

급열법에 의한 K - Na 이온교환 도파로의 굴절을 분포식산출

○ 강 승민, 송 재원

경북대학교 전자공학과

Derivation of the refractive index profile equation
of K-Na ion-exchange waveguide by a rapid thermal method

* Sueong Min Kang and Jae Won Song

Department of Electronics, Kyungpook National University

Abstract

A detailed theoretical and experimental study of K-Na exchange in soda lime silicate glasses by RTP is presented. Concentration profiles i.e. index profiles are given by complementary error function added Gaussian function. The estimated diffusion coefficient is $1.54\mu\text{m}^2/\text{min}$.

I. 서론

유리도파로는 수동형 광 소자를 개발하는데 있어 가장 먼저 선행되어야 할 기본적인 요소이다. 이러한 유리도파로 제작에는 이온교환법이 널리 쓰이는데 이는 유리내 Na이온을 편광성이 큰 이온으로 교체하는 과정을 요구한다. 이온교환원으로는 Ag, K, TI, Cs 등이 쓰이고 이들은 각각의 장단점을 지니고 있어서 응용 분야에 따라 선택된다. 특히 K - Na 이온교환은 굴절률의 변화가 적어서 저손실 단일모드 도파로 제작이 가능하여 방향성결합기, 스타결합기와 같은 소자의 개발에 쓰이고 있다. 일단 이온교환원이 선택되면 제작방법상의 문제를 고려해야 한다. 기존의 방법은 히터(heater)를 이용하여 보(furnace)의 온도를 일정한 상태로 유지시키는 일반법(usual method)을 많이 사용하였으나, 도파로 제작 시간이 많이 걸리는 단점때문에 광소자의 제작 비용(cost)을 높여주는 결과를 초래했다. 따라서 기존의 광소자 개발분야에서 단

시간 내에 도파로를 제작할 수 있는 기법이 요구되어 왔다.

본 논문에서는 집적광학에서 수동형 광소자의 제작으로 쓰이는 유리에 할로겐 텀프의 빛을 열원으로 사용하는 급열방식을 이용하여 K - Na 이온교환 도파로를 만들고 밝은모드선 관측법을 통하여 도파로의 유효굴절을 측정했다. 급열방식은 확산원으로 빛을 사용하는 특징이 있는데 이는 빛의 물리학적 성질을 이용하여 확산물질의 이동도를 증가시키고자 세로이 개발된 방식인데 이를 실험적으로 확인 하였다. 이 때 나타나는 확산물질의 농도분포(굴절률 분포)는 에러보상 함수에 가우시안 함수가 추가된 독특한 형태를 가짐을 IWKB(InverseWKB)방법을 이용한 굴절률 분포해석 기법을 이용하여 확인 할 수 있었다.

II. 본론

2.1 급열방식에 의한 K-Na 이온교환 도파로 제작

도파로 제작시 이온교환 온도가 정밀하지 않아서 되고 굴절률변화가 0.012정도로 상당히 작아서 저손실($< 0.2 \text{ dB/cm}$) 단일모드 도파로 제작이 가능한 K 이온을 사용하기 위해 질산칼륨(KNO_3)을 이온교환원으로 선택한다.

제작방법으로는 최근 반도체 공정에서 산화, 어닐링(annealing)시 단시간 공정으로 널리 쓰이는 급열방식을 도파로 제작에 이용한다. 이는 빛을 확산원으로 이용해서 이온교환원의 확산계수를 높여 소자 제작속도를 증가시킬 수 있다.

이온 교환 유리도파로 제작을 위해 기판으로는 시중에 판매되는 현미경 슬라이드 유리를 사용했으며

크기는 가로, 세로, 두께가 76 x 26 x 1 mm이다. 이 이온교환원으로는 순도 99.9%의 질산칼륨을 사용했다. 4000ml 파이렉스(Pyrex)비이커에 순도 99.9%의 질산칼륨 적당량을 넣는다. 그런다음 온도를 자동으로 조정해주는 ATC(automatic thermal controller)에 연결된 전열기 위에 이 비이커를 올려놓고 질산칼륨을 원하는 온도까지 가열한 후 할로겐 램프를 ATC에 연결하여 일정한 온도가 유지되게 한다.

사용한 할로겐 램프는 120V, 1000W 이며 원하는 온도는 ATC의 저항값을 변화시켜 조정하였다. 그리고 비이커 속의 질산칼륨 온도는 열전대(thermocoupler)를 넣어 측정하였다. 이온 교환 온도는 440°C 에서 행하였으며 이온 교환 시간은 각각의 샘플에 대해 10분, 20분, 50분, 100분으로하여 실시 하였다.

2.2 유효 굴절을 측정

유효굴절을 측정할 위해서는 일단 도파모드의 관측이 선행되어야 한다. 일반적으로 실험실에서는 프리즘 결합방법을 이용한다. 프리즘 결합기를 이용하여 광도파관상을 관측하는 방법에는 밝은 모드선 관측법과 어두운 모드선 관측법이 있다. 본 논문에서는 그림 1. 과 같은 밝은 모드선관측법을 이용하여 유효굴절을 측정한다. 식 (1)은 유효굴절률 n_m 을 구하는 공식이다.

$$n_m = \sin\theta_m \cos\alpha + (N_p^2 - \sin^2\theta_m)\sin\alpha \text{ -----(1)}$$

- 여기서 n_m 은 유효 굴절률
- θ_m 은 도파 모드의 출사각
- N_p 는 프리즘의 굴절률
- α 는 프리즘의 사이각 이다.

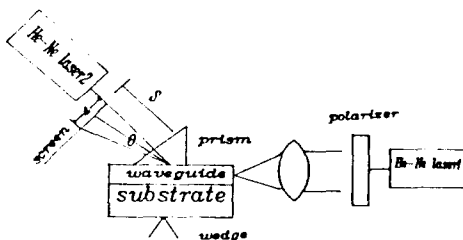


Fig 1. Schematic arrangement in effective refractive index measurement.

그림 1과 같은 방법으로 측정된 유효굴절률을 표 1에 나타냈다. 표 1은 440 °C 에서 각 시간

별로 금열방식과 일반방식에 의해 이온교환했을 때의 유효굴절률을 비교한 것으로 할로겐 램프를 사용하는 금열방식의 모드 수가 일반방식에 의한 것보다 많은 것을 알 수 있다. 모드 길이가 길다는 것을 간접적으로 나타내는 것으로 금열방식의 단 시간 내에 제작됨을 보여 주고 있다.

Table 1. Effective refractive index(at 440 °C)

mode	n_p	10 분	20 분	50 분	100 분
TF0	n_1	1.508766	1.510634	1.510485	1.510664
TF1	n_2	1.504492	1.507093	1.507753	1.507929
TF2	n_3			1.506047	1.506250
TF3	n_4			1.503930	1.504987
TF0	n_1	1.505192	1.506116	1.506154	1.507793
TF1	n_2		1.501816	1.502735	1.505263
TF2	n_3			1.500463	1.503359
TF3	n_4				1.501441

2.3 유효굴절을 이용한 굴절률분포산출

측정된 유효굴절을 이용하여 굴절률 분포를 추정할 수 있는 방법을 IWKB라 한다. 이는 굴절률 분포가 단조함수적으로 감소할 경우에 타당성이 입증되고 있는 비파괴법으로 도파관 연구에 널리 이용되고 있다. 그 결론식은 다음과 같이 표현된다.

$$Z_m = Z_{m-1} + \left[\left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{n_{m-1} + 3n_m}{2} \right)^{-1/2} (n_{m-1} - n_m)^{-1/2} \left\{ \left(\frac{4m-1}{8} \right) - \frac{2}{3} \sum_{k=1}^{m-1} \left(\frac{n_{k-1} + n_k}{2} + n_m \right)^{1/2} \left(\frac{Z_k - Z_{k-1}}{n_{k-1} - n_k} \right) \left[(n_{k-1} - n_m)^{3/2} - (n_k - n_m)^{3/2} \right] \right\} \right] \text{ -----(2)}$$

$$Z_1 = \frac{9}{16} \left[\frac{n_0 + 3n_1}{2} \right] (n_0 - n_1)^{-1/2} \text{ -----(3)}$$

이때 변수 Z_m 는 자유공간 파장 λ_0 에 의해 규격화된 값으로, $n(Z_m) = n_m$ 으로 정의된 WKB 전환점이다. m 개의 모드에 대한 유효굴절률을 알고 표면굴절률 n_0 을 모르므로 n_0 의 값을 두번째 차 계급의 합이 최소가 되게하여 굴절률 분포가 가장 완만한 곡선에 관계되는 값으로 정하는데 그 식은 다음과 같다.

$$\sum_{k=0}^{M-2} \left| \begin{array}{cc} \frac{n_{k+2} - n_{k+1}}{z_{k+2} - z_{k+1}} & \frac{n_{k+1} - n_k}{z_{k+1} - z_k} \\ \frac{z_{k+2}}{2} & \frac{z_{k+1}}{2} \end{array} \right|^2 \quad (4)$$

2.4 굴절을 본포식의 제언

도파로 제작시 관련 변수들이 도파로의 특성에 어떤 영향을 미치는지를 규명하기 위해 정확한 굴절을 본포식이 요구된다. 그러나 제작시 환경과 이온교환 공정의 복잡한 성질 때문에 실제 제작시 얻은 본포식은 이론에 의해 계산된 것과 다르다. 따라서 굴절을 본포식을 여러 특정한 형태라고 가정하게 되는데 대표적인 예가 식 (5)에 제시되었다. 이와같은 굴절을 본포식의 타당성을 보여주기 위해서 가정된 굴절을 본포식으로부터 유효굴절을 구하고 실

$$n(x) = n_b + \Delta n \operatorname{erfc}(x/d) \quad (5-a)$$

$$n(x) = n_b + \Delta n \exp(-x^2/d^2) \quad (5-b)$$

$$n(x) = n_b + \Delta n \exp(-x/d) \quad (5-c)$$

험에 의해 구한 굴절을 비교함으로써 추측된 본포식의 타당성 여부를 확인하게 된다. 급열 방식에 의해 제작된 도파로의 경우 위에서 언급된 굴절을 본포와는 상당히 다른 형태를 가진다. 이는 빛에 의해 유리와 이온교환원(NaNO₃) 사이의 확산물질이 상당한 양의 빛 에너지(1000 W X time)을 받기 때문이라 예상된다. 따라서 급열방식에 의해 제작된 도파로의 굴절을 본포식이 재검립될 필요가 있다. 본 논문에서는

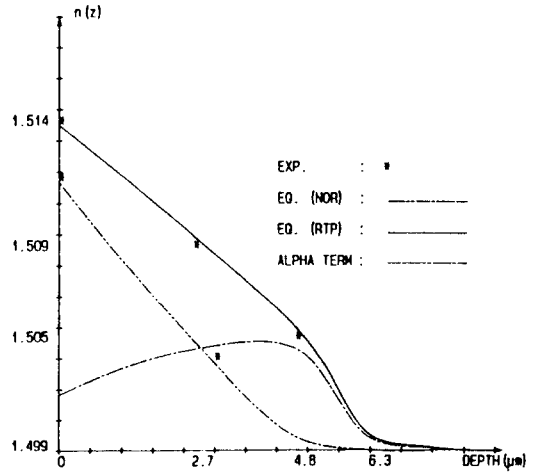
$$n(x) = n_b + \Delta n \operatorname{erfc}(x/d_r) + \sum_{i=1}^M \alpha_i$$

$$\alpha_i = \begin{cases} \Delta n(R_{pi}) \exp\left[-\frac{(x-R_{pi})^2}{2d_{R_{pi}}^2}\right] & ; x < R_{pi} \\ \Delta n(R_{pi}) \exp\left[-\frac{(x-R_{pi})^2}{2d_{R_{pi}}^2}\right] & ; x > R_{pi} \end{cases}$$

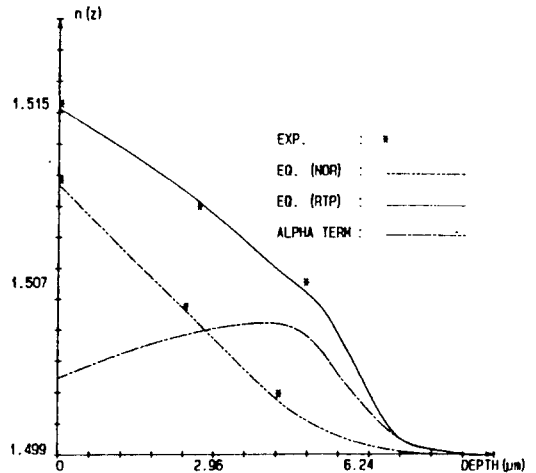
d_r = 일반법의 유효길이

$$d_{R_{pi}} \cong d_{R_{pi}} / 3.5 \quad (6)$$

식 (6)과 같은 급열방식에 의한 도파로의 굴절본포식을 제안한다. 이식은 실험식으로써 빛의 영향을 고려한 새로운 항을 추가함으로써 어느정도 정확성을 인정



(a) Diffusion time is 10 min.

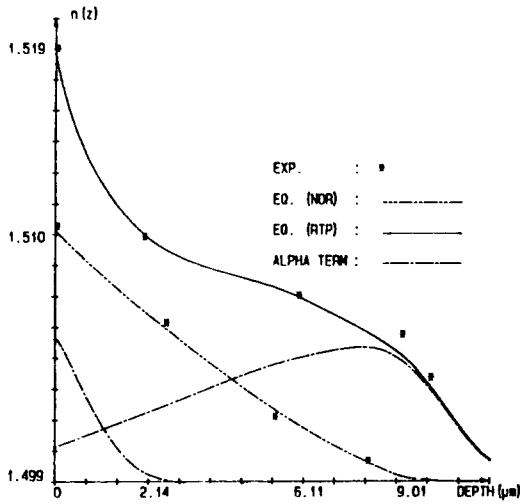


(b) Diffusion time is 20 min.

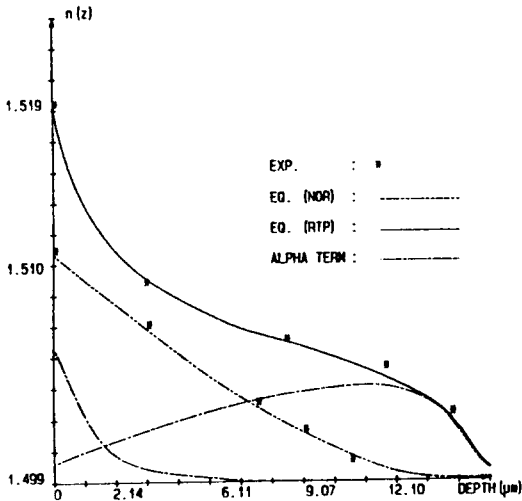
받을 수 있는 본포식임을 그림 (2)로부터 알 수 있다.

그림 (2)는 밝은 모드선관측법으로 측정된 유효굴절률로부터 산출된 값과 식 (6)에서 제공한 본포식을 동시에 나타냄으로서 이들 사이의 일치성을 보여준다. 이로부터 알 수 있는 사실은 일반법에 의해 제작된 도파로의 굴절본포는 에러보상함수의 굴절본포를 나타내고 급열방식에 의해 제작된 도파로의 굴절본포는 기본적인 에러보상함수에 가우시안 함수의 새로운 항이 더해진 형태를 가진다는 것을 알 수 있다. 이 항은 급열방식의 공정이 가지는 고유한 특성을 뒷받침 해주는 것으로 일반법에서는 없었던 빛(같은 온도) 공정상 어떤 영향을 미치는지를 암시한다

그림 (3)는 R_{pi}의 크기를 시간에 대해 나타냈다.



(c) Diffusion time is 50 min.



(d) Diffusion time is 100 min.

Fig 2. An refractive index profiles of RTP-waveguide. With comparison between and usual method.

빛의 영향으로 생긴 가우시안 덩어리가 시간이 경과 할수록 깊이 방향으로 진행함을 알 수 있다.

그림 (4)는 시간에 따른 도파로의 유효깊이를 나타낸 것이다. 급열방식의 기울기(확산계수)가 일반방식의 기울기보다 크다는 사실을 알 수 있다. 이로부터 급열방식의 유효깊이가 일반법의 유효깊이보다 크다는 것과 단시간공정의 가능성을 확인할 수 있다. 식 (7)는 급열방식과 일반법 두가지 경우의 확산 계수식 이다.

$$d_{rtp} = 1.2425 \sqrt{t} \quad ; \text{ 급열법 유효깊이} \quad \text{----- (7-a)}$$

$$d_r = 0.63553 \sqrt{t} \quad ; \text{ 일반법 유효깊이} \quad \text{----- (7-b)}$$

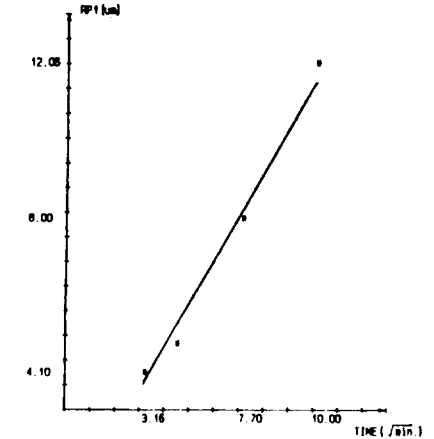


Fig 3. Position of Gaussian function obtained by light source

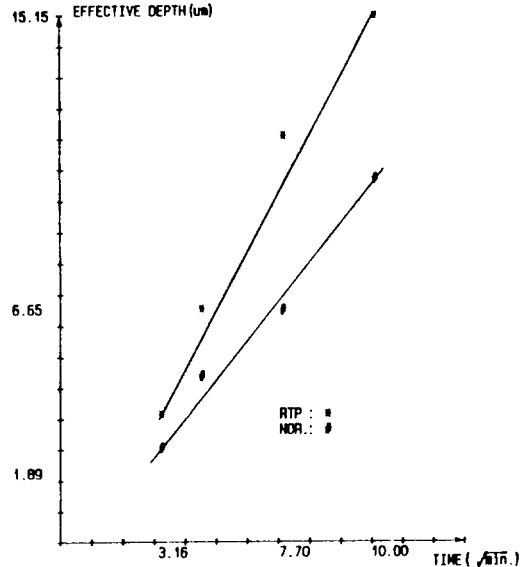


Fig 4. Comparison between the effective depth of RTP and the effective depth of usual method.

III. 결론

현미경 슬라이드 유리 (Sodalime slide glass)에 할 로겐램프 빛을 다른 형태의 확산원으로 사용하는 급

열방식에 의해 제작된 K - Na 이온교환도파로의 고유한 굴절을 본포식을 제안했다. IWKB방식을 이용하여 측정된 유효굴절률로부터 산출한 굴절을 본포와 비교하여 볼 때 본 논문에서 제안한 굴절률본포식이 아직 정립되지 않은 급열방식에 의한 K- Na 이온교환도파로의 굴절을 본포식으로 의미가 있음을 알 수 있고 실험 결과와 잘 일치함을 입증하였다. 일반법에 의해 제작된 굴절률본포와 비교해볼 때 급열방식은 가우시안함수 형태의 새로운 항이 추가되는데 이는 외부 빛에너지에 의해 만들어지고 있음을 추정할 수 있었다. 이로인하여 급열방식에 의해 제작된 도파로는 유효깊이와 확산계수($1.54\mu\text{m}^2/\text{min}$, 일반법: $0.4038\mu\text{m}^2/\text{min}$)가 커서 짧은 시간내에 단일모드에서 다수모드까지 제작이 가능함을 보였다. 특히 일반법으로는 다수 모드 도파로 제작이 어려웠던 K - Na 이온교환법에 급열법을 쓰므로 그 가능성을 엿볼 수 있었다.

참고문헌

- [1] G. L. Tip and J. Albert, " Characterization of planar optical waveguide by K-ion exchange in glass," Opt. Lett., No.10: 151- 153, 1985.
- [2] Joseph E. Gortych and Dennis G. Hall, " Fabrication of planar optical waveguides by K-ion exchange in BK7 and Pyrex glass," IEEE J.
- [3] R. Ulrich and R. Torge, "Measurement of thin film parameter with a prism coupler," App. Opt., vol. 12: 2901, 1978
- [4] J. M. White and P. E. Heidrich " Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: a simple analysis," App. Opt. 15: 151-155, 1976
- [5] 김태환 "급열방식에 의한 K-Na이온 교환 도파로 제작과 특성측정", 경북대학교 석사학위논문집.