように膜の厚さや光学定数に急激な変化があると、回折現象が生じ反射光の電磁界がじょう乱をうける。この回折現象によるじょう乱は膜に近づくにつれて小さくなるから、楕円偏光を検出する面を出来るだけ試料の近くに配置することによって減少させることが出来る。

透過光の楕円偏光を測定する場合にはこの方法が利用可能であるが、反射光の楕円偏光を測定する場合には入射光を遮えぎらずに検出面を近づけることは困難が伴う。したがって反射型のエリプソ・インタフェロメトリにおいてはレンズを用いて試料面の像を検出面上に形成することによってこの回折効果を避ける¹¹⁾。このレンズは結像のために用いられるから、従来のエリプソメトリに用いられる集光用のレンズとは働きが基本的に異なる。

図1に結像用レンズを用いたエリプソ・インタフェロメトリの概念図を示した。レーザから出射した光はビームエキスパンダによりその径を拡大され被測定領域全体がレーザ光に照射されるようにする。偏光子と1/4波長板は入射光を楕円偏光にするためのものである。試料から反射された光はレンズによって検出面上に結像されるとともに、検光子によって直線偏光にされる。偏光子および検光子の方位角を調整することにより、試料上の所望の1点あるいは領域に消光状態を生ぜしめ、その時の偏光子、1/4波長板および検光子の方位角から膜厚と光学定数を求めることとなる。集積回路等においては、膜厚および光学定数の様ないくつかの領域に分割できるから、その領域の数だけ測定および解析を行うことにより全試料の膜厚分布と屈折率分布が決定できる。したがってそのような場合には、集光と走査を併用したエリプソメトリに比較して測定回数・演算時間の大幅な低減が可能となり、また走査卓を制御する必要もないからオンラインで連動する電子計算機は不要であると考えられる。

3.1 横方向分解能

エリプソ・インタフェロメトリの横方向分解能は2つの要因によって制限される。第1は多重反射の効果によるものである⁴⁾¹²⁾。膜内を多重反射しながら進む光は膜の厚さと光学定数に関する情報を位相と振幅の形で運ぶわけである。ところがこの光は反射される度にその一部が屈折光として失われるから徐々に減衰する。また膜物質が光を吸収するならその効果によっても減衰する。出射点から十分に遠い所で膜に入射した光は以上のような過程により減衰されているので出射点での干渉にあまり寄与しない。しかし、出射点の近傍で入射した光は減衰されていないので大きな影響を与える。そのような光は出射点近傍の膜厚や光学定数に関する情報を運んでいるから、出射点の近傍の膜厚や光学定数によって干渉は大きな影響を受ける。これが多重反射による横方向分解能の制限である。したがって、この制限は、入射面に沿う方向(図1の x 方向)にのみ生じ、入射面に垂直な方向(図1の y 方向)には影響を与えない。

横方向分解能を制限する第2の要因は結像用レンズの開口が有限であるために生ずる回折効果である¹⁰⁾¹¹⁾。この回折効果は試料が結像用レンズの焦点近傍に置かれているものとすると光学顕微鏡の回折限界の理論を適用できる。ただし x 方向の分解能は試料面がレンズの軸と傾いていることを考慮しなければならない。

全体としての横方向分解能はシリコン基板上の二酸化シリコン膜をHe-Neレーザを用いて測定する場合について理論計算されている¹²⁾。膜厚が数百nm以下、入射角が40度、結像用レンズの開口数0.65の場合、 x 方向に約 $1\mu\text{m}$ 、 y 方向に約 $0.75\mu\text{m}$ となる。また入射角が60度では x 方向に約 $1.5\mu\text{m}$ 、 y 方向に約 $0.75\mu\text{m}$ となる。この分解能を、従来のエリプソメトリにより得ようとするれば入射光のスポットサイズを $0.75\mu\text{m}$ まで絞らなくてはならない。実用上の限界($20\mu\text{m}$)に比較して、約27倍の相違がある。この横方向分解能は使用波長が 632.8nm であることを考えると光学的測定のはほぼ限界であると考えられる。図2に x 方向分解能の数値計算例を等高線として示す¹³⁾。図中、破線より右上では多重反射による制限が、また左下では回折効果による制限が x 方向分解能を決める主要因である。

横方向分解能の実験的検討も行われている。シリコン基板上に二酸化シリコンを成長させ、ホ

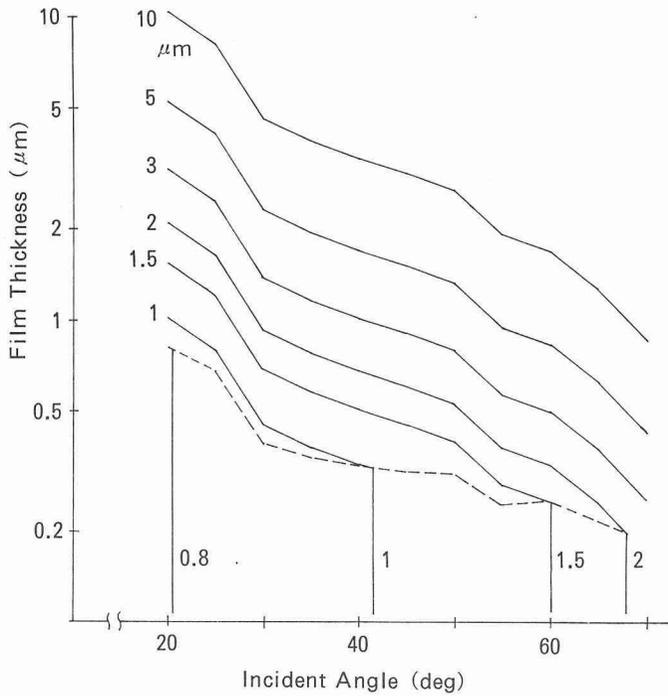
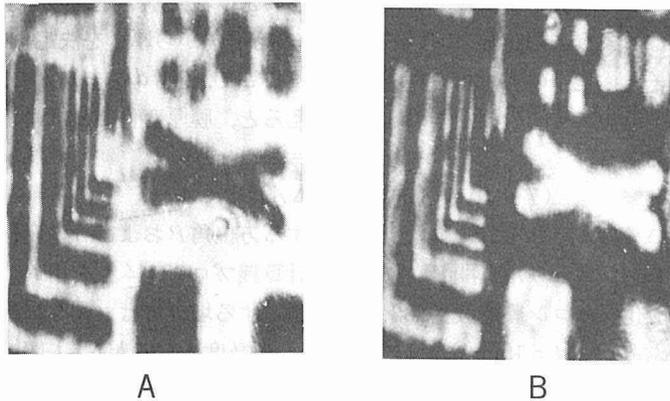


図2 エリプソ・インタフェロメトリの λ 方向分解能の例
 計算条件：試料，シリコン基板上の二酸化シリコン膜；
 波長，632.8nm；レンズの開口数，0.65

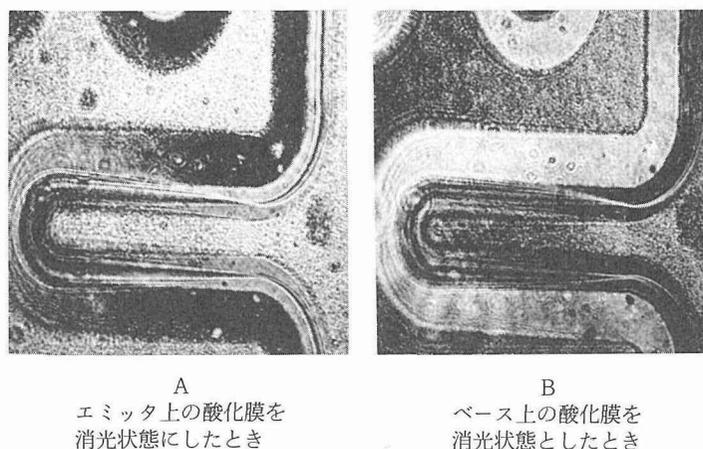
トエッチングによりその一部を除去し，再度二酸化シリコンを成長させることにより，厚さ15nmと30nmとから成るパターンを作成する。その試料を，図1に示された光学系を用いて写真撮影したのが図3である。この場合，検出面は写真フィルムである。図中の最小のL字形パターンの周



条件：波長632.8nm

	偏光子方位角	λ 波長板方位角	検光子方位角	入射角	消光状態の膜厚
A	36.92°	135.00°	22.8°	60.00°	15nm
B	29.47°	135.00°	23.3°	60.00°	30nm

図3 エリプソ・インタフェロメトリによる二酸化シリコン膜のテストパターンの測定



条件：波長632.8nm

	偏光子 方位角	1/4波長 板方位角	検光子 方位角	入射角	消光状態の 膜厚	SEMによる 膜厚測定結果
A	39.9°	135.00°	53.4°	45.00°	361nm	361±6nm
B	30.6°	135.00°	36.6°	45.00°	316nm	325±14nm

図4 エリプソ・インタフェロメトリによるシリコントランジスタの測定

期は $28\mu\text{m}$ であり、このパターンが明瞭に観察できたことから横方向分解能は $10\mu\text{m}$ よりも良好であることが実験的に確認された¹⁴⁾。また、市販のシリコントランジスタのエミッタおよびベース上の酸化皮膜の厚さが異なることが、この測定法を用いて確められ(図4参照)、更に、それらの測定値が、走査型電子顕微鏡を用いた測定値と一致することが示されている⁹⁻¹⁰⁾。

3.2 膜厚変化に対する感度

試料面上のある1点での膜厚を決定するには偏光子および検光子を光軸の回りに回転させ、その点が消光状態になるように調節し、これら光学部品の方位角から厚さを決定する。膜厚が変化した場合には、偏光子と検光子の方位角を再調整する。ここで、膜厚 d を未知入力、偏光子の方位角 P および検光子の方位角 A をこの測定器の出力と考えると、膜厚変化 Δd に対する感度($T.S.$)は次のように定義できる。

$$(T.S.) = [(\Delta P)^2 + (\Delta A)^2]^{1/2} / \Delta d \quad (1)$$

ここで ΔP および ΔA は、それぞれ、膜厚変化に対する方位角 P および A の変化分である。上式の右辺を従来のエリプソメトリ用に開発された電子計算機プログラム¹⁵⁾を用いて計算すると、シリコン基板上の二酸化シリコン膜を波長632.8nmで測定する場合には、図5に示すようになる。入射角を適当に選ぶと、 $\Delta d = 10\text{nm}$ に対して($T.S.$)は数度となるから、人間の目を検出器としても10nmの膜厚変化を容易に検知可能である⁹⁾。より電力密度の高いレーザー光と高感度の光検出器を用いると1nmより小さな膜厚変化も検出可能であると考えられる。

エリプソ・インタフェロメトリでは入射光の光束が試料上の広い領域に分散されており電力密度が小さくなること、2次元光検出器は一般に点検出器よりも雑音性能等が悪いことを考慮すると膜厚分解能が従来のエリプソメトリより向上するとは考えられない。しかし膜厚決定機構が両者とも原理上全く同一であることから、エリプソ・インタフェロメトリの膜厚分解能は従来のエリプソメトリのそれ(約 0.2nm ¹⁶⁾)に非常に近いものと考えられる。

屈折率分解能についても、膜厚分解能と同様、光検出器の相違と屈折率決定機構の同一性を考慮すると、従来のエリプソメトリのそれ(約 $\pm 0.002^{16)}$)に非常に近いものと考えられる。

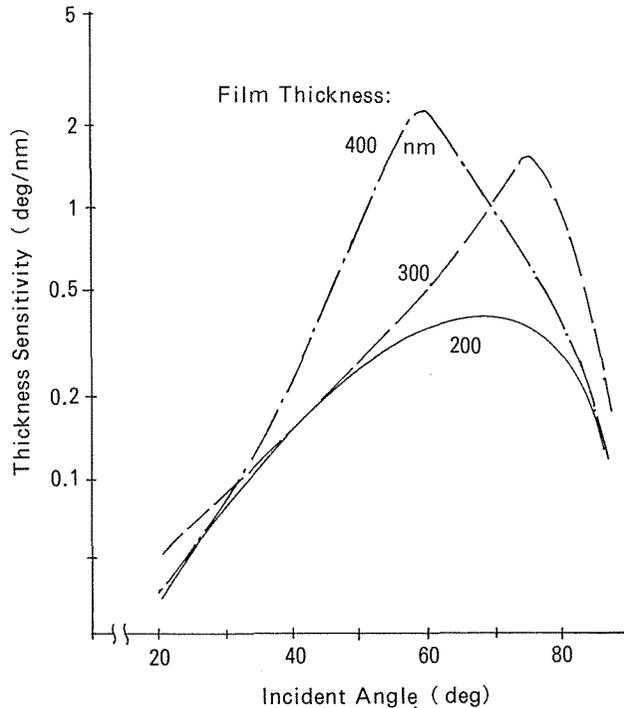


図5 エリプソ・インタフェロメトリの膜厚感度の例
計算条件：試料，シリコン基板上的二酸化シリコン膜；
波長，632.8nm；1/4波長板の方位角，135度

4. エリプソ・インタフェロメトリの簡便化

エリプソ・インタフェロメトリは試料面上の非常に小さな領域の膜厚と光学定数とを決定できるが、測定がやや複雑であり、基板が透明な場合には基板下面からの反射の影響を除くことが困難である。これらの欠点を克服するための方法¹¹⁾¹⁷⁾を以下に述べる。

4.1 理論

エリプソ・インタフェロメトリでは楕円偏光を用いたが、ここではその特殊な場合としてのP偏光を用いる。また入射角は感度等を考慮して任意に選択できたが、ここでは基板下面に Brewster角で入射するよう入射角を選ぶ。このように自由度を削減することにより、基板下面からの反射を除去し、かつ測定の容易なフリンジ型の光学測定法が実現できる。

周囲媒質と基板の屈折率を、それぞれ、 n_0 および n_1 とすると入射角 ϕ_0 が

$$\tan \phi_0 = n_2/n_0 \quad (2)$$

となるように選ぶと、P偏光成分は基板下面(基板と周囲媒質との境界面)ですべて屈折し反射はなくなる。したがって膜の上面と下面の間の多重反射による干渉効果のみが生じ、その干渉縞が試料面上に表われる。この干渉縞は膜厚の変化

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2} \left[n_1^2 - \frac{1}{n_0^2 + n_2^2} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

毎に表われるから、屈折率 n_0, n_1, n_2 が既知であれば膜厚を知ることが出来る。ここに n_1 は膜物質の屈折率である。通常、 n_0 は 1 で、 n_1 は $\sqrt{2}$ より大きい、その場合 Δd は半波長より小さくなり、垂直入射で用いられる Fizeau 干渉計による干渉縞の間隔より小さい。 $\lambda = 1\mu\text{m}$, $n_1 = 4$, $n_2 = 1.5$ であれば Δd は 130nm の程度であり、波長の約 1/8 程度の膜厚分解能を有する。この膜厚分解能はエリプソ・インタフェロメトリ本来の膜厚分解能と比較すると非常に劣っているが、電子計算機を利用せずに求められる簡便な方法としてはかなり良いものであろう。

また Michelson の定義による干渉縞の可視度は常に 1 であることが示され、常に明瞭な干渉縞が観測される。

更に、入射角と入射光のコヒーレンスに関連する問題を除くと Fizeau の干渉計と全く同一であるから緩やかに膜厚が変化する場合にも利用でき、膜厚分解能はそれ程良くないが、膜厚およびその均一性を簡単に検査する方法としては優れたものと考えられる¹¹⁾¹⁷⁾。

4.2 実験

ガラス基板上に故意に不均一な膜厚のセレンウムを蒸着し、He-Ne レーザを用いてその膜厚分布が測定された。ガラスとセレンウムは He-Ne レーザの出力波長 632.8nm においては透明とみなせる。この場合 $n_0 = 1$, $n_1 = 2.75$, $n_2 = 1.51$ であったので、入射角 ϕ_0 は $56^\circ 29'$ となり、隣り合った干渉縞に相当する膜厚の変化 Δd は 121nm である。図 6 にその典型的測定例を示す。また図 6 の写真撮影後、試料をダイヤモンドカッターで切断し、その断面を走査型電子顕微鏡により観察することにより膜厚を測定し、両測定結果が良く一致することが示されている¹⁷⁾。

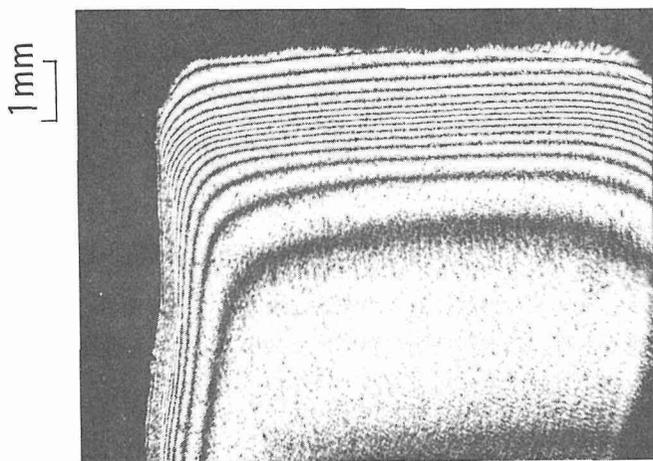


図 6 簡易型エリプソ・インタフェロメトリによる、ガラス基板上のSe膜の膜厚分布測定例

5. 結 言

エリプソ・インタフェロメトリについてのこれまでの研究を要約し、その特徴および性能について述べた。特徴および性能を要約すると以下ようになる。

- a 非破壊検査法である。
- b 走査なしで膜厚および光学定数の分布を測定でき、その横方向分解能は非常に良い。条件によっては光学顕微鏡と同程度である。
- c 膜厚分解能はエリプソメトリと同程度と考えられ、きわめて良好である。

d 屈折率分解能もエリプソメトリと同程度と考えられる。

e 結果の解析にエリプソメトリ用に開発されている解析法および電子計算機プログラムのほとんどが利用可能であり、更に、演算時間の減少が見込まれる。

また、エリプソ・インタフェロメトリの特殊な場合として、透明基板上の透明膜の膜厚を測定する簡便法について述べた。

これらの方法は物質の表面状態や薄膜の研究あるいは製造工程に広く用いられる可能性のあることがわかった。

謝 辞

長期間にわたり、カナダおよび米国における研究の機会を与えて下さった桜庭一郎教授をはじめ関係各位に感謝します。また討論や助言を頂いた University of Manitoba の Kwan C. Kao 教授および Howard C. Card 教授に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 例えば, "Surface profile measuring systems", (1980), Sloan Technology Corp., Santa Barbara, Calif., U.S.A.等を参照.
- 2) O. S. Heavens: "Optical properties of thin solid films", (1965), ch. 5, Dover.
- 3) R. M. A. Azzam and N. M. Bashara: "Ellipsometry and polarized light", (1979), ch. 6, North-Holland.
- 4) T. Mishima and K. C. Kao: "Determination of spatial distributions of thickness and optical constants of thin films by a new optical technique", Appl. Opt., 20 (1981), 21, p. 3719.
- 5) K. K. Svitashv, A. I. Semenko, L. V. Semenko, and V. K. Sokolov: "Use of a convergent light-beam for ellipsometric measurements", Optics and Spectroscopy, 30(1971), 3, p. 288, and "Ellipsometry based on a convergent light beam", Optics and Spectroscopy, 34(1973), 5, p. 542.
- 6) 私信による.
- 7) R. M. A. Azzam and N. M. Bashara: "Ellipsometry and polarized light", (1979), p. 359, North-Holland.
- 8) Y. A. Kontsevoi, R. R. Rezvyi, and V. M. Gololobov: "Use of a laser ellipsometric microscope for checking semiconductor structures", Industrial Laboratory, 37(1971), 2, p. 232.
- 9) T. Mishima and K. C. Kao: "Detection of the thickness uniformity of film layers in semiconductor devices by spatially resolved ellipso-interferometry, Optical Engin., (to be published in 1982).
- 10) T. Mishima and K. C. Kao: "Checking of the thickness uniformity of thin film layers in semiconductor devices by laser ellipso-interferometry", SPIE Proceedings, 334 (1982), 34.
- 11) T. Mishima and K. C. Kao: "Laser interferometry for the determination of thickness distributions of low absorbing films and their spatial and thickness resolutions, Appl. Opt., 21 (1982), 6, p. 1101.
- 12) 三島瑛人: "エリプソ・インタフェロメトリの横方向分解能——膜厚と入射角の影響——", 信学論C (投稿中).
- 13) 三島瑛人, 佐藤邦宏, 伊藤泰宏, 桜庭一郎: "エリプソ・インタフェロメトリにおける多重反射と回折の影響", 北大工学部研究報告 (投稿予定).
- 14) T. Mishima and K. C. Kao: "Improved lateral resolutions in the thickness measurement of thin films by ellipso-interferometry", (Submitted to Appl. Opt. for publication).
- 15) F. L. McCrackin: "A fortran program for analysis of ellipsometer measurements", National Bureau of Standards, Technical Note No. 479, United States Department of Commerce (1969).
- 16) 梅野正義: "偏光解析法 (エリプソメトリ) とその応用", 応用物理, 46 (1977), 9, p. 889.
- 17) T. Mishima and K. C. Kao: "Determination of 2-D thickness distributions of low absorbing thin films by new laser interferometry", Appl. Opt., 21 (1982), 16, p. 2894.