

## 전극 구조의 최적화를 통한 저전력 열광학 스위치 설계

최철현 · 공창경 · 이민우 · 성준호 · 이승걸 · 박세근 · 이일항 · 오범환<sup>†</sup>

인하대학교 정보통신공학부, 집적형 광자기술 연구센터  
 ☎ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

(2009년 6월 1일 받음, 2009년 9월 21일 수정본 받음, 2009년 9월 21일 게재 확정)

본 논문에서는 높은 소멸비뿐만 아니라 낮은 파워 소모를 가지는 방향성 결합기 구조의 열광학 스위치를 설계하였다. 설계된 스위치는 전극의 열발생 유무에 따라 폴리머의 굴절률이 변하는 열광학 효과를 이용하여 동작한다. 전극에 파워가 인가되지 않으면(OFF), 입사된 빛은 반대쪽 도파로로 대부분 전이된다. 전극에 일정수준 이상으로 파워가 인가되면(ON), 입력 도파로로 입사된 빛은 반대쪽 도파로의 굴절률이 낮아져 입력 도파로로 진행한다. 방향성 결합기 스위치는 소멸비 일반화 곡선과 입력 도파로의 수평이동 방법을 이용하여 설계되었다. 결합길이는 1,610  $\mu\text{m}$ , on과 off 상태의 소멸비는 각각 -28, -30 dB로 설계되었다. 또한, 본 논문에서 전극 구조는 열분석을 통해 최적화되었다. 전극의 폭(w)이 증가하고 전극과 도파로의 중심간격(d)이 감소할수록 도파로로 전달되는 열은 증가하였다. 전극에서 발생한 열은 반대쪽 도파로에도 영향을 주기 때문에 두 도파로간의 온도차이는 주어진 w와 d에 따라 변한다. 이때, 최대의 온도차이를 보이는 특정한 조건이 존재하였다. 최대 온도차이는 전극의 폭이 넓을수록, 전극의 온도가 높을수록 증가한다. 특히, 스위칭에 필요한 온도차이를 최대 온도차이 조건으로 설계하면 전극의 온도를 낮출 수 있다. 최대 온도차이 조건은 열광학 스위치의 파워소모를 감소시키는 방안이 될 것으로 기대된다.

### Design of Thermo-optic Switch with Low Power Consumption by Electrode Optimization

Chul Hyun Choi, Chang Kyeng Kong, Min Woo Lee, Jun-Ho Sung, Seung Gol Lee,  
 Se-Geun Park, El-Hang Lee, and Beom-Hoan O<sup>†</sup>

*Optics and Photonics Elite Research Academy (OPERA), School of Information and Communication Engineering, INHA University,  
 253 YongHyun-Dong, Nam-Gu, Incheon 402-751, Korea*

<sup>†</sup>E-mail: obh@inha.ac.kr

(Received June 1, 2009; Revised manuscript September 21, 2009; Accepted September 21, 2009)

We designed a thermo-optic switch based on a directional coupler with not only a high extinction ratio but also significantly low power consumption. The switch operates by using the thermo-optic effect of the polymer which the refractive index changes by heating the electrode. If the electrode is not powered (OFF), the input light will be coupled completely to the other waveguide. When the electrode is powered at a certain level (ON), input light launched into the input waveguide will remain in that waveguide due to the lower index adjusted in the other waveguide. The switch based on the directional coupler was designed using the generalized extinction ratio curve and the lateral shift of the input waveguide. The coupling length is 1,610  $\mu\text{m}$  and the extinction ratios are -28 and -30 dB for ON and OFF states, respectively. The electrode structures were optimized by thermal analysis. The transported heat into the waveguide is increased, as the electrode width (w) is increased and the center distance between the electrode and the waveguide (d) is decreased. Also, because the heat generated in the electrode affects the other waveguide, the temperature difference between two waveguides is varied as the given w and d. There are specific conditions which have the maximum of the temperature difference. That of the temperature difference is increased as the width and the temperature of the electrode are increased. Especially, when the switch is designed using the condition with the maximum of the temperature difference for switching, the temperature of the electrode can be decreased. We expect this condition will be the novel method for the reduction of the power consumption in a thermo-optic switch.

Keywords: Thermo-optic switch, Directional coupler, Extinction ratio

OCIS codes: (060.1810) Buffers, couplers, routers, switches, and multiplexers; (230.7370) Waveguides; (250.5300)

Photonic integrated circuits

<sup>†</sup>E-mail: obh@inha.ac.kr

## I. 서 론

방향성 결합기(directional coupler)는 근접한 두 도파로 사이의 광전이 현상을 이용하여 동작하는 광소자로서, 광통신이나 광집적회로에 있어서 기능성 소자의 근간이 되는 대표적인 광소자이다.<sup>[1-4]</sup> 광전이 현상 및 전이길이를 조절하여 광변조기, 광필터 및 광결합/분배기, 광스위치 등의 기능성 광소자로 널리 활용된다. 광스위치로 응용되는 방향성 결합기는 열광학 효과와 전기광학 효과 등을 이용하여 동작하며 그 중 열광학효과를 이용한 열광학 스위치는 광신호의 경로 변경이나 시스템 보호 등의 상대적으로 느린 속도로 동작하는 분야에 응용된다.<sup>[5,6]</sup> 이러한 열광학 스위치에서 주요 성능 사항으로는 스위치의 크기, 편광, 누화(crosstalk), 손실, 파워소모 등이며 특히, 파워소모를 줄이기 위해 두 도파로 사이에 미세 트렌치(trench) 구조를 만들어 불필요한 열이 반대쪽 도파로로 전이되는 것을 억제하는 구조, 기판의 밑부분을 제거한 멤브레인 구조, 이중 물질을 사용하는 구조 등이 제안되었다.<sup>[6-8]</sup>

본 논문에서는 방향성 결합기 구조의 열광학 스위치에서 입력 도파로의 수평이동 및 소멸비 일반화 곡선을 이용하여 광스위치의 크기 및 소자성능과 관련된 결합길이와 소멸비를 각각 최적화하였다. 또한, 스위치의 파워소모를 감소시키기 위해 임의의 구조를 추가하거나 변경하는 것 없이 최대 온도차이 조건을 이용한 설계를 하였으며 이는 스위칭을 위한 전극의 온도를 낮출 수 있어 효율적으로 열광학 스위치의 파워소모를 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## II. 방향성 결합기 스위치 설계

그림 1 (a)는 본 논문에서 설계된 방향성 결합기 구조의 열광학 스위치 구조도이다. 열광학 효과를 발생시키는 전극은 입력 도파로의 반대쪽에 위치한다. 전극이 off 상태일 때 입사된 광에너지는 반대쪽으로 결합되어 출력되고 전극이 on 상태일 때 입사된 빛은 반대쪽으로 결합되지 않고 입력 도파

로 출력된다. 이때 off 상태의 스위치는 일반적인 방향성 결합기로 동작하며 결합기 내의 두 기본 도파모드로의 전이 계수가 약간 다른 것으로 인해 소멸비 특성이 열화된다. 이러한 경우 근사적으로는 결합길이를 진행한 후 대부분의 광에너지가 출력 도파로 쪽으로 전이되지만, 두 모드 사이의 불완전한 상쇄로 인하여 입력 도파로 쪽에도 잔여 광에너지가 남아 있게 된다. 이로 인해 소멸비는 나빠지며 시스템의 요구성능을 맞추기 위한 허용 오차는 작아지게 된다. 또한, 도파로 폭이나 두 도파로 사이 간격 등 제작 공정상의 크기 변화에 대해 소멸비 열화가 발생하여 제작 허용오차는 더욱 작아진다. 결합영역에서 우함수와 기함수의 전이계수 차이를 감소시켜 소멸비를 개선시킬 수 있으므로<sup>[9]</sup> 입력 도파로를 방향성 결합기 외측으로 1.5  $\mu\text{m}$  수평이동하여 접촉시키면, 수평이동이 없는 일반적인 경우와 비교하여 소멸비는 약 7 dB 정도 향상된다. 또한, 이러한 소멸비 향상을 통해 공정상의 오차로 발생하는 소멸비 열화를 보상하고 그 보상범위를 넓힐 수 있어 일반적인 경우와 비교하여 제작 허용오차를 향상시킬 수 있다. 그러나 수평이동 거리가 증가할수록 소멸비를 증가시킬 수 있으나 모드 부정합이 발생하여 접합손실이 증가한다. 1.5  $\mu\text{m}$ 의 수평이동거리에 대한 접합손실은 약 1 dB 이내이다. 방향성 결합기 설계에 있어서, 여러 설계 변수(도파로 폭과 높이, 굴절률, 파장, 도파로 간격)들이 상호 복합적으로 관여하고 있어서 그 설계가 직관적이지 않으며 특히, 소자 성능과 관련된 소멸비는 반복적인 계산이 수반되어 다소 번거로울 수 있다. 그러나, 앞서 언급된 변수들에 대한 변화경향을 분석한 소멸비 일반화 곡선을 이용하면 방향성 결합기의 소멸비를 미리 설정할 수 있어 직관적인 분석이 가능하며 방향성 결합기의 중요한 성능지표인 소멸비를 최적화할 수 있다. 또한, 일반적으로 결합길이가 길어지면 소멸비는 증가하지만 소자 길이가 길어지는 단점이 발생한다. 본 논문에서는 소멸비 일반화 곡선을 사용하여 소멸비를 대략적으로 설정한 후 이로부터 앞선 설계 변수들을 결정함으로써 결합길이를 최적화할 수 있었다.<sup>[10]</sup> 이를 이용하여 설계된 결합길이는 1,610  $\mu\text{m}$ 이며 도파로 폭과 간격은 모두 4  $\mu\text{m}$ 이

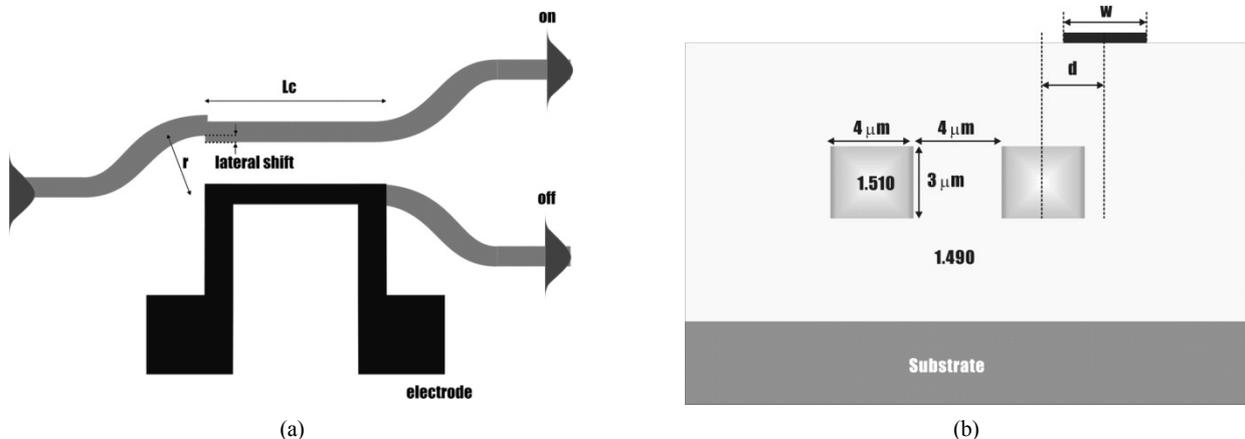


FIG. 1. Schematics of the directional coupler switch. (a) top view and (b) cross-sectional view.

다. 여기서 사용된 파장은  $1.55 \mu\text{m}$ 이며 코어와 클래딩의 굴절률은 각각 1.510, 1.490이다. 설계된 단면구조를 그림 1 (b)에 나타내었다. 매립형 도파로 구조로서 코어의 높이는  $3 \mu\text{m}$ 이다. 전극은 입력 도파로와는 반대쪽에 위치하며 상부 클래딩 위에 존재한다.

본 논문에서 설계된 방향성 결합기 광스위치는 폴리머의 열광학 효과를 기반으로 열 발생시 굴절률이 낮아지는 특성을 이용하며, 광결합 현상을 이용한 off 상태와 광결합 현상을 억제하는 on 상태로 나누어서 동작한다. 이에 대한 동작을 그림 2 (a), (b)에 각각 나타내었다. 전극에서 열이 발생하지 않는 경우는 그림 2 (a)와 같이 두 도파로의 굴절률이 동일하며 광결합 현상이 발생한다. 이와는 반대로 전극에서 열이 발생할 경우는 폴리머의 열광학 효과로 인해 그림 2 (b)와 같이 전극쪽 도파로의 굴절률이 낮아져 두 도파로간의 굴절률 차이가 발생한다. 비대칭성으로 인해 광결합 현상이 억제되어 입력 도파로의 광에너지는 계속하여 입력 도파로쪽으로 진행한다.

광스위치 동작을 위해 필요한 온도 변화를 결정해야 하며 이를 위해 우선적으로 두 도파로간의 굴절률 차이에 대한 결합길이( $1,610 \mu\text{m}$ )에서 소멸비 변화를 계산해야 한다. 그림 3 (a)는 두 도파로 간의 굴절률 차이( $\Delta n$ )에 따른 광스위치의 소멸비 변화이며 입력 도파로의 수평이동은  $1.5 \mu\text{m}$ 이다. off 상태에서는 통상적인 방향성 결합기로서 cross state로 전이되고 열이 발생하는 on 상태에서는 두 도파로간의 비대칭성에 의한 광결합 억제에 따라 소멸비가 좌우되며 bar state로 진행한다. off 상태(그림 3 (a)에서 (1)번 경우)에서 약  $-28 \text{ dB}$ 의 소멸비를 보이고 있다. 이에 대해 결합영역에서의 광진행 경로를 그림 3 (b)에 나타내었으며 결합길이에서 cross state로 전이되어 출력됨을 알 수 있다. 그림 3 (a)에서 (2)번 경우는 굴절률 차이가  $\Delta n=0.001$ 인 on 상태로써 bar state로 출력되며 약  $-26 \text{ dB}$ 의 소멸비를 보이고 있다. 이에 대한 결합영역에서의 광진행 경로를 그림 3 (c)에 나타내었다. 광에너지의 미세한 전이가 있으나 결합길이에서는 대부분의 광에너지가 bar state에 존재한다. 폴리머 물질의 열광학 계수

는 음의 부호를 가지고 있어 온도가 증가할수록 굴절률은 낮아진다. 전극에서 열이 발생할 경우, 폴리머의 열광학 효과로 인해 굴절률이 낮아지고 온도가 증가할수록 그 굴절률은 더욱더 낮아진다. 따라서, 열이 발생한 전극쪽 도파로의 굴절률이 낮아져 두 도파로의 굴절률 차이가 발생하여 대칭성은 깨어지고 이는 광결합 현상에 영향을 주게 된다. 비대칭 굴절률 분포로 인해 입사된 광에너지의 일부분만 전이될 뿐 완전한 전이는 발생하지 않는다. 그림 3 (a)에서 (3)번 경우는 굴절률 차이가  $\Delta n=0.0056$ 인 on 상태로써 약  $-49 \text{ dB}$ 의 높은 소멸비를 보이고 있다. 이에 대해 결합영역에서의 광진행 경로를 그림 3 (d)에 나타내었다. 비대칭성이 매우 증가할 경우, 광에너지의 전이가 발생하지 않기 때문에 입력 도파로만을 따라서 광에너지가 진행하게 된다.  $\Delta n=0.001$ 의 굴절률 차이로 광스위치를 동작시키기 위해서는 약  $10^\circ\text{C}$ 의 온도차이가 필요하고 이보다 더 높은 굴절률 차이인  $\Delta n=0.0056$ 로 동작시키기 위해서는 약  $56^\circ\text{C}$ 의 온도차이가 필요하다.  $\Delta n=0.0056$ 로 스위치를 동작시킬 경우, on 상태에서 성능은 우수하지만  $\Delta n=0.001$ 로 동작시킬 때보다  $46^\circ\text{C}$ 의 온도 차이를 더 만들어야 하므로 파워소모의 측면에서 상당히 많은 파워소모가 예상된다. 따라서, 본 논문에서는 파워소모적인 측면을 고려하여  $\Delta n=0.001$ 로 동작하는 광스위치를 고려한다.

입력 도파로 영역에서 그림 1 (a)와 같이 곡선형 입력 도파로를 적용하면 도파모드의 편향성으로 인해 수평이동의 효과를 얻을 수 있으며 곡률반경이 작아질수록 소멸비는 향상된다<sup>9)</sup>. 그러나 곡률반경이 너무 작아지면 도파로의 모드는 도파모드가 아닌 방사모드로 전환되기 때문에 전이효율이 급격히 감소하게 된다. 이로써 곡선형 입력 도파로에 수평이동을 적용하면 직선형 입력 도파로에 비해 큰 손실차이 없이 소멸비를 더 향상시킬 수 있으며 본 구조에서는 약  $2 \text{ dB}$  정도의 향상을 가져올 수 있다. 본 구조에 있어서 약  $1 \text{ dB}$  정도의 입력 손실내에서 소멸비를 최대로 향상시킬 수 있는 곡률반경과 수평이동 거리는 각각  $9 \text{ mm}$ ,  $1.5 \mu\text{m}$ 이다. 이를 함께 적용하여 최종적으로 설계된 광스위치의 성능을 표 1에 요약하였다.

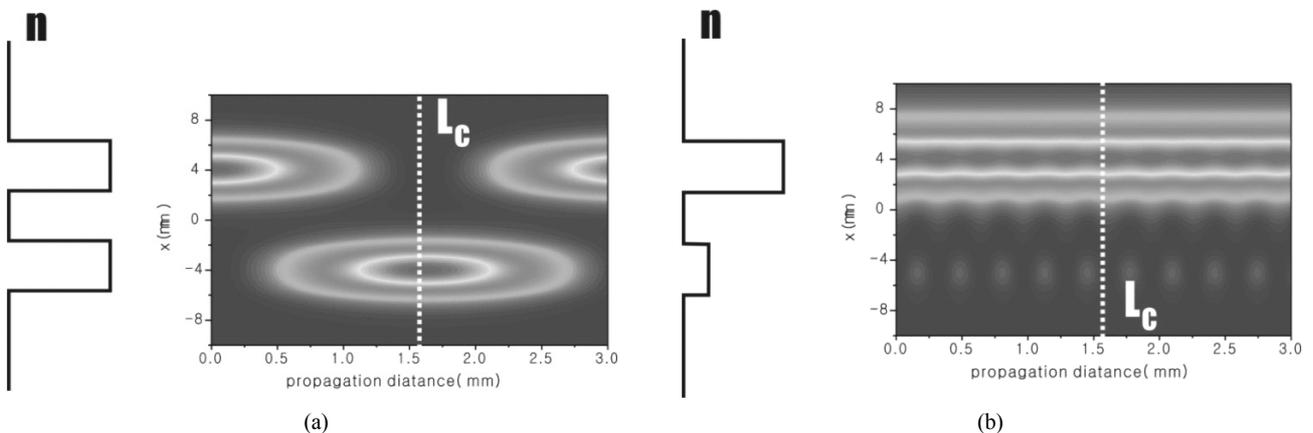


FIG. 2. Operating principle of the directional coupler switch. (a) In the off state, optical energy is coupled to the other waveguide. (b) In the on state, because the refractive index is decreased, optical energy is no longer coupled to the other waveguide.

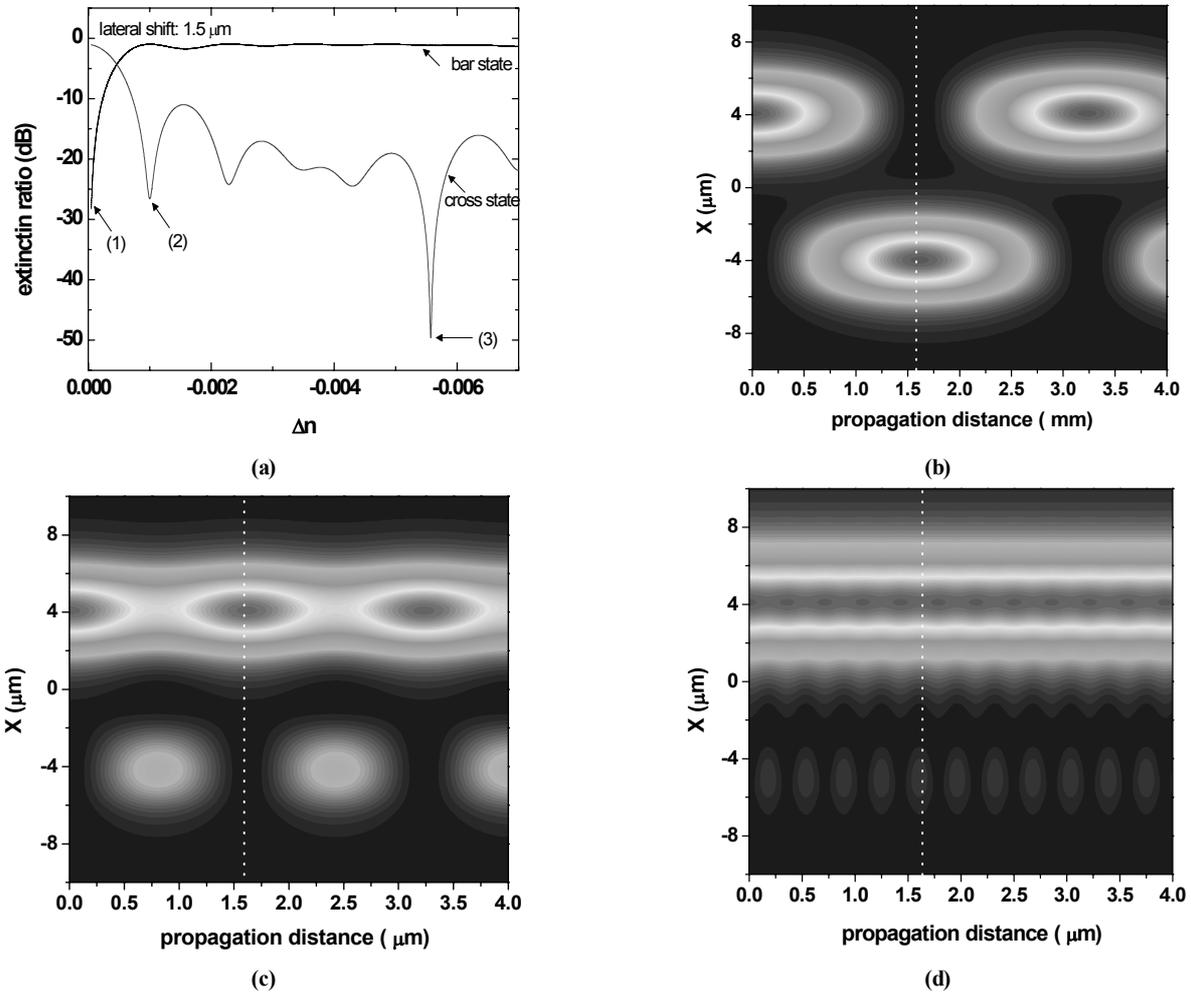


FIG. 3. Characteristics of the directional coupler switch. (a) extinction ratio as a function of the difference of the refractive index. Optical energy distribution in the directional coupler (b)  $\Delta n=0$  (case 1), (c)  $\Delta n=0.001$  (case 2), and (d)  $\Delta n=0.0056$  (case 3).

TABLE 1. Extinction ratios and temperature differences for switching in off and on state of the switch

|           | Extinction ratio (dB) | Temperature (C) |
|-----------|-----------------------|-----------------|
| off state | -30                   | 0               |
| on state  | -28                   | 10              |

### III. 전극 설계

이제 전극에서 발생하는 열로 인한 광스위치 내부의 열분포를 고려하자. 열 특성을 분석하기 위해 그림 1 (b) 구조에 대해 finite element method (FEM) 기반의 열분석 프로그램을 이용하였다. 그림 4는 그림 1 (b) 구조에 대해 상부 전극의 온도가 127°C일 때 광스위치 내부의 열분포이다. 이때 Au 전극의 두께는 100 nm이며 사용된 기판은 실리카 계열의 유리기판이다. 전극의 폭(w), 전극과 도파로의 중심간격(d)은 각각 20, 10  $\mu\text{m}$ 이다. 그림 4의 삽입그림은 도파로의 횡방향(점선방향) 온도 분포이며 이때 전극의 위치는 전극과

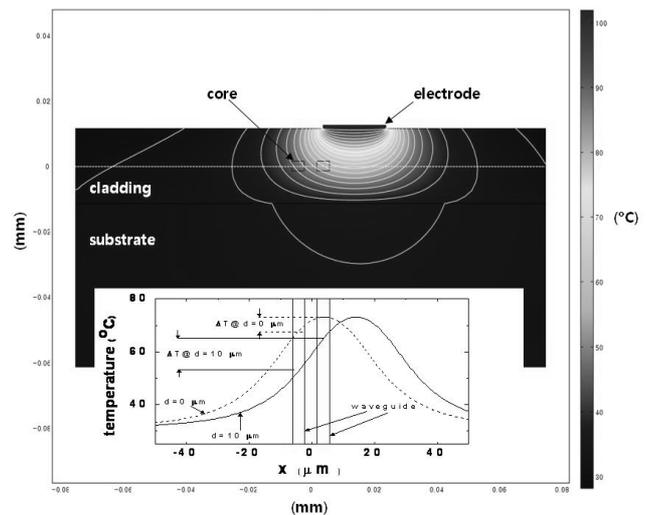


FIG. 4. Temperature distribution for heater of 127°C in the directional coupler section. Inset shows one-dimensional temperature profile.

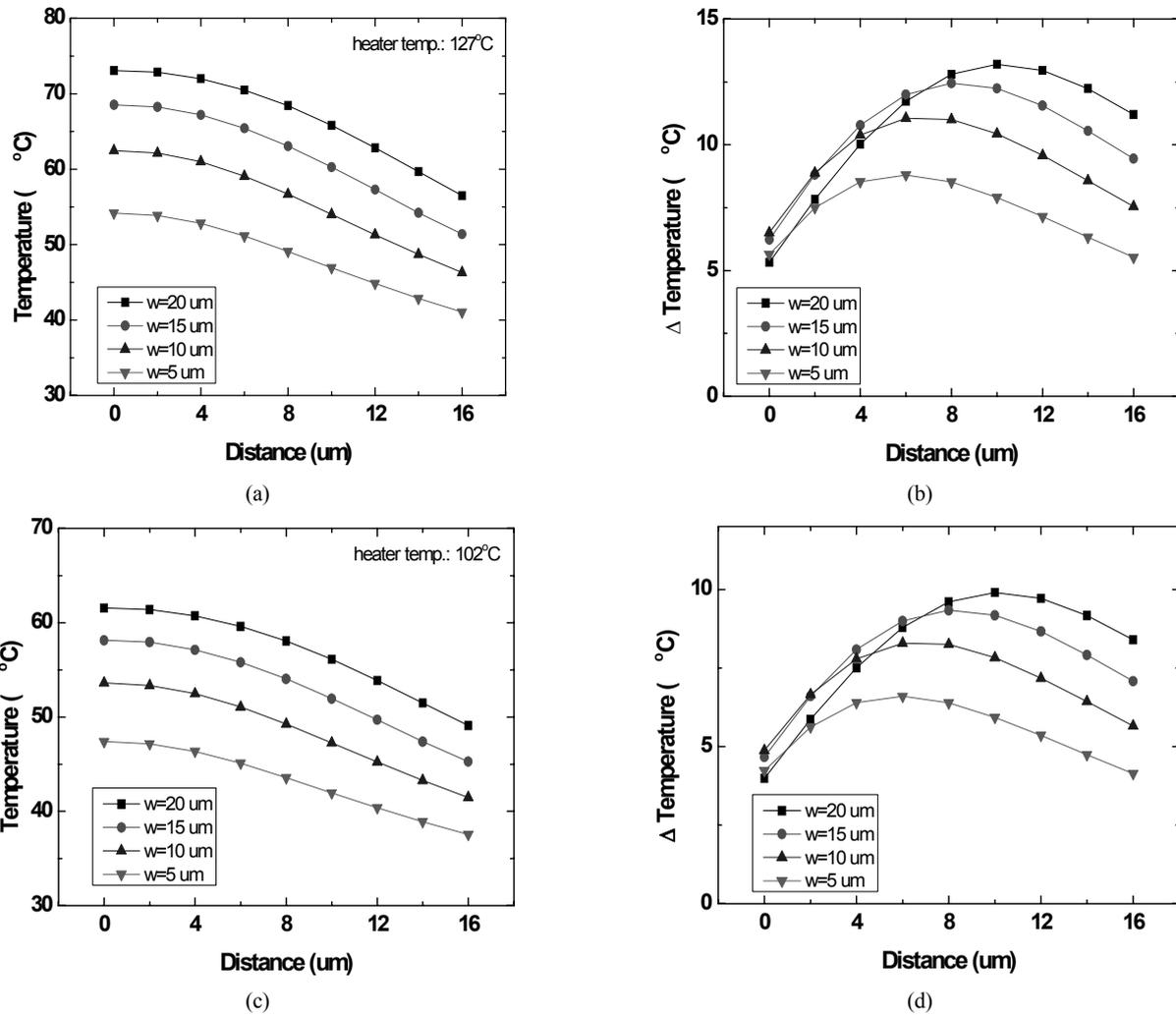


FIG. 5. Characteristics of temperature as a function of the center distance between the waveguide and the heater. (a) temperature of waveguide under heater and (b) temperature difference between two waveguides for heater temperature of 127°C. (c) temperature of waveguide under heater and (d) temperature difference between two waveguides for heater temperature of 102°C.

도파로의 중심이 일치된 경우( $d=0 \mu\text{m}$ )와 전극이 도파로 외부로 이동된 경우( $d=10 \mu\text{m}$ )이다. 전극의 중심위치에서 온도가 가장 높으며 전극을 이동시키면 전극 위치만 바뀔 뿐 온도에 관한 물리적 변수가 변함없으므로 온도분포는 그 방향으로 평행이동하게 된다. 본 논문에서 사용된 코어와 클래딩은 같은 계열의 폴리머 물질로 열전도와 열전달 계수 등의 열과 관련된 물리적 특성들의 차이는 없다. 따라서 코어와 클래딩의 경계에서 온도 변화는 없다. 전극에서 열이 발생할 경우, 전극쪽 도파로의 온도가 주로 상승하며 이보다는 적지만 반대쪽 도파로의 온도도 상승한다.

전극의 구조에 따른 열분포 특성을 살펴보기 위해  $w$ 와  $d$ 에 따른 도파로의 온도 특성을 살펴보았다. 그림 5 (a)는 전극의 온도가 127°C일 때, 각각의  $w$ 에서  $d$ 에 따른 전극쪽 도파로의 중심온도 분포이다.  $d$ 가 증가할수록,  $w$ 가 작을수록 도파로의 중심온도는 낮아지는 경향을 보인다. 그림 5 (b)는 전극쪽 도파로와 반대쪽 도파로 중심에서 온도차이다. 각

각의  $w$ 에 대해  $d$ 가 증가할수록 두 도파로간의 온도 차이는 증가하나 특정한  $d$ 보다 증가하면 감소하는 경향을 보인다. 즉, 최대의 온도차이를 보이는  $w$ 와  $d$  조건이 존재하며 최대 온도차이는  $w$ 가 클수록 높은 값을 가진다. 이러한 경향은 도파로내의 온도 분포에 기인한다. 두 도파로간의 온도 차이는 그림 4의 삽입그림에서 보듯이 두 도파로의 중심간격인  $8 \mu\text{m}$  떨어진 양 끝 지점의 온도 차이가 된다. 이때 전극의 위치를 이동시키면 전극이 이동된 방향으로 온도분포가 평행이동하여 두 지점의 온도는 변화되고 이러한 온도차이를 변화시킬 수 있다. 본 구조에서는 전극을  $10 \mu\text{m}$  이동시키면 온도 차이는 최대가 된다. 본 논문의 광스위치를 동작시키기 위해서는  $\Delta T=10^\circ\text{C}$ 의 온도차이가 필요하다.  $w=5 \mu\text{m}$ 일 때를 제외한 나머지 전극 폭인 10, 15, 20  $\mu\text{m}$ 에서  $\Delta T=10^\circ\text{C}$ 를 만족하는 각각의  $d$ 가 존재한다. 전극의 온도를 102°C로 낮추어서, 각각의 전극 폭( $w$ )에서 전극과 도파로의 중심간격( $d$ )에 따른 전극쪽 도파로 중심의 온도분포를 그림 5 (c)에 나

타내었다. 그림 5 (a)에서와 동일하게  $d$ 가 증가할수록,  $w$ 가 작을수록 도파로의 온도는 낮아지는 경향을 보인다. 그림 5 (d)는 전극쪽 도파로와 반대쪽 도파로 중심에서 온도차이다. 앞선 그림 5 (b)에서와 동일한 경향을 보이며  $\Delta T=10^\circ\text{C}$ 를 만족하는 조건( $w=20\ \mu\text{m}$ ,  $d=10\ \mu\text{m}$ )이 존재한다. 이 조건은 전극의 온도가  $127^\circ\text{C}$ 일 때보다  $25^\circ\text{C}$ 나 낮음에도 불구하고 광스위치 동작에 필요한 온도차이를 만족하여 광스위치의 파워소모를 낮출 수 있을 것으로 기대된다.

스위치가 on 상태일 때 전극 반대쪽 도파로의 굴절률이 다소 감소하나 전극쪽 도파로의 굴절률이 더 낮아져 결국 전극 반대쪽 도파로의 굴절률이 전극쪽 도파로보다 높은 상태가 된다. 이로써 두 도파로간의 굴절률 차이가 발생하여 앞서 언급한대로 광스위치는 on 상태로 동작할 것이다. 그러나, 전극 반대쪽 도파로의 굴절률이 원치 않게 감소하는 이유로 결합영역의 도파로 구조가 바뀌며 이로 인해 입력 도파로와 결합영역의 접합부에서 손실이 발생할 것으로 사료된다. 실제 동작에 있어서 전극에서 발생한 열이 반대쪽 도파로로 전달되는 것을 막는 것은 매우 중요하다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 고소멸비와 낮은 파워소모를 가지는 방향성 결합기 구조의 열광학 스위치를 설계하였다. 설계된 열광학 스위치는 전극에서 열이 발생하지 않으면 입사된 광에너지는 광결합 현상으로 반대쪽 도파로로 출력되고, 열이 발생하면 두 도파로간의 굴절률 차이가 발생하여 광결합이 억제되어 입사된 광에너지는 입사된 도파로로 출력된다. 방향성 결합기의 다소 복잡한 설계는 곡선형 입력 도파로의 수평이동과 소멸비 일반화 곡선을 이용하여 결합길이와 소멸비를 각각 최적화하였다. 또한, 전극 설계에 있어서 전극의 폭과 위치에 따른 온도분포 및 두 도파로간의 온도차이 경향을 제시하여 전극의 폭이 넓고 전극과 도파로의 위치가 가까울수록 도파로 내부로 열이 많이 전달되어 온도가 상승하는 경향을 파악하였다. 또한, 각각의 전극 폭에서 최대의 온도차이를 보이는 전극과 도파로 간격이 존재하였다. 이러한 조건들은 전극의 온도를 낮추어도 두 도파로간의 온도차이를 증가시킬 수 있어 열광학 스위치의 파워소모를 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 집적형 광자기술 연구센터(R11-2003-022-03002-0)를 통하여 과학재단의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### References

1. R. V. Schmidt and R. C. Alferness, "Directional coupler switches, modulators, and filters using alternating  $\Delta\beta$  techniques," *IEEE Trans. Circuits Syst.* **26**, 1099-1108 (1979).
2. N. Anwar, C. Themistos, B. M. A. Rahman, and K. T. V. Grattan, "Design considerations for an electrooptic directional coupler modulator," *J. Lightwave Technol.* **17**, 598-605 (1999).
3. I. Kiyat, A. Aydinli, and N. Dagli, "A compact silicon-on-insulator polarization splitter," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 100-102 (2005).
4. H. Lee, G. W. Kim, J. O. Park, S. H. Kim, and Y. C. Chung, "Widely tunable wavelength-selective reflector using polymer waveguide double-ring-resonator add/drop filter and loop-back mirror," *J. Opt. Soc. Korea* **12**, 157-161 (2008).
5. Y. C. Hung, S. K. Kim, H. Fetterman, J. Luo, and A. K.-Y. Jen, "Experimental demonstration of a linearized polymeric directional coupler modulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19**, 1762-1764 (2007).
6. A. M. Al-hetar, I. Yulianti, A. S. M. Supa'at, and A. B. Mohammad, "Thermo-optic multimode interference switches with air and silicon trenches," *Opt. Comm.* **281**, 4653-4657 (2008).
7. 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.* **12**, 407-409 (2000).
8. D. M. Yeo and S. Y. Shin, "Polymer-silica hybrid  $1 \times 2$  thermo-optic switch with low crosstalk," *Opt. Comm.* **267**, 388-393 (2006).
9. C. H. Choi, S. R. Park, and B. H. O, "A novel concept for a directional coupler design," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **11**, 405-410 (2000).
10. C. H. Choi, B. H. O, S. G. Lee, S. G. Park, and E. H. Lee, "The generalized characteristics of extinction ratio for a directional coupler and design of compact 1310/1550 nm demultiplexer," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **16**, 446-449 (2005).