

이온교환 평판도파로의 실효굴절을 측정 및 해석

Analysis and Measurement of Effective Refractive Indices with Ion-exchanged Slab Waveguide

천석표*, 박정일, 박태성, 정홍배

Seok-Phyo Cheon*, Jeong-Il Park, Tae-Sung Park, Hong-Bay Chung

광운대학교 전자재료공학과

Dept. Of Electronic Materials Eng. Kwangwoon Univ.

Abstract

In this study, the slab waveguide was fabricated using potassium-nitride (KNO_3) or silver-nitride ($AgNO_3$) molten sources by ion-exchange process. The effective refractive indices of waveguide were measured by Prism-Coupling method, and The characteristics of waveguide(mode dispersion, effective diffusion depth, surface refractive index, diffusion coefficient, and refractive index profile etc.) were investigated by WKB method. In the case of potassium ion-exchange, the computer calculation showed that the refractive index profile of waveguide followed Gaussian function, the surface refractive index increased with ion-exchange time, and the effective diffusion depth increased a little as ion-exchange time increased, while the surface refractive index of silver ion-exchanged waveguide decreased with ion-exchange time because of the ion depletion on the surface of waveguide, and the effective diffusion depth increased seriously with ion-exchange time. Double ion-exchanged waveguide was fabricated by performing silver ion-exchange after potassium ion-exchange. Double ion-exchanged waveguide had a tight mode binding force since the surface refractive index was larger than single step ion-exchanged waveguide.

1. 서 론

본 논문에서는 이온교환 도파로의 제작조건에 따른 도

파로 특성의 변화에 대해서 연구하였다. 이온교환 도파로는 제작이 간편하고 제작 비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 교환 이온의 종류에 따른 변화를 연구하기 위해서 KNO_3 용융염과 $AgNO_3$ 용융염을 사용하여 Ag^+-Na^+ , K^+-Na^+ 이온교환 도파로를 제작하였으며, 이온교환 시간에 따른 도파로 특성의 변화를 관찰하기 위해 30, 60, 120분의 교환 시간을 갖는 도파로를 제작하였다. 또한 광집적회로에서의 수동소자로서 이용하기 위하여 손실이 적고 강한 mode 구속력을 가지는 도파로를 제작하기 위해 이중이온교환 도파로를 제작하였다. 이중이온교환 도파로는 potassium 이온교환 후 silver 이온교환을 통하여 제작하였다. 제작된 도파로에 대한 실효굴절을 측정하기 위해 Prism-Coupling method를 이용하였으며, 측정된 실효굴절률로부터 도파로의 특성을 결정하는 표면굴절률과 확산 깊이를 결정하기 위해서 Exponential, Gaussian 그리고 Complementary error 굴절을 분포를 갖는 WKB 분산 관계식을 이용하여 이온교환 도파로를 해석하였다.

2. 이 론

2-1. Prism Coupling Method

Prism coupler에 의한 입력 coupling 효율은 gaussian laser beam의 경우 80.1% 정도이며, prism coupler는 beam coupling을 위해서 기계적 장치가 필요하기 때문에 광학적 집적회로에는 응용하기 어려우나 실험실에서 도파로의 특성을 고찰하기 위한 일반적인 방법이다.

만일 prism-air 경계면으로 입사하는 beam이 total internal reflection의 조건을 만족하는 입사각으로 입사되면, prism 내에서는 total internal reflection에 의한 standing wave mode가 발생되고 prism-air 경계면 아래

에서는 evanescent field가 발생된다. 그리고 prism과 도파로 사이의 air gap이 충분히 작다면, 에너지의 coherent coupling에 의하여 도파로 내로 에너지 전달이 발생한다. 이와 같은 과정을 Prism-Coupling이라고 하며 Prism-Coupling을 위해서는 도파로보다 높은 굴절율의 prism을 사용해야 한다.

2-2. WKB(Wentzel-Kramer-Brillouin) Method

확산형 도파로의 굴절을 분포는 식 (2-1)의 형태로 표현된다.

$$n(\xi) = n_b + \Delta n \cdot f(\xi) \quad (2-1)$$

n_b 는 기판의 굴절율이며, 분포함수 $f(\xi)$ 는 식 (2-2)에서와 같이 단일 이온교환의 경우에 Erfc(complementary error), Gaussian, Exponential 함수를 포함하며, 이중이온교환의 경우에 단일 이온교환의 분포함수의 합으로 표시된다. 이 때 potassium 이온교환의 분포함수는 Gaussian 분포이며, Silver 이온교환의 분포함수는 Erfc 분포이다.

Gaussian : $n(\xi) = n_b + \Delta n \cdot \exp(-\xi^2)$

Exponential : $n(\xi) = n_b + \Delta n \cdot \exp(-|\xi|)$ (2-2)

Erfc : $n(\xi) = n_b + \Delta n \cdot \text{Erfc}(\xi)$

Double Ion-Exchange

$$: n(\xi) = n_b + \Delta n_{\text{Ag}} \text{Erfc}(\xi) + \Delta n_{\text{K}} \text{Exp}(-\xi^2)$$

각 parameter를 나타내면 다음과 같다.

- n_f = surface refractive index
- n_b = substrate refractive index
- $\Delta n = n_f - n_b$
- Δn_{K} = Index change by potassium ion-exchange
- Δn_{Ag} = Index change by silver ion-exchange
- $\xi = x/d$: Normalized effective depth

확산형 도파로에 대한 WKB equation은 식 (2-3)과 같으며 식 (2-3)을 실효깊이(effective depth)에 대해 정리하면 식 (2-4)와 같다.

$$k_0 d \int_0^{\xi_0} \sqrt{n(\xi)^2 - N^2} d\xi = m\pi + \frac{\pi}{4} + \varphi_0 \quad (2-3)$$

$$d = \frac{m\pi + \frac{\pi}{4} + \arctan\left[\left(\frac{N^2 - n_c^2}{n_f^2 - N^2}\right)^{1/2}\right]}{k_0 \int_0^{\xi_0} \sqrt{n(\xi)^2 - N^2} d\xi} \quad (2-4)$$

본 논문에서 얻어진 도파로 특성 parameter들은 Prism-Coupling 방법에 의한 각 mode에 대한 실효굴절을 측정과 함께 식 (2-4)의 WKB equation을 이용하여 computer calculation을 통해 계산되었다.

3. 실험 및 측정

3-1. 이온교환 도파로의 제작

본 실험에서 이온교환을 위하여 사용한 용융염으로는 potassium 이온교환의 경우 증류수 500g에 KNO_3 2mole %로 하였으며, silver 이온교환의 경우는 증류수 500g에 AgNO_3 1mole %로 하였다. 기판으로는 Corning #0211 glass($n_b=1.522$; 6328\AA)를 사용하였다. 세척된 기판은 hot plate(250°C)에서 10분 정도 예열하였다. 예열과정은 용융염과 기판의 온도차에 의한 기판 표면에서의 crack 발생을 방지하고자 실시하였다. 만일 기판에 crack이 발생되면 이것은 손실 발생의 요인이 된다. 본 실험을 위하여 전기로($350 \times 350 \times 600\text{mm}$)를 제작하였으며, 이온교환 도파로 제작에 있어서 일정한 온도를 유지하는 것이 중요하다. 온도 조절을 위하여 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 오차를 갖는 CA thermocouple과 온도조절기를 사용하였다. thermocouple은 vessel의 벽면에 접촉시켰으며, 수평 방향의 온도차를 확인하기 위해 thermocouple 1에 대칭하여 thermocouple 2를 설치하였다. Potassium 이온교환은 KNO_3 의 이온화 에너지를 충족시키는 400°C 에서 실시하고 silver 이온교환은 AgNO_3 의 이온화 에너지를 충족하는 300°C 에서 시행하였다. 그리고 이온교환시간에 따른 특성 변화를 관찰하기 위하여 potassium 이온교환과 silver 이온교환시간을 각각 30, 60, 120분으로 하였다. 이온 교환후 sample은 공기중에서 냉각하여 증류수와 methyl alcohol로 세척하였다. 이중이온교환도파로의 경우는 30분간 potassium 이온교환을 한 후 silver 이온교환을 30분간 시행하여 제작하였다.

3-2. Prism-Coupling 방법을 이용한 실효 굴절을 측정

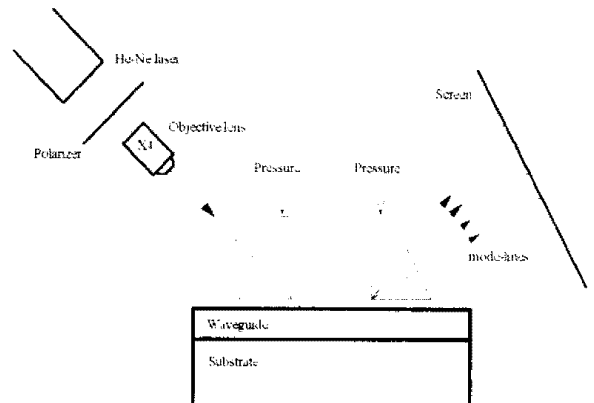


그림 3-1. mode 실효굴절을 측정하기 위한 Prism-Coupling 장치도

그림 3-1은 prism-coupling 방법을 이용한 도파로 모드들의 실효 굴절을 측정에 대한 개략도이다. 본 실험에서는 TE-mode의 실효 굴절을 측정을 위해 편광기를 사용하여 TE파를 생성하였으며, 광원으로 He-Ne laser($\lambda=632.8$)를 사용하였다. Prism(SF6 : $n_f=1.79$)에 입사되는 laser beam의 높은 coupling 길이와 효율에 영향을 미치지 때문에 objective lens($\times 4$)로 focusing 하여 prism에 입사시켰다. 또한 prism 윗면에 압력을 가하여 도파로 내로의 에너지 전달이 효율적으로 발생되게 하였다. 다양한 도파로 mode들의 실효 굴절을 측정과 beam launching을 위해 0.015

의 분해능을 갖는 angle rotary stage 와 x-y-z stage 를 사용 하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 4-1은 potassium 이온교환과 silver 이온교환의 이온교환시간에 따른 각 TE-mode의 실효굴절률 변화를 나타낸 것이다. potassium 이온교환의 경우에 교환시간이 증가함에 따라 각 mode의 실효굴절률은 증가하였다. 그러나 silver 이온교환의 경우는 mode number가 0, 1일 때 감소하다가 다시 증가하였으며, mode number 2 이상부터 교환시간에 따라 증가하였다. 이것은 potassium 이온교환의 경우는 교환시간이 증가함에 따라 표면굴절률은 증가하고 실효깊이의 증가율은 작기 때문에 모든 mode에 대해서 교환시간이 증가함에 따라 실효굴절률이 증가하고, silver 이온교환의 경우는 교환시간이 증가함에 따라 표면굴절률이 감소하고 실효깊이의 증가율이 매우 크기 때문에 mode number가 0과 1일 때는 시간에 따른 굴절률 분포가 교차하는 부분에 속해있기 때문에 감소하는 것이다.

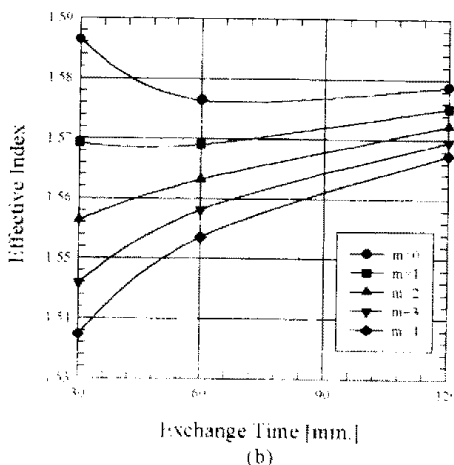
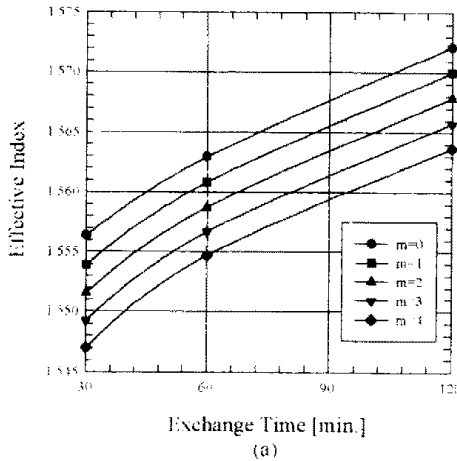


그림 4-1. 이온교환 시간에 따른 각 mode의 실효굴절률 변화
(a) potassium 이온교환
(b) silver 이온교환

Potassium 이온교환과 silver 이온교환에 의한 확산계수를 측정된 결과를 표 4-1에 나타내었다.

표 4-1. 이온교환에 의한 굴절률 분포에 따른 확산계수

Ion	Index profile	Diffusion coefficient [m ² /sec]
K ⁺	Gaussian	4.1428 × 10 ⁻¹¹
Ag ⁺	Eric	3.2867 × 10 ⁻¹⁰

그림 4-2는 제작된 이중이온교환 평판도파로의 silver 이온교환 시간에 따른 각 TE-mode의 실효굴절률 변화를 통하여 예측한 결과이다. 그림에서 SPSIE (Superior Point of Silver Ion-Exchange) 이상의 mode는 교환시간에 따라 silver 이온교환이 우세한 영역에서 발생할 수 있는 mode이다. 이러한 SPSIE는 이중이온교환시 silver 이온의 확산계수가 작음으로 교환시간에 따라 변화율이 매우 작다. 측정된 결과로부터 이중이온교환 도파로의 특성을 표 4-2에 나타내었다.

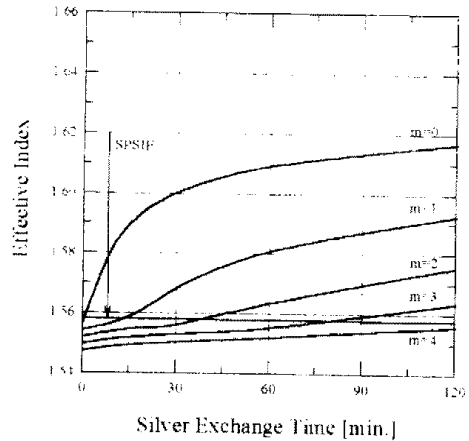


그림 4-2. 이중이온교환 도파로의 silver 이온교환시간에 따른 각 mode의 실효굴절률 변화

표 4-2. 이중이온교환 도파로의 특성

Exchange Time [min.]	Index at surface	Effective Depth for K ⁺ [μm]	Effective Depth for Ag ⁺ [μm]	Diffusion coefficient for Ag ⁺ [m ² /sec]
K ⁺ : 30	1.648033	17.1304	1.764137	4.1428 × 10 ⁻¹¹
Ag ⁺ : 30	1.547033	17.1304	1.764137	3.2867 × 10 ⁻¹⁰

그림 4-3은 이중이온교환에 의해 제작된 평판도파로의 각 TE-mode에 대한 field 분포를 나타낸다.

그림에서 turning point 부분의 peak는 WKB method에 의한 수치 해석 결과 발생한 오차이다. 이중이온교환을 시킨 도파로에서 mode number 증가에 따른 field 분포의 변화가 크며, 이것은 silver와 potassium 이온교환 부분과 potassium 이온교환 부분의 성세에 의한 효과로 볼 수 있다. 그림 4-2에서와 같이 potassium과 silver의 이중이온

교환 부분에서 mode 0, 1이 발생할 수 있음을 확인할 수 있다.

참 고 문 헌

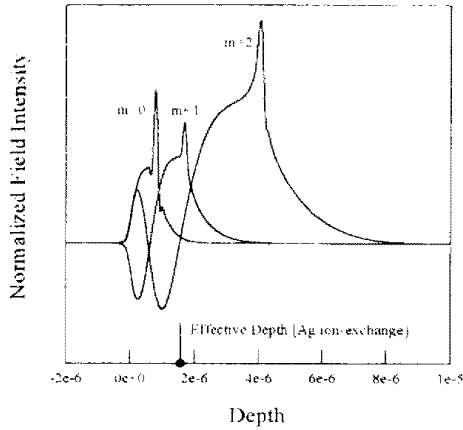


그림 4-3. 이중이온교환 도파로의 각 mode에 대한 Field 분포

1. R. Ulrich and R. Torge, Appl. Optics, Vol. 12, NO. 12, 2901 (1973)
2. Robert G. Hunsperger, "Integrated Optics: Theory and Technology", Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1982)
3. Kai Chang, "Handbook of Microwave and Optical Components", Vol. 4, JOHN WILEY & SONS
4. Hiroshi Nishihara, Masamitsu Haruna and Toahiaki Sahara, "Optical Integrated Circuit"
5. Donald L. Lee, "Electromagnetic Principles of Integrated Optics", JOHN WILEY & SONS
6. Joseph E. Gortych and Dennis G. Hall, IEEE J. Quantum Electronics, Vol. QE-22, NO. 8, 892 (1986)
7. Grant Griffiths and Peter J. Khan, IEEE J. Quantum Electronics, Vol. QE-17, NO. 4, 529 (1981)
8. Pierre L. Auger and S.I. Najafi, Appl. Optics, Vol. 33, NO. 16, 3333 (1994)

5. 결 론

본 논문에서는 수동소자 제작의 기반기술로서 이온교환에 의한 도파로의 제작조건에 따른 평판 도파로의 특성 변화를 prism-coupling method와 WKB equation을 이용하여 고찰하였다.

이온교환에 의한 굴절률 변화를 potassium($\Delta n=0.04 \sim 0.05813$) 이온교환보다 silver($\Delta n=0.05756 \sim 0.09854$) 이온교환에서 크게 발생하였으며, silver 이온교환의 확산계수($\sim 10^{13} [\text{m}^2/\text{sec}]$)가 potassium 이온교환의 확산계수($\sim 10^{14} [\text{m}^2/\text{sec}]$)보다 크게 측정되었다. 그리고 WKB 이론에 의한 해석 결과 potassium 이온교환에 의한 굴절률 분포는 gaussian 분포를 따름을 확인하였다.

이중이온교환 도파로의 해석 결과 굴절률 분포는 potassium과 silver가 함께 이온교환된 영역과 potassium만이 이온교환된 부분으로 나뉘어짐을 확인하였으며, 이때 두번째 교환단계인 silver 이온교환의 확산계수($\sim 10^{13} [\text{m}^2/\text{sec}]$)는 단일 이온교환시보다 작아짐을 알 수 있었다. 표면의 굴절률 변화($\Delta n=0.126643$)는 potassium 또는 silver 이온에 의한 단일 이온교환에 의해 제작된 도파로보다 변화치가 큼을 확인하였으며, 이러한 결과로부터 이중이온교환 도파로는 mode의 구속력을 강화시킬 수 있는 특성이 있음을 알 수 있다.