



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	プリズム結合法によるガラス薄膜の光ビーム伝播特性
Author(s)	小関, 護; Koseki, Mamoru; 今井, 正明 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 99, 89-96
Issue Date	1980-08-11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41620
Type	departmental bulletin paper
File Information	99_89-96.pdf



プリズム結合法によるガラス薄膜の 光ビーム伝播特性

小 関 護 今井正明 大塚喜弘

(昭和 55 年 3 月 31 日受理)

Propagation Characteristics of Optical Beam in a Thin Glass Film Waveguide by Means of a Prism Coupler

Mamoru KOSEKI Masaaki IMAI Yoshihiro OHTSUKA

(Received March 31, 1980)

Abstract

A thin glass film waveguide, which is deposited on a substrate by means of RF sputtering, is fabricated under various conditions of Ar gas pressure and sputtering time. The propagation parameters of the refractive index and the thickness of a light-guiding thin film are measured with good accuracy by coupling light from a He-Ne laser via a prism coupler. The coupling efficiency of laser light into guided modes of the glass film is determined, and the radiation loss and mode conversion, which occur due to the irregular boundaries of the waveguide surfaces and/or the refractive-index inhomogeneities in the film, are discussed in order to clarify the loss mechanisms of a thin film dielectric waveguide.

1. はじめに

ガラス薄膜中の光ビーム伝播特性は一般的にプリズム結合法を用いて測定される。この方法は Osterberg と Smith¹⁾ が平板ガラス導波路に開口により絞られた光を導波させて、他端から取り出した光が開口の像を形成させるのにプリズムを用いたのが最初の試みであるが、その後 Tien ら²⁾ により誘電体薄膜導波路にレーザー光を導波伝播させる方法として理論的、実験的に詳細に検討されてきた。その方法は導波させようとする薄膜面上にプリズムを圧着させて、そのプリズムにレーザー光を入射させることにより光はプリズムの底面と薄膜の間のギャップを通り抜けて薄膜中を伝播するものである。このとき、プリズムエッジに入射する光の特定の角度に対応して、薄膜中の伝播モードが決定されるので、この導波条件を使うことにより、薄膜の膜厚と屈折率を同時に求めることができる。これらの基本的なパラメータにより、ガラス薄膜を光導波路として使う場合のマクロな特性を知ることができるが、実際のガラス薄膜では膜内での屈折率の不均一性、薄膜と基板および薄膜と空気のような互いに屈折率の異なる層の境界面の不規則な乱れによる光の散乱損失も考慮しなければならない。さらにガラス薄膜中の吸収による損失も考えなければならないが、通常の場合には散乱損失に比べて無視される。このようにガラス薄膜の

製作過程において生ずる薄膜内部の屈折率ゆらぎ、境界面ゆらぎによる散乱損失はかなり大きい場合があり、誘電体導波路を光伝送路や光集積回路などの応用に用いる場合には、その損失機構を十分に検討しなければならない。

誘電体薄膜導波路の散乱損失の大きさは薄膜の厚さ、基板との屈折率差、伝播モードとともにゆらぎの統計的性質に依存する。これまでは境界面ゆらぎに対して、指数形相関関数を仮定して、モード変換量、散乱損失の解析が行なわれており^{3),4)}、また、相関関数の形を変えても結果はさほど変化しないことが知られている。一方、Imai等⁵⁾により、薄膜内部の屈折率ゆらぎが存在する場合についても詳細に検討されており、薄膜内部の影響も無視しえないことがわかった。屈折率と境界面のゆらぎの分散値(標準偏差)、膜厚方向および膜面内の相関長をパラメータにして数値計算した結果、伝播モードが放射モード(空気・基板放射)へ変換することにより形成される放射散乱パターンの形状およびその大きさ(散乱損失 dB/cm)が与えられると、境界面の不完全さあるいは薄膜内部の不均一の分散値、相関長を推定する可能性が示唆された⁶⁾。

本研究はこれらの統計量を測定するための予備的実験を行なった結果であり、ガラス薄膜の基本的な量としての膜厚および屈折率の測定、さらに伝播モードの結合特性、導波特性について述べる。用いたガラス薄膜は高周波スパッタ法で作ったコーニング7059ガラス薄膜(基板:バイコールガラス)であり、高周波電力、アルゴンガス圧、スパッタ時間等のパラメータを調整することにより、再現性のあるガラス薄膜試料を得た。ここでは、このようにして作製したガラス薄膜にプリズム結合法によりHe-Neレーザー光を導波伝播させたときの結合効率、散乱損失およびモード変換量(入射モードから他の伝播モードへの変換量)の測定結果について報告する。

2. プリズム結合による薄膜導波条件

屈折率の高い誘電体が、屈折率のより低い誘電体に囲まれた構造においては、電磁波を軸方向に伝播させることができる。このような導波路として2次元構造では誘電体薄膜導波路があり、3次元構造として光ファイバがある。これらの導波路において波長程度の薄膜中(コア領域:屈折率の高い部分)を伝播する場合には、電磁波はTEモードやTMモードあるいはHEモード、EHモードなどのような伝播モードとして存在する。伝播モードの導波条件は膜厚、屈折率などに依存する。Tien等は入射レーザー光を伝播モードに変換し薄膜中に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、この方法によれば導波条件から膜厚と屈折率の値を同時に決定することができる。導波された光ビームは薄膜中を伝播するが、この時、薄膜内の屈折率のゆらぎや境界面の形状(いわゆるグレーティング)は、特定の方向へ光ビームを散乱する。これらの導波路から散乱・放射した光ビームの角度依存性を測定することによって、屈折率のゆらぎや境界面の不規則な乱れの相関長を推定することができる。また薄膜中を導波伝播している光ビームのすぐ上の散乱光強度を移動距離の関数として求めることにより、屈折率のゆらぎや境界面の不規則な乱れの絶対量を知ることができる。ここではこれらの実際の現象を理解するために、プリズム結合法による光ビームの入射結合の原理を述べる。

図-1のような基板(屈折率 n_s)、薄膜(屈折率 n_f)、空気(屈折率 n_a)からなる三層構造を考える。薄膜内を光ビームが導波さ

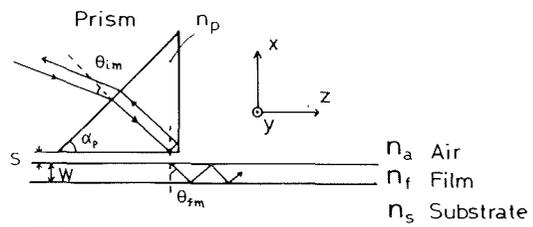


図-1 プリズム結合器

れる条件は、

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

である。すなわち、光は屈折率の大きな誘電体中を伝播することになる。また導波光は膜厚方向 (x 方向) で定在波を形成しているから導波条件は、

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

と書ける。この式は Maxwell 方程式を 図-1 の境界条件のもとで解いても得られる。ここで ϕ_{fs} と ϕ_{fa} はそれぞれ薄膜と基板、薄膜と空気の境界面での導波光の全反射の際の位相変化であり、 β_m は導波光の z 方向の伝播定数、 W は薄膜の膜厚である。また m はモード番号である。 β_m は導波光の境界面での全反射角を θ_{fm} とすると、

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

と書ける。このとき(2)式から明らかのように θ_{fm} は離散的な値をとる。ここで k_0 は真空中での光の波数 ($2\pi/\lambda_0$) である。また β_m をプリズムへの入射角 θ_{im} で表わせば、

$$\frac{\beta_m}{k_0} = N_m = \sin \theta_{im} \cos \alpha_p + (n_p^2 - \sin^2 \theta_{im})^{1/2} \sin \alpha_p \quad (4)$$

となる。ここで、 n_p はプリズムの屈折率、 α_p はプリズムの入射面と底面のなす角である。 N_m は実効屈折率と呼ばれる量で光ビームの z 方向へ寄与する実効的な屈折率を表わし各伝播モードによって異なる離散的な値をとる。各伝播モードに対応する実効屈折率の値は、

$$n_f > N_0 > N_1 > \dots > n_s$$

という関係があり、伝播モードの数は、薄膜と基板の屈折率差と薄膜の膜厚に関係し、屈折率差が大きいほど、また薄膜が厚いほど薄膜内に存在できる導波モードの数は多くなる。 ϕ_{fs} と ϕ_{fa} はフレネルの反射式によって基板と薄膜の屈折率によって表わすことができ、TE モード、TM モードに対してそれぞれ次式のように与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{fs} = \tan^{-1} \left\{ \sqrt{\frac{N_m^2 - n_s^2}{n_f^2 - N_m^2}} \right\} \\ \phi_{fa} = \tan^{-1} \left\{ \sqrt{\frac{N_m^2 - n_a^2}{n_f^2 - N_m^2}} \right\} \end{array} \right. \quad (\text{TE モード}) \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{fs} = \tan^{-1} \left\{ \frac{n_f^2}{n_s^2} \cdot \sqrt{\frac{N_m^2 - n_s^2}{n_f^2 - N_m^2}} \right\} \\ \phi_{fa} = \tan^{-1} \left\{ \frac{n_f^2}{n_a^2} \cdot \sqrt{\frac{N_m^2 - n_a^2}{n_f^2 - N_m^2}} \right\} \end{array} \right. \quad (\text{TM モード}) \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{fs} = \tan^{-1} \left\{ \frac{n_f^2}{n_s^2} \cdot \sqrt{\frac{N_m^2 - n_s^2}{n_f^2 - N_m^2}} \right\} \\ \phi_{fa} = \tan^{-1} \left\{ \frac{n_f^2}{n_a^2} \cdot \sqrt{\frac{N_m^2 - n_a^2}{n_f^2 - N_m^2}} \right\} \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{fs} = \tan^{-1} \left\{ \frac{n_f^2}{n_s^2} \cdot \sqrt{\frac{N_m^2 - n_s^2}{n_f^2 - N_m^2}} \right\} \\ \phi_{fa} = \tan^{-1} \left\{ \frac{n_f^2}{n_a^2} \cdot \sqrt{\frac{N_m^2 - n_a^2}{n_f^2 - N_m^2}} \right\} \end{array} \right. \quad (8)$$

(2)~(8)式から明らかのように、基板の屈折率 n_s 、空気の屈折率 n_a 、モード番号 m 、偏光方向 (TE, TM) などが既知ならば N_m を求めることによって薄膜の屈折率 n_f と膜厚 W を同時に決めることができる。 N_m は(4)式を用いて、プリズムの角 α_p が既知ならば、光ビームが薄膜中へ結合したときのプリズムへの入射角 θ_{im} を測定することによって求められる。このように薄膜に入射結合した光ビームは伝播する過程で減衰してゆくが、その原因は2つに大別される。1つは薄膜内における組成の変化 (密度のゆらぎや異分子、原子の混入) に基づく屈折率の不均一性による導波光の散乱または薄膜を形成している物質自身による吸収である。他の1つは薄膜の境界面 (薄膜-空気、薄膜-基板) の不完全性による散乱である。これらの原因によって伝播モードは他の

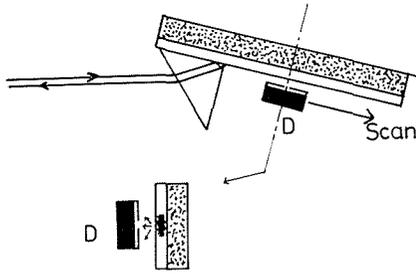


図-2 散乱損失の測定法

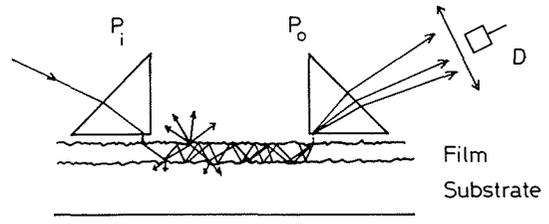


図-3 境界面のゆらぎによる散乱とモード変換

伝播モードへ変換したり、あるいは放射モードへと変換する。このような放射損失を測定する測定系を図-2に示す。この測定系では散乱光の強度は検出器のすぐ下の光ビームの強度に比例すると考えられるので、検出器を膜面からの距離を一定にして伝播方向に走査すれば光ビーム伝播中の散乱損失を知ることができる。散乱損失が大きい場合には、その成因は主に境界面の不規則な乱れによるものであり、伝播損失は不規則な乱れの相関長と密接な関係がある。しかし、散乱光強度の角度依存性を測定しなくては相関長を求めることはできない。その方法は、まずある相関関数を仮定して、不規則に乱れた境界面からの放射・散乱パターンを理論的に解析して、この軸方向および横方向の相関長に対する依存性を検討する。その結果を用いて、逆に高周波スパッタによって作られたガラス薄膜の散乱パターンの実測から乱れの相関長を推定する方法である。また境界面の不規則な乱れは伝播モードの変換を引き起こす。薄膜中でのモード変換現象は先に述べたプリズム結合器を使って測定できる。(図-3参照)入射プリズム P_i から薄膜中へ入射した光ビームは境界面の不規則な乱れにより散乱される。(2)式から明らかなように伝播モードの全反射角 θ_{rm} は離散的な値をとることから散乱した光ビームのほとんどは薄膜の外部へと放射される。このとき、残りの一部が他のモードへと変換される。モード変換した光ビームは複数の伝播モードとなって薄膜中を伝播するが、出射プリズム P_o によって各伝播モードに対応した角度で出射する。このときの出射光の各モードにおける強度分布を測定することにより、乱れの相関長との関連を検討することができる。この方法は、境界面の乱れの相関長に対して入射基本モードから高次の伝播モードへのモード変換量をあらかじめ数値計算しておいて、出射プリズムによって実測した各伝播モードの強度分布から逆に相関長を求めるものである。しかし、この方法では入射プリズムと出射プリズムの2個のプリズムを用いる必要があり、それらのプリズムの調整によって各モードの入出力特性が微妙に変わるために、モード変換量から境界面ゆらぎの相関長を推定することは実際上困難である。

3. プリズム結合を用いた 実験装置

ここでは、入射プリズムによる光ビームの薄膜中への結合、出射プリズムによる異なる伝播モードの分離、薄膜導波中の散乱による損失などプリズム結合法を用いた測定系を示す。最初に結合効率を測定する実験系を図-4に示す。ガラス薄膜とプリズムはローテーターとX-Yステージによ

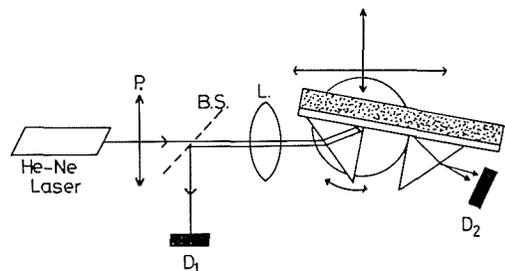


図-4 実験装置

反射光を D_1 で、導波光を D_2 で検出する。

り微動調整することができて、伝播モードの励振は入射プリズムに対する光ビームの入射角をローテーターにより微調することによって行なう。また X-Y ステージによって入射位置の最適化を行なう。He-Ne レーザーを出射した光ビーム (波長: 6328 Å) は偏光板 P で偏光方向を選択されて TE モードと TM モードに区別される。膜面に平行な偏光方向が TE モードで、膜面に垂直な偏光方向が TM モードとなる。光ビームはビームスプリッタを通り、レンズ ($f=77$ mm) によって入射プリズム底面に集光する。ここで用いたプリズムは $\alpha_p=45^\circ$ の重フリントガラスの直角プリズムで屈折率は 1.840 である。このとき、プリズム底面に入射したレーザー光は、一部は入射した方向へ全反射される。この反射光はビームスプリッタにより反射されソーラーセル D_1 で検出される。また一部は薄膜中へと結合して伝播モードなる。光ビームが薄膜中へ結合していないときの反射光強度を I_0 、結合したときの反射光強度を I_{coupled} とすれば、結合効率 η は、

$$\eta = \frac{I_0 - I_{\text{coupled}}}{I_0} \quad (9)$$

で与えられる。 η が極大をとるとき I_{coupled} は極小となる。このことは、 I_{coupled} が極小値をとる角度において導波光が共鳴的に励起され (synchronous condition), プリズム底面からの反射光強度は導波光として結合した割合だけ減少することに対応している。このようにして同調したときの入射角度 θ_{im} を求めると、導波条件 (2) 式によって薄膜屈折率と膜厚を決定することができる。(2) 式は数値的に解くことが困難なのでモード番号をパラメータとして屈折率と膜厚のグラフを作りモードに対する曲線の交点が求める屈折率および膜厚となる。

3.1 結合効率と屈折率、膜厚の測定例

入射角度と反射光強度の関係を 図-5 に、結合効率を表-1 に示す。各伝播モードによって結合効率が大きく異なるのは、入射角度を変化させる際に入射位置も若干変わってしまうためである。しかし、散乱損失、モード変換の測定では単一の伝播モードで励起するので、伝播モードによる結合効率の違いは測定に影響しない。

同調時における入射角度 θ_{im} を測定することにより、(4) 式を用いて実効屈折率 N_m を求めることができる。この N_m 値の値をパラメータとして (2) 式より屈折率と膜厚の関係をプロットする (図-6)。ただし実効屈折率の最大の値が基本モード (0 次モード) に対応する。ここで、 n_s , n_a

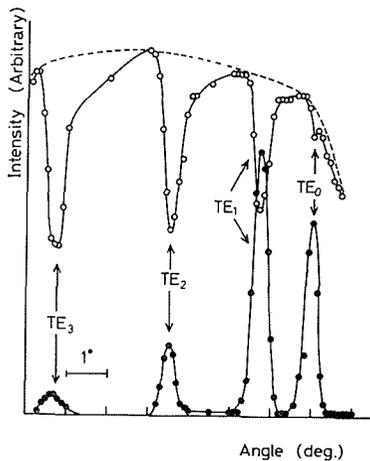


図-5 励振特性

○は D_1 の検出した反射光,
●は D_2 の検出した導波光

は既知であり、 $n_s=1.457$ (波長: 6328 Å), $n_a=1.000$ である。種々の薄膜について測定した結果をまとめて表-2 に示す。同一のスパッタ条件 (アルゴンガス圧 10 Pa, 高周波電力 150 W) では、屈折率は誤差範囲内で一致していて、 $n_f=1.552 \pm 0.001$ である。ただし Z_4 は $Y_1 \sim Y_4$ と別個に高周波スパッタしたのでスパッタ条件の若干の変動が考えられ、屈折率が低くなった可能性がある。また膜厚はスパッタ時間に比例している。他にスパッタ時のアルゴンガス圧

表-1 結合効率 η

Modes	η
TE ₀	10 %
TE ₁	40 %
TE ₂	50 %
TE ₃	55 %

によって屈折率および膜厚が影響を受けることが明らかになった。例えば、屈折率はアルゴンガス圧が低くなるほど大きくなっている。このことは、酸素雰囲気中で7059ガラスを高周波スパッタしたときに屈折率が大きくなるという報告例⁷⁾を考慮すれば、アルゴンガス圧が低くなるとスパッタ室内に残留している酸素の分圧が増加するために屈折率の増加が起こるものと思われる。

3.2 散乱損失の測定例

ガラス薄膜中を伝播する光ビームの散乱損失は導波光のすぐ上での散乱光強度を測定することによって求めることができる。この原理に従って図-2のような実験系を使って散乱損失を求めた。測定には検出器としてPINダイオード(開口1mmφ)を用い、受光面と膜面の距離は1mm以下である。測定結果を対数プロットした結果を図-7に示す。これらの直線の傾きを求めることにより各伝播モードの損失(dB/cm)を決定することができる。(表-3) TEモード、TMモードともに高次モードになるに従って、散乱損失は大きくなっているが、このことは次のように解

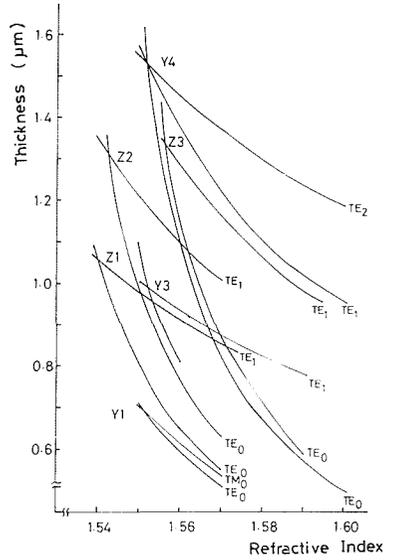


図-6 屈折率と膜厚の解析例
2つ以上のモードについて N_m を測定して、グラフ上での交点から、屈折率、膜厚を求める。

表-2 膜厚と屈折率の測定結果

	スパッタ条件			実効屈折率 N (膜中心)	膜厚 (膜中心) (μm)	屈折率	備考
	Ar 圧力 (Pa)	時間 (分)	スパッタ 電力 (W)				
Y1	10	60	150	TE ₀ 1.517	0.98±0.02	1.551±0.001	TM ₀ を利用
Y3	10	90	150	TE ₀ 1.532 TE ₁ 1.475	0.99±0.02	1.552±0.001	
Y4	10	120	150	TE ₀ 1.542 TE ₁ 1.512 TE ₂ 1.466	1.53±0.02	1.552±0.001	
Z4	10	180	150	TE ₀ 1.544 TE ₁ 1.531 TE ₂ 1.510 TE ₃ 1.481	2.47±0.05	1.547±0.001	
Z1	30	120	150	TE ₀ 1.522 TE ₁ 1.472	1.06±0.02	1.540±0.001	
Z2	20	120	150	TE ₀ 1.530 TE ₁ 1.492	1.29±0.02	1.543±0.001	
Z3	50	120	150	TE ₀ 1.544 TE ₁ 1.507	1.34±0.02	1.560±0.001	

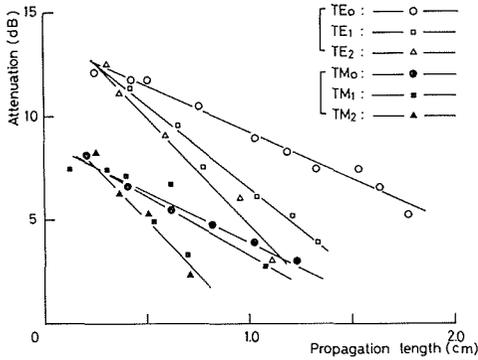


図-7 散乱損失

表-3 散乱損失

Modes	Scattering Loss (dB/cm)
TE ₀	4.7
TE ₁	8.2
TE ₂	10.6
TM ₀	4.7
TM ₁	5.6
TM ₃	10.2

積される。幾何光学的な解釈によれば、薄膜内の伝播現象は光ビームが薄膜内を空気と薄膜、基板と薄膜の境界面で全反射しながら進んで行くと考えられる。単位距離を進む間の光路長と境界面での内部反射回数は伝播モードによって異なるが、TE₀モードを基準とした場合、光路長はTE₂モードで1.05倍にすぎない。これに対して、内部反射回数はTE₀モードを基準にしてTE₁モードで約2倍、TE₃モードでは約4倍となっている。このことから、薄膜中を伝播する光ビームの散乱損失のほとんどは境界面散乱によるものであると思われる。しかしガラス薄膜の作製時に基板の洗浄を入念に行い、境界面における乱れを減少させたなら、薄膜内部の屈折率のゆらぎによる散乱損失も無視できなくなると考えられる。

3.3 モード変換量の測定例

2.で述べたように、単一の伝播モードで励起しても伝播する過程でモード変換が起こり、出射プリズムによって出射する光ビームは複数の伝播モードに分離して出射してくる。したがって、出射光の各モードの強度分布を調べれば薄膜内でのモード変換量を知ることができる。検出器としてフォトマル(開口100 μm×100 μm)を用いてプリズム面から5 cmの位置を機械的に走査することによって強度分布を得た。ただし励振した伝播モードの出射光分布には入射ビームスポットが存在するので、スポットを避けて走査した。測定例を図-8に示す。横軸は各モードに対応する出射角を表わす。(A)は入射プリズムにおいてTE₀モードを励振した場合、(B)はTE₁モードを励振した場合、(C)はTE₂モードを励振した場合である。(A)の場合、TE₀モードが強く出ているが、モード変換によって、TE₁モード、TE₂モードも表われている。(B)の場合、TE₁モードで励振しているが、TE₀モードが強く表われていてTE₁モードはかなり弱くなっている。(C)では導波光のほとんどがTE₀モードに変換されている。出射プリズムの結合効率が一定でないため定量的な議論はできないが、伝播モードはより低次の伝播モードへと変換される傾向がある。

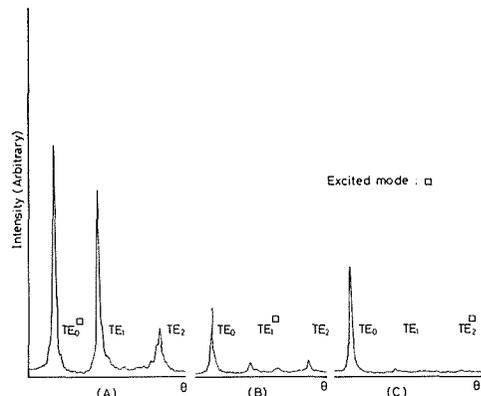


図-8 出射光のモードによる強度分布
励振した伝播モードの他にも伝播モードが表われている。

4. 結 論

薄膜中に光ビームを導波伝播させる方法としてプリズム結合法は優れた方法であって、約60%の結合効率が得られる。結合効率は入射プリズムを薄膜に圧着する際に、プリズム底面と膜面の間のギャップ ($\sim 0.5 \mu\text{m}$) を調整することによって80%程度まで高めることは可能であるが、あまり結合効率を高めることは測定精度の点で好ましくない⁸⁾。

本実験で用いた装置の測定精度は屈折率に対し約0.001, 膜厚に対し約 $0.02 \mu\text{m}$ である。この精度の限界は用いた微動装置の機械的精度, プリズムの屈折率, 角度の読み取り精度による。しかし, ここで得られた膜厚, 屈折率のパラメータは散乱パターンの測定には十分なものである。また散乱損失の実験系は散乱パターンの測定装置に類似しているので, 今回の散乱損失の実験系は今後の参考となる。しかし, 散乱パターンの測定の際の散乱光強度は極めて弱いので, 小型で非常に高感度な検出器を用いてしかもチョッピングにより同期検波を行なうことが必要である。相関長を決定するためには散乱パターンだけでなくモード変換量も精度よく測定することが必要であるが, この点に関しては今後の検討課題である。

終りに当り, ガラス薄膜の試料を作製していただいた本学卒論生阿達完二君に深く感謝の意を表す。本研究は文部省科学研究費(課題番号420501昭和54年度特定研究光導波エレクトロニクス)の援助のもとに行なわれた。

参 考 文 献

- 1) H. Osterberg and L. W. Smith: J. Opt. Soc. Am. **54** (1964) p. 1073.
- 2) P. K. Tien, R. Ulrich and R. J. Martin: Appl. Phys. Lett. **14** (1969) p. 291.
- 3) D. Marcuse: Bell Syst. Tech. J. **48** (1969) p. 3187.
- 4) Y. Suematsu *et al.*: Proc. IEEE (Lett.) **60** (1972) p. 744.
- 5) M. Imai, S. Miyanaga and A. Asakura: IEEE J. Quant. Electron. QE-13 (1977) p. 255
- 6) S. Miyanaga, T. Asakura and M. Imai: Opt. Quant. Electron. **11** (1980) p. 23.
- 7) J. E. Goell and R. D. Standley: Bell Syst. Tech. J. **48** (1969) p. 3445.
- 8) R. Ulrich and R. Torge: Appl. Opt. **12** (1973) p. 2901.