

Na⁺ ⇌ K⁺ 이온교환 광도파로의 특성

한기관 김선호 최상삼
한국과학기술원 응용광학연구실

요약

Soda-lime 유리에서 Na⁺ → K⁺ 이온교환시 이온교환 온도에 따른 Potassium 농도와 굴절률 변화량에 대한 관계를 구하였다. 그 결과 같은 potassium 농도에 대해서도 이온교환 온도가 높으면 굴절률 증가량이 작고 TM모드가 TE모드보다 굴절률 증가량이 크다.

서론

이온교환 유리도파로를 이용한 광집적회로 제조방법은 LiNbO₃ 나 GaAs를 이용한 광집적회로 제조방법과 더불어 광통신및 광계측소자 제조에 중요하다. 비록 이 방법으로 광 스위치 같은 능동소자의 제조는 어렵지만 도파로 제조가 간단하고 광손실이 적으며, 주변환경의 변화에 대해 안정성이 있다. 그리고 큰 에너지에 대한 광손상이 적으며 도파로의 N.A.(numerical aperture) 와 크기를 조절하는데 유연성이 있다. 이러한 장점 때문에 방향성 결합기, N x N 광결합기, 링 공진기, WDM 소자와 같은 수동소자들이 이온교환 유리도파로를 이용 제조되었다. (1,2)

이온교환 유리 도파로 제조는 유리성분중 +1가 알칼리 원소를 다른 +1가의 원소로 교환시켜 주변 굴절률이 증가하게 되는 현상을 이용하며 주로 이용되는 이온교환은 유리내의 Na⁺ 이온을 Li⁺, K⁺, Ag⁺와 교환하는 것이다. 그 외에도 Tl⁺, Rb⁺, Cs⁺ 등이 가능하기는 하나 독성및 폭발의 위험으로 사용되지 않고있다. (3)

이온교환에 의해 굴절률이 증가하는 이유는 두 가지가 있으며, Lorenz-Lorentz 관계식

$$\Delta n = \frac{\pi \cdot (n^2 + 2)^2}{9n} \sum \Delta Q_i \cdot \alpha_i \dots \dots 1$$

에 의해 설명될 수 있다. 첫째, 표1에서 볼 수 있듯이 Na⁺ 이온과 같이 이온 반경이 큰 원소가 Li⁺ 와 같은 작은 이온반경을 가진 원소와 교

환되면 주위에 있는 원자들이 Li^+ 이온주위에 밀집하게 되어 1식에서 알 수있듯이 단위 부피당 원자개수 ΔQ 가 증가하므로써 굴절률이 증가하게 된다

이온	electronic polarizability	이온반경	굴절률증가 Na^+ 이온교환시	광손실 dB/cm	제작시 문제점
Na^+	0.41 (\AA^3)	0.95 (\AA)	—	—	—
Li^+	0.03	0.65	0.01	>1	없음
K^+	1.33	1.33	0.009	<0.2	없음
Ag^+	2.4	1.26	0.09	>2	없음
Tl^+	5.2	1.49	0.1	<0.1	독성
Rb^+	1.98	1.49	0.015	high	폭발
Cs^+	3.34	1.65	0.03	>1	독성

표1 Na 와 교환되는 이온들의 특성 (3)

두 번째 이유는 1식에서 보듯이 교환된 이온의 electronic polarizability α 의 차에 의한 것이다. 1가 이온들의 electronic polarizability 는 표1에 열거하였다. 이들 이온중에서 $\text{Na}^+ \rightarrow \text{K}^+$ 이온교환은 다른 이온들의 교환보다 광손실이 적고 굴절률 변화량이 광섬유의 코어 굴절률과 비슷하다는 점때문에 $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Ag}^+$ 이온교환과 더불어 많은 관심을 모아왔다.(4,5,6,7)

그런데 실제로 이온교환 도파로를 제작할 때 이미 알려진 potassium의 확산계수만으로는 우리가 원하는 도파로를 제작할 수 없음을 알았다. 예를 들어 앞에서 언급한 바와 같이 이온교환시 시편의 위치에 따라 농도분포가 다르며 또한 이온교환 온도에 따라서도 굴절률이 다르다는 것을 보았다. 그래서 우리의 관심은 Soda-lime 유리 (Si 72%, K 1.5%, Na 14%, Mg 5%, Ca 7.5%)에 이온교환되어 들어간 K^+ 이온의 농도와 굴절률 변화량에 대한 관계에 두었다. 그러므로 이러한 실험결과를 이용하면 K^+ 이온의 농도를 조절하므로써 원하는 굴절률 분포를 얻을 수 있다.

유리의 굴절률 측정

우선 도파로를 만들 Soda-lime 유리의 굴절률을 알아야 하며 굴절률을 구하기 위해 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 그림 1과 같이 두께 1mm 길이 3cm의 시편의 단면을 연마한 후 단면으로 부터 2cm 되는 곳에 AZ-135 photoresist 로 약 5000Å의 격자를 He-Cd 레이저의 간섭방법으로 제작한다 다음에 He-Ne 레이저를 현미경 대물렌즈를 이용하여 시편의 표면으로 부터, 20μm 되는 곳에 집속시켜 입사시킨다. 시편에 입사한 빛이 그림 1의 1번 광선처럼 격자에 직접 도달한 후 회절되어 나가기도 하며 2번 광선처럼 표면에 한번이상 반사되어 나간다. 빛이 시편에 입사하는 점 Z₀를 표면 근처로 이동시키면 1번광선은 표면과 거의 나란하게 된다. 예를들어 Z₀가 0.1mm 일때 1번광선과 표면이 이루는 각은 0.3도 보다 작다. 1번광선이 격자에 의해 회절되어 나가는 각을 θ라 하고 이 각을 측정하게 되면

$$n = \sin \theta + \lambda / \Lambda \quad \dots \dots \dots 2$$

의 방정식으로 부터 시편의 굴절률 n을 구할 수 있다. 여기서 λ는 사용된 광 파장이며 Λ는 격자의 주기이다. 1번 광선과 시편이 이루는 각이 0.3° 일때 굴절률의 측정오차는 $\pm 1.5 \times 10^{-5}$ 이다. 그리고 회절각 θ는 Auto-collimator 를 이용하여 측정할 수 있다. 이 때 Auto-collimator 를 사용하기 위해서는 시편의 법선과 회절된 빛이 이루는 각이 20이내가 되도록 격자 주기를 결정해야한다. 이와같은 방법으로 측정할 경우 측정오차는 5이내가 되므로 굴절률 측정에는 3×10^{-5} 의 오차를 가진다. 그러므로 시편의 굴절률 측정오차는 격자주기의 측정오차에서 주로 발생한다. 격자주기의 측정은 격자가 만들어진 시편에 He-Cd (4416Å) 레이저빔을 수직 입사시켜서 ±1차 회절각을 측정하여 주기를 구하였다. 회절각은 1이내의 오차로 측정하였으며 이것으로 부터 격자주기 Λ를 1Å이내의 오차로 알 수 있다. 그러므로 이와같은 방법으로 측정한 굴절률은 3×10^{-4} 의 오차이내로 알 수 있다.

도파로의 제작 및 모드 굴절률 측정

KNO₃ 를 Pyrex 관에 넣고 350-450 °C에서 용융상태로 만든다. 잘 세척한 Soda-lime 유리를 용융액과 같은 온도에서 5분간 예열하여 용융 KNO₃에 담근다. 이와같이 하면 열 충격을 줄이고 시편표면에 생기는 작은 기포를 없앨 수 있다.

일반적으로 이온교환 도파로를 만들 때 용융액을 제어 주어 시편에서 교환되어 나온 Na⁺ 이온이 시편표면에 정제하여 K⁺이온의 교환을 막지 않도록 하였다. 그러나 본 실험에서는 용융액을 짓지 않고 시편을 수평으로 놓고 이온교환하였다. 이와같이 하면 시편의 윗면과 아랫면의 이온확산 분

포가 그림 2 처럼 달라지며 시편의 윗면은 에러함수 $(1 - \int \exp(-x^2) dx)$ 에 가깝고 아랫면은 가우스 함수 $(\exp(-x^2))$ 에 가깝다. potassium 농도는 가속 전자에 의한 x선 산란으로 측정하였다. 농도 단위는 Si, Mg, K, Na, Ca 의 원자개수에 대한 백분률 (AT%)이다.

제작된 시편의 굴절률 분포 측정은 앞에서 설명한 시편의 굴절률 측정방법과 같은 방법으로 하였다. 집속된 He-Ne 레이저 (6328Å) 를 이온교환으로 만들어진 도파로에 입사키면 전파상수가 다른 각각의 모드들이 격자에 의해 다른 각도로 회절되어 나간다. 그러므로 회절각 θ 를 측정하므로써 도파로내에 존재하는 모드의 유효굴절률(effective index)을 알 수 있다. 측정된 모드의 유효굴절률로부터 굴절률 분포 함수를 구하기 위해 아래와 같은 WKB 방법으로 계산하였다. 도파모드란 도파로의 횡적 경계조건을 만족하는 것이므로 시편의 표면 (Z=0)에서 위상이 같아야한다. 그러므로 빛이 도파로 응의 표면을 출발하여 반환점 (그림 1의 Z=t) 을 돌아 다시표면을 출발할 때 까지 Z축 방향으로의 위상변화가 $2m\pi$ 가 되어야한다. 그러므로 WKB 방정식은 (8)

$$2k \int (n^2(z) - n^2) dz + 2\Phi_1 + 2\Phi_2 = 2m\pi \dots \dots 3$$

로 쓸 수 있다. 여기서 $k = 2\pi/\lambda$ 이며 n은 반환점에서의 굴절률 즉, 모드의 유효굴절률이다. Φ_1 은 표면에서 일어나는 Goos-Hanchen 위상변이며 Φ_2 는 반환점에서의 위상변이다. 3식의 $n^2(z)$ 를 가우스 및 에러함수로 가정하여 계산하여 구한 모드의 유효굴절률 과 측정된 값과 비교하므로써 가장 잘 맞는 굴절률 분포를 구했다. 그림 3은 이와같은 방법으로 구한 굴절률분포의 한 예이다. 그림에서 (o) 표는 계산된 값이고 (*) 표는 측정된 값이다. 이제 굴절률과 Potassium 농도를 Z축의 깊이에 따라 비교하므로써 둘의 관계를 얻을 수 있으며 그림 4과 표 2에 그 결과를 나타내었다. 여기서 실험의 중요한 결과는 이온교환 온도가 증가함에 따라 굴절률 변화량이 감소한다는 것이다. 또한 stress에 의해 TM모드가 TE모드보다 굴절률의 증가량이 더 크게 나타났다.

이온교환 후 다시 열처리에 의해서도 같은 결과를보였다. 그 것은 다음과 같은 실험으로 명확히 알 수 있다. 시편을 380 °C에서 7 시간 이온 교환시킨 후 400°C, 410°C, 420°C, 430 °C 및 440°C에서 15분 동안 가열한 다음 시편의 굴절률 및 모드의 유효굴절률을 측정하였으며, 그 결과 그림 5에서의와 같은 변화를 보였다. 이 경우 모드의 굴절률이 변하는 것은 두 가지 이유로 볼수 있다. 즉, 재확산에 의한 것 (그림6-a)과 앞의 실험결과와 같이 굴절률이 변하는 경우 (그림6-b)이다. 계산결과 그림 6에서 보듯이 모드의 굴절률 변화는 같은 Potassium 농도에서도 온도에 따라 굴절률이 달라지는 것으로 설명될 수 있다.

이온교환온도	TE모드	TM모드
380°C	4.8×10^{-4}	6.0×10^{-4}
400°C	4.8×10^{-4}	5.9×10^{-4}
430°C	4.2×10^{-4}	5.1×10^{-4}
450°C	3.4×10^{-4}	4.0×10^{-4}

표2 이온교환온도에 따른 Potassium 농도에 대한 굴절률 변화 $\Delta n = Ax(C-1.5)$ 의 비례상수 A값

결론

Soda-lime 유리를 용융 KNO_3 에 담구어 Na^+ 이온을 K^+ 이온으로 교환시켰을 때, 유리내의 Potassium 농도의 증가량과 굴절률 증가량의 관계를 구하였다. TE모드의 굴절률 증가량은 stress에 의해 TM모드의 굴절률 증가량보다 작을 뿐만 아니라 같은 Potassium 농도에 대해서도 이온교환 온도가 높을 수록 반대로 굴절률 증가량이 작다. 또한 이온교환 후 열처리에 의해서도 같은 경향을 보였다. 또한 이 결과를 이용하면 고해상도를 가진 SEM 으로 Potassiums 농도를 측정하여 굴절률 분포를 구할 수 있다.

참고문헌

1. G.L.Yip and J.Finak, Optical engineering, vol 24, 244 (1985).
2. K.Kaede and R.Ishikawa, Electronics letters, vol.20 647 (1984).
3. T.Findakly, Optical engineering, vol.244(1985).
4. J.E.Gortych and D.G.Hall, IEEE. Jour.Q.E., vol QE-22, 892(1986).
5. J.Albert and G.L.Yip, Electronics Lett., vol.23, 737(1987).
6. G.L.Yip and J.Albert, Optics lett., vol.10, 151(1985).
7. A.Brandenburg, Jour.Light.Tec., vo(1986)
8. G.B.Hocker and W.K.Burns, IEEE. Jour. Q.E, vol.QE-11, 270(1975).

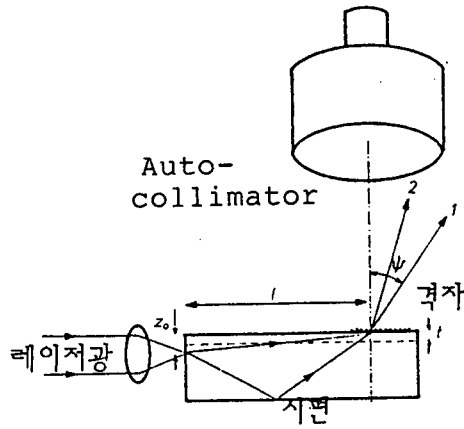


그림1 시편의 굴절을 측정 장치

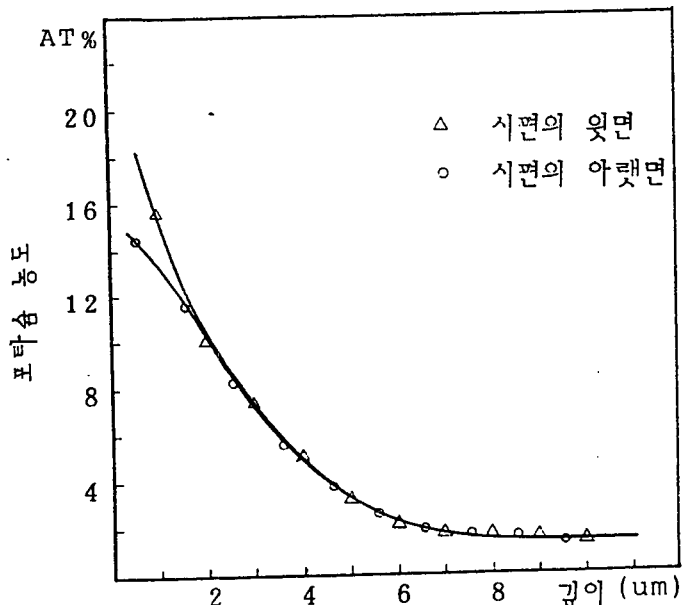


그림2 이온교환 후 시편의 윗면과 아랫면의 포타슘 농도 분포

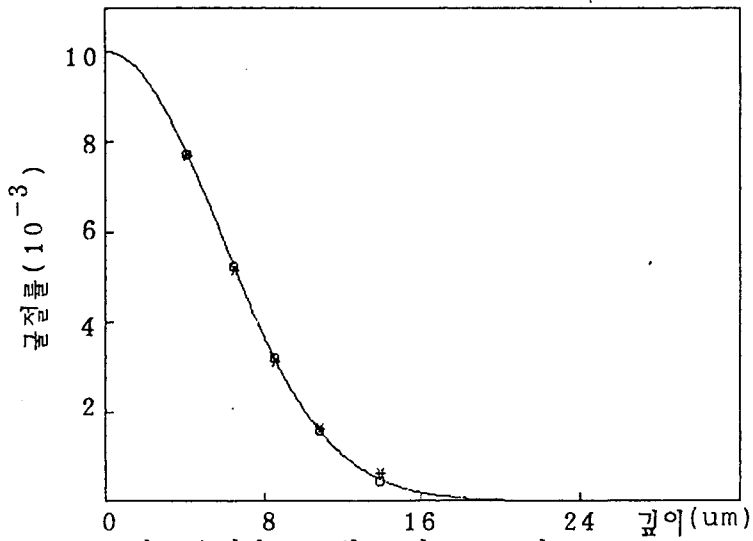


그림3 측정된 모드의 굴절률로부터
 방법에 의해 계산된 굴절률분포

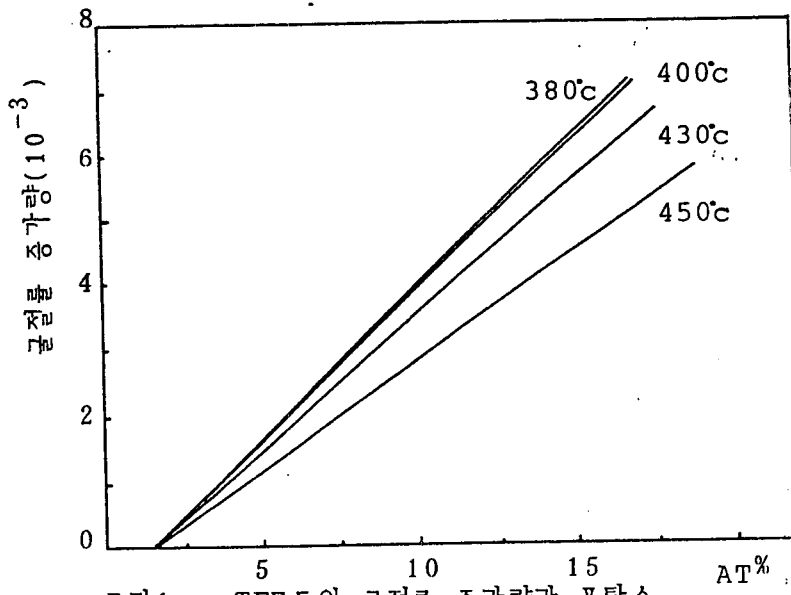


그림 4-a TE모드의 굴절률 증가량과 포타슘 농도와의 관계

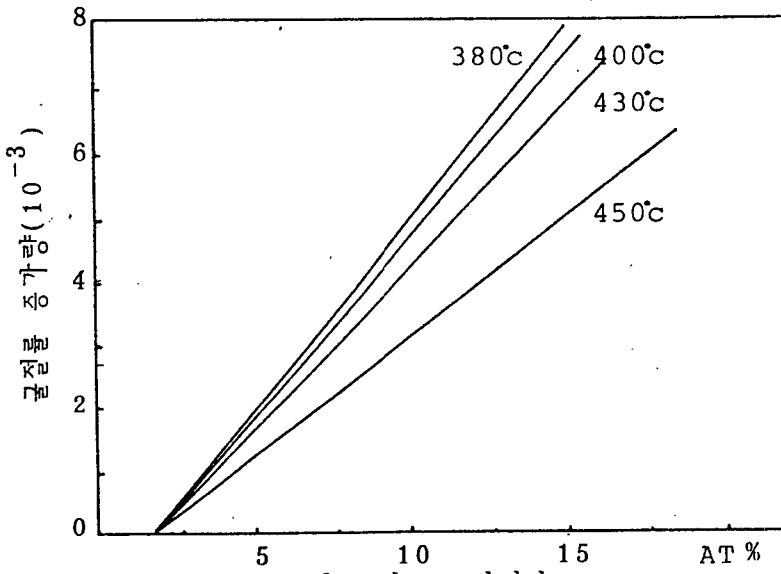


그림 4-b TM모드의 굴절률 증가량과 포타슘 농도와의 관계

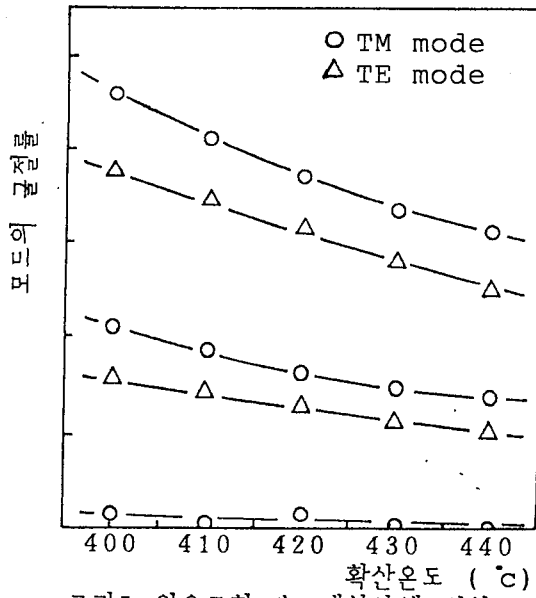


그림5 이온교환 후 재확산에 의한
모드 질점률의 변화

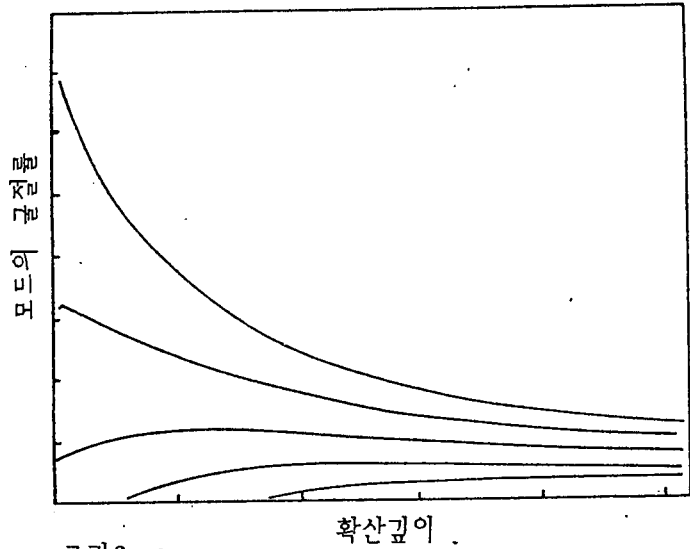


그림 6-a

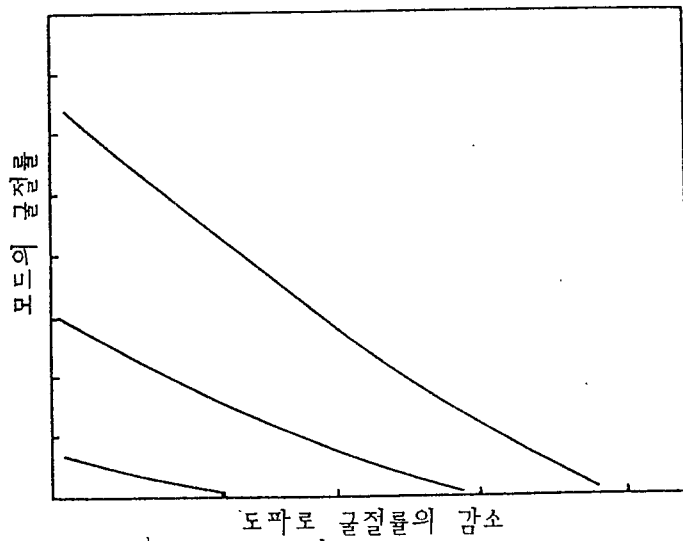


그림 6-b

그림 6 재확산 및 도파로 굴절률 변화에 따른 모드 굴절률의 변화