



## 干渉分光法による多層膜厚の解析的評価

深沢 亮一・西沢 誠治

日本分光工業(株) 〒192 八王子石川町 2967-5

(1990年11月29日受付, 1991年2月14日受理)

### Analytical Estimation of the Multilayer Thicknesses Using the Interferometric Spectrometry

Ryoichi FUKASAWA and Seiji NISHIZAWA

Japan Spectroscopic Co., Ltd., 2967-5, Ishikawa-cho, Hachioji 192

(Received November 29, 1990; Accepted February 14, 1991)

For an estimation of each one of the layer-thicknesses in a multilayer-structure by the interferometric spectrometry, an analytical formulation is effectively represented with the spatial-gram defined as the spatial-intensity distribution given by the Fourier transform of reflectance spectrum. A few techniques of the spectral manipulations are also discussed to make advance of the estimation limit of layer-thickness.

#### 1. ま え が き

多層膜構造デバイスにおいては、各層の膜厚がデバイス特性を決める重要な因子のひとつであることから、近年、その製造工程における精密な膜厚制御が求められている。そこでは、各層の膜厚を非破壊でしかもサブミクロンの程度まで測る技術が要求される。従来、エネルギー反射度の解析から膜厚を評価する方法が知られているが<sup>1)</sup>、多層膜になるとそれぞれの層からの反射光と多重反射光の干渉成分が加わるためにエネルギー反射度は非常に複雑になり、解析を困難にする。一方では、赤外干渉分光法を用いて得られるインターフェログラムから半導体膜の膜厚を測定する評価法も考察されている<sup>2)</sup>。しかしながら、多層膜や薄膜(～0.1 μm)の場合までは拡張されていない。

ここでは、エネルギー反射度をフーリエ変換して多層薄膜の各層ごとの膜厚(～0.1 μm)を精度よく算出する技術的な方法を提案するとともに、その物理的意味を明らかにする。この処理法は、おもに赤外分光を利用した半導体多層薄膜の膜厚評価に有効である<sup>3)</sup>。

#### 2. スペーシャルグラム

屈折率に分散がなく、かつ吸収のない物質から成る多層膜系(Fig. 1)に、波数  $\sigma$  cm<sup>-1</sup> の自然光を入射させたときのエネルギー反射度  $R(\sigma)$  は次式で与えられる。

$$R(\sigma) = \frac{1}{2}(\bar{r}_s \bar{r}_s^* + \bar{r}_p \bar{r}_p^*) \quad (1)$$

ここで、 $\bar{r}_s$  および  $\bar{r}_p$  はそれぞれ s 偏光および p 偏光の複素振幅反射係数であり、よく知られているように、それらは次式で与えられる。すなわち s 偏光に対しては、

$$\bar{r}_s = \frac{(A+B p_{j+1})p_0 - (C+D p_{j+1})}{(A+B p_{j+1})p_0 + (C+D p_{j+1})} \quad (2)$$

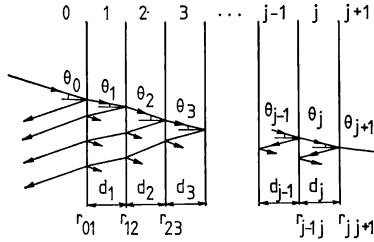
と書ける。ここで、

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos h_1 & -\frac{i}{p_1} \sin h_1 \\ -i p_1 \sin h_1 & \cos h_1 \end{pmatrix} \times \dots \\ \times \begin{pmatrix} \cos h_j & -\frac{i}{p_j} \sin h_j \\ -i p_j \sin h_j & \cos h_j \end{pmatrix} \quad (3a)$$

$$p_j = n_j \cos \theta_j \quad (3b)$$

$$h_j = (2\pi\sigma)n_j d_j \cos \theta_j \quad (3c)$$

$j$  は光の入射側から数えて  $j$  番目の層を表し、 $(n_j, \theta_j, d_j)$  はそれぞれ屈折率、屈折角、膜厚である。A, B, C,



**Fig. 1** Reflection from a multilayer structure.  $r_{j,j+1}$ ,  $\theta_j$  and  $d_j$  are the reflection coefficient, the incident angle and the layer thickness, respectively.

$D$  は s 偏光に対する 1 層から  $j$  層までの全体の特性行列の成分である。p 偏光の複素振幅反射係数は式(2)、(3a-c)中の  $p_j$  を  $q_j$  で置き換えた式で与えられる。その場合、 $q_j = \cos \theta_j / n_j$  となる。

つぎに、垂直反射におけるエネルギー反射度を、フーリエ変換したパターンに含まれる情報の意味を明らかにするために、基板の上の 2 層膜系からのエネルギー反射度について検討する。系全体の複素振幅反射係数  $\bar{r}$  は、各境界面の振幅反射係数  $\bar{r}_{j,j+1}$  と各膜厚の光路長に起因する位相変化  $h_j$  を使ってあらわに表すこともできる。すなわち

$$\bar{r} = \frac{\bar{r}_{01} + \bar{r}_{12}e^{i2h_1} + \bar{r}_{01}\bar{r}_{12}\bar{r}_{23}e^{i2h_2} + \bar{r}_{23}e^{i2(h_1+h_2)}}{1 + \bar{r}_{01}\bar{r}_{12}e^{i2h_1} + \bar{r}_{12}\bar{r}_{23}e^{i2h_2} + \bar{r}_{01}\bar{r}_{23}e^{i2(h_1+h_2)}} \quad (4)$$

ここで、 $\bar{r}_{j,j+1}$  は  $j$  層と  $j+1$  層の界面での複素振幅反射係数であり、そこでの位相変化を  $\phi_{j,j+1}$  とすれば、 $\bar{r}_{j,j+1} = r_{j,j+1} \exp(i\phi_{j,j+1})$  となる。 $r_{j,j+1}$  は、境界面の前側、後側の屈折率  $n_j$ ,  $n_{j+1}$  を使って  $r_{j,j+1} = (n_j - n_{j+1}) / (n_j + n_{j+1})$  と書ける。2 層膜系に対するエネルギー反射度  $R(\sigma)$  は  $R(\sigma) = \bar{r} \cdot \bar{r}^*$  より求めることができるが、その際、 $R(\sigma)$  の分子に現れる  $r_{01}^2$ ,  $2r_{01}r_{12} \cos(\phi_{01} - \phi_{12} - 2h_1)$ ,  $2r_{01}r_{23} \cos(\phi_{01} - \phi_{23} - 2(h_1 + h_2))$  以外の項は十分小さいので無視しても結果にはほとんど影響を与えない。また、分母の 1 以外の項は 1 に比べて十分小さいので無視すると、エネルギー反射度は近似的に  $R(\sigma) = r_{01}^2 + 2r_{01}r_{12} \cos(\phi_{01} - \phi_{12} - 2h_1) + 2r_{01}r_{23} \cos(\phi_{01} - \phi_{23} - 2(h_1 + h_2))$  となる。上記のような計算を、基板の上に  $j$  層ある場合の  $R(\sigma)$  について行うと次のようになる。

$$\begin{aligned} R(\sigma) = & r_{01}^2 + 2r_{01}r_{12} \cos(\phi_{01} - \phi_{12} - 2h_1) \\ & + 2r_{01}r_{23} \cos(\phi_{01} - \phi_{23} - 2(h_1 + h_2)) \\ & + \dots \\ & + 2r_{01}r_{j,j+1} \cos(\phi_{01} - \phi_{j,j+1} \\ & - 2(h_1 + h_2 + \dots + h_j)) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $h_j = (2\pi\sigma)n_j d_j$  である。

つぎに、エネルギー反射度のフーリエ変換を行う。エネルギー反射度の  $-\sigma_m$  から  $\sigma_m$  の波数領域にわたるフーリエ変換は

$$S(x) = \int_{-\sigma_m}^{\sigma_m} R(\sigma) \exp(i2\pi\sigma x) d\sigma \quad (6)$$

と表される。この空間変数  $x$  についての  $S(x)$  をスペーシャルグラム (spatialgram) と呼ぶことにする。上式に(5)式を代入して積分を実行する。その際、薄膜は吸収がないとしているから反射による位相変化は一定であり、したがって積分の外に出せる。さらに、奇関数の積分は 0 となることから、最終的に次式を得る。すなわち

$$\begin{aligned} S(x) = & 2\sigma_m r_{01}^2 \text{sinc}(2\pi\sigma_m x) \\ & + 2\sigma_m r_{01}r_{12} \cos(\phi_{01} - \phi_{12}) \\ & \times \text{sinc}[2\pi\sigma_m(x - 2n_1d_1)] \\ & + 2\sigma_m r_{01}r_{12} \cos(\phi_{01} - \phi_{12}) \\ & \times \text{sinc}[2\pi\sigma_m(x + 2n_1d_1)] \\ & + 2\sigma_m r_{01}r_{23} \cos(\phi_{01} - \phi_{23}) \\ & \times \text{sinc}[2\pi\sigma_m\{x - 2(n_1d_1 + n_2d_2)\}] \\ & + 2\sigma_m r_{01}r_{23} \cos(\phi_{01} - \phi_{23}) \\ & \times \text{sinc}[2\pi\sigma_m\{x + 2(n_1d_1 + n_2d_2)\}] \\ & + \dots \\ & + 2\sigma_m r_{01}r_{j,j+1} \cos(\phi_{01} - \phi_{j,j+1}) \\ & \times \text{sinc}[2\pi\sigma_m\{x - 2(n_1d_1 + \dots + n_jd_j)\}] \\ & + 2\sigma_m r_{01}r_{j,j+1} \cos(\phi_{01} - \phi_{j,j+1}) \\ & \times \text{sinc}[2\pi\sigma_m\{x + 2(n_1d_1 + \dots + n_jd_j)\}] \end{aligned} \quad (7)$$

ここでは、吸収のない媒質の垂直反射光を考えているので各界面における位相変化  $\phi_{j,j+1}$  は  $n_j < n_{j+1}$  のとき  $\pi$  であり、 $n_j > n_{j+1}$  のとき 0 である。したがって(7)式中の  $\cos(\phi_{01} - \phi_{j,j+1})$  は、 $j$  と  $j+1$  層の界面における反射で位相が  $\pi$  変化したときには +1、位相変化がないときには -1 になり、sinc 関数の前の符号の正負を与える。

スペーシャルグラムの第 1 項は原点のところでピークをもつような sinc 関数になる。第 2 項、第 3 項は原点から測って  $+2n_1d_1$  および  $-2n_1d_1$  の位置にピークをもつ。つまり、原点を中心として左右対称の位置に sinc 関数に特徴的なピークを示すようなパターンになる。正の方向のみを考えれば、原点から測って一つ目のピークまでの光学的距離は  $x_1 = 2n_1d_1$ 、二つ目のピークまでは  $x_2 = 2n_1d_1 + 2n_2d_2$  となっているので、1 層目の膜厚は  $d_1 = x_1/2n_1$  から求められ、また 2 層目の膜厚は  $d_2 = (x_2 - x_1)/2n_2$  より求められる。一般に、原点から測って  $j-1$  番目のピークと  $j$  番目のピークの光学的距離をそ

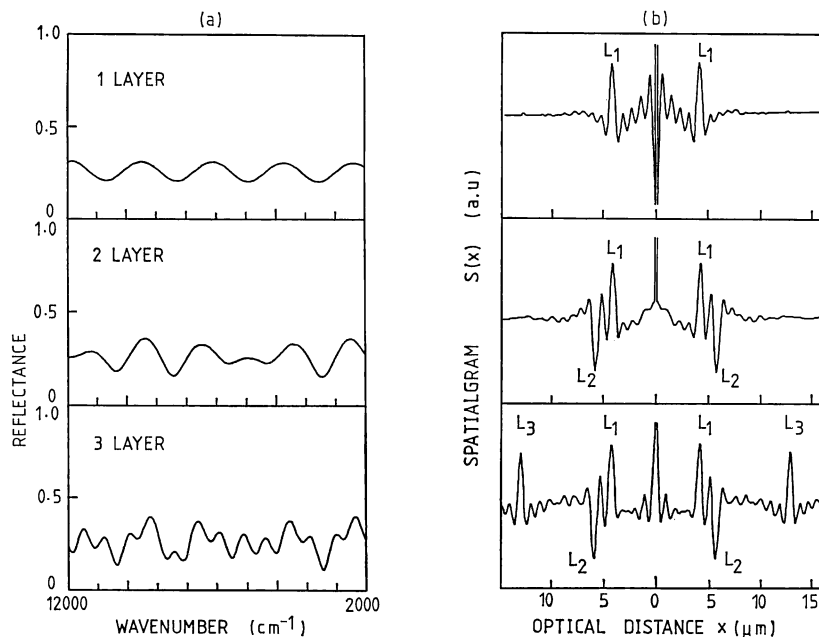


Fig. 2 Examples of calculated reflectance (a) and their spatialgrams (b) for multilayer structures.

れぞれ  $x_{j-1}$ ,  $x_j$  とすれば,  $j$  番目の層の膜厚  $d_j$  は  $d_j = (x_j - x_{j-1}) / 2n_j$  から求めることができる. ただし,  $x_0 = 0$  である.

さらに(7)式から明らかなように, sinc 関数のピークの極大の幅は  $1/\sigma_m$  によって決まるので,  $\sigma_m$  が小さければ幅が広がる. また, 各層の厚みが薄くなると sinc 関数どうしが接近し副極大が重なるので膜厚に対応したピークの判別がつかなくなる可能性もある. もし, エネルギー反射度が 0 から  $\sigma_m = \infty$  まで測定されていれば, それぞれのピークはデルタ関数となり, 膜厚の算出は容易になる. しかし, エネルギー反射度の測定は有限の波数領域でしか行われぬ. その場合の膜厚測定精度については検討を要する.

### 3. 数値的評価

Fig. 2(a)に, 多重反射を考慮した(1)式を使って得た垂直反射スペクトルの計算例を示した. 1層の計算には屈折率が 3.51 の基板の上に  $d_1 = 0.69 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 3.05$  の層がある系を仮定した. 2層の計算には屈折率が 3.05 の基板の上に  $d_1 = 0.69 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 3.05$  の層と  $d_2 = 0.24 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 3.51$  の層がある系を仮定した. 3層では屈折率が 3.51 の基板の上に  $d_1 = 0.69 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 3.05$ ,  $d_2 = 0.24 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 3.51$  および  $d_3 = 1.17 \mu\text{m}$ ,  $n_3 = 3.05$  から成る系を仮定した. ここで用いた屈折率に対応する実

際の材料は InGaAs (3.51) と InP (3.05) である. 1層の場合のエネルギー反射度はその大部分が(5)式の  $r_{01r_{12}}$  を含む項に起因するため単純なパターンを示しているが, 2層, 3層になると  $r_{01r_{23}}$  を含む項さらに  $r_{01r_{34}}$  を含む項が加わり, 複雑なエネルギー反射度になっていく様子がわかる. したがって, 層の数が多い場合には, エネルギー反射度は複雑になり, エネルギー反射度そのものから膜厚を算出するのはかなりやっかいになる. これを避けるための技術的な工夫としてわれわれは, エネルギー反射度をスペーシャルグラムに変換することを試みた. Fig. 2(b)に Fig. 2(a)の三つのエネルギー反射度に対応するスペーシャルグラムを示した. 層の数に対応した強いピーク  $L_1$ ,  $L_2$  および  $L_3$  が明確に現れ, ピークの位置からはじめに仮定した膜厚を正確に算出することができた.

### 4. 波形処理技術

膜厚を正確に求めるためにはピーク位置が明確なスペーシャルグラムを得る必要がある. 膜厚の精度はスペーシャルグラムの横軸の分解能  $\Delta x$  によって決まる.  $\Delta x$  とエネルギー反射度の波数の最大値  $\sigma_m$  との間には  $\Delta x = 1/2\sigma_m$  なる関係があるので, ピークを明確に識別できるようにスペーシャルグラムを得るためには, なるべく広い波数領域のエネルギー反射度を測定する必要があ

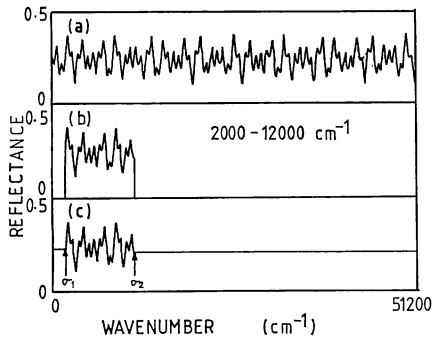


Fig. 3 Typical reflectance (a) for a 3-layer structure over full wavenumber region and the reflectances (b), (c) in a partial wavenumber region.

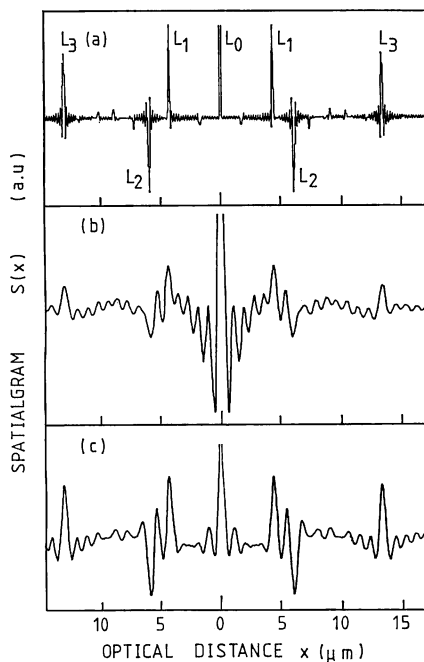


Fig. 4 The spatialgrams obtained from the reflectances (a), (b) and (c) in Fig. 3.

る。たとえば膜厚を精度  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  で算出したいときに必要とされる  $\sigma_m$  は  $51,200 \text{ cm}^{-1}$  となる。しかし、スペーシャルグラムを得るために実際に利用できるエネルギー反射度の波数領域は、屈折率の分散や吸収などの影響を受けない限られた波数領域である。このように限られた有限波数領域のエネルギー反射度から得られるスペーシャルグラムは幅が広がった sinc 関数の和になり、膜厚算出に利用できない。それを改善する方法を以下に提案する。Fig. 3(a)と Fig. 4(a)は3層膜の0から  $51,200 \text{ cm}^{-1}$  までのエネルギー反射度とそれに対するス

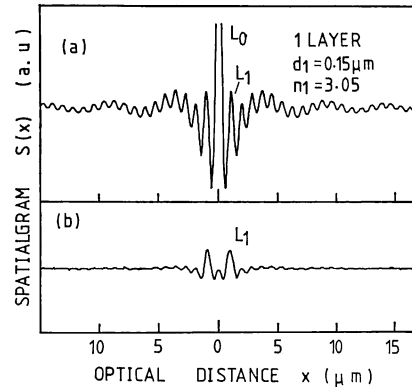


Fig. 5 Spatialgram of thin layer structure.

ペーシャルグラムで、膜厚に対応した3本のピーク  $L_1$ ,  $L_2$  および  $L_3$  が明確に現れている。一方、Fig. 3(b)と Fig. 4(b)は  $2,000$  から  $12,000 \text{ cm}^{-1}$  までのエネルギー反射度とスペーシャルグラムである。このように限られた狭い領域のエネルギー反射度のフーリエ変換から得られるスペーシャルグラムは広い波数領域のエネルギー反射度に矩形波を乗算してフーリエ変換したものに相当する。このとき、スペーシャルグラムのパターンは中心付近で激しく振動するような形になり、三つの膜厚に対応したピークのほか疑似ピークが数多く現れ、膜厚を評価することはきわめて困難になる。これを避けるための試みとして、Fig. 3(c)のように0から  $\sigma_1$  および  $\sigma_2$  から  $51,200 \text{ cm}^{-1}$  に定数データを加えたものを0から  $51,200 \text{ cm}^{-1}$  のスペクトルとみなしてフーリエ変換してみた結果、Fig. 4(c)に示したようなスペーシャルグラムを得た。膜厚に対応したピークが見やすくなっていることがうかがえる。これは見かけ上の  $\sigma_m$  を大きくとることによって sinc 関数をデルタ関数的にする処理である。また、第1層目の膜厚が薄くなると ( $\sim 0.1 \mu\text{m}$ )、Fig. 5(a)に示したように、第1層目から引き起こされるピーク  $L_1$  と表面反射によるピーク  $L_0$  が完全に重なってしまい、両者の識別が困難になり、膜厚の算出ができなくなる。その場合には、表面反射からの寄与分を取り除く処理が有効になる。その手法としては、まずはじめに表面反射によるピークがエネルギー反射度の定数成分のフーリエ変換に起因していることから、エネルギー反射度の平均値をエネルギー反射度から差し引き、つぎにスペクトルがない領域に定数0を加えたスペクトルデータをフーリエ変換すればよい。そこでは、スペーシャルグラム中央の sinc 関数への表面反射からの寄与分が取り除かれるために、Fig. 5(b)に示したように、非常に薄い層に対応したピーク  $L_1$  が明確に

分離される。

## 5. む す び

ここでは多層膜干渉による反射度から多層膜の膜厚を算出するために反射度をフーリエ変換したパターンが大変有効に利用できることを示した。さらに、狭い波数領域の反射度においても、また薄い層に対しても膜厚測定精度を改善するための波形処理法を提案した。なお、この方法は、フーリエ変換分光光度計に適用するために考案したものであるが、反射度をもとに膜厚算出を行うので、反射度を求める分光方式によらない利点がある。

最後に、反射度の解析的記述の展開にあたっては、元

筑波大学教授工藤恵栄博士に示唆深い議論をいただいた。ここに深謝の意を表します。

## 文 献

- 1) P. A. Schumann, Jr. and C. P. Schneider: "Measurement of silicon epitaxial layers less than  $1\text{-}\mu$  thick by infrared interference," J. Appl. Phys., **41** (1970) 3532-3535.
- 2) I. I. Foteva, G. G. Gorbunov and I. A. Voi'kenshtein: "Measuring the thickness of semiconductor films by an interferometric method," Sov. J. Opt. Technol., **42** (1975) 46-47.
- 3) 服部 亮, 広中美佐夫, 玉利邦喜, 西沢誠治: "FTIR によるエピ多層膜の膜厚測定", 第50回応用物理学会学術講演会予稿集 (1989) p. 783.