

**K<sup>+</sup> 와 Ag<sup>+</sup> 이온교환 도파로의 광결합 특성**  
**The optical coupling characteristics of K<sup>+</sup> and Ag<sup>+</sup>**  
**ion-exchanged waveguide**

김홍석\*, 이병석, 천석표, 이현용, 정홍배  
 (광운대학교 전자재료공학과)

H.S. Kim\*, B.S. Yi, S.P. Cheon, H.Y. Lee, H.B. Chung  
 (Dept. of Electronic Materials Eng., Kwangwoon Univ.)

**Abstract**

In this paper, we investigated the optical coupling characteristics for K<sup>+</sup> ion-exchanged diffused channel waveguide by using coupled-mode equations. In this case, the optical-power-dividing was observed at the waveguide-type optical coupler with 3[μm] line-width and, 6[μm] separation between channel waveguides in which interaction lengths were 1 and 3[mm], respectively. On the basis of that, we performed simulation for Ag<sup>+</sup> ion-exchanged diffused channel waveguide. As a result of simulation, the optical-power-dividing was shown at the waveguide-type optical coupler with 3[μm] line-width, 6[μm] separation between channel waveguides and 0.1[mm] interaction length.

**1. 서 론**

현재의 통신망이 다양한 정보의 수요와 공급을 필요로 하는 고도의 정보화 사회로 변화함에 따라 고품질 영상전송, 화상통신, 일인 다자간 통신 및 광가입자망의 구현 등 대량의 데이터 전송을 빠른 속도로 실현시키기 위한 광대역 통신 시스템에 대한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다. 이에 따른 기술의 개발은 물론 대용량의 고속정보통신의 실현을 위해 필수적인 소자기술의 기반

확립 역시 중요한 문제이다. 광통신 시스템을 구성하고 있는 소자로는 외부에너지의 인가여부에 따라 능동소자<sup>1,2)</sup>와 수동소자<sup>3,4)</sup>가 있다. 광수동소자는 광섬유형과 도파로(waveguide)형으로 구분하며 광섬유형에 비해 도파로형은 대량생산이나 직접도면에서 상당한 잇점을 갖고 있다. 수동소자중 광결합기(optical coupler)<sup>5,6)</sup>는 광섬유로부터 광신호를 분리하거나 결합하는 광통신망의 가장 기본적인 소자로서 다양한 기능을 수행하고 있다. 본 연구에서는 광결합기를 제작하기 위해 이온 교환 공정<sup>7)</sup>을 사용하였다. 이온 교환 공정이란, Li<sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ag<sup>+</sup> 그리고 Tl<sup>+</sup>와 같은 크기가 크거나 상대적으로 큰 분극율을 가지는 1가의 알칼리 이온이 유리기판내의 Na<sup>+</sup> 이온과 교환되는 것으로 결과적으로 유리기판내에 선택적으로 굴절율 영역이 형성되어 광도파로가 제작된다. 본 연구에서는 이온교환 방법을 이용하여 K<sup>+</sup> 이온을 soda-lime 유리 기판으로 이온교환시켜 도파로형 방향성 광결합기를 제작하고, 결합모드방정식을 이용하여 그 특성에 대해 고찰하였다. 그리고 K<sup>+</sup> 이온에 대한 실험을 토대로 Ag<sup>+</sup> 이온에 대해서도 같은 방법을 적용하여 K<sup>+</sup> 이온교환 채널도파로와 Ag<sup>+</sup> 이온교환 채널도파로의 광결합 특성을 비교, 고찰하였다.

**2. 이 론**

**2-1. 결합 모드 방정식**

각각의 채널도파로의 굴절율 분포는 식(2-1)과

식(2-2)와 같다.

$$n_1(x, y) = n_b + \Delta n \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{d}\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{y+s}{\sigma}\right)^2\right] \quad \dots (2-1)$$

$$n_2(x, y) = n_b + \Delta n \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{d}\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{y-s}{\sigma}\right)^2\right] \quad \dots (2-2)$$

$n_b$  : 기판의 굴절율,  $\Delta n$  : 이온교환에 의한 기판 표면에서의 굴절율 변화치,  $d$  : 이온교환에 의한 실효확산깊이(effective diffusion depth),

$2\sigma$  : 실효확산폭(effective diffusion width)

전파모드에는 대칭모드와 비대칭모드가 있으며 두 모드가 각각  $\beta_e$ 와  $\beta_o$ 의 전파상수로 도파로를 진행함에 따라 서로 결합하여 두 채널도파로 사이에서 광세기를 연속적으로 전달하게 된다. 인접한 두 채널도파로간에 광결합 현상이 일어날 경우, 단방향성 광결합기(unidirectional optical coupler)에 대한 결합 모드 방정식은 식(2-3)과 식(2-4)과 같이 표현된다.

$$\frac{dA(z)}{dz} = -jxB(z) \exp[-j(\beta_2 - \beta_1)z] \quad \dots (2-3)$$

$$\frac{dB(z)}{dz} = -jxA(z) \exp[+j(\beta_2 - \beta_1)z] \quad \dots (2-4)$$

$A(z)$ ,  $B(z)$  : 광결합 현상이 발생할 경우 각각 채널도파로 1과 2에 광이  $z$ 방향으로 진행함에 따라 변화하는 진폭의 세기,  $x$  : 결합계수(coupling coefficient),  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  : 채널도파로 각각의 전파상수

광결합기에서 비결합상태와 결합상태의 전파상수는 그림 2-2와 같다. 여기서  $\Delta = (\beta_2 - \beta_1)/2$

이며,  $\beta_c = \sqrt{x^2 + \Delta^2}$ 이다. 그리고 대칭모드와 비대칭모드에 대한 전파상수는 식(2-5)와 같다.

$$\left. \begin{matrix} \beta_e \\ \beta_o \end{matrix} \right\} = \beta_m \pm \beta_c \quad \dots (2-5)$$

식(2-3)과 식(2-4)를 풀어 채널도파로 1과 2에서  $z$ 방향으로 진행하는 광세기를 규격화된 형태로 표현하면 식(2-6)과 식(2-7)과 같다.

$$\frac{|A(z)|^2}{|A(0)|^2} = 1 - F \cdot \sin^2(\beta_c z) \quad \dots (2-6)$$

$$\frac{|B(z)|^2}{|A(0)|^2} = F \cdot \sin^2(\beta_c z) \quad \dots (2-7)$$

$$F = \left(\frac{x}{\beta_c}\right)^2 = \frac{1}{1 + (\Delta/x)^2} \quad \dots (2-8)$$

만약 광결합기를 구성하는 두 채널도파로의 실효확산깊이, 실효확산폭 그리고 표면굴절을 변화가 동일하다면, 두 채널도파로의 전파상수는 일치하여  $\Delta = 0$ 가 된다. 이 경우에 광결합기는 최대의 결합계수를 가지며 결합길이를 반주기로 하여 광세기를 서로 교번하여 전달한다.

## 2-2. 광결합기의 결합계수와 결합길이

각각의 채널도파로 1과 2에 대한 결합계수는 식(2-9)와 식(2-10)과 같다.

$$x_{12} = \frac{k_0^2}{2\beta_1} \frac{\int \int_{-\infty}^{\infty} n_2^2(x, y) \cdot E_1^*(x, y) \cdot E_2(x, y) dx dy}{\int \int_{-\infty}^{\infty} E_1^*(x, y) \cdot E_1(x, y) dx dy} \quad \dots (2-9)$$

$$x_{21} = \frac{k_0^2}{2\beta_2} \frac{\int \int_{-\infty}^{\infty} n_1^2(x, y) \cdot E_2^*(x, y) \cdot E_1(x, y) dx dy}{\int \int_{-\infty}^{\infty} E_2^*(x, y) \cdot E_2(x, y) dx dy} \quad \dots (2-10)$$

$n_1(x, y)$ ,  $n_2(x, y)$  : 채널도파로 1과 2에 대한 굴절을 분포식,  $E_1(x, y)$ ,  $E_2(x, y)$  : 채널도파로 1과 2에 대한 전계의 규격화된 필드분포식, 윗 첨자 \* : 공액 복소수,  $x_{12}$  : 채널도파로 2에 대한 채널도파로 1의 결합계수,  $x_{21}$  : 채널도파로 1에 대한 채널도파로 2의 결합계수 만약 채널도파로 1과 2의 모든 파라미터들이 서로 동일하다면  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ 이고  $x_{12} = x_{21} = x$ 로서 간략화된다. 계산된 결합계수로부터 광결합기의 결합길이(coupling length)를 구하면 식(2-11)과 같다.

$$L = \frac{\pi}{2\beta_c} \quad \dots (2-11)$$

이 때, 인접한 두 채널도파로가 서로 동일한 조건을 만족한다면,  $\Delta = 0$ 이므로 식(2-12)와 같이 간략화된다.

$$L = \frac{\pi}{2x} \quad \dots (2-12)$$

## 3. 실험

그림 3-1은 이온교환에 의한 채널도파로의 공정도를 나타낸 것이다. 제작된 광결합기에 대한 광세기와 도파로 전송손실은 Prism-coupling 방법을 이용하여 측정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

그림 4-1은 광결합기에서 채널도파로간의 간격 증가에 따른 대칭모드와 비대칭모드의 전파상수를 보인 것이다. 간격이 작을수록 전파상수간의 차가 크며, 간격이 증가할수록 서로 독립적인 비결합상태의 채널도파로 전파상수에 수렴한다.

그림 4-2은 광결합기의 결합계수와 결합길이를 나타낸 것으로 결합계수는 채널도파로간의 간격이 작을수록 매우 큰 값을 나타내며 결합길이는 채널도파로간의 간격이 증가할수록 급격히 증가함을 볼 수 있다. 그리고 실험에 사용된 시편의 계산된 결과는 표4-1과 같다.

그림 4-3은 광결합기에서 채널도파로 1과 2의 광진행 방향에 따른 광세기 전달을 보여주며 이 때 광이 진행함에 따라 서로 광세기 전달이 교번함을 알 수 있다. 그리고 광결합기의 광세기 분할 결과를 표4-2에 나타내었다.

## 5. 결 론

파장  $0.6328[\mu\text{m}]$ 에서 선포이  $3[\mu\text{m}]$ 인 채널도파로 간의 간격이  $6[\mu\text{m}]$ 인 광결합기에서 최대 광세기 전달에 대한 결합계수와 결합길이는  $\text{K}^+$  이온의 경우, 이론적으로 계산된 결과 각각  $785.016767, 2.001[\text{mm}]$ 이다. 이 때 상호작용길이가  $1[\text{mm}]$ 와  $3[\text{mm}]$ 인 시편에서 광세기 분할 현상이 발생하였으며 상호작용길이가  $3[\text{mm}]$ 인 경우 광세기 분할 비율은 이론치(채널도파로 1 :  $49.885[\%]$ , 채널도파로 2 :  $50.1144[\%]$ )와 측정치(채널도파로 1 :  $48.0309[\%]$ , 채널도파로 2 :  $51.9651[\%]$ )가 거의 일치하였다.  $\text{Ag}^+$  이온의 경우, 컴퓨터 계산결과 결합계수와 결합길이는 각각  $7676.375, 0.2046[\text{mm}]$ 이다. 이 때 광세기 분할 현상은 상호작용길이가  $0.1[\text{mm}]$ 인 시편에서 발생하고 광세기 분할 비율은 채널도파로 1과 2에서 각각  $51.7757[\%]$ 와  $48.2243[\%]$ 이다. 결과적으로 이러한 이온교환 방식에 의해 제작된 도파로형 광결합기는 채널도파로 1과 2로 광세기 분할 현상이 일어났으나  $\text{Ag}^+$  이온교환 방식 보다는  $\text{K}^+$  이온교환 방식을 사용하는 것이 유리하다고 판단된다. 또한  $\text{K}^+$  이온교환 도파로형 광결합기가 전파손실이 작고 제작비용이 저렴하여 향후 광집적수동소자로의 응용 가능성이 높을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [1] H.Kogelnik, et. al, "Switched Directional Coupler with Alternating  $\Delta\beta$ ", IEEE J. of Quantum Electronics, QE-12(7), 1976
- [2] R.C.Alferness, et. al, "Tunable optical waveguide directional coupler filter", Appl. Phys. Lett. 33(2), 1978
- [3] Rics,R.R., et. al, "Multi wavelength monolithic integrated fiber-optic terminal", Proc. Soc. Photo-Optical Instr. Eng., 176:133, 1979
- [4] De Yu, Z., "Waveguide optical planar lenses in  $\text{LiNbO}_3$  theory and experiments", Opt. Commu., 47(4), 1983
- [5] Arun K. Agarwal, "Review of Optical Fiber Couplers", Fiber Integr. Opts., 6(1), 1987
- [6] R.C.Alferness, et. al, "Characteristics of Ti-diffused lithium niobate optical directional couplers", Appl. Opt. 18(23), 1979
- [7] H.Helmers, et. al, "Single mode potassium and silver ion-exchanged glass glass waveguides with low losses and high index increase", Appl. Phys. Lett., 61(23), 1992
- [8] Ajoy Ghatak, et. al, OPTICAL ELECTRONICS, Cambridge University Press
- [9] G.Stewart, et. al, "Planar Optical

Waveguides Formed by Silver-Ion Migration in Glass", IEEE J. of Quantum Electronics, QE-13(4), 1977

[10] H.Nishihara, et. al, Optical integrated circuits, McGraw-Hill Book Company

표 4-1. 선포이  $3[\mu\text{m}]$  시편의 파장  $0.6328[\mu\text{m}]$ 에 대한 광결합기의 계산된 결과

	$\text{K}^+$ ion	$\text{Ag}^+$ ion	
Effective Diffusion Width $[\mu\text{m}]$	3	3	
Distance between Guides center-to-center $[\mu\text{m}]$	6	6	
Ion-exchange Time[hrs.]	3	3	
Effective Diffusion Depth $[\mu\text{m}]$	3.417	21.297	
Coupling Coefficient	785.016767	7676.375	
Coupling Length[mm]	2.001	0.2046	
Propagation Constants $[1/\text{m}]$	$\beta$	$1.505867 \times 10^7$	$1.581073 \times 10^7$
	$\beta_e$	$1.505946 \times 10^7$	$1.581841 \times 10^7$
	$\beta_o$	$1.505789 \times 10^7$	$1.580305 \times 10^7$

표 4-2. 이온교환 광결합기의 광분할

	Channel waveguide 1	Channel waveguide 2
$\text{K}^+$ ion	0.22[mV]	0.238[mV]
	Mesurement : $48.0349[\%]$ Theory : $49.8856[\%]$	Mesurement : $51.9651[\%]$ Theory : $50.1144[\%]$
$\text{Ag}^+$ ion	$51.7757[\%]$	$48.2243[\%]$

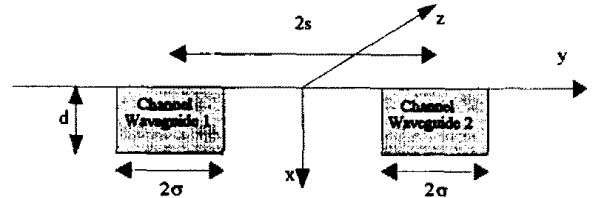


그림 2-1. 광결합기의 단순화된 단면도

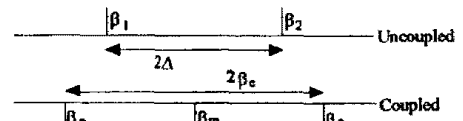


그림 2-2. 광결합기의 전파상수

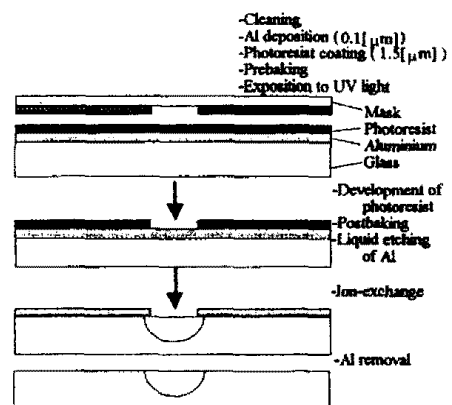
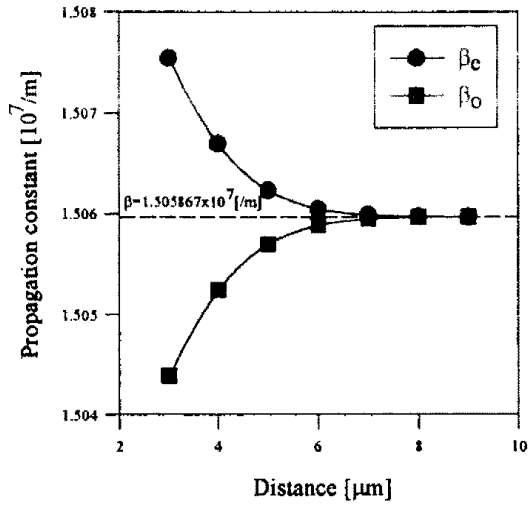
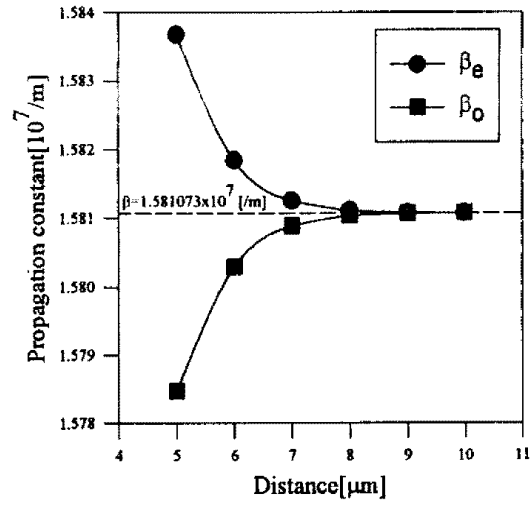


그림 3-1. 채널도파로의 제작공정도

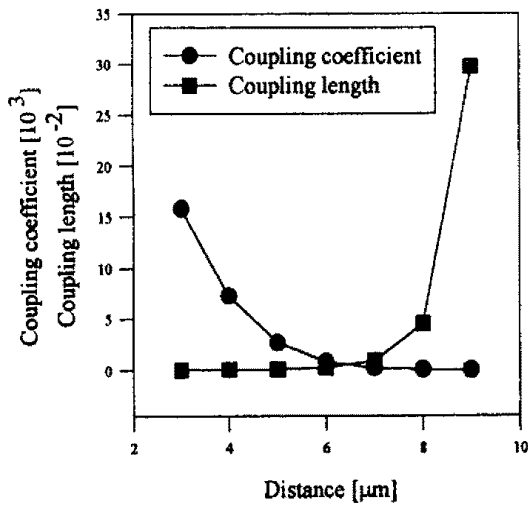


(a) K<sup>+</sup> 이온

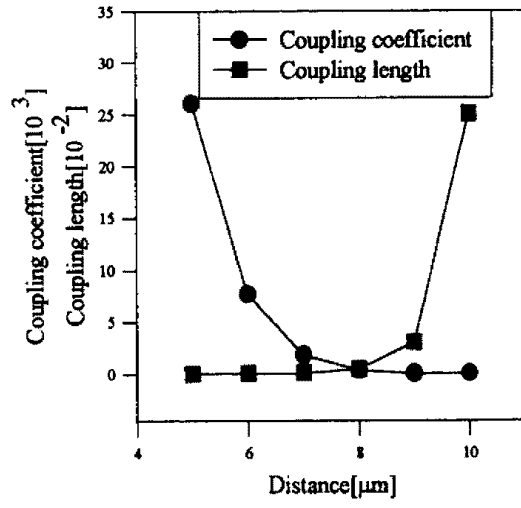


(b) Ag<sup>+</sup> 이온

그림 4-1. 채널도파로간의 간격에 따른 대칭모드와 비대칭모드의 전파상수

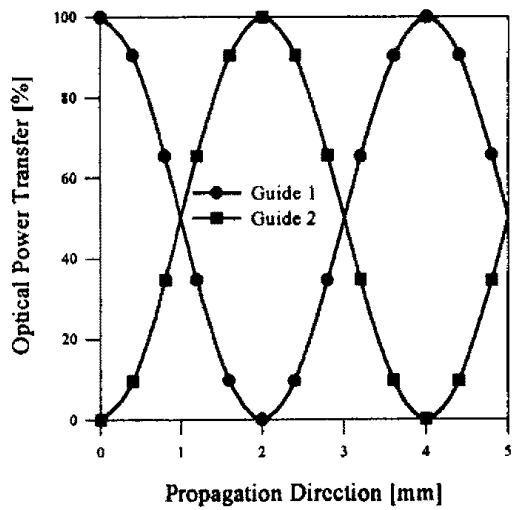


(a) K<sup>+</sup> 이온

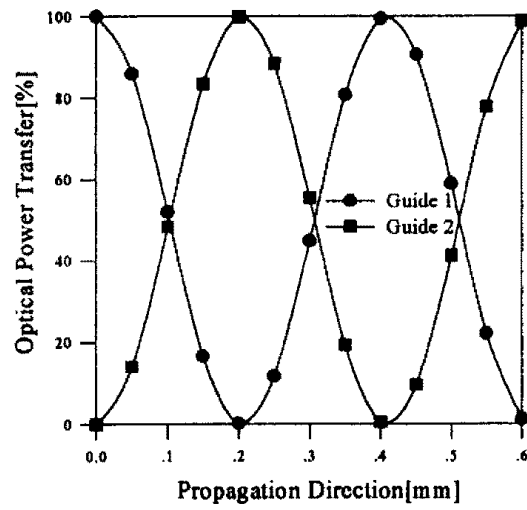


(b) Ag<sup>+</sup> 이온

그림 4-2. 광결합기 채널도파로간의 간격에 따른 결합계수와 결합길이



(a) K<sup>+</sup> 이온



(b) Ag<sup>+</sup> 이온

그림 4-3. 광결합기의 진행방향에 따른 광세기전달