

# 光導波路の構造パラメータの導波モードを用いた考察

岸本 美樹, 原田 美佳, 今井 元

日本女子大学理学研究科 数理・物性構造科学専攻

(2011年10月11日受理)

**要 旨** 我々は、光導波路を精確に設計するには定量的に構造を測定する必要があるため、構造パラメータの評価を行っている。三層対称スラブ導波路を用いた導波モードによる解析を用い、幅方向と厚み方向に分けた一次元解析を行った。計算と測定から解析を行う事で評価・検討を行った。計算結果としては、導波モードを用いた式により、フィールドパターンが得られた。測定結果としては、ビームスポットからピーク値の  $1/2$ ,  $1/e$ ,  $1/e^2$  の値が得られた。この2つの結果のフィッティングを誤差分散により行った。導波路幅が  $7.0 [\mu\text{m}]$ , 導波路厚みが  $6.5 [\mu\text{m}]$ , 比屈折率差が  $1.2 [\%]$  であると検討できた。これより、幅方向と厚み方向に共通しているパラメータである比屈折率差の値が一致した事から一次元解析が有効であると考えた。

**キーワード**：光導波路, 比屈折率差, 導波モード

## 1. はじめに

光ファイバと光導波路は光通信と情報システムで幅広く活用されている。その理由として、光通信は、高速・長距離になっても伝送路損失が少なく済み、高速な信号を長距離まで伝送可能であるからです。光導波路は、コアとクラッドの屈折率の違いによって光を閉じ込め、任意の方向に伝搬させている。光導波路は現在、光変調器や光スイッチ、および光増幅器などの様々な技術に応用されている。今日では、光導波路の集積回路の実現に向け、多くの研究が行われている。光導波路を精確に設計するためには、定量的に構造を測定する必要がある。

その測定方法には、光学顕微鏡を用いた解析や三層対称スラブ導波路を用いた解析などがある。

本研究では、光導波路の構造パラメータの評価を目的とし、三層対称スラブ導波路を用いた解析を行った。導波路を幅方向と厚み方向でそれぞれ計算と測定から一次元解析を行い、比較・検討をした。

## 2. 試 料

今回用いた試料は、石英ガラスを用いた埋め込み型導波路である。図1に試料の平面図と断面図の模式図を示す。このように矩形になっている三層対称スラブ導波路として解析を行った。

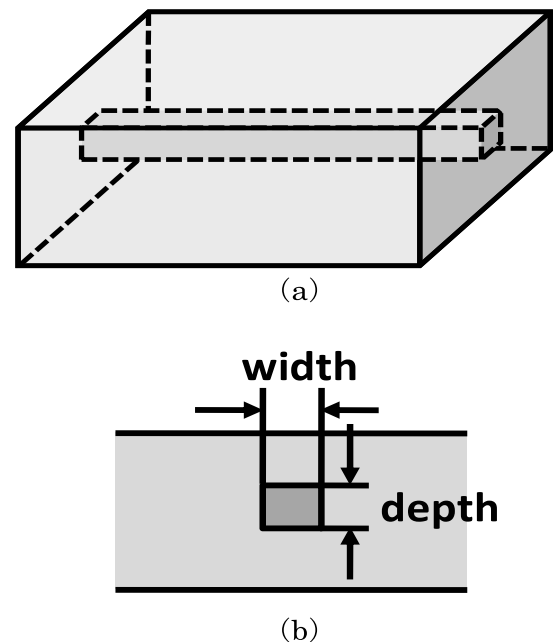


Fig. 1. Waveguiding structure (a) Schematic plane section of the sample, (b) Schematic cross section of the sample

## 3. 計算結果

三層対称スラブ導波路の導波モードの式を用いて計算による解析を行った。幅方向と厚み方向にそれぞれ分け、フィールドパターンを求めた。ここでは、幅方向の計算結果を示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} \exp(w) \cos(u) \exp\left(-\frac{2wx}{d}\right) \\ \left(\frac{d}{2} \leq x, \text{ clad } n_2\right) \\ H_y(x) = \cos\left(\frac{2ux}{d}\right) \\ \left(-\frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2}, \text{ clad } n_1\right) \\ \exp(w) \cos(u) \exp\left(\frac{2wx}{d}\right) \\ \left(x \leq -\frac{d}{2}, \text{ clad } n_2\right) \end{array} \right. \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{2w}{n_2^2 d} \exp\left(-\frac{2wx}{d}\right) \cos(u) \exp(w) \\ \left(\frac{d}{2} \leq x, \text{ clad } n_2\right) \\ E_z(x) = -\frac{i}{\omega \epsilon_0} - \frac{2u}{n_1^2 d} \sin\left(\frac{2ux}{d}\right) \\ \left(-\frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2}, \text{ clad } n_1\right) \\ \frac{2w}{n_2^2 d} \exp\left(\frac{2wx}{d}\right) \cos(u) \exp(w) \\ \left(x \leq -\frac{d}{2}, \text{ clad } n_2\right) \end{array} \right. \quad (3.2)$$

まず、境界条件を考えた。この場合、 $x = d/2$  と  $x = -d/2$  を境界条件として計算を行った。これより、未知数  $u$  と  $w$  を用いて 2 つの関係式 (3.3) 式、(3.4) 式が得られた。

$$u \tan(u) = \frac{n_1^2}{n_2^2} w \quad (3.3)$$

$$V = \sqrt{u^2 + w^2} = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (3.4)$$

この 2 つの式から未知数  $u$  と  $w$  を定めた。まず、導波路幅、屈折率などに数値を代入した。波長は、測定に合わせ  $1.55 \mu\text{m}$  を用いた。2 式とも横軸に  $u$ 、縦軸に  $w$  とするグラフを描き、2 つのグラフの交点から  $u$  と  $w$  の値を定めた。図 2 にグラフを示す。その結果、 $u = 1.1$ 、 $w = 2.4$  とそれぞれ値が算出出来た。また、交点が 1 か所しかない事より、基本モードしかたたないシングルモードになる事が予測出来た。そして、ここでわかった  $u$  と

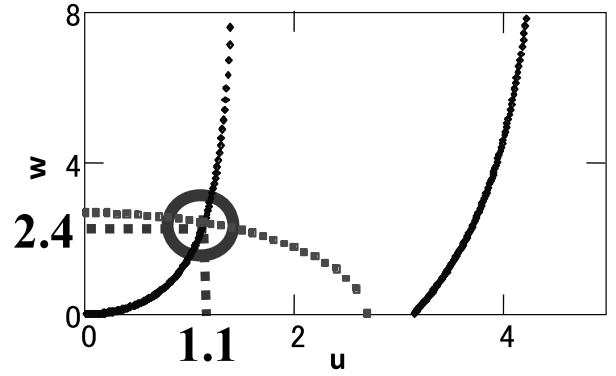


Fig. 2. Equation (3.3) and (3.4) from the graph, calculate the intersection ( $\Lambda = 1.55 [\mu\text{m}]$ ,  $d = 7.5 [\mu\text{m}]$ ,  $\Delta = 0.8$ ,  $n_1 = 1.45$ )

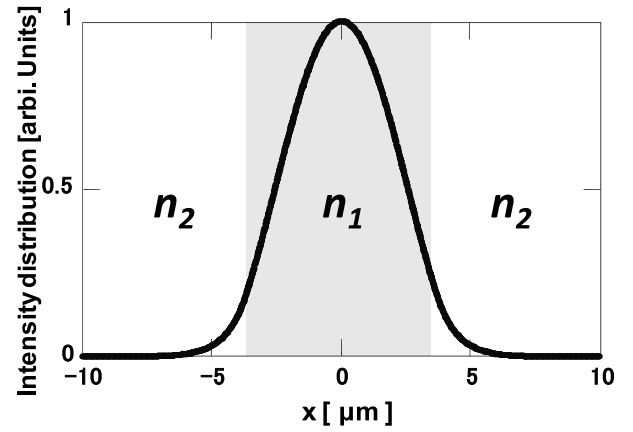


Fig. 3. Field pattern ( $\Lambda = 1.55 [\mu\text{m}]$ )

$w$  の値を先ほどのモード計算の式に代入する事でフィールドパターンを描いた。この計算結果を用いて、測定結果を比較した。図 3 に得られたフィールドパターンを示す。

#### 4. 測定結果

実際に行った実験系の模式図を図 4 に示す。光源には波長  $1.55 \mu\text{m}$  のものを用いた。光源からの光を光ファイバを用いて試料の導波路部に導波させた。そして得られたビームスポットをレンズで拡大し、カメラに取り込んだ。そして、カメラで得られた画像を PC に取り込んだ。

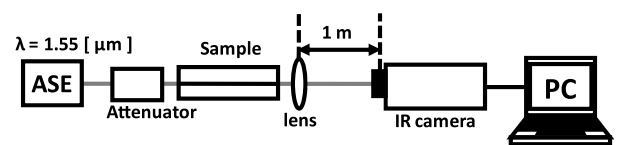
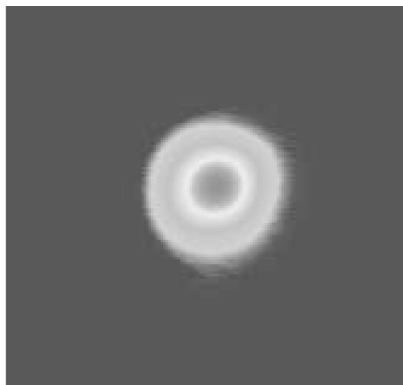
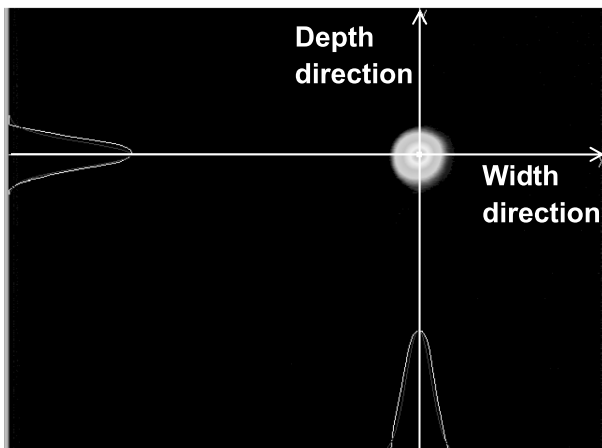


Fig. 4. Experiment of system

カメラから得た画像を図 5 (a) に示す。円形の部分が導波路のビームスポットを表している。また、中心部分の光強度が強い部分から、徐々に強度が弱くなっている様子を色の変化で表している。真ん中に 1 つ強度の強い山が見えている事より、基本モードでシングルモードであると推定した。図 5 (b) に示すように、横軸から幅方向の、縦軸から厚み方向のフィールドパターンが描けた。この結果から光強度のピーク値の  $1/2$ ,  $1/e$ ,  $1/e^2$  の値が得られた。



(a)



(b)

Fig. 5. Result of a measurement (a) Beam spot, (b) Intensity distribution ( $\Lambda = 1.55 \text{ } [\mu\text{m}]$ )

## 5. 計算結果と測定結果の比較・検討

### 5.1 誤差分散による解析

測定より得られた値を、計算より得られたフィールドパターンに乗せ、比較をした。グラフを図 6 に示す。

計算結果と測定結果を比較すると、値にずれが生じていることがわかる。そのため、測定値と計算値のフィッティングを考えるため、誤差分散を求めた。

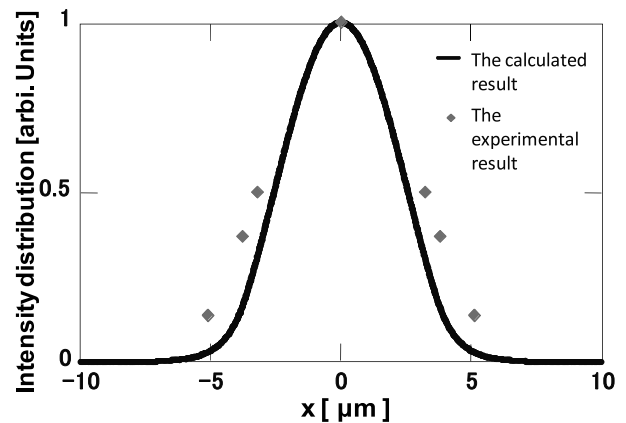


Fig. 6. Field pattern of intensity distribution of light ( $\Lambda = 1.55 \text{ } [\mu\text{m}]$ )

まず図 7 に示すように計算値  $\omega_0$  から測定値  $x_0$  を引き、計算値で割った誤差を計算しました。これをピーク値の  $1/2$ ,  $1/e$ ,  $1/e^2$  の値でそれぞれ同様に計算し、その 2 乗和の平均を取ったものを誤差分散とした。誤差分散は表 1 のようになり、誤差分散が 0.0029 であると求まった。

$$\text{誤差分散} = \frac{\sum \left( \frac{\omega_0 - x_0}{\omega_0} \right)^2}{3} \quad (5.1)$$

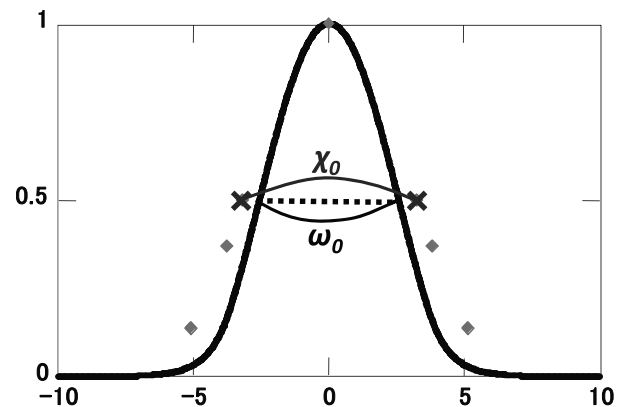


Fig. 7. Calculation of the error variance

Table 1. The error variance ( $\Lambda = 1.55 \text{ } [\mu\text{m}]$ ,  $d = 7.5 \text{ } [\mu\text{m}]$ ,  $\Delta = 0.8$ ,  $n_1 = 1.45$ )

|                  | Experimental results | Calculated results | Error variance |
|------------------|----------------------|--------------------|----------------|
| FWHM             | 6.44                 | 6.86               | 0.0029         |
| 1/e              | 7.55                 | 7.82               |                |
| 1/e <sup>2</sup> | 10.20                | 10.9               |                |

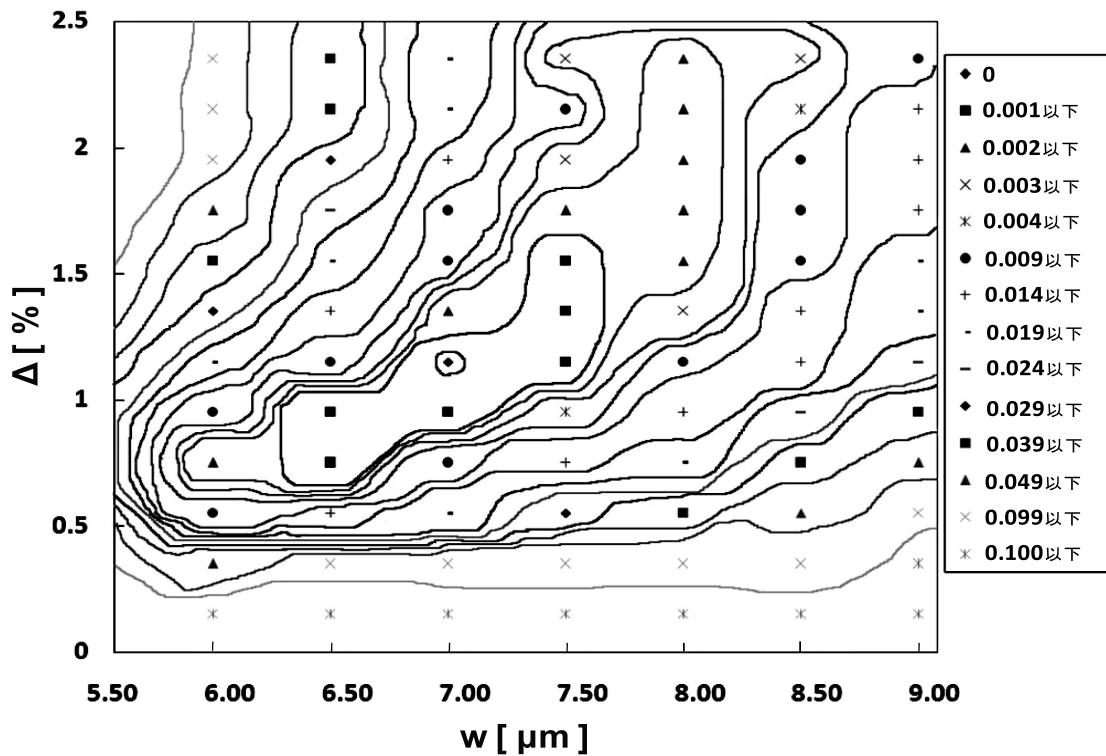


Fig. 8. The distribution of error variance (The waveguide width was changed by  $0.5\mu\text{m}$  step between from 6.0 to  $9.0\mu\text{m}$ . The  $\Delta$  was changed by 0.2% step between from 0.2 to 2.4%)

## 5.2 導波路幅と比屈折率差の検討

測定結果と計算結果が一致する値、つまり誤差分散が 0 になる値の検討を行った。まず、値を変えて同様の三層対称スラブ導波路の計算を行った。導波路幅を  $6.0\sim 9.0 [\mu\text{m}]$  の間  $0.5\mu\text{m}$  間隔、比屈折率差を  $0.2\sim 2.4 [\%]$  の間  $0.2\%$  間隔で変えてそれぞれ計算を行い、フィールドパターンを求めた。次に、それぞれの計算結果において測定結果との誤差分散の計算を同様に行った。すべての誤差分散の結果を 1 つのグラフにまとめ、解析を行った。幅方向の結果を図 8 に示す。

横軸が導波路幅、縦軸が比屈折率差である。誤差分散の値ごとにプロットの種類を変えていった。そのため、0 から順に同じ値を囲っていくことで、誤差分散の分布を見ることができた。この結果より、導波路幅が  $7.0 [\mu\text{m}]$ 、比屈折率差が  $1.2 [\%]$  であると検討できた。

同様の解析を厚み方向でも行った結果、厚さ  $d$  は  $6.5 [\mu\text{m}]$ 、比屈折率差が  $1.2 [\%]$  であると検討できた。幅方向と厚み方向とそれぞれ一次元解析を行う方法を取っているが、どちらも比屈折率差が  $1.2 [\%]$  と同じ値を得られたため、一次元解析によって求められる結果が有効であると考えた。

## 6. ま と め

断面が矩形となっている光導波路を用い、三層対称スラブ導波路の導波モードによる解析を行った。計算結果から得られたフィールドパターンと測定結果から得られたビームスポットのどちらからでも、光源の波長が  $1.55 [\mu\text{m}]$  の場合、基本モードでシングルモードの様子を確認できた。

また、測定結果よりフィールドパターンのピーク値の  $1/2$ ,  $1/e$ ,  $1/e^2$  の値が得られるため、計算結果との誤差分散を計算することで、フィッティングを考える事ができた。幅方向と厚み方向で、それぞれ一次元解析を行った結果、共通のパラメータとなっている比屈折率差の値が  $1.2 [\%]$  と一致した。これより、一次元解析が有効であると考えた。

様々な構造で検討を行うため、今後有限要素法を用いた二次元解析を行う必要があることがわかった。

## 参 考 文 献

- 1) 岸本美樹, 原田美佳, 今井 元: “光導波路の構造パラメータの評価”, 電子情報通信学会 2011 年総合大会, C-3-79, 東京都市大学 (2011)
- 2) 岸本美樹, 原田美佳, 今井 元: “光導波路の構造パラメータの考察”, 電子情報通信学会 2011 年ソサイエティ大会, C-3-60, 北海道大学 (2011)

# Evaluation of Parameters of the Optical Waveguide for the Waveguide Mode

Miki Kishimoto, Mika Harada and Hajime Imai  
The Graduate School of Science, Division of Mathematical and  
Material Structure Science, Japan Women's University

(Received October 11, 2011)

**Abstract:** We have evaluated the process of structure-parameters of the optical waveguide because of necessary to investigate the measurement of the structure quantitatively to design the waveguide exactly. One-dimensional analysis of width direction and thickness direction was performed using waveguide mode analysis by using the three-layer slabwaveguide. Evaluation was analyzed from the theoretical calculation and the experiment. As the theoretical calculation result, by using a waveguide mode equation, field pattern was calculated. As the experiment result, the width of each  $1/2$ ,  $1/e$ , and  $1/e^2$  of the peak value of the guided field pattern was calculated. The experiment results were compared with the calculated result. Fitting of the two results was calculated by error variance. Waveguide width is  $7.0 [\mu\text{m}]$ , depth is  $6.5 [\mu\text{m}]$  and the relative refractive index difference is  $1.2 [\%]$ . Thus, one-dimensional analysis was considered valid because matches the value of the relative refractive index difference of parameters that are common to the width direction and depth direction.

**Key words:** Optical waveguide, Relative refractive index difference, Waveguide mode