

イオン交換によるグレーデッド形光導波路屈折率分布の測定

陳, 抱雪 / CHIN, Hosetsu / 浜中, 広見 / 岩村, 国也 /
IWAMURA, Kokuya / HAMANAKA, Hiromi

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部
研究集報

(巻 / Volume)

26

(開始ページ / Start Page)

147

(終了ページ / End Page)

151

(発行年 / Year)

1990-02

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00003918>

イオン交換によるグレーデッド形 光導波路屈折率分布の測定

陳 抱 雪*・浜 中 広 見**・岩 村 国 也**

Determination of Index Profiles of Ion-Exchanged Graded Optical Waveguide

Hosetsu CHIN*, Hiromi HAMANAKA** and Kokuya IWAMURA**

Abstract

A method is presented which fits the refractive index distribution function to a practical refractive index profile of waveguide by means of the eigen value equation of guided mode. By use of this method, the refractive index profiles of Ag^+ , K^+ and Tl^+ ion exchange glass optical waveguides are determined. The mode effective index by this method is consistent with the mode effective index measured by the prism coupling method.

§1. ま え が き

イオン交換法 (ion exchange method) によるガラス光導波路の屈折率分布は徐々に変化するグレーデッド形であり¹⁾, 短い時間のイオン交換法によって作製される光導波路の屈折率分布は, Fig. 1 に示すように, 非対称グレーデッド形となる。Fig. 1 中で, n_1 , n_2 , $n(x)$ は各々空気, ガラス基板及び光導波層の屈折率である。このような光導波路の屈折率分布の測定には, 一般に何らかの近似方法が用いられる。よく用いるのはいわゆる逆 WKB 方法²⁾であるが, 他の方法と同様一長一短がある。ここでは, 導波モードの固有値方程式 (eigen value equation) を直接利用し, 実効屈折率の測定値から光導波層の屈折率分布を推定する方法を提案する。この方法を用いて, Ag^+ イオン交換, K^+ イオン交換及び Tl^+ イオン交換によるガラス光導波層の屈折率分布を推定した結果について以下に報告する。

* HIF 招聘研究員

** 工学部計測制御

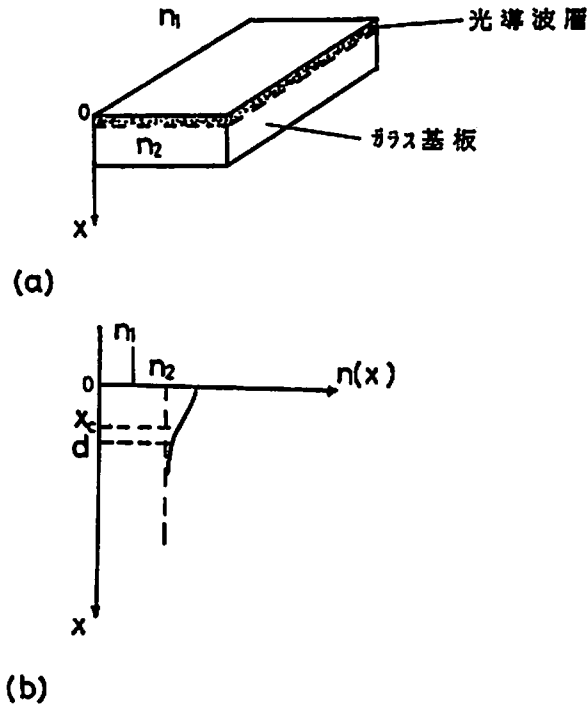


Fig. 1 (a) イオン交換光導波路の構造
(b) 非対称屈折率分布

§2. 原理と方法

2.1 屈折率分布の推定について

Fig. 1 (b) に示した屈折率分布 $n(x)$ は次のような式で記述される。

$$n(x) = n_2 + \Delta n \cdot f(x/d) \quad (1)$$

ここで、 Δn , d , $f(x/d)$ は各々の表面の屈折率増加量、拡散深さ、屈折率分布関数であり、かつ、 $0 \leq f(x/d) \leq 1$ 。このような構造を持った導波路中を伝搬する光波の Helmholtz 方程式はポテンシャル・バリア中において電子の挙動を表すシュレディンガーの方程式と全く同じ形をしている。したがって、量子力学の分野でよく知られている WKB 法を用いて次の導波モードの固有値方程式

$$K_0 \int_0^{X_c} [n^2(x) - N_m^2]^{\frac{1}{2}} dx = \left(m + \frac{3}{4}\right) \pi \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

を得ることができる。式(2)で、 K_0 , X_c , N_m は各々真空中の光波の波数、一次転移点 (linear turning point)、モードの実効屈折率 (effective index) であり、かつ、次の式

$$N_m = \frac{\beta_m}{K_0} = n(X_c) \quad (3)$$

で表される関係がある。ここで、 β_m は m 次モードの伝搬定数である。次に、

$$\begin{cases} V_d = K_0 \cdot d \cdot \sqrt{n^2(0) - n_2^2} \\ b_m = (N_m^2 - n_2^2) / (n^2(0) - n_2^2) \\ \xi = x/d \\ \xi_c = x_c/d \end{cases} \quad (4)$$

と置くと、式(2)を

$$V_d \int_0^{\xi_c} [f(\xi) - b_m]^2 d\xi = \left(m + \frac{3}{4}\right) \pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

と書き直すことができる。ここで、 V_d, b_m は各々規格化拡散深さ、規格化導波路屈折率と定義される。かつ、 $b_m = f(\xi_c)$ となる。屈折率分布関数 $f(\xi)$ が与えられれば、式(5)から、分散曲線 $V_d - b_m$ ダイアグラムが計算できる。仮定した $f(\xi)$ が実際の導波路の屈折率分布関数と一致(或はほとんど一致)すれば、ある V_d に対し、次のような式

$$\sum_{j=m}^{i=m-1} \left| \frac{N_j^2 - n_2^2}{N_i^2 - n_2^2} - \frac{b_j}{b_i} \right| = 0 \quad (\text{或は} \rightarrow 0) \quad (6)$$

が満足されるはずである。ここで、 N_j と N_i は j 次と i 次モード実効屈折率の測定値である。

2.2 実効屈折率の測定について

導波路の実効屈折率はプリズム結合法³⁾ (prism coupling method) を利用し測定することができる。プリズム結合器の構造を Fig. 2 に簡单的に示す。Fig. 2 のように入力プリズム結合により入射ビームパワーが導波パワーに移行し、導波層中に導波光を励振する。伝搬している導波光を出力プリズム結合により再び外部に取り出す。入力プリズム底面に θ_m の角度で光ビームを入射させれば、この光波の導波路に沿う方向の伝搬定数 β_m は

$$\beta_m = n_p \cdot K_0 \cdot \sin \theta_m \quad (7)$$

とならなければならない。ここで、 n_p はプリズムの屈折率である。式(3)と式(7)から

$$N_m = n_p \cdot \sin \theta_m \quad (8)$$

を得る。従って、入射角度 θ_m さえ測定すれば、実効屈折率 N_m を得ることができる。

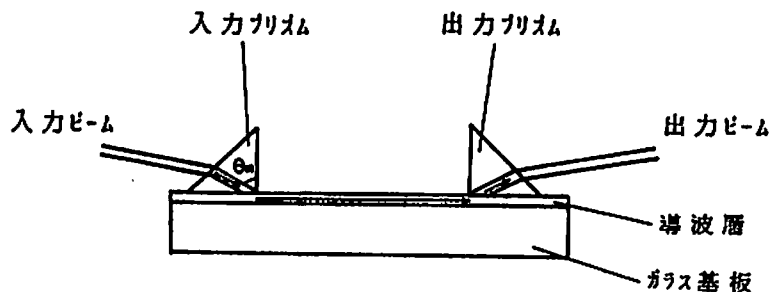


Fig. 2 プリズム結合器の構造

§3. 実験と結果

モード実効屈折率 N_m の測定のための実験構成をFig. 3に示す。He-Neレーザー($\lambda=0.6328\mu\text{m}$)を用い、偏光子を通してTEモードを励振する。 xy 微動一回転ステージの角度精度は $10''$ である。プリズムはFZ6交換光学ガラス製であり、屈折率は1.74971である。用いた試料は Ag^+ , K^+ , Tl^+ イオン交換によるガラス導波路である。ステージを回転し、一定の入射角度で、スクリーン上で m ラインが一番はっきり見えるようにする。このときの光ビームの入射角度を測定し、式(8)により実効屈折率 N_m を計算する。測定結果をTable 1に示す。通常、イオン交換法或は熱拡散法によって作製した光導波路の屈折率分布関数は次の五つの関数から選ばれる⁴⁾。

a. ガウス関数

$$f(\xi) = \exp(-\xi^2)$$

b. 放物関数

$$f(\xi) = \begin{cases} 1 - \xi^2, & |\xi| \leq 1 \\ 0, & |\xi| > 1 \end{cases}$$

c. 指数形減少関数

$$f(\xi) = \exp(-\xi)$$

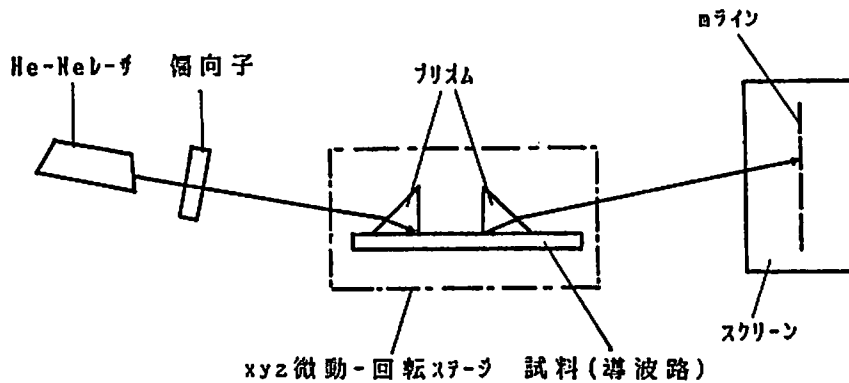


Fig. 3 実効屈折率測定実験の構造

Table 1 実効屈折率の測定結果 (TEモード, $\lambda=0.6328\mu\text{m}$)

| 試料 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------|--------|---------|--------|--------|
| 実効屈折率 | | | | |
| N0 | 1.5833 | 1.61847 | 1.5324 | 1.5754 |
| N1 | 1.5661 | 1.59038 | 1.5299 | 1.5404 |
| N2 | 1.5499 | 1.56678 | | |
| N3 | 1.5344 | 1.54599 | | |
| N4 | | 1.52827 | | |
| N5 | | 1.51695 | | |

(注) 試料1, 4: Ag^+ イオン交換ソーダガラス導波路, 試料2: Tl^+ イオン交換K9光学ガラス導波路, 試料3: K^+ イオン交換ソーダガラス導波路

Table 2 屈折率分布の推定結果 (TEモード, $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$)

| 試料 | m | Nm | Nm' | $\Sigma(Nm - Nm')^2$ | $d(\mu\text{m})$ | Δn | $n(x)$ |
|----|-----|--------|--------|-----------------------|------------------|------------|--------------------------------------|
| 1 | 0 | 1.5833 | 1.5796 | 3.38×10^{-5} | 3.610 | 0.0903 | $1.512 + 0.0903[1 - (x/3.610)^2]$ |
| | 1 | 1.5661 | 1.5690 | | | | |
| | 2 | 1.5499 | 1.5500 | | | | |
| | 3 | 1.5344 | 1.5310 | | | | |
| 2 | 0 | 1.6185 | 1.6181 | 6.72×10^{-6} | 2.503 | 0.1268 | $1.5147 + 0.1268 \exp[-(x/2.503)^2]$ |
| | 1 | 1.5904 | 1.5898 | | | | |
| | 2 | 1.5668 | 1.5651 | | | | |
| | 3 | 1.5460 | 1.5442 | | | | |
| | 4 | 1.5283 | 1.5278 | | | | |
| | 5 | 1.5170 | 1.5169 | | | | |
| 3 | 0 | 1.5324 | 1.5398 | 3.56×10^{-5} | 3.236 | 0.0383 | $1.512 + 0.0383[1 - (x/3.236)^2]$ |
| | 1 | 1.5299 | 1.5259 | | | | |
| 4 | 0 | 1.5754 | 1.5749 | 5.75×10^{-7} | 1.947 | 0.0891 | $1.512 + 0.0891[1 - (x/1.947)^2]$ |
| | 1 | 1.5404 | 1.5399 | | | | |

(注) m : モード番号, Nm : 実効屈折率測定値, Nm' : 実効屈折率推定値, d : 拡散深さ, Δn : 表面屈折率増加量, $n(x)$: 屈折率分布

d. 補誤差関数

$$f(\xi) = \text{erfc}(\xi) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi \exp(-t^2) dt$$

e. 補誤差積分関数

$$f(\xi) = \sqrt{\pi} \text{ierfc}(\xi) = \sqrt{\pi} \int_\xi^\infty \text{erfc}(t) dt$$

実効屈折率の測定値をもとにこれら五つの関数を用い各試料の屈折率分布を推定した。Ag⁺ と K⁺ イオン交換光導波路の屈折率分布を放物関数で, TI⁺ イオン交換光導波路をガウス関数で推定すると, 実効屈折率の推定値が測定値とよく一致しており, 従って, Ag⁺, K⁺イオン交換光導波路と TI⁺ イオン交換光導波路の厚み方向の屈折率分布は各々放物関数とガウス関数分布であることが分かる。具体的な推定結果及び試料導波路の屈折率分布を Table 2 に示す。

§ 4. む す び

我々はプリズム結合法を用いグレーデッド形光導波路の実効屈折率を測定し, それをもとに導波モードの固有値方程式を利用して, 光導波層の屈折率分布を推定した。この方法を用いることにより, 正確にイオン交換導波路の屈折率分布を推定できる。

参 考 文 献

- 1) P.K. Tien: Integrated optics and new wave phenomena in optical waveguides, A quarterly journal published by the American Institute of Physics. (1977).
- 2) J.M. White and P.F. Heidrich: *Appl. Opt.*, Vol. 15, No 1, p. 151~155 (1976).
- 3) P.K. Tien et al.: *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 14, No 9, p. 291~294 (1969).
- 4) 金鋒, 范俊清: 集成光学, 国防工業出版社 (1981).