ES-93-10

방향성 결합을 위한 광도파로 굴절율의 최적화 해석

Optimum analysis of optical waveguide refractive index for directional coupling

전용우*	명지대학교 전자공학과
채기병	명지대학교 전자공학과
소대화	명지대학교 전자공학과
장지호**	금성 중앙 연구소

Yong - Woo Jeon*	MYONG JI UNIV.
Kee - Byung Chae	MYONG JI UNIV.
Dae - Wha Soh	MYONG JI UNIV.
Chi - Ho Chang**	GOLD STAR CENTRAL RESEARCH LAB.

ABSTRACT

In this paper, we performed theoretical simulation for directional coupler using BPM program. Simulation results showed that the optimum optical waveguide refractivee index between the guides were 3μm. Using the parameters of n_1=2.25, n_2=2.25, n_3=2.2, gap=3μm, W= 30μm, △z=0.1μm, λ=1.5μm, we decided other design parameters. When we applied 40[V] in the optimum condition of the directional coupling effect, we concluded the refractive index variation of 0.001.

Ⅰ. 서론

고속 광 신호전달 시스템의 응용은 반도체 레이저의 스펙트럼 순도와 중심주파수 안정도가 비교적 낮은 점과 시스템이 복잡하게 구성되어 있다는 점에서 많은 제한을 받고있으나 효율적인 주파수 대역 사용 기술 대신 고속화 및 광대역화로 기술 발전 방향이 전환되어 가고있다. 따라서,최근 집적광학에 의한 복합적인 광 신호처리 소자[1]에 대해 연구되고있다. 이와 아울러 반도체 레이저, 광변조기,광검파기의 개발이 많은 사람에 의해서 이루어지고 있으며 또한 계속 연구중에 있다.1960년대 레이저의 개발과 1970년대 광통신 시스템의 실용화에 따라 광신호 처리를위해 집적광학(integrated optic) 소자[2]의 필요성이 증대되었고, 현재는 광손실과 변조전압을 감소시키며 대역폭을 향상시키기 위한 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 병행하여 연구가 활발히 진행되고 있다. 광변조기는 광도파로의 형태에 따라서 단일광도파로(optical single waveguide), 가지형 도파로(branching waveguide),마하젠더 간섭계형(Mach-Zehnder interfero- ometer),방향성 결합기(directional-coupler),X-스위치(intersecting wave- guide) 등의 기본적인 몇가지 유형으로 분류된다.

따라서, 본 연구는 정교한 coherent 광변조를 위한 광변조기를 설계 및 제작하기 위하여, 전단계로서 광전송이론(Beam Propagation Method)에의한 프로그램을 이용하여, 단일 도파변조기와 X-스위치 변조기 및 방향성 결합기의 모델링[3] 및 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과를 바탕으로 실제적인 변조기 제작에 적용할수 있는 파라미터를 도파로 부분에대한 굴절율 변화와 입사광원의 진행에의한 결합현상의 최적화 조건을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 실험하였다.

II. 방향성 결합형 광변조기의 광전송 이론

여러개의 입·출력을 갖는 방향성 결합형 집적광 변조기의 기본적 소자중의 하나로 두개의 평행한 도파로 사이에서 발생하는 결합 현상을 고찰하기 위하여, 그림1과 같이 결합 광 도파로를 나타냈다. 여기서 방향성 결합기의 결합현상은 z=0인 입력부에서 한쪽 광도파로에 전송되는 광파워가 z축을 따라 진행하면서 다른쪽 광 도파로로 천이되는 현상이다. 이러한 천이현상은 평행한 두개의 광도파로 내에 존재할 수 있는 전파모드가 서로 중복되어 발생되는 것으로 방향성 결합(directional coupling)이라고 한다.[4]

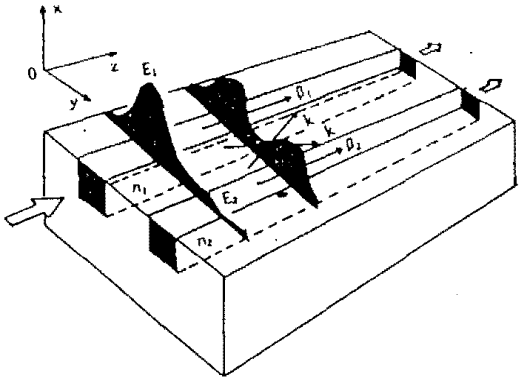


Fig.1. Model of coupling-optical waveguide

결합모드 방정식은 방향성결합기, 광 스위치, 광 변조기등과 같은 소자들을 해석하는데 유용하며, 널리 이용되므로 기하학적 변화에 의한 전파상수(β)의 변화와 도파로 사이의 전력이 상호 변화되어 결합 미분 방정식에 대한 이론적해석은 다음과 같은 두개의 결합 미분방정식으로 나타낼 수 있다.[6]

$$\frac{dE_1}{dz} = j\beta_1 E_1 + k_1 E_2 \qquad (2\text{-}1)$$

$$\frac{dE_2}{dz} = k_2 E_1 + j\beta_2 E_2 \qquad (2\text{-}2)$$

$$\beta_1 = \beta_1' - k_1,\ \beta_2 = \beta_2' + k_2 \qquad (2\text{-}3)$$

여기서 β_1' 와 β_2' 는 각 도파로의 전파상수이고 $k(k_1, k_2)$는 결합계수이다.

결합모드 이론은 미분 방정식의 해 이므로

$$E_1 = Ae^{\gamma z},\ E_2 = Ae^{\gamma z} \qquad (2\text{-}4)$$

여기서 평행한 두 광도파로 내에 존재하는 전파 모드의 위상부정합계수(phase-mismatch coefficient)를 δ라고 하면, (2-1)식과 (2-2)식에서 두 모드간의 중첩현상에 의한 결합계수 k가 결정된다. 식 (2-1),(2-2)식을 $E_1(n_1)=1$, $E_2(n_2)=0$의 조건에 대하여 구하고, 이를 다시 평행한 두 광도파 내에 존재하는 광파워를 $P(n_1) = W_1$, $P(n_2) = W_2$로 나타내면, 다음과 같이 성립된다.

$$P(n_1) = P_i \frac{k^2}{k^2+\delta^2} \sin^2[(k^2+\delta^2)^{1/2}] \qquad (2\text{-}5)$$

$$P(n_2) = P_i - P(n_1) \qquad (2\text{-}6)$$

여기서 P_i는 광도파로의 입력을 나타낸 것이다.

(2-5)식으로 부터 도파로 W_1에서 도파로 W_2로 전달되는 광 파워 관계는 δ=0 일때 도파로 W_1에서 도파로 W_2로 완전히 전달될 수 있는 광 파워로써

$$\frac{|P(n_1)|}{P_i} = \frac{k^2}{k^2+\delta^2} \qquad (2\text{-}7)$$

이된다.

일반적으로 이용되고 있는 결합모드 이론을 적용하면 전기적으로 스위칭될수있는 방향성 결합형 광 변조기를 구현할수 있다. $LiNbO_3$ 기판을 이용하여 평행한 두개의 광도파로를 그림 2와 같은 구조의 방향성 결합기로 나타낼 수 있다.

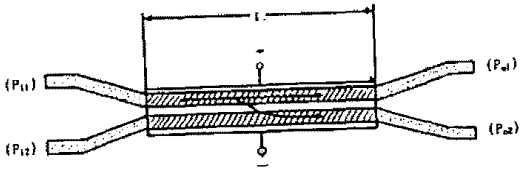


Fig.2. Basic structure of directional coupler

III. 시뮬레이션 결과 및 고찰

광 전송방식(BPM) 이론[5]을 이용하여, 방향성 결합기의 도파로 부분에 대한 굴절율 변화와 입사 광원의 진행을 확인 위하여 파장(λ)의 변화에 대한 결합 거리의 변화, 그리고 방향성 결합기의 양 도파로의 굴절율 차에 의한 결합기의 변화등에 대하여 고찰하였다. 먼저, 가장 기본적인 조건에서의 실험 결과로써, 파라메터 설정을 위한 비대칭인 도파로 1과 도파로 2의 굴절율 및 도파로 폭의 변수를 각각 도파로 1의 굴절율(n_1)은 2.25, 도파로 2의 굴절율(n_2)은 2.24, 기판의 굴절율(n_3)은 2.2, 도파로 사이의 gap = 0.5[㎛], 도파로 1의 폭(d_1)은 1.0[㎛], 도파로 2의 폭(d_2)은

1.5[㎛], 기판의 폭(w)은 20[㎛], 파장(λ)은 1.5[㎛], z방향의 overlap 상수(△z)는 0.1[㎛], 도파로의 길이(L)는 50[㎛]인 방향성 결합기와 또한 같은 조건에서 gap = 1.0[㎛] 인 경우의 결합현상을 고찰하였으며, 또한 제작과정 중 n_1과 n_2의 굴절율 차이에 따른 공정의 어려움을 감안하여 도파로 1과 도파로 2의 굴절율을 일치시켜, 대칭적으로 제작하기 위하여 동일조건에서 d_1 = 2.0[㎛], d_2 = 2.0[㎛], L = 200[㎛], gap = 2.0[㎛]로 실험하였다. 그리고 파장 λ = 1.0[㎛]에서 1.5㎛ 사이의 변화값에 따른 굴절율 n_1 = n_2 = 2.25, n_3 = 2.2, 도파로 폭 d_1 = d_2 = 1.0[㎛], 도파로 gap은 1.0[㎛], 그리고 기판의 폭은 20[㎛]에서 Δz = 0.1[㎛], 도파로 길이를 50[㎛]에 대한 실험 결과에서 1.5[㎛]의 결합현상을 확인하므로써 파장의 변화는 주어진 도파로 폭의 범위내에서 완전한 결합 모드를 볼수있는 결과로 보아 1.5[㎛]의 파장을 갖는 DFB(Distributed feedback laser)를 광원으로 사용할 수 있음이 시뮬레이션 결과로 부터 확인 되었다.[7]

또한 그림 3은 gap의 변화에 따른 실험 결과로서, gap을 1.0[㎛]로 했을때의 완전한 결합모드가 200[㎛]에서 나타난 결과와 gap을 2.0[㎛]로 했을경우 완전한 결합모드가 600[㎛]에서 나타난 결과, 그리고 3.0[㎛]로 함으로써 1000[㎛]에서 완전한 결합모드가 형성됨을 관찰하여, gap의 변화에 대한 결합길이의 실험 결과로 부터 도파로 사이의 gap의 크기가 증가함에 따라 방향성 결합이 이루어 지는 거리가 증가함을 알수 있다. 따라서 그림 3에 n_1=n_2=2.25, n_3=2.2, d_1=d_2=3.0[㎛], w=20[㎛,], λ = 1.5[㎛], Δz=0.1[㎛]일때 gap=3.0[㎛]인 결과를 나타냈다.

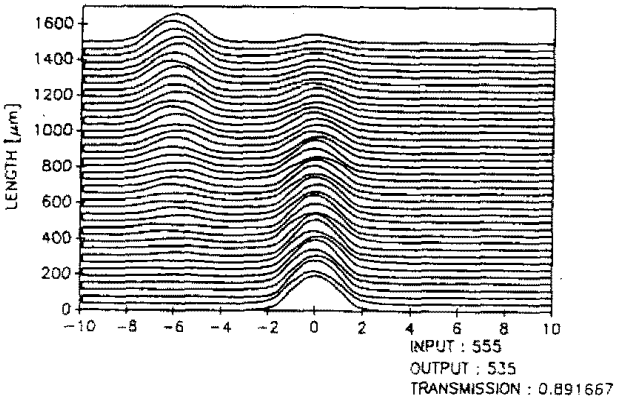
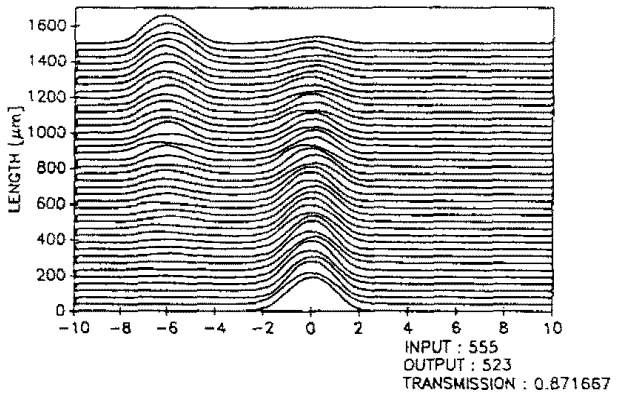
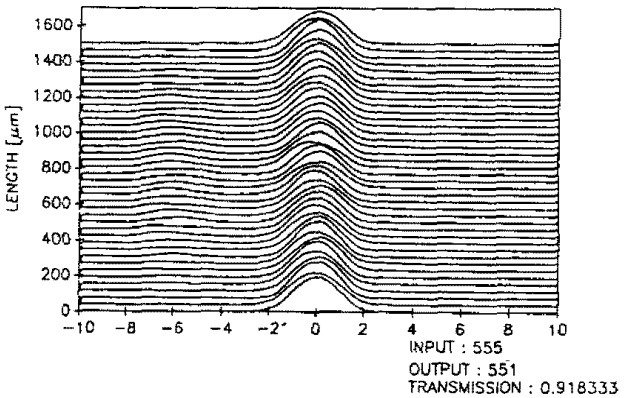


Fig.3 Simulation result of n_1=2.25, n_2=2.25, n_3=2.2, d_1=d_2=3.0[㎛], w=20[㎛], λ=1.5[㎛], Δz=0.1㎛ to gap=3.0[㎛]

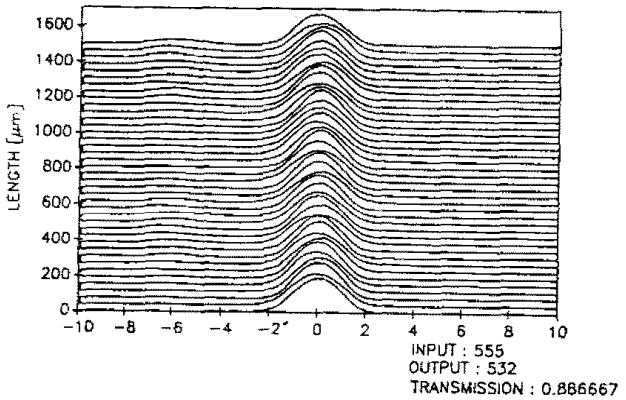
결과적으로, $LiNbO_3$ 기판에 방향성 결합기를 제작함에 있어서 실용상 제작기술 및 여러가지 조건에따라 규격화된 장비에서의 공정을 감안했을 경우 도파로 1과 도파로 2및 도파로 사이의 gap을 실제 제작의 어려움에 접근하여, 같은 크기로 가정했을 경우 지금까지의 시뮬레이션 결과에 따라 d_1 - d_2 = 3[㎛] 그리고 gap을 3[㎛]로 형성한 방향성 결합기를 제작 할 수 있도록 설계하였으며, d_1, d_2, gap을 3㎛로 하였을때 최적의 굴절율 변화를 알아보기 위하여 전압을 인가한 경우 방향성 결합현상을 고찰하였다. 따라서, 그림 4에서는 전압인가에 의한 굴절율 변화를 나타낸 그림(b)의 경우 40[v]에서 0.001의 굴절율 변화를 나타냄으로써 최적조건을 형성하였다.



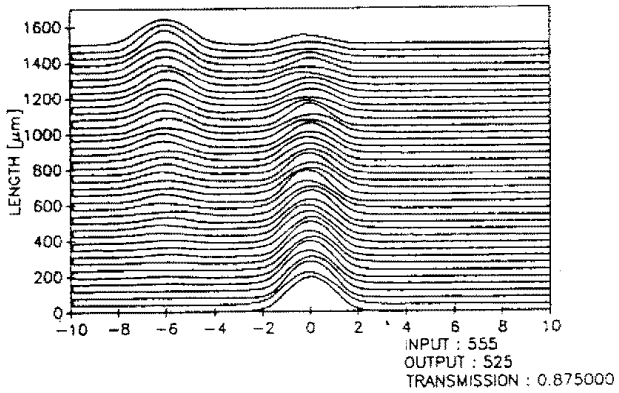
(a) aplied voltage of 35[v]



(b) aplied voltage of 40[v]



(c) aplied voltage of 60[v]



(d) aplied voltage of 80[v]

Fig.4. Simulation result as $n_1=n_2=2.25$, $n_3=2.2$, $d_1=d_2=3.0[\mu m]$, $w=30[\mu m]$, $\lambda=1.5[\mu m]$, $\Delta z=0.1[\mu m]$, $gap=3[\mu m]$, applied voltage of 35~80[V].

그림 5에서는 그림 4의 (b)에 대한 광파의 전송 등고선도 변화를 관찰하므로서, 결과적으로 본 실험에서 제작 할 수 있는 소자의 크기를 도파로 폭과 gap을 각각 3[μm]로 설계하여, 앞으로 광 cable과의 실용성을 고려하면 1.5μm의 DFB laser source를 가정했을 경우 의 최종 시뮬레이션 결과를 그림 3, 및 4와 같은 파라메터로 설계한다면 소자의 제작에 적용 할수 있을것으로 사료된다.

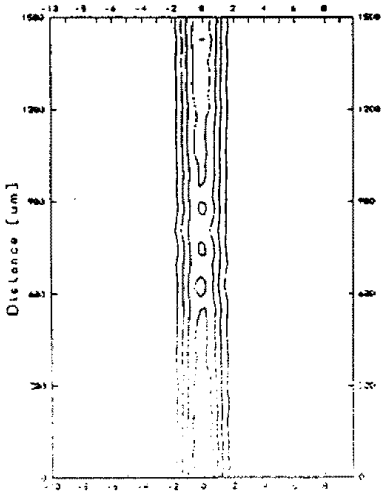


Fig.5. Optical transfer contour plot of $n_1=n_2=2.25$, $n_3=2.2$, $n_1=d_2=3.0[\mu m]$, $w=30[\mu m]$, $\lambda=1.5[\mu m]$, $\Delta z=0.1[\mu m]$, $gap=3[\mu m]$ at applied voltage of 40[v].

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 광 변조기의 모델 특성을 BPM으로 해석하여 방향성 결합현상을 광 도파로 굴절율의 최적화를 위한 중요변수와 실제 제작공정에 따른 개선 방안을 고려하여 실험한 시뮬레이션 결과와 광 변조기의 구조에 관한 특성을 고찰하여 아래의 결론을 얻을 수 있었다.

방향성 결합기의 각 파라 미터는 도파로 1의 굴절율(n_1) = 2.25, 도파로 2의 굴절율(n_2)=2.25, 기판의 굴절율 (n_3)=2.2, 도파로 사이의 gap=1[μm], 도파로 1의 폭(d_1)=1[μm], 도파로 2의 폭(d_2)=1[μm], 기판의 폭 (w)=20[μm], Laser 파장 (λ)=1.5[μm], Δz=0.1[μm]인 소자의 전체길이 50[μm]에서 λ=1.0~2.0[μm]의 변화와 gap의 변화를 1~3[μm]의 범위로 하여 실험하였다. 따라서 시뮬레이션 결과 파장(λ)=1.5[μm]와 gap=3[μm] 일때 90% 이상의 전송율을 나타내는 파라미터의 값으로 λ=1.5[μm]와 gap=3[μm] 인 방향성 결합기의 결합 모드를 설정하였다. 결과적으로, V=40[v] 일때 Δn=0.001의 굴절율 변화를 나타냄으로써 방향성 결합기에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 으로부터 방향성 결합현상이 이루어지는 경우 인가 전압에 의한 굴절율 변화의 최적화 조건을 형성하였다. 따라서 $LiNbO_3$기판을 이용하여 방향성결합 광변조기의 제작에 시뮬레이션 결과를 응용함으로써 공정과정을 더욱 효율적으로 실용화하고, 광변조기의 제작기술상의 오차를 최소화하는 균일한 도파로 형성등이 가능할것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] H.YASAKA, Y.YOSHIKUNI, Y.NAKANO, K.OE "Optical frequency stabilization and line width Reduction of a multielectro -de DFB laser with current feedback", reprient with permission from electi -on. lett. vol. 23, No. 21. pp.1161 - 1162 1987

[2] T.C KOCH, J.E. BOWERS , "Nature of wavelength clipping in directly Modula -tion Semiconductor laser" Electronics Letter Vol. 20, No 25/26 pp.1038-1039 1984

[3] G.MOTOSUGI, Y.YOSHIKUNI, Y.ITAYA "Spectral characteristics of a DFB laser under high - speed direct modulation." Electr -onics Lett, Vol. 20, No. 21 pp.849-850 1984

[4] HIROSHI, NISHIHARA, MASAMTISU MARUNA TOSHIAKI SUHARA "Optical Integrated Circ -uit pp.99-104, pp.218-219, 1985

[5] J.A FLECK .Jr. and M.D. FEIT "Beam propagation in uniaxial anisotropic -media". J. opt Soc Vol. 73. pp.920-926 1983

[6] 소대화, 강기성, 채기병, 장용웅 "BPM 알고리즘 을 이용한 $LiNbO_3$ 광스위치 전계분포와 굴절율 변화의 연구"한국전기 전자 재료학회 춘계발표회 논문집 pp.38-42 1991

[7] Chang Min Kim , R.V.Ramaswamy, "Modeling of grade-index channel wave -guides using Nonuniform Finite difference Method". J. Of Lightwave Technology, Vol.LT-7, NO 10. pp.1581-1589 , 1989