

偏光解析法における膜厚測定および 有効媒質近似理論

川 畑 州 一

東京工芸大学工学部 ☎ 243-02 神奈川県厚木市飯山 1583

(1997 年 6 月 17 日受理)

Determination of the Film Thickness and the Effective Medium Approximation Theories in Ellipsometry

Shuichi KAWABATA

Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Polytechnoly
1583 Iiyama, Atsugi, Kanagawa 243-02

(Received June 17, 1997)

Ellipsometry is an extremely high sensitive method for the film thickness determination. The complex amplitude reflection ratio of the sample is a basic formula for the analysis of the optical constants. The analytical methods of the complex amplitude reflection ratio are described for the both samples of single layer and multilayers. The calculation method for the simultaneous determination of the refractive index and the thickness of a single transparent film is described. We also describe the analytical method for the single absorbing layer of different film thickness. The algorithm for the calculation of the complex amplitude reflection coefficient of the multilayer samples is shown. The effective medium approximation theories of Maxwell-Garnett and Bruggeman are derived starting from the Clausius-Mosotti formula.

1. は じ め に

固体表面に薄膜が存在する場合、その反射特性は薄膜の膜厚によって大きく異なる。例えば、ガラス表面に光学膜厚（屈折率×膜厚）が $\lambda/4$ となるように、 MgF_2 の薄膜を蒸着すると波長 λ の光に対してガラス表面からの反射は最小となる（反射防止膜）。また、光学膜厚が $\lambda/2$ の場合は逆に、反射増加となる。このように物体表面での反射の様子は薄膜の存在に敏感である。これは、空気-膜界面での反射光と膜-物体界面での反射光との位相差に関係している。光の干渉により測定できる位相差は大雑把に言って、 $\lambda/30$ 程度である。しかし、エリプソメトリーでは $0.1^\circ (= \lambda/3600)$ 以下の位相差を、普通に検出することができ、これを干渉による反射率測定と単純に比較すると、その感度は、およそ 100 倍である。したがって、エリプソメトリーは極めて薄い膜の存在に対して非常に敏感である。エリプソメトリーでは表面に

存在する 1 nm 以下の膜厚の測定も可能である。

エリプソメトリーは極薄膜の膜厚測定法として、表面および界面の研究や半導体産業での開発研究に大いに利用されている。ここでは、エリプソメトリーによる膜厚測定の解析手法と、不連続膜あるいは粗い表面及び界面の解析における有効媒質近似理論について解説する。

2. 多重光束反射干渉

Fig. 1 に示すように、試料表面が連続な薄い単層の膜で覆われている場合、試料に入射する光は、空気-膜界面と、膜-下地界面でそれぞれ反射、屈折をくり返す。そして、これらの光線は互いに干渉し、試料表面からの反射光となる。このように、それぞれの界面で多重に反射をくり返した光線が互いに干渉することを、多重光束反射干渉と言う¹⁾。

試料に入射角 ϕ で、光が入射したときの、空気-膜界面での振幅反射率を r_1 、振幅透過率を t_1 、とし逆方向か

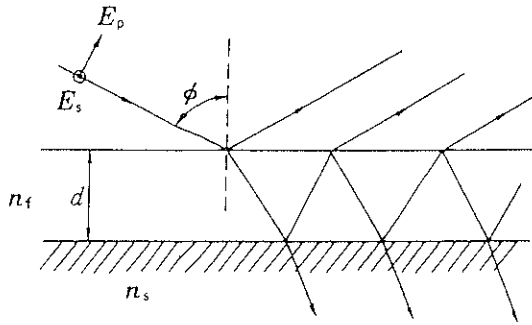


Fig. 1 Multiple beam interference and complex amplitude reflectance.

らの振幅反射率と振幅透過率をそれぞれ、 r_1' 、 t_1' とする。また、膜-下地界面での振幅反射率を r_0 とする。このとき、振幅 1 の入射光に対する試料表面からの反射光 R は、多重光束反射干渉を考慮して、

$$\begin{aligned} R &= r_1 + t_1 \cdot r_0 \cdot t_1' \cdot \exp(-i\delta) \\ &\quad + t_1 \cdot r_0^2 \cdot r_1' \cdot t_1' \cdot \exp(-i2\delta) \\ &\quad + t_1 \cdot r_0^3 \cdot r_1'^2 \cdot t_1' \cdot \exp(-i3\delta) + \cdots \\ &\quad + t_1 \cdot r_0^k \cdot r_1'^{(k-1)} \cdot t_1' \cdot \exp(-ik\delta) + \cdots \\ &= r_1 + t_1 \cdot r_0 \cdot t_1' \cdot \exp(-i\delta) \{1 + r_0 \cdot r_1' \cdot \exp(-i\delta) \\ &\quad + r_0^2 \cdot r_1'^2 \cdot \exp(-i2\delta) \\ &\quad + r_0^3 \cdot r_1'^3 \cdot \exp(-i3\delta) + \cdots\} \\ &= r_1 + t_1 \cdot r_0 \cdot t_1' \cdot \exp(-i\delta) \\ &\quad / \{1 - r_0 \cdot r_1' \cdot \exp(-i\delta)\} \end{aligned} \quad (1)$$

となる。ここで、 δ は光が膜内を一往復することによって生じる位相差で、膜の屈折率を n_f 、膜厚を d 、光の波長を λ 、膜内での屈折角を χ とすると、

$$\delta = 4\pi \cdot n_f \cdot d \cdot \cos \chi / \lambda \quad (2)$$

である。さらに、空気-膜界面での振幅反射率および振幅透過率に関する Stokes の関係式より、

$$r_1 = -r_1', t_1 \cdot t_1' = 1 - r_1^2 \quad (3)$$

である。これらを (1) 式に代入すると、試料面での反射光 R は

$$R = (r_1 + r_0 \cdot \exp(-i\delta)) / (1 + r_0 \cdot r_1 \cdot \exp(-i\delta))$$

となる。これはまた、入射振幅が 1 なので、試料面での振幅反射率を表している。しかも、 R は一般に複素数 ($= |R| \exp(i\Delta)$) となるので、 R を複素振幅反射率と呼び、光がこの試料面で反射する際、振幅の変化 ($|R|$) と同時に位相の跳び (Δ) も生じることを示している。

ここでは、各界面における振幅反射率を、 r_0 および r_1 としたが、光が試料面に斜めに入射するとき、各界面での、振幅反射率および振幅透過率は光の p 、 s 成分で異なる。 p 成分とは光の電場ベクトルが入射面に平行に振動する成分で、 s 成分とは光の電場ベクトルが入射面に

垂直に振動する成分である。したがって、試料面での複素振幅反射率も光の p 成分と s 成分とで異なった値となる。

3. エリプソメトリーによる膜厚の測定

Fig. 1 に示すように、屈折率 n_s の下地上に、屈折率 n_f 、膜厚 d の単層の薄膜が存在するとき、この試料表面での p 、 s 成分における複素振幅反射率 R_p と R_s (簡単のため R_{ps} と書く) は、光の p 、 s 成分に対する、空気-膜界面でのフレネル係数 (振幅反射率) をそれぞれ、 r_{1p} 、 r_{1s} (r_{1p} と r_{1s} 、以下同様)、膜-下地界面での Fresnel 係数をそれぞれ、 r_{0p} 、 r_{0s} とすると、多重光束反射干渉を考慮して、

$$\begin{aligned} R_{ps} &= (r_{1p} \cdot s + r_{0p} \cdot s \cdot \exp(-i\delta)) \\ &\quad / (1 + r_{0p} \cdot s \cdot r_{1p} \cdot \exp(-i\delta)) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

一般に複素振幅反射率 R_p と R_s は異なるため、光がこの試料表面で反射される際には、その p 成分と s 成分とは異なった、振幅変化率と位相の跳びが生じる。したがって、反射の偏光状態を決めるのは、試料面の p 、 s 成分に対する複素振幅反射率比の R_p/R_s である。

簡単のため、方位角 45° の直線偏光 (p 、 s 成分の振幅が等しく、位相差が 0 の光) を試料面に入射させたとすると、反射光の p 、 s 成分の振幅比と位相差 (複素振幅比) は試料表面の複素振幅反射率比 R_p/R_s に等しくなる。

試料表面からの反射光の p 、 s 成分の振幅比を $\tan \Psi$ 、位相差を Δ とおくと、

$$\begin{aligned} \tan \Psi \exp(i\Delta) &= R_p/R_s \\ &= (r_{1p} + r_{0p} \cdot \exp(-i\delta)) / (1 + r_{0p} \cdot r_{1p} \cdot \exp(-i\delta)) / \\ &\quad (r_{1s} + r_{0s} \cdot \exp(-i\delta)) / (1 + r_{0s} \cdot r_{1s} \cdot \exp(-i\delta)) \end{aligned} \quad (5)$$

である。一般に、 $\tan \Psi$ と Δ は複素振幅反射率比 R_p/R_s において、反射における p 、 s 成分の振幅反射率比と反射により生じた位相差を表す。

(5) 式において、左辺の $\tan \Psi \exp(i\Delta)$ はエリプソメトリーにより測定される量であり、右辺の試料表面の複素振幅反射率比 R_p/R_s は単層膜の場合、光の波長 λ 、入射角 ϕ 、下地の屈折率 n_s 、屈折率 n_f および膜厚 d の関数である。

エリプソメトリーでは Ψ と Δ の二つの量が同時に測定されるので、右辺の式より、二つの変数を未知数として、求めることができる。単層透明膜の場合、下地の屈折率と光の波長および入射角を既知として、膜の屈折率および膜厚を求めるのが普通である。

3.1 単層透明膜の解析²⁻⁵⁾

エリプソメトリーの測定値 $\tan \Psi \exp(i\Delta)$ から、単層

透明膜の屈折率と膜厚を求める方法についてはいくつかの方法が提案されているが、ここでは、最も代表的な McCrackin の方法に基づいて、説明する。

(5) 式において、左辺の $\tan \Psi \exp(i\Delta)$ を ρ とおき、式を $\exp(-i\delta)$ について整理すると、

$$A \cdot [\exp(-i\delta)]^2 + B \cdot [\exp(-i\delta)] + C = 0 \quad (6)$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} A &= (\rho \cdot r_{1p} - r_{1s}) r_{0p} \cdot r_{0s} \\ B &= r_{1p} \cdot r_{1s} (\rho \cdot r_{0p} - r_{0s}) + (\rho \cdot r_{0s} - r_{0p}) \\ C &= \rho \cdot r_{1s} - r_{1p} \end{aligned} \quad (7)$$

である。

一方、(6) 式と複素共役な式を考えると、膜が透明な場合、 δ は実数であるから、

$$A^* \cdot [\exp(i\delta)]^2 + B^* \cdot [\exp(i\delta)] + C^* = 0 \quad (8)$$

となる。ここで、 $*$ は共役複素数を表す。(8) 式の両辺に $[\exp(-i\delta)]^2$ を掛けると、

$$C^* \cdot [\exp(-i\delta)]^2 + B^* \cdot [\exp(-i\delta)] + A^* = 0 \quad (9)$$

となる。そこで、(6) 式と (9) 式より、 $\exp(-i\delta)$ について解くと、

$$\exp(-i\delta) = \frac{(C \cdot C^* - A \cdot A^*)}{(A \cdot B^* - B \cdot C^*)} \quad (10)$$

となる。ここで、 $|\exp(-i\delta)| = 1$ であるから、

$$|(C \cdot C^* - A \cdot A^*) / (A \cdot B^* - B \cdot C^*)| = 1 \quad (11)$$

の式が得られ、これは膜の屈折率 n_f だけを未知数とする方程式である。そこで、これをコンピュータを用いて解くと膜の屈折率 n_f が得られる。ただし、実際に計算を行うと複数の解が求まることがあるので、その場合には、得られた解の中から物理的に意味のあるものを選択する必要がある。

膜の屈折率が求まると、(10) 式より、 $\exp(-i\delta)$ の値が計算できる。そこで、この値を X とすると、

$$\delta = i \cdot \ln(X)$$

となる。これより、膜の厚さ d は

$$\begin{aligned} d &= i \cdot \ln(X) \cdot \lambda / [4\pi \cdot n_f \cdot \cos \chi] \\ &= i \cdot \ln(X) \cdot \lambda / [4\pi \sqrt{n_f^2 - \sin^2 \phi}] \end{aligned}$$

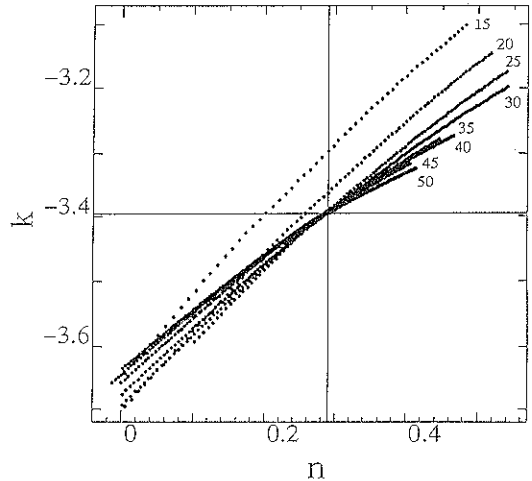
として求めることができる。

以上のように、下地の屈折率、波長、入射角が既知の場合、エリブソメトリーの測定値 Ψ と Δ より、単層透明膜の屈折率と膜厚を求めることができる。ただし、膜厚が極端に薄くなると、屈折率に対する感度が悪くなり、膜厚は測定できるが膜の屈折率に関しては正確な決定が困難になる。

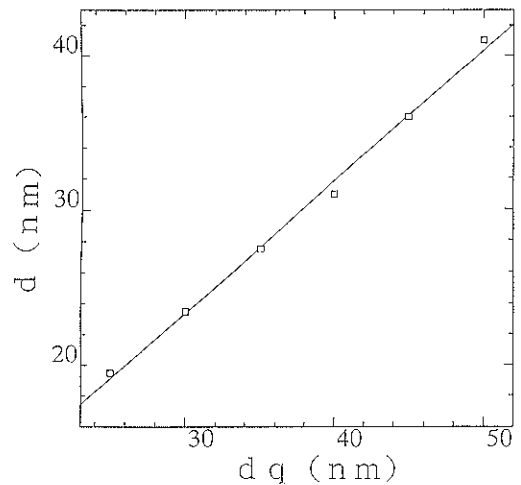
3.2 単層吸収膜の解析⁶⁾

単層吸収膜の場合、一般に未知数は膜の屈折率 n および消衰係数 k 、それに膜厚 d の三つである。この場合、

一回のエリブソメトリーによる測定で全ての未知数を決定することはできない。したがって、反射率の同時測定、あるいは入射角を変えた測定が必要となる。しかし、これらの測定法の併用がいかなる単層吸収膜に対しても高感度であるとは一概には言えず、それは寧ろケースバイケースである。ただし分光エリブソでは、測定感度の良い波長域を探し出して測定できる可能性は高いと思われる。



(a)



(b)

Fig. 2 Analysis of an absorbing single layer. (a) n is a phase coefficient and k is extinction coefficient of the film. The figures indicate the film thickness in nm estimated by a quartz oscillator (after Ref. 7). (b) Measured film thickness d and the estimation by a quartz oscillator dq .

また、膜厚の異なる二つの試料を用意して、それらのエリプソメトリーによる測定から膜の屈折率 n および消衰係数 k と、それぞれの試料の膜厚 d_1 , d_2 を求めることができる。その解析の手順は以下の通りである。

- (1) d_1 を含む範囲で、膜厚を仮定しながら膜の n と k を計算する。そして、もう一方の試料に対しても d_2 を含む範囲で膜厚を仮定しながら膜の n と k を計算する。
- (2) これらの計算結果を横軸に n 、縦軸に k をとってプロットすると交差する二つの曲線が得られる。この時交点における膜厚がそれぞれ求める膜厚 d_1 , d_2 であり、交点の n と k が膜の屈折率である。

ただしこの場合、膜厚 d_1 , d_2 についてある程度の推定値が分かっていることと、二つの試料の屈折率 n および消衰係数 k は同じである必要がある。

このような場合の解析例を Fig. 2 に示す。Fig. 2 (a) は、金膜の蒸着過程における膜の光学定数と膜厚を解析したグラフである。蒸着の過程で測定した Ψ と Δ より、膜厚を仮定しながら膜の屈折率を求め、それがグラフに表してある。各点は 0.1 nm の膜厚間隔であり、図中の数字は膜厚モニターによる推定膜厚である。仮定した膜厚は図中の数字から ± 5 nm の範囲である。図では、推定膜厚 25 nm 以上で各グラフがほぼ一点で交わっている。すなわち、この金膜の蒸着過程において、推定膜厚 25 nm 以上では膜は一定の屈折率で連続的に成長していることがわかる⁹⁾。そして、交点における膜厚が各蒸着過程での金膜の真の膜厚を示し、グラフにおける交点の座標が膜の屈折率を示している。交点における膜厚 d と膜厚モニターによる推定膜厚 d_q の関係を表したのが

Fig. 2 (b) である。

3.3 多層膜の解析⁸⁾

多層膜の複素振幅反射率は、単層膜における複素振幅反射率の計算と同様の手順を順次くり返すことで求めることができる。その手順を以下に示す。

Fig. 3 (a) に示すように、下地の上に n 層の膜がある場合、 n 層目でのフレネル係数を $r_{np, s}$ 、 $(n-1)$ 層までの多層膜の複素振幅反射率をそれぞれ $R_{(n-1)p, s}$ とすると、 n 層の多層膜の複素振幅反射率比は、見かけ上、Fig. 3 (b) に示すような単層と見なせるので、

$$R_{p, s} = (r_{np, s} + R_{(n-1)p, s} \cdot \exp(-i\delta_n)) / (1 + r_{np, s} \cdot R_{(n-1)p, s} \cdot \exp(-i\delta_n))$$

である。ここで $\exp(-i\delta_n)$ は光が n 層目の膜内を一往復するときに生じる位相差である。以下 $\exp(-i\delta_j)$ ($j = (n-1), (n-2), \dots, 2, 1$) とする。また、 $R_{(n-1)p, s}$ は $(n-1)$ 層目のフレネル係数を $r_{(n-1)p, s}$ 、 $(n-2)$ 層までの多層膜の複素振幅反射率をそれぞれ $R_{(n-2)p, s}$ とすると、 n 層目の場合と同様に、

$$R_{(n-1)p, s} = (r_{(n-1)p, s} + R_{(n-2)p, s} \cdot \exp(-i\delta_{(n-1)})) / (1 + r_{(n-1)p, s} \cdot R_{(n-2)p, s} \cdot \exp(-i\delta_{(n-1)}))$$

である (Fig. 3 (c))。さらにまた、 $R_{(n-2)p, s}$ は $(n-2)$ 層目のフレネル係数を $r_{(n-2)p, s}$ 、 $(n-3)$ 層までの複素振幅反射率をそれぞれ $R_{(n-3)p, s}$ とすると、

$$R_{(n-2)p, s} = (r_{(n-2)p, s} + R_{(n-3)p, s} \cdot \exp(-i\delta_{(n-2)})) / (1 + r_{(n-2)p, s} \cdot R_{(n-3)p, s} \cdot \exp(-i\delta_{(n-2)}))$$

である。そして最終的には、

$$R_{1p, s} = (r_{1p, s} + r_{0p, s} \cdot \exp(-i\delta_1)) / (1 + r_{1p, s} \cdot r_{0p, s} \cdot \exp(-i\delta_1))$$

である。このようにして、順次式を書き下していくこと

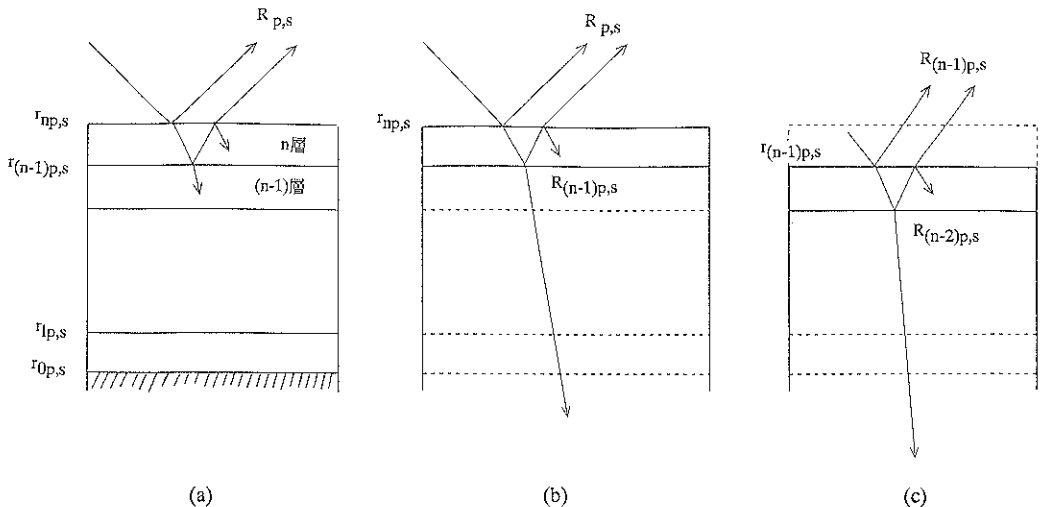


Fig. 3 Schematic diagrams of multilayers.

によって、各層の界面におけるフレネル係数を用いて、 n 層の多層膜の複素振幅反射率を求めることができる。

透明膜でも膜が2層以上の場合、一回のエリブソメトリでこれらの膜の光学定数を全て決定することはできない。しかし、分光エリブソによる多層膜の解析においては、未知のパラメータが膜厚や膜の組成比など波長に独立な変数の場合、測定波長域に比例した変数の決定が可能となる。

分光エリブソにおいては、有効媒質近似理論を用いた多層膜解析が膜の表面や界面のラフネスおよび膜の不均一性などの評価に成功を納めている。この場合には、各層の厚さと有効媒質近似理論における packing factor がフィッティングのパラメータとなる。これらは波長に独立な変数なため、分光エリブソにおいて、測定波長域が広ければ広いほど信頼性の高い結果が得られる。

4. 有効媒質近似理論^{9~11)}

これまで、薄膜の解析に関して、膜は均質連続で、平行平面膜であるとの前提で話をしてきたが、実際の膜は不均質、不連続であったり、膜面および界面にラフネスのある場合が普通である。そこで、このような膜を解析する手法として、有効媒質近似がある。有効媒質近似では膜面および界面のラフネス、あるいは膜の不均質や不連続性を実効的な均質膜に置き換えて解析する。そして、その実効的な均質膜の光学定数を求める式が有効媒質近似理論である。分光エリブソで用いられる有効媒質近似理論としては Bruggeman の式が有名であるが、Bruggeman の式を含め、他の有効媒質近似理論についても簡単に解説する。

分極率 α の双極子が密度 n で一様に分布しているとき、媒質の誘電率 ϵ は

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{4\pi}{3} n \alpha \quad (12)$$

と表される。これを Clausius-Mosotti の式と言う¹²⁾。また、分極率の異なる2種類の双極子 α_a , α_b が分散している場合、(12) 式は

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{4\pi}{3} (n_a \alpha_a + n_b \alpha_b) \quad (13)$$

のように変形できる。ここで、金属 a の誘電率を ϵ_a とすると、

$$\frac{\epsilon_a - 1}{\epsilon_a + 2} = \frac{4\pi}{3} n_a \alpha_a \quad (14)$$

そして、金属 b の誘電率を ϵ_b 、各双極子の充填比を f_a , f_b とすると

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = f_a \frac{\epsilon_a - 1}{\epsilon_a + 2} + f_b \frac{\epsilon_b - 1}{\epsilon_b + 2} \quad (15)$$

となる。これが Lorentz-Lorenz の式である。

もう少し一般的に、まわりが真空ではなく ϵ_h という媒質であるとする、

$$\frac{\epsilon - \epsilon_h}{\epsilon + 2\epsilon_h} = f_a \frac{\epsilon_a - \epsilon_h}{\epsilon_a + 2\epsilon_h} + f_b \frac{\epsilon_b - \epsilon_h}{\epsilon_b + 2\epsilon_h} \quad (16)$$

と書くことができる。媒質 a と b の比率が大きく異なる場合、例えば ϵ_a の媒質の中に ϵ_b の媒質が散在する場合、 $\epsilon_h = \epsilon_a$ と見なして良く、

$$\frac{\epsilon - \epsilon_a}{\epsilon + 2\epsilon_a} = f_b \frac{\epsilon_b - \epsilon_a}{\epsilon_b + 2\epsilon_a} \quad (17)$$

となる。これが Maxwell-Garnett の式である。ここで、 f_b は充填率 (packing density) である。媒質 a と b の比率が同じぐらいで $\epsilon = \epsilon_h$ のとき、

$$0 = f_a \frac{\epsilon_a - \epsilon}{\epsilon_a + 2\epsilon} + f_b \frac{\epsilon_b - \epsilon}{\epsilon_b + 2\epsilon} \quad (18)$$

となる。 $f_a + f_b = 1$ で、この式は Bruggeman theory と呼ばれている。

分光エリブソにおいては、表面や界面のラフネスおよび膜の不均一性などを評価するのに、Maxwell-Garnett あるいは Bruggeman などの有効媒質近似理論が用いられているが、実際的な成功を収めていると思われる。

基板の上に膜を蒸着しても実際には必ずしも単純な単層膜になるとは限らない。蒸着された膜の表面は常に平らとは限らず、基板と膜との界面にも基板と膜とは性質の違う界面層ができる場合がある。しかし、このような場合でも、分光エリブソでは、膜表面の粗さの評価や界面層の検出を行うことができる。これらの解析に用いられているのが Bruggeman の式である。

表面粗さの評価においては、膜と void (空孔) から成る表面層を仮定し、表面層の屈折率を Bruggeman の式により計算する。void の割合と表面層の厚さをフィッティングパラメータとして測定値に最も良く一致するパラメータの値を決定する。決定された void の割合や表面層の厚さが大きくなるに従って、表面粗さは大きいと評価できる。また、界面層の評価では、基板と膜とが混在した界面層を考え、界面層の屈折率を Bruggeman の式により計算する。基板と膜との混合の割合と界面層の厚さをフィッティングパラメータとして測定値に最も良く一致するパラメータの値を決定する。界面層の有無は、界面層を仮定した場合の計算値と仮定しない場合の計算値のいずれが、測定値によりフィットするかで判定される。

GaAs の上に SiO₂ を CVD (Chemical Vapor Deposition) により蒸着したサンプルを分光エリブソで測定し、Bruggeman の理論で解析した結果、単層モデルでは良い一致は得られず、SiO₂ とおよそ 2 nm の界面層 (酸化層) の

二層モデルによって良いフィットが得られたとの報告がある¹³⁾。このとき、酸化層の屈折率は陽極酸化された GaAs の値とアモルファス As の値とを用いて Bruggeman の式より求め、SiO₂ 膜の屈折率は石英ガラスの屈折率と膜の密度に応じた void を用いて求めている。さらに、これらのサンプルを窒素および酸素雰囲気中でアニールした場合の界面層の変化についても調べ、分光エリブソでの結果が X 線光電子分光や二次イオン質量分析器などの結果とも良く一致することが示されている。

しかしまた、以上の議論は前提として、

- ・双極子粒子は 3 次元的に様に分布している。
- ・双極子粒子は完全な球形で半径は同一である。

との仮定がある。実際の薄膜では双極子粒子は 2 次元ののかつ粒形も様々で、サイズも分布をもつと考えるのが普通である。そこで、これらのことを考慮に入れた理論も種々提案されている。

D. Polder¹⁴⁾は Maxwell-Garnett の理論に島の形の項を入れて、

$$\varepsilon_{\text{effect}} = \varepsilon_m \cdot \frac{1 + (2/3) \sum f_j \cdot \alpha_j}{1 - (1/3) \sum f_j \cdot \alpha_j},$$

$$\alpha_j = \frac{1}{3} \sum_i \frac{\varepsilon_j - \varepsilon}{\varepsilon + L_i(\varepsilon_j - \varepsilon)}$$

の式を導いた。ここで、 f_j は充填率で、 L_i は島の形による反分極電場係数である。

T. Yamaguchi ら¹⁵⁾は形による項に加えて、島自体の誘電率がバルクとは異なると考え、

$$\varepsilon = \varepsilon_f + \varepsilon_b$$

とした。 ε_f は自由電子による寄与で、 ε_b は束縛電子（内殻電子）による寄与である。そして、

$$\varepsilon_f = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\omega\omega_1}$$

ω_p : プラズマ振動数, ω_1 : 緩和振動数, ω : 光の振動数である。

E.D. Mozrymas ら¹⁶⁾は島のサイズ分布を考慮に入れた式を提案している。

しかし、これらの理論には、式が偏光解析パラメータである Ψ と Δ に直接的には結びつき難いものもあり、また様々な要素を考慮に入れた理論は、式のパラメータが増えるため、実際の測定との比較が難しいのも実状である。

5. お わ り に

これまで、エリブソメトリーにおける膜厚測定および有効媒質近似理論について説明してきた。エリブソメトリーにおいて膜厚を決定する場合、膜の屈折率は既知として行うのが通常である。しかし、実際の膜となると文献値とのずれもあり、このような不一致が膜厚測定の誤差となる。より良い結果を得るためには、測定の波長範囲で、膜の屈折率に関するデータベースの充実が肝心である。

また、有効媒質近似理論においては、様々な要素を考慮に入れつつ、よりエリブソメトリーに適した実的な式の導出がなされることが望まれる。

文 献

- 1) M. Born and E. Wolf: "Principles of Optics"; "光学の原理", 横田英嗣, 草川 徹訳 (東海大学出版会, 東京, 1974).
- 2) F.L. McCrackin, E. Passaglia, R.R. Stromberg and H.L. Steinberg: J. Res. Nat. Bur. Stand. A **67**, 363 (1963).
- 3) F.L. McCrackin: Nat. Bur. Stand. Tech. Note 479 (1969).
- 4) S. Kawabata, M. Yamamoto and K. Kinoshita: Jpn. J. Appl. Phys. **14**, Suppl. 14-1, 407 (1975).
- 5) Y. Yoriune: J. Opt. Soc. Am. **73**, 888 (1983).
- 6) W. Paik and J.O' M. Bockris: Surf. Sci. **28**, 61 (1971).
- 7) T. Shibuya, S. Kawabata, H. Yoshizawa, S. Suzuki, N. Amano and H. Yokota: Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 4556 (1996).
- 8) J. Sarakinos and J. Spyridelis: Thin Solid Films **28**, 167 (1975).
- 9) L. Ohlidal and F. Lukes: Opt. Acta **19**, 817 (1972).
- 10) E.C. Chan and J.P. Marton: J. Appl. Phys. **45**, 5008 (1974).
- 11) D.E. Aspnes, J.B. Theeten and F. Hottier: Phys. Rev. B **20**, 3292 (1979).
- 12) L. Ward: "The Optical Constants of Bulk Materials and Films" (Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1988).
- 13) Y. Watanabe, T. Saitoh, M. Miyazaki and S. Suzuki: Thin Solid Films **233**, 236 (1993).
- 14) D. Polder and J.H. van Santen: Physica **12**, 257 (1946).
- 15) T. Yamaguchi, T. Kitajima, M. Sakai and V. Truong: Appl. Surf. Sci. **33/34**, 952 (1988).
- 16) E.D. Mozrymas, J. Peisert and P. Bieganski: Appl. Opt. **27**, 181 (1988).