

論文2000-37SD-5-6

새로운 수직형 비대칭 광 결합 구조를 이용한 폴리머 열광학 변조기 구현

(Implementation of Polymeric Thermo-optic Modulator using a New Vertical Asymmetric Optical Coupler)

李素瑛*, 權裁煥*, 金光鐸*, 宋在元*

(So Young Lee, Jai Young Kwon, Kwang Taek Kim, and Jae Won Song)

요 약

제작 공정이 단순하고 결합길이가 매우 짧은 폴리머를 이용한 수직형 비대칭 광 결합기를 새로이 제안하고, 폴리머를 이용한 열광학 변조기를 제작하였다. 전산모의를 통하여 광통신 파장대인 $1.33\mu\text{m}$, TE모드에서 중간 버퍼층 두께 $t=0.4\mu\text{m}$ 이고, $n_u=1.522$, $n_l=1.51$ 이고 $nt=1.49$ 일 때, 결합길이가 $277\mu\text{m}$ 이며, 최고 94%의 결합 및 재결합 효율을 얻음으로써 비대칭 구조에서의 최적화를 도모하였다. 또한 반전된 릿도파로와 평면도파로를 상하부 수직형태로 갖는 광결합기를 제작하고 폴리머를 이용한 열광학 변조기를 구현하였다. 변조 특성은 구동전력 4.5mW , 소멸비 17dB, 변조대역 600Hz로 삽입손실은 4.5dB였다.

Abstract

We newly proposed a polymer based vertical asymmetric optical coupler, which was characterized by simple fabricating procedure and short coupling length. And we fabricated a thermo-optic modulator using the polymeric optical coupler. We optimized the proposed device by coupling characteristic analysis. In a TE polarized $1.33\mu\text{m}$ wavelength, we obtained very short coupling length ($L=277.6\mu\text{m}$) with $0.4\mu\text{m}$ thickness of middle layer, high coupling efficiency (94%), and asymmetric vertical waveguides with $n_u=1.522$, $n_l=1.51$. We implemented vertical asymmetric thermo-optic modulator with lower inverted rib waveguide and upper slab waveguide. In the 600Hz bandwidth and 4.5mW input power, the extinction ratio of the mode was 17dB with an insertion loss of 4.5dB.

I. 서 론

현재 폴리머를 이용한 집적광학 소자의 연구는 다양한 분야에서 광범위하게 진행되고 있으며,^[1] 특히 집적 광학 회로의 구성요소 중 광 결합기와 스위칭 소자는 완전 광 전송 시스템에 있어서 매우 중요한 위치에 있

다. 더우기 수직형의 구조를 갖는 광결합기가 새로이 제안되면서 결합길이를 줄여 전체 소자길이를 감소시키고, 도파로를 진행하는 동안 겪게되는 도파 손실을 최소화하려는 연구 또한 활발하다.^[2] 그러나 이들 수직형 광결합기는 결합효율을 높이기 위하여 대부분 상하부 도파로의 구조가 동일한 대칭형으로 제작됨에 따라 매우 까다롭고 복잡한 공정을 갖게된다. 이러한 공정의 복잡성과 두 도파로의 대칭성을 위한 반복작업은 실제 제작공정의 불완전함을 야기시킴으로서 이론상의 이상적 결합에 비하여 효율이나 성능의 저하를 가져오게 된다.^[3] 반도체 물질과 반도체의 제작기법을 그대로

* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(School of Electronic Electrical Eng., Kyung-pook Nat'l Univ.)

接受日字:1999年12月14日, 수정완료일:2000年4月4日

갖는 수직형 구조나^[4], 용융형 수직 결합기(Fused Vertical Coupler: FVC)^[5] 역시 두 도파로 사이의 정확한 간격을 유지시키고 재현하는 것이 제작 공정 중 가장 중요한 과정으로 작업상의 어려움을 갖고 있다.

수직형 결합기의 구조가 갖는 가장 큰 장점은 동 평면구조의 광 결합기가 갖는 두 도파로 사이의 간격이 마스크 제작시 공정상의 한계에 의해 제약을 받게되는 데에 비해, 수직형 결합기는 중간 결합층 즉 도파로 사이 비퍼층으로 사용되는 도파로 물질에 맞는 공정을 통하여 수직으로 쌓아가는 형식을 취할 수 있다는 것이다. 이렇게 중간 비퍼층의 두께 제어를 용이하게 할 수 있는 물질이 바로 폴리머 즉 유기 고분자 계열을 이용한 수직형 광 결합기이다.^{[6][7]} 그러나 지금까지 연구된 폴리머를 이용한 광 결합기 역시 대칭형 구조를 가지며 O₂ RIE 전식 식각법^{[8][9]}으로 제작된 광결합기가 그 예이다. 그러나 이 역시 두 도파로의 대칭성을 위한 반복적인 공정과 정확한 식각 조건 등이 요구되는 번거로운 제작과정을 포함하고 있다. 따라서 본 논문은 제작방법이 매우 간단하고, 중간 비퍼층 즉 결합층의 두께를 단지 스핀 코팅만으로 조절할 수 있는 폴리머를 이용한 비대칭 수직형 광결합기를 새로이 제안하고, 구조에 대한 특성을 분석하였다. 또한 이를 토대로 폴리머 열광학 변조기를 실제로 제작하고 특성을 측정하였다.^{[10][11]} 본 연구에서 제안한 비대칭성은 구조상에서의 비대칭성의 의미로 제작공정을 매우 단순화시키기 위한 새로운 기법이며, 전체 소자길이가 입 출력 도파로 길이를 합하여 1mm 미만 더 나아가 단면 절단 기술에 따라 수 백 μm 정도의 광 소자제작의 가능성을 보인 것으로 도파 길이가 줄어들어 따른 손실 감소효과와 더불어 대량 생산을 위한 저 손실, 고 집적화, 공정상의 단순화에 의한 신뢰성 확보라는 잇점을 갖게 될 것으로 기대된다.

II. 수직형 비대칭 광 결합기의 분석모델

지금까지 주로 연구되어온 폴리머 수직형 광결합기는 상하부 도파로 모두 주로 RIE 기법으로 채널 도파로를 형성함으로써 대칭적 구조를 이루어왔다. 이는 구조적인 대칭성이 갖는 결합의 효율 면에서는 매우 이상적인 형태이다. 그러나 실제소자의 제작에서 갖는 공정상의 한계 즉 정확한 식각율, 미세한 정렬과정, 반복되는 마스크 작업등은 오히려 소자의 성능을 저하시키

는 요인이 되었으며, 이는 결국 이론적 근거에 의한 소자설계 조차도 소자 성능에 대한 신뢰성을 뒷받침하는 근거가 되지 못하는 모순으로 이르게 되었다. 따라서 이러한 공정상의 오차를 줄이고 소자의 성능을 향상시키기 위한 연구의 하나로 현재 반도체 물질을 이용한 비대칭 수직형 광소자들의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 아직까지 폴리머를 이용한 비대칭구조는 연구된 바 없으며, 이를 이용한 광소자 역시 발표된 적이 없다. 그러므로 본 연구에서는 수직형 비대칭 광결합기를 새로이 제안하고 전산모의를 통하여 가능성을 검증하였다.

본 연구에서 제안한 폴리머를 이용한 비대칭 결합형 소자 그림1은 비대칭 도파로 구조를 갖는 수직형 광결합기의 단면도로서 단순화된 2차원 굴절률 분포를 고려한 단면도이다. 하부 도파로는 반전된 릿구조로 $w=7\mu\text{m}$, $d_l=2.5\mu\text{m}$ 이고 도파 물질은 굴절률을 다양하게 변화시켜 결합효율을 분석하고자 하였다.

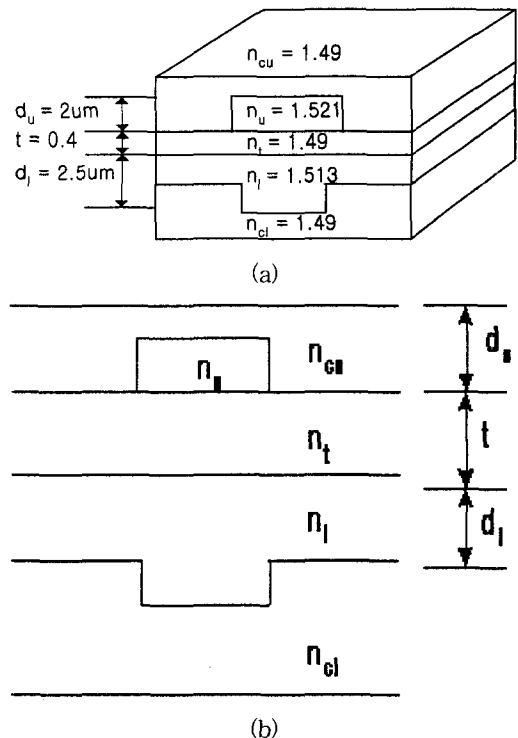


그림 1. 제안된 수직형 광 결합기의 도파로 구조
(a) 전체윤곽도 (b) 2차원 굴절률 분포를 고려한 단면도
Fig. 1. Proposed vertical optical coupler waveguide structure.
(a) Full Schematic view (b) Cut view of refractive index scheme.

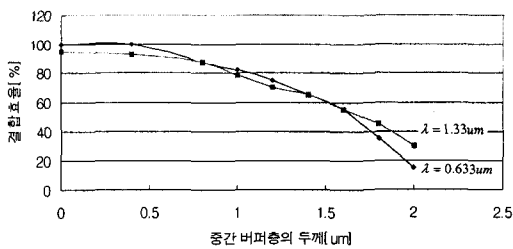
진체적으로 비대칭 구조를 갖는 광 결합기는 하부 도파로를 반전된 립도파로로 제작하고 중간 버퍼층으로 $n_t=1.49$ (PMMA: polymethyl-methacrylate)인 물질을 코팅한 후, 그 위에 다시 상부 도파로를 부분 코팅하여 평판 도파로를 제작하는 형태이다. 실제 반전된 도파로의 제작은 대부분 실리콘 기판이나 산화막을 식각하고 식각된 부분에 폴리머 도파물질을 코팅함으로써 이루어진다. 따라서 본 연구에서는 코팅속도(rpm)를 변화시켜 중간 버퍼층의 코팅두께를 $t=0\sim 2\mu\text{m}$ 까지 조절하여 이에 따른 결합정도를 예측하였다. 이는 중간 버퍼층 즉 결합층의 코팅두께에 따라 결합길이를 조정할 수 있으므로 원하는 파장대에서 높은 결합효율을 얻기 위해 단지 코팅속도의 정확한 제어가 요구 될 뿐이다. 물론 물질의 점도 역시 코팅 두께를 제어하는 요인이므로 이들을 잘 고려하여야 한다.^{[12][13]} 그림 2는 폴리머 계열의 일종인 PMMA($n=1.49$)를 중간 버퍼층으로 사

용하여 코팅된 두께에 따른 결합효율을 나타낸 것이며, 광원으로는 $1.33\mu\text{m}$, TE모드로 SEMI VECTORIAL FDM BPM으로 해석된 결과로부터 추출한 것이다.

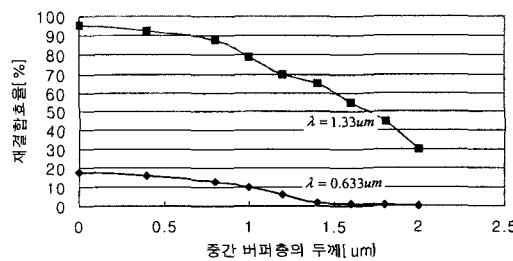
제안된 구조가 하부의 립 도파로와 부분적으로 존재하는 상부 평판 도파로로 구성되므로 하부로 진행하던 빛이 상부의 도파로와 만나 결합된 후 다시 하부 도파로로 재결합되는 소자로서 결합효율과 재결합효율을 각각 표현하였다. 이때 하부 도파로로 입력된 빛은 손실이 없다고 가정하였으며, 결합길이와 동일한 거리를 더 진행한 후의 결합효율이 궁극적으로 소멸비를 의미

하게되며 소멸비는 $\frac{P_u}{P_i}$ 로 정의하였다. 여기서 P_u, P_i 은 상 하부 도파로로 진행하는 도파광의 세기이며, 전산모의에 사용된 파장은 측정에 용이한 가시광선영역대인 $0.633\mu\text{m}$ 와 광통신용 파장대인 $1.33\mu\text{m}$ 로 동시에 두개의 파장에 따른 결합효율의 변화를 나타내었다. 여기서 $1.33\mu\text{m}$ 파장대와 가시광선 영역에서의 결합 및 재결합 효율이 서로 다른 것을 볼 수 있는데 특히 동일한 결합길이에서 가시광선 영역의 파장에 대하여는 재결합이 전혀 일어나지 않게 할 수 있다. 이는 동일한 소자를 사용하여 파장대만 달리하더라도 광 결합기와 스위칭소자 또는 수직형 변조기로 응용될 수 있음을 의미하는 것이다. 그리고 가시광선 영역에서 약 20%의 재결합효율을 갖게 되는 형태로 광소자를 제작하게 되면 변조도는 다소 떨어지더라도 관측이 용이한 파장대의 변조기로도 응용 가능하게 된다. 이때의 상 하부 도파로의 굴절률은 $n_u=1.521, n_l=1.513, d_u=2.5\mu\text{m}, d_l=2\mu\text{m}$ 로 하였다. 여기에 n_u 와 n_l 의 굴절률도 사용되는 폴리머의 물질에 따라 다양하게 변화시킬 수 있으므로 상 하부 도파로의 굴절률변화에 따른 결합효율의 변화도 예측이 가능하다. 이렇게 상 하부 도파로의 굴절률 변화에 따른 결합효율의 변화를 그림 3에 나타내었다. 여기서 횡축은 중간 버퍼층과 상부 도파로의 굴절률의 차이를 나타내는 것으로 상부 도파로와 중간 버퍼층의 물질과의 차이를 변화시킴으로써 하부 도파로와의 유효굴절률에 의한 위상정합조건이 점점 만족됨에 따라 결합효율이 커지게 됨을 보인 것이다.

여기서 상 하부 도파로의 굴절률차이를 0.012로 일정하게 하고 이들 도파로의 굴절률과 중간 버퍼층의 물질을 다르게 사용함으로써 중간 버퍼층과 상부 도파로를 $0\sim 0.03$ 까지 미세하게 변화시켜 이에 따른 결합정도를 보였으며, $1.33\mu\text{m}$ 의 파장을 사용하였다. 여기서 중간



(a)



(b)

그림 2. 중간 버퍼층 두께에 따른 결합 및 재결합 효율

- (a) 중간 버퍼층 두께에 따른 결합효율
- (b) 중간 버퍼층 두께에 따른 재결합효율

Fig. 2. Efficiency of the coupling and re-coupling by changing a middle buffer layer's thickness.

- (a) the coupling efficiency by changing a middle buffer's thickness
- (b) the re-coupling efficiency by changing a middle buffer's thickness

버퍼층과 도파로의 굴절률의 차이가 클수록 광결합이 더 잘 일어나는 것을 볼 수 있었다. 그러나 지나친 굴절률의 차이는 단지 하부 도파로에만 진행하는 빛을 강하게 국한시키게 됨으로 결합모드이론에 근거한 굴절률의 변화가 필요하다.^[14]

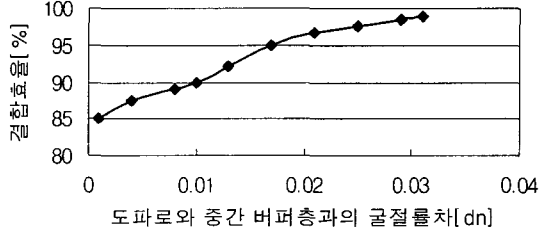


그림 3. 다양한 도파물질 선정에 따른 광 결합도
Fig. 3. Efficiency of optical coupling according to the versatile waveguide materials.

여기서 도파로 내를 진행하는 빛의 전계를 식1로 표현하고 두 모드간 결합을 위한 방정식을 식2로 나타내었다.^[15]

$$E(x, y, z) = A(z)\epsilon(x, y) \quad (1)$$

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = -j\beta_1 A_1(z) - jK_{12} A_2(z) \quad (2)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = -j\beta_2 A_2(z) - jK_{21} A_1(z)$$

이때 $A(z)$ 는 진행방향으로의 전계(longitudinal field)이고, $\epsilon(x, y)$ 는 횡방향(transverse field)의 전계성분이며, β_1, β_2 는 두 도파로의 전파상수, K_{12}, K_{21} 결합계수를 나타낸다. 여기서 방정식의 해를 구하기 위하여 경계조건($A_1(0) = 1$ and $A_2(0) = 0$)를 적용하면 다음과 같은 해를 구할 수 있다.

이렇게 구해진 해가 식 3이다.

$$A_1(z) = \left(\cos(bz) - j\frac{\Delta\beta}{2b} \sin(bz) \right) e^{-j(\beta_1 - \frac{\Delta\beta}{2})z} \quad (3)$$

$$A_2(z) = \left(-j\frac{K}{b} \sin(bz) \right) e^{-j(\beta_2 - \frac{\Delta\beta}{2})z}$$

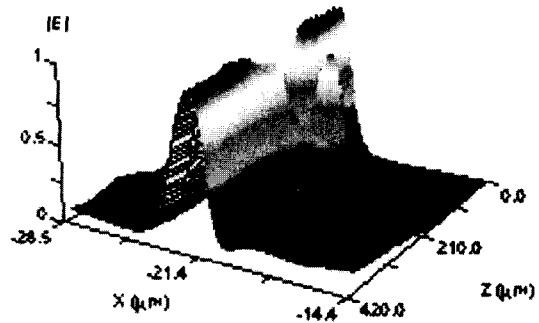
여기서 $b^2 = K^2 + (\frac{\Delta\beta}{2})^2$, $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ 이다. 또한 광세기의 결합에 의한 에너지전달은 $bL = \pi/2 + m\pi$ 일 때 일어나며, 최소결합조건은 $\Delta\beta = \frac{2}{L}\sqrt{\pi^2 - \chi^2 L^2} - (\beta_u - \beta_d)$ 이다.^[16] 따라서 비대칭성과 결합길이는 반비

례함을 알 수 있다. 또한 결합계수와 결합길이는 Marcatili의 결합계수 공식으로써 다음과 같이 표현되어진다.^[17]

$$K = \frac{-\pi}{2L} = 2 \frac{k_y^2}{k_z} \frac{\xi}{W} \frac{\exp(-t/\xi)}{1 + k_x^2 \xi^2} \quad (4)$$

여기서 k_y, k_z 는 y와 z 방향의 전파상수, ξ 는 y방향의 감쇄상수, t 는 도파로간의 간격으로 t 의 변화에 대한 결합계수 K 와의 관계를 나타낸 것이며, 결합길이와 결합계수는 반비례함을 의미한다. 여기서 $\Delta\beta$ 를 최소화시킴으로써 효율면에서 불이익을 갖지 않으면서 동시에 최적화된 결합길이를 찾아낼 수 있었으며, 이렇게 하여 최적의 결합상태를 가진 상태에서 도파로를 진행하는 빔의 전파과정을 그림 4에 나타내었다. 단 감쇄 성분 ξ 는 전산모의 과정에서는 없다고 가정하였다. 즉 상하부 도파로의 굴절률의 차이 $\Delta n = 0.001$ 정도가 되도록 하고, 버퍼층과 도파로의 굴절률차이는 0.02로 두어 중간 버퍼층의 두께 $t = 0.4\mu\text{m}$ 로 두었을 때로 결합길이가 $277.6\mu\text{m}$ 였다. 이러한 최적화된 빔의 전파과정을 상용화된 BeamProb 프로그램을 이용하여 표현하였다.

그림 4(a)는 광의 결합 및 재결합이 일어나는 과정을 3차원으로 도시한 것이며, 결합효율의 분포도를 그림 4(b)에 나타내었다. 하부로 진행하던 빛이 부분적으로 존재하는 도파로로 결합되어 다시 하부 도파로로 재결합되어 진행하는 것을 볼 수 있으며, 간단한 개략도와 광의 경로를 그림 5에 나타내었다.



(a)

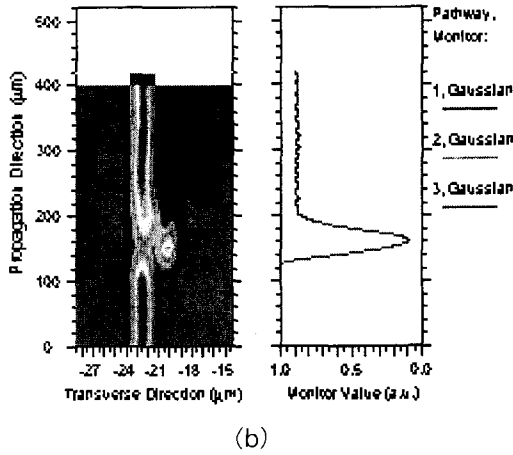


그림 4. 제안된 수직형 광결합기의 도파빔 패턴
 (a) 광 결합에 의한 도파빔의 전파과정
 (b) 부분적 상부 도파로와의 광 결합 및 재결합 경로와 결합효율 분포도
 Fig. 4. Proposed vertical optical coupler's propagating beam pattern,
 (a) beam propagation of optical coupling
 (b) Coupling and re-coupling efficiency profile of beam propagation.

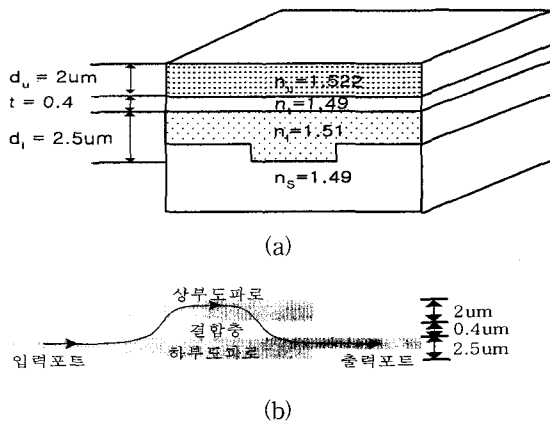


그림 5. 두 도파로간의 광결합 및 재결합의 진행경로
 Fig. 5. Propagation paths of optical coupling and re-coupling.

이러한 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 하부 도파로^[18]를 제외한 전 공정을 유기고분자 물질인 폴리머를 사용하여 스펀코팅의 간단한 공정만으로 제작이 가능한 물론 쉽게 코팅두께를 조절함으로써 파장에 따른 결합정도를 높일 수 있게 하였다. 또한 실제 광 스위치나 변조기로 사용하기 위하여 외부로부터 굴절률의 변화를 주었을 때의 결합효율의 변화를 역시 상용화된

프로그램을 이용하여 알아보았다. 폴리머의 열의 민감성을 이용한 열 광학효과에 의한 굴절률변화($\frac{\partial n}{\partial T} \Delta T$)에 따른 결합도를 나타낸 것이 그림 6이다.

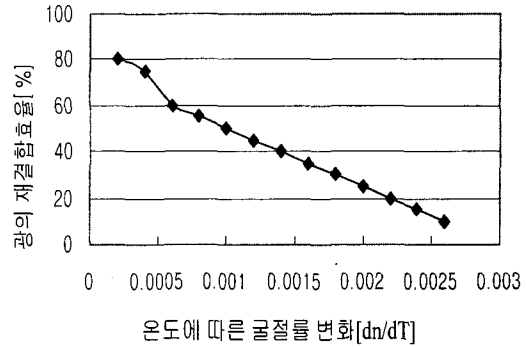


그림 6. 열광학효과에 의한 굴절률 변화에 따른 광의 재결합효율
 Fig. 6. Optical re-coupling efficiency of thermo-optic effect.

열 광학효과가 우수한 물질인 폴리머의 열광학계수가 약 $-1 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ^[19]정도이므로 온도조절에 의하여 완전한 광 결합세기의 광에너지 교환이 일어남을 알 수 있었다. 이는 도파로의 유효굴절률이 열 광학효과에 의하여 변화함으로써 재결합 효과가 다르게 나타남을 보여주는 것이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 열이 가해지는 초기상태에서는 열광학적 효과의 선형적 변화와는 달리 다소 비 선형적인 것을 알 수 있는데, 이는 폴리머가 열에 의하여 굴절률이 변화하는데 어느 정도의 이완상태까지 천이시간이 소요됨을 나타내는 것이다. 실제 열 광학 변조기의 속도가 느린 것 역시 여기에 기인하는 것으로 여겨진다. 지금까지 해석된 결과들은 모두 사용 파장 $1.33\mu\text{m}$ 에서 TE모드에 대하여 전산모의 된 결과이다. 그러나 본 논문에서 제안된 구조는 비대칭이며 특히 상부 도파로가 평면구조이므로 상 하부 도파로의 구조적 특성으로 인한 편광 의존성은 간과할 수 없게 된다.^[20] 따라서 적외선 영역인 $1.33\mu\text{m}$ 대하여 TE와 TM모드 각각에 대한 유효 굴절률을 빔 전파방법을 이용하여 전산모의 한 결과를 표 1과 같이 나타내었다. 이때 하부 도파로의 손실은 없는 것으로 가정하고 상부 도파로는 평면 도파로로 손실을 0.5dB로 가정하였다.

표 1. 수직형 비대칭 광결합기의 편광에 따른 유효굴절률 및 결합길이

Table 1. Refractive index and coupling length of vertical directional coupler according to polarization state.

파장 / 모드	1.33[μm]/TE	1.33[μm]/TM
	유효굴절률	유효굴절률
상부 평면 도파로	1.512349	1.51296
하부 도파로	1.5082	1.508099
두 도파로의 굴절률차(Δn)	0.004149	0.004861
전파 상수차($\Delta \beta$)	19600.7	22964.33
결합 길이[μm]	277.612	236.95

표 1에서 보는 바와 같이 편광에 따른 유효굴절률은 제안된 구조가 비대칭이라는 점과 상부의 도파로가 평면이라는 구조상의 이유로 다른 값을 가지지만, 상하부 도파로 사이의 효과적인 광 결합을 위해서는 두 도파로 사이의 위상차 즉 굴절률 차이가 가장 중요한 요소가 된다. 따라서 각 편광에 대한 두 도파로의 굴절률 차이는 결합효율에 다소간의 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러나 이러한 편광 의존성은 외부 섭동을 가하는 요인이 무엇인가에 따라 그 의존도가 커지기도 하고, 배제되기도 하므로 도파로나 상부 클래드의 폴리머의 물질 특성에 따라 결정된다고 보아도 무관할 것이다. 가령 전기-광학 폴리머에 수직으로 폴링 전계를 인가하여 폴리머내의 쌍극자 배열을 일정한 방향으로 정렬시키게 되면, 이에 따른 편광 의존도는 의존의 문제가 아닌 입사시의 편광을 미리 정렬된 폴리머의 전기 쌍극자의 방향과 맞추어 진행해야 한다.^{[21][22]} 그러나 열광학적 효과를 외부 섭동으로 이용할 경우는 거의 편광과 무관하게 되므로^[23] 이는 단순히 편광에 의한 굴절률 차이만큼의 외부 전력을 공급함으로써 편광의존도를 줄이게 된다. 따라서 상부 도파로가 평면 구조를 가짐에 따라 편광의존도가 큰 것이 다소 불리하기는 하나, 외부에서 가해주는 인가 에너지의 세기로 구조적인 비대칭성에 의한 편광 의존도를 낮출 수 있을 것으로 예상된다. 특히 제안된 비대칭 구조를 전기광학 폴리머를 이용한 변조기로 응용할 경우, 폴링 과정에서 이미 편광 의존성을 갖기 때문에 이때 여기되는 진행

광의 모드는 하나의 편광에 대해서만 고려되므로 구조적인 편광의존도에 의한 성능대비의 의미는 크게 중요하지 않을 것으로 생각된다.

III. 열광학 변조기의 제작 및 특성측정

본 논문에서는 제작공정을 간소화하기 위하여, RIE 전식식각 대신, 하부 도파로는 BHF(Buffered HF, HF-NH₄:HF=6:1)를 식각액으로 산화막을 습식 식각하고 NOA65(n=1.54, Norland Optical Adhesive 65)를 5000rpm으로 스핀 코팅하여 반전된 립도파로를 만들고, PMMA[poly(methyl methacrylate), n= 1.49]를 사이클로헥사논(cyclohexanone)용매에 무게비 8:2로 희석시킨 용액을 3500rpm의 회전 속도로 두께가 약 1.5 μm (α -step, TENCOR-200)인 중간 버퍼층을 코팅하였다. 그 위에 다시 NOA65를 코팅하고 부분적으로 UV(halogen lamp, 8mw/cm²) 경화를 15분 정도 행한 후 아세톤으로 경화되지 않은 부분을 제거하여 상부 평면 도파로를 형성하고 상부 버퍼층으로 AZ4562(n=1.59, clariant사)를 코팅한 후 금(Au)을 열증착하여, 저항이 20 Ω 인 열전극을 형성하였다. 그림 7은 제작된 광도파로의 SEM(Scanning electron microscopy)으로, 이때 하부 도파로의 폭은 8 μm , 깊이 2.5 μm 이고, 상부 평면 도파로는 두께가 약 2 μm , 상부 버퍼층의 두께가 1.5 μm 이다. 또한 end-fire coupling방법으로 도파모드를 관측하였으며, 관측된 근거리 도파모드 사진이 그림 8이다.

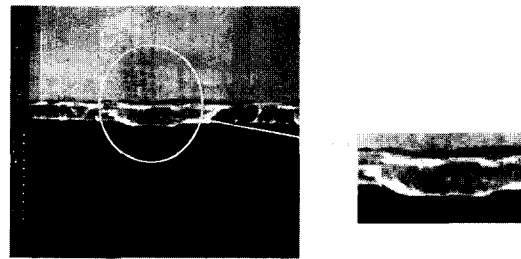


그림 7. 제작된 립도파로의 단면SEM 사진
Fig. 7. SEM photography of waveguide.

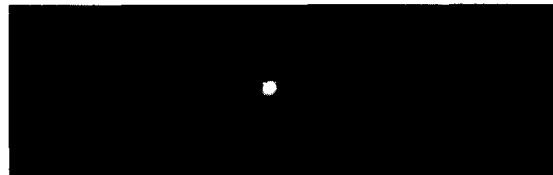


그림 8. 관측된 도파모드의 근거리 패턴
Fig. 8. Observed near-field mode pattern.

그림 8에서 립도파로 내의 중간 부분에서 빛이 강하게 국한되어 있는 것을 볼 수 있다. 도파 특성은 cleave-back방식을 사용하였으며, 0.6328 μ m광원에서 얻어진 도파로의 광 결합 손실은 약 3dB, 전파손실은 약 1.3dB/cm였다. 측정된 결과로 볼 때 다소 손실이 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 NOA65(표면거칠기:8~9Å)의 코팅면이 상용화된 일반 폴리머(PMMA의 표면거칠기: 2~3Å)에 비하여 매끄럽지 못한 것에 기인한 것으로 본다. 다음으로 제작된 전체소자의 개략도를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 상부 도파로가 하부 도파로와 수직결합이 되도록 임의의 위치에 부분적으로 형성시켜 미세한 정렬과정을 배제하였다.

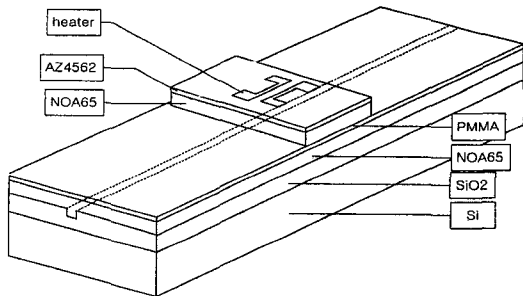


그림 9. 제작된 열광학 변조기의 전체 윤곽도
Fig. 9. Schematic view of thermo-optic modulator.

이렇게 완성된 변조기의 출력 특성을 측정하기 위한 장치사진을 그림 10에 나타내었으며, 사용파장 0.6328 μ m, 20mW출력의 He-Ne 레이저를 광원으로 이용하였다. 그림에서와 같이 광원과 광소자의 결합은 20배의 대물 렌즈를 이용한 butt 결합법을 취하였으며, 출력광은 광검출기와 오실로스코프를 연결하여 관측하였다.

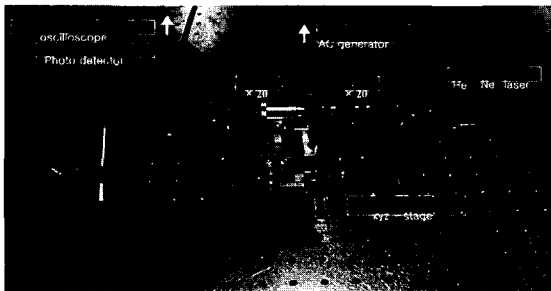


그림 10. 변조특성 측정을 위한 장치 사진
Fig. 10. Photography of setup to measure modulation characteristic.

그림 11은 인가된 DC 전력에 따른 광의 세기 변화를 측정된 것으로 인가전력 약 4.5mW에서 소멸비 17dB를

얻었다. 이때 인가 전력의 한계가 9mW로서 그 이상의 전력을 인가하지 못하였는데, 이는 전극의 열 저항이 20 Ω 으로 높은 인가 전력에 견디지 못하였기 때문이다.

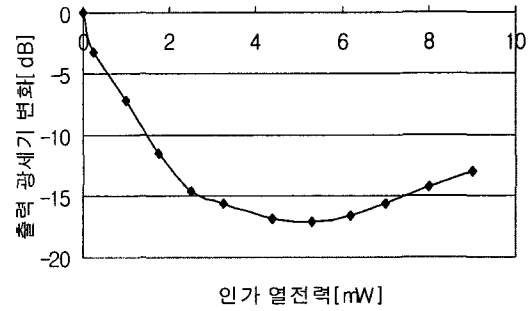


그림 11. 인가 전력에 따른 광 출력의 변화
Fig. 11. Relationship between the applied power and optical intensity.

그림 12는 교류 신호를 인가하였을 때의 변조특성을 측정된 것으로 상측 파형은 인가신호를, 하측 파형은 출력신호를 각각 나타내었다.

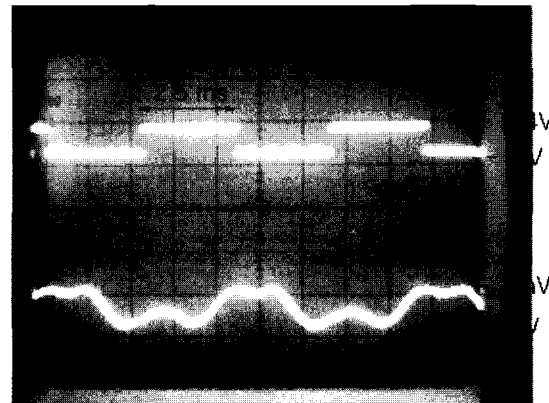


그림 12. 200Hz 펄스 파형인가에 따른 변조된 광 출력 파형
Fig. 12. Modulation characteristic for applied square-wave pulsed voltage with 200Hz.

그림 12의 상측 파형은 주기가 5ms인 0.4V전압의 크기를 갖는 펄스파를, 하측 파형은 천이시간이 약 1.25ms를 갖는 전압크기가 4mV인 출력 신호를 보여주고 있다. 또한 변조대역폭은 600Hz였다. 또한 신호원의 off set 전압을 인가하여 동작점을 이동시켜 주파수 중배 현상을 관측하였으며, 이를 그림 13에 나타내었다.

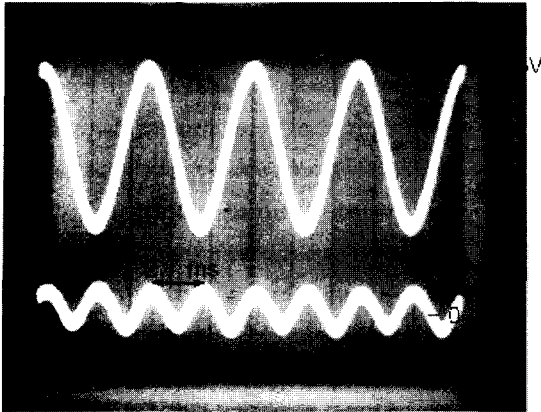


그림 13. 정현파 인가에 대한 증배된 광출력 파형
Fig. 13. The frequency doubling characteristic for applied sinusoidal wave.

IV. 결론 및 고찰

제작 공정 상 기법이 매우 간소화되고, 결합길이와 짧은 수직형 비대칭 폴리머 광 결합기를 새로이 제안하고, 광 결합의 중요 요소인 중간 버퍼층의 두께 변화와 구조상의 비대칭성에 따른 결합효율을 분석하였다. 즉 제안된 구조로 $1.33\mu\text{m}$, TE모드를 입력파장으로 하여 중간 버퍼층 두께 $t=0.4\mu\text{m}$ 이고, $n_u=1.521$, $n_l=1.51$ 이고 $n_t=1.49$ 일 때 결합길이 $277.612\mu\text{m}$, 결합 및 재결합 효율 94%인 수직형 비대칭 광 결합기를 얻음으로써 특성분석에 의한 최적화를 이루었다. 여기서 우리는 광통신영역의 사용파장 중 전송손실이 적은 장파장 대역에서 더 효과적인 결합이 일어남을 알 수 있었으며, 열 광학에 의한 외부 변조의 가능성도 보였다. 이는 향후 열 광학뿐 아니라, 전기광학이나 음향 광학성질을 갖는 폴리머 물질을 사용함으로써 응용의 폭을 훨씬 넓일 수 있을 것으로 예상된다. 또한 제안된 구조를 이용하여 전체 소자길이 7mm, 구동전력 4.5mW, 소멸비 17dB, 삽입 손실 4.3dB이며, 변조대역폭이 600Hz인 폴리머를 이용한 열광학 변조기를 직접 구현하고 변조특성을 관측하였다. 따라서 본 연구는 기존의 동 평면 구조에서 필요한 사용 파장에 따른 별도의 마스크 제작 공정이 제거되고, 마스크 공정의 한계와 상관없이 짧은 결합길이를 가질 수 있는 수직형 비대칭 광결합기를 제안하고 광 결합형 변조기를 제작함으로써 대칭형의 수직구조에 비해 제작 공정이 매우 단순하고, 결합길이를 코팅두께에 따라 자유로이 조절 할 수 있는 능동형 광소자를

구현하였다. 이는 향후 폴리머를 이용한 집적광학소자의 양산화에 있어서 저 손실, 고집적화는 물론 소자의 성능 면에서의 신뢰성 확보에도 도움이 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Lawrence A. Hornak, "Polymers for Lightwave and Integrated Optics", Marcel Dekker Inc., pp. 385-386, 1992.
- [2] A. Bandyopadhyay and P. K. Basu "Low-Voltage Vertical Directional Coupler Switch with suppressed Electroabsorption", IEEE Journal of Quantum Electronics. vol. 32, No. 6, pp.1048, 1996.
- [3] A Chen, V. Chuyanov, F. I. Marti-Carvera, S. Gamer, W. H. Steier, S. S.H.Mao, Y. Ra and L. R. Dalton, "Fast trimming of electro-optic polymer waveguide Y-branches by post-Photobleaching for tuning the power splitting ratio," Proc. SPIE, vol.3147, pp.268-274,1997.
- [4] J. E. Zuker, K.L.Jones, M.G.Young, B.I.Miller, and U.Koren, "Compact directional coupler switches using quantum-well electro-refraction," Appl. Phys. Lett., vol. 55, pp.2280-2282, 1989.
- [5] B. Liu, A. Shakouri, P. Abraham, B. G. Kim, A. W. Jackson, and J. E. Bowers, "Fused vertical couplers," Appl. Phys. Lett., vol. 66, pp.3410-2638, 1998.
- [6] Toshio Watanabe, Makoto Hikita, Michiyuki Amano, Yoshito Shuto and Satoru Tomaru "Vertically stacked coupler and serially grafted waveguide: Hybrid waveguide structures formed using an electro-optic polymer" J. Appl. Phys. Vol. 83, No. 2, 15 pp.639-649, 1998.
- [7] M. Hikita, Y. Shuto, M. Amano, R. Yeshimura, S. Tomaru, and J. Kozawaguchi, "Optical intensity modulation in a vertically stacked coupler incorporation EO polymer", Appl. Phys. Lett., vol. 63, pp.1161-1162, 1993.

- [8] 홍순광, "실리콘 기판상에 RIE와 산화작용을 적용한 폴리머 광변조기," 경북대학교석사학위논문, pp. 7-8, 1998
- [9] A. Chen, F. I. Marti-Carrera, S. Garner, V. Chuyanov, and W. H. Steier "fabrication of vertical tapers in polymer thin films by oxygen reactive ion etching with a shadow mask for photonic device applications," in Organic Thin Films for Photonics Applications, OSA Tech. Dig. Ser., 1997, vol. 14, pp 152-154.
- [10] Soyoun Lee, Jaiyoung Kwon, Kwangtack Kim, and Jae-Won Song, "Simple asymmetric vertical thermo-optic modulator," Opto Northwest SPIE's Reginal Meeting on Optoelectronics, Photonics, and Imaging, Conference RM04 Paper 07
- [11] 권재영, 이소영, 김광택, 송재원, "수직형 비대칭 구조를 갖는 열광학 방향성 결합기형 변조기," IV4/ Photonics Conference'99 pp 341-342
- [12] 박원규, "레이저 리소그래피를 이용한 역 $\Delta\beta$ 방향성 결합기의 설계 및 제작" 경북대학교 석사 학위 논문
- [13] 박 이순, "Fine line lithography를 위한 Polymer Resist연구", 서울대학교, 반도체부 연구보고서, 1990
- [14] H. A. Haus, W. P. Huang, S. Kawakami and N. A. Whitaker, "Coupled-Mode theory of Optical Waveguides", IEEE J. of Lightwave Tech. vol. LT-5, No.1, pp.16-23, 1987.
- [15] K. Tada and K. Hirose, "A new light modulator using perturbation of synchronism between two coupled guides," Appl.Phys.Lett., vol.25, pp.561-562, 1974.
- [16] D. Marcuse, " Directional Couplers Made of Nonidentical Asymmetric Slabs. Part II: Grating-Assisted Couplers," IEEE J. of Lightwave Tech. vol. LT-5, NO. 2, pp. 268-273, 1987.
- [17] Marcatili, E. A. J, "Dielectric Rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics," Bell syst. Tech. J., vol. 48, pp.2071-2102, 1969.
- [18] 송재원, 폴리머 도파로형 광 결합기 및 광 변조기 개발, 경북대학교 테크노파크-삼성전자 공동연구, 3차년도 보고서, 1999
- [19] Toshio Watanabe, Naoki Ooba, Yasuhiro Hida, Shoichi Hayashida, Takashi Kurihara and Saburo Imanura, "Digital Thermo-optic Switch Formed Using Silicon Resin Waveguides", Jpn. J. Appl. Phys, vol. 36, 1997, pp.1672-1671.
- [20] N. Anwar, C. Themistos, B. M. A. Rahman and Kenneth T. V. Grattan, "Design considerations for an electro-optic directional coupler modulator," J. of Lightwave Tech., vol. 17, pp.598-605, 1999.
- [21] S.Herminghaus, Barton A. Smith and J. V. Swalen, " Electro-optic coefficients in electric field poled waveguides," J. Opt. Soc. Am. B. Vol. 8, 1991, pp.2311-2317.
- [22] 김광택, 이소영, 이남권, 송재원, 박이순, 금창대, "측쇄결합 폴리머 필름의 전기광학 특성 측정", 한국광학회지, vol.9, no.4, pp. 215-220. 1998
- [23] M. B. J. Diemer, J. J. Brons, and E. S. Trommel, "Polymer Optical Waveguide Switch Using the thermo-optic effect," IEEE J. Lightwave Tech., vol. 7, no.3, pp.449-543, 1989.

저 자 소 개



李素瑛(正會員)

경북대학교 전자공과(학사). 1992년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(석사). 1996년 3월~현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정



權栽煥(正會員)

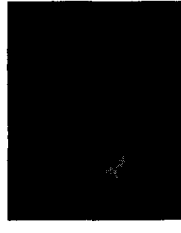
1998년 2월 경북대학교 전자공학과(학사). 2000년 2월 경북대학교 전자공학과(석사). 2000년 3월~현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정



金光鐸(正會員)

1989년 2월 경북대학교 전자공학과(학사). 1991년 2월 경북대학교 전자공학과(석사). 1991년 3월~1995년 12월 포항기속기 연구소 근무. 2000년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(박사). 2000년 3월~현재

호남대학교 전자전기컴퓨터 공학부 전임강사



宋在元(正會員)

1980년 2월 경북대학교 전자공학과(학사). 1982년 2월 한국과학기술원 전기전자공학과(석사). 1986년 8월 한국과학기술원 전기전자공학과(박사). 1986년 9월~현재 경북대학교

전자전기공학부 교수