

マイクロコンピューターを用いた 光電測光型偏光解析装置の試作

川 畑 州 一* 猪 瀬 博 昭**

Photometric Ellipsometer Combined with Micro-computer

Shuichi KAWABATA and Hiroaki INOSE

An automatic measurement system of the photometric ellipsometer combined with micro-computer is described, which has been designed for the measurements of the optical constants of the evaporated films and the bulk surfaces. The ellipsometer is of the rotating-analyser type; it is capable of determining the ellipsometric parameters, in typical cases to $\delta\psi=0.1^\circ$ and $\delta\Delta=0.1^\circ$. It takes about 1.5 minutes to accomplish the measurement.

We developed new measurement method which does not need the accurate alignment of the optical components before measurement. By carrying out the measurements at two 90 degree different azimuths of the polariser, we can determine p, s directions of the optical system and the ellipsometric parameters at a time. It is also applied to the new alignment procedure which is more simpler and accurate than usual methods.

The versatility of this new measurement method has been confirmed experimentally.

1. はじめに

偏光解析法 (Ellipsometry) は試料面における、光の入射面に平行な振動成分 (p 成分) と垂直な振動成分 (s 成分) の複素振幅反射率の比を測定することによって、その試料面の光学定数、またその面に附着した薄膜の厚さや屈折率を知る方法である¹⁾。

入射角 φ で入射する単色な平行光束の p, s 成分の試料面における複素振幅反射率—Fresnel 係数—をそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} R_p &= r_p \cdot e^{i\delta p} \\ R_s &= r_s \cdot e^{i\delta s} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

とすると、試料面の複素振幅反射率比は、

$$R_p/R_s = \frac{r_p}{r_s} \cdot e^{i(\delta p - \delta s)} \quad (2)$$

となる。これはまた、 $r_p/r_s = \tan \psi$, $\delta p - \delta s = \Delta$ とおくと $\tan \psi$ は試料表面の振幅反射率比、 Δ は反射光の位相差を表わす。そこで (2) 式は $\tan \psi$ と Δ を用いて

$$R_p/R_s = \tan \psi \cdot e^{i\Delta} \quad (3)$$

と書くことができる。

偏光解析法ではふつう試料表面の複素振幅反射率比における $\tan \psi$ と Δ を測定するわけであるが、この $\tan \psi$ と Δ は入射角 φ 、波長 λ 、下地の屈折率 $\bar{N}_s (= n_s - ik_s$, n_s は位相速度係数, k_s は振幅減衰係数), および膜の屈折率 $\bar{N}_f (= n_f - ik_f)$ と膜厚 d の関数である。そこで下地の屈折率が既知でしかも膜が透明 ($k_f=0$) であれば膜の屈折率 n_f と膜厚 d を $\tan \psi$ と Δ の値から求めることができる。また、吸収膜 ($k_f \neq 0$) の場合でも $\tan \psi$, Δ の測定をいろいろな条件下で行なえば n_f , k_f , d を知ることができる²⁾。

偏光解析法は試料表面の状態に対して、非常に

* 物性工学研究室講師

** 写真工学科 4 年

昭和 56 年 9 月 10 日受理

敏感で物質表面の研究にとって有益な手段である。例えば、試料表面に存在する表面層あるいは吸着層などの測定において、偏光解析法では、それらの膜厚を 1 \AA 以下の感度で測定することができる³⁾。

これまでに、偏光解析法を用いた研究例としては、ガラス表面のヤケの研究⁴⁾、蒸着薄膜の屈折率と膜厚の測定⁵⁾、光学的異方性の測定⁶⁾などがあげられるが、物質表面に関する研究がさかんになるにつれて偏光解析法の応用も広がるものと期待される。

偏光解析装置には、試料表面で反射された楕円偏光を $\lambda/4$ 板と検光子を交互に動かして消光させる消光型⁷⁾と、検光子を透過してくる光の強度を直接測定する光電測光型とがある。消光型は光電測光型に比べて測定精度では大変優れているが、その測定に時間がかかるのが難点である。そのため、光学定数のすみやかな変化を測定する場合には不向きである。光電測光型には回転検光子型^{8),9)}と位相変調型^{10),11)}とがあり、共に早い測定が可能である。しかも回転検光子型は装置の構成が簡単で、可変波長での測定も容易なことから、分光偏光解析装置として、固体表面の新しい研究手段となりつつある。

ここではマイクロコンピュータを用いて、測定から解析まで一貫して行なうことができる回転検光子型偏光解析装置を試作したので報告する。また、これまで測定の前に必要とされた光学素子の調整を行わず、直接試料表面の光学定数を測定することができる新しい測定法を開発した。この新しい測定法により、従来の回転検光子型偏光解析法に比べ試料をセットしてから測定完了までの時間を大幅に短縮することができ、しかも高精度の測定が可能となった。

2. 測定原理

ここでは回転検光子型偏光解析法の測定原理について簡単に説明する。

光学系として図1に示されたような偏光子(P)

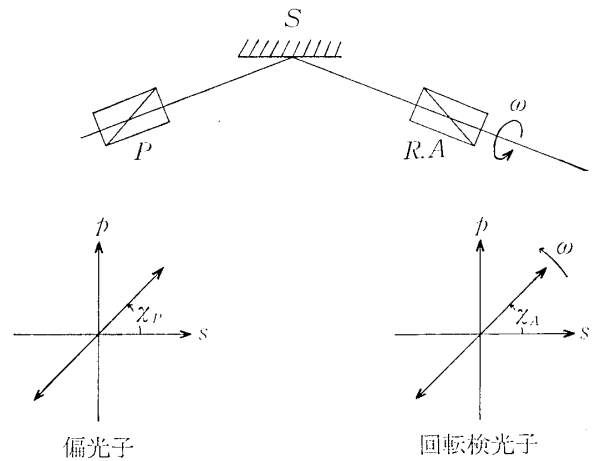


図1 回転検光子型偏光解析法における光学系
P: 偏光子 S: 試料 R.A: 回転検光子

一試料(S)一回転検光子(RA)から成る系を考える。入射直線偏光の方位角は 45° とし、試料面の複素振幅反射率比を $\tan \psi e^{i\Delta}$ とすると、方位角 χ_A にある検光子を透過して検出器に入射する光の強度 $I(\chi_A)$ は

$$I(\chi_A) = \frac{I_0}{2} (1 + \cos 2\psi \cdot \cos 2\chi_A + \sin 2\psi \cdot \cos \Delta \cdot \sin 2\chi_A) \quad (4)$$

となる。ここで I_0 は試料面で反射された楕円偏光の強度である。(4)式はまた、反射楕円偏光を表わすストークスパラメーターの S_1, S_2 を用いて

$$I(\chi_A) = \frac{I_0}{2} (1 + S_1 \cdot \cos 2\chi_A + S_2 \cdot \sin 2\chi_A) \quad (5)$$

と表わされる。ただし

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \cos 2\psi \\ S_2 &= \sin 2\psi \cdot \cos \Delta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

である。楕円偏光の偏光状態を半径1のポアンカレ球上の点で表わすと、規格化されたストークスパラメーター S_1, S_2, S_3 はその点の直角座標を与える(図2)。この論文では、規格化されたストークスパラメーターを単にストークスパラメーターと呼ぶことにする。

(4)式から、検出器に入射する光の強度 $I(\chi_A)$ は検光子の方位角 χ_A に関してストークスパラメ

ーターの S_1, S_2 をその Fourier 係数とする 1 次の Fourier 級数となっていることがわかる。そこで検光子が $2\pi/N$ だけ回転するごとにその透過強度 $I(\chi_A)$ を測定したとすると、検光子が 1 回転する間に N 個の透過度 $I(\chi_{A_i})$ ($i=1, 2, 3, \dots, N$) が得られる。これらの透過強度とその

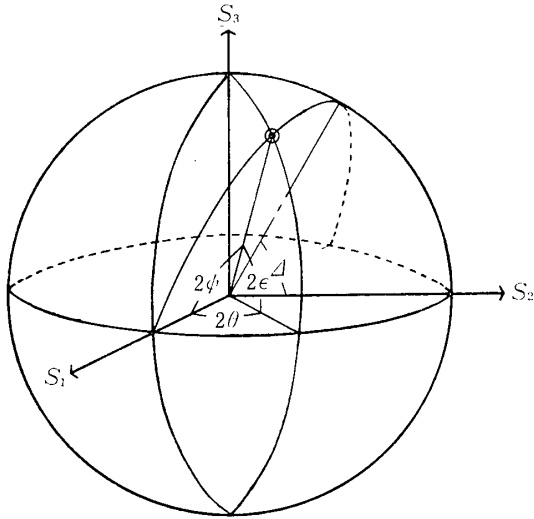


図 2 ポアンカレ球による楕円偏光の表示とストークスパラメーター S_1, S_2, S_3 との関係

$$\begin{aligned} S_1 &= \cos 2\epsilon \cdot \cos 2\theta \\ S_2 &= \cos 2\epsilon \cdot \sin 2\theta \\ S_3 &= \sin 2\epsilon \end{aligned}$$

ここで θ, ϵ はそれぞれ楕円偏光の方位角と楕円角である。

ときの検光子の方位角から Fourier 変換によって (5) 式におけるストークスパラメーター S_1, S_2 を求めることができる。すなわち

$$S_1 = 2 \sum_{i=1}^N I(\chi_{A_i}) \cdot \cos 2\chi_{A_i} / \sum_{i=1}^N I(\chi_{A_i}) \quad (7)$$

$$S_2 = 2 \sum_{i=1}^N I(\chi_{A_i}) \cdot \sin 2\chi_{A_i} / \sum_{i=1}^N I(\chi_{A_i}) \quad (8)$$

となる。したがって試料面の複素振幅反射率比における $\tan \psi$ と Δ はそれぞれ (6) 式から

$$\tan \psi = \sqrt{(1 - S_1) / (1 + S_1)} \quad (9)$$

$$\tan \Delta = \sqrt{1 - S_1^2 - S_2^2} / S_2 \quad (10)$$

として求まる。

3. 装置

装置の概略を図 3 に示す。光学系はコリメーター、フィルター、偏光子、試料台、検光子、拡散レンズ系、検出器から成っている。コリメーターでは、白色光源 (ハロゲンランプ, 24 V, 150 W)

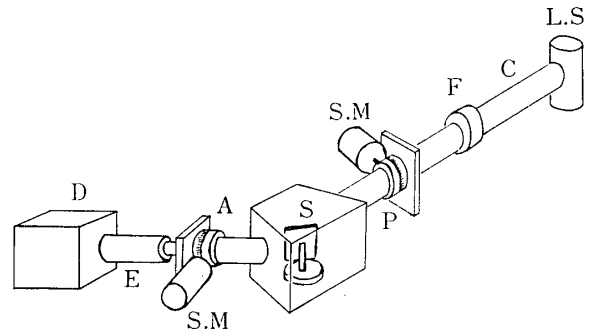


図 3 装置の概略

L.S: 光源 (ハロゲンランプ, 24 V, 150 W),
C: コリメーター, F: フィルター, P: 偏光子
S.M: ステッピングモーター, S: 試料台,
A: 検光子, E: 拡散レンズ系, D: 検出器

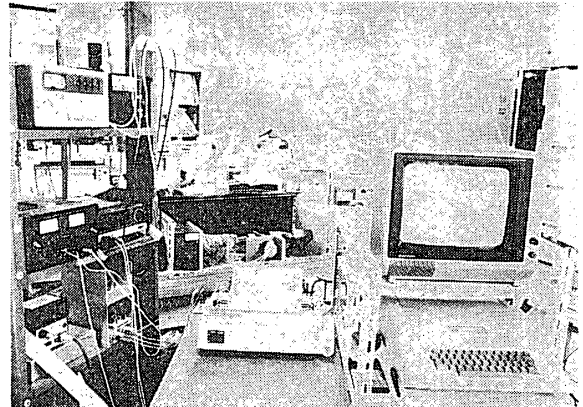


写真 1 装置全景

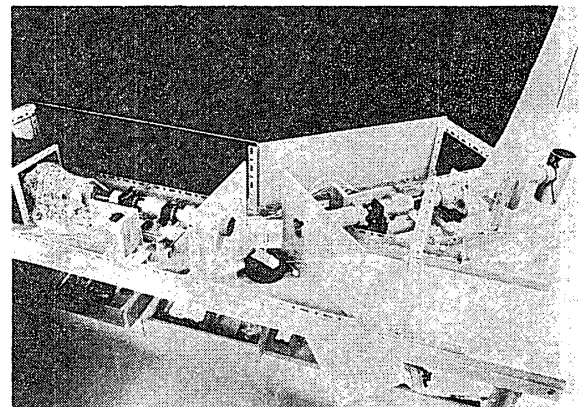


写真 2 偏光解析装置

からの光をコンデンサーレンズによってピンホール ($0.5\text{ mm}\phi$) 上に集光させ、ピンホールから出た光をコリメーターレンズ (アクロマティックレンズ, $f=250\text{ mm}$) によって平行光束にしている。フィルターは中心波長 6328 \AA ($\pm 100\text{ \AA}$) の干渉フィルターで交換可能である。偏光子と検光子には消光率 10^{-5} のグラン・トムソンプリズムを用いた。これらを全周型回転ホルダー ($40\text{ mm}\phi$) に組み込み、回転ホルダーのウォームギアを1パルス 1.8° のステッピングモーターで回転させている。また、ステッピングモーターの制御はマイクロコンピューターからパルスを出力して行っている。回転ホルダーはステッピングモーターを68回転させるとほぼ1回転する。そこで偏光子と検光子の1パルス当りの回転角はおよそ 0.026° となるが、ウォームギアのバックラッシュのため $\pm 0.06^\circ$ の誤差がある。

検光子のあとにはビームスプリッターがあり、試料面からの反射光がうまく検出器側に入射しているかどうか光学系の側面から見るようにになっている。しかし、測定中はビームスプリッターの偏光特性による透過強度の変化が生じるので、レバーによってビームスプリッターを光路からずらしておく。

拡散レンズ系の前にシャッターがあり、不用なとき、光が光電子増倍管に入射しないようにしてある。拡散レンズ系は非偏光で広い光束の光を光電子増倍管に入射させるためのレンズ系である。光電面の偏光特性と場所による感度のゆらぎを避

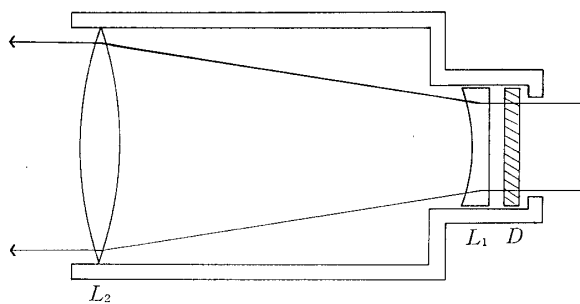


図4 拡散レンズ系

D: スリガラス, L_1 : 凹レンズ, L_2 : 凸レンズ

けるためには、光電子増倍管に入射させる光は非偏光で、しかも光電面に比べて広い光束であることが好ましい。拡散レンズ系の構造については図4に示してある。

検出器には光電子増倍管 (R 376 HTV) を用い、測定値のダークカレントによる影響を避けるために、冷却器によって -20°C まで冷却している。ダークカレントの測定値に及ぼす影響は光電子増倍管を冷却することによって 0.1% 以下に減少する。

光電子増倍管からの出力電流は $1\text{ M}\Omega$ の抵抗を通して電圧に変換し、それをフルスケール 2.4000 V の電圧計で測定している。電圧の測定は測定値の有効桁数と光電子増倍管の定格電流 (0.01 mA) とのかねあいのため、 1 V 付近で行なう。そのため、コリメーターと偏光子の間にもう1つ偏光子を置いて試料面に入射する光の明るさを調整している。

電圧計にはBCD出力があり、測定された電圧はマイクロコンピューターに直接入力される。出力電圧の測定は検光子が $2\pi/34$ (約 10.6°) 回転するごとに行なうが、検光子が1回転するまでの時間は測定時間も含めて約1.5分である。これは現在、ステッピングモーターの回転速度が律速となっている。

測定系のブロック・ダイアグラムを図5に示す。マイクロコンピューターからステッピングモーターの駆動回路にパルスを出し検光子を $2\pi/34$ だけ回転させる。そして検光子からの透過強度を電圧計によって測定し、その値をマイクロコンピューターに取り込む。これを検光子が1回転

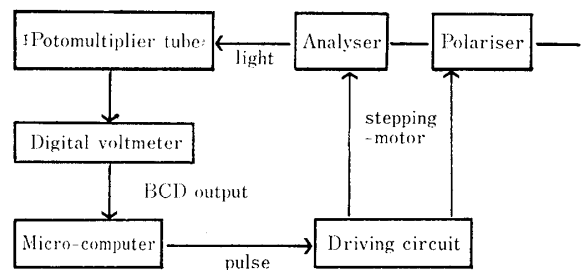


図5 測定のプロックダイアグラム

するまでくり返し、検光子の方位角とそのときの出力電圧から反射楕円偏光のストークスパラメータを求める。

そしてこれらの値から試料表面の複素振幅反射率が求まる。試料表面の光学定数は測定された複素振幅反射率比の値から求められるが、マイクロコンピュータでは複素数の計算ができないので大型計算機で解析を行なう¹²⁾。しかし、試料が透明下地上の透明膜の場合は川畑等¹³⁾の解析法によってマイクロコンピュータでも解析を行なうことができる。

3.1 光電特性

光電測光型偏光解析法では、光源強度の安定度と光電子増倍管の入射強度に対する出力電圧の直線性が精度を決める重要な要因となる。

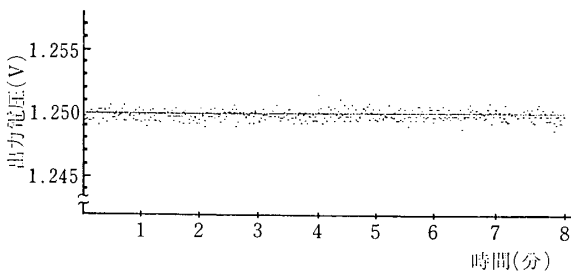


図 6 光源強度の安定度

図 6 に光源強度の安定度を示す。光源には 24 V, 150 W のハロゲンランプを用い、これを安定度 0.005% の直流安定化電源で点灯した。サンプリングタイムは約 1" で 8 分間測定した。この時間内に偏光解析法の測定を行なうには十分な時間である。グラフからわかるように光源の強度変動は 1.25 V の出力電圧に対して ±0.0015 V である。これは安定化電源の変動率から予想される変動に比べて 1 桁ほど大きい。そこでこの変動は光電子増倍管のゆらぎに起因するものと考えられる。

次に、光電子増倍管 (R 376, HTV) の入射強度に対する光電変換係数の変化を図 7 に示す。コリメーター、偏光子、検光子、検出器を一直線上に配置し、偏光子と検光子の透過軸のなす角を θ とすると検光子を透過して検出器に入射する光の

強度 $I_{(\theta)}$ は

$$I_{(\theta)} = I_0 \cos^2 \theta$$

となる。ここで I_0 は偏光子と検光子の透過軸が平行なとき ($\theta=0$) の透過強度である。また、検出器の光電変換係数を K とすると、出力電圧 $V_{(\theta)}$ は

$$V_{(\theta)} = KI_0 \cdot \cos^2 \theta$$

となる。そこで、検光子の方位角 θ を変えて出力電圧を測定することによって検出器の入射強度に対する出力電圧の直線性を調べることができる。

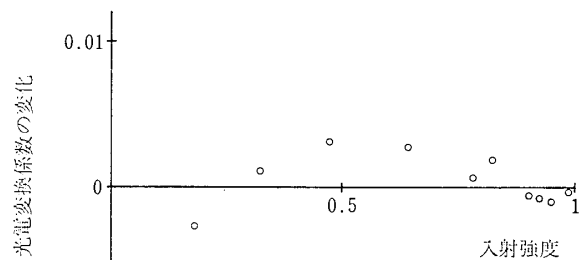


図 7 光電子増倍管 (R 376, HTV) の入射強度に対する光電変換係数の変化

横軸は入射強度を表わし、その最大入射強度を 1 としてある。最大入射強度での光電変換係数を K_0 、またいろいろな入射強度に対する光電変換係数を K とし、縦軸には $(K-K_0)/K_0$ が示されている。

すなわち、横軸に検光子の方位角 θ の $\cos^2 \theta$ をとり縦軸に出力電圧をとると検出器が理想的 (K が一定) であればそれは光源強度の安定度の範囲内で直線となる。

ここではグラフを見やすくするために、縦軸には $\theta=0$ における光電変換係数 K_0 に対する相対光電変換係数 $(K-K_0)$ の比 $(K-K_0)/K_0$ が示されている。また、横軸は $\theta=0$ における入射強度 I_0 を 1 とする規格化された入射強度を表わす。グラフからわかるように、光電子増倍管の入射強度に対する出力電圧の直線性には光源強度の変動 (0.1% 程度) を含めて 0.3% 程度の変動があることがわかる。

究極的にこれらの値が光電測光型偏光解析装置

の精度を決めることになる。しかし、回転検光子型偏光解析法では円偏光に近い楕円偏光を測定することが多いので、測定における実際の強度変化はグラフに示された変化に比べてはるかに少ない(グラフで横軸が1付近)。そのため、測定における検出器の直線性はグラフの右端の値からわかるようにその変動が0.1%以下と考えられる。

3.2 機械的特性

回転検光子型偏光解析法で出力信号に対してFourier変換を行なう場合、回転検光子の方位角の精度が問題となる。試料表面の複素振幅反射率比を3桁以上の精度で求めるためには、回転検光子の方位角の精度は 0.1° 以下でなければならない。

偏光子や検光子などの光学素子は全周型回転ホルダーに取り付けてあり、回転つまみを回すとウォームギアによって回転ホルダーが回転する。ここでは、その回転つまみの軸とステッピングモーターの回転軸とを直接連結し、1パルスあたりおよそ 0.03° の角度で回転ホルダーを回転させている。回転ホルダーには2度きざみに目盛りが切っているが、 0.5° 以下の回転角を読みとることは困難である。そこで、ステッピングモーターの駆動パルス数から光学素子の回転角を求めた。回転ホルダーの目盛りを見てそれがちょうど一回転するまでステッピングモーターを回転させると、そのときのパルス数はおよそ13600であった。しかしながら、この方法では目盛りが完全に一致しているかどうか正確にはわからない。そこで回転ホルダーが1回転するのに必要なパルス数をより厳密に求めるのに以下のような方法を用いた。

直線偏光を回転検光子型偏光解析法で測定すると、回転検光子の初期方位角が直線偏光の方位角に対して平行か垂直な場合、測定されるみかけのストークスパラメーター S_1 、 S_2 のうち S_2 の値は0となる。しかも、その前後の初期方位角では S_2 の符号は異なる。そこでコリメーター、偏光子、検光子、検出器を一直線上に配置して検光子

の初期方位角を変えながら同一直線偏光を測定すると、検光子の初期方位角が直線偏光の方位角に対して、垂直あるいは平行となる近傍では、 S_2 の変化は図8のようになる。横軸には検光子の初期方位角がパルス数でとってあり、縦軸は S_2 の値である。グラフで測定値を結ぶ直線が横軸($S_2=0$)と交わる位置が直線偏光に対して検光子の透

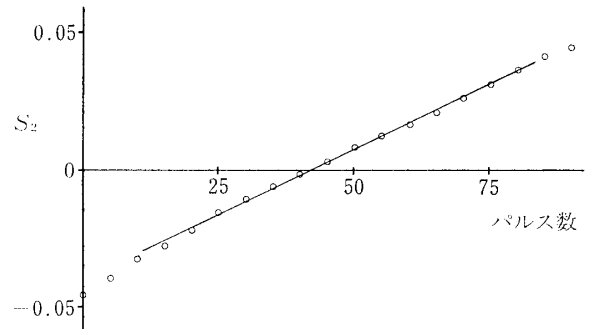


図8 直線偏光の方位角の測定

横軸には検光子の初期方位角がパルス数で示してあり、その測定間隔は5パルス(およそ 0.13°)である。

過軸が垂直または平行となる位置である。これを直線偏光に対して検光子が1回転するまで行なうと、 S_2 が0となる検光子の初期方位角の位置が 90° おきに4ヶ所ある。これらの位置のパルス数を測定すれば、回転ホルダーの 90° 回転に対するパルス数が求まる。その測定の結果を表1に示す。表1より、回転ホルダーが 90° 回転するのに要するパルス数は 3400 ± 2 である。これはさきに求めた1回転のパルス数13600と一致している。しかし、回転ホルダーの 90° 回転に対する角度誤差は約 $\pm 0.06^\circ$ となるので、回転ホルダーを常に一定方向に回転させ続けると、光学素子の方位角に累積誤差を生じる恐れが

表1 光学素子を 90° 回転させるのに必要なステッピングモーターのパルス数

	Pulses
1	3398
2	3402
3	3402
4	3398

ある。そこで測定は検光子を左右交互に1回転ずつ回転させて行ない、測定後、検光子が常に元の方位角に戻るようにした。このようにすれば、測定を何度くり返しても検光子の初期方位角に累積誤差は生じない。

4. 新しい測定法

偏光解析法では測定の前に試料表面に対する p または s 方向を決定し、それを光学素子の方位角の基準とするが、その手順は繁雑で測定以上の手間と時間を要する¹⁴⁾。

従来、基準方位の決定は偏光解析法において測定を始める前の不可欠な手順であったが、ここでは回転検光子型偏光解析法においてこれらの手順を不用とする新しい測定法について述べる。それは

- I) 回転検光子型偏光解析法によって測定される楕円偏光の偏光状態(方位角と楕円率)は、検光子の初期方位角が χ_A のとき、ポアンカレ球上でその方位角の基準を $2\chi_A$ だけ回転させた座標系での偏光状態を表わす。
- II) 方位角の異なる直線偏光が等方的な同一試料表面で反射されると、それらの偏光状態はポアンカレ球上で p, s 方向を通る同じ大円上にある。

ことに着目した方法¹⁵⁾で、その詳しい内容はここでは省略する。以下に新しい測定法の手順を述べる。

- 1) 偏光子の方位角を 0 から 90° の間の適当な位置(金属表面の測定の場合は 45° 付近が好ましい)にセットする。
- 2) 検光子の方位角を -45° から +45° の間の適当な位置にセットする。

以上の手順は光学素子の透過軸がわかっているならば簡単に行なえるし、その方位角はここでは厳密に決定する必要はない。

- 3) 回転検光子型偏光解析法の測定により、反射楕円偏光のストークスパラメーター S_1, S_2 を求める。

- 4) 偏光子を 90° 回転させる。

- 5) 3) と同様の測定を行ないストークスパラメーター S_1', S_2' を求める。

以上の手順により得られた反射楕円偏光のみかけのストークスパラメーター S_1, S_2 と S_1', S_2' から光学素子の初期方位角と試料表面の複素振幅反射率比における $\tan \psi$ と Δ が次の式によって求まる。

偏光子と検光子の初期方位角をそれぞれ χ_P, χ_A とすると

$$\tan^2 \chi_P = \sqrt{(1-S_1)(1+S_1')/(1+S_1)(1-S_1')} \quad (13)$$

$$\tan 2\chi_A = -(S_2 \cdot S_3' - S_3 \cdot S_2') / (S_1 \cdot S_3' - S_3 \cdot S_1') \quad (14)$$

である。ここで

$$S_3 = \pm \sqrt{1-S_1^2-S_2^2} \quad (15)$$

$$S_3' = \mp \sqrt{1-S_1'^2-S_2'^2} \quad (16)$$

である。また、試料表面の複素振幅反射率比における $\tan \psi$ と Δ は

$$\tan^2 \psi = \sqrt{(1-S_1)(1-S_1')/(1+S_1)(1+S_1')} \quad (17)$$

$$\tan \Delta = \sqrt{1-S_1^2-S_2^2}/S_2 \quad (18)$$

となる。

5. 実験

ここでは新しい測定法によって、光学素子(偏光子と検光子)の方位角と試料表面の複素振幅反射率比とが同時に求まり、しかも光学素子の方位角によらず得られる試料表面の複素振幅反射率比の $\tan \psi$ と Δ が一定していることを実験によって確かめた。試料にはガラスに金を蒸着したものをを用いた。入射角は約 67° で波長は 6328Å である。

まず偏光子をほぼ 45° にセットして、1回目の測定(偏光子の 90° 回転を含む)を行ない、次に偏光子を p 方向に 60 パルス(約 1.59°) 検光子を s 方向に 1700 パルス(約 44.96°) 回転させ 2 回目の測定を行なった。それらの結果を表 2 に示

表 2 新しい測定法による金属蒸着膜の測定
試料はガラスに金を蒸着したものを用い、入射角は約 67° 、波長は 6328 \AA である。カッコ内は計算による偏光子と検光子の方位角を表わす。

	Azimuth of the optical components (degree)		Ellipsometric parameters	
	Polariser	Analyser	$\tan \psi$	Δ (degree)
First	44.25	69.41	0.8362	71.51
Second	45.80 (45.84)	24.40 (24.45)	0.8354	71.53

す。表 2 からわかるように、2 回目の測定における偏光子と検光子の方位角は回転ホルダーの回転誤差 $\pm 0.06^\circ$ 以内で計算による値と一致しており、試料表面の複素振幅反射率比の $\tan \psi$ と Δ も偏光子と検光子の方位角によらず 0.1° 以下の精度で求まることがわかる。

また、この方法は新しい光学素子の調整法としても利用できる。その手順は測定によって光学素子の初期方位角を求め、次に光学素子をその初期方位角だけ基準方向へ回転させればよい。

ここでは検光子の方位角調整を行なった。調整する前の検光子の方位角と調整後の方位角を表 3 に示す。

表 3 光学素子の調整前の方位角の方位角と調整後の方位角
調整は検光子についてのみ行なった。

	Before alignment	After alignment
Polariser	44.80°	44.75°
Analyser	-13.49°	0.01°

偏光子の方位角は変わっていないが、検光子の方位角は測定誤差以内で 0 になっていることがわかる。

6. 結 論

試作装置に関する予備実験から、光源強度の安定度および光電子増倍管の入射強度に対する出力電圧の直線性はともに 0.1% 程度であることが

わかった。これは試料表面の複素振幅反射率比 $\tan \psi e^{i\Delta}$ の変化を $\delta\psi=0.1^\circ$ 、 $\delta\Delta=0.1^\circ$ の精度で決定できることを意味する。これはまた、金属薄膜の膜厚測定において 1 \AA 以下の膜厚変化に相当する。

次にここで述べた新しい測定法はこれまで手間と時間をかけて行なっていた光学素子の基準方位への調整を必要としないので、回転検光子型偏光解析法による測定をたいへん容易なものにする。

また、この方法は新しい光学素子の調整法としても利用できる。

この方法は、偏光子の方位角を少しずつ変えながら反射光が直線偏光となる偏光子の方位角を探す従来の方法に比べてかかる手間と時間がはるかに少なくすむ。この装置で 2 つの方法を比較した結果、光学素子の調整に必要な時間は従来の方法で約 50 分かかったのに対して、新しい方法によると調整後の方位角の確認も含めて 10 分足らずで完了した。

試作した装置はまだブロックで組んである状態なのでその操作には技術を要する。しかも各部が一体化されていないため、コリメーター側と検出器側の光軸のずれとか入射角の誤差などがあり、装置の調整をくり返すたびに測定値の変動がみられることがある。そのため現在は装置の取り扱いを容易にし、測定値の信頼性を向上すべく改良中である。

7. 謝 辞

マイクロコンピューターおよびステッピングモーターの駆動回路についていろいろと御指導いただいた本大学の植村助教授に感謝致します。また、装置の製作にあたりお世話になった本大学電子工学科助手の山口氏、ならびに株式会社オペレックスの篠田氏に感謝致します。

最後に、英文原稿について有益な助言をしていただいた本大学の市村教授に感謝致します。

参考文献

- 1) 木下是雄, 日本化学会編, 新実験化学講座第 18 卷, 界面とコロイド (丸善 1977) p. 157.
- 2) F. L. McCrackin, E. Passaglia, R. R. Stromberg and H. L. Steinberg, *J. Res. Nat. Bur. Stand.* **67 A** (1962) 363.
- 3) C. E. Leberknight and B. Lustman, *J. Opt. Soc. Am.* **29** (1939) 59.
- 4) H. Yokota, H. Sakata, M. Nishibori and K. Kinoshita, *Surface Sci.* **16** (1969) 265.
- 5) K. Kinoshita, M. Nishibori, M. Yamamoto and H. Yokota, *Optica Acta* **17** (1970) 115.
- 6) S. Kawabata and K. Ichiji, *Surface Sci.* **56** (1976) 316.
- 7) L. Ord and B. L. Wills, *Appl. Opt.* **6** (1967) 1673.
- 8) D. E. Aspnes, *Opt. Commun.* **8** (1973) 222.
- 9) P. S. Hauge and F. H. Dill, *IBM J. Res. Dev.* **17** (1973) 472.
- 10) S. N. Jasperson and S. E. Schnatterly, *Rev. Sci. Instr.* **40** (1969) 761.
- 11) S. N. Jasperson, D. K. Burge and R. C. O'Handley, *Surface Sci.* **37** (1973) 548.
- 12) F. L. McCrackin, A Fortran Program for Analysis of Ellipsometer Measurements (Nat. Bur. Stand. Tech. Note 479, 1969).
- 13) S. Kawabata, M. Yamamoto and K. Kinoshita, Proc. ICO conf. Opt. Methods in Sci. and Ind. Meas., Tokyo, 1974, Japan. *J. Appl. Phys.* **14** (1975) Suppl. 14-1, 407.
- 14) D. E. Aspnes and A. A. Studna, *Appl. Opt.* **14** (1975) 220.
- 15) 投稿予定