



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	導波光による薄膜の屈折率の測定
Author(s)	田中, 啓司; Tanaka, Keiji
Citation	北海道大學工學部研究報告, 90, 99-107
Issue Date	1978-11-29
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41511">https://hdl.handle.net/2115/41511</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	90_99-108.pdf



## 導波光による薄膜の屈折率の測定

田 中 啓 司\*

(昭和53年6月15日受理)

### Measurements of Refractive-Index in Thin Films by Optical Waveguiding

Keiji TANAKA

(Received June 15, 1978)

#### Abstract

A prism coupler, developed for exciting guided optical waves in integrated optical circuits, can be used to determine the refractive index and the thickness of a light-guiding thin film. Both quantities are obtained simultaneously by measuring the coupling angles of a light beam at the prism and plotting the results on a dispersion chart. The fundamentals, mathematical procedures and the experimental details are reported. It is revealed that satisfactory accuracies of 0.001 and 0.001  $\mu\text{m}$  for refractive index and film thickness, respectively, can be obtained.

#### 1. はじめに

物質の光学的性質は基本的には、複素屈折率  $\hat{n} = n + ik$  ( $n$ : 屈折率,  $k$ : 消衰係数) を電磁波の全周波数域にわたって測定すれば決定される。消衰係数  $k$  は吸収率  $\alpha$  と、 $k = \lambda\alpha/4\pi$  で関係付けられている ( $\lambda$ : 真空中での電磁波の波長)。吸収率  $\alpha$  は異なる厚さの試料の透過率の値より計算し求める方法が一般的である。したがって、消衰係数  $k$  の値は、多くの場合、比較的簡単に決定され、また基本的な物性的知見を与えるが、屈折率  $n$  の値も相補的に重要な物理量である。さらに応用の立場から考えると、例えば干渉フィルター、位相ホログラム、光導波路、光ファイバー等の材料として考えると、 $n \gg k$  であるべきであり、屈折率  $n$  の値を決定することは重要である。

以下、対象として「薄膜」を考えると、可視光領域で屈折率の値を決定する方法として考えられる測定法は表1の様にまとめられる<sup>1-4)</sup>。この中で屈折率と膜厚を同時に測定するのに適するのは、偏光解析法とプリズム結合法である。

最近、非晶質カルコゲン系半導体薄膜において「光誘起構造変化」と呼ばれる現象が発見され、この機構の解明に関する研究が多くなされている<sup>5)</sup>。また、この現象を用いて、上記の薄膜材料を例えば感光材料として応用しようとする試みもなされている<sup>6)</sup>。すなわち、光誘起構造変化とは、励起光の照射により薄膜のミクロな構造が恒久的に変化するものであるが、この変化に対応して例えば屈折率の様なマクロな物理量も変化する。したがって、光照射による屈折率変化という現象に注目すれば、この材料は現像過程の不要な位相ホログラムを形成することも可能である。

\* 共通講座 工業力学第一講座

表1 薄膜の屈折率についての情報を与える測定法  $n$ ; 屈折率,  $k$ ; 消衰係数,  $W$ ; 膜厚

測 定 量	方 式	原 理 式	物 理 量	文 献
1. 全反射角	アッペの方法	フレネルの式	$n$	1)
2. ブリュースター角	アベレスの方法	〃	$n$	2)
3. 偏光反射率	偏光解析法	〃	$n, W$	2)
4. 分光反射率	—	$K-K$ 関係式	$n, k$	3)
5. 位相	種々の干渉計	干渉条件	$n \times W$	1)
6. 分光透過率	—	〃	$n \times W$	3)
7. 共振角	プリズム結合法	導波条件	$n, W$	4)

著者は、光誘起構造変化にともなう屈折率と膜厚の変化を精密に測定する目的から、プリズム結合法に基づく測定系を検討し試作した。この論文ではそれについて報告する。2. では測定原理と誤差の評価について、3. では具体的な測定例について記述し、4. では結語として試作した測定装置の利点や制約を明らかにする。

## 2. 測 定 法

電磁波が自由空間を伝播する際には TEM 波として進行する。しかし、例えば膜厚が波長程度の薄膜内に電磁波のエネルギーを閉込め、薄膜に沿って内部を伝播させると、TEM 波としては伝播せず、TE 波や TM 波のいわゆる導波モードとなる。導波モードの導波条件は薄膜の性質、具体的には膜厚と屈折率、等に依存する。Tien ら<sup>7)</sup>は TEM 波を導波モードに変換し導波光を励起する手段としてプリズムを用いる方法を示したが、この方法によると導波モードの導波条件の測定も可能である。したがって、薄膜の膜厚と屈折率の値を求めうる。これがプリズム結合法の原理である。

### 2.1 測 定 原 理<sup>8,9)</sup>

図1に示すように、基板(屈折率  $n_s$ )の上に屈折率が  $n_f$ (等方的で均質)で膜厚が  $W$ の薄膜が付着している系を考える。薄膜の上面に接する物質(通常は空気)の屈折率を  $n_c$ とし、これらの物質は考えている波長  $\lambda_0$ の単色光に対し、吸収は示さないものとする。薄膜内を光が導波され得る必要条件是、

$$n_f > n_s \geq n_c \quad (1)$$

である。すなわち、薄膜の屈折率は周囲のものより大きくなければならない。また導波光は  $z$  方向には定在波であるから導波条件は、

$$2\beta_m W - 2\phi_{fs} - 2\phi_{fc} = 2m\pi \quad m=0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

と書ける。ここで  $\phi_{fs}$  と  $\phi_{fc}$  は各々、薄膜と基板、薄膜と空気、の界面での導波光の反射の際の位相の変化であり、 $\beta_m$  は導波光の  $z$  方向の伝播定数である。また整数  $m$  はモード指数と呼ばれる。 $\beta_m$  は図1に示すように導波光の界面での全反射角を  $\theta_{fm}$  とすると

$$\beta_m = k_0(n_f^2 - N_m^2)^{1/2}, \quad N_m = n_f \sin \theta_{fm} \quad (3)$$

と書きうる。(下つき添字  $m$  は前述のモード指数)。ここで  $k_0$  は真空中での単色光の波数(=  $2\pi/\lambda_0$ )であり、 $N_m$  は実効屈折率とよばれる量である。この値は物理的には  $x$  方向への導波光の伝播に寄与する屈折率と解釈でき、

$$n_f > N_0 > N_1 > \dots > n_s \quad (4)$$

の値をとる。 $N_m$  は考えている系の物理定数、導波光のモードと偏光(TE波かTM波か)に依存する。 $\phi_{fs}$  と  $\phi_{fc}$  は、例えばTE波の場合、

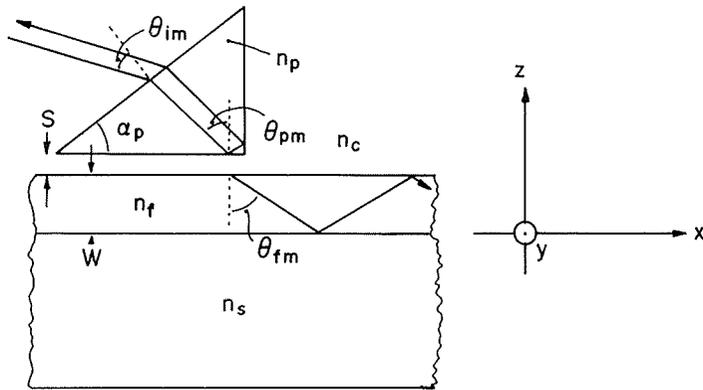


図1 解析モデルと座標系

$$\phi_{fc} = \tan^{-1}\{(N_m^2 - n_s^2)/(n_f^2 - N_m^2)\}^{1/2} \quad (5)$$

$$\phi_{fc} = \tan^{-1}\{(N_m^2 - n_s^2)/(n_f^2 - N_m^2)\}^{1/2} \quad (6)$$

と書ける。

(2)~(6) 式は、幾可光学的にはフレネルの反射式と干渉条件より、また波動光学的にはマックスウェルの方程式で  $z$  方向に定在波の解が存在すると仮定して解くことにより、導出できる。したがって、前者の考え方に従えば導波条件 (2) は干渉条件に他ならない。また後者の方法によれば、解法は量子力学的な波動方程式に用いられる方法と非常に良く似ていることが解かる。(2)~(6) 式より明らかなように、基板の屈折率  $n_s$ 、薄膜の上面媒質の屈折率  $n_c$ 、モード指数  $m$ 、偏光方向などが既知であれば、 $N_m$  を測定することにより、薄膜の屈折率  $n_f$  と膜厚  $W$  の関係が求まる。さらに、2 個以上のモードについて  $N_m$  が測定されれば、 $n_f$  と  $W$  の値は一義的に定まる (式 (9) を参照のこと)。

Tien らにより提案されたプリズム結合法<sup>7)</sup>とは、 $N_m$  を測定するのに薄膜上面にプリズムを近接させ、導波光を励起することにより行なう。すなわち、図1に示すように、薄膜上に屈折率  $n_p$  の透明なプリズムを近接させる。プリズム底面への光の入射角  $\theta_p$  が臨界角  $\sin^{-1}(1/n_p)$  より大きければ光は底面で全反射される。この時、もしもプリズム底面と薄膜上面の間隔  $S$  が  $S \leq \lambda_0$  であれば、全反射に伴ってしみ出した光のエネルギーの幾分かは、薄膜中に浸入する。この現象は、光学においては frustrated total reflection と呼ばれるものであり、量子力学的にはトンネル効果に他ならない。この様な情況下でさらに、 $\theta_p$  が屈折の法則 (言いかえれば  $x$  方向の波数の保存則)

$$n_p \sin \theta_{pm} = n_f \sin \theta_{fm} = N_m \quad (7)$$

を満足するシンクロ角  $\theta_{pm}$  に等しいと導波光が共鳴的に励起される。ただし、(7) 式はプリズムが近接して配置されている影響は導波条件 (2) 式において、ほとんど無視しうる (すなわち  $\theta_{fm}$  はプリズムの有無に依存しない) という近似下で成立する。プリズムの光の入射面と底面のなす角を  $\alpha_p$ 、入射角を  $\theta_i$  とすると、幾可光学的な考察より

$$\theta_p = \sin^{-1}(\sin \theta_i / n_p) + \alpha_p \quad (8)$$

式 (7) (8) より、 $n_p$  と  $\alpha_p$  が既知であれば、導波光が励起されている状態で、 $\theta_{im}$  を測定すれば  $N_m$  が計算できることが解かる。 $N_m$  の値によって式 (2)~(6) により薄膜の物理量、 $n_f$  と  $W$ 、が求められる。

以上をまとめると以下に示すようになる。

$$\theta_{im} \xrightarrow{\text{(7) (E)}} N_m \xrightarrow{\text{(2)~(6)}} n_f, W \quad (9)$$

既知量  $n_p, \alpha_p$  既知量  $n_s, n_c, m$ , 偏光,  $k_o$

ここで問題となるのは、 $\theta_{im}$  が測定できて式 (7) (E) より  $N_m$  の値が求まったとして、その時の  $m$  をどの様にして決定するかということである。これは何個の  $N_m$  の値が測定できるかという事とも関連する。すなわち、測定している薄膜中をいくつのモードが伝播しうるかという事に関連する。

- i) 1 個の場合～一般的には  $m$  の値は決まらない。 $m$  の値が決まったとしても  $n_f$  と  $W$  の関係のみが決定される。
- ii) 2 個の場合～一般的には  $m$  の値は決まらない。 $n_f$  か  $W$  の大体の値が解かっていれば、 $n_f$  と  $W$  の値を厳密に決められ得る。
- iii) 3 個以上の場合～(4) 式を参考にして適当に  $m$  の値を仮定し、それによって計算される  $n_f$  と  $W$  の値の各々が収束するようにして  $m$  を決める。この過程で、当然  $n_f$  と  $W$  の値は厳密に求められる。

一般的にいえば、 $n_f$  と  $W$  が大きければ大きいほど多くのモードが伝播しうる。これらが小さい場合には 1 個のモードも伝播しないこともある（この事情は、量子力学における井戸型ポテンシャル中に閉じ込められる固有状態が何個あるかということと全く同等である。この場合には  $-n_f^2$  が井戸の深さに、 $-N_m^2$  が固有値に対応する。）。

以上、測定原理を示したが、媒体の屈折率は原則として、式 (1) (4) (7) より

$$n_p > n_f > N_m > n_s \geq n_c \quad (10)$$

であればよいことが解かる。 $(n_f > N_m > n_p > n_s)$  の時は、その様な値のプリズムにより  $m+1$  番以上のモードは励起しうる場合もある。）

ここで、この測定原理に含まれていた主な仮定を要約すると以下の様になる。

- a. 薄膜は等方的で均質
- b. すべての媒質に吸収はない。
- c. プリズムの導波条件への影響は無視できる。

次節でこれらの近似の妥当性を検討する。a や b は基板やプリズム等についても検討する必要があるが、実際には、この様な仮定を満足する媒質を用いることが可能なので、以下では薄膜についてのみこれらの仮定を検討する。

## 2.2 仮定の検討

2.2a 等方性と均質性 例えば適当な温度に保持されている基板に蒸着された硫化カドミウム薄膜は  $x-y$  方向と  $z$  方向で異方性を示すことが知られている。同様の現象はセレン化鉛、酸化亜鉛などかなり多くの物質でもみられる<sup>10)</sup>。結論から言えば、この様な場合には、 $x-y$  面方向と  $z$  方向の屈折率を測定しうる<sup>7)</sup>。ただし以下の事に注意する必要がある。すなわち、導波光の電場ベクトルは、TE 波の場合には  $x-y$  平面内にあり、TM 波の場合には  $z$  方向を向いている。したがって、TE 波と TM 波で測定される屈折率は各々、 $x-y$  方向と  $z$  方向の値になる。各々の偏波で測定される幾つかの実効屈折率  $N_m$  の値を各々の分散式 (2) に代入して屈折率の値を求めればよい。勿論、膜厚については両方の測定値から計算される値は同じとなるはずである。また斜蒸着された試料の様に面内でも異方性のある場合は、各々の方向へ導波光を走らせて上記と同様の解析をすれば良い。

次に不均質性について検討する。例として TE 波を考えると、図 1 の系において波動方程式は

$$\partial^2 E_y / \partial z^2 + k_0^2 (n_f^2 - N_m^2) E_y = 0 \quad (11)$$

ただし  $i=c(x>W), f(W>x>0), s(x<0)$  である。ここで不均質な屈折率  $n_f(y, z)$  が

$$n_f(y, z) = n_{fo} + n_{f1}(y, z), n_{fo} \gg n_{f1}(y, z), \langle n_{f1}(y, z) \rangle = 0 \quad (12)$$

と書けるとする。ただし  $\langle \dots \rangle$  は空間平均を表わす。1次の摂動論で考えると、 $n_{f1}(y, z)$  による実効屈折率の変化  $N_{m1}$  は ( $N_m \equiv N_{mo} + N_{m1}$ ),  $E_y(z)$  が規格化されているとすると、

$$\begin{aligned} N_{m1} &= (n_{fo}/N_{mo}) \int_{-\infty}^{\infty} dz \int_{-\infty}^{\infty} dy E_y(z)^2 n_{f1}(y, z) \\ &= (n_{fo}/N_{mo}) \int_0^W dz E_y(z)^2 \int_{-\infty}^{\infty} dy n_{f1}(y, z) \end{aligned} \quad (13)$$

ここで (12) より  $y$  の積分は  $\int_{-\infty}^{\infty} dy n_{f1}(y, z) = 0$  となるから、

$$N_{m1} = 0 \quad (14)$$

すなわち、1次の摂動論の範囲で考える限りにおいては不均質性の影響は考えなくてよい。TM波の場合には解析は複雑となり、一般には (12) 式の条件下でも誤差を生ずると思われる。

さらに不均質性が大きい場合には、 $y$  方向と  $z$  方向に分けて考える必要がある。前者の場合には、ストリップ型導波路などの解析に用いられる実効屈折率法<sup>1)</sup>の考え方に従えば、光束の直径で空間的に平均化された値が求められると考えて良いであろう。

$z$  方向の不均質性は、例えば多成分系の試料を蒸着した場合などに生じうる。このような場合には成分比が深さ方向に変化している膜と成り易く、その結果、屈折率が  $z$  方向で変化する。2.1 に記述した解析では膜の屈折率  $n_f$  を一様としてあり、このような試料では本測定法により求められる屈折率と膜厚の値の誤差はかなり大きくなる。(実際に、これによると思われる誤差が As-S 系薄膜の実験において観測される場合もあった。) 一方、White と Heidrich<sup>11)</sup> らは拡散などの方法により作った不均質導波路の深さ方向の屈折率分布を  $\theta_{im}$  の測定値から WKB 法による解析で求める方法を示している。この方法を薄膜の場合に応用し  $n_f(z)$  を測定することも可能と思われるが、その際には膜厚は少なくとも  $1 \mu\text{m}$  以上で、いくつかの  $N_m$  の値が求められる必要があると考えられる。

2.2 b 吸収の影響 これについては、Kane と Osterberg<sup>12)</sup> や Swalen ら<sup>13)</sup> によって考察されている。吸収の影響は試料の物理定数とともにモード指数  $m$  や偏光方向によっても異なる。文献 12) によれば、屈折率  $n_f$  が消衰係数  $k_f$  に対し、 $n_f \gg k_f$  であれば 1 次の摂動論の近似下では、吸収の影響は一般的に考えなくてよい事、また定量的には  $k_f \leq 10^{-2}$  ( $\alpha_f \leq 10^3 \text{ cm}$ ) では、吸収による実効屈折率の変化  $\delta N$  は  $\delta N \leq 10^{-4}$  程度であることが報告されている。一方、文献 13) によると  $k_f \simeq 1$  で  $\delta N \simeq 10^{-3}$  となることが示されている。As-S 系薄膜の場合には、 $\lambda_0 \simeq 633 \text{ nm}$  で  $k_f \simeq 10^{-2}$  と考えてよいので、求められる実効屈折率の有効桁は 4 桁より良いと考えられる。

2.2 c プリズムの影響  $a, b$  で考察した誤差は、薄膜が理想的なものであれば、完全に無視しうるものである。しかし、プリズムの影響は本測定法に本質的なものである。すなわち、一般にどんな測定法でも、被測定物体に対し何らの影響も与えずに計測することはできない。今の場合にはプリズムを結合し導波光を励起させることがこの影響に相当する。理論的にこれを評価することはむずかしいが、プリズムの結合効率  $\eta$  (入射光強度が導波光へ変換される際の変換効率) に比例して増大すると考えてよいであろう。結合効率  $\eta$  は、摂動法によって Tien と Ulrich<sup>9)</sup> により解析されている。それによると、

$$\begin{aligned} \eta &= (8W \tan \theta_{fm} / |T|^2) \{1 - \exp(-|T|^2 / 4W \tan \theta_{fm})\}^2 \\ &\quad |T|^2 \leq 4 \exp\{-2k_0(N_m^2 - n_c^2)^{1/2} S\} \end{aligned} \quad (15)$$

ただし、 $l$  は光束のプリズム底面での  $x$  方向の長さである。(15) 式によると、プリズム底面と薄膜上面の間隔  $S$  が大きくなると結合効率  $\eta$  は小さくなり、したがってプリズムの影響が小さくなるのが解かる。しかし、 $S$  を実験的に測定することは困難で、(15) 式によって  $\eta$  を評価することはむずかしい。

一方、実験では後述するように  $\eta$  を測定することは可能である。したがって、間隔  $S$  を変化させ、 $\eta$  を測定し、その時の  $\theta_{im}$  を測定し、 $\eta$  の小さな値での  $\theta_{im}$  をもってプリズムの影響のない値と考えるのが妥当であり簡単である。後述する実験では、 $\eta \leq 0.2$  とすれば、 $\delta\theta_{im} \leq 0.01^\circ$  であった。これは  $\delta N \leq 10^{-4}$  に相当する。

### 3. 実 験

#### 3.1 実 験 装 置

試作した装置の概略を図2に示す。測定に用いた光源  $LS$  は、波長 633 nm の He-Ne レーザーであって出力が 3 mW のものである。実際の測定では、この測定光の薄膜への影響をさける目的から（特に光誘起構造変化の場合には影響がやすい）、ND フィルターで光強度を約  $1\mu W$  に減衰させて用いている。偏光子  $PL$  の方向で導波光の偏光方向を制御する。凸レンズ  $L$  は  $f \leq 20$  cm のものであり、プリズム底面に入射光を集束する。このレンズは無い方が入射角  $\theta_{im}$  の読み取り精度は向上するが、反面、導波光は励起しづらくなるので角度の精度を考慮して適当な値に決定する必要がある。入射光はプリズム底面で反射された後、光電子増倍管  $D_1$  で強度が測定される。一方、光電子増倍管  $D_2$  は入射光強度を測定する。 $D_1$  と  $D_2$  の出力電圧の比は角度  $\theta_i$  (回転テーブルの目盛による読み取られる) を変化させると図3の様な変化を示す。 $D_2$  の出力電圧はほぼ一定であるが、 $D_1$  の出力が或る角で極小を示すのは、丁度この角度で導波光が共鳴的に励起され、プリズム底面からの反射光の強度が導波光のエネルギー分だけ減少することに対応している<sup>4)</sup>。このディップの半値巾  $\delta\theta_{im}$  は、プリズムの結合度、凸レンズの集点距離や薄膜の品質などにより決定されるが、普通  $\delta\theta_{im} \leq 0.1^\circ$  である。よって、入射角は回転テーブルのバックラッシュ等を考慮しても、 $\delta\theta_{im} \leq 0.01^\circ$  の精度で測定しうる。また、プリズムの結合効率  $\eta$  は  $\eta = (V_1 - V_2)/V_1$  と書けるので ( $V_1$  と  $V_2$  は各々、ディップからずれた角での信号値、ディップ中心での極小値) 容易に実験から求められる。なお、検出器  $D_1$  と  $D_2$  には迷光の影響を小さくする目的から中心波長 633 nm の干渉フィルターがつけられている。

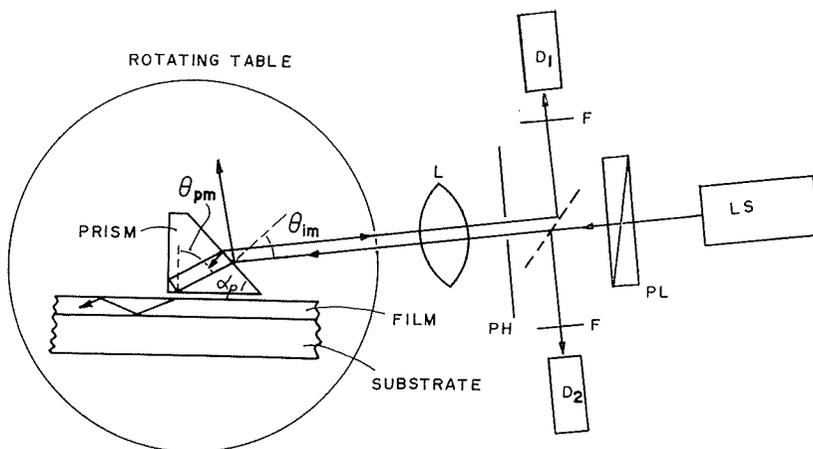


図2 実験装置の概略図

回転テーブルは、入射光のプリズムへの入射位置を調整する目的から、 $X$ - $Y$  微動ステージ上に設置されている。さらに回転テーブル上には、回転テーブルの中心軸とプリズムの中心を合わせるために  $X$ - $Y$  微動ステージが備えられている。また、入射光の高さ方向の位置を微調整するために、 $Z$  微動ステージも付けられていて、この上にプリズムと薄膜試料の圧着器具が取り付けられている。

プリズムは  $\alpha_p = 45^\circ$  の一辺が 5 mm の小さなルチル製のものである。この様に小さなプリズムを用いる理由は、プリズムを回転させた時の光束のプリズム底面での位置ずれが小さい必要があることによる。また測定対象である As-S 系薄膜の屈折率は、633 nm の波長において 2.2 ~ 2.6 であるので<sup>14)</sup>、ルチル製のプリズム ( $n_e = 2.872$ ,  $n_o = 2.584$ ) を用いる必要がある。またさらに、 $\alpha_p = 45^\circ$  のものを用いたが、この場合には図 1 よりも明らかな様に、入射角  $\theta_i$  は実際には  $-90^\circ < \theta_i < 90^\circ$  に限定される。したがって、式 (7) (8) より  $1.2 < N_m < 2.6$  となる。一般的には、薄膜の屈折率を予測して適当な形状と屈折率のプリズムを選択する必要がある。さらに、出来る限り広範囲の入射角をとれるように、プリズム・ホルダーの形状も考慮する必要がある。

### 3.2 測定例

実際の測定においては、式 (9) に示した手順によって、測定値  $\theta_{im}$  から膜厚  $W$  と屈折率  $n_f$

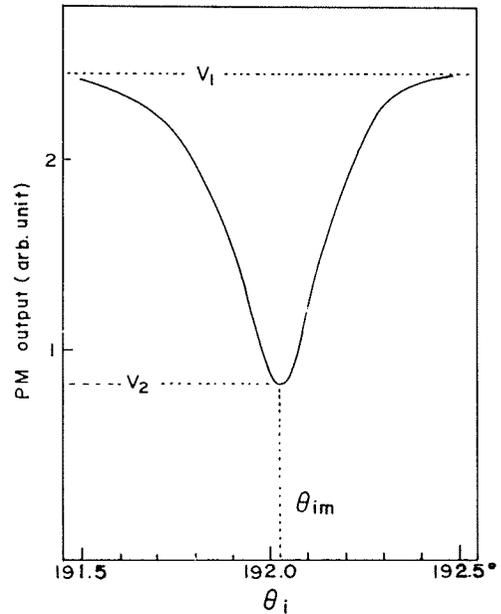


図3 共振特性 (プリズムへの光束の入射角  $\theta_i$  と光電子増倍管出力の関係)。 $\theta_i = \theta_{im}$  でモード指数  $m$  の導波光が励起される

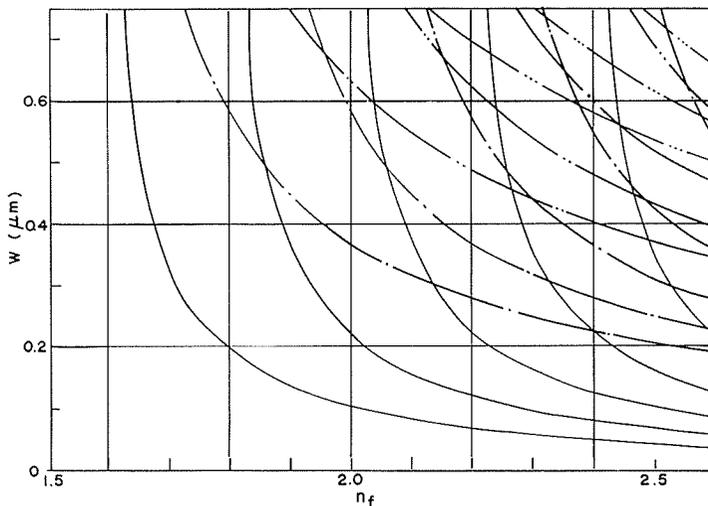


図4 解析チャートの一例。実効屈折率とモード指数を変数とした薄膜の屈折率と膜厚の関係。  $n_s = 1.474$  とし TE 波についてのみ記す。—— $m=0$ ；— — — $m=1$ ；- · - · - $m=2$ ；- · · - $m=3$ 。左下側より  $N_m = 1.6, 1.8, 2.0, \dots$

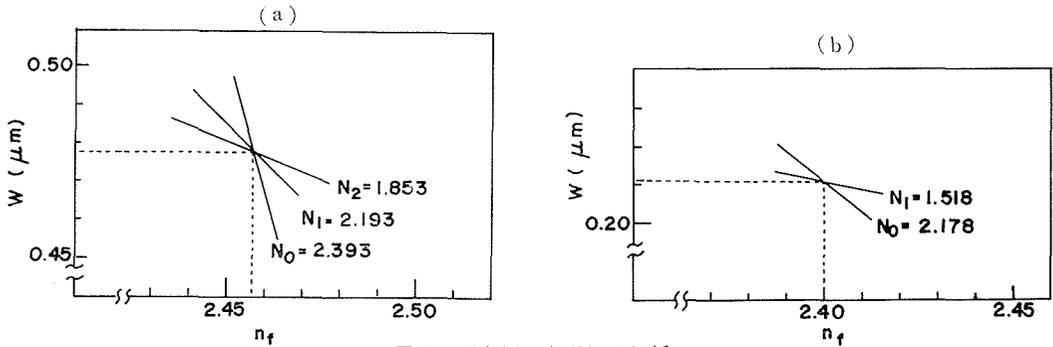


図5 測定例 (a) (b) の解析

表2 (a) 真空蒸着法により作られた非晶質  $As_{40}S_{60}$  薄膜 (TE波で測定)。 (b) 真空蒸着法により作られた非晶質  $As_{28}S_{72}$  薄膜を熱処理したもの (TE波で測定)

m	測定値 $\theta_{im}$	実効屈折率	結 果
0	34.70°	2.393	} $n_f = 2.457$ $W = 0.478 \mu m$
1	13.81°	2.193	
2	-14.00°	1.853	

m	測定値 $\theta_{im}$	実効屈折率	結 果
0	12.49°	2.178	} $n_f = 2.400$ $W = 0.211 \mu m$
1	-40.58°	1.518	

(a)

(b)

を求める。しかし一般的には、実効屈折率  $N_m$  より  $n_f$  と  $W$  を計算する過程は式 (2)~(6) に示す様になかなり複雑である。ゆえに著者は、式 (2)~(6) をあらかじめ種々の  $n_f$  と  $W$  の値で解いて、その時の  $N_m$  の値をグラフとしたチャートを作った。1例を図4に示す。これは、 $n_s = 1.474$  (パイレックスガラス) とし TE 波について、 $m=0, 1, 2, 3$  について示してある。さらに図4の一部を拡大したものを図5に示す。このようなチャートを用いることにより、求められた  $N_m$  の値の交点の  $x, y$  座標として、 $n_f$  と  $W$  がグラフ上で容易に求めることができる。

測定例 (a) (b) を表2と図5に示す。求められた屈折率の値は、各々、報告されている値  $2.42 \pm 0.05$  (波長 827 nm において)<sup>15)</sup> や  $2.40 \pm 0.02$  (波長 633 nm)<sup>16)</sup> と良く一致している。また膜厚についても多重干渉計による測定と、干渉計の測定誤差  $\pm 50 \text{ \AA}$  以内で完全に一致した。

以上の様に本測定法は薄膜の屈折率と膜厚を精度よく求めることができるが、図3に示した共振特性を利用すると電気光学定数の様な屈折率変化の測定については約  $10^{-7}$  の感度が得られる。これは、あらかじめ回転テーブルを共振曲線 (図3) の傾きが最大となる位置に固定し、その状態で薄膜への印加電圧と光電子増倍管の出力信号の関係を測定する。この信号は、出力信号と角度  $\theta_i$  の関係、すなわち共振特性、を測定しておけば実効屈折率の変化に読み直される。印加電圧を交流とし位同期検波法を用いて上記の感度を得ることができる。

#### 4. 結 語

プリズムによって導波光を励起することにより薄膜の屈折率と膜厚を測定する方法について検討し、その諸特性を明らかにした。試作した装置の測定精度は屈折率に対し約 0.001、膜厚に対しては  $0.001 \mu m$  であった。この精度の限界は主に、用いた微動装置の精度、用いたプリズムの諸特性の精度、の二点によるものであり、さらに改善することが可能である。しかし得られた精度は当初に計画した光誘起構造変化の測定には十分なものである。

以下にこの測定法の特徴を列記する。

1. 屈折率と膜厚を一義的に高い精度で測定できる。精度は偏光解析法と同程度と考えられる。

2. 屈折率の異方性の測定が可能である。また屈折率分布を測定しうる可能性がある。
3. 屈折率変化の測定では位相同期検出法を用いることが可能で、その場合には  $10^{-7}$  の変化量が測定しうる。
4. 微小面積の試料で測定が可能である。すなわち、本測定法では導波光を励起できる条件を測定するのであって、励起された導波光が伝播する必要はないので、必要な試料面積は収束した光束の直径程度で良い。
5. 測定対象の薄膜は透明に近いものでなければならない。測定可能な薄膜の屈折率に制限がある(式(10))。膜厚は最小で  $\sim 0.1 \mu m$  は必要である。
6. 理論上は非接触測定であるが、実際にはプリズムを圧着させる必要があり、薄膜は清浄なものでなければならない。
7. 一般には測定光としてレーザーが必要である。

最近、Kikuchi と Matsuda<sup>17)</sup> はプリズムにより励起した導波光を薄膜中に伝播させ、非常に小さな吸収を薄膜においても測定することが可能であることを示した。導波光による薄膜の物性測定法は、光集積素子の開発にともなって、今後さらに発展するものと思われる。

終るに当り、終始有益な御助言を賜った本学大塚喜弘教授に深く感謝の意を表したい。

この研究は文部省科学研究費(奨励研究 A)の援助のもとに行われた。尚、計算に際しては、北大大型計算機センター FACOM 230-75 を利用した。

#### 参 考 文 献

- 1) Heavens, O. S.: *Optical Properties of Thin Solid Films*, (Dover Publications, Inc., 1954) pp. 96.
- 2) 薄膜工学ハンドブック, 日本学術振興会編, (オーム社, 1964) pp. II-277.
- 3) 応用分光学ハンドブック, 吉永弘編, (朝倉書店, 1973) pp. 172.
- 4) Tamir, T. (ed.): *Integrated Optics*, Top. Appl. Phys. 7 (Springer, Berlin, 1975).
- 5) DeNeufville, J. P., Photostructural Transformations in Amorphous Solids. In B. O. Seraphin (ed.), *Optical Properties of Solids—New Developments*, (North-Holland, Amsterdam, 1975).
- 6) 井郷健夫, 固体物理, 12 (1977) 483.
- 7) Tien, P. K., R. Ulrich and R. J. Martin: Appl. Phys. Lett., 14 (1969) 291.
- 8) Tien, P. K. and R. Ulrich: J. Opt. Soc. Am., 60 (1970) 1325.
- 9) Ulrich, R. and R. Torge: Appl. Opt., 12 (1973) 2901.
- 10) Chopra, K. L.: *Thin Film Phenomena*, (McGraw-Hill, Inc., New York, 1969) pp. 137.
- 11) White, J. M. and P. K. Heidrich: Appl. Opt., 15 (1976) 151.
- 12) Kane, J. and H. Osterberg: J. Opt. Soc. Am., 54 (1964) 347.
- 13) Swalen, J. D., M. Tacke, R. Santo, K. E. Rieckhoff and J. Fischer: IBM Res. Report, RJ 2125 (29248).
- 14) Tanaka, K. and Y. Ohtsuka: Thin Solid Films, 48 (1978) 17.
- 15) DeNeufville, J. P., S. C. Moss and S. R. Ovshinsky: J. Non-Cryst. Solids, 13 (1973/74) 191.
- 16) Kosek, F. and J. Cermak: Ces. Ca. Fysiku A, 19 (1969) 271.
- 17) Kikuchi, M. and A. Matsuda: Proc. 6th Intl. Conf. on Amorphous and Liquid Semiconductors, Leningrad, 1975.