



Title	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
Author(s)	三島, 瑛人; Mishima, Teruhito; 佐藤, 邦宏 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 112, 57-67
Issue Date	1983-01-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41768
Type	departmental bulletin paper
File Information	112_57-68.pdf



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

三島 瑛人 佐藤 邦宏 伊藤 泰宏 桜庭 一郎

(昭和57年9月30日受理)

Effects of Multiple Reflection and Diffraction on Lateral Resolution of Ellipso-Interferometry

Teruhito MISHIMA, Kunihiro SATOH, Yasuhiro ITOH,
and Ichiro SAKURABA

(Received September 30, 1982)

Abstract

A nondestructive optical technique named ellipso-interferometry has been developed for the determination of the distribution of the thickness and the optical constants of thin films.

In this paper the lateral resolutions of the technique is analyzed in terms of multiple reflection effects and diffraction effects in the case of determining the distributions of the thickness and the optical constants of SiO₂ film on Si substrate. The effects of multiple reflection dominate the lateral resolution in case of thick film or large incident angle. On the contrary, the effects of diffraction prevail in the case of thin film and small incident angle. The resolution is calculated to be of the order of 1 μ m for the film thinner than several hundreds nm.

This new technique seems to be applicable to the determination of thickness and optical constants in very small area such as in integrated circuits.

1. ま え が き

時間的コヒーレンスを有する光を楕円偏光にし、膜に照射してその反射光の偏光度(ellipticity)や偏光角(azimuth)の変化から膜厚および膜の光学定数を求める方法はエリプソメトリ(ellipso-metry)と呼ばれ、酸化膜や界面状態の解析にはなくてはならない方法である。この方法は非破壊検査法であると同時に、非常に薄い膜の厚さを0.1mmのオーダーで測定可能な程膜厚に敏感である¹⁾ことで知られている。この方法を用いてシリコン酸化膜²⁾およびヒ化ガリウムの酸化膜の界面状態²⁾、金属表面の皮膜³⁾の解析等が行われている。

ところが、エリプソメトリは原理上、集光と走査とを併用しなければ、試料面に沿っての厚さ分布および屈折率分布を求めることはできない⁴⁾。また集光と走査とを併用して分布を求めたとしても、その分解能は、入射光のビーム径で決められる。ビーム径が偏光に与える影響は複雑なものがあり⁵⁻⁶⁾、約20 μ mより小さくすることは困難である⁷⁾。

以下に議論するエリプソ・インタフェロメトリ(ellipso-interferometry)はエリプソメトリの

光源としてレーザを用い、その出力光の空間的・時間的コヒーレンスを積極的に利用することによって集光や走査を用いずに厚さ分布や屈折率分布を求めるものである^{4), 8-13)}この新しい測定法の膜厚分解能は膜厚測定原理がエリプソメトリと全く同じことから、エリプソメトリと同程度、また横方向分解能は、ある場合にはレンズの回折限界により決まる⁸⁾ことから光学顕微鏡と同程度と推察され¹³⁾る非常に有望な非破壊検査法と考えられる。

エリプソ・インタフェロメトリでは膜の上面と下面との間を光が往復する多重反射を利用するため多重反射の経路に沿って他の場所の膜厚・屈折率に関する情報が伝達される。そのため横方向分解能が制限される。これが多重反射による横方向分解能の制限である。横方向分解能を制限するもう一つの要因はレンズの開口が有限なための回折効果である。膜厚や屈折率の周期的変動や階段状の変動は反射光に回折効果を生起する。この回折効果を除くためレンズを用いて試料面の像を検出面上に作る⁸⁾わけであるが、今度はその結像用レンズの開口が有限であるための回折効果が表われ⁸⁾、横方向分解能を制限する。ここでは以上2つの要因を定量的に考察し、いずれが、どのような場合に、全体としての横方向分解能を決める主要因となるかを考察する。

2. 結像用レンズを用いたエリプソ・インタフェロメトリ

従来のエリプソメトリにおいては、単色光を光源とし（したがって入射光には空間的コヒーレンスはなくとも良い）、1つの光路から膜の上面で分離されたいくつかの光路の干渉を考えている（図1参照）。このような光の干渉は入射光に時間的コヒーレンスのみがあれば生じ、入射光に空間的コヒーレンスがなくとも生ずる。故に、基本的には単色光源で充分である。この方法ではP偏光（電界ベクトルが入射面に平行）に対するフレネルの反射係数とS偏光（電界ベクトルが入射面に垂直）に対するそれとの相違および各光路間の時間遅れを、干渉効果により楕円偏光の状態（elliptic state）の変化に変換して観測するわけである。このような光学系で干渉させるためには全光路を1点に集めるか（反射光をレンズ等で集光する必要がある）、あるいは電界の和にตอบสนองする検出器ですべての光路を通る光を同時に受光し検出する（例えば光電面を用いるとそれが可能である）必要がある。いずれにしてもそれ以後は単に時間関数となり、試料面に沿った分布に関する情報は全く失われる。

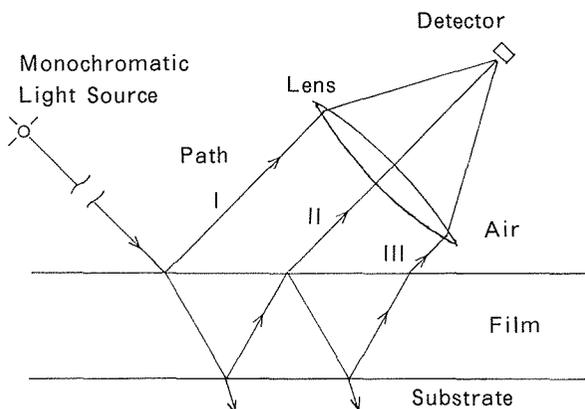


図1 従来のエリプソメトリにおける干渉

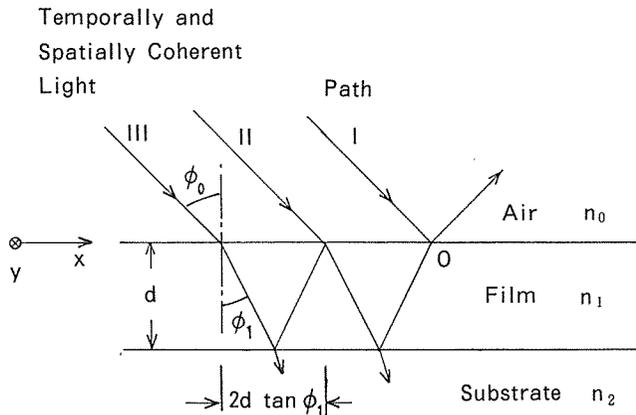


図2 エリプソ・インタフェロメトリにおける干渉

ところが、光源としてレーザを用いると以上のような試料面に沿う（横方向）分布に関する情報をも得ることが可能となる。それがエリプソ・インタフェロメトリの原理であり、エリプソメトリとの重要な相違でもある。図2にこの新しい測定法における干渉の模式図を示す。被測定膜上の一点Oを通り膜から出射する光は多くの光路の寄与から成っている。もし入射光に空間的コヒーレンスがなければ、入射する各光路相互には特定の位相関係がない。そのような場合には、点Oから出射する光はそれぞれの光路を通った光の電力の和となり、干渉しない。干渉しなければ多重反射による位相の遅れは検出できず、膜厚に関する情報を失ってしまう。しかし入射光として空間的コヒーレンスのあるレーザ光を用いると、点Oから出射する各光路は、たとえ入射点が異なっても、特定の位相関係があり点Oで干渉する。したがって反射光を集光しなくても、あるいは電界の和に応答する検出器を用いなくても、干渉が生じ、その結果は反射光の楕円偏光のパラメータの変化となって観測され得る。すなわち図2に示された各光路を通る光は光源として時間的および空間的にコヒーレントな入射光を用いると干渉し楕円偏光解析が可能となる。

膜内を多重反射しながら進む光は反射のたびにその一部を屈折光として失うから振幅は減少する。また膜物質に吸収効果があれば吸収による振幅減少が加わり、より急速に減少する。したがって出射点Oから遠く離れた入射点を持つ光路の光は充分減衰されており、出射点Oでの干渉に寄与しなくなる。結局、そのような2点は干渉効果の見地からは独立とみなすことができ、もし上記2点で膜厚や光学定数に差異があれば、反射楕円偏光の状態もこの2点では異なることとなる。これが、エリプソ・インタフェロメトリにおいて、横方向に分解可能な理由である。しかし、近接した2点の情報が混じり合うことは避けられない。これが横方向分解能を制限する基本的原因である。

以上、膜に沿っての分布を測定できる原理を述べたが、これら横方向の分布に関する情報は膜厚および屈折率の階段上の変化に起因する回折効果によりじょう乱を受ける。この回折効果は膜から離れるにしたがって大きくなるから、検出面と膜面との距離をできるだけ小さくすることによって軽減することが可能である。しかし入射光を遮えぎることなく近づけることは配置上困難な場合が多い（反射光ではなく透過光の楕円偏光を測定する場合には可能であろう）。ところで、レンズにより膜の像を作り、この像面で楕円偏光を観測するなら、上記の回折効果を除くことが可能である。このレンズは結像のためのものであり、従来のエリプソメトリにおいて用いられる集光用のレンズとは根本的に異なる。図3に、結像用レンズを用いたエリプソ・インタフェロメ

トりの光学系の一例を示す。偏光子と1/4波長板は楕円偏光を作るためのものであり、検光子は楕円偏光の状態を知るためのものである。被測定面がレーザービームの径より小さければ、ビームエキスパンダは不要である。またビームエキスパンダは、その偏光状態に与える影響が無視できれば、偏光子と1/4波長板の間、あるいは1/4波長板と試料との間に配置することも可能であり、そのような配置はそれら光学部品の小口径化にとって有益であろう。さて、結像用レンズの使用により、上記回折効果を除くことが可能となったが、今度はこのレンズの開口が有限であることによる回折効果が生ずる。このレンズ開口による回折効果が、エリプソ・インタフェロメトリの横方向分解能を制限する第2の要因である。しかし、この回折効果は、基本的には、顕微鏡における回折効果と同一のため、解析は比較的容易である。

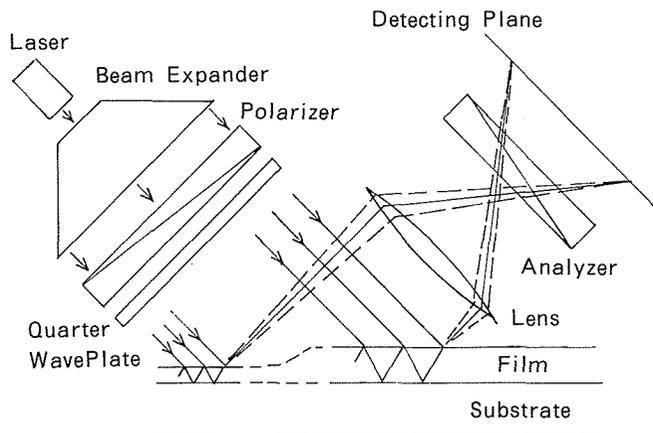


図3 エリプソ・インタフェロメータの光学系の一例

3. 多重反射による横方向分解能の限界

x 軸を入射面と膜上面との交線とし、 y 軸は膜上面にあり x 軸に垂直とする (図2参照)。膜を構成する物質による光の吸収は無視する。この仮定は多くの誘電体膜を可視光で測定する場合には正当なものであり、金属膜でもその厚さが非常に薄い場合には妥当である。空気の屈折率を n_0 、膜の屈折率を n_1 、入射角を ϕ_0 とすると膜への屈折角 ϕ_1 はスネルの法則

$$n_1 \sin \phi_1 = n_0 \sin \phi_0 \quad (1)$$

により求められる。図2にはいくつかの光路が示されている (他は簡単のため省略した) が、 m 番目の光路の位相は $(m-1)$ 番目の光路の位相に比べて

$$2\delta = (4\pi/\lambda)dn_1 \cos \phi_1 \quad (2)$$

だけ遅れる。ただし、 λ はレーザー光の自由空間波長、 d は膜厚である。入射光の P 偏光成分および S 偏光成分の電界ベクトルをそれぞれ E_{Pi} および E_{Si} 、反射光のそれらを E_{Pr} および E_{Sr} とすると P 偏光の反射係数 E_{Pr}/E_{Pi} が S 偏光の反射係数 E_{Sr}/E_{Si} に対する比は偏光解析にとって重要な量であり、次式のように d と ψ を用いて表現される。

$$\tan \psi \exp(i\Delta) = \{(E_{Pr}/E_{Pi})/(E_{Sr}/E_{Si})\} \quad (3)$$

上記の右辺を多重反射による干渉効果まで含めて計算すると

$$\tan \psi \exp(i\Delta) = \frac{r_{01}^P + r_{12}^P z}{1 + r_{01}^P r_{12}^P z} \frac{1 + r_{01}^S r_{12}^S z}{r_{01}^S + r_{12}^S z} \quad (4)$$

$$z \equiv \exp(-2i\delta) \quad (5)$$

となる。ここで r_{ij}^ν ($i, j=0, 1$ または 2) は媒質 i から入射し媒質 j との境界で反射される場合の ν 偏光 ($\nu=P$ または S) 成分に対するフレネルの反射係数であり、以下ようになる。

$$r_{ij}^P = \frac{-n_i \cos \phi_j + n_j \cos \phi_i}{n_i \cos \phi_j + n_j \cos \phi_i} \quad (6)$$

$$r_{ij}^S = \frac{n_i \cos \phi_i - n_j \cos \phi_j}{n_i \cos \phi_i + n_j \cos \phi_j} \quad (7)$$

以上、無限個の光路の干渉を考えたが、 N 番目までの光路を考慮し、他を無視すると

$$\tan \psi_N \exp(i\Delta_N) = \frac{1 + r_{01}^S r_{12}^S z}{1 + r_{01}^P r_{12}^P z} \cdot \frac{r_{01}^P + r_{12}^P z - \{1 - (r_{01}^P)^2\} r_{12}^P z (-r_{01}^P r_{12}^P z)^{N-1}}{r_{01}^S + r_{12}^S z - \{1 - (r_{01}^S)^2\} r_{12}^S z (-r_{01}^S r_{12}^S z)^{N-1}} \quad (8)$$

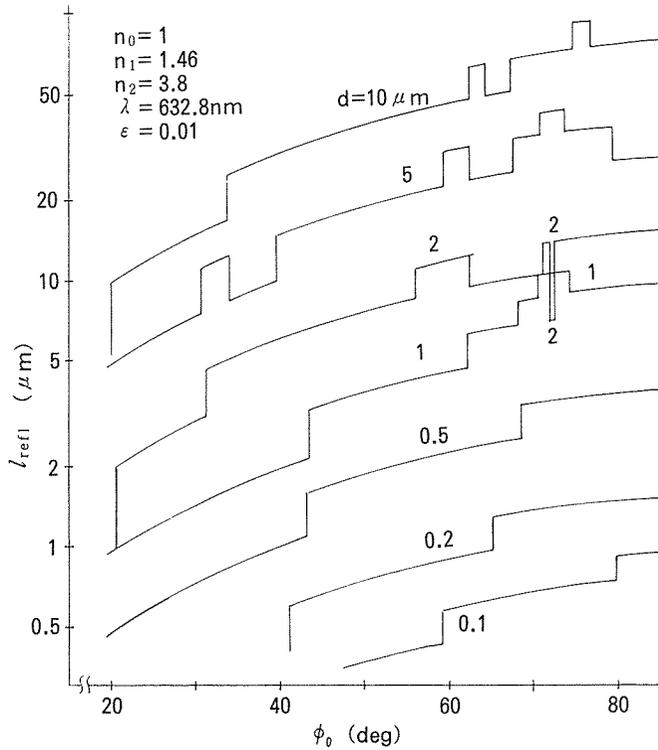
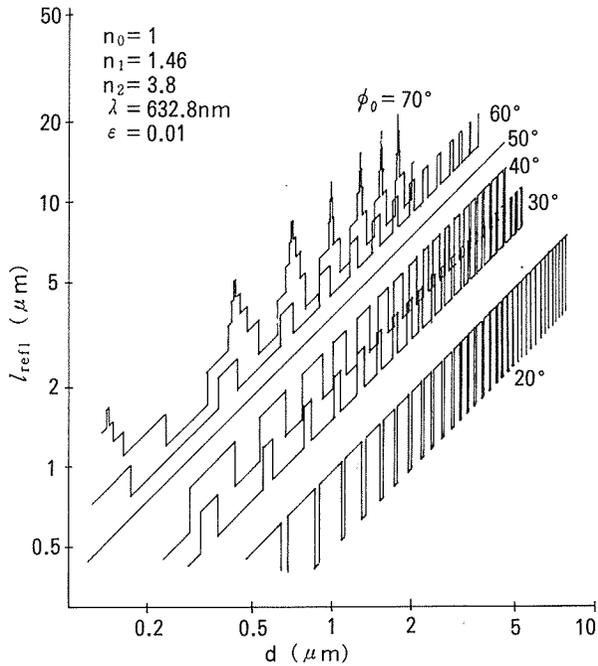
となる。上式において無視された光路の全体に対する寄与を調べるため式(8)の両辺を式(4)の両辺で割り次式を得る。

$$\frac{\tan \psi_N \exp(i\Delta_N)}{\tan \psi \exp(i\Delta)} = \frac{1 - \frac{\{1 - (r_{01}^P)^2\} r_{12}^P z (-r_{01}^P r_{12}^P z)^{N-1}}{r_{01}^P + r_{12}^P z}}{1 - \frac{\{1 - (r_{01}^S)^2\} r_{12}^S z (-r_{01}^S r_{12}^S z)^{N-1}}{r_{01}^S + r_{12}^S z}} \quad (9)$$

$(-r_{01}^\nu r_{12}^\nu z)$ の絶対値は 1 より小さいので上式の右辺は N が大きくなると 1 に収束する。したがって N が十分に大きければ上式は以下のように近似できる。

$$\frac{\tan \psi_N \exp(i\Delta_N)}{\tan \psi \exp(i\Delta)} = 1 + \left[\frac{\{1 - (r_{01}^S)^2\} r_{12}^S}{r_{01}^S + r_{12}^S z} (-r_{01}^S r_{12}^S)^{N-1} - \frac{\{1 - (r_{01}^P)^2\} r_{12}^P}{r_{01}^P + r_{12}^P z} (-r_{01}^P r_{12}^P)^{N-1} \right] z^N \quad (10)$$

結局、上式の右辺第 2 項が 1 より充分小さければ式(8)の式(4)に対する近似度が充分であることになり、そのことは、式(10)の右辺第 2 項が充分小さければ $(N+1)$ 番目以降の光路を無視しても楕円偏光のパラメータを充分正確に表現できることを意味している。したがって、 x 軸方向に沿

(a)入射角 ϕ_0 の影響図4 多重反射による制限 l_{refl} の数値計算例(b)膜厚 d の影響図4 多重反射による制限 l_{refl} の数値計算例

って出射点から N 番目の光路の入射点まで一様な膜があれば、その膜厚および光学定数が充分正確に求め得ることになる。故にある小さな正数 ε ($0 < \varepsilon < 1$) をパラメータとして、

$$\varepsilon \geq \left| \frac{\{1 - (r_{01}^S)^2\} r_{12}^S}{r_{01}^S + r_{12}^S z} (-r_{01}^S r_{12}^S)^{N-1} - \frac{\{1 - (r_{01}^P)^2\} r_{12}^P}{r_{01}^P + r_{12}^P z} (-r_{01}^P r_{12}^P)^{N-1} \right| \quad (11)$$

となる最小の N を用いて、 N 番目の光路の入射点と出射点の距離

$$l_{\text{refl}} \equiv 2d(N-1) \tan \phi_1 \quad (12)$$

を計算したものは x 方向の分解能とみなすことができる。なお、この多重反射による横方向分解能の制限は x 方向にのみ生じ、 y 方向には無関係である。なぜなら、多重反射によって情報が運ばれるのは x 方向であり、 y 方向には無関係だからである。

式(11)および(12)より多重反射による横方向分解能の制限を考えてみよう。式(12)より l_{refl} は膜厚 d 、屈折角 ϕ_1 の正接、および $(N-1)$ に比例する。したがって、一般に、膜厚が厚く、入射角が大きいと良い x 方向分解能が得られない。 N の値は式(11)により定まり、複雑なので定性的に考察する。 r_{ij}^p はフレネルの反射係数であり、その絶対値は 1 より小さい。したがって r_{ij}^p の値の如何にかかわらず（その絶対値が 1 より小さければ）式(11)を満足する N は必ずみつかるはずである。後述する数値計算によると、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、 $\varepsilon = 0.01$ で N の値は 3 ~ 8 程度である。膜と基板の屈折率が小さく空気の屈折率により近い光導波路用の膜の場合には、 r_{ij}^p はより小さく考えられ、したがってより小さな N の値でも式(11)を満足するであろう。そのような場合、 l_{refl} はより小さくなり横方向分解能は向上すると考えられる。

図 4 にシリコン基板上に作られた二酸化シリコン膜を He-Ne レーザ ($\lambda = 632.8\text{nm}$) を用いて測定する場合の l_{refl} の数値計算例を示した。 l_{refl} は膜厚 d 、入射角 ϕ_0 、屈折率 n_1 、 n_2 および波長 λ の関数であり複雑である。図 4 a および b に見られる階段状の変化は N が整数であることを要請したため生じたもので、 N の値の変化に対応している。この変化の大きさは式(12)からも明らかのように $2d \tan \phi_1$ である。階段状の変化のない領域では $2d \tan \phi_1$ に比例するから ϕ_0 の変化に対しては単調増加し（なぜなら式(1)より ϕ_1 は ϕ_0 の単調増加関数）、 d に対しては比例する。膜厚が薄く入射角の小さな領域では波長 632.8nm の程度にもなり、以下に述べる回折効果による横方向分解能の限界と同程度である。

4. 回折効果による横方向分解能の限界

結像用レンズを用いたエリプソ・インタフェロメトリではそのレンズの開口が有限なために回折効果によって横方向分解能が制限されることは前述した。次にこの効果を定量的に考察する。

試料面をレンズの焦点距離近くに置き、大きな倍率を得ようとする場合を考えることとする。この場合の回折限界は、顕微鏡の回折限界の理論¹⁴⁾が適用できる。コヒーレント光照射の場合、 y 方向の回折限界 $|Y|$ にはこの理論がそのまま適用でき、レンズの開口数を $(N.A.)$ とすれば

$$|Y| = 0.77 \lambda / (N.A.) \quad (13)$$

となるが、 x 方向に対しては試料面がレンズの軸に対して垂直ではない効果を考慮しなければならない。 x 方向に沿って $|X|$ だけ離れた 2 点が識別できるためには、その傾きを考慮して

$$|X| = 0.77\lambda / \{(N.A.) \cos \phi_0\} \quad (14)$$

以上に離れていなければならない。x方向、y方向いずれにしても用いる光の波長が短く、用いるレンズの開口数が大きければこれら分解能は小さくなり向上する。

市販の標準顕微鏡の対物レンズの開口数は大略表1の程度である¹⁵⁾が、倍率40倍までは乾燥対物レンズであり、100倍のものは液浸で用いるのが普通である。したがって開口数として0.3、0.4および0.65を用いて、結像用レンズの回折効果による分解能の限界を計算した例を図5に示す。

表1 市販標準顕微鏡の対物レンズの倍率と開口数の例¹⁵⁾

倍率	10×	20×	40×	100×
開口数	0.30	0.40	0.65	1.25~1.30

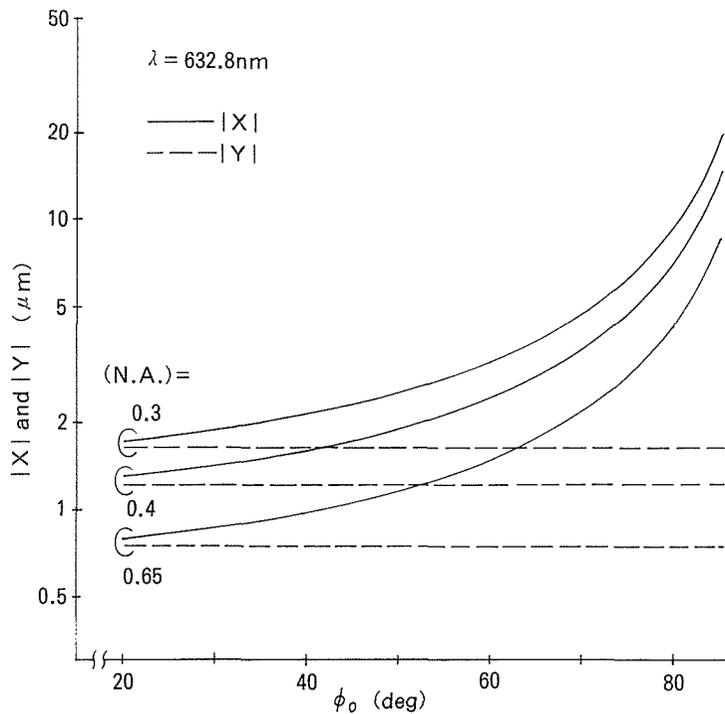


図5 結像用レンズによる回折限界

$|X|$ は入射角 ϕ_0 に無関係に一定で、かつ $|X|$ より常に小さいので、試料によっては90度回転させx軸とy軸を交換することが良い結果を生ずるかもしれない。 $|X|$ は入射角 ϕ_0 の増加により急激に増加するので、 $|X|$ を小さくするためには入射角 ϕ_0 を小さく選ぶと良いことがわかる。y方向には回折効果の他には分解能を制限する要因はないので全体としてのy方向分解能も $|Y|$ である。しかしx方向には回折効果と多重反射の効果があり、 $|X|$ と l_{refl} の大きな方が全体としての分解能を支配するものと考えられる。

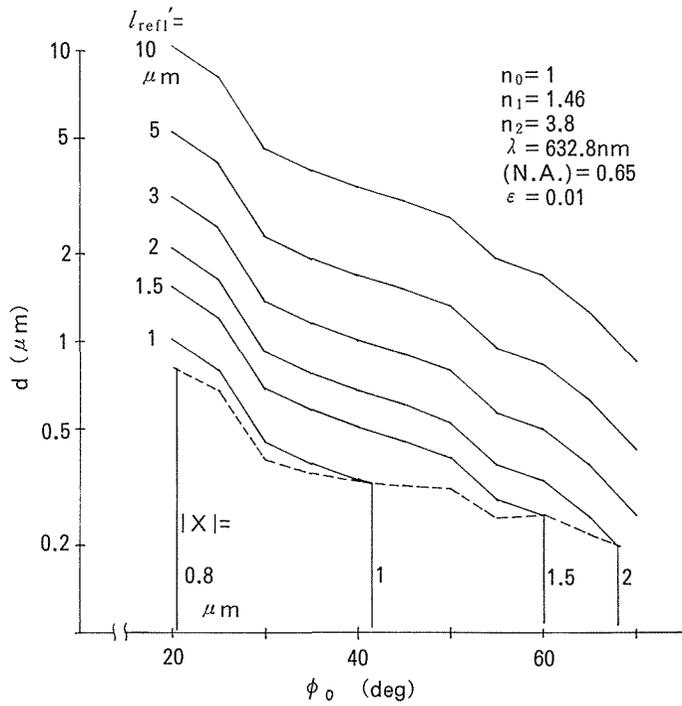


図6 x方向分解能の膜厚dと入射角 ϕ_0 による影響

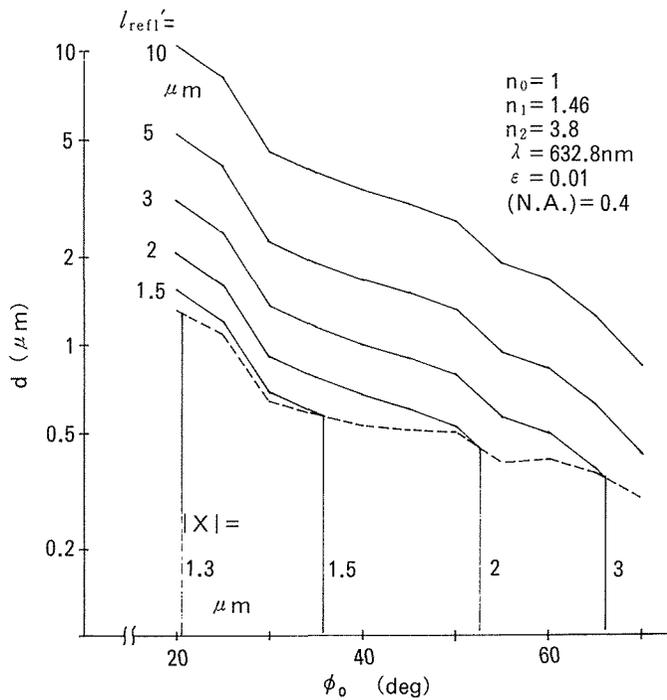


図6 x方向分解能の膜厚dと入射角 ϕ_0 による影響

5. 多重反射の効果および回折効果がそれぞれ支配的となる条件

y方向の分解能は用いる結像用レンズの回折効果によってのみ決定されるので、ここではx方向についてのみ考察する。x方向の分解能は $|X|$ と l_{refl} によって制限され、この2者のうち大きな方が全体としての分解能を決定する支配的要因となるであろうから、ここでは前記2者のうち大きなものをもって全体の分解能とする。図6に全体の分解能を等高線として示した。同図aは結像用レンズの開口数が0.65, 同図bは0.4の場合である。ただし多重反射による限界 l_{refl} は図4からも明らかのように滑らかな曲線ではないので、ある入射角 ϕ_0 に対してとり得る最大の N の値を用いて l_{refl} を計算している(すなわち図4aの各折線の上側に接する直線を用いている)。したがって図4および図5の l_{refl} より小さいことはない。以上の理由から図6では l_{refl} という表記を用いずに l_{refl}' を用いた。図中の破線は多重反射による限界と回折効果による限界とが等しい所であり、その右上では多重反射の効果が、またそれより左下では回折効果が支配的である。

膜厚が数百nmより厚い場合には多重反射による効果が支配的で、それ故分解能は膜厚と入射角によって大きな影響を受けるが、レンズの開口数には無関係である。したがってそのような場合、ある与えられた膜に対して横方向分解能を向上させるには入射角を小さくすることしか方策がない。一方、膜厚が数百nmより薄い場合には回折効果が支配的で、それ故分解能は入射角とレンズの開口の影響を受けるが、膜厚には無関係である。このような場合に、与えられた膜に対して横方向分解能を向上させるためには入射角の減少と開口数の増大を企図しなければならない。膜厚が数百nmより薄い場合、厚さ方向の感度を犠牲にして小さい入射角を用いるとx方向の分解能は $1\ \mu\text{m}$ 以下(ただしレンズの開口数が0.65の場合)にもなる。これは使用波長が632.8nmであることを考慮すれば、大略、光学的測定法の限界に近い。

6. む す び

エリプソ・インタフェロメトリの横方向分解能を制限する原因が膜内を光が多重反射することによるものと結像のために用いたレンズの開口による回折効果であることを説明した。ただしy方向(入射面に垂直)の分解能は回折効果によってのみ決定される。次に、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を想定し、これらの原因によるx方向の分解能を数値計算した。その結果以下の事項が明らかになった。

- a 多重反射による限界 l_{refl} は入射角 ϕ_0 によっても異なるが、大略、膜厚 d の数倍程度である。 l_{refl} が小さくなる(向上する)のは膜厚が薄く入射角が小さい場合である。
- b レンズの回折効果による限界 $|X|$ は入射角 ϕ_0 とレンズの開口数($N.A.$)の関数であり、入射角が小さく開口数が大きければこの限界は小さく(向上)する。入射角があまりに大きくなるとこの限界は急激に増加し、x方向分解能の見地からは望ましくない。
- c 入射角によっても異なるが、膜厚が数百nmより厚い場合には多重反射による限界が支配的であり、それより薄い場合には回折効果による限界が支配的である。
- d 膜厚が数百nmより薄い場合に感度を犠牲にして小さい入射角を用いると、レンズの開口数が0.65のとき、x方向の分解能は $1\ \mu\text{m}$ 以下にもなる。これは波長が632.8nmであることを考慮すれば、大略、光学的測定法の限界に近い。

故に、この新しい測定法はシリコン半導体の製造過程に広く用いられる可能性がある。また、実時間で観測でき、高い膜厚分解能を有し、更に高い横方向分解能を有することなどから、誘電体、半導体および金属表面上の膜の観察に非常に有用であると思われる。

謝 辞

この研究は著者の一人（三島）がカナダ・マニトバ大学電気工学科に長期海外研修旅行をさせて頂いた折に始まったものであることを記し、関係各位に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 河村守康：“偏光解析装置（エリプソメータ）”，応用物理，46（1977），9，p.887.
- 2) D. E. Aspens, J. B. Theeten, and R. P. H. Chang: “Nondestructive characterization of interface layers between Si or GaAs and their oxides by spectroscopic ellipsometry”, J. Vac. Sci. Technol., 16 (1979), 5, p. 1374.
- 3) 西村六郎，工藤清勝，佐藤教男：“リン酸塩溶液およびホウ酸塩溶液における鉄表面不働態皮膜”，日本金属学会誌，45（1981），6，p.581.
- 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. Semenenko, L. V. Semenenko, and V. K. Sokolov: “Use of a convergent light beam for ellipsometric measurements”, Opt. and Spectrosc., 30 (1971), 3, p. 288.
- 6) K. K. Svitashv, A. I. Semenenko, L. V. Semenenko, and V. K. Sokolov: “Ellipsometry based on a convergent light beam”, Opt. and Spectrosc., 34 (1973), 5, p. 542.
- 7) 私信による.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) T. Mishima and K. C. Kao: “Detection of the thickness uniformity of film layers in semiconductor devices by spatially resolved ellipso-interferometry”, Optical Engineering, (to be published in 1982).
- 11) 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.
- 12) 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).
- 13) 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）。
- 14) M. Born and E. Wolf: Principles of Optics, 5th ed., (1975), p. 424, Pergamon Press.
- 15) 石黒浩三：光学，（1968），p. 76，共立出版。