

K⁺ 이온교환 도파로형 광결합기의 모델링 및 특성 Modeling and Characteristics of K⁺ Ion-exchanged Waveguide-type Optical Coupler

천석표*, 박태성, 정홍배

Seok-Phyo Cheon*, Tae-Sung Park, Hong-Bay Chung

Dept. of Electronic Materials Eng., Kwangwoon Univ.

ABSTRACT

In this study, we performed a modeling for K⁺ ion-exchanged diffused channel waveguide and waveguide-type optical coupler by WKB(Wentzel-Kramer-Brillouin) dispersion equation, field distribution equation of mode and coupled mode theory, and examined the optical-power-dividing of the optical coupler fabricated by using the modeling condition. The optical-power-dividing was observed at the waveguide-type optical coupler with 3[μ m] line-width, 6[μ m] space between channel waveguides, and 3[mm] interaction length

1. 서론

최근에 기존의 전자통신 시스템에서 충족되지 못하는 고품질 영상전송, 화상통신, 일인 다자간 통신 및 광가입자망의 구현 등 대량 데이터 전송을 실현시키기 위한 광대역의 광통신시스템에 대한 연구와 개발이 진행중이다. 이러한 광통신 시스템을 구성하는 요소로서, 전기장을 인가하여 광신호를 선택적으로 전송하는 능동소자^{1,2)}와 인가하지 않는 수동소자^{3,4)}를 들 수 있으며 이 중, 수동소자에 속하는 광결합기(optical coupler)^{5,6)}는 광섬유로부터 광신호를 분기하거나 결합하는 광통신망의 가장 기초적인 부품으로 광통신망에서 다양한 기능을 수행하고 있다. 본 연구에서 광결합기를 제작하기 위해 사용한 이온교환공정⁷⁾이

란, 유리 기판내의 이온(Na⁺)이 Ag⁺, K⁺, Cs⁺ 또는 Tl⁺ 과 같은 크기가 크거나 상대적으로 큰 분극율을 가지는 이온들과 교환되는 공정을 의미한다. 결과적으로 유리 기판내에 선택적으로 고굴절율 영역이 형성되어 광도파로가 제작된다. 본 연구에서 제작한 방향성 광결합기의 특징으로는 상호작용길이를 변화시켜 주어 제작자가 원하는 대로 광세기 출력비를 조절할 수 있는데 있다. 제작에 앞서, soda-lime 유리 기판으로의 K⁺ 이온 교환에 의한 도파로 파라미터들과 WKB 분산관계식^{8,9)}, 모드에 대한 필드 분포식 및 결합모드방정식¹⁰⁾을 이용하여 모델링된 결과에 따라 채널도파로간의 간격을 결정하고 여러가지 상호작용길이를 갖는 방향성 광결합기를 제작하였다.

II. 이론

II-1. WKB(Wentzel-Kramer-Brillouin) 분산관계식

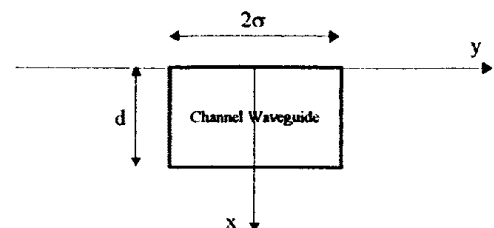


그림 2-1. 확산형 채널도파로의 단순화된 단면도

결과적인 WKB 분산관계식을 나타내면 다음과 같다. 여기서 식(2-1)은 깊이방향에 대한 분산관계식이고, 식(2-2)는 폭방향에 대한 분산관계식이다.

$$k_0 \int_0^{x_1} \sqrt{n(x)^2 - N_x^2} dx = m\pi + \frac{\pi}{4} + \arctan \left[\eta \cdot \left(\frac{N_x^2 - n_c^2}{n_f^2 - N_x^2} \right)^{1/2} \right] \quad (2-1)$$

$$k_0 \int_{y_1}^{y_2} \sqrt{n(y)^2 - N_y^2} dy = m\pi + \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \quad (2-2)$$

$$n(x) = n_0 + \Delta n \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{d} \right), \quad n(y) = n_0 + \Delta n \cdot \exp \left[- \left(\frac{y}{\sigma} \right)^2 \right]$$

여기서, $k_0 (= 2\pi/\lambda)$ 는 파수벡터이고 N_x 와 N_y 는 각각 깊이방향과 폭방향으로의 각 모드에 대한 실효굴절률이다. m 은 모드수(mode number)이며 x_1 와 y_1 는 각각 깊이방향과 폭방향에서의 모드에 대한 반환점(turning point)이다. 또한, n_c 는 공기의 굴절률이며 n_f 는 이온교환에 의한 기판표면의 굴절률이다. 식(2-1)에서, η 는 TE(Transverse Electric) 모드에 대해서 1이고 TM(Transverse Magnetic) 모드에 대해서는 $(n/n_c)^2$ 로서 대입된다.

II-2. 확산형 채널도파로의 일반화된 필드 분포

이온교환에 의한 확산형 채널도파로인 경우, WKB 분산관계식을 이용하여 파동방정식에서의 전계(E)에 대한 해를 근사적으로 구할 수 있다. 확산형 도파로에 대한 깊이방향으로의 파동방정식은 식(2-3)에서와 같이 Schroedinger 방정식의 형태이다.

$$\frac{\partial^2 E(x)}{\partial x^2} + (\phi - U(x))E(x) = 0 \quad (2-3)$$

$$\phi = k_0^2(n_f^2 - N_x^2)$$

$$U(x) = k_0^2(n_f^2 - n^2(x))$$

이 식은 양자역학적인 해석과 비슷하며, 모드의 실효굴절률에 의존하는 ϕ 는 전위 $U(x)$ 에 구속되어 있는 전자의 에너지로 볼 수 있다. 그러므로 확산형 도파로의 모드는 전자에너지 준위에 해당하는 것으로 해석할 수 있다. 모드가 도파로에 구속될 조건은 $0 < \phi < U(\infty)$ 이며 $U(\infty)$ 이상에서는 방사모드가 형성된다. 그리고 반환점은 $\phi = U(x_1)$ 의 조건에서 만족되며, 전계는 반환점 이내의 영역에서 진동 함수(oscillatory function)를 따르고 반환점 이상에서 지수 함수(exponential function)적으로 감소한다. 이러한 조건하에서 식(2-3)의 해를 채널도파로의 깊이방향과 폭방향으로 구하여 모드에 대한 필드분포를 구할 수 있다.

II-3. 결합 모드 방정식

결과적인 결합모드 방정식의 해를 구하면 식(2-4), 식(2-5)와 같다. 여기서 $A(z)$, $B(z)$ 는 각각 채널도파로 1과 2의 필드에 대한 일반화된 진폭 변화이다.

$$\frac{|A(z)|^2}{|A(0)|^2} = 1 - F \cdot \sin^2(\beta_c z) \quad (2-4)$$

$$\frac{|B(z)|^2}{|A(0)|^2} = F \cdot \sin^2(\beta_c z) \quad (2-5)$$

$$F = \left(\frac{\kappa}{\beta_c} \right)^2 = \frac{1}{1 + (\Delta/\kappa)^2}, \quad \Delta \equiv (\beta_2 - \beta_1)/2, \quad \beta_c \equiv \sqrt{\kappa^2 + \Delta^2}$$

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

$$\kappa_{12} = \frac{k_0^2 \iint_{\Omega} n_1^2(x,y) \cdot E_1^*(x,y) \cdot E_2(x,y) dx dy}{2\beta_1 \iint_{\Omega} E_1^*(x,y) \cdot E_1(x,y) dx dy} \quad (2-6)$$

$$\kappa_{21} = \frac{k_0^2 \iint_{\Omega} n_2^2(x,y) \cdot E_2^*(x,y) \cdot E_1(x,y) dx dy}{2\beta_2 \iint_{\Omega} E_2^*(x,y) \cdot E_2(x,y) dx dy} \quad (2-7)$$

여기서, $n_1(x,y)$ 와 $n_2(x,y)$ 는 각각 채널도파로 1과 2에 대한 굴절률 분포식이고 $E_1(x,y)$ 와 $E_2(x,y)$ 는 각각 채널도파로 1과 2에 대한 필드의 일반화된 필드분포식이다. 그리고 윗 첨자 *는 공액 복소수를 의미한다. 이 때, κ_{12} 는 채널도파로 2에 대한 채널도파로 1의 결합계수이며, κ_{21} 은 채널도파로 1에 대한 채널도파로 2의 결합계수이다. 만약 채널도파로 1과 2의 모든 파라미터들이 서로 동일하다면 $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ 이고, $\kappa_{12} = \kappa_{21} = \kappa$ 로서 간략화 된다. 계산된 결합계수로부터 광결합기의 결합길이(coupling length)를 구하면 다음 식(2-8)과 같다.

$$L = \frac{\pi}{2\beta_c} \quad (2-8)$$

이 때, 두 인접한 채널도파로가 서로 동일한 조건을 만족한다면, $\Delta=0$ 이므로 다음 식(2-9)와 같이 간략화 된다.

$$L = \frac{\pi}{2\kappa} \quad (2-9)$$

III. 실험

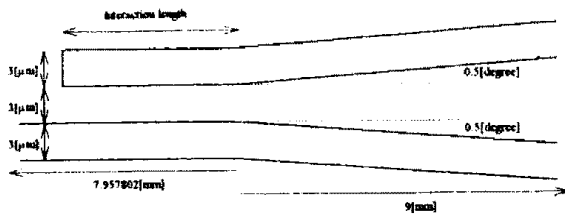


그림 3-1. 마스크 패턴

그림 3-1은 제작된 광결합기의 구조를 보인다. 여기서, 상호작용길이(interaction length)는 1[mm], 1.5[mm], 2[mm], 2.5[mm] 및 3[mm]로 하였다. 광결합기 제작을 위한 공정도를 그림 3-2에 나타내었다.

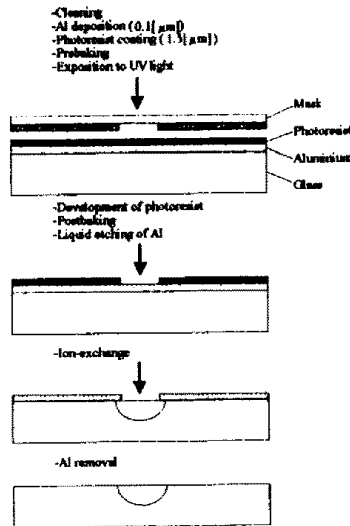


그림 3-2. 광도파로 제작공정도

IV. 결과 및 고찰

그림 4-1은 광결합기에서 채널도파로간의 간격이 증가함에 따른 대칭 모드와 비대칭 모드의 전파상수를 나타낸 것이다. 간격이 작을수록 전파상수간의 차가 크며 반면, 간격이 증가할수록 서로 독립적인 비결합상태의 채널도파로의 전파상수에 수렴한다.

그림 4-2는 계산된 광결합기의 결합계수와 결합길이를 보인 것이다. 결합계수는 채널도파로간의 간격이 작을수록 매우 큰 값을 나타내며, 간격이 증가할수록 급격히 감소한다. 또한, 결합길이는 채널도파로간의 간격이 증가할수록 급격히 증가한다. 그리고 실험에 사용된 시편의 모델링 결과를 나타내면 표 4-1과 같다.

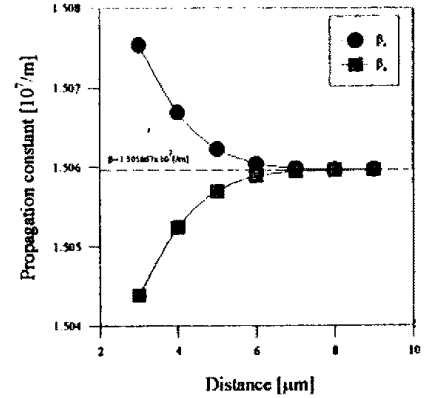


그림 4-1. 채널도파로 간격에 따른 대칭 모드와 비대칭 모드의 전파상수

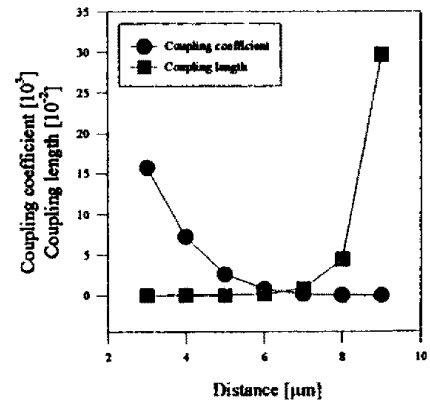


그림 4-2. 광결합기의 채널도파로간의 간격에 따른 결합계수와 결합길이

표 4-1. 선폭 3[μm] 광결합기의 모델링 결과

Effective Diffusion Width [μm]	3	
Distance between Guides center-to-center [μm]	6	
K ⁺ Ion-exchange Time [hrs.]	3	
Effective Diffusion Depth [μm]	3.417	
Coupling Coefficient	785.016767	
Coupling Length [mm]	2.001	
Propagation Constants [1/m]	β	1.505867 × 10 ⁷
	β ₁	1.505946 × 10 ⁷
	β ₂	1.505789 × 10 ⁷

그림 4-3은 광결합기에서 채널도파로 1과 채널도파로 2의 광진행 방향에 따른 광세기 전달과 그에 상응하는 3차원 시뮬레이션 결과이다. 그림에서와 같이, 결합길이는 2.001[mm]이고 광이 진행함에 따라 서로 광세기 전달이 교번함을 알 수 있다. 위의 모델링 조건에 의해 제작된 광결합기의 광세기분할 모습을 사진 4-1에 나타내었으며, 그 결과를 표 4-2에 정리하였다.

참고 문헌

[1] H.Kogelnik, R.V.Schmidt, "Switched Directional Coupler with Alternating $\Delta\beta$ ", IEEE J. of Quantum Electronics, Vol.QE-12, No.7, 1976

[2] R.C.Alferness, R.V.Schmidt, "Tunable optical waveguide directional coupler filter", Appl. Phys. Lett. Vol.33, No.2, 1978

[3] Rics,R.R.,J.D.Zino,D.A.Bryan, et al, "Multiwavelength monolithic integrated fiber-optic terminal", Proc. Soc. Photo-Optical Instr. Eng., 176:133, 1979

[4] De Yu, Z., "Waveguide optical planar lenses in LiNbO₃ theory and experiments", Opt. Commu., Vol.47, No.4, 1983

[5] Arun K. Agarwal, "Review of Optical Fiber Couplers", Fiber Integr. Opts., Vol.6, No.1, 1987

[6] R.C.Alferness, R.V.Schmidt, E.H.Turner, "Characteristics of Ti-diffused lithium niobate optical directional couplers", Appl. Opt. Vol.18, No.23, 1979

[7] H.Helmers, O.G.Helleso, P.Benech, R.Rimet, "Single mode potassium and silver ion- exchanged glass waveguides with low losses and high index increase", Appl. Phys. Lett., Vol.61, No.23, 1992

[8] Ajoy Ghatak and K. Thyagarajan, OPTICAL ELECTRONICS, Cambridge University Press

[9] G.Stewart, C.A.Millar, et al, "Planar Optical Waveguides Formed by Silver-Ion Migration in Glass", IEEE J. of Quantum Electronics, Vol.QE-13, No.4, 1977

[10] H.Nishihara, M.Haruna, T.Suhara, OPTICAL INTEGRATED CIRCUITS, McGraw-Hill Book Company

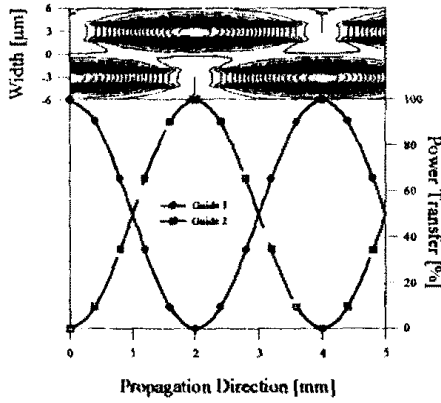


그림 4-3. 광결합기의 진행방향에 따른 광세기 전달

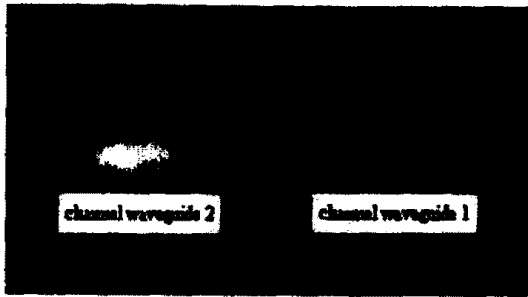


사진 4-1. 광결합기의 광세기분할

표 4-2. 광결합기의 광세기분할

Channel Waveguide 1	Channel Waveguide 2
0.22[mV]	0.238[mV]
48.0349[%]	51.9651[%]
Theory : 49.8856[%]	Theory : 50.1144[%]

V. 결 론

파장 0.6328[μm]에서 선폭 3[μm]이고 채널도파로의 간격이 6[μm]인 도파로형 광결합기의 경우, 최대 광세기 전달에 대한 결합계수와 결합길이는 이론적인 계산 결과로부터 각각 785.016767, 2.001[mm]이다. 상호작용길이가 3[mm]인 시편의 이론적 광세기분할 비율은 49.8856[%]와 50.1144[%]이며 측정에 의한 비율은 48.0349[%]와 51.9651[%]로서 이론치와 실험치가 거의 일치하였다. 결과적으로 이러한 K⁺ 이온교환 방식에 의해 제작된 도파로형 광결합기는 광세기분할 특성을 나타내었으며 전송손실이 작고 제작 비용이 저렴하여 향후 광집적수동소자로서의 응용가능성이 높을 것으로 판단된다.

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음