

最近の技術から

回転素子型エリプソメーターとその調整

1. エリプソメトリー (偏光解析法)

エリプソメトリーは、物質表面で光が反射するときの偏光状態の変化を測定して表面の光学的性質を精密に調べる手法である。近年、とくに半導体表面や、それに付着している薄膜を精密にコントロールする必要性から注目をあびてきている。他の表面分析技術とちがって、真空試料室を必要とせず、多くの場合は可視光を用いるので試料に影響を与えない非破壊検査法であることが大きな特徴である。感度はすこぶる高く、単分子層以下の厚さのガス吸着¹⁾や、蒸着膜²⁾に対しても十分な感度をもっている。この高感度を最大限に利用するためには、エリプソメーター (偏光解析装置) を正しく調整することが重要である。以下に、最近よく用いられている回転素子型エリプソメーターの利害得失と、その調整法について述べる。

2. 回転検光子型と回転移相子*1型

Aspnes らによって、分光偏光解析法 (spectroscopic ellipsometry)³⁾ に用いられた回転検光子型の装置 (RAE) は、古くからある測定法に近年の電子技術を応用したもので、簡単な原理にもとづいて自動分光測定ができることが大きな利点である (Fig. 1(a)). しかしこの方法は、反射偏光が直線偏光に近いときは原理的に感度が悪く、また、楕円偏光が右回りであるか左回りであるかの情報 (後述の S_3 の符号) が失われるという欠点をもっている。この点を改良すると、回転移相子型の装置 (RCE) となる。Fig. 1(a) に点線で示されているように、回転素子として検光子のかわりに移相子が付加されるので、RAE の単純さが失われること、分光測定には無色の 1/4 波長プリズム⁴⁾*2 が必要であることが欠点である。しかし、偏光状態に関するすべての情報が得られるし、偏光度の測定もできるので、偏光状態の大きく変化する試料⁵⁾や、

異方性をもつ試料⁵⁾などの複雑な系の解析に適している。いずれの方法も、測定の正確度に関しては、正しく調整されていても旧来のクロスニコルの状態を利用する消光法には及ばないが、精密度に関しては消光法と同程度の値が得られる。つまり、試料面の光学的性質の変化が重要である場合や、分光特性が重要である場合には偉力を発揮する方法である。

2.1 規準化ストークスパラメータ

RAE も RCE も、反射光を定速で回転する素子に通し、偏光状態を交流信号に変換して検出する。入射光は原理的には完全偏光であればどのような偏光状態でもよいが、普通はグラントムソン偏光子を使って方位角 $\theta_P = 45^\circ$ の直線偏光を入射する。このときは、反射光の偏光状態は試料の p 成分の振幅反射率 R_p と s 成分の振幅反射率 R_s の比

$$\rho = R_p/R_s = \tan \Psi \cdot \exp(i\Delta) \quad (1)$$

で表わすことができる。反射面の光学的性質を反映しているこの (Δ, Ψ) がエリプソメーターで測定すべき変数となる。回転素子型の装置では、反射楕円偏光のストークスパラメータを偏光の強度で割った規準化ストークスパラメータ $(1, S_1, S_2, S_3)$ が交流信号の振幅係数として直接測定される。 $\theta_P = 45^\circ$ では、両者の間に

$$\begin{aligned} S_1 &= -\cos 2\Psi \\ S_2 &= \sin 2\Psi \cdot \cos \Delta \\ S_3 &= -\sin 2\Psi \cdot \sin \Delta \end{aligned} \quad (2)$$

が成り立つ。また、完全偏光を扱うので次式が使える。

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = 1 \quad (3)$$

2.2 測定原理

Fig. 1(b) のような光学系で、偏光子 P と同様に、移相子 C の進相軸および検光子 A の振動面の方位をそれぞれ θ_C, θ_A と書く。各素子の方位角は、基準を入射面方向 (p 方向) として、光の進行方向から光源を見て左回りを正とする。RAE では A が回転される。C は反射偏光の楕円率が小さい場合に必要となる。RCE では、C が回転され、A は固定される。 θ_A は 90° とする*3。A を透過した光の強度 I は、P に入射する光の強度を I_0 として、

*1 回転補償子 (rotating compensator) とも呼ばれるが、使われる素子は正しくは移相子 (phase shifter) であるから回転移相子と呼ぶことにする。

*2 最近、市販品が手に入るようになった。

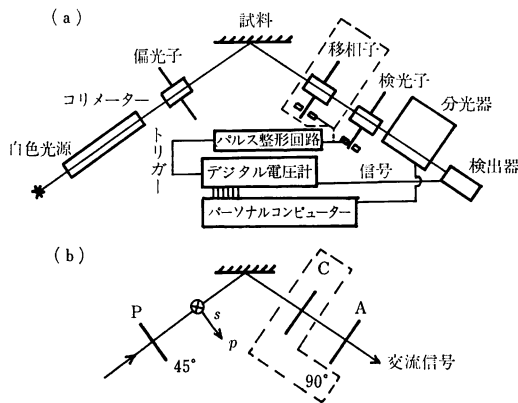


Fig. 1 回転素子型エリプソメーター(a). 点線内は回転移相子型の場合を示す. 分光器は光源側でもよい. 光学系(b). P, C, Aはそれぞれ偏光子, 移相子, 検光子を示す. s 方向は紙面から下向き. 点線内は回転移相子型の場合を示す.

RAE では

$$I = (I_0/8)(|R_p|^2 + |R_s|^2)(1 + S_1 \cdot \cos 2\theta_A + S_2 \cdot \sin 2\theta_A) \quad (4)$$

RCE では, 移相子の移相角 $\delta c = 90^\circ$ ($1/4$ 波長) として,

$$I = (I_0/16)(|R_p|^2 + |R_s|^2)(2 - S_1 + 2S_3 \cdot \sin 2\theta_c - S_1 \cdot \cos 4\theta_c - S_2 \cdot \sin 4\theta_c) \quad (5)$$

となる. RCE では $4\theta_c$ の項が信号に加わる. 回転素子が一定角回転するごとに検出器出力をデジタルサンプリングし, 数回転分のデータを用いたフーリエ変換処理によって各フーリエ係数となるストークスパラメータを求めるのが回転素子型の原理である^{3,6)}. RAE では S_3 は(3)式から求める.

現在最も普及しているのは RAE で, パーソナルコンピュータを組み合わせて信号処理をするほか, 簡単な系に対しては, 内蔵のプログラムによって光学定数を求めて表示することができる. このような, 装置が完全に自動化されて, 大勢の人が使用するようになると, 常に装置を正しく調整しておく必要が出てくる. また調整済の装置で得られる測定値の正確度も確かめる必要がある.

3. 調 整

通常の, 分光器としての光軸調整のあと, 消光状態を肉眼で観察し, 余分な散乱光や迷光源を取り除く. この

ほか回転素子の傾きを十分調整し, 光束の振れを最小にする.

3.1 p 方向

各素子の方位角を正しく読むには, まず目盛板の偏心を調整する. Cを取り去り, PとAを一直線上に配置しいろいろな方位で消光位置を求めて $\theta_P - \theta_A$ が読取り誤差範囲内で一定になればよい. つぎに p 方向を正確に決めるには, 表面の反射だけを取り出せるように, くさびに研磨したガラスを試料とする. 偏光角近傍では, $\theta_P \sim 0^\circ$ で反射光の強度が極小となる. 90° 回転してほぼ s 偏光入射とすると反射光は, より完全な s 偏光となる⁴⁾. これをAで消光してAの p 方向の読みが求まる. 次にAを 90° 回転して, Pで消光すると, Pの p 方向が決まる.

3.2 進相軸

$\theta_P = 90^\circ$, $\theta_A = 0^\circ$ でCを光路に入れて回転させると進相軸が p または s 方向に一致したときに消光する. p か s かを知るには, 金属面での反射では $0 < \Delta < 180^\circ$ である⁷⁾ ことを利用する. $\theta_c = 45^\circ$ でPとAを交互に調節して $0 < \theta_P < 90^\circ$ の範囲で消光位置を求める. このとき反射偏光は左回りであり, $|\theta_A| < 45^\circ$ であれば θ_c は正しく $45^\circ < |\theta_A| < 90^\circ$ であれば 90° ちがっている.

3.3 位相誤差

回転素子の位相信号の基準も同様にして p 方向に合わせることができるが, 出力信号の位相は, 検出系の電気的位相遅れの分だけ p 方向からずれてしまい, 位相誤差を生じる. 素子は定速回転しているので信号周波数は決まっており, 前述の s 偏光反射の条件で S_2 または Ψ がゼロとなるようにトリガーのタイミングを調整すれば誤差を最小にできる. ρ またはストークスパラメータを求めるプログラムの中の位相角の項に, 初期位相を加えて処理してもよい.

3.4 振幅誤差

強度信号の振幅誤差は, RAE では検出系の非直線性や偏光特性によるものと, 迷光によるものが考えられる. RCE ではAは固定されているから偏光特性は無視できるが, δc の誤差によるものが加わる, これらも s 偏光反射の条件で, S_3 または $\sin \Delta$ がゼロになるかを見て判定できる. 許容範囲内でゼロにならない場合は, 検出された信号を図示し, これをフーリエ変換して得られたストークスパラメータから計算される理論曲線を重ねて書いてみる. 素子の1回転分(2周期分)をプロットす

³⁾ 0° (p 方向) では(5)式のストークスパラメータを含む項の符号が逆転する. 現実の試料では $|R_s|^2 > |R_p|^2$ であり $S_1 < 0$ だから光量レベルを確保するには s 方向が有利である.

⁴⁾ よく研磨した溶融石英では, 偏光角で $\tan \Psi \leq 0.0003$ となりグラントムソン偏光子と組み合わせると最も完全な直線偏光を造る方法となる.

ると、光軸調整が悪かったり、回転に同期した迷光がある場合は、 180° ずれたピークの高さが一致しない。また、迷光の非偏光成分は、極小値を鈍らせるし、検出器の非直線性は極大を強調することが多い。さらに偏光特性や光電面上の量子効率のむらは信号を非対称にする。これらの誤差の原因を実験的につきとめ、ていねいに調整してゆけば、 s 偏光に対するストークスパラメータ $(1, -1, 0, 0)$ が正しく得られるようになる。RCE の δ_c は、 θ_A をかえた測定によって決める。

以上の調整によって、ストークスパラメータはふつう $1 \sim 0.1\%$ の正確度とすることが可能であるが、回転素子法の大きな利点が、簡単にだれでも分光測定ができる点であることを考えると、 1% が現実的な目安になる。精密度は、数回転分を平均する等の操作で $0.1 \sim 0.01\%$ が得られる。

4. ステッピングモーター方式

現在市販されている装置はすべて定速で回転する素子を使ったものだが、ステッピングモーターのシャフトを中空として、一端に回転素子を取り付け、パーソナルコ

ンピュータで回転角をコントロールする方式も可能である。この方法では、サンプリング時間が長くとれるのでほぼ DC 測定となり、電気系の位相遅れを無視できること、比較的安価に装置を構成できること、ステップ角度をプログラムコントロールできること等の特徴を持っている。筆者らは、この方式で正確度 1% を得ることができた。現在ステップ精度がまだ不十分だが、 1 分程度になれば今後有力な方法であろう⁸⁾。

文 献

- 1) F. H. P. M. Habraken, O. L. J. Gijzeman and G. A. Bootsma: Surf. Sci., **96** (1980) 482.
- 2) K. Kinoshita, M. Yamamoto and S. Hirasawa: Thin Solid Films, **90** (1982) 19.
- 3) D. E. Aspnes: *Optical Properties of Solids*, ed. B. O. Seraphin (North-Holland, Amsterdam, 1975) p. 799.
- 4) R. J. King: J. Sci. Instrum., **43** (1966) 617.
- 5) P. S. Hauge: Surf. Sci., **56** (1976) 148.
- 6) 川畑州一, 平沢伸一, 友広良泰, 山本正樹, 木下是雄: 応用物理, **50** (1981) 929.
- 7) W. Swindell: J. Opt. Soc. Am., **61** (1971) 212.
- 8) 川畑州一, 猪瀬博昭: 東京工芸大学紀要, **4** (1981) 9.

(東北大科研 山本正樹, 1983年3月15日受理)