

論文97-34D-4-12

# 최적의 모드 결합을 얻기 위해 수정된 결합 영역을 갖는 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 해석

## (Analysis of Electro-Optic Polymer Digital Optical Switch with a Coupling Region Modified for Optimum Mode Coupling)

李 相 信 \* , 申 相 永 \*

(Sang-Shin Lee and Sang-Yung Shin)

### 요 약

본 논문에서는 최적의 결합을 얻기 위하여 수정된 결합 영역을 갖는 전기광학 폴리머 디지털 광스위치를 제안하고 해석하였다. 수치해석을 위하여 유한차분법 빔진과 방법과 유효굴절률 방법을 이용하였다. 수정된 결합 영역은 두 광도파로의 분기점에서부터 광파의 진행 방향을 따라 점진적으로 도입되었다. 분기형 도파로에서의 모드 결합을 최적화 할 수 있도록 수정된 결합 영역의 구조와 굴절률 분포를 설계하였다. 계산 결과에 의하면, 소자의 길이가 고정되어 있는 상태에서 구동 전압은 약 30% 이상 감소되었으며 누화는 8 dB 이상 개선되었다.

### Abstract

An electro-optic polymer digital optical switch with a coupling region modified for optimum mode coupling is proposed, and it is analyzed by using the beam propagation method combined with the effective index method. Its modified coupling region is adiabatically introduced along the propagation direction from the branching point of the two waveguides. The structure of the modified coupling region and its refractive index profiles are designed to optimize the mode coupling in the Y-branch waveguide. Therefore, the switching performance of the device may be enhanced with a fixed device length. It is confirmed from the numerical calculation that the drive voltage is reduced by more than 30 percents and the crosstalk is improved by about 8 dB.

### I. 서 론

디지털 광스위치는 광통신 시스템이나 네트워크 등에서 도파로형(guided-wave) 스위칭 소자로 이용할 목적으로 많은 연구가 되어 왔다. 이 스위치의 장점은 광의 파장에 무관하게 동작하고 인가전압에 대하여 주기적이 아닌 디지털 특성을 가지며 제작공정의 영향을

적게 받는다는 것이다. 지금까지는 주로 리튬나이오베이트(LiNbO<sub>3</sub>) 결정<sup>[1]</sup>이나 반도체<sup>[2]</sup> 등의 무기물(inorganic) 재료나 열광학 폴리머(thermo-optic polymer)<sup>[3]</sup> 등의 유기물(organic) 재료 등을 이용하여 구현되었다. 최근에는 전기광학 폴리머(electro-optic polymer)를 이용한 도파로형 집적광학소자에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다<sup>[4]</sup>. 이러한 소자는 스피ن 코팅된 다층구조의 도파로로 이루어져 있으며, 저렴한 가격으로 손쉽게 제작할 수 있다. 또한, 실리콘(Si)이나 갈륨비소(GaAs) 등의 다양한 기판을 사용할 수 있기 때문에 다른 집적전자회로나 광소자와의 결합이

\* 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科  
(Dept. of Electrical Engineering, Korea Advanced  
Institute of Science and Technology)

接受日字:1997年1月15日, 수정완료일:1997年4月4日

용이하다. 더욱이, 마이크로파와 광파 간의 속도 부정합이 작고 유전상수(dielectric constant)도 작기 때문에 고속 동작에 유리하며, 또한 광섬유와의 결합시 굴절률 차이로 인한 반사 손실(Fresnel reflection loss)이 매우 작다. 위에서 언급한 장점에 근거하여, 본 논문의 저자 등은 광표백 방법을 이용한 전기광학 폴리머 디지털 광스위치를 제작하였다<sup>[5]</sup>.

근본적으로, 모드진화 현상(modal evolution effect)<sup>[6]</sup>을 이용한 디지털 광스위치는 방향성결합 광스위치와 같은 간섭 현상을 이용하는 소자에 비해 구동 전압이 크다고 알려져 있다<sup>[7]</sup>. 이러한 높은 구동 전압을 줄이기 위하여 여러 가지 방법이 연구되어 왔다.

이들 중에는 가중치가 적용된 결합(weighted coupling)을 얻기 위해 서로 다른 두 개의 분기각(branch angle)을 갖는 선형 분기<sup>[2]</sup>, 약한 구속력(weak confinement)을 갖는 선형 분기<sup>[8]</sup>, 비선형 분기(shaped branch)<sup>[9]</sup> 등이 있다.

선형 분기는 마스크 설계가 간단하기 때문에 곡선 분기에 비하여 유리하다. 또한, 선형 분기는 단조적으로 변하는 디지털 특성을 나타내는 반면에, 곡선 분기는 일정한 인가 전압 이상에서는 스위칭 특성이 다시 나타나는 문제점이 있다. 선형 분기를 이용한 디지털 광스위치의 경우<sup>[8]</sup>, 분기 영역의 근처에 약한 구속력을 갖는 도파로를 도입하여 소자의 성능을 향상시키고자 하였다.

이는 결합모드이론(coupled mode theory)에 의하면 두 도파로 간의 횡방향 결합 세기가 약해질수록 구동 전압이 감소한다는 사실에 기인한다. (즉, 이 결합 세기는 두 도파로 사이의 클래딩 영역에서의 감쇄상수( $\gamma_3$ )에 지수함수적으로 감소하고 ( $e^{-\gamma_3}$ ), 이때 구동 전압은  $1/\gamma^3$ 에 비례하여 증가하거나 감소한다.) 그러나, 이러한 방법은 실제 제작하기가 복잡하고 어렵다.

본 논문에서는 최적의 모드 결합을 얻기 위하여 수정된 결합 영역을 갖는 전기광학 폴리머 디지털 광스위치를 설계하고 해석하였다. 이 수정된 결합 영역은 두 광도파로의 분기점에서부터 광파의 진행 방향을 따라 점진적으로 도입되었다. 분기 영역에서 두 도파로 간의 모드 결합을 최적화 할 수 있도록 수정된 결합 영역의 구조와 굴절률 분포를 설계함으로써, 소자의 길이가 고정되어 있는 상태에서도 구동 전압과 누락을 줄일 수 있을 것이다.

## II. 소자의 동작 원리 및 수정된 결합 영역의 설계

본 논문에서 제안한 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 구조가 그림 1에 도시되어 있다. 이 소자는 결합 영역의 일부만이 수정된 선형 Y 분기 광도파로와 스위치용 전극으로 이루어져 있다. 도파로의 폭  $w$ 는  $6 \mu\text{m}$ 이고, 분기각  $\theta_B$ 는  $0.06^\circ$ 이다. 또한, 전극이 끝나는 지점에서 두 도파로 사이의 거리  $G_1$ 은  $22 \mu\text{m}$ 이고, 출력 단에서의 두 도파로 사이의 거리  $G_2$ 는 모드분포 간의 충분한 거리를 유지하기 위해서  $28 \mu\text{m}$ 로 하였다. 이때, 본 논문에서 고려하는 도파로의 도파모드 크기 ( $1/e^2$ )는 약  $10 \mu\text{m}$ 로 두 도파로간의 간섭은 무시할 만큼 작다. 기본적으로 디지털 광스위치의 동작원리는 모드진화현상에 근거한다. 모드진화란 광의 진행 방향을 따라서 구조가 변하는 분기 광도파로에서 각 지점에서 국부정규모드(local normal mode)가 겪는 모양의 변화를 의미한다. 이 모드진화의 정도는 인가 전압에는 비례하고 분기각에는 반비례 한다. 전계가 인가되지 않았을 때에는 입력 광파워가 두 출력 포트에 균등하게 나뉘어진다. 전계가 인가되면 전기광학효과를 통하여 분기의 두 팔(arm)에 양(positive)과 음(negative)의 굴절률 변화가 생기게 되므로 광파워는 굴절률이 증가된 팔로 스위칭 된다.

수정된 결합 영역을 설계하고 그것을 갖는 디지털 광스위치의 특성을 해석하기 위하여 유효굴절률 방법(effective index method)과 유한차분법 빔전파 방법(finite difference beam propagation method: FD-BPM)을 도입하였다<sup>[10]</sup>. 계산을 위해 사용된 파라미터의 값은 다음과 같다. 횡방향 샘플링 수는 512이고, 횡방향 계산 윈도우(transverse computing window)는  $100 \mu\text{m}$ 이다. 진행 방향의 전파 스텝(propagation step)은  $1.0 \mu\text{m}$ 이고, 기판의 유효 굴절률은  $1.55 \mu\text{m}$  파장대에서 1.53으로 가정하였다. 먼저, 입력 광도파로에 자신의 도파모드로 여기 시키고, 출력 포트의 광파워는 출력 광의 전계와 도파모드와 상관(cross-correlation) 시켜서 구하였다. 결합모드이론과는 달리, 빔전파 방법을 도입함으로써 복사 모드(radiation mode)와 전파 손실(propagation loss) 등도 고려할 수 있다<sup>[11]</sup>. 또한, Y 분기 도파로의 이중모드 테이퍼된 영역(two-mode tapered region)에는 점진적으로 변하는 전극이 놓여 있는데, 이곳에서의 광

의 전파 특성도 고려할 수 있다.

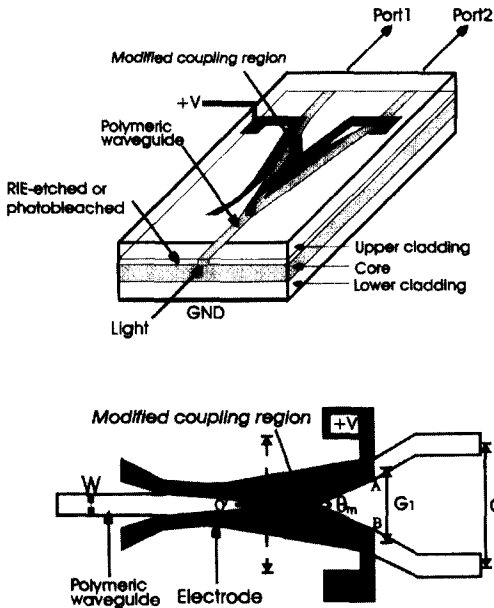


그림 1. 수정된 결합 영역을 갖는 폴리머 디지털 광 스위치의 구조  
 Fig. 1. Configuration of the polymeric digital optical switch with a modified coupling region.

결합모드이론에 의하면, 모드진화현상을 이용하는 소자의 스위칭 성능은 분기를 이루는 두 도파로 사이의 결합 세기(coupling strength)에 의존한다<sup>16)</sup>. 본 논문에서는 이 사실에 근거하여 모드 결합을 최적화 함으로써 스위칭 성능을 향상시키고자 한다. 이를 위해 수정된 결합 영역을 도입하였다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 수정된 결합 영역의 경계 (OAOB)는 Y 분기형 도파로의 내부와 새로이 도입된 V자 췌기 형태 (AOB)의 모양에 의해 정의된다. 이 췌기의 사잇각  $\theta_m$ 이 수정된 결합 영역의 전체 구조를 결정한다. 또한, 이 영역의 굴절률 분포는 최적의 결합을 얻기 위하여 조절된다. 그림 2에는 제안된 소자의 굴절률 분포가 도시되어 있다. 여기서,  $\Delta n_0$ 는 도파 영역(guiding region)과 측면 클래딩 영역(cladding region) 간의 유효굴절률 차이이고,  $\Delta n_m$ 은 수정된 결합 영역에서의 유효굴절률 변화이다.

먼저, 수정된 결합 영역을 갖지 않는 ( $\Delta n_m = 0$ ) 기존 광스위치에 대하여 두 도파로 간의 결합 세기에 따른 스위칭 성능의 변화를 계산하였다.

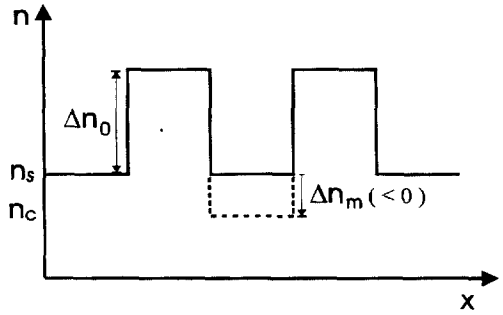


그림 2. 수정된 결합 영역을 갖는 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 굴절률 분포  
 Fig. 2. Refractive index profile of the polymeric digital optical switch with a modified coupling region.

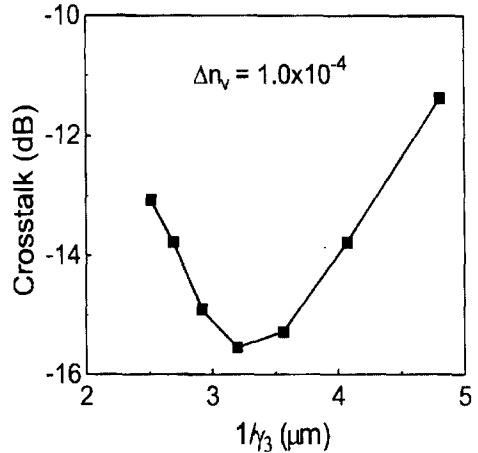


그림 3. 결합 세기에 따른 스위칭 성능의 변화  
 Fig. 3. Dependence of the crosstalk upon the coupling strength for a convention digital optical switch.

이 결합 세기는 전극 구조가 고정되어 있는 상태에서  $\Delta n_0$ 를 이용하여 변화시켰다. 즉, 두 도파로 사이의 클래딩 영역에서의 감쇠 상수(decaying constant)  $\gamma_3$ 는  $\Delta n_0$ 에 비례한다. 그리고 결합 세기는  $\gamma_3$ 에 따라 지수함수적으로 감소한다. 그림 3은  $\Delta n_0$ 가 0.002에서 0.005까지 변할 때의 누화 특성을 보여 준다. 이때,  $\gamma_3$ 는  $0.21 \mu\text{m}^{-1}$ 에서  $0.40 \mu\text{m}^{-1}$ 까지 변한다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 누화는  $\gamma_3$ 가 감소함에 따라 단조적(monotonic)으로 감소하는 것이 아니라, 대신에  $\gamma_3 = 0.30 \mu\text{m}^{-1}$  근처에서 가장 좋은 특성을 나타낸다. 이것은 결합 세기 ( $\propto e^{-\gamma_3}$ )가 커짐에 따라 누화가 단조적으로 개선된다고 예측하는 결합모드이론의 결과와

는 다르다. 그 이유는 실제 소자의 경우에는 전극 구조가 고정되어 있기 때문에 인가 전계와 도파모드 간의 결합 (overlap integral factor)을 고려해야 하기 때문이다. 본 논문에서는, 도파 손실과 광섬유와의 결합 손실이 작은 도파모드를 얻도록  $\Delta n_0$ 를 설계한 후, 도파층 영역 대신에 결합 영역을 점진적으로 수정하여 결합 세기를 최적화 하였다. 이를 통해 Y 분기형 도파로의 도파 특성에 영향을 주지 않고 스위칭 성능을 향상시킬 수 있다.

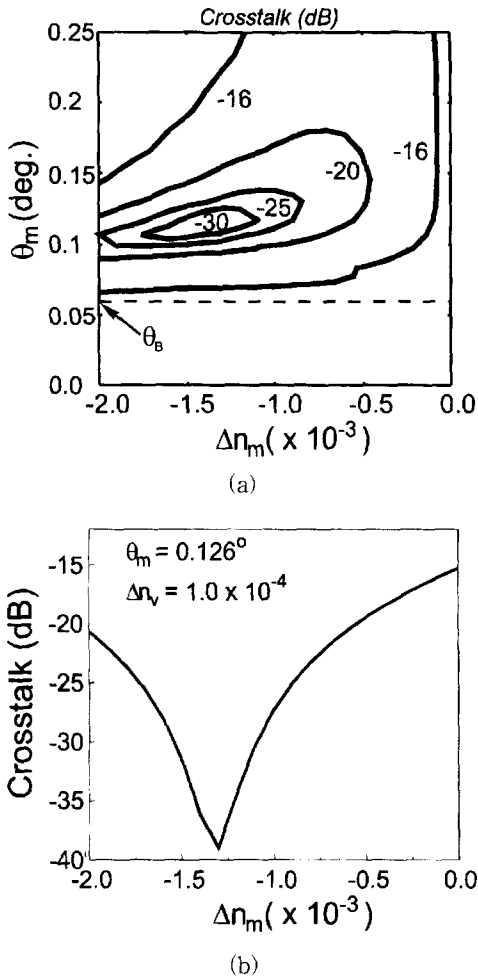


그림 4. 수정된 결합 영역이 스위칭 성능에 미치는 영향 (a)  $\Delta n_m$  과  $\theta_m$ 에 대한 누화의 특성을 나타내는 등고선 그래프 (b)  $\theta_m = 0.126^\circ$  일때,  $\Delta n_m$ 에 따른 누화 특성

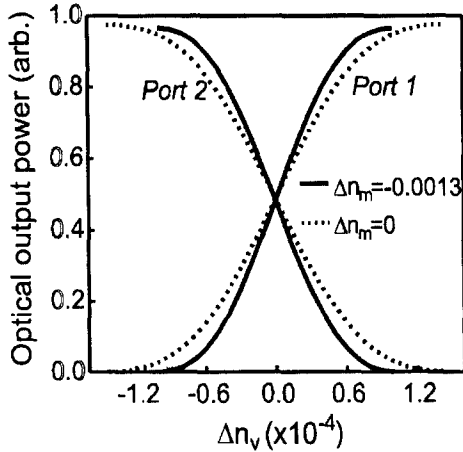
Fig. 4. Effect of the modified coupling region on the switching performance (a) Contour graph of the crosstalk for  $\Delta n_m$  and  $\theta_m$  (b) Dependence of the crosstalk on  $\Delta n_m$ , with  $\theta_m = 0.126^\circ$ .

다음으로, 수정된 결합 영역을 설계하기 위한 과정을 설명하고자 한다. 먼저, 적당한 도파모드 크기를 얻기 위하여  $\Delta n_0$ 를 0.003으로 가정하였다. 이때,  $1/e^2$  도파모드 크기는  $10.0 \mu\text{m}$ 이고,  $\gamma_3$ 는  $0.29 \mu\text{m}^{-1}$ 이다. 수정된 결합 영역이 스위칭 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 이 영역에서의 추가 굴절률 변화인  $\Delta n_m$ 을  $-0.002$ 에서  $+0.001$ 까지 변화시키고,  $\theta_m$ 은  $0.06^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지 변화시켰다. 그림 4(a)는 전기광학효과에 의하여 유발되는 굴절률 변화  $\Delta n_v (=0.0001)$ 가 일정할 때, 제안된 소자의 누화를 나타내는 등고선 그래프를 보여준다. 수정된 결합 영역이 없을 때 ( $\Delta n_m = 0$ , 또는  $\theta_m = 0.06^\circ$ ) 누화가 약  $-15 \text{ dB}$ 인데,  $\Delta n_m$ 과  $\theta_m$ 을 적당히 조절함으로써 특성이 개선됨을 알 수 있다. 즉, 약  $-20 \text{ dB}$  이하의 누화를 나타내는 비교적 넓은 영역이  $\Delta n_m = -0.0013$ ,  $\theta_m = 0.126^\circ$ 의 근처에서 존재한다. 실제 소자의 제작 측면에 있어서, 소자의 마스크 패턴이 이미 제작된 이후에는  $\theta_m$ 은 고정되기 때문에, 두 도파로 간의 결합 세기를 조절하기 위해서는  $\Delta n_m$ 을 이용해야만 한다. 그림 4(a)에서 알 수 있듯이, 누화가 가장 크게 개선될 것으로 예상되는  $\theta_m = 0.126^\circ$ 에 대해,  $\Delta n_m$ 에 따른 누화 특성이 그림 4(b)에 나타나 있다.  $\Delta n_m (>0)$ 의 경우에는 두 도파로 간의 결합 세기가 강해지고, 그림 4에서 예측할 수 있듯이 결합영역을 수정하더라도 누화특성이 개선되지 않았다. 반면에,  $\Delta n_m (<0)$ 의 크기가 증가할수록 수정된 결합 영역의 유효굴절률이 감소함에 따라 결합 세기는 약해진다. 이 때 누화는 점차 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 이 때, 수정된 결합 영역을 도입함으로써 근처에서 누화가  $-15 \text{ dB}$  ( $\Delta n_m = 0$ )에서  $-37 \text{ dB}$  ( $\Delta n_m = -0.0013$ ) 이하까지 감소하였다.

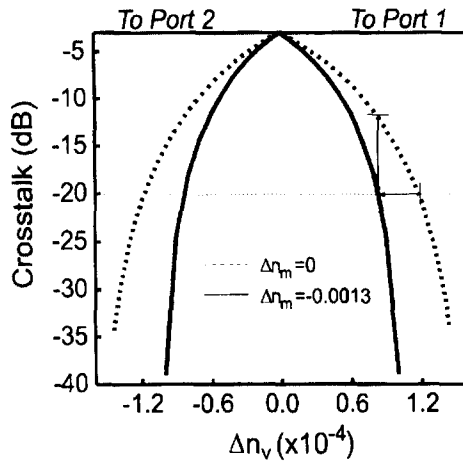
### III. 소자의 특성 해석 및 토의

그림 5(a)와 5(b)는 각각 수정된 결합 영역이 없는 경우( $\Delta n_m = 0$ )와 그것이 있었던 경우( $\Delta n_m = -0.0013$ )에 대한 제안된 소자의 출력 광파워와 누화 특성을 보여준다. 예상대로, 인가 전압에 대하여 디지털 특성을 나타내며, 수정된 결합 영역을 도입함으로써 스위칭 성능이 개선됨을 알 수 있다. 즉,  $-20 \text{ dB}$  누화에 대해서 수정된 결합 영역을 갖는 디지털 광스위치의 구동 전압(굴절률 변화  $\Delta n_v$ )은 기존의 소자에 비해 약 30% 이상 작다. 또한,  $-20 \text{ dB}$  누화를 얻을 수 있

는 인가 전압에 대해서 누화는 약 8 dB 이상 개선되었 으며, 인가 전압이 증가할수록 더욱 개선될 것이다.



(a)



(b)

그림 5. 수정된 결합 영역이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 계산된 전달 특성 (a) 광출력 (b) 누화  
 Fig. 5. Calculated transfer characteristics of the polymeric digital optical switch with and without the modified coupling region (a) Optical output power (b) Crosstalk.

마지막으로, 제안된 소자의 실제 제작 방법에 대하여 논의하고자 한다. 먼저 기본적인 Y 분기형 광도파로는 광표백 방법<sup>[12]</sup> 과 RIE 방법<sup>[13]</sup> 을 이용하여 제작할 수 있다. 광표백 방법은 폴리머의 굴절률 분포를 정밀하게 조절할 수 있기 때문에 저손실의 우수한 도파로를 제작하는데 유용하지만, 폴링에 의한 복굴절로 인하여 TE 모드를 도파시키지 못하는 단점이 있다. 반면

에, RIE 방법은 광표백 방법에 비하여 다음과 같은 장점을 갖는다. 첫째로, 과도한 자외선 조사로 인한 폴링된 폴리머의 비선형성이 감소되지 않는다. 둘째로, 폴링 이후에도 TE와 TM 두 모드를 모두 도파시킬 수 있다. 셋째로, 화학적 변화가 아닌 물리적 식각에 의해 도파로를 형성하므로 특성이 훨씬 안정적이다. 다음으로, 본 논문에서 제안한 수정된 결합 영역도 광표백 방법이나 RIE 공정을 이용하여 구현할 수 있을 것이다. RIE 공정을 이용하는 경우에는, 하부 클래딩층과 코어층을 형성한 후에 도파로 패턴을 만들기 위해 코어층 폴리머를 식각하여 수정된 결합 영역을 형성한다. 광표백법을 이용하는 경우에는, 하부 클래딩층과 코어층을 형성한 후에 곧바로 광표백을 수행하여 수정된 결합 영역을 형성할 수도 있다. 그렇지만, 이보다는 세층의 폴리머를 모두 형성한 후, 광표백을 연속적으로 수행함으로써 그것을 형성하는 것이 유리하다. 왜냐하면, 광표백에 의하여 수정된 결합 영역의 굴절률 분포를 정밀하게 조절함으로써, 소자 제작 이후에도 소자의 성능을 능동적으로 제어할 수 있을 것이기 때문이다<sup>[14]</sup>.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 최적의 결합을 얻기 위하여 수정된 결합 영역을 갖는 전기광학 폴리머 디지털 광스위치를 제안하고 해석하였다. 수정된 결합 영역은 두 광도파로의 분기점에서부터 광파의 진행 방향을 따라 점진적으로 도입되었다. 분기 영역에서 두 도파로 간의 모드 결합을 최적화 할 수 있도록 수정된 결합 영역의 구조와 굴절률 분포를 조절함으로써, 소자의 길이가 고정되어 있는 상태에서도 스위칭 성능이 향상되었다. 계산 결과에 의하면, 구동 전압은 약 30% 이상 감소되었으며 누화는 8 dB 이상 개선되었다. 제안된 소자는 광표백 방법이나 반응이온식각 방법 등을 이용하여 구현할 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

[1] Y. Silberberg, P. Perlmutter, and J. E. Baran, Digital optical switch, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 51, pp. 1230-1232, 1987.  
 [2] M. N. Kahn, J. E. Zucker, T. Y. Chang, N. J. Sauer, and M. D. Divino, Design and

- demonstration of weighted-coupling digital Y-branch optical switches in InGaAs/InGaAlAs electron transfer waveguides, *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, pp. 2032-2039, 1994.
- [3] N. Keil, H. H. Yao, and C. Zawadzki, (2x2) digital optical switch realized by low cost polymer waveguide technology, *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 1470-1471, 1996.
- [4] E. V. Tomme, P. P. V. Daele, R. G. Baets, and P. E. Lagasse, Integrated optic devices based on nonlinear optical polymers, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 778-787, 1991.
- [5] Sang-Shin Lee, Seh-Won Ahn, and Sang-Yung Shin, Electro-optic polymer digital optical switch with photobleached waveguides and a self-aligned electrode, accepted for publication, *Optics Communications*, 1997.
- [6] W. K. Burns, M. M. Howerton, and R. P. Moeller, Performance and modeling of proton exchanged LiTaO<sub>3</sub> branching modulators, *J. Lightwave Technol.*, vol. 10, pp. 1403-1408, 1992.
- [7] W. K. Burns, Voltage-length product for modal evolution-type digital switches, *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, pp. 990-998, 1990.
- [8] M. Renaud, J. F. Vinchant, A. Goutelle, B. Martin, G. Ripoche, M. Bachmann, P. Pagnod, and F. Gaborit, Compact digital optical switches for low insertion loss large switch arrays on InP, *Proc. 21st Eur. Conf. on Opt. Comm.*, ECOC '95-Brussels, 1995, paper Mo.L.3.1.
- [9] W. K. Burns, Shaping the digital switch, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 861-863, 1992.
- [10] Y. Chung and N. Dagli, An assessment of finite difference beam propagation method, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, pp. 1335-1339, 1990.
- [11] L. Thylen, P. Svensson, and W. K. Burns, Beam propagation method analysis of the digital switch, *Integrated and Guided-Wave Optics 1989 Technical Digest Series*, vol. 4, Houston, Texas, U.S.A., 1989, paper WBB3.
- [12] M. B. J. Diemeer, F. M. M. Suyten, E. S. Trommel, A. McDonach, J. M. Copeland, L. W. Jenneskens, and W. H. G. Horsthuis, Photoinduced channel waveguide formation in nonlinear optical polymers, *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 379-380, 1990.
- [13] W. Wang, D. Chen, H. R. Fetterman, Y. Shi, W. H. Steier, and L. R. Dalton, 40-GHz polymer electrooptic phase modulators, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, pp. 638-640, 1995.
- [14] W.-Y. Hwang, Jang-Joo Kim, Taehyoung Zyung, Min-Cheol Oh, and Sang-Yung Shin, Postphotobleaching method for the control of coupling constant in an electro-optic polymer directional coupler switch, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 67, pp. 763-765, 1995.

## — 저 자 소 개 —



李相信(正會員)

1968년 9월 5일생. 1991년 2월 한국과학기술원 과학기술대학 전기 및 전자공학과 졸업(학사). 1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정 졸업(석사). 1997년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정 졸업(공학박사). 1997년 3월 ~ 현재 한국과학기술원 부설 정보전자연구소 연수연구원(postdoctoral researcher). 주관심분야는 폴리머 및 리튬나리오베이트 광도파로 소자 등임.



申相永(正會員)

1946년 9월 14일생. 1968년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1973년 Polytechnic Institute of New York, Brooklyn, NY, 전기물리(석사). 1976년 Polytechnic Institute of New York, Brooklyn, NY, 전기물리(박사). 1975년 ~ 1977년 Polytechnic Institute of New York, Brooklyn, NY, 연구원. 1978년 ~ 현재 한국과학기술원 교수. 1986년 ~ 1987년 Optical Science Center, University of Arizona, Visiting Scholar. 주관심분야는 집적광학 소자, 레이저 다이오드의 동력학, 그리고 광연결 등임.