

### 1.3 偏光解析法（エリプソメトリー）

#### 1.3.1 偏光<sup>(2)</sup>

光は電磁波であり、その電界ベクトルは光の進行方向に対し垂直に振動している。光はその電界ベクトルの振動がランダムな無偏光と、規則的な偏光とに区別される。偏光では、その電界ベクトルの先端の軌跡が、光の進行方向に垂直な平面内で直線、円、楕円を描いており、このような光はそれぞれ直線偏光、円偏光、及び楕円偏光と呼ばれている。さらに円偏光と楕円偏光の場合には電界ベクトルの先端の動きが光線を覗き込む方向から見て、左回りの場合と右回りの場合がある。図 1.2 に偏光の種類を示す。これらの光の偏光状態は進行方向に垂直な平面内で直行する二つの直線偏光の重ね合わせとして考えることもできる。

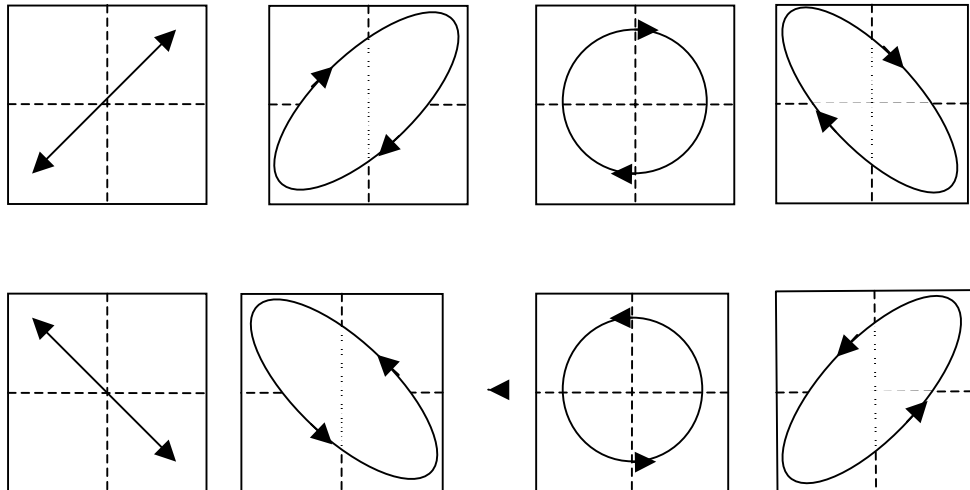


図 1.2 偏光の種類

#### 1.3.2 エリプソメトリーの原理<sup>(3)</sup>

電場が入射面に対し平行に振動する直線偏光を p 偏光、電場が入射面に対し垂直に振動する直線偏光を s 偏光と呼ぶ。p、s 偏光を試料に入射させたとき p、s 偏光の振幅反射係数はそれぞれ異なる。そのため、試料での光反射により p、s 偏光のそれぞれの振幅及び位相は大きく変化する。エリプソメトリーでは、反射 p、s 偏光の位相差及び振幅比を角度で表した  $\rho$  と  $\Delta$  の二つの値を決定する。エリプソメトリーで決定されると  $\rho$  は p、s 偏光の振幅反射係数の比として次式で表される。

$$\rho = \tan \psi \exp(i\Delta) = \frac{r_p}{r_s} \quad (1.1)$$

エリブソメトリーから得られる  $\theta$  と  $\alpha$  の二つの測定値から、試料の複素屈折率を決定することができる。

### 1.3.3 測定データ解析の原理<sup>(3)</sup>

測定された決定された  $(\theta, \alpha)$  から試料の複素屈折率や膜厚などを解析的に求めることはできない。しかし複素屈折率と膜厚から  $(\theta, \alpha)$  は求めることはできる。そこで適当な光学モデルを仮定し複素屈折率と膜厚に対する試料表面の  $(\theta, \alpha)$  を計算により求め、測定により決定された  $(\theta, \alpha)$  を比較することで、複素屈折率及び膜厚を決定する。

基板上に形成された薄膜に関する光学モデルの一例(媒質/薄膜/基板)を図 1.4 に示す。

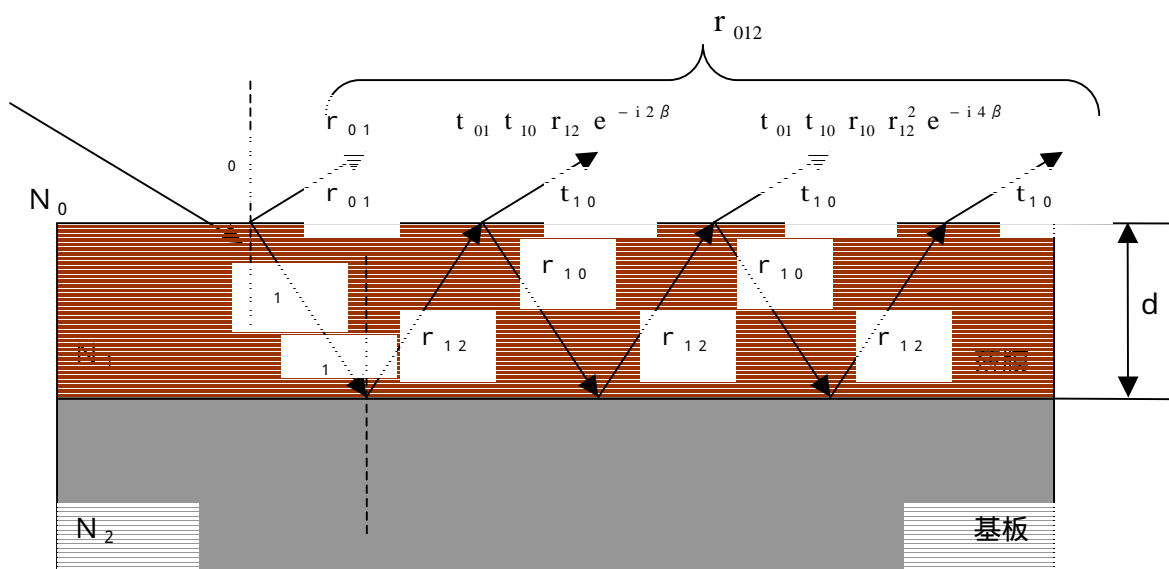


図 1.4 光学モデル

図 1.4 では、媒質、薄膜及び基板の複素屈折率を、それぞれ  $N_0$ 、 $N_1$  及び  $N_2$  としている。 $r_{jk}$  ( $t_{jk}$ ) はそれぞれの界面における振幅反射 (透過) 係数を示している。

入射光は薄膜表面及び薄膜/基板界面での多重反射によって光学干渉を起こす。最初に薄膜表面で反射された光 (1 次光) の振幅反射係数は  $r_{01}$  である。一方、薄膜/基板界面で反射された光 (2 次光) の光路長の違いにより生じる位相変化は次式で表される。

$$\alpha = \frac{4\pi d}{\lambda} \sqrt{(N_1^2 - N_0^2 \sin^2 \theta_0)} \quad (1.2)$$

ここで薄膜の厚さを  $d$ 、光の波長を  $\lambda$ 、入射角度を  $\theta_0$  としている。この位相変化は 2 次光が薄膜内を 1 往復した時の変化を示し、通常はこれを表すため、 $m = 2$  とすると次式が得られる。

$$\beta = \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{(N_1^2 - N_0^2 \sin^2 \theta_0)} \quad (1.3)$$

この位相変化は、 $\exp\{i[\delta - (Kx+2d)]\} = \exp[i(\delta - Kx)] \exp(-i2\beta)$  から  $\exp(-i2\beta)$  と表される。そのため、2次光は位相変化及びそれぞれの界面における振幅反射係数を掛け合わせた  $t_{01} t_{10} r_{12} \exp(-i2\beta)$  で示されることになる。媒質/薄膜/基板における振幅反射係数  $r_{012}$  は、高次の反射光を全て足し合わせ、更に(1.3)式を用いると次式で表される。

$$r_{012} = \frac{r_{01} + r_{12} \exp(-i2\beta)}{1 + r_{01} r_{12} \exp(-i2\beta)} \quad (1.4)$$

(1.4)式から、p、s偏光に対する振幅反射係数は

$$r_{012,p} = \frac{r_{01,p} + r_{12,p} \exp(-i2\beta)}{1 + r_{01,p} r_{12,p} \exp(-i2\beta)}, \quad r_{012,s} = \frac{r_{01,s} + r_{12,s} \exp(-i2\beta)}{1 + r_{01,s} r_{12,s} \exp(-i2\beta)} \quad (1.5)$$

となる。(1.1) (1.5)式から  $(\rho, \theta)$  は

$$\rho = \arg(r_{012}), \quad \theta = \tan^{-1}(|r_{012}|) \quad (1.6)$$

で表される。

以上が試料の複素屈折率、または試料表面に付着した薄膜の複素屈折率を求めるための原理である。

## 第2章 装置概要

### 2.3 偏光解析装置 (エリプソメーター)

本実験で使用したエリプソメーターの主な仕様及び構造を示す。以下、本論文では偏光子、1/4波長板、検光子の角度をそれぞれ、P、C、Aと表すことにする。

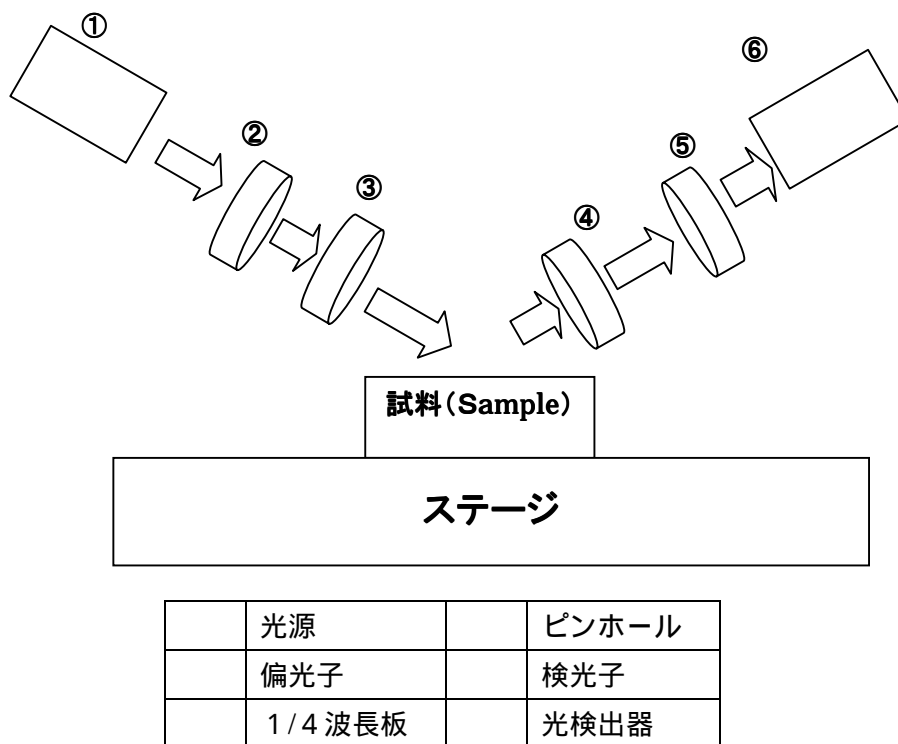


図 2.4 エリプソメーター構成図



図 2.5 エリプソメーター写真

### 2.3.1 回転検光子法の原理<sup>(3)</sup>

偏光解析法には多くの方法があるが、本研究ではその内の回転検光子法という方法を用いた。以下にその原理を示す。

回転検光子法では、偏光子を固定し検光子を回転させ、その光強度依存性から反射光の偏光状態を決定する。

任意の偏光子の角度  $P$  に対する検出光の強度は次式で表される。

$$I = I_0[(1 - \cos 2P \cos 2\psi) + (\cos 2P - \cos 2\psi) \cos 2A + (\sin 2P \sin 2\psi \cos \Delta) \sin 2A] \quad (2.1)$$

本実験では  $P$  の角度を  $45^\circ$  に固定して行う。(2.1)式に  $P = 45^\circ$  を代入すると

$$I = I_0(1 - \cos 2\psi \cos 2A + \sin 2\psi \cos \Delta \sin 2A) \quad (2.2)$$

となる。ここで、 $I_0$  は入射光の光強度に比例する反射光の比例定数である。

検光子を回転させると、 $-\cos 2\psi$  及び  $\sin 2\psi \cos \Delta$  をフーリエ係数として求めることができる。 $-\cos 2\psi$  及び  $\sin 2\psi \cos \Delta$  をそれぞれ  $\alpha$  及び  $\beta$  とすると、 $\alpha$  及び  $\beta$  は次式で表される。

$$\alpha = \frac{\tan^2 \psi}{\tan^2 \psi + 1}, \quad \beta = \frac{2 \tan \psi \cos \Delta}{\tan^2 \psi + 1} \quad (2.3)$$

(2.3)式を(  $\alpha$  ,  $\beta$  )について解くと、次式が得られる。

$$\tan \psi = \sqrt{\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}}, \quad \cos \Delta = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \alpha^2}} \quad (2.4)$$

本実験では検光子を回転させ、得られる反射光強度をフーリエ変換し、上記の方法を用いて(  $\alpha$  ,  $\beta$  )を求める。なお、この方法では右回り円偏光を左回り円偏光と区別することはできない。これは、左回り及び右回り円偏光では偏光子の角度に対する光強度依存性がまったく同じになるためである。

### 引用文献

- (1) 「速解 光サイエンス辞典」 (オプトロニクス株式会社 1998)
- (2) 藤原 裕之、「分光エリプソメトリー」(丸善株式会社 2003)