

# 分光エリプソメトリーの基礎と 太陽電池評価への応用

藤原 裕之・赤川 真隆

## Fundamental of Spectroscopic Ellipsometry and Application to Solar Cell Characterization

Hiroyuki FUJIWARA and Masataka AKAGAWA

In the last two decades, the spectroscopic ellipsometry technique has developed rapidly with the help of computer technology. As a result, the application area of spectroscopic ellipsometry has expanded, and now this technique is utilized in wide research areas from semiconductors to organic materials. Most recently, spectroscopic ellipsometry has been applied to characterize various solar cells that have complicated textured structures. Such characterization has been found to provide detailed structures and properties of various component layers in solar cells. In this article, basic principles of spectroscopic ellipsometry and application of ellipsometry technique to solar cell characterization will be introduced.

**Key words:** Spectroscopic ellipsometry, basic principles, solar cells, optical constants, optical model

過去 20 年間に分光エリプソメトリーの測定・解析技術は飛躍的に発達し、分光エリプソメトリーは従来の基礎的な光学評価だけでなく、最近では薄膜成長の実時間観測およびより複雑な有機薄膜の解析にも用いられている<sup>1)</sup>。分光エリプソメトリーは基本的に光学測定手法であるが、特に非破壊・高速測定が可能であり、非常に高い測定感度 ( $\sim 0.1 \text{ \AA}$ ) をもつことが特徴である。本稿では、分光エリプソメトリーの原理および解析技術を解説し、応用として複雑なテクスチャー構造をもつ太陽電池のエリプソメトリー評価を紹介する。

### 1. エリプソメトリーの原理

エリプソメトリーは、偏光した光を試料に入射させ、試料での光反射による偏光状態の変化から試料の光学定数や薄膜の膜厚などを評価する方法である<sup>1)</sup>。特にエリプソメトリーは測定プローブとして光を用いるため、試料を非破壊で数秒程度の時間で評価できるだけでなく、きわめて高い測定精度をもち、これまで各種材料の膜厚や光学特性の

基礎評価に広く用いられている。

図 1 はエリプソメトリーによる試料測定の原理を示している。エリプソメトリーは偏光した光を用いて測定を行うが、基本的に光 (電磁波) の偏光状態は直交する 2 つの座標軸上を伝播する波の重ね合わせから表される。エリプソメトリーの場合、入射・反射光の偏光は、その光の電場  $\mathbf{E}$  の振動方向から p 偏光と s 偏光に区別され、p 偏光では電場の振動方向は入射光  $\mathbf{E}_{ip}$  と反射光  $\mathbf{E}_{rp}$  で同一平面内にある。図 1 の入射光は p, s 偏光の間に位相差がない直線偏光とよばれる状態を示しており、この場合 p, s 偏光の合成電場 ( $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{ip} + \mathbf{E}_{is}$ ) は常に  $45^\circ$  方向で振動する。一方、試料により光が反射されると、p, s 偏光それぞれの振幅および位相は変化する。図 1 に示すように、エリプソメトリーでは、反射 p, s 偏光の位相差および振幅比を角度で表した  $(\Delta, \psi)$  の 2 つの値を測定する。試料構造が理想的な場合には、 $(\Delta, \psi)$  の 2 つの測定値から試料の光学定数である屈折率  $n$  および消衰係数  $k$  の 2 つの値を直接求めることができ、これがエリプソメトリーの基本原理となっている。

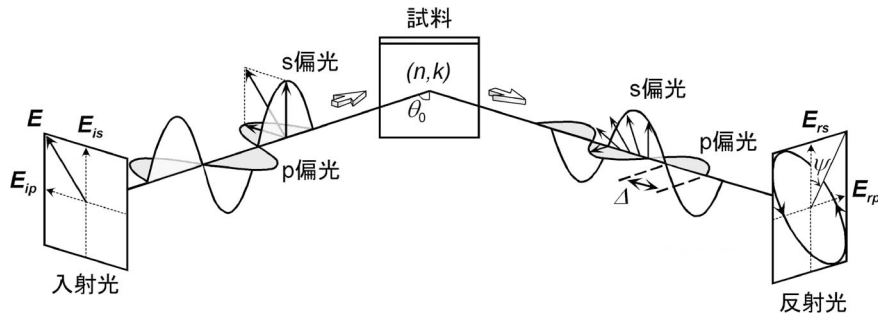


図1 エリプソメトリー測定の実理.

入射光に対する反射光の比率 (振幅反射係数  $r$ ) は p, s 偏光で異なり, それぞれは振幅比  $|r|$  と位相差  $\delta$  に分けた次式で表される.

$$\begin{aligned} r_p &\equiv E_{rp}/E_{ip} = |r_p| \exp(i\delta_p) \\ r_s &\equiv E_{rs}/E_{is} = |r_s| \exp(i\delta_s) \end{aligned} \quad (1)$$

特にエリプソメトリーでは, p 偏光と s 偏光の振幅反射係数の比から  $(\Delta, \psi)$  を定義する.

$$\rho \equiv \tan\psi \exp(i\Delta) \equiv r_p/r_s \quad (2)$$

$$\Delta \equiv \delta_p - \delta_s, \tan\psi \equiv |r_p|/|r_s| \quad (3)$$

このようにエリプソメトリーは, p, s 偏光に対する光反射の違いを偏光状態の変化として測定し, p, s 偏光の振幅比および位相差から計算により試料の光学定数  $(n, k)$  を決定する手法である. 実際のエリプソメトリー測定器では, 偏光素子を回転させ, 回転に応じた光強度を測定することにより反射光の偏光状態を測定している. ただし, 測定器には回転検光子型や回転補償子型などがあり, 使用する偏光素子の種類や光学配置によって測定精度や測定領域が大きく変化するため注意が必要である<sup>1)</sup>. 現在, 最も広く普及している高精度型の測定器は, 回転検光子型に位相子 (補償子) を導入した測定器および回転補償子型の測定器である.

単一波長でのエリプソメトリー測定には, 光源として一般に He-Ne レーザーなどが使用され, 検出器には光電子倍増管が用いられる. 分光エリプソメトリーの測定は, 分光器により分光した光を試料に照射し, 光電子倍増管を使用して光を検出することから行う. 分光スペクトルを短時間で測定する装置では, 白色光を試料に照射し, 反射した白色光を分光器により分散させ, 全波長をフォトダイオードアレイや CCD 検出器により同時検出することから測定が行われる.

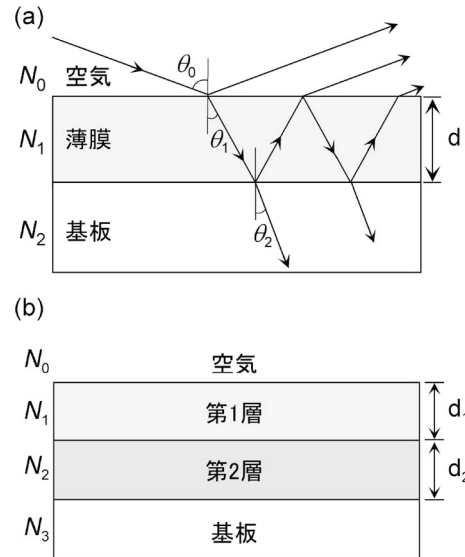


図2 (a) 基板上の薄膜, および, (b) 基板上の2層膜に対応した光学モデル.

## 2. エリプソメトリーのデータ解析

エリプソメトリーは基本的に間接評価手法であり, 測定した  $(\Delta, \psi)$  から薄膜の光学定数や膜厚を求めるためには光学モデルを使用した解析が必要である<sup>1)</sup>. 図2は, (a) 基板上の薄膜, および (b) 基板上の2層膜に対応した光学モデルを示している. 光学モデルは各層の  $(n, k)$  および厚さ  $d$  から定義され, 図2の  $N$  は  $N \equiv n - ik$  ( $i = \sqrt{-1}$ ) で定義される各層の複素屈折率を表している. なお, 一般に用いられる光吸収係数  $\alpha$  は,  $k$  および波長  $\lambda$  より  $\alpha = 4\pi k/\lambda$  で与えられ, 光吸収がない場合には,  $\alpha = k = 0$  となる. さらに, 複素誘電率 ( $\epsilon \equiv \epsilon_1 - i\epsilon_2$ ) は,  $\epsilon = N^2$  の関係式を使用すると, それぞれ  $\epsilon_1 = n^2 - k^2$  および  $\epsilon_2 = 2nk$  として  $(n, k)$  から算出される. 図2 (a) の  $\theta_1$  および  $\theta_2$  は, 入射角  $\theta_0$  から  $N_0 \sin\theta_0 = N_1 \sin\theta_1 = N_2 \sin\theta_2$  (スネルの法則) を用いて求めることができる. ここで,  $N_0, N_1$ , および  $N_2$  は, それぞれ空気 ( $N_0 = 1$ ), 薄膜および基板の複素屈折率である. また, 薄膜の厚さ  $d$  が光の進入深さに比べ薄い場合には, 薄膜内での光の多重反射により光学干渉が起こ

る。この場合、p, s 偏光の振幅反射係数は、それぞれ同じ次式から計算される。

$$r_{012} = [r_{01} + r_{12} \exp(-i2\beta)] / [1 + r_{01} r_{12} \exp(-i2\beta)] \quad (4)$$

ここで、 $r_{01}$  は空気 / 薄膜界面および  $r_{12}$  は薄膜 / 基板界面での振幅反射係数を示し、 $\beta = 2\pi d N_1 \cos \theta_1 / \lambda$  である。p, s 偏光の各層界面での振幅反射係数  $r_{jk}$  は次に示すフレネル (Fresnel) 方程式から与えられる。

$$r_{jk,p} = \frac{N_k \cos \theta_j - N_j \cos \theta_k}{N_k \cos \theta_j + N_j \cos \theta_k} \quad (5)$$

$$r_{jk,s} = \frac{N_j \cos \theta_j - N_k \cos \theta_k}{N_j \cos \theta_j + N_k \cos \theta_k}$$

図 2 (a) の光学モデルの場合には、式 (4) を使用して  $(\Delta, \psi)$  を次のように求めることができる。

$$\rho = \tan \psi \exp(i\Delta) = r_{012,p} / r_{012,s} \quad (6)$$

ここで、 $r_{012,p}$  および  $r_{012,s}$  は、それぞれ p 偏光および s 偏光に対する式 (4) の計算値である。

図 2 (b) のように薄膜が 2 層で構成される場合には、まず第 2 層と基板の振幅反射係数  $r_{123}$  を式 (4) を変形して計算し、次にこの  $r_{123}$  を用いて全体の振幅反射係数  $r_{0123}$  を

$$r_{0123} = [r_{01} + r_{123} \exp(-i2\beta_1)] / [1 + r_{01} r_{123} \exp(-i2\beta_1)] \quad (7)$$

として求める。この手順を繰り返すと多層膜構造でも容易に計算を行うことが可能である。また、式 (7) の場合には、 $\rho = r_{0123,p} / r_{0123,s}$  から  $(\Delta, \psi)$  が計算される。

エリプソメトリー測定は表面ラフネスや界面構造にきわめて敏感であり、試料に表面ラフネスや界面層が形成されている場合には、光学モデルにこれらの層を取り入れる必要がある。表面ラフネスがある場合には、図 2 (b) において第 1 層を表面ラフネス層とし、第 2 層を均一な薄膜層とする。表面ラフネス層の光学特性の計算には、一般に有効媒質近似 (EMA) が用いられ、二相構造に対する EMA の計算式は次式で与えられる。

$$f \frac{N_0^2 - N_1^2}{N_0^2 + 2N_1^2} + (1-f) \frac{N_2^2 - N_1^2}{N_2^2 + 2N_1^2} = 0 \quad (8)$$

ここで、表面ラフネス層内のポイド (空気) の体積分率を  $f$  とすると、表面ラフネス層の  $N_1$  は、 $N_0 = 1$  および  $N_2$  から求められる。式 (8) を適用すると、例えば第 2 層の屈折率が  $n_2 = 5$  であれば、表面ラフネス層 ( $f = 0.5$ ) の屈折率

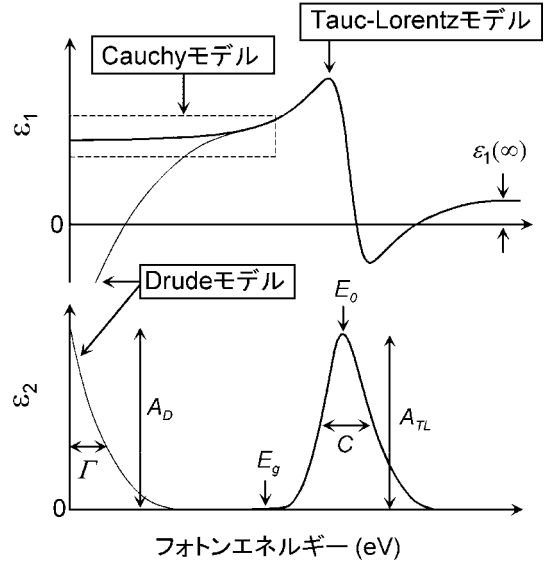


図 3 誘電関数のモデル化に使用される各種誘電関数モデル。

は約半分程度の  $n_1 = 2.84$  となる。

実際のエリプソメトリー解析では、試料に対して光学モデルおよび光学定数を仮定し、この計算から得られる  $(\Delta, \psi)$  を実測値にフィッティングすることから、試料の膜厚  $d$  および光学定数 ( $n, k$ ) を決定する。

### 3. 光学定数のモデル化

光の波長を変化させて測定を行う分光エリプソメトリーでは、 $(\Delta, \psi)$  に対するスペクトルが測定される。このときのエリプソメトリー解析には、光学モデルの構築だけでなく、さらに波長 (または光子エネルギー) に対する光学定数のモデル化が必要となる。図 3 は、赤外から紫外 / 可視領域の誘電関数 (複素誘電率) をさまざまなモデルにより表した例を示している。この図では、光波長ではなく光子エネルギー ( $E$  [eV] =  $1239.8 / \lambda$  [nm]) に対するスペクトル変化が表されている。試料に光吸収がなければ ( $k = \alpha = 0$ )、 $\epsilon_1 = n^2 - k^2$  より  $\epsilon_1 = n^2$  となり、 $\epsilon_1$  は屈折率成分を示す。一方、 $\epsilon_2$  は  $\epsilon_2 = 2nk$  より基本的に光吸収を示し、 $k = 0$  で  $\epsilon_2 = 0$  となる。一般に半導体では、バンドギャップより高いエネルギー領域で光吸収が起こるが、図 3 ではこの光吸収を Tauc-Lorentz (TL) モデル<sup>1,2)</sup> により示している。TL モデルは  $\epsilon_2$  ピークの振幅  $A_{TL}$ 、半値幅  $C$ 、バンドギャップ  $E_g$ 、ピーク位置  $E_0$ 、および  $\epsilon_1$  スペクトルの高エネルギー領域での値  $\epsilon_1(\infty)$  の合計 5 変数から計算され、 $E_g$  より高エネルギー側の  $\epsilon_2$  は次式で示される。

$$\epsilon_2 = \frac{A_{TL} E_0 C (E - E_g)^2}{(E^2 - E_0^2)^2 + C^2 E^2} \frac{1}{E} \quad (9)$$

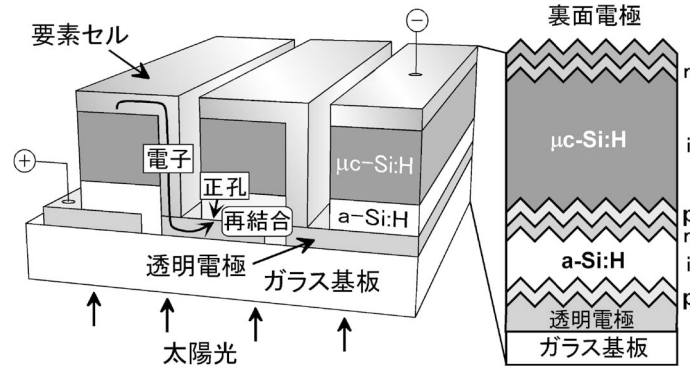


図4 薄膜シリコン太陽電池のモジュール構造。

なお、 $E \leq E_g$ では $\epsilon_2 = 0$ となる。また、TLモデルの $\epsilon_1$ は、式(9)にKramers-Kronigの関係式を使用して導出されている。 $\epsilon_1$ の低エネルギー側で光吸収のない領域( $\epsilon_2 = k = 0$ )では、次式で示されるCauchyモデル<sup>1)</sup>を適用することも可能である。

$$n = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4 + \dots, \quad k = 0 \quad (10)$$

一方、透明導電膜では、透明導電膜中の自由電子濃度が高い場合( $> 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )には、自由電子による光吸収(フリーキャリアー吸収)が起こる。このフリーキャリアー吸収は図に示すDrudeモデル<sup>1,3)</sup>から表すことが可能であり、このときの低エネルギー側における誘電関数は、図の細線で示される変化を示す。Drudeモデルは振幅 $A_D$ および吸収幅 $\Gamma$ の2変数により次式で示される。

$$\epsilon = -\frac{A_D}{E^2 - i\Gamma E} \quad (11)$$

このDrudeモデルを解析に適用すると、 $A_D$ および $\Gamma$ の値から、さらに膜中のキャリアー濃度および移動度を光学的に求めることが可能である<sup>1,3)</sup>。

#### 4. エリプソメトリーの太陽電池評価への応用

近年、分光エリプソメトリーは太陽電池評価での応用分野で注目を集めている。図4は水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)太陽電池と微結晶シリコン( $\mu\text{c-Si:H}$ )太陽電池を積層させたタンデム型太陽電池のモジュール(パネル)構造を示している。この薄膜シリコン太陽電池は、大面積・低コスト化が可能な太陽電池として研究開発および工場生産が積極的に進められているが、この太陽電池モジュールは、a-Si:Hおよび $\mu\text{c-Si:H}$ 半導体のp-i-n構造が積層したストライプ状の要素セルにより構成されており、これらの各要素セルは集積化プロセスにより電氣的に直列に接続されている。そのため、このモジュール構造では、モ

	膜厚	誘電関数モデル
表面ラフネス層	$d_s$	EMA
SnO <sub>2</sub> :F層	$d_b$	TL+Drude
透明層	$d_t$	$n=1.86$
ガラス基板		$n=1.46$

図5 SnO<sub>2</sub>:F テクスチャー型透明導電膜に対する光学モデル。

ジュール全体の電流が最も電流の低い要素セルで決定される構造的な欠点がある。現在のモジュールサイズは1m角程度であり、今後のモジュール変換効率の向上には、構造不均一性の評価がより重要になると考えられる。本章では、分光エリプソメトリーによる薄膜シリコン太陽電池モジュールの構造評価を目指した筆者らの研究について紹介する。

#### 4.1 テクスチャー型透明導電膜の評価

一般に薄膜シリコン太陽電池では、太陽電池層での光吸収を増加させるためにテクスチャー型のSnO<sub>2</sub>:F透明導電膜が太陽電池の入射側に形成されている。このSnO<sub>2</sub>:Fテクスチャー層は1 $\mu\text{m}$ 以下の凹凸構造をもつが、このテクスチャー構造に対してもエリプソメトリー評価が可能であることがすでに報告されている<sup>4)</sup>。特に、エリプソメトリー測定では光路長が長いいため、テクスチャー構造により乱反射された光は検出されず、テクスチャー上で起こる光の正反射だけが検出される。そのためテクスチャー構造の場合にも、通常と類似した方法により解析を行うことが可能である<sup>4)</sup>。

図5は、テクスチャー型SnO<sub>2</sub>:F層の解析に使用した光学モデルを示している。このモデルでは、ガラス基板上の透明導電膜層を透明層、SnO<sub>2</sub>:F層および表面ラフネス層

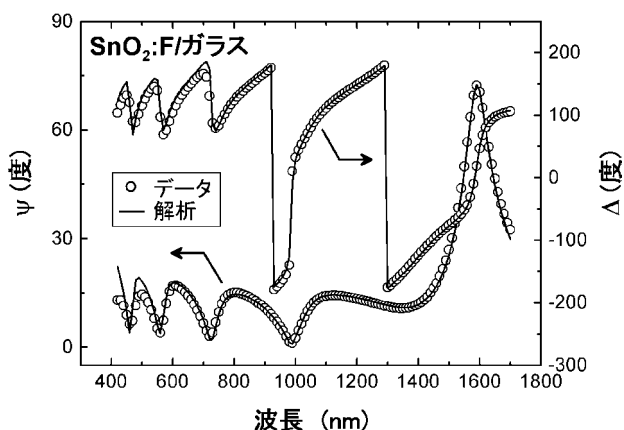


図6 ガラス基板上に形成されたテクスチャー型SnO<sub>2</sub>:F透明導電膜層に対するエリプソメトリー測定・解析スペクトル。

に分割し、それぞれの膜厚を  $d_t$ 、 $d_b$  および  $d_s$  としている。ガラス基板および透明層の解析には、式 (10) で示される Cauchy モデルを適用することができるが、ここでは解析を簡略化するために、ガラス基板および透明層の屈折率をそれぞれ  $n=1.46$  および  $n=1.86$  の固定値としている。一般に各種透明導電膜の誘電関数は、TL モデルおよび Drude モデルからモデル化が可能であることが知られている<sup>3,4)</sup>。また、図5の表面ラフネス層は、前述した式 (8) の EMA から計算することができる。

図6は、テクスチャー型 SnO<sub>2</sub>:F 透明導電膜層に対するエリプソメトリー測定・解析スペクトルを示している。図のプロットで示される測定スペクトルは、測定入射角を 55° とし、補償子付回転検光子型の測定器から測定している。この図の実線は、図5の光学モデルにおいて、膜厚 ( $d_s$ ,  $d_b$ ,  $d_t$ ) および TL+Drude モデル (7 変数) を使用したフィッティングから得られる解析スペクトルを示している。図からわかるように、解析値は実測値と非常に一致している。図6において、 $\psi$  スペクトルの 1600 nm 付近にみられる比較的大きなピークは、SnO<sub>2</sub>:F 層内の自由電子によるフリーキャリアー吸収を示している。特にこの領域の Drude 解析からは、式 (11) の ( $A_D$ ,  $\Gamma$ ) が求められ、それぞれの値からは光学キャリアー濃度および光学移動度が決定される<sup>3)</sup>。

表1は、図6のエリプソメトリー解析から決定された各

種解析値および他評価法から得られる測定値を比較した結果を示している。特にここでは、Drude 解析をより正確に行うため、図6のエリプソメトリー解析を  $\lambda \geq 600$  nm に限定し、フィッティングが劣化する領域 ( $\lambda < 600$  nm) を除外して解析を行ったときの結果を示している。表からわかるように、分光エリプソメトリーから求めた膜厚は走査型電子顕微鏡 (SEM) により評価したおよそその値と一致するが、エリプソメトリーでは、より定量的な評価が可能である。また、表面ラフネス層の値 ( $d_s$ ) は原子間力顕微鏡 (AFM) から求めた rms ラフネスの値と同様の値を示す。他の材料系においても、分光エリプソメトリーから求めた表面ラフネス層の厚さは、AFM の rms ラフネスとよく一致することが報告されている<sup>5)</sup>。そのため、逆にエリプソメトリーにより評価した  $d_s$  の値から、さらにテクスチャー構造を推定することも可能である。一方、Drude 解析から決定したキャリアー濃度も Hall 測定から評価した値と非常によく一致する。ITO や ZnO などの他の透明導電膜においても、エリプソメトリーおよび Hall 測定から求めたキャリアー濃度は高い精度で同じ値になることが報告されている<sup>3)</sup>。しかしキャリアー移動度に関しては、エリプソメトリー測定結果は Hall 測定の結果とはあまりよく一致しない<sup>6)</sup>。これは、エリプソメトリーでは結晶粒内での自由電子吸収から移動度が評価されるのに対し、Hall 測定では粒界を通した電気伝導が直接測定されるため、粒界が測定値に大きな影響を与えるためである。そのため、エリプソメトリーから求めた光学移動度は、Hall 移動度よりも一般に大きくなる<sup>6)</sup>。一方、表1では、Hall 測定の移動度に比べ、エリプソメトリー測定の移動度が小さくなっている。特に図6の測定試料では、結晶粒径の不均一性が比較的大きく、エリプソメトリーでは各結晶粒の平均的な移動度が測定されるために、移動度の小さい結晶粒の影響が顕著になったためと考察される。逆に Hall 測定の移動度が大きい場合には、大粒径の結晶粒によるパーコレーション効果を考慮する必要があると考えられる<sup>3)</sup>。

表1に示すように、エリプソメトリー測定からは、SEM, AFM および電気特性 (Hall 測定) から評価される

表1 分光エリプソメトリー測定結果の他評価法との比較。

	分光エリプソメトリー	他評価法
膜厚 (nm)	659 ± 3 <sup>a)</sup>	~650 (SEM)
表面ラフネスの厚さ (nm)	50 ± 1 <sup>b)</sup>	48.9 <sup>c)</sup> (AFM)
キャリアー濃度 (10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup> )	2.77 ± 0.02	2.7 ± 0.1 (Hall)
キャリアー移動度 (cm <sup>2</sup> /Vs)	36.5 ± 0.5	49.0 ± 1.5 (Hall)
シート抵抗 (Ω/□)	14.1	10.6 (Hall)

<sup>a)</sup> 図5の  $d_b + d_t$  の合計値, <sup>b)</sup> 図5の  $d_s$  の値, <sup>c)</sup> AFM による rms ラフネスの値。

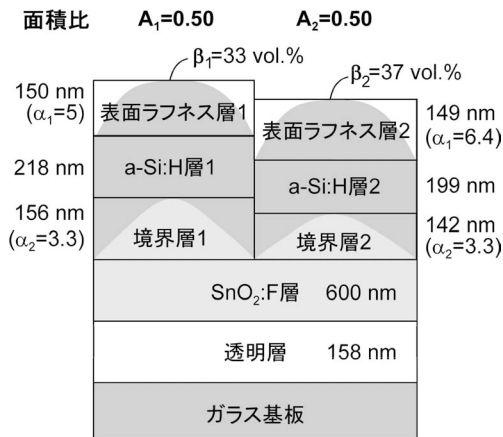


図7 a-Si:H/SnO<sub>2</sub>:F テクスチャー構造に対する光学モデル。この光学モデルでは、SnO<sub>2</sub>:F 層上に形成された a-Si:H 層を面積比 A<sub>1</sub> および A<sub>2</sub> で示される 2 領域に分割している。

諸特性をひとつのスペクトル解析からすべて求めることが可能である。さらにエリプソメトリーは、測定にサンプルの切断や電極形成などの必要がなく、非破壊で高速測定が可能であるため、テクスチャー透明導電膜の評価に非常に有効な測定手法と考えられる。

#### 4.2 テクスチャー型 a-Si:H/SnO<sub>2</sub>:F 構造の評価

ここでは、a-Si:H 太陽電池構造の評価を目的として、SnO<sub>2</sub>:F 膜上にさらに a-Si:H 層を形成したテクスチャー構造を分光エリプソメトリーにより評価した結果を紹介する。一般にテクスチャー透明導電膜上に形成した a-Si:H 層は 1 μm 以下の微視的な構造不均一性を示し、通常の平坦な層構造を仮定した光学モデルでは解析が困難である。そのため、テクスチャー構造における a-Si:H 層の解析には、図7に示す光学モデルを新たに適用した。この光学モデルでは、透明導電膜 / ガラス基板の上に形成される a-Si:H 層の構造不均一性を表すため、a-Si:H 層を 2つの領域に分割している。この場合の振幅反射係数  $r$  は、各領域の面積比 ( $A_1, A_2$ ) および各領域の振幅反射係数 ( $r_1, r_2$ ) を使用すると  $r_t = A_1 r_1 + A_2 r_2$  ( $A_1 + A_2 = 1$ ) として求めることが可能である<sup>1)</sup>。これを使用すると、( $\Delta, \psi$ ) は p, s 偏光に対する  $r_{tp}$  および  $r_{ts}$  から次式で与えられる。

$$\rho = \tan \psi \exp(i\Delta) = r_{tp} / r_{ts} \quad (12)$$

さらに、図7の境界層および表面ラフネス層は、有効媒質近似を適用した多層モデルから計算した。この多層モデルでは、半径  $r=1$  の円柱内における二相混合相の体積分率変化を

$$d = d_0(1 - r^\alpha) \quad (13)$$

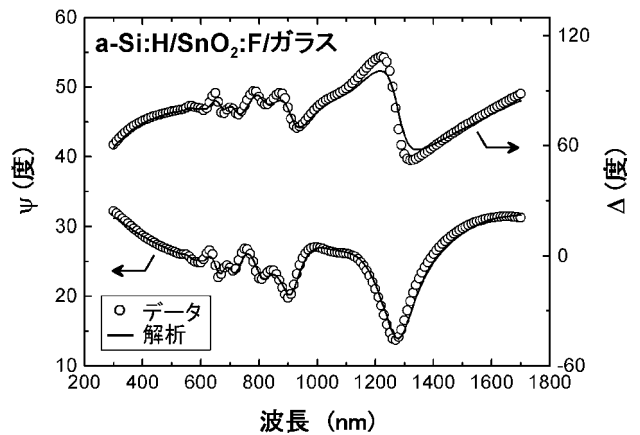


図8 ガラス基板上的 a-Si:H/SnO<sub>2</sub>:F テクスチャー構造に対するエリプソメトリー測定・解析スペクトル。

によりモデル化している。ここで、 $d_0$  は  $r=0$  における混合相の厚さ、 $\alpha$  は円柱を上から切断したときに現れる断面での  $r$  に対する  $d$  の曲率変化を示している。特に  $\alpha=1$  の場合には、切断面における混合相の変化は線形になり、 $\alpha > 1$  の場合には、混合相の変化は図7の表面ラフネス層に示すように、上方に盛り上がった形状となる。実際の多層モデルでは、表面ラフネス層および境界層をそれぞれ 10 層程度に分割し、各層の体積分率を式 (13) を適用して求めている。さらに、求めた体積分率から EMA を使用して各層の光学定数を算出し、全体の振幅反射係数を決定している。また表面ラフネス層に関しては、多層モデルにおける最上層のポイド体積分率を  $\beta$  により表している。

図8は、a-Si:H/SnO<sub>2</sub>:F テクスチャー構造から得られる測定および解析スペクトルを示している。このエリプソメトリー測定には、SnO<sub>2</sub>:F テクスチャー基板上に a-Si:H 層を約 350 nm 堆積させた試料を用いた。特に図8の実線は、図7に示す光学モデルを用いたフィッティング結果を示している。この解析の光学定数としては、SnO<sub>2</sub>:F テクスチャー基板の光学定数には a-Si:H 形成前の基板測定から求めた値を使用し、a-Si:H 層の光学定数には平坦な基板上に形成した a-Si:H 層から得られる値を使用した。図8からわかるように、2 領域に分割した光学モデルから計算される解析スペクトルは測定スペクトルに非常によく一致している。この解析から得られる各層の膜厚および ( $\alpha, \beta$ ) の値を図7に示す。特にこの解析では、2 分割した各領域の面積比を  $A_1 = A_2 = 0.5$  としており、 $A_1$  および  $A_2$  の各領域における表面ラフネス層および境界層の混合相変化をそれぞれ  $\alpha_1$  および  $\alpha_2$  としている。また、 $\beta_1$  および  $\beta_2$  は、それぞれ領域  $A_1$  および  $A_2$  における表面ラフネス最上層のポイド体積分率を示している。

図9は同じ試料の透過型電子顕微鏡 (TEM) から測定し

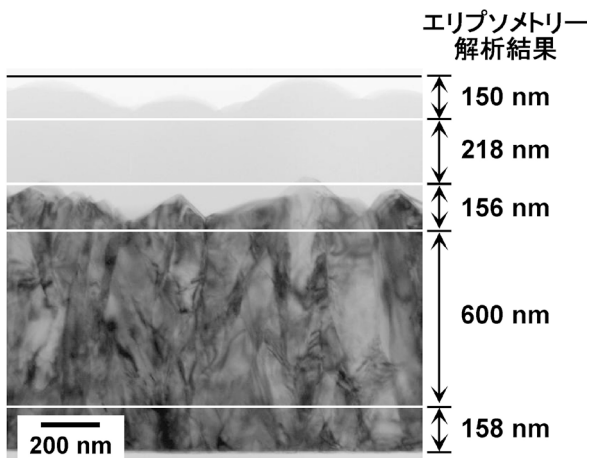


図9 断面TEMによるa-Si:H/SnO<sub>2</sub>:Fテクスチャー試料の観察像。図中の白線は、図7に示すエリプソメトリー解析結果(領域A<sub>1</sub>)に対応した各層の膜厚を示す。

た断面構造を示している。この図の白線はエリプソメトリー解析から求めた各層の膜厚を示し、図7における領域A<sub>1</sub>の膜厚に対応する。図9から、断面TEM像により観察される膜厚は分光エリプソメトリーの解析結果ときわめてよい一致を示すことがわかる。この結果は、a-Si:H層を膜厚の異なる領域に分割する新しい解析法が、

a-Si:H/SnO<sub>2</sub>:Fテクスチャー構造の解析にきわめて有効であり、複雑なテクスチャー構造に対しても分光エリプソメトリーによる定量的評価が可能となることを示している。

## 文 献

- 1) 藤原裕之：分光エリプソメトリー (丸善, 2003).
- 2) G. E. Jellison, Jr. and F. A. Modine: "Parameterization of the optical functions of amorphous materials in the interband region," *Appl. Phys. Lett.*, **69** (1996) 371-373; Erratum, *Appl. Phys. Lett.*, **69** (1996) 2137.
- 3) H. Fujiwara and M. Kondo: "Effects of carrier concentration on the dielectric function of ZnO:Ga and In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn studied by spectroscopic ellipsometry: Analysis of free-carrier and band-edge absorption," *Phys. Rev. B*, **71** (2005) 075109.
- 4) P. I. Rovira and R. W. Collins: "Analysis of specular and textured SnO<sub>2</sub>:F films by high speed four-parameter Stokes vector spectroscopy," *J. Appl. Phys.*, **85** (1999) 2015-2025.
- 5) J. Koh, Y. Lu, C. R. Wronski, Y. Kuang, R. W. Collins, T. T. Song and Y. E. Strausser: "Correlation of real time spectro-ellipsometry and atomic force microscopy measurements of surface roughness on amorphous semiconductor thin films," *Appl. Phys. Lett.*, **69** (1996) 1297-1299.
- 6) K. Peter, G. Willeke, K. Prasad, A. Shah and E. Bucher: "Free-carrier absorption in microcrystalline silicon thin films prepared by very-high-frequency glow discharge," *Philos. Mag. B*, **69** (1994) 197-207.

(2010年3月17日受理)