

論文98-35D-1-12

Ag⁺-Na⁺ 이온교환법을 이용한 BK7 유리 평판형 광도파로의 특성

(Characterization of Planar Optical Waveguides by Ag⁺-Na⁺ Ion Exchange in BK7 Glass)

田金洙*, 潘在景*

(Keum-Soo Jeon and Jae-Kyung Pan)

요 약

Ag⁺ 이온교환법을 이용하여 BK7 다모드 평판형 광도파로를 제작하였다. Ag⁺-Na⁺ 이온교환으로 형성된 BK7 유리 평판형 광도파로의 확산 특성과 모드 특성을 살펴보기 위하여 유효굴절율을 측정하였다. 표면 굴절율 변화량과 Ag⁺ 이온의 확산계수 등을 구하고, 확산 깊이와 확산 시간의 제곱근 사이의 선형 관계, 확산 계수와 확산온도의 관계, 확산 이온의 농도와 표면굴절율 변화량과의 관계등의 소자변수와 공정변수의 관계를 결정하였다. 이론적인 gaussian 함수의 굴절율 분포가 모든 도파 모드에서 대하여 측정된 값과 잘 일치함을 확인하였다. 그리고 공정변수와 소자변수 사이의 관계를 정립하여 단일 모드나 원하는 모드의 도파로를 제작할 수 있는 공정조건을 확립하였다.

Abstract

Planar graded index optical waveguides have been formed by Ag⁺ ion exchange in the BK7 optical glass. The experimental results of diffusion and modal characteristics of Ag⁺-Na⁺ exchanged BK7 glass waveguides are presented. Measurements of the mode indices have been made and the surface index change and diffusion coefficient of Ag⁺ ion have been measured. We found the relations between the process and device parameters such as the diffusion depth and the square root of the diffusion time, diffusion coefficient and diffusion temperature, and diffusion ion concentration and surface index change. A theoretical gaussian function refractive index profile matched best with the measured data for all the guided modes. The empirical relations between the process and the device parameters are derived and subsequently used to formulate a systematic procedure for fabricating singlemode and multimode waveguides.

I. 서 론

유리는 다른 소자 재료에 비하여 비교적 가격이 싸고, 투명도가 높아 전송손실이 적으며, 기계적으로 강하여 안정성 있는 소자를 제작할 수 있으며, 유리의 굴절율이 광섬유의 굴절율에 가깝게 근접함으로써 광

섬유와 광집적 소자의 접합 손실을 줄일 수 있는 특징과 같은 장점을 가지고 있기 때문에 파장다중화기, 광분리기, 편광 분리기 등의 수동 집적광학 소자의 재료로 매우 중요한 역할을 하고 있으며, 그 응용 분야 또한 다양하다.

유리에 광도파로를 형성하는 방법으로는 다른 방법(화학 기상 증착법, 이온 주입법, sputtering, sol-gel 코팅법 등)에 비하여 공정이 간단하고 저 손실의 재현성 있는 광도파로 제작이 가능한 이온 교환법이 널리 이용되고 있다. 이온 교환법은 유리 내부에 포함되어

* 正會員, 全北大學校 電氣·電子·制御 工學部
(Dept. of Electrical Engineering, Chonbuk National University)

接受日字:1997年8月7日, 수정완료일:1998年1月3日

있는 단가의 양이온(Na⁺)과 크기와 편구 특성이 다른 외부의 양이온(Ag⁺, TI⁺, K⁺, Cs⁺)이 교환됨으로써 굴절율의 증가를 가져오고, 이 증가된 굴절율이 도파로를 형성하게 된다.^[1]

이온 교환은 보통 300℃ 이상의 높은 온도에서 수행되며 외부전계를 가하여 이온 교환 반응을 가속시키는 방법도 이용되고 있다. 유리에 외부 확산원을 제공하는 방법으로는 용해된 염과 금속 박막을 이용하는 방법이 있으며, 제작공정의 간편함 때문에 용해된 염을 주로 사용한다.

유리 광도파로는 능동소자와는 달리 제작 후 전계나 음향 등의 외부의 에너지에 의하여 소자 특성을 변화시킬 수 없는 수동소자이다. 따라서 실제 응용 가능한 재현성있는 유리 집적광학 소자를 제작하기 위해서는 제작과정에서 소자 재료인 유리나 확산원의 종류에 따라서 확산온도, 확산시간 및 확산 이온의 농도 등의 공정변수와 제작된 도파로의 최대 굴절율의 증가치, 굴절율 분포, 확산깊이 등의 소자변수 사이의 관계 정립이 필수적이다.

본 논문에서는 BK7 유리 기판에서의 Ag⁺ 이온의 확산에 의해 형성된 도파로의 특성을 파악하기 위하여 외부 확산원으로 농도에 따른 굴절율 변화를 정밀하게 제어할 수 있으며 등방성의 확산 특성을 가진 AgNO₃를 사용하였으며, 공정과정에서는 외부전계를 사용하지 않고 여러 공정변수에 따라서 다모드 평판형 도파로를 제작하였다. 제작된 도파로의 유효 굴절율은 프리즘결합기를 이용하여 측정하고, 역WKB(IWKB)법^[2,3]을 이용하여 각 공정변수에 따른 굴절율의 분포와 최대 굴절율의 증가치, 확산깊이를 구하였다.

그리고 이들 값을 이용해 각 확산온도에서 BK7 유리 내부에서의 Ag⁺이온의 확산계수를 결정하고, 공정변수와 소자변수의 관계를 통하여 1.3μm와 1.55μm의 두 파장에서 원하는 모드 수를 지원하기 위한 공정조건을 결정하였다.

2장에서는 확산 이론에 대해 살펴보고, 3장에서는 평판형도파로의 제작과정과 제작된 도파로의 특성을 평가하였다. 그리고 4장에서 결론을 맺었다.

II. 확산 이론

외부 전계가 없는 이온교환의 경우 1차원 확산 방정식은 식(1)처럼 표현된다.^[4]

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_a}{1 - \alpha u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\alpha = 1 - \frac{D_a}{D_b} \quad (2)$$

여기에서 D_a(D_b)는 유리 내부에서의 은이온(나트륨이온)의 자기 확산계수를 u는 정규화된 은이온 농도를 나타낸다. 그리고 α는 교환되는 이온들의 이동도 비이다. α는 0과 1사이의 값을 가지며 α가 0인 경우는 교환 이온의 이동도가 같음을 의미한다.

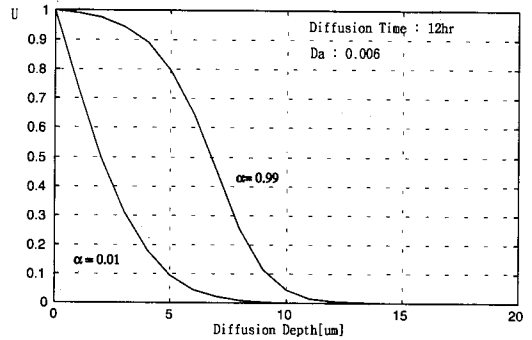


그림 1. α값의 변화에 따른 이온 교환 평판형 도파로의 농도 분포
Fig. 1. Profiles of concentration for ion exchange of slab waveguides with α.

그림 1은 유한 차분법을 사용하여 식(1)을 수치해석한 결과이다. α의 변화에 따라서 확산이온의 농도분포의 모양과 확산 깊이가 크게 변하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, α의 값이 0에서 1의 값으로 가까워지면 농도 분포는 erfc 함수의 모양에서 gaussian 함수의 모양으로 변화하고 확산깊이가 증가한다. 그림 2는 α가 0.931일때 확산 시간의 변화에 따른 은이온의 농도를 확산깊이에 따라 나타내었다. 다른 공정 조건이 일정하고 확산시간만이 변화하면 확산 이온의 농도분포의 모양은 변하지 않고 확산깊이만이 증가하고 있다. 결과적으로, 그림 1과 그림 2에서 우리는 확산깊이나 확산 이온 농도 등의 소자변수들이 확산 이온의 종류, 기판의 재료, 그리고 확산시간 등의 공정변수의 조건에 따라서 다양한 특성을 나타내고 있음을 볼 수 있다. α는 확산 이온의 종류나 기판으로 사용되는 유리의 구성 성분에 따라서 각각 다른 값을 가지며, 확산 시간 또한 도파로의 제작과정에서 많은 오차를 포함하고 있으므로 정확한 소자특성을 파악하기 위해서는 실제 공정조건에 따른 도파로를 제작하여 공정조건을 잡

이야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 다모드 평판형 도파로를 제작하고 정확한 공정변수와 소자변수의 관계를 통하여 제작 공정을 최적화하였다.

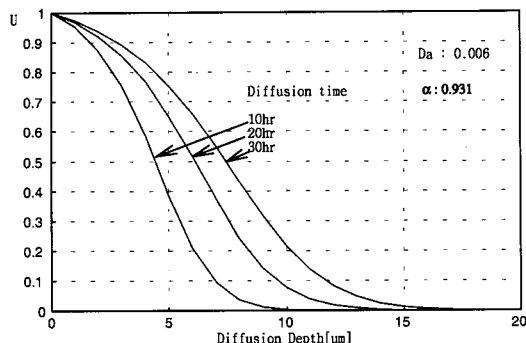


그림 2. 확산시간에 따른 이온 교환 평판형 도파로의 농도 분포
Fig. 2. Profiles of concentration for ion exchange of slab waveguides with diffusion time.

III. 평판형 도파로의 제작 및 특성평가

1. 도파로 제작

BK7에서 Ag⁺ 이온의 확산 특성을 파악하기 위해서 여러 공정변수, 즉 확산 시간, 확산 온도, 그리고 Ag⁺ 이온의 확산농도 등을 변화시키면서 다모드 평판형 도파로를 제작하였다. 기판으로는 두께 1mm, 직경 5cm의 BK7 유리를 사용하였다.

확산원의 농도는 0.67NaNO₃ + 0.33KNO₃ + x × 10⁻³AgNO₃(x = 0.5, 1, 2, 4)의 구성비로 이루어진다. 확산온도는 330℃, 340℃, 350℃에서 확산시간은 46시간에서 88시간의 범위에서 행하였다. 확산원으로 순수한 AgNO₃를 사용하지 않고 NaNO₃에 희석하여 사용하는 이유는 순수한 AgNO₃를 사용할 경우 최대 굴절율의 증가치가 약 0.1정도가 되어 매우 짧은 시간에 단일 모드가 형성되어 실소자 제작을 위해서는 정확한 온도제어 뿐만 아니라 수 초 범위의 시간 제어가 필요하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 AgNO₃를 NaNO₃에 희석하여 낮은 농도에서 이온교환을 수행하면, 수 시간동안의 이온교환에서 단일 모드가 형성되므로 공정시간을 매우 정밀하게 제어하지 않아도 원하는 소자변수를 쉽게 얻을 수 있다. 확산원의 구성중에 KNO₃의 역할은 이온 교환중에 BK7에 존재하는 K⁺가 외부로 확산되는 것을 방지하여 기판 내부의 Na⁺ 이온과 확산원의 Ag⁺ 이온 만의 순수한 이온 교환을

기대하기 위해서이다.

2. 평판형 도파로의 유효 굴절을 측정

제작된 도파로의 유효 굴절율은 프리즘 결합기에 의해 측정된 결합 각도를 이용하여 구하였다. 모드에 따른 유효 굴절율은 식(3)에서 계산할 수 있다.

$$N_m = n_p \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_m}{n_p} \right) + A \right] \quad (3)$$

여기에서 A는 프리즘의 기본각을 나타내고, n_p는 프리즘의 굴절율을, 그리고 θ_m은 결합 각도이다. 결합 각도를 측정하기 위한 실험장치는 그림 3에 나타내었다. 각 모드의 결합 각 θ_m은 검출기에 최대 전력이 검출될 때까지 회전 테이블을 회전시켜 그때의 각도를 측정한다. 실험장치에서 광원으로는 0.6328μm 파장의 He-Ne 레이저를 사용하였고, 기본각 A가 42.5°이고 0.6328μm 파장에서의 굴절율이 1.84491인 루틸 프리즘을 사용하였다.

확산에 의해 형성된 평판형 도파로의 기판의 굴절율 (n_b)을 포함한 굴절율은 식(4)로 표현된다.

$$n(x) = n_b + \Delta n f(\bar{x}) \quad (4)$$

$$\Delta n = n_s - n_b, \quad n_s = \text{표면 굴절율}, \quad \bar{x} = \frac{x}{d}$$

여기서 Δn은 최대 굴절율 변화량을, x는 도파로 안쪽으로의 거리를 나타내며, f(̄x) 정규화된 확산 분포이고 표1에 주어진다. 그리고 d는 유효확산 깊이로서 WKB 관계식에 의해 식(5)로 표현된다.

표 1. 정규화된 확산 분포 함수
Table 1. Normalized diffusion profiles.

분포 함수	f(̄x)
Gaussian	exp(-x̄ ²)
Erfc	Erfc(x̄) = $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-y^2) dy$
Exponential	exp(- x̄)

$$d = \frac{(m + \frac{3}{4})\pi}{k_0 \int_0^{x_i} \sqrt{n^2(\bar{x}) - N_m^2} d\bar{x}} \quad m=0,1,2,3 \dots, \quad (5)$$

여기에서 ̄x는 정규화된 x 좌표를, x_i는 각모드의 정규화된 전환점을 그리고 N_m은 유효굴절율을 나타낸다.

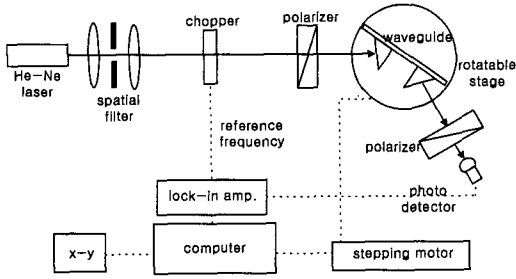
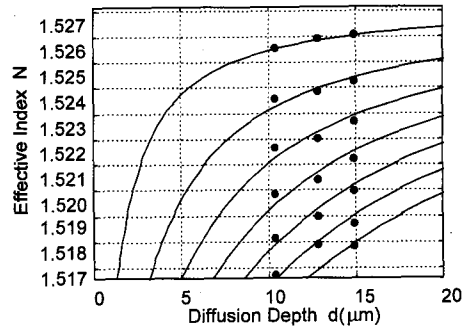


그림 3. 프리즘 결합기를 이용하여 도파로의 결합각도를 구하기 위한 실험 장치
 Fig. 3. Experimental setup for measuring coupling angles in the prism-coupling method.

프리즘 결합기를 이용하여 구한 유효굴절율의 실험 값과 표 1의 gaussian, erfc, exponential의 이론적인 확산 분포와 비교하여 가장 근접한 굴절율 분포를 결정한다. 그림 4(a), (b), (c)는 이론적인 굴절율 분포가 Gaussian 함수의 형태로 가정할 때 330°C, 340°C, 350°C의 각각의 확산온도에서 이론적인 곡선과 실험적으로 측정된 데이터를 비교한 그림이다. 그림 4의 Gaussian 형태의 이론적인 굴절율 분포가 여러 공정 조건에서 실험 데이터에 잘 일치함을 확인할 수 있다.



(c)

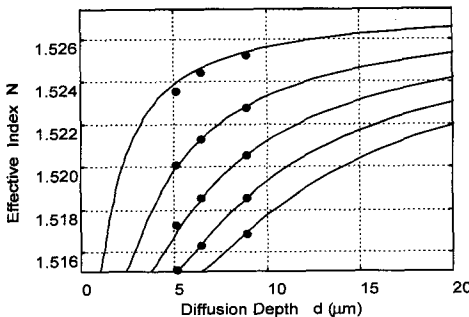
그림 4. Gaussian 분포의 이론적인 곡선과 측정된 유효 굴절율의 비교; 확산 온도 (a) 330°C, (b) 340°C, (c) 350°C.
 Fig. 4. Gaussian curves compared with measured effective indices; diffusion temperature (a) 330°C, (b) 340°C, (c) 350°C.

본 논문에는 erfc나 exponential 형태의 이론적인 굴절율 분포와 실험 데이터를 비교한 그림은 생략하였지만 각각의 확산온도에서 이론 값과 실험 데이터 사이에 많은 오차가 있음을 확인하였다.

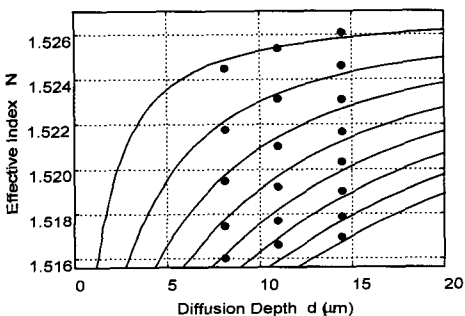
3. 굴절율 분포

제작된 평판형 도파로의 굴절율 분포는 측정된 유효 굴절율에 IWKB법을 이용하여 결정하였다. IWKB법은 굴절율 분포가 표면으로부터 단조롭게 감소한다면 다모드 도파로의 경우 매우 정확한 굴절율 분포를 제공한다.

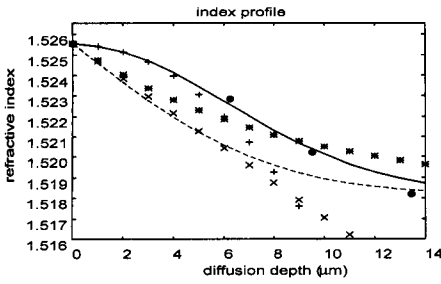
그림 5(a)-(d)는 측정된 유효굴절율을 사용하여 IWKB 방법으로 계산한 굴절율 분포를 나타내고 있다. 여러 공정변수에 따라서 IWKB(●)법에 의해 구한 값과 여러 가지 이론적인 굴절율 분포함수 Gaussian(—), exponential(*), erfc(--), $1-x^2$ (+), 그리고 $1-x$ (x) 함수를 비교하였다. 그림에서 보면 모든 샘플의 IWKB 법으로 구한 실험 값과 Gaussian 함수의 이론적인 굴절율 분포가 가장 근사함을 확인할 수 있다. 논문에 제시되지 않은 다른 공정조건에서도 위의 사실을 확인하였다. 그림 5에서 고차 모드에서의 굴절율 분포가 Gaussian(—) 함수의 그래프와 많은 오차가 있음을 볼 수 있다. 이는 모드가 증가하면 프리즘 결합기의 모드 사이의 결합각의 간격이 좁아져 측정 오차가 증가하고, IWKB 법에서 오차가 모드수가 많을수록 수치해석 과정에서 오차가 증가되기 때문이라 생각된다.



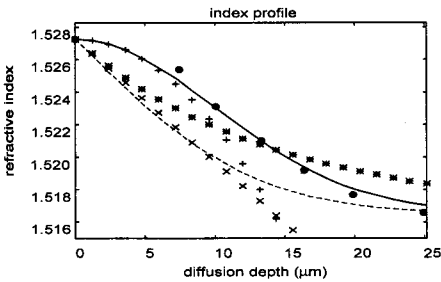
(a)



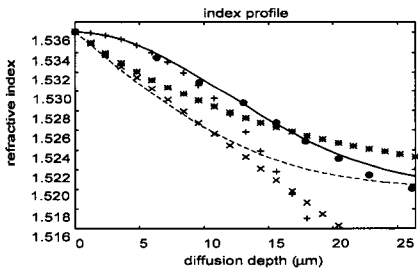
(b)



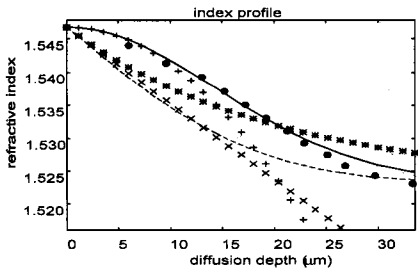
(a) $t : 60 \text{ h}, T : 340^\circ\text{C}, C_0 : 0.5 \times 10^{-3}$



(b) $t : 64 \text{ h}, T : 340^\circ\text{C}, C_0 : 1 \times 10^{-3}$



(c) $t : 60 \text{ h}, T : 340^\circ\text{C}, C_0 : 2 \times 10^{-3}$



(d) $t : 60 \text{ h}, T : 340^\circ\text{C}, C_0 : 4 \times 10^{-3}$

그림 5. IWKB법으로 구한 굴절율 분포와 이론적인 굴절율 분포 함수의 비교 : IWKB(●), gaussian(—), erfc(--), 1-x²(+), 1-x(x), exponential(*)

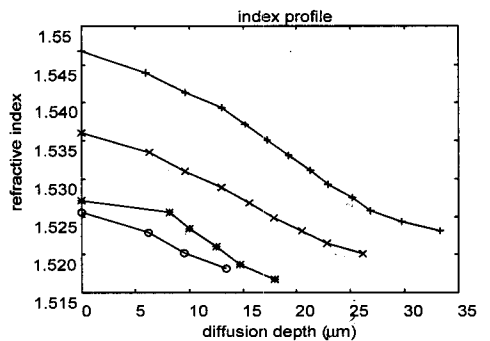
Fig. 5. Comparison index profile by the IWKB method with various theoretical index profiles.

결과적으로 앞 절에서 살펴본 유효 굴절율과 유효 확산깊이의 관계와 그림 5의 결과를 토대로 BK7 유리 기판에 Ag⁺이온의 이온교환에 의해 형성된 평판형 도파로의 굴절율 분포는 Gaussian 함수 형태의 굴절율 분포를 갖는다.

그림 6은 공정변수의 변화에 따른 굴절율의 변화를 보여 주고 있다. 그림 6(a)는 확산시간 t(60시간)와 확산온도 T(340°C)를 일정하게 유지하고 Ag⁺ 이온농도 C₀의 변화에 따른 굴절율 분포의 변화를 나타내고 있다. Ag⁺ 이온 농도가 증가할수록 확산깊이와 도파로 표면의 굴절율, 즉 최대굴절율 변화량이 증가함을 볼 수 있다. 그리고 그림 6(b)는 일정한 Ag⁺ 이온의 확산농도(1×10⁻³ mole %)와 각각의 확산온도 330°C, 340°C, 350°C에서 확산시간의 변화에 따른 굴절율의 변화를 나타내고 있다. 확산시간이 증가하면 기판 표면의 굴절율(또는 최대굴절율 변화량)은 거의 변화가 없고 확산깊이만이 증가함을 볼 수 있다. 그림 6(c)는 각각 확산시간과 확산농도를 일정하게 유지하고 확산온도를 변화시키면서 제작한 도파로의 굴절율 분포를 나타내고 있다. 여기에서 공정변수 중에서 확산온도만이 변할 경우 기판 표면의 굴절율(또는 최대굴절율 변화량)은 변화가 없고, 단지 이온의 확산깊이만이 증가함을 확인할 수 있다.

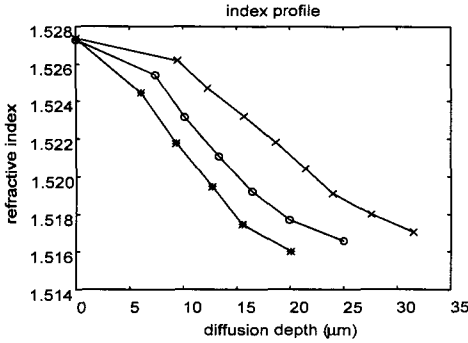
4. 평판형 도파로의 전계분포

Graded 굴절율 분포의 평판형 도파로에서 TE 모드 E_y의 전계분포는 식(6)의 Helmholtz 방정식의 근이 된다.



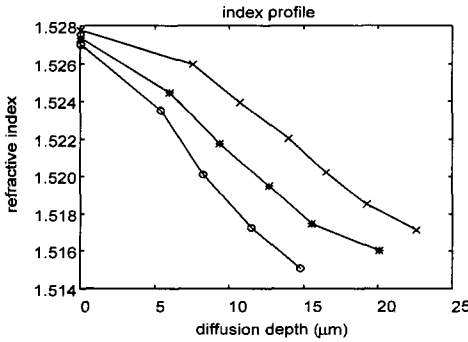
(a)

- $t : 60 \text{ h}, T : 340^\circ\text{C}, C_0 : 0.5 \times 10^{-3}$ (o)
- $t : 60 \text{ h}, T : 340^\circ\text{C}, C_0 : 1.0 \times 10^{-3}$ (*)
- $t : 60 \text{ h}, T : 340^\circ\text{C}, C_0 : 2.0 \times 10^{-3}$ (x)
- $t : 60 \text{ h}, T : 340^\circ\text{C}, C_0 : 4.0 \times 10^{-3}$ (+)



(b)

t : 46 h, T : 340°C, C₀ : 1.0×10⁻³ (*)
 t : 64 h, T : 340°C, C₀ : 1.0×10⁻³ (o)
 t : 88 h, T : 340°C, C₀ : 1.0×10⁻³ (x)



(c)

t : 46 h, T : 330°C, C₀ : 1.0×10⁻³ (o)
 t : 46 h, T : 340°C, C₀ : 1.0×10⁻³ (*)
 t : 46 h, T : 350°C, C₀ : 1.0×10⁻³ (x)

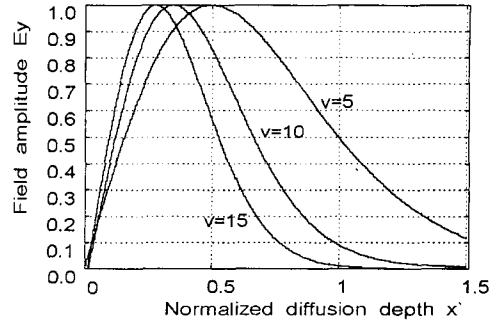
그림 6. IWKB법으로 계산된 평판형 도파로의 굴절률 분포

Fig. 6. Index profile of a planar waveguide reconstructed by the IWKB method.

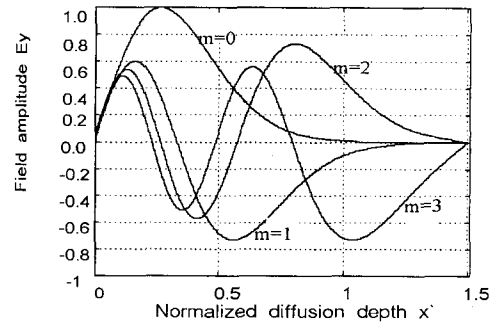
$$\frac{d^2 E_y}{dx^2} + [k_0^2 n^2(x) - \beta^2] E_y = 0 \quad (6)$$

여기에서 k_0 는 자유공간에서의 파벳터이고 β 는 전파상수이다. 이 2차 미분방정식의 수치적인 전체분포 해를 임의의 굴절률 분포를 갖는 도파로에 적용하기 위하여 식(6)을 정규화할 필요가 있다.

식 (6)을 정규화된 전파상수 $b = (N^2 - n_b^2)/(n_s^2 - n_b^2)$ 와 정규화된 주파수 $V = k_0 d (n_s^2 - n_b^2)^{1/2}$, 그리고 $\bar{x} = x/d$ 이용하여 정규화하면 식(7)이 된다.



(a) m=0 and V=5, 10, 15



(b) V=15 and m=0, 1, 2, 3

그림 7. Gaussian 함수 굴절률 분포에서의 전계
 Fig. 7. Electric field for gaussian profile.

$$\frac{d^2 E_y}{d\bar{x}^2} + V^2 [\bar{n}(\bar{x}) - b] E_y = 0 \quad (7)$$

위 식은 단지 정규화된 파라미터 \bar{x} , b , V 그리고 표 1의 $\bar{n}(\bar{x})$ 를 포함하고 있으므로 앞 절에서 결정된 평판형 도파로의 Gaussian 함수 형태의 굴절률 분포에 대하여 수치적인 해를 구할 수 있다. 초기조건 $E(0)=1$ 과 $\frac{dE_y}{dx} = V(a_E + b)^{1/2}$ 를 가지고 미분방정식(7)를 4차 Runge-Kutta법^[5]을 이용하여 수치해석 방법을 이용하여 구하였다. 여기에서 a_E 는 비대칭 변수로 $a_E = (n_b^2 - 1)/(n_s^2 - n_b^2)$ 이다. 이때 주의할 점은 Runge-Kutta법으로 계산된 해는 도파로 표면으로부터 먼 거리에서는 전체의 세기가 0이 되지 않기 때문에 일반적으로 도파 모드가 되지 않는다. 이런 수치적인 불안정성은 계산된 전파상수 값에서 약간의 오차가 생기는 결과 때문에 발생한다. 식(7)이 선형미분방정식 이므로 초기조건을 달리하여 구한 두 해를 선형 결합하면 결합된 값도 방정식의 해가 된다. 따라서 정확한 도파 모드의 전계분포를 얻기 위해서 초기조건인

$x=0$ 에서의 기울기 $dE_y/d\bar{x}$ 의 값을 약간 변화시켜 다른 새로운 해를 구하였다. 구한 두 해를 선형결합하여 도파로의 원하는 확산깊이에서의 전계의 크기가 0이 되게 만들어, 두 해를 중첩하면 모드의 전계 분포가 된다.

그림 7은 Gaussian 함수 형태의 굴절을 분포에서 TE 모드의 전계 분포를 나타내고 있다. 여기에서 변수들 즉, 파장은 $0.6328\mu\text{m}$, BK7 기판의 굴절율은 1.515, 최대굴절을 변화량은 0.0123을 사용하였다. 그림 7(a)는 여러 V 값($V=5, 10, 15$)에서의 0차 모드의 전계분포를 보여주고 있다. 그림에서 V 가 클수록 모드가 도파로에 더 잘 제한됨을 볼 수 있다. 그림 7(b)는 $V=15$ 일 때 다모드 도파로의 모드 $m=0, 1, 2, 3$ 에서의 전계분포이다. 고차 모드의 전계의 최고값이 도파로의 안쪽으로 더 많이 침투하여 에너지의 대부분이 표면에서 멀리 떨어진 부분에 존재함을 볼 수 있다.

Imai^[6] 등의 논문에 의하면, 전파 모드가 증가함에 따라 광손실은 선형적으로 감소한다. 고차 모드에서 손실이 감소하는 이유는 그림 7(b)에서 처럼 고차 모드의 전계가 저차 모드의 전계보다 더 깊이 도파로 내부로 침투하여 은이온의 농도가 상대적으로 적은 부분을 많은 에너지가 진행하기 때문에 은이온에 의해 생기는 산란손실이 줄어든다. 그리고 표면 결함을 가진 도파로의 경우 표면 산란 손실 등에 의해 생기는 도파손실도 모드가 증가할수록 감소한다. 따라서 도파로의 표면산란과 도파로 내부의 은이온에 의해 발생하는 산란으로 인한 전체 손실은 모드증가에 따라 감소하게 된다.

5. 확산계수 결정

유효 확산깊이와 확산시간의 관계를 구하고, 각 조건에서의 최대 굴절을 변화량과 여러 확산온도에서의 유효 확산계수를 결정하였다. G.Y.Yip^[7] 등이 soda lime 유리 기판을 이용하여 K⁺이온의 이온교환에서 수행한 방법을 이용하였다.

Gaussian 함수의 경우, 유효 확산깊이 d 는 아래 식처럼 주어진다.^[8]

$$d = \sqrt{D_e t} \tag{8}$$

여기에서 t 는 확산시간, D_e 는 확산계수를 나타낸다. 또한 확산온도 T 와 확산계수의 관계는 Arrhenius의 관계식에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$D_e(T) = D_0 e^{-\Delta H/RT} \tag{9}$$

여기에서 ΔH 는 활성화 에너지, R 은 기체상수 (8.314 J/K° mole)이다. 식(9)에 로그를 취하면 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\ln D_e(T) = \ln D_0 - (\Delta H)/RT \tag{10}$$

위 두 식에서 D_0 와 $\Delta H/R$ 는 상수이고, T 는 절대온도이다. 여러 공정변수에 따라서 측정된 데이터를 가지고 D_0 와 $\Delta H/R$ 를 구하여 확산온도와 확산계수 및 유효 확산 깊이와의 관계를 결정하였다.

표 2. 온도에 따른 측정된 최대굴절을 변화량과 확산계수

Table 2. Measured max. index change and diffusion coefficients with temperature.

온도(°C)	최대굴절을 변화량(Δn)	확산계수 ($\mu\text{m}^2/\text{min}$)
330	0.01250	0.0224
340	0.01213	0.0355
350	0.01227	0.0453

그림 8은 유효 확산깊이 d 와 확산시간 \sqrt{t} 의 관계를 나타내고 있다. 각 온도에서 측정된 확산깊이의 데이터 점에 최소사승법을 이용하여 관계 곡선을 구하였다. 이 그림에서 확산깊이 d 와 확산시간 \sqrt{t} 사이에 선형관계가 있음을 확인할 수 있다. 그림 8과 식(8)로부터 확산계수 D_e 를 구할 수 있다. 330°C, 340°C, 350°C의 확산온도에서 확산계수 D_e 는 각각 $0.0224\mu\text{m}^2/\text{min}$, $0.0355\mu\text{m}^2/\text{min}$, $0.0453\mu\text{m}^2/\text{min}$ 을 결정하였다. 표2에 각 온도에서 측정된 최대굴절을 변화량과 확산계수를 요약하였다. 식(10)의 $\ln D_e$ 와 $1/T$ 의 관계곡선의 기울기는 $\Delta H/R$ 이다. 표 2의 결과를 이용하여 $\ln D_e$ 와 $1/T$ 사이의 관계를 그림 9에서 보여주고 있다. 그림에서 기울기 $\Delta H/R$ 을 RMS 법에 의해 13208 m²/sec로 결정하였다. 따라서 활성화 에너지 ΔH 는 1.098×10^5 J이 되고, 확산상수 D_0 는 1.2597×10^{-6} m²/sec가 된다. 그림 10은 Δn 과 C_0 와의 관계를 나타내고 있다. Δn 과 C_0 의 관계는 농도가 적은 부분에서 선형적으로 증가하다가 4×10^{-3} 이상의 농도에서는 더 이상 최대굴절을 변화량이 증가되지 않고 포화됨을 볼 수 있다.

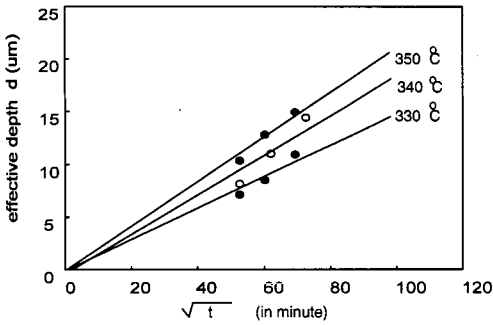


그림 8. 유효 확산깊이와 확산시간의 제곱근과의 관계 (확산이온 농도 : 1×10^{-3} mole %)
 Fig. 8. Effective diffusion depth versus the square root of diffusion time (concentration : 1×10^{-3} mole %).

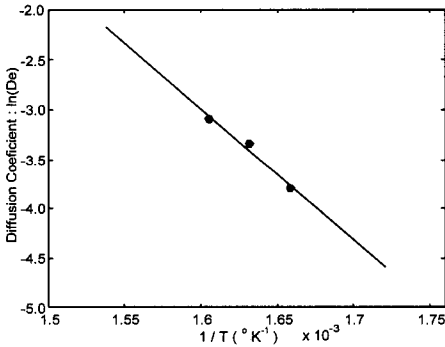


그림 9. $\ln D_e$ (확산계수) 와 $1/T$ (확산온도)의 관계 (확산이온 농도 : 1×10^{-3} Mole %)
 Fig. 9. The relation between $\ln D_e$ and $1/T$ (concentration : 1×10^{-3} mole %).

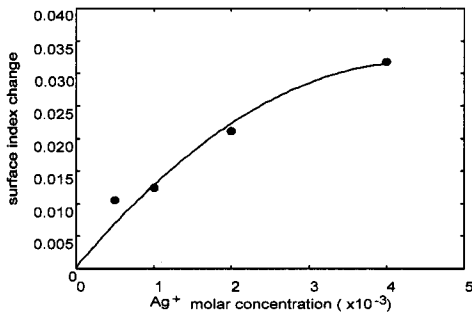


그림 10. 표면 굴절율 변화량과 Ag^+ 확산이온 농도의 관계
 Fig. 10. Surface index change versus Ag^+ diffusion ion concentration.

6. 소자 설계를 위한 공정의 최적화

집적 광학에 사용되는 소자의 도파로는 대부분이 단

일 모드에서 동작한다.

따라서 단일 모드의 광 도파로를 제작하기 위해서는 제작 공정 변수와 소자 변수의 정확한 관계의 정립이 필요하다. 소자의 광 도파특성은 최대 굴절율의 증가치, 굴절율 분포, 도파로의 깊이 등과 같은 소자 변수에 의존하며, 이들 각각의 소자 변수는 확산시간, 확산 온도, Ag^+ 농도 등의 제작 공정변수에 의하여 변화한다. 따라서 각 변수 사이의 관계를 결정하면 원하는 수만큼의 모드를 지원하는 광 도파로를 제작할 수 있다. 그림 11은 공정변수와 소자변수의 관계를 통하여 $0.6328\mu m$ 의 파장에서 확산시간과 용해된 염 내의 Ag^+ 농도의 관계를 지원 가능한 모드 수에 따라서 보여주고 있다.

이 그림을 이용하여 $0.6328\mu m$ 의 파장에서의 원하는 모드 수를 지원하는 도파로를 제작할 수 있는 공정변수를 찾을 수 있기 때문에 소자설계에 사용할 수 있다. 예를 들어, 일단 확산시간이 결정되어지면 식(7)에서 이는 곧 확산깊이까지 결정된 것이고, 제조자는 원하는 모드의 도파로를 제작하기 위한 확산 농도는 그림 11을 통해 구할 수 있다.

다른 파장에서도 산란 특성이 무시된다면 그림 10의 확산 농도와 표면 굴절율 변화량과의 관계가 유효하므로 $1.3\mu m$ 와 $1.55\mu m$ 의 파장에서도 비슷한 설계를 그릴 수 있다.

그림 12는 $1.3\mu m$ 와 $1.55\mu m$ 의 두파장에서의 확산농도와 확산시간과의 관계를 보여주고 있다. 두 파장에서 원하는 모드 수의 공정조건을 결정할 수 있고, 단일 모드만을 공통으로 지원할 수 있는 영역을 결정할 수도 있다.

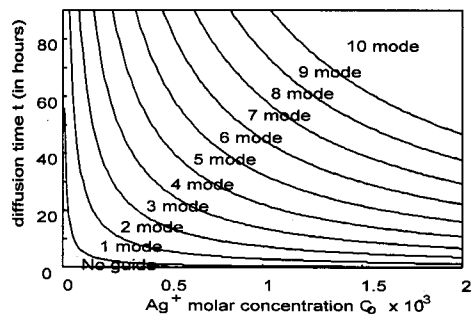


그림 11. 파장 $\lambda = 0.6328\mu m$ 에서 확산시간과 확산농도의 관계
 Fig. 11. Diffusion time versus concentration for $\lambda = 0.6328\mu m$.

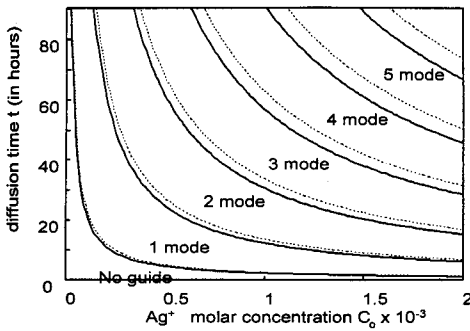


그림 12. 파장 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ (-)과 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ (...)에서 확산시간과 확산농도의 관계
 Fig. 12. Diffusion time versus concentration for $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ (-) and $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ (...).

IV. 결 론

본 논문에서는 BK7 유리 기판에 Ag⁺ 이온의 확산을 이용하여 제작한 평판형 도파로의 특성을 살펴 보았다. 확산에 의해 형성되는 도파로의 이론적 해석으로 이온교환 반응을 수치적으로 모델링하였다. 평판형 도파로를 다양한 공정조건으로 제작하고, 프리즘 결합기를 이용하여 모드의 유효 굴절율을 측정하였다. 측정된 유효굴절율 데이터를 가지고 굴절율 분포를 구하고, 공정변수의 변화에 따른 굴절율의 변화 특성을 살펴 보았다. 그리고 실험에 의해 구한 굴절율 분포와 이론적인 굴절율 분포를 비교하여 Ag⁺ 이온의 확산에 형성된 BK7 유리 도파로는 gaussian 함수의 굴절율 분포와 가장 가까움을 확인하였다.

유효 확산깊이와 확산시간의 선형관계를 결정하고 또한 확산 온도와 유효 확산상수의 관계도 결정하였다. 이들 관계를 이용하여 확산온도 330℃, 340℃, 350℃에서 확산계수를 각각 0.0224 $\mu\text{m}^2/\text{min}$, 0.0355 $\mu\text{m}^2/\text{min}$, 0.0453 $\mu\text{m}^2/\text{min}$ 로 결정하였고, 확산상수는 1.2597 $\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}$ 로 결정하였다. 그리고 각 온도에서의 최대 굴절율 변화량이 각각 0.0125, 0.01213, 0.01227가 됨을 확인하였다. 공정의 최적화를 위하여 확산 시간과 확산이온 농도 사이의 관계를 모드 생성 조건에 따라 결정하였으며, 1.3 μm 와 1.55 μm 두 파장 영역에서 공통의 단일 모드가 형성될 수 있는 조건을 결정하였다.

본 논문에서 제시한 Ag⁺이온의 확산특성과 제작변수에 대한 소자변수의 관계를 이용하여 채널형 도파로나 방향성 결합기 등의 기능소자 설계나 제작에 이용

할 수 있으며, 여기에서 확립된 공정과 이론적 토대는 유리를 매질로 한 수동소자 뿐만 아니라, 반도체나 LiNbO₃를 매질로 한 능동소자의 제작 기술에도 활용이 가능하리라 사료된다.

참 고 문 헌

[1] R. V. Ramaswamy and R. Srivastava, "Ion-Exchange Glass Waveguides: A Review," J. Lightwave Technol., vol. 6, no. 6, pp. 984-1002, June 1988.
 [2] K.S.Chiang., "Construction of Refractive-index Profiles of Planar Dielectric Waveguides from the Distribution of Effective Indices," J. Lightwave Technol., vol. LT-3, no. 2, pp. 385-391. Apr. 1985.
 [3] J. M. White and P. F. Heidrich, "Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: a simple analysis," Applied Optics, vol. 15, no. 1, pp. 151-155, Jun. 1976.
 [4] S. Irai Najafi, "Glass Integrated Optics and Optical Fiber Devices," Proceedings of SPIE., vol. CR53, 1994.
 [5] R. L. Buden and J. D. Faires, "Numerical Analysis," PWS, pp. 254-263, 1993.
 [6] Kasaaki Imai, Norihisa Haneda, and Yoshihio Ohtsuka, "Losses in optical waveguides formed by silver-sodium ion exchange," J. Lightwave Technol., vol. Lt-1, no. 4, pp. 611-615, Dec. 1983.
 [7] G. L. Yip and J. Albert, "Characterization of planar optical waveguides by K⁺-ion exchange in glass," Optical Society of America, vol. 10, no. 3, pp. 151-153, Mar. 1985.
 [8] K. Kishioka, "Determination of diffusion-parameter values in K⁺-ion exchange waveguides made by deluted KNO₃ in soda-lime glass," IEICE Trans. Electron, vol. 78-C, no. 10, pp. 1409-1417, Oct. 1995.

— 저 자 소 개 —



田 金 洙(正會員)

1972년 7월 16일생. 1995년 2월 전
북대학교 전기공학과 졸업. 1997년 2
월 동대학원 전기공학과 석사학위 취
득. 현재 동 대학원 전기공학과 박사
과정. 주관심분야는 광통신용 광집적
소자 설계 및 제작, 광도파로 해석 등

潘 在 景(正會員) 第 31卷 B編 第11號 參照

현재 전북대학교 전기전자제어공학부
부교수. 전북대학교 전기전자회로합
성연구소 연구원

임