

## 트렌치 구조를 이용한 저전력 1×2 폴리머 열 광학 스위치의 제작

여동민<sup>†</sup> · 김기홍 · 신상영

한국과학기술원 전자전산학과

Ⓣ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

(2002년 10월 4일 받음, 2002년 2월 7일 수정본 받음)

트렌치 구조를 이용한 저전력 1×2 폴리머 열 광학 스위치를 제안하고 제작하였다. 최적의 위치에 적절히 형성된 트렌치 구조는 전극으로부터 발생한 열 흐름을 방해하여 전력 소모를 줄이는데 기여할 수 있다. 광 도파로를 구성하는 폴리머 층에서의 온도 분포가 변하여 Y-분기를 이루는 두 도파로들 사이의 온도 기울기가 급격하게 증가하기 때문이다. 본 실험에서는 트렌치 구조의 효과를 비교 분석하기 위해 트렌치 구조가 없는 1×2 폴리머 열 광학 스위치도 동일한 기판 위에 함께 제작하였다. 트렌치 구조를 이용한 열 광학 스위치의 경우, 측정된 누화는 TE 편광에서 -17.0 dB 이하, TM 편광에서 -15.0 dB 이하였다. 전력 소모는 트렌치 구조가 없는 열 광학 스위치의 소모 전력보다 25% 감소한 약 66 mW였다.

주제어 : trench structure, low power, polymeric thermo-optic switch.

### I. 서 론

최근 음성, 데이터, 영상 등 멀티미디어를 고속으로 전송, 교환할 수 있는 초고속 광대역 종합 광 통신망을 구현하는 연구가 전 세계적으로 진행되어오고 있다. 또한 각 가입자에게 다양한 서비스를 고속으로 제공할 수 있는 분배망에 대한 연구도 함께 이루어지고 있다. 이러한 초고속 광대역 통신망과 분배망들을 구성하는데 있어 광 스위치는 광 경로 제어를 위한 핵심적인 소자 가운데 한 가지라 하겠다. 이러한 응용에서 Y-분기 광 도파로 열 광학 스위치를 기본 단위 소자로 하여 스위치 어레이(switch array)<sup>1,2</sup>나 매트릭스 스위치(matrix switch)<sup>3,4</sup> 등을 제작하는 경우 하나의 단위 소자에서 소모되는 전력을 최소화하는 것은 중요한 일이 된다.

열 광학 스위치의 경우, 전력 소모를 줄이는 많은 방법들이 연구되어왔으나<sup>5,6</sup> 복잡한 제작 과정에 비해 소모 전력이 크거나 소자의 제작 공정상 정확한 정렬(alignment) 식각이 어렵다는 점이 있었다. 그러나, 이러한 방법들의 공통점은 효율적인 열 분포를 얻는 문제로 귀결되고 있다는 것이다. 열 광학 소자에서는 소자 내부의 열 분포 변화가 바로 동작에 직접적인 영향을 미치는 굴절률 변화를 의미하기 때문이다.

본 연구에서는 흔히 기본 단위 소자로 많이 사용되고 있는 Y-분기 광 도파로를 사용한 1×2 열 광학 스위치에 트렌치 구조를 도입하여 소자 내에서 보다 효율적인 열 분포를 얻고자 하였다. 또, 스위칭에 필요한 소모 전력을 더욱 줄이기 위해 열 광학 효과가 다른 재료에 비해 우수한 폴리머를 사용하였다.

### II. 트렌치 구조를 이용한 1×2 폴리머 열 광학 스위치의 구조와 동작 원리

기본적으로 립(rib) 형태의 대칭형 Y-분기 광 도파로 구조를

채택하였으며, 광 도파로 주변 최적의 위치에 도입된 트렌치 구조가 전극으로부터 발생된 열의 흐름을 완화시켜 도파로 층에서 효율적인 열 분포를 가질 수 있도록 하였다. 그림 1에 제안된 트렌치 구조를 이용한 저전력 1×2 폴리머 열 광학 스위치의 단면을 나타내었다. 이 구조물의 열 분포는 Y-분기된 두 도파로 모드들의 상대적 유효온도 차를 트렌치 구조가 없는 열 광학 스위치에서 보다 더욱 증가시켜 소모 전력의 감소에 기여하게 된다.

실리콘(Si) 기판 위에 상·하부 클래딩(cladding) 물질로 Perfluorocyclobutane(PFCB)을, 코어(Core) 물질로는 Benzocyclobutane(BCB)을 사용하였다. 이 물질들은 Dow Chemical사에서 합성한 것으로 우수한 열적 안정성을 가지고 있고 본질적으로 등방성 매질이므로 편광 무의존 특성을 기대할 수 있다. 그리고 전극은 금(gold)을 증착시켜 만들었다. 상·하부 클래딩의 굴절률은 1,550 nm에서 1.4867, 코어의 굴절률은 1,550 nm에서 1.5434이다.

유효굴절률 방법(effective index method)을 통해, 각각 코어 물질과 클래딩 물질로 사용된 BCB와 PFCB의 굴절률 차가 매우 크기 때문에 광 도파로가 단일 모드를 가지기 위해서는 코어 층의 두께가 매우 얇아야함을 알 수 있다. 그러나 코어 층을 얇게 쌓게 되면 공정상의 어려움 뿐 아니라, 광을 소자

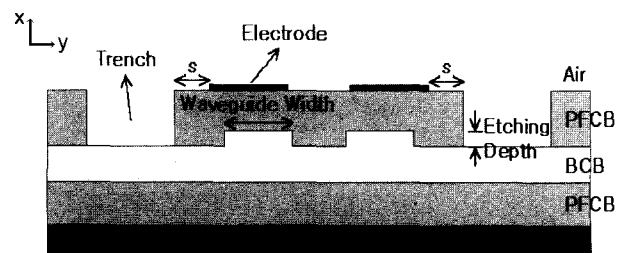


그림 1. 트렌치 구조를 이용한 저전력 1×2 폴리머 열 광학 스위치의 단면 구조.

<sup>†</sup>E-mail: headers@ceinfo.kaist.ac.kr

로 입사시킬 때 광섬유와 도파로 간의 결합손실도 증가하는 등의 문제를 초래하게 된다. 따라서 큰 두께의 코어 층을 가지면서도 단일 모드를 도파시키는 과도한 립(oversized rib) 형태로 광 도파로를 제작하였다.

유효굴절률 방법과 과도한 립 형태의 광 도파로가 단일 모드를 가지는 조건들<sup>7)</sup>로부터 도파로 폭은  $6.5\ \mu\text{m}$ , 코어 층의 두께는  $5\ \mu\text{m}$ , 그 식각 깊이는  $1.5\ \mu\text{m}$ 로 각각 정하였다. 또, Y-분기된 두 도파로들 사이의 분기각은  $0.12^\circ$ 였다.

### III. 열 해석을 통한 트렌치 구조와 전극 설계

열 광학 스위치를 만들 때, 열 해석의 가장 큰 목적은 열 해석을 통해 얻어진 열 분포에서 Y-분기된 두 도파로 모드들의 유효온도 차를 최대한으로 하는 데에 있다. 그림 1과 같은 단면 구조에 대해 유한 요소 방법(finite element method)을 이용하여 트렌치 구조를 고려한 열 해석<sup>8)</sup>을 통해 전극과 트렌치 구조 사이의 간격  $s$ 의 변화에 따라 도파로 층에서의 온도 분포 변화는 그림 2처럼 경향을 보인다.  $x=0$ 인 지점이 그림 1에서 왼쪽 전극 중심의 위치이다.

전극에서 같은 전력으로 동일한 열을 발생시키더라도 트렌치 구조의 위치에 따라 온도 분포가 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 그림 2는 트렌치 구조의 위치가 전극에 가까워져 그 영향이 커질수록 분기된 두 도파로 모드들의 온도 차를 크게 할 수 있으므로 그만큼 더 효율적인 열 분포를 가진다는 의미이다.

그러나 트렌치 구조의 위치가 전극에 가까워질수록 도파로 모드가 트렌치 구조의 불균일한 식각 단면으로부터 산란 손실(scattering loss)을 겪으면서 진행하게 될 위험이 커진다. 그리하여 3차원 유한 차분 빔 전파 방법(*beam propagation method*)으로 수치 모사하여 광 도파로가 가지는 고유 모드의 모양과 크기에 대해 살펴보았다. 그림 3은 수치 모사에 사용한 광 도파로의 단면 방향 굴절률 분포이고, 그림 4는 수치 모사 결과 얻어진 광 도파로의 고유 모드의 모양 및 크기를

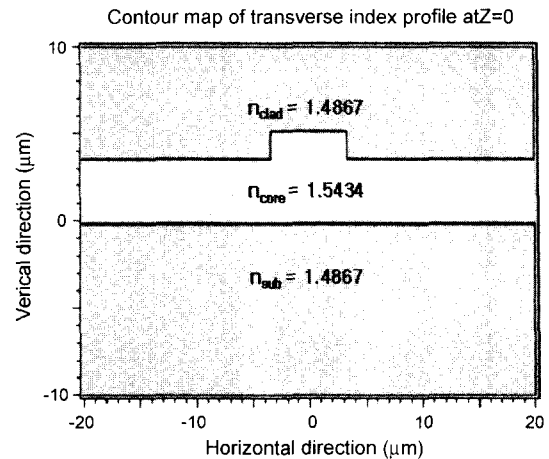


그림 3. 광 도파로의 단면 방향 굴절률 분포.

나타낸 것이다. 도파로 모드가 산란 손실을 겪지 않고 트렌치 구조로부터 최대한의 효율적인 열 분포를 얻기 위해, 공정 과정에서 보통  $1\sim 3\ \mu\text{m}$  정도의 정렬 오차가 생기는 것을 감안할 때, 트렌치 구조의 위치는  $s=6\ \mu\text{m}$ 가 적절함을 알 수 있었다.

그림 4는 고유 모드 중심의 최고 진폭(amplitude)값에 대해 정규화(normalization)되어있다.

전극과 트렌치 구조 사이의 간격  $s$ 를 적절하게 결정하는 것과 더불어 트렌치 구조의 식각 깊이도 중요한 설계 요소이다. 열 해석을 통하여, 트렌치 구조의 식각 깊이가 그림 1에서처럼 코어 층의 바로 위까지의 깊이 이상이지만 하면 도파로 층에서의 열 분포에는 거의 변화가 없음을 알 수 있었다. 따라서 트렌치 구조에 의한 산란 손실을 최소화하면서 도파로 층에서 효율적인 열 분포를 유지하기 위해 트렌치 구조의 식각 깊이를 코어 층의 바로 위까지로 하였다.

열 광학 스위치에서는 분기된 두 도파로 모드들의 실제 온도 차보다 인근 도파로 모드에 대해 상대적인 유효온도 차가 더 중요하다.  $i$ 번째 광 도파로의 고유 모드의 유효온도는 다음의 식 (1)처럼 정의<sup>9)</sup>된다.

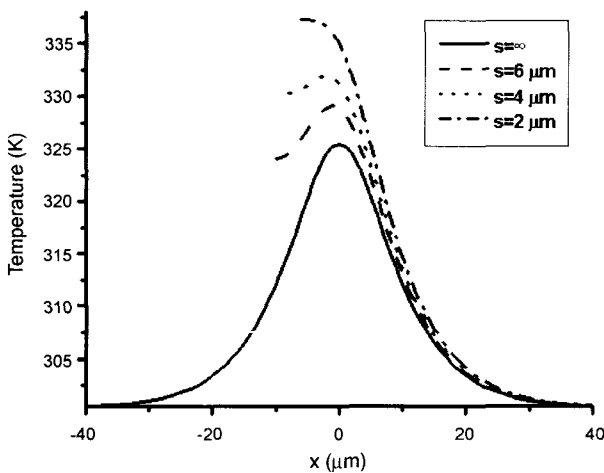


그림 2. 전극과 트렌치 구조 사이의 간격  $s$ 의 변화에 따른 도파로 층에서의 온도 분포 변화.

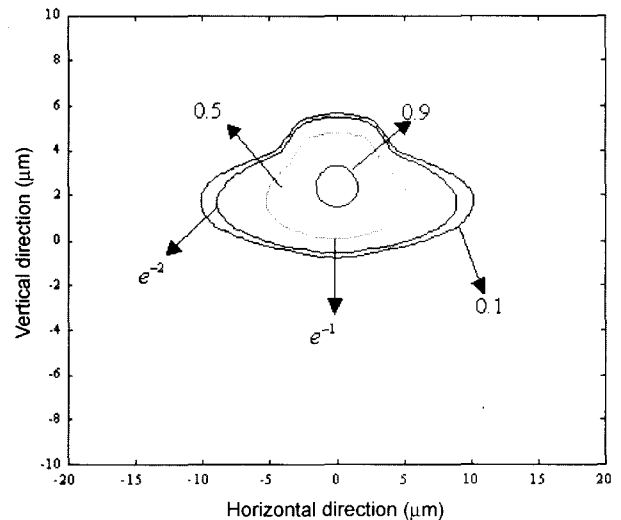


그림 4. 광 도파로의 고유 모드의 모양 및 크기.

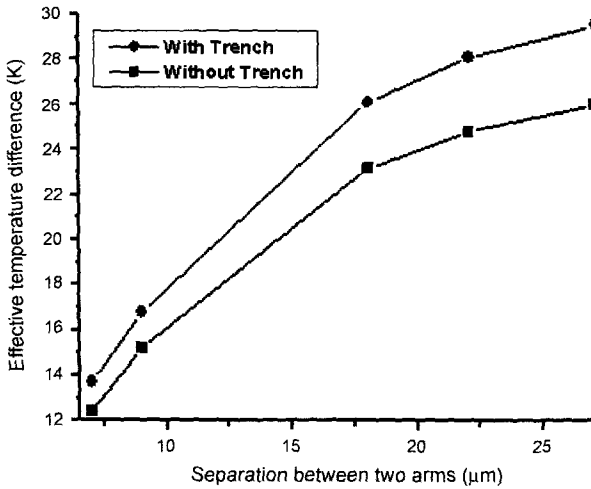


그림 5. Y-분기된 두 도파로들 사이의 거리에 따른 유효온도 차.

$$T_i = \frac{\iint_{A_i} T(x, y) \times I_i(x, y) dx dy}{\iint_{A_i} I_i(x, y) dx dy} \quad (1)$$

$T_i$ :  $i$ 번째 광 도파로의 고유 모드의 유효온도

$T(x, y)$ : 실제 온도 분포

$I_i$ :  $i$ 번째 광 도파로의 정규화된 광 세기 분포

$A_i$ :  $i$ 번째 광 도파로의 고유 모드의 크기에 해당하는 적분 영역

광의 진행 방향을 따라 Y-분기된 두 도파로들 사이의 거리 (도파로의 중심에서 중심까지의 거리)가 점차 증가하게 되고 각 지점에서 얻을 수 있는 유효온도 차를 아래 그림 5에 나타내었다.

그림 5에서 트렌치 구조를 이용한 열 광학 스위치가 그렇지 않은 경우에 비해 항상 유효온도 차를 더 크게 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이는 트렌치 구조에 의해 열 광학 스위치의 전력 소모를 줄일 수 있는 확실한 근거가 된다. 그림 5에서 드 그래프 아래의 면적비로부터 대략 25% 정도의 소모 전력 개선 효과를 기대할 수 있다. 이 때 트렌치 구조는 두 도파로들 사이의 거리가 약 27 μm 될 때까지 존재한다. 이 지점이 Y-분기된 두 도파로 모드들이 서로 결합 현상을 일으키지 않을 만큼 충분히 떨어질 때까지 진행된 것을 의미하기 때문이다. 이는 그림 5에서 두 도파로들 사이의 거리가 증가함에 따라 두 그래프의 기울기 차가 점차 0으로 수렴해가고 있음을 보고 알 수 있다. 즉 트렌치 구조가 이 이상 존재하더라도 두 그래프 아래의 면적비에는 더 이상 변화가 없고 분기된 두 도파로 모드들이 서로 결합하여 영향을 미치는 일이 일어나지 않는 영역에서는 트렌치 구조의 효과가 없을 것이라는 예상과도 일치하는 분석이다.

#### IV. 트렌치 구조를 이용한 1×2 폴리머 열 광학 스위치의 제작 및 측정

채널 광 도파로와 트렌치 구조는 반응 이온 식각(reactive ion

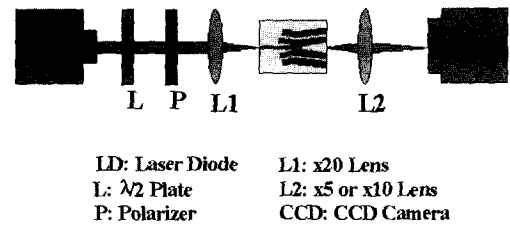


그림 6. 측정 장치 구성.

etching) 공정을 이용하여 만들었다.

제작된 소자의 특성 측정 장치는 그림 6과 같다. 레이저 다이오드에서 나오는 1,550 nm 파장을 갖는 입력 광을 편광기와 위상 변조판( $\lambda/2$  plate)을 이용하여 원하는 선편광(linear polarization) 상태로 만들고, 이 광을 20배 대물 렌즈를 이용해 제작된 소자에 결합(end-fire coupling)시켰다. 출력단에서 나오는 출력 광은 적외선 CCD 카메라를 통하여 모드를 관측하고, 오실로스코프를 사용하여 스위칭 특성을 측정하였다.

트렌치 구조의 효과를 비교 분석하기 위해 동일한 기판 위

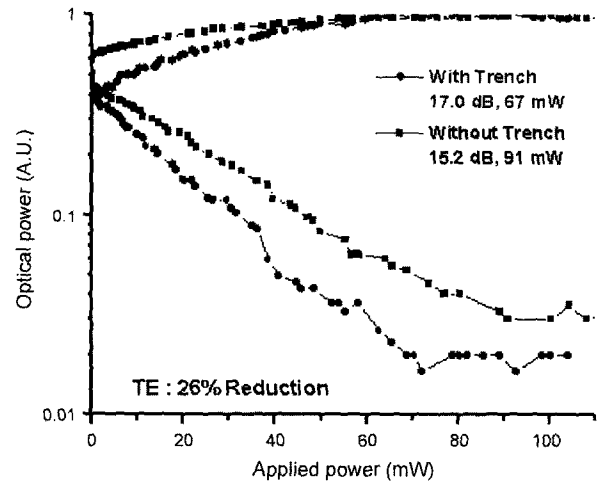


그림 7. 스위치의 TE 편광 전달 특성.

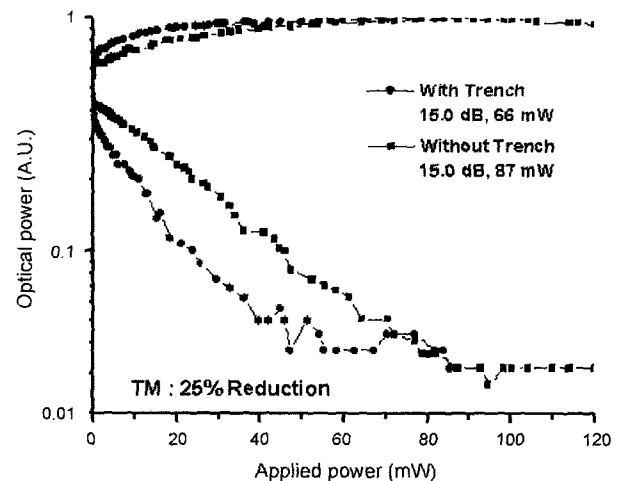


그림 8. 스위치의 TM 편광 전달 특성.

표 1. 스위치의 동작 지연 특성.

	With Trench		Without Trench	
	TM	TE	TM	TE
Rising time	0.3 ms	0.3 ms	0.2 ms	0.3 ms
Falling time	1.0 ms	1.0 ms	0.8 ms	0.9 ms

표 2. 스위치의 추가 손실.

	With Trench		Without Trench	
	TM	TE	TM	TE
Excess loss	0.83 dB	0.75 dB	0.32 dB	0.24 dB

에 기존의 트렌치 구조가 없는 1×2 폴리머 열 광학 스위치도 함께 제작하였다. 그림 7, 8은 트렌치 구조의 유무에 따라 비교하여 각 편광에 대해 측정된 스위치의 전달 특성을 나타낸 것이다.

누화 특성은, 트렌치 구조가 있는 경우 TE 편광에서 -17.0 dB 이하, TM 편광에서 -15.0 dB 이하였고, 그렇지 않은 경우에는 TE 편광에서 -15.2 dB 이하, TM 편광에서 -15.0 dB 이하였다.

스위칭에 필요한 소모 전력은 스위치의 전달 특성에서 누화 특성이 거의 정상 상태에 이르는 시점에서의 전력 값으로 정의되고, 트렌치 구조가 있는 경우 약 66 mW, 트렌치 구조가 없는 경우 약 89 mW로 각각 측정되었다. 측정 결과로부터 트렌치 구조를 사용하여 대략 25% 정도의 소모 전력이 줄어들었음을 확인하였다. 이는 시뮬레이션 과정을 통해 예측한 값과 일치하는 결과이다. 나아가 소자 제작 중에 보통 발생하는 1~3 μm 정도의 정렬 오차 범위가 1 μm 이하로만 보장된다면 전극과 트렌치 구조 사이의 간격 s를 6 μm 이하로 좁혀 전력 소모를 더욱 줄일 수 있을 것이다.

다음 스위치의 응답 시간을 측정하여 트렌치 구조에 의해 스위치의 동작이 약간 지연됨을 관측하였다. 그 측정 결과는 표 1과 같다.

초기 상태에서 계단 응답을 하는 데 필요한 시간인 상승 시간(rising time)은 전극에 가한 변조 신호에 반응하는 데 걸리는 시간이고, 이 후 다시 초기 상태로 돌아가는 데 걸리는 시간인 하강 시간(falling time)은 전극에 가해지던 변조 신호가 사라져 열이 식으면서 초기 상태로 돌아가는 시간에 크게 의존한다. 이 때 트렌치 구조가 있는 경우 열의 빠짐이 그만큼 나빠지므로 동작 지연이 약간 증가하는 경향을 보이는 것이다.

스위치와 동일한 길이의 직선 도파로와 비교하여 추가적으로 발생한 손실은 표 2와 같다.

따라서 트렌치 구조에 의한 추가 손실은 편광에 관계없이 0.51 dB임을 확인할 수 있다. 제작된 소자의 삽입 손실은 약 11 dB 정도로 나타났고 소자 길이는 2 cm였다. 이는 코어 물질로 사용된 BCB가 물질 구조상 C-H 결합을 가지고 있어 일반적으로 1,550 nm 파장에서 대략 2 dB/cm 정도의 큰 전파 손실을 보이므로 긴 소자 길이로 인한 전파 손실과 모드 부정

합 손실 등에 의한 것이다.

## V. 결 론

트렌치 구조를 도입하여 기존의 트렌치 구조가 없는 열 광학 스위치보다 더 효율적인 열 분포를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그리하여 기존의 트렌치 구조가 없는 경우 스위칭에 필요한 소모 전력의 25% 정도를 줄일 수 있었다. 실제 소자 제작 중에 보통 발생하는 정렬 오차를 줄인다면 전극과 트렌치 구조 사이의 간격을 좀더 좁혀 전력 소모를 더욱 줄일 수 있을 것이다. 제작된 트렌치를 이용한 저전력 1×2 폴리머 열 광학 스위치는 TE 편광에서 -17.0 dB, TM 편광에서 -15.0 dB의 누화 특성을 보였다. 트렌치 구조에 의한 추가 손실은 0.51 dB로 얻어졌다.

## 참고문헌

- [1] M.-H. Lee, Y. H. Min, S. T. Park, J. J. Ju, J. Y. Do, and S.-K. Park, "Fully packaged polymeric four arrayed 2×2 digital optical switch," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 5, pp. 615-617, 2002.
- [2] M. N. Khan, B. I. Miller, E. C. Burrows and C. A. Burrus, "Integrated high-speed 1×4 digital Y-branch switch array with passive taper fanouts for fibre interconnection," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 6, pp. 484-485, 1999.
- [3] Takashi Goh, Akira Himeno, Masayuki Okuno, Hiroshi Takahashi, and Kuninori Hattori, "High-extinction ratio and low-loss silica-based 8×8 strictly nonblocking thermo-optic matrix switch," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 7, pp. 1192-1199, 1999.
- [4] Masayuki Okuno, Kuniharu Kato, Ryo Nagase, Akira Himeno, Yasuji Ohmori, and Masao Kawachi, "Silica-based 8×8 optical matrix switch integrating new switching units with large fabrication tolerance," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 5, pp. 771-781, 1999.
- [5] Martin Hoffmann, Peter Kopka, and Edgar Voges, "Thermo-optical digital switch arrays in silica-on-silicon with defined zero-voltage state," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 395-400, 1998.
- [6] S.-S. Lee, J.-U. Bu, S.-Y. Lee, K.-C. Song, C.-G. Park, and T.-S. Kim, "Low-power consumption polymeric attenuator using a micromachined membrane-type waveguide," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 4, pp. 407-409, 2000.
- [7] Richard A. Soref, Joachim Schmidtchen, and Klaus Petermann, "Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO<sub>2</sub>," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 8, 1991.
- [8] O. Axelsson, and V. A. Barker, *Finite Element Solution of Boundary Value Problems* (Academic Press, Inc., 1984).
- [9] 송현채, "4분기 광도파로를 이용한 1×4 광파워분할기와 열광학스위치," 한국과학기술원 박사학위논문, 2000.

## **Fabrication of a low-power 1×2 polymeric thermo-optic switch with a trench structure**

Dong-Min Yeu<sup>†</sup>, Ki-Hong Kim, and Sang-Yung Shin

*Department of Electrical Engineering & Computer Science,  
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, KOREA*

*<sup>†</sup>E-mail: headers@eeinfo.kaist.ac.kr*

(Received October 4, 2002, Revised manuscript January 2, 2003)

A low-power 1×2 polymeric thermo-optic switch with a trench structure is proposed and fabricated. The trench structure in the optimized region slows down the heat flow from the electrodes, which contributes to the reduction of power consumption. The temperature distribution in the polymer layers has been adjusted to increase the temperature gradient between the two arms of the Y-branch. For comparison, a 1×2 polymeric thermo-optic switch with no trench structure is fabricated together on the same substrate. In the device with a trench structure, the measured crosstalk is less than -17.0 dB for TE polarization, -15.0 dB for TM polarization. The power consumption is about 66 mW, which is 25% less than that of the device with no trench structure.

*Classification codes* : OE.010, OE.030.