

K⁺ 이온교환 도파로형 광결합기의 모델링 및 특성

논문
9-3-4

Modeling and Characteristics of K⁺ Ion-exchanged Waveguide-type Optical Coupler

천석표*, 박태성*, 정홍배*

(Seok-Phyo Cheon, Tae-Sung Park, Hong-Bay Chung)

Abstract

In this study, we performed a modeling for K⁺ ion-exchanged diffused channel waveguide and waveguide-type optical coupler by Wentzel-Kramer-Brillouin(WKB) dispersion equation, normalized field distribution equation for 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[μm] line-width, 6[μm] space between channel waveguides, and 3[mm] interaction length

Key Words(중요용어) : Modeling(모델링), Ion-Exchanged Waveguide(이온교환 도파로), Diffused Channel Waveguide(확산형 채널도파로), Optical-Power-Dividing(광전력 분할), Optical Coupler(광결합기)

1. 서 론

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, 전계를 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 공정은 이온교환공정^{7,8)}으로서, 이 공정은 유리 기판내의 Na⁺ 이온이 외부의 용융 염으로부터의 Ag⁺, K⁺, Cs⁺ 또는 Tl⁺ 과 같은 크기가 크거나 상대적으로 큰 분극율을 가지는 이온들과 교환되는 공정을 의미한다. 결과적으로 유리

기판내에 선택적으로 고굴절을 영역이 형성되어 광도파로가 제작된다. 본 연구에서 제작한 도파로형 광결합기는 방향성 결합기(directional coupler)로서 그 특징으로는 상호작용길이를 변화시켜 주어 제작자가 원하는대로 광세기 출력비를 조절할 수 있는데 있다. 제작에 앞서, soda-lime 유리 기판으로의 K⁺ 이온교환에 의한 도파로 파라미터들과 WKB 분산관계식^{9,10)}, 모드에 대한 전계분포식 및 결합모드방정식¹¹⁾을 이용하여 광세기 출력비가 1대1이 되도록 적절히 모델링하였으며, 그 모델링된 조건에 따라 도파로형 광결합기를 제작하고 광세기 출력비를 prism-coupling 방법¹²⁾을 이용하여 관찰해 보았다.

II. 이 론

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

그림 1은 WKB 분산관계식을 설명하기 위하여 채널도파로의 단순화된 모형을 나타낸 것이다. 깊이방향을 x축으로, 폭방향을 y축으로 하였으며, 채널도파로의 폭은 2σ, 깊이는 d라 가정하였다.

WKB 분산관계식은 광도파로의 굴절률분포가

* : 광운대학교 공대 전자재료공학과 신기술연구소

접수일자 : 1995년 11월 20일

심사완료 : 1996년 1월 6일

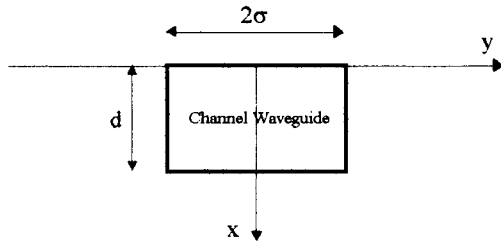


그림 1. 이온교환 채널도파로의 단순화된 단면도
Fig. 1. Simple cross-section of ion-exchanged channel waveguide.

언덕형(graded)일 경우에 적용되며 각각 실효확산 깊이와 실효확산폭에 대해서 각 모드에 대한 실효굴절율과의 분산관계를 표시하는 방법이다. 본 논문에서는 각 모드에 대한 실효굴절율과 반환점(turning point)를 구하는데 WKB 분산관계식을 이용하였다. 또한, 실험상으로 평판형 광도파로의 각 모드에 대한 실효굴절율을 측정을 통하여 알고 있을 경우에 실효확산깊이와 표면굴절율 변화치를 구하는데도 이용된다. 결과적인 WKB 분산관계식을 나타내면 다음과 같다. 여기서 식(1)은 깊이방향에 대한 분산관계식이고, 식(2)는 폭방향에 대한 분산관계식이다.

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

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

$$n(x) = n_b + \Delta n \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{d} \right),$$

$$n(y) = n_b + \Delta n \cdot \exp \left[- \left(\frac{y}{\sigma} \right)^2 \right]$$

여기서, $k_0 (= 2\pi/\lambda)$ 는 파수벡터이고 N_x 와 N_y 는 각각 깊이방향과 폭방향으로의 각 모드에 대한 실효굴절율, n_f 는 기판표면의 굴절율이다. 그리고 m 은 모드수(mode number)이고 x_1 와 y_1 는 각각 깊이방향과 폭방향에서의 모드에 대한 반환점(turning point)이며 $n(x)$ 와 $n(y)$ 는 각각 깊이방향과 폭방향으로의 굴절율 분포식이다. 여기서 d 와 σ 는 각각 실효확산깊이와 실효확산반폭을 의미하고 n_c 는 공기의 굴절율이며 n_b 는 사용된 기판의 굴절율, $\Delta n (= n_f - n_b)$ 은 이온교환공정에 의한 굴절율 변화치이다. 식(1)에서, η 는 TE(Transverse Electric) 모드일 경우에는 1이고 TM(Transverse Magnetic) 모드일 경우에는 $(n_f/n_c)^2$ 이다⁹⁾.

II-2. 이온교환 채널도파로의 필드 분포

이온교환에 의한 확산형 채널도파로인 경우, WKB 분산관계식을 이용하여 파동방정식에서의 전계(E)에 대한 해를 근사적으로 구할 수 있다¹¹⁾. 확산형 도파로에 대한 깊이방향으로의 파동방정식은 식(3)에서와 같이 슈뢰딩거 방정식의 형태이다.

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

$$\varphi = k_0^2(n_f^2 - N_x^2), \quad U(x) = k_0^2(n_f^2 - n(x)^2)$$

이 식은 양자역학적인 해석과 비슷하며, 모드의 실효굴절율에 의존하는 φ 는 전위 $U(x)$ 에 구속되어 있는 전자의 에너지로 볼 수 있으므로 확산형 도파로의 모드는 전자에너지 준위에 해당하는 것으로 해석할 수 있다. 모드가 도파로에 구속될 조건은 $0 < \varphi < U(\infty)$ 이며 $U(\infty)$ 이상에서는 방사모드가 형성된다. 그리고 반환점은 $\varphi = U(x_i)$ 의 조건에서 만족되며, 전계는 반환점 이내의 영역에서 진동함수를 따르고 반환점 이상에서 지수 함수적으로 감소한다. 이러한 조건하에서 식(3)의 해를 채널도파로의 깊이방향과 폭방향으로 구하여 모드에 대한 전계분포를 구할 수 있다.

II-3. 결합 모드 방정식

인접한 두 채널도파로간에 광결합 현상이 일어날 경우, 단일방향성 광결합기(unidirectional optical coupler)에 대한 결합모드 방정식¹¹⁾은 다음과 같다.

$$\frac{dA(z)}{dz} = -j\kappa B(z) \exp[-j(\beta_2 - \beta_1)z] \quad (4)$$

$$\frac{dB(z)}{dz} = -j\kappa A(z) \exp[+j(\beta_2 - \beta_1)z] \quad (5)$$

여기서, $A(z)$ 와 $B(z)$ 는 광결합 현상이 발생할 경우 각각 채널도파로 1과 2에 광이 z 방향으로 진행함에 따라 변화하는 진폭의 세기를 의미하고 κ 는 결합계수(coupling coefficient)를 나타낸다. 식(4), 식(5)를 풀어 채널도파로 1과 2에서 z 방향으로 진행되는 광세기를 규격화된 형태로 표현하면 식(6), 식(7)과 같다.

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

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

$$F = \left(\frac{\kappa}{\beta_c} \right)^2 = \frac{1}{1 + (\Delta/\kappa)^2},$$

$$\Delta \equiv \frac{(\beta_2 - \beta_1)}{2}, \quad \beta_c \equiv \sqrt{\kappa^2 + \Delta^2}$$

여기서, β_1 과 β_2 는 각각 광결합기의 채널도파로 1과 채널도파로 2의 전파상수이다. 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. 결합계수와 결합길이는 다음과 같다.

$$\kappa_{12} = \frac{k_0^2 \int \int_{-\infty}^{\infty} n_2^2(x,y) \cdot E_1^*(x,y) \cdot E_2(x,y) dx dy}{2\beta_1} = \frac{\int \int_{-\infty}^{\infty} E_1^*(x,y) \cdot E_1(x,y) dx dy}{k_0^2 \int \int_{-\infty}^{\infty} n_1^2(x,y) \cdot E_2^*(x,y) \cdot E_1(x,y) dx dy}$$

$$\kappa_{21} = \frac{\int \int_{-\infty}^{\infty} E_2^*(x,y) \cdot E_2(x,y) dx dy}{2\beta_2}$$

여기서, $n_1(x,y)$ 와 $n_2(x,y)$ 는 각각 채널도파로 1과 2에 대한 굴절을 분포식이고 $E_1(x,y)$ 와 $E_2(x,y)$ 는 각각 채널도파로 1과 2에 대한 전계분포식이다. 그리고 밑 첨자 *는 공액 복소수를 의미한다. 이때, 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 식(6)으로부터 구하면 $z=L$ 에서 식(6)의 좌변은 0이 되고, $\Delta=0$ 일 때 $F=1$ 이므로 식(6)은 $\sin^{-1}(\beta_c L) = 1$ 이 되어 이것을 풀면 $\beta_c L = \pi/2$ 이다. 그러므로 결합계수는 식(10)과 같다.

$$L = \frac{\pi}{2\beta_c} \tag{10}$$

이 때, 두 인접한 채널도파로가 서로 동일한 조건을 만족한다면, $\Delta=0$ 이므로 다음 식(11)과 같이 간략화 된다.

$$L = \frac{\pi}{2\kappa} \tag{11}$$

위의 식(1)과 식(2)로부터 깊이방향과 폭방향에서의 단일모드에 대한 실효굴절을 구하고 결정된 실효굴절을 이용하여 깊이방향과 폭방향으로의 전계분포를 계산한다. 계산된 전계분포를 식(8)과 식(9)의 결합계수식에 대입하여 결합계수를 구하고

식(6)과 식(7)에 계산된 결합계수를 대입하여 상호작용길이(interaction length)에 따른 광세기 전달 비율을 이론적으로 고찰하여 1대1의 광세기 분할 비율을 갖는 광결합기를 모델링하였다.

III. 실험

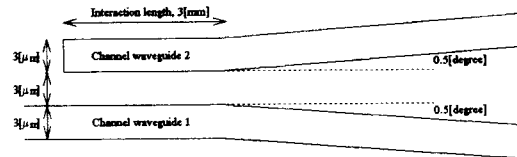
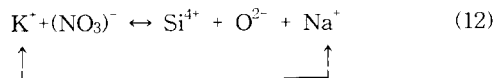


그림 2. 광결합기의 구조

Fig. 2. Structure of optical coupler.

그림 2는 위의 이론에 의하여 1대1의 광세기 분할을 할 수 있도록 모델링된 조건에 따라 제작된 광결합기의 구조를 보인다. 여기서, 상호작용길이는 3[mm]이며 He-Ne 레이저는 prism-coupling (prism : flint glass SF11) 방법¹²⁾에 의해 채널도파로 1에 입력된다. 이때 도파로내를 진행하는 광의 모드는 TE₀₀로서 단일모드를 여기서 키웠다. 광결합기 제작을 위한 공정도를 그림 3에 나타내었다. 먼저 soda-lime 유리 기판을 3단계 세척법으로 세척하였으며, 세척된 유리 기판위에 sputtering을 이용하여 약 0.1[μm]의 Al 박막을 증착하였다. 그리고 채널도파로와 광결합기의 패턴 제작을 위한 포토리소그라피를 위하여 증착된 Al 박막위에 positive형 포토레지스트를 스핀 코팅 하였다. 준비된 마스크(Cr mask, 선폭 : 3[μm])와 Maskaligner (UV source : QUINTEL co. : Power watt 140~150W)를 이용하여 시편의 패턴을 형성하였다. 이때 현상액으로는 Shiply 9912 MF-319를 사용하였고 PR을 에칭하기 위해서는 Shiply 9912 etcher를 사용하였다. 그리고 Al 박막을 선택 에칭하기 위하여 NaOH 0.03[wt%]의 수용액을 사용하였다. 마지막으로 K⁺ 이온교환공정(KNO₃ : 400[°C])을 이용하여 채널도파로와 광결합기를 제작하였다. 이때 K⁺ 이온교환에 대한 화학식을 표시하면 (12)와 같다. 그리고 제작된 시편에 대한 광세기 출력은 prism-coupling 방법을 이용하여 측정하였다.



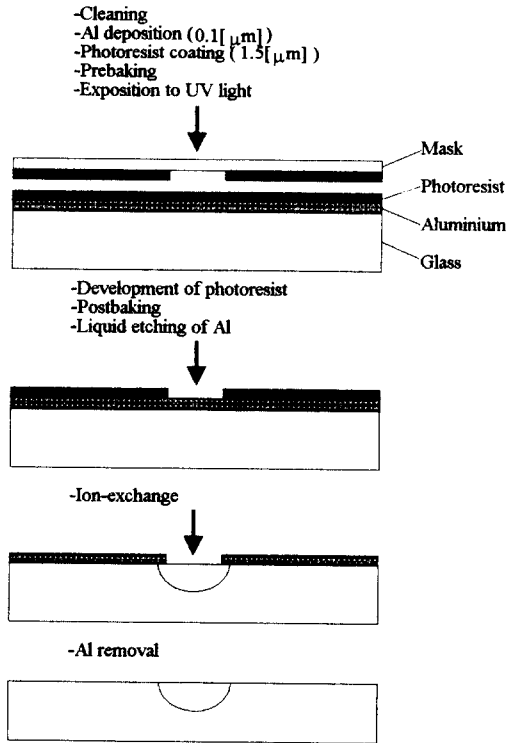


그림 3. 채널도파로 제작공정도
Fig. 3. Schematic fabrication process of channel waveguide.

표 1. Soda-lime 유리 기판에 대한 K⁺ 이온교환 파라미터

Table 1. K⁺ ion-exchange parameters of soda-lime glass substrate.

Soda-lime Glass Substrate		
Refractive Index of Glass (n_s)	$\lambda=0.6328$ [μm]	1.5125
Refractive Index Change for K ⁺ Ion-exchange (Δn)		0.009
Diffusion Coefficient for K ⁺ Ion-exchange	TE mode	0.0649 [$\mu\text{m}^2/\text{min.}$]
	TM mode	0.0637 [$\mu\text{m}^2/\text{min.}$]

IV. 결과 및 고찰

그림 4는 광결합기에서 채널도파로간의 간격이 증가함에 따른 대칭 모드와 비대칭 모드의 전파상수에 대한 계산된 결과를 나타낸 것이다. 이러한

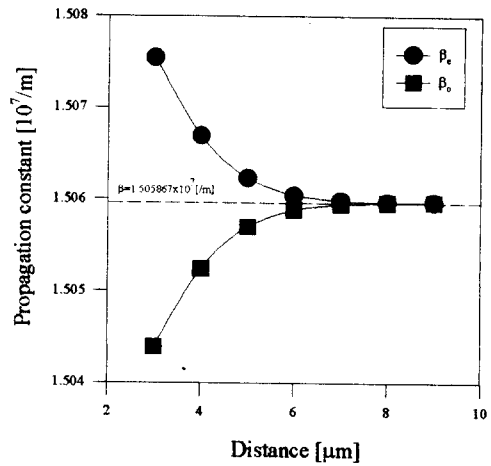


그림 4. 채널도파로 간격에 따른 대칭모드와 비대칭모드의 전파상수

Fig. 4. Propagation constants of symmetric and asymmetric mode with the distance between channel waveguides.

대칭모드와 비대칭모드는 광결합기에서 두 채널도파로간의 간격이 충분히 적을 때 여기되는 모드로서 이 두 모드가 서로 간섭을 일으키며 작용하여 광세기가 주기적으로 전달되게 된다. 그림 4에서 간격이 작을수록 전파상수간의 차가 크며 반면, 간격이 증가할수록 서로 독립적인 비결합상태의 채널도파로에 대한 전파상수에 수렴한다. 이것은 광결합기를 구성하는 두 채널도파로간의 간격이 어느정도 근접하여야만 대칭모드와 비대칭모드가 여기되어 광결합현상을 유발할 수 있음을 의미한다.

그림 5는 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. 이러한 결과는 그림 4에서와 같이 대칭모드와 비대칭모드의 상호작용에 기인한 것이라 해석할 수 있다.

그림 6은 광결합기에서 채널도파로 1과 채널도파로 2의 광진행 방향에 따른 광세기 전달 비율을 나타낸 것이고, 그림 7은 그 결과를 3차원 시뮬레이션한 것이다. 그림 6에서와 같이, 결합길이는 2.001[mm]이고 광이 진행함에 따라 서로 광세기 전달이 교번함을 알 수 있다. 실험에 사용된 시편에 대한 모델링 결과를 표 2에 나타내었다. 그리고 상호작용길이가 3[mm]인 광결합기의 단일모드에 대한

실험적인 광세기분할 모습과 시뮬레이션 모습의 비교를 그림 8에 나타내었으며, 그 결과를 표 3에 정리하였다.

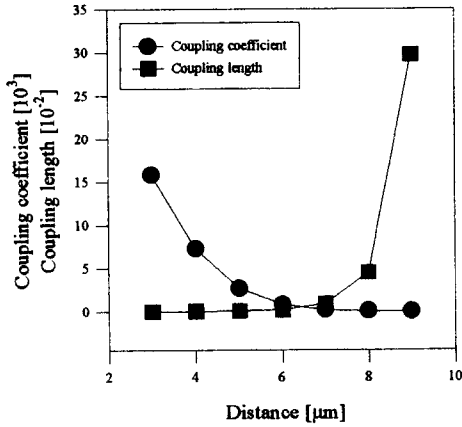


그림 5. 채널도파로 간격에 따른 결합계수와 결합 길이

Fig. 5. Coupling coefficient and length with the distance between channel waveguide.

표 2. 광결합기의 모델링 결과

Table 2. Modeling results of the optical coupler.

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_e	1.505946×10^7
	β_o	1.505789×10^7

V. 결 론

파장 0.6328[μm]에서 각 채널도파로의 선폭이 3 [μm]이고 채널도파로간의 간격이 6[μm]인 도파로형 광결합기의 경우, 최대 광세기 전달에 대한 결합계수와 결합길이는 이론적인 계산 결과로부터 각각

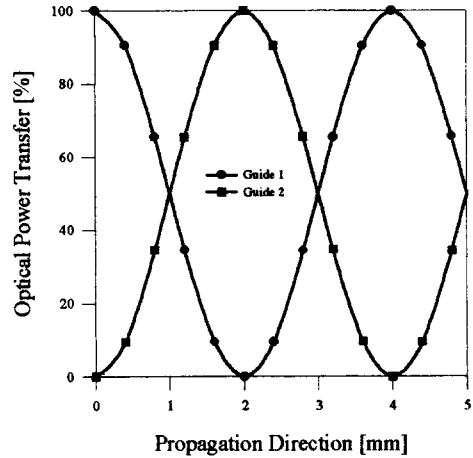


그림 6. 광결합기의 진행방향에 따른 광세기 전달 비율

Fig. 6. Optical power transfer ratio of optical coupler with the propagation direction.

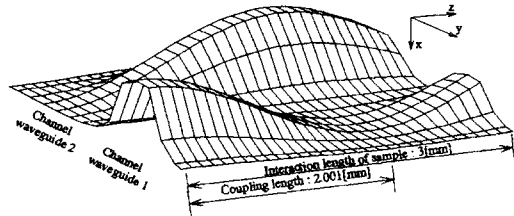


그림 7. 광결합기내의 광세기 전달에 대한 3차원 시뮬레이션

Fig. 7. 3-dimensional simulation of optical power transfer within optical coupler.

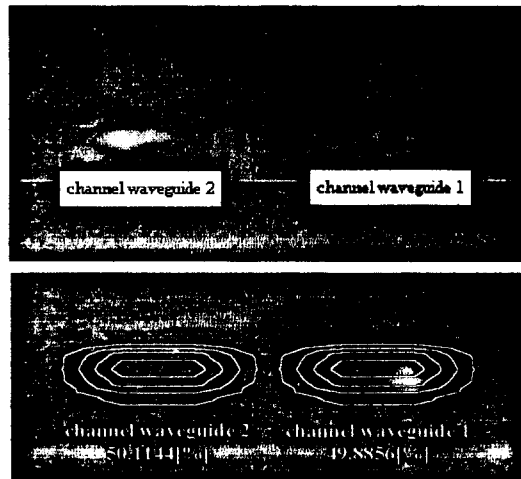


그림 8. 광결합기의 분할된 광세기

Fig. 8. Divided optical power of the optical coupler.

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.

표 3. 광결합기의 분할된 광세기

Table 3. Divided optical power of the optical coupler.

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

참 고 문 헌

1. H.Kogelnik, R.V.Schmidt, "Switched Directional Coupler with Alternating", 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. 정홍배, 박정일, 박태성, 천석표, "이온교환 채널 유리도파로의 도파광 분포 특성", 한국전기전자재료학회 논문지, Vol.8, No.3, 1995
8. S.P.Cheon, T.S.Park, H.B.Chung, "Low Loss Glass Waveguide Fabrication by Double-Ion-Exchange", J. of KIEEME, to be published, 1995
9. Ajoy Ghatak and K. Thyagarajan, OPTICAL ELECTRONICS, Cambridge University Press
10. 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
11. H.Nishihara, M.Haruna, T.Suhara, OPTICAL INTEGRATED CIRCUITS, McGraw-Hill Book Company
12. R.Ulrich and R.Torge, "Measurement of Thin Film Parameters with a Prism Coupler", Appl. Opt. Vol.12, No.12, 1973

저자소개



정홍배
1951년 1월 19일생. 1973년 연세대학교 공대 전기공학과 졸업. 1976년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1983년 미국 M.I.T. 객원교수. 현재 광운대학교 공대 전자재료공학과 교수. 본 학회 총무 이사.



천석표
1971년 9월 3일생. 1994년 광운대학교 전자재료공학과 졸업. 1996년 광운대학교 전자재료공학과 석사과정 졸업.



박태성
1964년 6월 19일생. 1987년 광운대 공대 전자재료공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전자재료공학과(석사). 1993년 11월-전자부품종합기술연구소 선임연구원. 1996년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학박). 1996년 현재 삼성종합기술연구원.