

## 모드 결합을 최적화 하기 위해 수정된 결합 영역을 갖는 전기광학 폴리머 디지털 광스위치

이상신 · 신상영

한국과학기술원 전기 및 전자공학과

(1997년 1월 13일 받음)

본 논문에서는 모드 결합을 최적화 하기 위해 수정된 결합 영역을 갖는 전기광학 폴리머 디지털 광스위치를 제작하였다. 분기형 도파로는 반응이온식각 방법을 이용하여 만들었다. 그리고, 수정된 결합 영역은 두 광도파로의 분기점에서부터 광파의 진행 방향을 따라 점진적으로 도입하였으며, 소자 제작 이후에 광표백 방법을 이용하여 구현하였다. 분기 영역에서 두 도파로 간의 모드 결합이 최적화 되도록 수정된 결합 영역의 구조와 굴절률 분포를 조절함으로써, 소자의 길이가 고정되어 있는 상태에서 스위칭 성능을 향상시켰다. 측정 결과에 의하면, 구동 전압은 약 30%이상 감소되었으며 누화는 4~6 dB정도 개선되었다.

### 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 스핀 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 용이하다. 더욱이, 마이크로파와 광파 간의 속도 부정합이 작고 유전 상수(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 비추어 볼 때, 전기광학 폴리머를 이용한 디지털 광스위치는 우수한 스위칭 소자가 될 것이다. 특히, 본 논문의 저자 등은 광표백(photobleaching) 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 구속력을 갖는 선형 분기<sup>[8]</sup>, 곡선 분기(shaped branch)<sup>[9]</sup> 등이 있다. 선형 분기는 마

스크 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 나빠지는 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 구동 전압은 두 도파로 간의 횡방향 결합 세기가 약해질수록 감소한다는 사실에 기인한다. 그러나, 이러한 방법은 실제 제작하기가 복잡하고 어렵다.

한편, 폴리머 광도파로를 제작하기 위한 방법으로는 광표백 방법<sup>[10]</sup>과 반응이온식각(RIE: Reactive Ion Etching) 방법<sup>[11]</sup> 등이 있다. 광표백 방법은 폴리머의 굴절률 분포를 정밀하게 조절할 수 있기 때문에 저손실의 우수한 성능을 갖는 도파로를 제작하는데 유용하다. 또한, 간단한 자외선 조사(illumination) 공정만이 필요하기 때문에 소자의 특성을 조절하는데 용이하다. 다음으로, RIE 방법은 다음과 같은 장점을 갖는다. 첫째로, 과도한 자외선 조사로 인한 폴링된 폴리머에서의 비선형효과의 감소가 없다. 둘째로, 화학적인 변화에 의한 것이 아니라 물리적으로 폴리머를 식각하여 도파로를 형성하기 때문에 도파로의 특성이 보다 안정적이다.

본 논문에서는 최적의 모드 결합을 얻기 위하여 수정된 결합 영역(modified coupling region)을 갖는 전기광학 폴리머 디지털 광스위치를 제작하였다. 기본적인 분기 도파로는 반응이온식각 공정을 이용하여 만들었다. 그리고, 수정된 결합 영역은 두 도파로의 분기점에서부터 광파의 진행 방향을 따라 점진적으로 도입하였으며, 소자 제작 이후에 광표백 방법을 이용하여 구현하였다. 분기 영역에서 두 도파로 간의 모드 결합이 최적화 되도록 수정된 결합 영역의 구조와 굴절률 분포를 조절함으로써, 소자의 길이가 고정되어 있는 상태에서 구동 전압과 누화(crosstalk)를 감소시킬 수 있었다.

## II. 소자의 동작 원리

본 논문에서 제안한 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 구조가 그림 1에 도시되어 있다. 이 소자는 결합 영역의 일부 분기 수정된 선형 Y 분기 광도파로와 스위치용 전극으로 이루어져 있다. 분기 도파로와 수정된 결합 영역은 각각 RIE와 광표백 공정을 도입하여 제작하였다. 도파로 폭  $W$ 는  $4\ \mu\text{m}$ 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, 출력단에서의 두 광도파로 사이의 거리  $G_2$ 는 모드 간의 충분한 거리를 유지하기 위해서  $28\ \mu\text{m}$ 로 하였다. 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 포트로 균등하게 나뉘어진다. 전계가 인가되면 전기광학효과를 통하여 분기의 두 암(arm)에 양(positive)과 음(negative)의 굴절률 변화가 생기게 되므로 광파워는 굴절률이 증가된 암으로 스위칭 된다.

결합모드이론에 의하면, 모드진화현상을 이용하는 디지털 광스위치의 스위칭 성능은 분기를 이루는 두 도파로 사이의 결합 세기(coupling strength)에 의존한다.<sup>[6]</sup> 이 사실에 근거하여 본 논문의 저자 등은 결합 영역을 점진적(adiabatic)으로 수정하여 모드 결합을 최적화 함으로써 소자의 성능을 향상시킬 수 있는 방안을 제안하였다.<sup>[12]</sup> 그림 1에서 알 수 있듯이, 이 수정된 결합 영역의 경계(O'AOB)는 Y분기형 도파로의 내부와 새로이 도입된 'V'자 형태의 썸기(AOB)에 의해 정의된

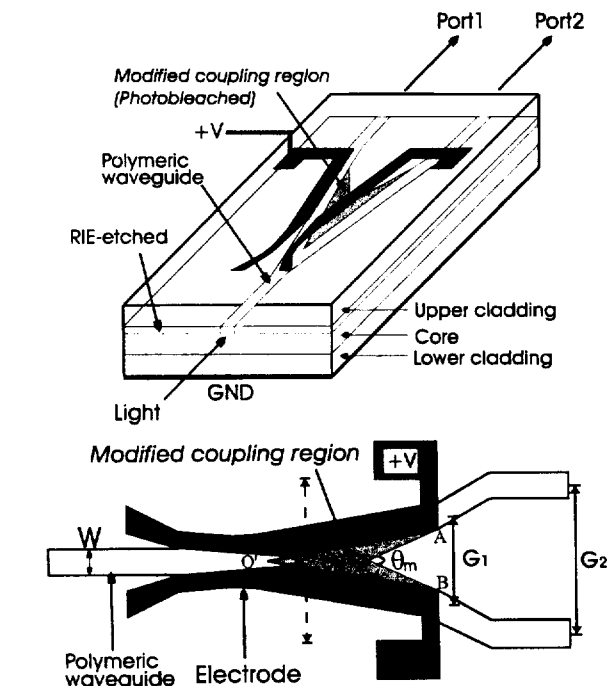


그림 1. 수정된 결합 영역을 갖는 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 구조.

다. 이 썸기의 사잇각  $\theta_m$ 이 수정된 결합 영역의 전체 구조를 결정한다. 이론적인 해석에 의하면,  $\theta_m$ 이  $0.126^\circ$ 으로 고정되어 있을 때, 수정된 결합 영역의 굴절률 분포를 조절함으로써 디지털 광스위치의 누화와 구동 전압을 감소시킬 수 있다.

## III. 소자의 제작 및 특성 측정

광도파로의 코어층으로 사용되는 전기광학 폴리머는 PMMA (Poly(methyl methacrylate)) 주층에 Disperse Red 1 (DR1) 염료 분자가 측쇄결합되어 있는 형태의 비선형 폴리머이다 [poly(disperse red 1 methacrylate-co-methyl methacrylate): PMMA-DR1]. 이 전기광학 폴리머는 미국의 IBM-Almaden Research Center로부터 구매하였다. 클래딩층(cladding layer)으로는 미국의 Master Bond사에서 공급하는 자외선 경화 에폭시(UV-curable epoxy)의 일종인 UV-15를 사용하였다. 프리즘 결합 방법을 이용하여 측정된 PMMA-DR1과 UV-15의 굴절률은  $1.3\ \mu\text{m}$  파장대에서 각각 1.542와 1.512였다.

전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 제작 과정에 대한 개략도가 그림 2에 도시되어 있다. 먼저 실리콘 기판에 절연층으로서  $\text{SiO}_2$ 를  $1.0\ \mu\text{m}$  가량 되도록 열산화(thermal oxidation) 방식을 이용하여 성장시킨다. 그 위에 Au/Cr 금속을 진공 증착(thermal evaporation)시켜 하부전극을 형성한다. 광도파로의 하부 클래딩층으로 UV-15를  $3.1\ \mu\text{m}$ 의 두께가 되도록 스핀 코팅하고 진공 상태에서 자외선에 노출시켜 경화시킨다. 코어층으로는 PMMA-DR1을 두께가  $3.3\ \mu\text{m}$ 가 되도록 스핀 코팅하여 형성한다. 다음, 표준 리소그래피(lithography) 공정과 산소플라즈마(oxygen plasma)에 의한 RIE 공정을 도입하여 전기광학 폴리머를 식각함으로써 코어층 립을 형성한다. 이때, 식각 깊이는  $0.54\ \mu\text{m}$ 이다. 상부 클래딩층도  $2.6\ \mu\text{m}$  두께의 UV-15를 스핀 코팅하여 형성한다. 각각의 폴리머층을 스핀 코팅한 후 용매(solvent)를 제거하기 위해 고온에서 충분히

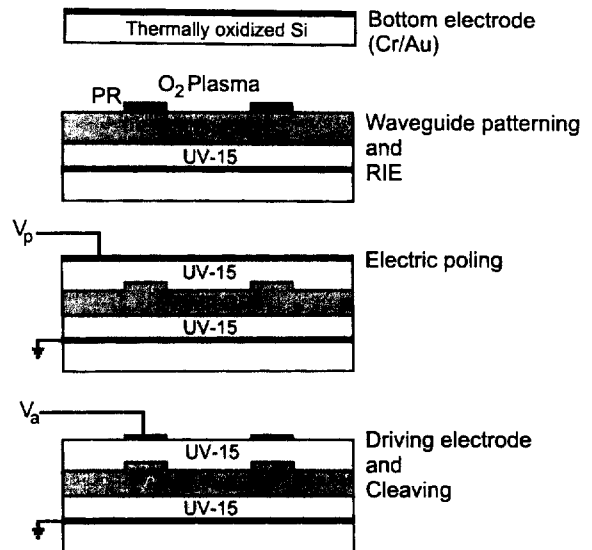


그림 2. 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 제작공정.

히 베이킹(baking)한다. 상부 전극은 Au를 진공 증착시킨다. 코아층 폴리머에 전기광학효과를 유발시키기 위하여 113 °C로 유지된 대류오븐에서 3층 구조의 폴리머층에 900 V의 전압을 인가하여 전계 폴링을 수행한다. 그리고, 립 광도파로 마스크 패턴과 전극 마스크 패턴을 정렬하여 스위칭용 전극을 만든다. 이 경우, 광표백 공정과는 달리 식각으로 인하여 도파 영역(guiding region)과 측면 클래딩(side cladding region) 영역 사이에 뚜렷한 경계가 형성되기 때문에, 별도의 정렬용 표시 없이도 정렬이 가능하다. 마지막으로, 입출력단에 광을 결합시키기 위해 실리콘 기판을 클리빙(cleaving)하여 단면을 형성한다.

그림 3은 립 광도파로의 클리빙된 단면의 주사전자현미경 사진(scanning electron micrograph: SEM)을 보여준다. 실리콘 기판 위에 있는 4층은 각각 SiO<sub>2</sub>, UV-15, PMMA-DR1, 그리고 UV-15를 나타낸다. UV-15으로 이루어진 하부와 상부 클래딩 층이 클리빙 도중에 약간 찢어지거나 벗겨졌음을 알 수 있다.

소자가 제작된 이후에, 광표백을 연속적으로 수행하여 수정된 결합 영역에서의 굴절률 분포를 변화시켰으며, 각 광표백 스텝마다 스위칭 특성을 측정하였다. 제작된 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 전달 특성을 측정하기 위한 장치의 개략도가 그림 4에 도시되어 있다. 하부 접지 전극과 상부의 두 전극 중 하나에 전압을 인가한 채, TM편광된 다이오드 레이저의 광을 입력시켰다. 광원의 파장은 1.3 μm와 1.55 μm이다. 두 출력 포트의 광파워는 광검출기(photodetector)를 이용하여 측정하였다. 또한, 도파모드의 분포를 관찰하기 위하여 적외선 카메라(IR vidicon)를 이용하였다.

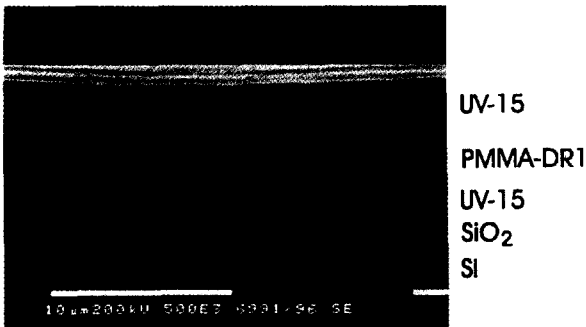


그림 3. 립 광도파로의 클리빙된 단면의 주사전자현미경 사진.

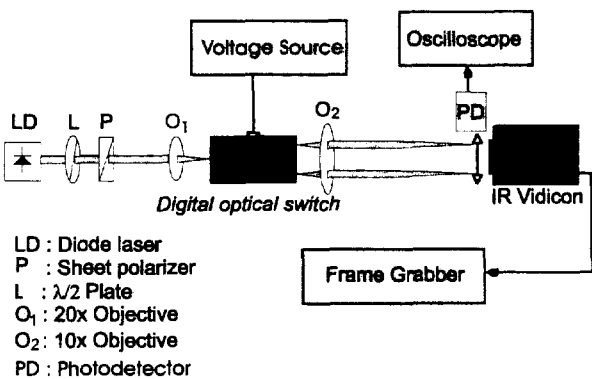


그림 4. 측정 장치.

그림 5는 수정된 결합 영역이 있는 경우와 없는 경우에 대한 제작된 소자의 광출력 특성 측정 결과를 보여준다. 또한, 출력 포트 2로 입력 광파워를 스위칭 하는 경우에 대한 측정된 누화 특성이 그림 6에 도시 되어 있다. 예상대로, 제작된 소자는 파장에 무관하게 동작하고 인가 전압에 대하여 디지털 응답 특성을 가지며, 또한 수정된 결합 영역을 도입함으로써 스위칭 성능이 향상됨을 알 수 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이, 누화가 최대 6 dB 정도 개선되었다. 인가 전압이 약 -25 V일 때, 누화의 개선이 약간 감소하고 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 또한, -11 dB 누화를 얻기 위한 경우, 수정된 결합 영역을 갖는 소자의 구동 전압은 그것이 없는 소자의 구동 전압의 70 % 이하로 감소되었다. 다음으로, 인가 전압이 -27 V일 때(포트 2로 스위칭)는 수정된 결합 영역을 도입하기 이전과 이후에 대해 측정된 누화는 -10 dB에서 -14 dB로 약 4 dB 정도개선되었고, 인가 전압이 +27 V일 때(광파워를 포트 1로 스위칭)는 수정된 결합 영역이 도입된 이후에도 누화가 약 -19 dB로 그대로 유지되었다. 이 때, 포트 1의 소멸비(extinction ratio)는 10 dB에서 15 dB로 증가하였고, 포트 2의 소멸비는 약 19 dB로 그대로 유지되었다. 실제 실험에서는 제작상의 오차로 인하여 광스위치의 두 출력 포트의 특성이

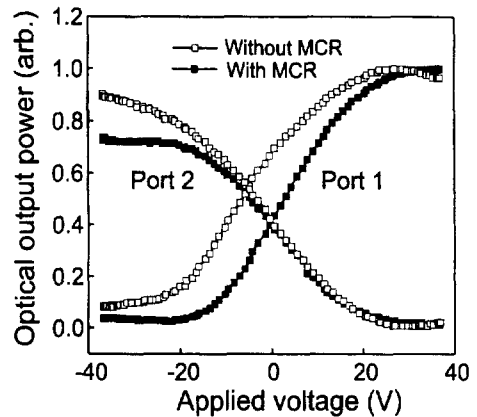


그림 5. 수정된 결합 영역이 있는 경우와 없는 경우에 대한 제작된 소자의 전달 특성 측정 결과.

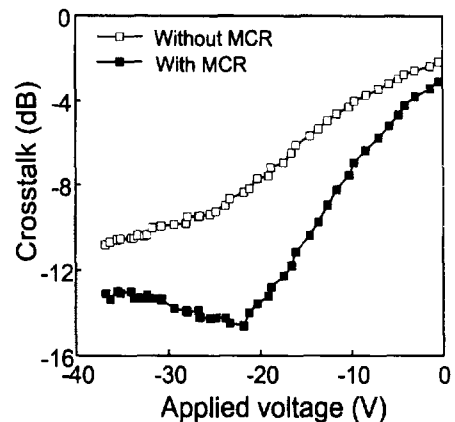


그림 6. 수정된 결합 영역이 있는 경우와 없는 경우에 대한 제작된 소자의 누화 측정 결과.

서로 다른 경우가 많다. 이러한 경우, 수정된 결합 영역을 형성할 때 RIE 공정에 의한 립 도파로 패턴과 광표백용 마스크 패턴 간의 정렬을 적절하게 조절함으로써 상대적으로 성능이 좋지 않은 포트의 특성을 선택적으로 개선할 수 있을 것이다. 또한, 실험상의 오차를 제거한다면, 누화를 -30 dB 이하까지 감소시킬 수 있을 것이다.

본 논문에서 제안한 광스위치는 서론에서 언급한 RIE 공정의 장점(비선형효과의 감소 방지, 안정성, 용이한 정렬)과 광표백 공정의 장점(용이한 성능 제어)을 동시에 활용할 수 있도록 제작되었다. 이와 같이 RIE 공정과 광표백 공정의 특성을 동시에 살릴 수 있도록 적절히 이용한다면 다양한 폴리머 광소자를 제작하는데 유용할 것이다. 또한, 본 논문에서 사용한 전기광학 폴리머인 PMMA-DR1의 폴링 특성에 관한 자료에 의하면 수행된 폴링조건 하에서의 전기광학계수는 약 5 pm/V이다. 지금까지 가장 우수한 성능을 갖는다고 알려진 비선형 폴리머인 DANS를 사용한다면 구동 전압이 약 1/6 이하로 감소될 것이다. 그러나 이 폴리머는 현재 상용으로 판매되지 않고 있다.

마지막으로, 본 논문에서 제작한 디지털 광스위치의 동작속도는 기존의 방향성 결합 광스위치 (directional coupler switch)와 크게 다르지 않을 것으로 예상된다. 다만, 유전 상수(dielectric constant)가 작은 전기광학 폴리머를 이용하기 때문에 대역폭이 훨씬 향상될 것이다. RC 시상수(time constant)를 고려한 이론적인 계산에 의하면 이 소자의 대역폭은 약 8 GHz 정도이다. 다음으로, 1×2 광스위치의 입력단 구조를 출력단과 동일하게 한다면 2×2 스위치도 손쉽게 구현할 수 있을 것이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 최적의 결합을 얻기 위하여 수정된 결합 영역을 갖는 전기광학 폴리머 디지털 광스위치를 제작하였다. 기본적인 분기 도파로는 RIE 공정을 도입하여 만들었으며, 수정된 결합 영역은 소자 제작 이후에 광표백 방법을 이용하여 형성하였다. 이 수정된 결합 영역의 구조와 굴절률 분포를 조절하여 분기 영역에서 두 도파로 간의 모드 결합을 최적화함으로써, 소자의 구동 전압과 누화를 감소시켰다. 측정 결과에 의하면, 구동 전압은 약 30% 이상 감소되었으며 누화는 4-6 dB 정도 개선되었다.

#### 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, "(2×2) 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. Ripoché, 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] 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).
- [11] 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).
- [12] Sang-Shin Lee and Sang-Yung Shin, "Polymeric digital optical switch with a linear branch and an optimized coupling region," SPIE's International Symposium on Optoelectronics '97, Proc. SPIE., vol. **2997**, San Jose, CA USA, Feb. (1997).

## **Polymeric digital optical switch with a coupling region modified for optimum mode coupling**

Sang-Shin Lee and Sang-Yung Shin

*Dept. of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea*

(Received : January 13, 1997)

An electro-optic polymer digital optical switch with a coupling region modified for optimum coupling is designed and demonstrated. Its branch waveguide is fabricated by reactive ion etching. Then, the modified coupling region is adiabatically introduced along the propagation direction from the branching point of the two waveguides, and it is implemented by photobleaching after the device fabrication. 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 was shown to be enhanced with a fixed device length. The measured drive voltage is reduced by more than 30 percents, and the crosstalk is also improved by about 4~6 dB.