

전기장에 의한 $\text{Cs}^+\text{-Na}^+$ 이온교환으로 제작된 유리 광도파로*

김영철 · 원영희 · 조두진

아주대학교 자연과학대학

(1998년 2월 25일 받음, 1998년 4월 8일 수정본 받음)

소오다 석회유리를 기판으로 하고 전기장에 의한 $\text{Cs}^+\text{-Na}^+$ 이온교환으로 다중 모우드 평면 광도파로를 제작하였다. 광도파로의 각 모우드들에 대한 실효굴절률을 측정하였으며 변형 Fermi 함수 모양으로 맞춤형 굴절률 분포형태를 전자 현미분석기로 얻은 농도분포형태와 비교 분석하여 설명하였다. 정량적인 분석결과 약 95%의 Na^+ 이온이 Cs^+ 이온으로 치환되었다. 주어진 인가전기장, 확산온도 및 확산시간으로부터 광도파로 깊이, 이동도 및 굴절률 변화를 구하는 식을 세웠다. 이 식에서 성립하는 광도파로의 깊이와 확산시간의 제곱근 사이의 선형관계 및 광도파로의 깊이와 인가전기장 사이의 선형관계를 실험으로 확인하였다.

I. 서 론

다중 모우드 광섬유를 사용하는 광통신 시스템의 급속한 개발로 이 광섬유에 기하학적 및 광학적으로 정합되는 집적광학용 두꺼운 다중 모우드 광도파로의 필요성이 증대되고 있다.^[1] 저 손실 다중 모우드 광도파로를 제작하는 간편한 기법으로는 질산염을 사용한 유리기판에서의 열적 이온교환방법이 알려져 있다. 소오다 석회유리를 기판으로 하여 $\text{Ag}^+\text{-Na}^+$ ^[2] 또는 $\text{K}^+\text{-Na}^+$ ^[3,4] 이온교환으로 제작된 광도파로는 집적광학 수동형 장치의 기초 광도파로로 이용되고 있다.^[4,5]

이 이온교환방법에서는 $\text{K}^+\text{-Na}^+$ 이온교환 경우보다 기판과의 굴절률 차가 보다 크게 형성되는 $\text{Cs}^+\text{-Na}^+$ 이온교환 경우가 보다 실용적 가치가 높다. Cs^+ 이온교환으로 520°C 온도에서 제작된 광도파로는 기판유리와의 굴절률 차가 0.026^[6]이고 K^+ 인 경우는 430°C 온도에서 0.009^[7]이며, 모두 1 dB/cm 이하의 저손실 광도파로로 알려져 있다. 그러나 Na^+ , K^+ 및 Cs^+ 이온 반경은 각각 0.95 Å, 1.33 Å 및 1.65 Å이기 때문에 작은 이온이 큰 이온과 교환될 경우에는 교환된 큰 이온의 점유용적 차이에 의한 장애효과가 예상된다. $\text{K}^+\text{-Na}^+$ 경우에서도 이온교환을 또는 확산율이 급격히 감소된다는 정성적 실험결과가 보고되었다.^[8,9]

일반적으로 이 열적 이온교환방법은 매우 긴 시간동안 이온교환시켜야 하는 단점이 있다. 이온교환 속도를 증대시키기 위하여 실험온도를 높이면 교환되는 이온들 사이의 점유용적률 차이로 유기된 압축응력이 완만되어 광도파로의 표면굴절률 차가 줄어들게 되므로 다중 모우드 제작에 제약조건이 된다. 실제로 $\text{K}^+\text{-Na}^+$ 이온교환의 경우 380°C에서 426시간동안 교환시키면 40 μm 두께의 다중 모우드 광도파로가 생성되지만 표면굴절률은 25%가 감소되어 전파 모우드 수가 줄어든다.^[10]

따라서 굴절률 분포곡선을 신속하게 제어하고 이온교환을 및 교환된 이온의 공간분포를 다중 모우드 광섬유 단면적에 적합하도록 맞추는 방법으로 외부로부터 전기장을 인가하여 강제

이온교환시키는 방법이 사용되고 있다. 예를 들면 Tl^{+11} , Ag^{+12} 및 K^{+13} 를 유리 속의 Na^+ 자리에 강제로 확산시키는 전기장에 의한 이온교환 결과가 보고되었다. 본 논문에서는 이온반경이 Na^+ 에 비하여 상당히 큰 이온인 Cs^+ 이온들을 전기장을 이용하여 이온교환시킬 때 Cs^+ 이온들의 상대적으로 큰 이온반경 때문에 나타나는 장애효과를 측정 분석하여 보고한다.

II. 실험

이온교환 실험용 기판유리로는 두께 1 mm의 상용 현미경 슬라이드 유리판을 선정하였다. 이 소오다 석회유리의 조성은 CAMECA SX-51 전자현미분석기(electron probe X ray micro analyzer: EPMA)로 분석한 결과 무게 백분율로 13.28 Na_2O , 0.82 K_2O , 4.21 MgO , 6.46 CaO , 1.20 Al_2O_3 , 74.02 SiO_2 이며, 밀도는 2.468(g/cm^3)이고 굴절률은 파장 632.8 nm에서 1.5109이다. 사용한 질산 용융염 KNO_3 및 CsNO_3 는 녹는온도가 각각 334°C 및 414°C이다. 또한 이 CsNO_3 용융염은 유리기판 서냉점(annealing point) (550°C부근)이하에서 안정하다.

$\pm 1^\circ\text{C}$ 로 제어되는 수직 전기로를 사용하여 전기장에 의한 이온교환을 다음과 같이 행하였다. 1 mm 두께 유리시료의 한 면에 유리판을 세라믹 접착제로 부착하고 이 유리판 속에 질산염 분말을 넣고 녹여 음극에 연결하고 다른 한 면은 같은 종류의 용융염이 들어있는 백금 도가니에 평면으로 접촉시킨 후(그림 1 참조) 이 백금 도가니를 양극에 연결하였다. 다음 여러 온도에서 전류밀도가 5 mA/cm^2 이내인 범위의 전기장을 인가하여 Cs^+ 이온을 유리 내부로 강제 이동시켰다.

이온교환으로 형성된 박막형 광도파로의 TE 전파 모우드 대한 실효굴절률은 M-line 방법으로 측정하였다.^[13] M-line 측정장치의 goniometer는 Gaertner L113이고, 편광자는 Gaertner Glan-Thompson 프리즘(소광율 1×10^{-6})이다. 그리고 광도파로 결합프리즘으로는 Schott F2($n_d=1.62004$) 프리즘을 사용하

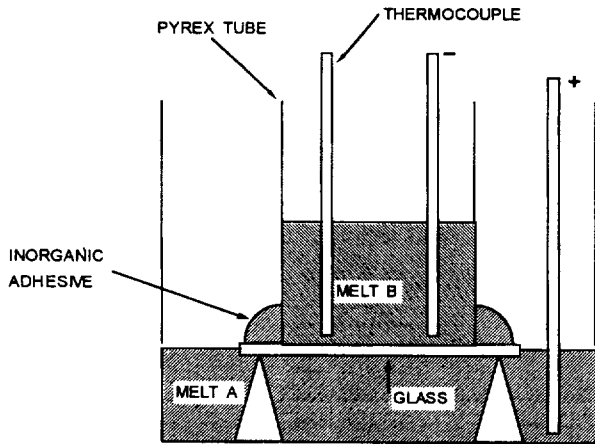


Fig. 1. Cell design for field-assisted exchange.

였다. 광원은 He-Ne 레이저를 사용하여 파장 632.8 nm에서 측정하였다.

제작된 광도파로 단면에서의 확산이온 농도분포 곡선은 CAMECA SX-51 EPMA로 분석하였다.

III. 실험결과 및 논의

그림 2는 온도 430°C에서 CsNO₃용융염을 양극으로 하고 전압을 8V로 고정된 후 전기장 인가 시간이 10분, 15분, 20분, 25분, 30분 및 35분인 경우 각 굴절률 분포곡선의 변화를 나타낸 것이다. 또한 열적 이온교환결과와 비교하기 위하여 501°C에서 전기장을 인가하지 않고 1440분동안 열적 이온교환만으로 제작된 광도파로의 굴절률 분포곡선(g)를 추가하였다. 실험온도를 501°C로 높인것은 430°C에서 다중 모우드를 형성시키는 데 오랜시간이 소요되기 때문이다. 그림의 점

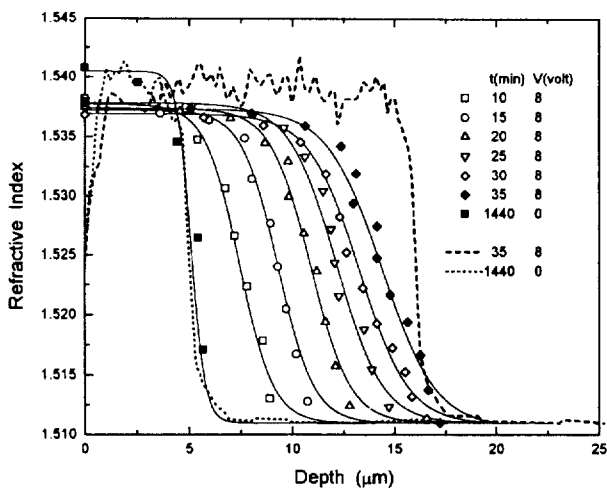


Fig. 2. Index profiles in the case of a Cs anode at temperature T= 430°C, applied voltage 8 V, for different time t: (a) 10 min, (b) 15 min, (c) 20 min, (d) 25 min, (e) 30 min and (f) 35 min. Index profile of (g) is the case for 1440 min without applied voltage. Dotted curves are concentration profiles (ref. fig. 3).

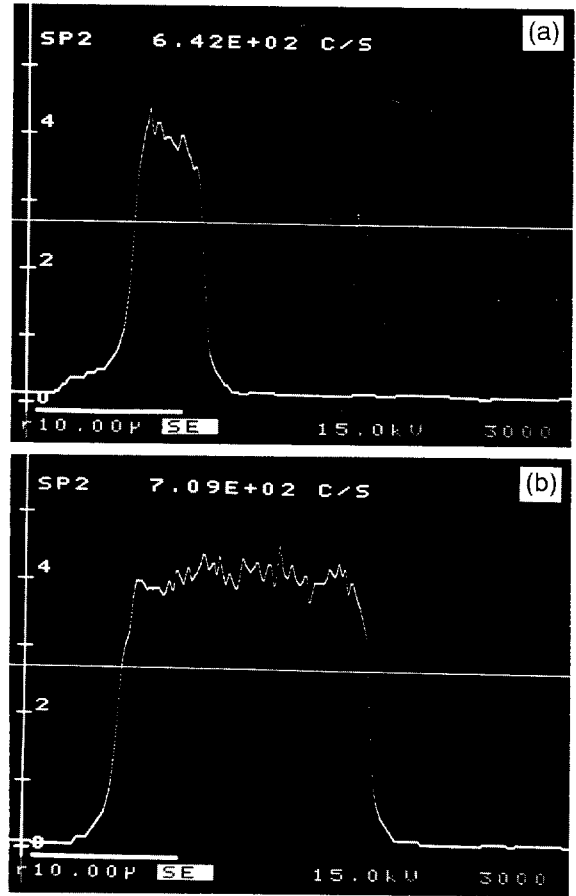


Fig. 3. Concentration profile of a planar waveguides of cesium ions obtained using EPMA. (a) fabricated thermal diffusion and (b) fabricated field-assisted diffusion.

들은 측정된 각 모우드의 실효굴절률이며, 이 그림의 실선은 측정된 전파 모우드 실효굴절률로부터 역 WKB방법^[14]으로 굴절률 분포와 표면굴절률을 산출하고 이 산출된 실효굴절률 분포에 근접하도록 이 점들에 맞추어 구한 굴절률 분포곡선이다. 그림의 점선은 그림 3의 EPMA로 측정한 농도 분포곡선이다. 이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 전기장의 인가로 형성된 분포곡선 함수형은 변형 Fermi함수형으로 급경사의 준계단형이었다. 이 변형 Fermi함수를 다음식으로 기술하였다.^[15]

$$n(x) = n_s + \Delta n \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{a}\right) + \exp\left(x - \frac{d}{a}\right) \right]^{-1} \quad (1)$$

여기서 n_s 는 기판의 굴절률이고 Δn 은 최대 굴절률변화량으로서 $n(0) - n_s$ 이며, x 는 유리표면으로부터의 확산거리이다. 또한 a 는 분포곡선형태와 관계되는 매개변수이며, d 는 실효깊이로서 $n(d) = n_s + \Delta n / [2 - \exp(-d/a)]$ 이다. 본 실험에서는 대체로 $\exp(-d/a) \ll 1$ 이므로 실효깊이는 굴절률이 굴절률 분포함수의 최대치 반값에 접근할 때 λ 값이 된다.

굴절률 변화량 Δn 은 이온교환에 관여한 이온들의 전자 분극을 및 유리 내부에서의 점유용적을 차이에서 발생된다. 따

라서 유리 속의 Na⁺이온과 X%치환되어 용융염에서 유리 속으로 확산된 Cs⁺이온의 몰농도 분포함수를 유리표면으로부터의 거리 x 와 실험시간 t 의 함수인 몰농도 분포함수 $C(x, t)$ 로 표현하면 Cs⁺-Na⁺이온교환 후 유리표면 내부의 굴절을 변화 $\Delta n(x, t)$ 는 일차 근사로서 다음과 같이 Cs⁺이온의 몰농도 $C(x, t)$ 에 비례한다.^[16,27]

$$\Delta n(x, t) = \beta C(x, t) = \beta \chi(x, t) C_0 \quad (2)$$

$$\beta = \frac{R_0}{V_0} \left(\frac{\Delta R}{R_0} - \gamma \frac{\Delta V}{V_0} \right)$$

여기서 C_0 는 유리기판에서의 Na⁺이온 몰농도이다. R_0 는 유리 속 산소원자의 물 굴절률이고, V_0 는 산소원자의 물 체적이다. ΔR 은 이온교환에 의한 물 굴절률 변화량이고 ΔV 는 물 체적 변화량이다. $\gamma(t, T, C)$ 는 실험온도 T , 실험시간 t 및 교환된 Cs⁺이온의 몰농도 C 의 함수인 체적변화계수이다. 즉 유리 내부에서의 이온교환 후 압축변형력으로 발생된 체적변화효과를 나타낸다. $\gamma=1$ 은 점유용적을 차이 효과가 100%로서 압축변형력이 약하여 체적변화가 최대로 이루어지는 경우이고, $\gamma=0$ 은 점유용적을 차이에 의하여 거대한 압축변형력이 발생하기 때문에 체적변화가 전혀 이루어지지 않은 경우이다.

그림 3은 EPMA로 구한 평면 광도파로의 Cs⁺이온 농도 분포곡선이다. (a)는 501°C에서 1440분동안 순수한 열적 이온교환만으로 제작된 광도파로 단면을 따라 측정된 결과이고, (b)는 430°C에서 8 V 전기장을 35분동안 인가하여 제작된 광도파로 단면을 따라 측정된 결과이다. 이 결과는 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 M-line으로 구한 굴절률 분포함수와 유사한 형태이다. 그림 4(a)는 430°C에서 8V 전기장을 35분동안 인가하여 제작한 광도파로 중심부의 X선 에너지 분광기(X-ray energy spectrometry(XES))분석결과이다. 그림 4(b)는 동일시료 기판부의 분석결과이다. (a)와 (b) 두 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Cs⁺-Na⁺이온교환으로 Na⁺농도가 감소되고 새로이 Cs⁺이온농도가 증가되어 나타났다. 동시에 수행한 성분 분석 결과 Na⁺농도감소가 95%이고 Cs⁺농도만 증가하였기 때문에 본 Cs⁺-Na⁺이온교환율은 최대 95%로 해석된다. 이 값은 K⁺-Na⁺의 경우 93%^[18]보다 약간 큰 값이다.

그림 2에서 표면굴절률 변화량 Δn 은 열적 이온교환의 경우 1.542에서 1.537로 감소하였다. K⁺-Na⁺경우^[9]와 Ag⁺-Na⁺경우^[19]에 나타나는 증가결과와 반대되는 현상이다. 그림 3 및 4에서 알 수 있는 바와 같이 Cs⁺이온농도는 전기장이 인가되지 않은 경우와 인가된 경우가 모두 유사한 점을 고려하면 이 Δn 의 감소는 전기장에 의한 Cs⁺이온의 강제 이동으로 반경이 큰 Cs⁺이온의 확산층이 K⁺경우와 비교하여 보다 심하게 표면위로 부풀어 오르거나^[20] 불룩하게 굽어져^[21] 압축변형력이 이완되었기 때문에 식 (2)에서의 γ 가 증가한 결과로 해석되지만 보다 세부 연구는 현재 진행중이다.

또한 그림 2의 우측 확산 전단부에서 농도 분포곡선과 굴절률 분포곡선의 차이는 식 (2)로 해석할 수 있다. 즉, 이온 교환층에서는 Cs⁺밀도가 높아 큰 압축변형력이 발생되었기 때문에 체적변화계수가 작아져 굴절률이 높지만 확산 전단부 경

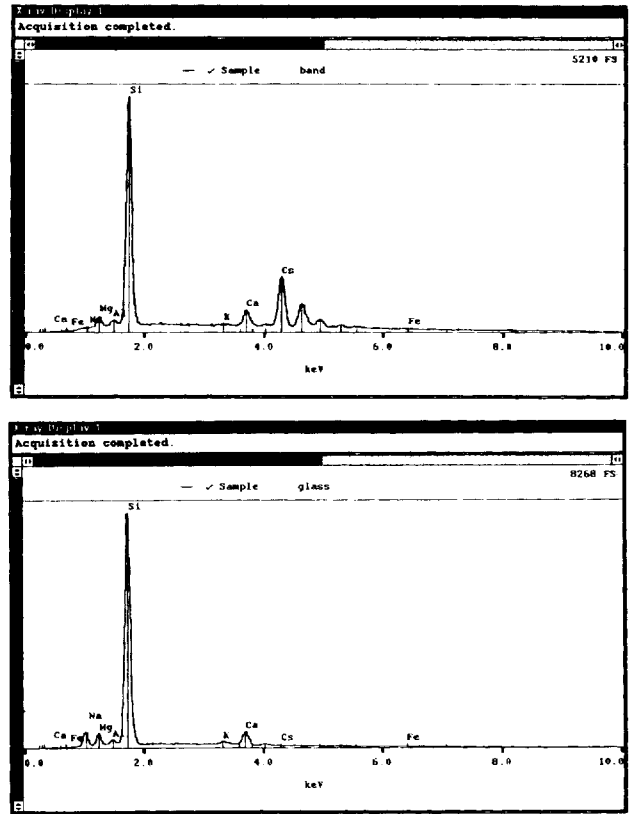


Fig. 4. XES analysis of surface of waveguide (a) as compared to the bulk glass (b).

계부근에서는 압축변형력이 없는 비확산층과 근접한 정도에 따라 체적변화가 상대적으로 충분히 이루어져 γ 가 커지고 굴절률이 낮아진 결과로 해석된다 (Fig. 2~4).

한편 그림 2에서 실효확산깊이와 실험시간과의 관계를 살펴보면 비선형적임을 알 수 있다. 일반적으로 A⁺이온을 유리 속에 확산시키기 위하여 A⁺-Na⁺열적 이온교환을 시키는 경우, 실효 확산깊이 d 와 확산시간의 제곱근 \sqrt{t} 는 다음과 같이 선형적 관계식으로 기술된다.

$$d = \sqrt{D_e t} \quad (3)$$

여기서 D_e 는 온도의 함수인 실효확산계수이다. 또한 전기장 E 를 인가하여 A⁺이온을 유리에 침투시키는 경우 d 는 다음과 같이 기술된다.^[9]

$$d = \sqrt{D_e t} + A_1 E t \quad (4)$$

여기서 A_1 은 유리 속에서의 A⁺ 이온 실효이동도 μ 와 관계되는 상수이다. 따라서 μ 에 관한 정보를 알면 Cs⁺광도파로 제작조건 (E, t)로부터 광도파로 깊이를 산출할 수 있으며, 깊이와 Δn 으로부터 모드 수가 계산된다.^[9] 그러나 Cs⁺-Na⁺이온교환의 경우는 Cs⁺이온의 반경이 Na⁺이온반경의 1.74배이기 때문에 이온교환 후 밀집된 Cs⁺이온들의 점유용적 증가로 이온들의 이동통로인 유리 network cavity에 병목현상이 발생하여 전기장에 의한 이온이동의 진행에 장애효과 즉 실효이동도 μ 의 감소가 예상된다. 한편 강한 전기장에 의한 이온확산

의 경우는 자기확산에 의한 이온이동이 무시되기 때문에 인가된 전압에 의한 이온이동만 고려하면 t 시간 동안 확산시킨 경우 실효확산깊이 d 는 단순 비례상수 A_0 를 사용하여 다음과 같이 기술된다.

$$d = A_0 E t = A_0 \mu E t \quad (5)$$

본 논문에서는 그림 2의 결과와 전기장에 의한 이온이동 장애효과를 고려하고 $\ln \mu$ 와 T^{-1} 의 일반적 비례관계를 포함하여 식 (5)의 실효이동도 μ 를 비례상수 μ_0 를 사용한 아래 식으로 확장하여 기술하였다.

$$\mu = \mu_0 f(E, t) \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right) \quad (6)$$

여기서 $f(E, t)$ 는 인가전기장 E 와 인가시간 t 와 관계되는 함수이다. 이 새로운 함수를 실험적으로 결정하기 위하여 식 (5)의 d 와 μ 의 관계 및 그림 2의 d 와 시간과의 관계에서 $f(E, t)$ 의 시간 의존성을 도출하였다. 부가적으로 이 $f(E, t)$ 의 전기장과 관계를 알아보기 위하여 전기장 인가시간을 10분으로 고정하여 인가전압을 7V에서 12V로 변화시킬 때 인가전압에 대한 굴절을 분포곡선의 변화를 측정하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 인가전압 즉 인가전기장을 증대시키면 굴절을 분포함수의 준계단형 형태나 표면굴절을 변하지 않고 실효 확산깊이 d 만 증대됨을 알 수 있었다.

$f(E, t)$ 의 시간의존성과 전기장의존성을 비교하기 위하여 그림 2와 그림 5의 굴절률 분포곡선에서 식 (1)로부터 실효 확산깊이 d 를 산출하고 각각 실험시간의 제곱근 및 인가전압에 따른 d 의 변화를 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 (a)에서 실효 확산 깊이가 전압에 비례함을 알 수 있으며 (a)에 최적화시킨 직선의 기울기에서 얻은 430°C에서의 A_1 값은 $10.81 \mu\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{min}$ 이었으며, 보다 낮은 실험온도 385°C에서 행한 K⁺-Na⁺ 경우 A_1 의 값 $21.33 \mu\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{min}$ ^[9]보다도 매우 낮은 값이었다.

이 결과는 확산속도 즉 이온의 이동도가 K⁺에 비하여 매우 낮음을 나타낸다. 또한 그림 6의 (b)에서 실효 확산깊이가 확산 시간의 제곱근에 비례한 것으로 나타났다. 이 결과는 K⁺-Na⁺ 처럼 d 가 전압과 시간에 비례하는 일반적인 경우와^[9] 상이한 결과이다. 이 현상은 반경이 큰 Cs⁺이온 확산량 증가로 확산 장애효과가 증대하여 Cs⁺이온 실효이동도가 시간에 따라 $1/\sqrt{t}$ 로 저하된 것으로 해석된다. 실제로 그림 2의 (g)곡선의 경우 초기 전류밀도 4.48 mA/cm²는 35분 후 0.72 mA/cm²로 감소하였다. 따라서 본 논문에서는 Cs⁺-Na⁺경우 $f(E, t)=1/\sqrt{t}$ 로 결정하였다.

끝으로 전기장에 의한 Cs⁺-Na⁺이온교환의 온도 의존성을 연구하기 위하여 실험시간을 10분으로 하고 전기장의 세기를 8 V/mm로 고정시킨 후 430°C에서 460°C까지 실험온도를 변화시켜 제작된 광도파로의 실효 굴절률을 측정하여 구한 굴절률 분포곡선을 그림 7에 나타내었다. 그림에서 실험온도 증가에 따라 표면굴절률과 전단부 곡선의 경사도가 저하됨을 알 수 있다. 이 결과는 온도상승에 따라 압축변형력이 이완되어

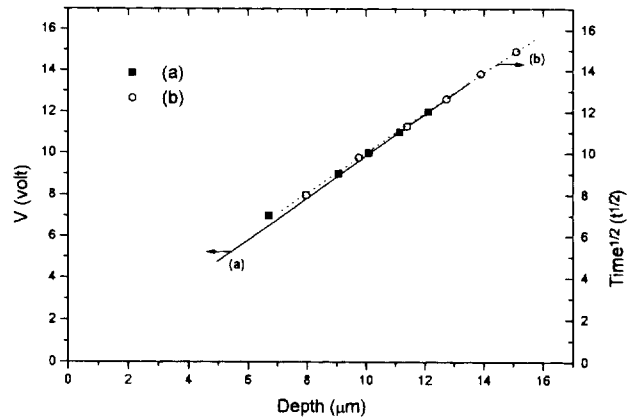


Fig. 6. (a) Effective guide depths (μm) versus the applied voltage. (b) Effective guide depths versus the diffusion time in the electric-field-assisted ion exchange.

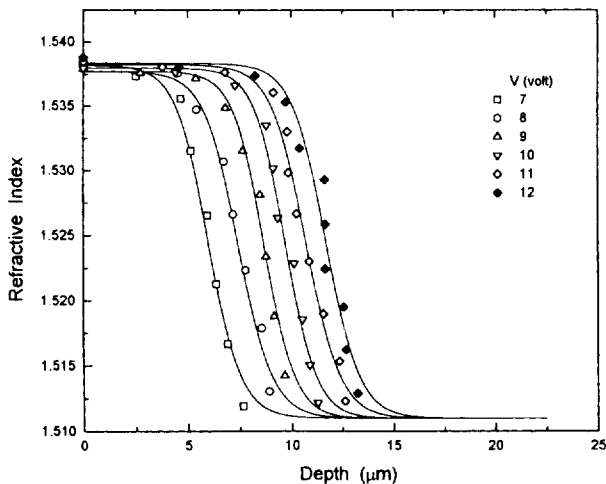


Fig. 5. Field dependence of the index profiles at $T=430^\circ\text{C}$, $t=10$ min, for various voltage value. (a) 7 V, (b) 8 V, (c) 9 V, (d) 10 V, (e) 11 V and (f) 12 V.

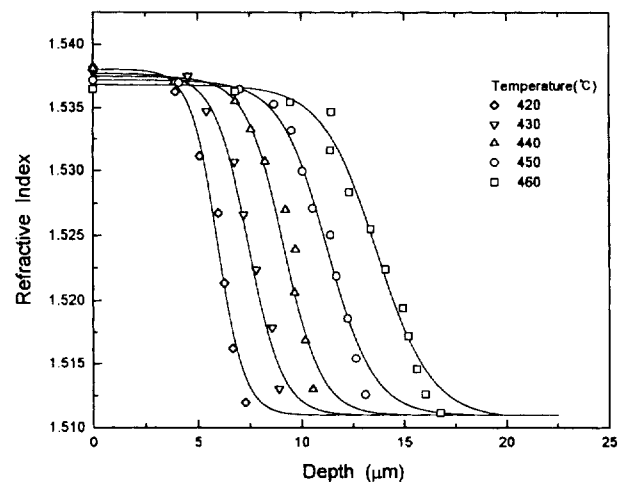


Fig. 7. Temperature dependence of the index profiles for $t=10$ min, voltage 8 V at various temperature 420, 430, 440, 450, 460°C.

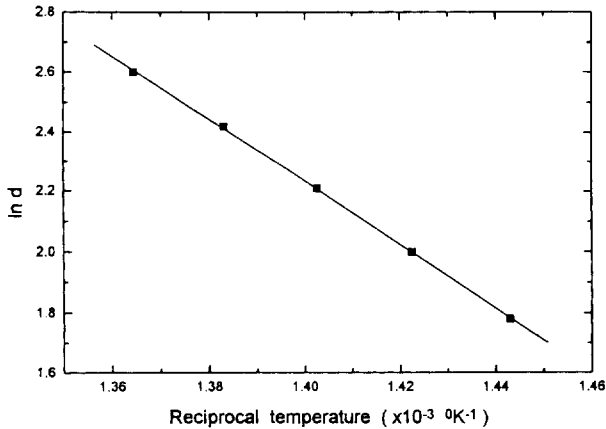


Fig. 8. Temperature dependence of the guide depth for t=10 min. voltage 8 V at various temperatures 420, 430, 440, 450, 460°C.

굴절률이 상대적으로 낮아진 것으로 생각된다. 실험온도에 따른 실효 확산길이 d의 변화를 조사하기 위하여 그림 7로부터 d를 산출하고 ln d를 온도 T의 역수로 그림 8에 나타내었다. 그림 6의 결과 및 식 (5)와 식 (6)을 결합하여 d를 다음 식으로 기술하였다.

$$d = A_0 \mu_0 \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right) \cdot E \sqrt{t} \quad (7)$$

그림 8의 실험 data와 식 (7)로부터 실험시간 10분인 경우에 T₀는 1.05 × 10⁴⁰K 이었으며 이 값은 Ag⁺-Na⁺경우의 T₀=1.2 × 10⁴⁰K 보다 작은 값으로 실험온도 상승에 대한 Cs⁺이온의 실효 이동도 증가는 Ag⁺에 비하여 낮음을 알 수 있다.

IV. 결 론

소오다 석회유리를 기판으로 하고 전기장에 의한 Cs⁺-Na⁺이온교환으로 다중 모우드 평면 광도파로를 제작하였다. 광도파로의 각 모우드들에 대한 실효 굴절률을 측정하였으며 변형 Fermi함수 모양으로 맞춘 굴절률 분포형태를 전자현미분석기로 얻은 농도분포형태와 비교 분석하여 설명하였다. 정량적인 분석결과 약 95%의 Na⁺이온이 Cs⁺이온으로 치환되었다.

주어진 인가전기장, 확산온도 및 확산시간으로 부터 광도파로 깊이, 이동도 및 굴절률 변화를 구하는 식을 세웠다. 이 식에서 성립하는 광도파로의 깊이와 확산시간의 제공근 사이의 선형관계 및 광도파로의 깊이와 인가전기장 사이의 선형관계를 실험으로 확인하였다.

감사의 글

본 연구의 농도분포곡선에 대한 EPMA측정을 해 주신 기초과학 지원 연구소에 감사드립니다.

표면굴절률은 전기장에 의한 이온교환 경우 1.537로 열적 이온교환의 경우인 1.542보다 낮았으며 일반적 이온교환에서 나타나는 결과와 반대되는 이 현상의 원인을 규명중에 있다. 그러나 굴절률분포곡선 모양은 인가전기장 세기증대에 따라 보다 준계단형으로 경사도가 증가하였다. t와 E를 고정하고 온도 변화에 따른 굴절률분포곡선 변화에서 lnμ의 온도 역수의존성을 확인하고 실험시간 10분의 경우 T₀는 1.05 × 10⁴⁰K 였다. 열적 이온교환 기술에 전기장인가 방법을 병행함으로써 광도파로 제작시간을 획기적으로 단축할 수 있었으며 온도 증가에 따른 이동도 증가로 확산속도를 보다 증대시킬 수 있기 때문에 이동도의 시간제공근에 비례한 감소로 인한 제약조건이 존재함에도 불구하고 Cs⁺-Na⁺이온교환에 의한 다중 모우드 광도파로 제작 실현성을 제시하였다.

참고문헌

- [1] H-S. Lilienhof, E. Voges, D. Ritter, and B. Pantschew, IEEE J. Quantum Electron., **QE-18**, 1899(1982).
- [2] T. G. Giallorenzi, E. J. West, R. Kirk, R. Ginther, and R. A. Andrews, Appl. Opt., **12**, 1240 (1973).
- [3] Y. H. Won, P. C. Jaussaud, and G. H. Chartier, Appl. Phys. Lett., **37**, 269 (1980).
- [4] G. L. Yip and J. Finak, Opt. Lett., **9**, 423 (1984).
- [5] T. Findakly and B. Chen, Appl. Phys. Lett., **40**, 549 (1982).
- [6] V. Neuman, O. Parriaux, and L. M. Walpita, Electron. Lett. **15**, 704 (1979).
- [7] G. L. Yip and J. Albert, Opt. Lett. **10**, 151 (1985).
- [8] A. Miliou, H. Zhenguang, H. C. Cheng, R. Srivastave, and R. V. Ramaswamy, IEEE J. Quantum Electron. **25**, 1889 (1989).
- [9] G. L. Yip, P. C. Noutsios, and K. Kishioka, Opt. Lett. **15**, 789 (1990).
- [10] 원영희 · 송용진, 새물리 **23**, 27 (1983).
- [11] T. Izawa. and H. Nakagome, Appl. Phys. Lett. **21**, 584 (1972).
- [12] R. V. Ramaswamy, H. C. Cheng, and R. Srivastave, Appl. Opt. **27**, 1814 (1988).
- [13] P. K. Tien and R. Ulrich, J. Opt. Soc. Amer. **60**, 1325 (1970).
- [14] J. M. White and P. F. Heidrich, Appl. Opt. **15**, 151 (1976).
- [15] T. R. Chen and Z. L. Yang, Appl. Opt. **24**, 2809 (1985).
- [16] G. Chartier, P. Collier, A. Guez, P. Jaussaud and Y. Won, Appl. Opt. **19**, 1092 (1980).
- [17] S. D. Fantone, Appl. Opt. **22**, 432 (1983).
- [18] H. Ohta and M. Hara, Yogyo-Kyokai-Shi **78**, 158 (1970).
- [19] R. V. Ramaswamy and S. I. Najafi, IEEE J. Quantum Electron. **QE-13**, 192 (1977).
- [20] J. Albert and G. L. Yip, Electron. Lett. **23**, 737 (1987).
- [21] S. S. Kistler, J. Am. Ceram. Soc. **45**, 59 (1962).

Glass optical waveguides made by electric-field-assisted Cs⁺-Na⁺ ion exchange

Young-Chull Kim and Young-Hee Won and Doo Jin Cho
Department of Physics, Ajou University, Suwon 442-749, Korea

(Received February 25, 1998, Revised manuscript received April 8, 1998)

Multimode planar waveguides have been fabricated by an electric-field assisted cesium ion exchange in soda-lime glass substrates. Measurements of the mode indices have been made and the index profiles modeled on a modified Fermi function are explained by a comparative analysis with the concentration profiles obtained using an electron probe X-ray micro analyzer. The analytical measurements showed that no more than 95% of sodium ions were replaced by the cesium ions. We established formulas for guide depth, mobility, and refractive index change, given the applied electric field, the diffusion temperature, and the time. We have verified the linear relations in the formulas not only between guide depth and root of diffusion time but also between guide depth and the applied electric field experimentally.