

광표백 폴리머 광도파로를 이용한 디지털 광스위치

이상신 · 신상영

한국과학기술원 전기 및 전자공학과

305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

(1996년 7월 1일 받음)

광표백 광도파로와 자기정렬 전극을 이용하여 전기광학 폴리머 디지털 광스위치를 제작하였다. 이 광스위치는 파장에 무관하게 동작하고, 제작조건에 민감하지 않고, 설계가 다양하다는 특성을 갖는다. 또한, 광섬유와의 결합 손실이 작고 넓은 대역폭을 갖는 장점이 있다. 스위칭 성능을 향상시킬 목적으로 광표백 시간을 이용하여 광표백 광도파로의 도파모드 분포를 적절하게 조절함으로써 브랜치 영역에서의 모드 결합을 최적화 하였다. 또한, 광과 인가 전계의 효과적인 결합과 점진적으로 테이퍼된 전극을 형성하기 위해 자기정렬전극을 이용하였다. 측정된 누화는 1.32 μm 와 1.55 μm 에서 모두 -21 dB이 하였고 각 출력포트의 소멸비도 모두 20 dB 이상이었다.

I. 서 론

디지털 광스위치는 광통신 시스템 등에서 도파로 형태의 스위칭 소자로 이용할 목적으로 많은 연구가 되어 왔다. 이 스위치의 장점은 광의 편광과 파장에 무관하게 동작하고 인가전압에 대하여 주기적이 아닌 디지털 특성을 가지며 제작공정의 영향을 적게 받는다는 것이다. 지금까지는 주로 리튬나이오베이트(LiNbO₃) 결정^[1]이나 반도체^[2] 등의 무기물(inorganic) 재료나 열광학 폴리머(thermo-optic polymer)^[3] 등의 유기물(organic) 재료 등을 이용하여 구현되었다. 열광학 폴리머를 이용한 디지털 광스위치는 작은 구동 전압과 낮은 누화 특성을 갖는 장점이 있는 반면에, 동작 대역폭은 수 kHz 미만으로 매우 좁다. 이는 기본적으로 속도가 느린 열광학현상(thermo-optic effect)을 이용하기 때문이다. 무기물 재료를 이용한 디지털 광스위치의 경우에는, 고속 동작을 하기 위해서는 광파와 마이크로파 사이에 정확한 속도 정합(velocity matching)이 필요하고 광섬유와의 결합 손실이 크다는 단점이 있다.

최근에, 마하젠더 간섭계나 방향성결합 광스위치^[4], 수동형 편광제어 소자^[5,6] 등의 도파로형 집적광학소자에 응용할 목적으로 전기광학 폴리머(electro-optic polymer)가 많이 연구되어 왔다. 전기광학 폴리머를 이용한 도파로형 집적광학소자는 보통 스핀 코팅된 다층구조를 갖는 도파로로 이루어져 있으며, 광표백(photobleaching)^[7]

이나 반응이온식각(reactive ion etching) 공정을 이용하여 저렴한 가격으로 손쉽게 제작할 수 있다. 그리고 실리콘(Si)이나 갈륨비소(GaAs) 등의 다양한 기판을 사용할 수 있기 때문에 다른 전자집적회로나 광소자와의 결합이 가능하다. 더욱이, 고속 동작을 하기 위해서 속도 정합이 필요없고 광섬유와의 결합시 굴절률 차이에 의하여 유발되는 반사손실(fresnel reflection loss)이 매우 작다. 결과적으로, 위에서 언급한 전기광학 폴리머가 갖는 장점에 비추어 볼때, 전기광학 폴리머를 이용한 디지털 광스위치는 수십 GHz 이상의 넓은 대역폭을 가질 수 있으며 광섬유와의 결합시 작은 결합 손실을 갖는 우수한 스위칭 소자가 될 것이다. 그러나 고전압센서로서 제안된 낮은 변조 특성을 갖는 초보적인 디지털 광스위치^[8] 외에는 아직까지 보고된 바가 없다. 또한, 광표백이나 반응이온식각 공정을 이용하여 구현된 소자는 설계가 다양하고 능동적인 구조 수정이 가능하기 때문에 낮은 누화와 작은 구동전압을 얻기가 매우 용이하다^[9]. 현재, 큰 전기광학효과와 낮은 전파 손실을 갖는 우수한 전기광학 폴리머에 대한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있기 때문에, 전기광학 폴리머 광스위치의 구동전압은 더욱 개선될 것이다.

본 논문에서는 광표백 광도파로와 자기정렬전극(self-aligned electrode)을 이용한 전기광학 폴리머 디지털 광스위치에 관하여 언급한다. 낮은 누화와 작은 구동전압을 갖는 디지털 광스위치를 제작하기 위해서, 다음의

방법을 이용하여 브랜치(branch) 광도파로의 결합 영역에서 결합을 최적화하고 점진적(adiabatic)으로 변화하는 구조를 갖는 전극을 형성하였다. 첫째로, 광표백 광도파로의 도파모드분포를 광표백 시간을 이용하여 조절함으로써 브랜치에서 최적화된 결합을 얻었다. 둘째로, 자기정렬전극을 채택함으로써 광파와 인가 전계의 효과적인 겹침(overlap)과 점진적으로 테이퍼된(tapered) 전극을 형성할 수 있었다. 마지막으로, 유한차분 빔전파방법(finite-difference beam propagation method)^[10]을 이용하여 디지털 광스위치의 광표백 광도파로와 자기정렬전극을 체계적으로 설계하였다.

II. 소자의 동작원리 및 설계

본 논문에서 제작한 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 구조가 그림 1에 도시되어 있다. 이 소자는 기본적으로 광표백 공정으로 형성된 선형 Y 브랜치 광도파로와 푸쉬풀(push-pull) 형태의 자기정렬전극으로 이루어져 있다. 이 디지털 광스위치의 동작원리는 모드진화현상(mode evolution effect)에 근거한다. 모드진화란 광의 진행방향을 따라서 구조가 변하는 브랜치 광도파로 구조에서 각 지점에서의 국부 정규모드(local normal mode)가 겪는 모양의 변화를 의미한다. 이 모드진화의 정도는 인가전압에는 비례하고 브랜치의 분기각도

(branch angle)에는 반비례 한다. 전계가 인가되지 않았을 때에는 입력 광파위가 두 출력 포트에 균등하게 나뉘어지고, 전계가 인가되면 전기광학효과를 통하여 분리기구의 두 암(arm)에 양(positive)과 부(negative)의 굴절률 변화가 생기게 된다. 따라서, 입력 광파위는 모드진화현상에 의하여 굴절률이 증가된 암으로 스위칭 된다^[11].

그림 1에 도시되어 있는 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 구체적인 설계 과정이 다음에 서술되어 있다. 기본적으로, 모드진화 현상을 이용한 브랜치형 소자의 경우에, 광파위의 스위칭 성능은 브랜치를 이루는 두 광도파로 사이의 결합 세기(coupling strength)에 의존한다^[11]. 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 경우, 광표백 광도파로의 도파모드 분포는 광표백 시간을 조절하면 쉽게 변화시킬 수 있으므로, 광표백을 적절하게 수행함으로써 두 도파로 사이에 최적화된 결합 세기를 갖도록 하는 도파모드 분포를 얻을 수 있다. 또한, 도파모드 분포가 디지털 광스위치의 성능에 영향을 주는 효과도 수치해석을 통하여 조사하였다. 다음으로, 누화의 원인이 되는 국부 정규모드 간의 원하지 않는 모드 결합을 막기 위하여 점진적으로 변하는 자기정렬전극을 도입하였다. 이 자기정렬전극은 광도파로와 전극을 거의 완벽하게 정렬시켜 줌으로써 인가 전계와 광파를 효율적으로 겹치도록 해 준다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 점진적으로 테이퍼된 전극을 만들기 위해 전극폭이 이중모드 특성을 갖는 테이퍼된 영역의 시작점에서 거의 0 이고 이후 단일 광도파로의 폭까지 점진적으로 변하게 된다. 그림 2는 유효굴절률법(effective index method)과 1차원 유한차분법 빔전파방법을 이용하여 계산한 디지털 광스위치의 전달 특성을 보여준다. 이때, 도파로의 폭 w 는 $6 \mu\text{m}$ 이고, 분리기의 분기각도 θ_b 는 0.2° , 두 출력 광도파로간의 간격 G 는 $40 \mu\text{m}$ 이다. 브랜치 근처의 두

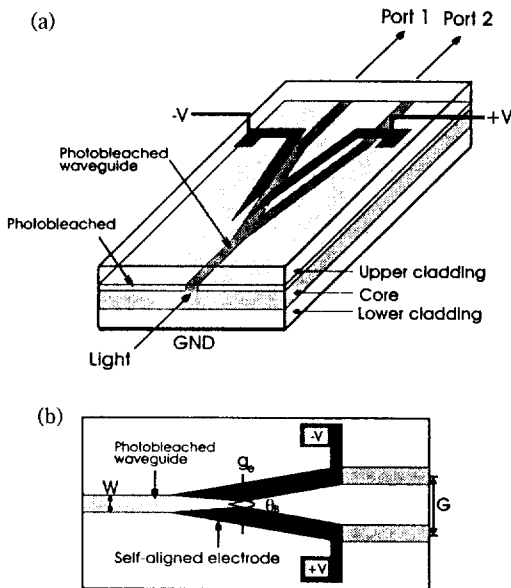


그림 1. 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 구조. (a) 구성도, (b) 윗면도

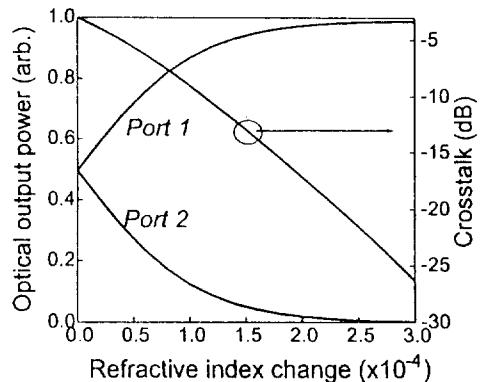


그림 2. 설계된 디지털 광스위치의 계산된 전달 특성.

전극 팁(tip) 간의 간격 g 는 효율적으로 모드전화를 유발하고 전기적인 방전(electric breakdown)을 막기 위하여 $3\ \mu\text{m}$ 로 결정하였다. 그림 2에서 알 수 있듯이, 전기광학효과에 의하여 유발되는 굴절을 변화인 약 2.4×10^{-4} 에서 $-20\ \text{dB}$ 의 누화 특성을 얻을 수 있다. 마지막으로, 푸쉬풀 형태의 전극구조가 디지털 광스위치의 스위칭 성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 상용화된 유한요소법(finite element method) 소프트웨어인 MEDICI를 이용하여 전계분포를 계산하였다. 푸쉬풀 형태 전극의 경우, 전계의 수직방향 성분은 두 전극 사이의 중앙에서는 광의 진행 방향을 따라 소멸되기 때문에 스위칭 효율을 감소시키는 요인이 되는 도파로 영역에서의 전계의 퍼짐(spreading) 효과가 크게 억제되었다. 본 논문에서는 푸쉬풀 형태의 전극에 대한 구동전압이 단일 전극 형태의 경우에 비해 2배 이상 개선되는 효과가 있다는 것을 이론적 및 실험적으로 확인하였다. 현재는 푸쉬풀 동작을 위하여 두개의 독립적인 전압원을 이용하지만 펄스폴링 기법(pulse poling technique)^[12]을 이용하면 단일 전압원으로도 가능하게 할 것이다.

III. 소자의 제작 및 특성 측정

전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 제작과정에 대한 개략도는 그림 3에 도시되어 있다. 먼저 실리콘 기판에 절연층으로서 SiO_2 를 $1.0\ \mu\text{m}$ 가량 되도록 열산화(thermal oxidation) 방식을 이용하여 성장시킨다. 그 위에 Au/Ti 금속을 진공 증착(thermal evaporation)시켜 하부전극을 형성한다. 광도파로의 코어층으로 사용되는 전기광학

폴리머는 PMMA 주축에 Disperse Red 1(DR1) 염료 분자가 축쇄결합되어 있는 형태의 비선형 폴리머이다 [poly(disperse red 1 methacrylate-co-methyl methacrylate): PMMA-DR1]. 이 전기광학 폴리머는 미국의 IBM-Almaden Research Center로부터 구매 하였다. 클래딩층(cladding layer)으로는 미국의 Master Bond사에서 공급하는 자외선 경화 에폭시(UV curable epoxy)의 일종인 UV15을 사용하였다. 프리즘 결합 방법을 이용하여 측정된 PMMA-DR1과 UV15의 굴절률은 $1.3\ \mu\text{m}$ 파장대에서 각각 1.542와 1.512였다. 또한, 소자의 신뢰성을 결정짓는 요소인 폴리머 물질의 성질에 관한 보고에 의하면, PMMA-DR1의 유리전이 온도인 131°C 보다 훨씬 낮은 온도에서 2개월에 걸쳐 전기광학 계수가 약 5% 미만 정도 감소한다고 보고되었다^[13]. 먼저 하부 클래딩층으로 UV15을 $3.2\ \mu\text{m}$ 의 두께가 되도록 스핀 코팅하고 진공상태에서 자외선에 노출시켜 경화시킨다. 광도파로의 코어층(core layer)으로는 PMMA-DR1을 두께가 $2.5\ \mu\text{m}$ 가 되도록 스핀 코팅하여 형성한다. 상부 클래딩층도 $3.2\ \mu\text{m}$ 두께의 UV15을 스핀 코팅하여 형성된다. 각각의 폴리머층을 스핀코팅한 후 용매를 제거하기 위해 충분히 베이킹(baking) 한다. 상부 전극은 Au를 진공 증착시킨다. 코어층 폴리머에 전기광학효과를 유발시키기 위하여 3층의 폴리머층에 1000 V의 전압을 인가하고 113°C 로 유지된 대류오븐에서 전계 폴링을 수행한다. 이후, 상부 폴링 전극을 습식 식각하여 광표백용 Y분기형 광도파로 마스크 패턴을 만든다. 입출력단에 광결합을 시키기 위해 실리콘 기판을 클리빙하여 단면을 형성시킨다. 최적의 센싱 성능을 갖도록 하는 적당한 도파모드 분포를 얻기 위하여 연속적으로 광표백을 수행한다. 즉, 이론적으로 가장 우수한 특성을 보이는 약 $8.5\ \mu\text{m}$ 근처의 도파모드 크기($1/e^2$)를 갖는 소자를 여러개 제작한다. 적외선 카메라(IR vidicon)를 이용하여 서로 다른 광표백 조건에 따른 도파모드 분포를 측정한다. 최종적으로, Y분기형 근처의 Au 전극을 선택적으로 제거함으로써 Y분기형 전극의 두개의 연결된 암을 서로 분리시켜서 자기정렬 전극을 형성한다. 약 $3\ \mu\text{m}$ 의 좁은 전극간격을 갖는 푸쉬풀 형태의 전극에 전압을 인가하기 위해, 미국의 Norland사에서 공급하는 자외선 경화 에폭시의 일종인 NOA61(Norland Optical Adhesive 61)을 스핀 코팅하여 전기적 절연층(electric insulating layer)을 형성하였다. 자외선 경화된 에폭시 절연층의 유전체 세기(dielectric strength)는 공기에 비해 약 10배 이상 크다.

제작된 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 전달특성을 측정하기 위한 장치의 개략도가 그림 4에 도시되어

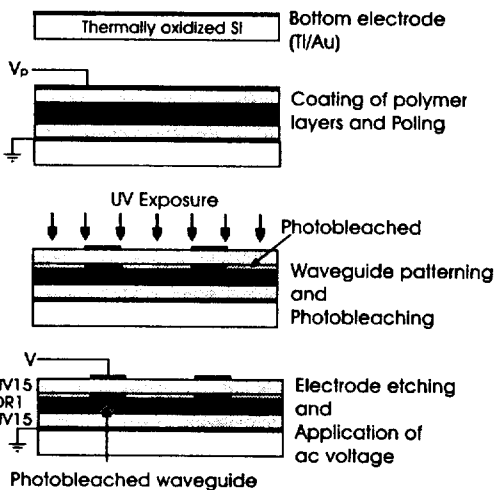


그림 3. 전기광학 폴리머 디지털 광스위치의 제작과정.

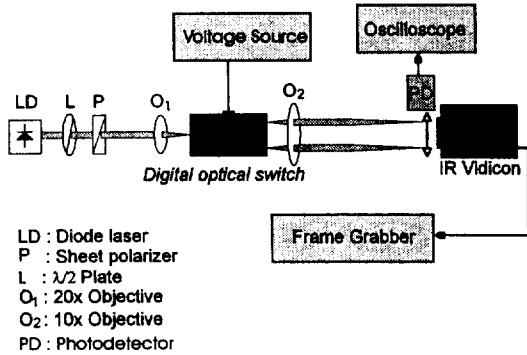


그림 4. 측정 장치.

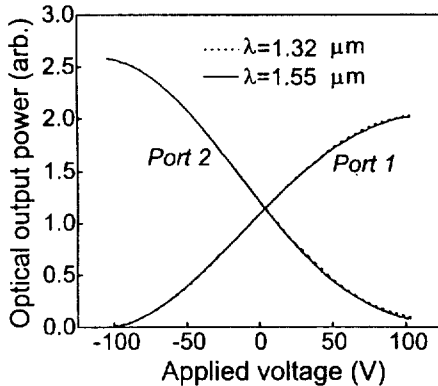


그림 5. 1.32 μm와 1.55 μm 파장대에서의 제작된 디지털 광스위치의 전달특성 측정 결과.

있다. 푸쉬풀 형태의 전극에 전압을 인가한 채 TM 편광된 1.32 μm와 1.55 μm 파장을 갖는 다이오드 레이저의 광을 입력시켰다. 두 출력 포트의 광파워는 광검출기 (photodetector)를 이용하여 측정하였다. 그림 5는 1.32 μm와 1.55 μm 파장대에서 인가전압에 따른 디지털 광스위치의 전달특성을 보여준다. 예상대로 두 파장대에서 전달특성이 거의 동일하며 인가전압에 대하여 주기적이 아닌 디지털 응답특성을 보인다. 표 1은 +95 V와 -95 V의 인가 전압에 대한 누화 및 각 출력 포트의 소멸비에 대한 측정결과를 보여준다. 입력 광파워를 포트 1로 스위칭하는 경우에는 1.55 μm와 1.32 μm의 파장대에서 각각 -13.2 dB와 -12.5 dB의 누화를 얻었다. 또한, 입력 광파워를 포트 2로 스위칭하는 경우에는 1.55 μm와 1.32 μm의 파장대에서 각각 -22.3 dB와 -21.2 dB의 누화를 얻었다. 포트 1과 포트 2의 소멸비는 1.55 μm와 1.32 μm 파장대에서 각각 21.3 dB와 20.1 dB였다. 한편, 제작 공정의 오차로 인하여 포트 1과 포트 2의 특성이 약간 달랐다. 위의 측정결과로부터, 제작된 전기광학 폴리머

표 1. +95 V와 -95 V의 인가전압에 대한 제작된 디지털 광스위치의 누화 및 소멸비에 대한 측정 결과

Wavelength	Crosstalk(dB)		Extinction ratio(dB)	
	To Port 1	To Port 2	Port 1	Port 2
1.55 μm	-13.2	-22.3	21.3	14.0
1.32 μm	-12.2	-21.2	20.1	13.2

디지털 광스위치는 1.32 μm에서 1.55 μm의 넓은 파장 대역에서 1 dB 미만의 누화 변화를 갖으면서 파장에 거의 무관하게 동작한다는 사실을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 PMMA-DR1이라는 전기광학계수가 작은 전기광학 폴리머를 이용하였기 때문에 소자의 구동전압이 비교적 컸다. 그러나, 전기광학계수가 34 pm/V까지 보고된 바 있는 DANS와 같은 성능이 우수한 전기광학 폴리머를 이용하고 브랜치의 분기각도를 감소시키면 구동전압을 더욱 개선할 수 있을 것이다.

IV. 결 론

광표백 광도파로와 자기정렬 전극을 이용하여 파장에 무관하게 동작하는 전기광학 폴리머 디지털 광스위치를 제작하였다. 스위치의 성능을 향상시키기 위하여 브랜치 영역에서 최적화된 결합을 얻기 위해 광표백 시간을 이용하여 광표백 광도파로의 도파모드분포를 적절하게 조절하였다. 또한, 광과 인가 전계의 효과적인 결합과 점진적으로 테이퍼된 전극을 형성하기 위해 자기정렬전극을 이용하였다. 측정된 누화는 1.32 μm와 1.55 μm에서 모두 -21 dB 이하였고 각 출력 포트의 소멸비도 모두 20 dB 이상이었다.

참 고 문 헌

[1] Y. Silberberg, P. Perlmutter, and J. E. Baran, "Digital optical switch", *Appl. Phys. Lett.*, **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.*, **12**, pp. 2032-2039, 1994.

[3] R. Moosburger, G. Fischbeck, C. Kostrzewa, and Petermann, "Digital optical switch based on 'oversized' polymer rib waveguides", *Electron. Lett.*, **32**, pp. 544-545, 1996.

- [4] E. V. Tomme *et al.*, "Integrated optic devices based on nonlinear optical polymers", *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, pp. 778-787, 1991.
- [5] Min-Cheol Oh, Sang-Yung Shin, Wol-Yon Hwang, and Jang-Joo Kim, "Wavelength insensitive passive polarization converter fabricated by poled polymer waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, **67**, pp. 1821-1823, 1995.
- [6] Min-Cheol Oh, Sang-Yung Shin, Wol-Yon Hwang, and Jang-Joo Kim, "Poling-induced waveguide polarizers in electrooptic polymers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, pp. 375-377, 1996.
- [7] 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.*, **26**, pp. 379-380, 1990.
- [8] Sang-Shin Lee, She-Won Ahn, Min-Cheol Oh, and Sang-Yung Shin, "Integrated optical high-voltage sensor based on a polymeric Y-branch digital optical switch", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, pp. 921-923, 1996.
- [9] Sang-Shin Lee and Sang-Yung Shin, "Polymeric digital optical switch with a linear branch and an optimized coupling", in preparation, 1996.
- [10] Y. Chung and N. Dagli, "An assessment of finite difference beam propagation method", *IEEE J. Quantum Electron.*, **26**, pp. 1335-1339, 1990.
- [11] W. K. Burns, M. M. Howerton, and R. P. Moeller "Performance and modeling of proton exchanged LiTaO3 branching modulators", *IEEE J. Lightwave Technol.*, **10**, pp. 1403-1408, 1992.
- [12] T. A. Tumolillo, Jr. and P. R. Ashley, "A novel pulse-poling technique for EO polymer waveguide devices using device electrode poling", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4**, pp. 142-145, 1996.
- [13] J. I. Thackara, J. C. Chon, G. C. Bjorklund, W. Volksen, and D. M. Burland, "Polymeric electro-optic Mach-Zehnder switches", *Appl. Phys. Lett.*, **67**, no. 26, pp. 3874-3876, 1995.

Polymeric Digital Optical Switch Based on Photobleached Waveguides

Sang-Shin Lee and Sang-Yung Shin

*Dept. of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
373-1 Kusong-dong, Yusong-gu, Taejon, 305-701 Korea*

(Received: July 1, 1996)

An electro-optic polymer digital optical switch was fabricated by using a photobleached waveguide and a self-aligned electrode. It features wavelength insensitive operation, fabrication tolerance and flexible design. And its possible advantages include low coupling losses to the fibers and wide bandwidths. For improving its switching performance, the guided mode profiles of the photobleached waveguides were controlled by photobleaching times to achieve optimized coupling in the branch. And the self-aligned electrode was employed to achieve both efficient overlap of the optical and electric fields and easy introduction of the adiabatically tapered electrodes. The measured crosstalks were better than -21 dB at 1.32 μm and 1.55 μm, and the extinction ratios of each output port were also more than 20 dB.