

## 열확산 효과 개선을 위한 트렌치 구조의 SOI 1×2 열광학 스위치 개발

### Development of Trenched SOI 1×2 Thermo-Optic Switch For Improvement of Thermal Diffusion Effect

박종대\*, 서동수\*, 이기수\*\*  
(Chongdae Park\*, Dongsu Suh\*, and Kisu Lee\*\*)

#### Abstract

In order to reduce driving power consumption, we propose and fabricate a new structure of asymmetric SOI 1×2 thermo optic switch that has a back side silicon trenched structure. Compared to conventional SOI thermo optic switches without heat sink structure, it shows an improvement of switching power reduction from about 4 watt to 1.8 watt without sacrificing cross talk of about 20 dB at the light wavelength of 1.55  $\mu\text{m}$ . Here we also described the main design consideration and fabrication procedure for the proposed device.

**Key Words** : Optical switch, SOI, Thermo optic, MEMS

#### 1. 서론

Silicon은 반도체 산업에서 가장 주목받고 있는 물질로서, 이에 대한 물리적 성질과 이를 이용한 전자소자의 제작을 위해 필요한 제조공정 기술이 이미 충분히 개발되어 있는 상태이다. 반면 그동안 국내에서는 silicon을 광소자에 응용하는 연구는 매우 미약하였으나, 국외에서는 최근들어 silicon을 이용한 광소자에 대한 연구가 매우 활발하게 진행되어왔다. Silicon을 이용한 광소자의 연구는 단순한 저손실 광도파로 소자[1]의 연구에서 비롯하여, 광분배기[2], 배열광도파로형 광회절격자(AWG)[3], 광변조기[4] 및 광스위치[5]등의 다양한 형태의 연구결과가 발표되었다. 본 논문에서는 silicon의 열광학효과를 이용한 비대칭형 1×2 열광학 광스위치의 스위칭 소모전력을 줄이기 위해 새로운 방법

을 제안하였고, 이를 설계 제작하여 그 효율성을 검증하였다. 최근까지 광스위치를 제작하는 재료로 사용된 물질로는 실리카, LiNbO<sub>3</sub>, GaAs, 폴리머 등을 들 수 있다[6-8]. 반면 silicon은 안정된 공정 기술, 낮은 제조공정 가격 그리고 높은 열광학 계수특성을 이용한 열광학 소자로의 장점을 가지고 있다. 실리콘은 단지 1 K의 온도 변화에 의해서도  $2.3 \times 10^{-4}$ 의 굴절률( $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ ) 변화를 준다. 이는 다른 물질인 폴리머에 비해서 2배 이상이며 LiNbO<sub>3</sub>에 비해 4배 이상 높은 수치이다. 그러나 본 연구에서와 같은 silicon을 이용한 비대칭 1×2 열광학 스위치는 높은 열광학 계수를 갖는 장점에도 불구하고 다른 물질에 비해 상대적으로 높은 열전달 계수로 인해 열광학 소자의 구조가 최적화되지 않을 경우 구동전력이 높아지는 문제를 가지게 된다. 이는 전극으로부터 발생한 열이 인접 도파로로 퍼지는 확산 현상으로 인한 것이다. 본 논문은 silicon on insulator(SOI)에서 silicon이 갖는 높은 열광학계수의 장점에도 불구하고 열확산 효과에 의한 구동전력의 상승을 효과적으로 개선하는 새로운 구조의 열광학 스위치 구조를 제안 및 제작하였다.

\* : 명지대학교 전자공학과  
(경기도 용인시 남동 산38-2,  
Fax : 031-332-2226  
Corresponding Author : cdpark@mju.ac.kr)

\*\* : (주)에이티아이  
2003년 8월 22일 접수, 2003년 9월 26일 1차 심사완료,  
2003년 10월 15일 최종 심사완료

## 2. 열확산 억제를 위한 새로운 광소자의 구조 및 설계

### 2.1 단일 모드 광도파로 설계 조건

SOI를 이용한 광도파로의 설계를 위해서 유효굴절률 방법을 사용하였으며, 이와 같은 유효굴절률 방법은 직각형 광도파로 구조에 적합하다.

그림 1은 설계할 단일모드 SOI 광도파로의 단면 구조로서 undoped 5  $\mu\text{m}$ 의 silicon core층과 약 1  $\mu\text{m}$ 의 SiO<sub>2</sub> clad층으로 구성되었다. 본 연구에서 사용된 SOI 광도파로는 quasi-single 모드를 이용하게 됨으로 광섬유의 단일모드 광출력이 ridge형 단일모드 SOI 광도파로에 입사할 경우를 가정하여 leaky mode를 제거할 수 있는 최소 1000  $\mu\text{m}$ 의 transient 영역을 필요로 한다. 또한 단일모드를 위한 silicon 도파로의 폭과 식각 깊이의 관계는 다음의 관계식[1]을 만족함을 알 수 있다.

$$\frac{W}{H} \leq 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (1)$$

$$\left( r = \frac{h}{H} \geq 0.5 \right)$$

여기서 H는 silicon층의 두께, W는 도파로의 폭, r은 core silicon의 두께 대비 식각된 silicon 두께의 비이다.

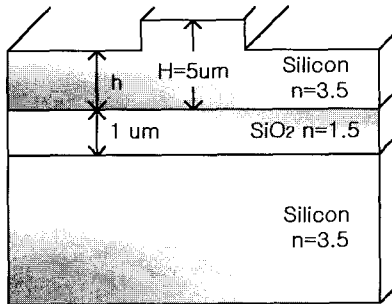


그림 1. 제작에 사용된 SOI 광도파로의 단면도.  
Fig. 1. Cross-section of SOI optical waveguide.

### 2.2 비대칭 Y분기 광도파로 설계 조건

그림 2는 비대칭 Y분기형 SOI 광도파로를 구성한 것으로, W<sub>1</sub>은 채널 1의 도파로 폭을 말하며, W<sub>2</sub>는 채널 2의 도파로 폭을 말한다. 또한 그림 2는 도파로 폭이 W<sub>2</sub>인 광도파로 위에 열전극을 올

릴 경우, 본 연구에서 제안한 새로운 구조의 광소위치와 비교하고자하는 기존의 비대칭 1×2 SOI 광소위치는 구조와 동일하다. SOI를 이용한 광소위치에서는 열광학 계수가 양의 값을 가지기 때문에 열전극이 없는 광도파로의 폭 W<sub>1</sub>이 열전극이 있는 광도파로의 폭 W<sub>2</sub>에 비해 상대적으로 크게 설계하여야 한다. 또한 비대칭 1×2 광소위치의 경우 아래의 관계식을 만족해야 한다.

$$\frac{\Delta\beta}{\theta\gamma} > 0.44 \quad (2)$$

위 식에서  $\Delta\beta$ 는 두 도파로간의 모드전파상수의 차이이며,  $\gamma$ 는 클래딩영역의 전파상수이고  $\theta$ 는 두 도파로의 분기각이다. 위 파라미터가 0.44보다 작으면 모드 분할기로(mode divider) 동작하고, 0.44보다 크면 파워 분배기로(power splitter) 동작하게 된다. 따라서 식 (2)의 값이 0.44보다 크게되는 조건하에서 비대칭 Y분기 광도파로는 입사된 광파워의 대부분이 입력측 도파로의 유효굴절률 값과 비슷한 유효굴절률 값을 갖는 도파로쪽으로 빛이 진행된다(열전극에 전원을 인가하지 않은 경우). 일반적으로 비대칭 Y분기 광도파로를 설계할 때 가장 중요시되는 것은 누화특성이며, 본 연구에서는 이점을 중시하여 20 dB 이상이 되도록 입사도파로의 폭 W<sub>1</sub>과 출력도파로의 폭 W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub> 및 분기각  $\theta$ 를 설계하였다. 이때 전산모의 후 설계된 구조는 silicon의 식각 깊이= 1.7  $\mu\text{m}$ , 도파로의 폭 W<sub>1</sub>=3.0  $\mu\text{m}$ , W<sub>2</sub>= 2.6  $\mu\text{m}$ , 분기각  $\theta = 0.14^\circ$ 로 설정하였다. 또한 Y도파로 제작시 공정상의 제약으로 인하여 두 도파로가 분기되는 지점에서 패턴은 일부 왜곡되어지며 이를 블런트라 한다. 따라서 본 연구에서는 블런트의 폭을 UV를 이용한 사진공정상 허용되는 안정적인 분해능인 1  $\mu\text{m}$ 로 설정하여 이를 포함한 구조를 BPM 전산모의 실험에 적용하여 Y분기 도파로 구조를 설계하였다.

### 2.3 열 해석을 통한 전극 설계

실리콘의 열광학 계수는 표 1에서와 같이 폴리머에 비해 2배 이상, 실리카에 비해 13배 이상 크며, 성능이 우수하다고 알려진 LiNbO<sub>3</sub>에 비해 4배 정도의 큰 값을 가지고 있다. 따라서 우수한 열광학 특성을 갖는 실리콘을 이용하여 광소자를 만들 때 저전력을 이용하여 좋은 특성을 갖는 소자를 제작할 수 있다. 설계된 소자에서 스위칭이

되는데 필요한 굴절률의 변화량  $\Delta n$ 은 약  $0.9 \times 10^{-4}$ 이다. 열 광학 스위치에서는 전극에서 발생된 열에 의한 개별 광도파로의 온도변화보다는 인접한 광도파로간의 상대적인 온도차이가 더 중요하다. 따라서 광도파로간의 온도차를 높이기 위한 새로운 구조의 광스위치가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 두 도파로간의 상대적인 온도차를 최대한 크게 하여 열광학 스위치의 구동 전력의 소모를 줄이기 위해서 그림 3과 같이 SOI 광스위치 하부에 방열용 트렌치를 갖는 새로운 구조를 제안하고 이를 유한요소법을 이용하여 SOI 광스위치 구조에서의 열분포를 전산모의 하였다.

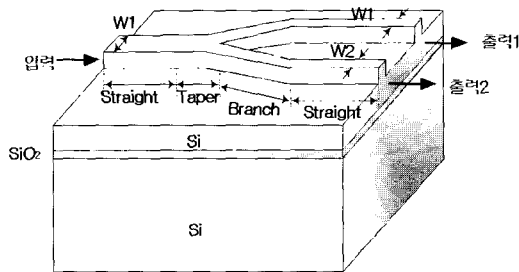


그림 2. 비대칭 Y분기 SOI 광도파로.  
Fig. 2. Asymmetric Y branch SOI optical waveguide.

표 1. 물질별 열광학 특성.

Table 1. Thermo optic parameters of materials.

물질	파장 ( $\mu\text{m}$ )	굴절률 (n)	열 광학 계수 $(\partial n / \partial T) \cdot 10^5$	열전도계수 $(\text{W/m} \cdot \text{K}) @ 300\text{K}$
LiNbO <sub>3</sub>	1.3	2.15	+ 5.3	38
SiO <sub>2</sub>	1.3	1.45	+ 1.5	1.38
TiO <sub>2</sub>	0.633	2.86	- 7.2	8.4
Polymer	0.633	1.5	- 10	0.19
PLZT	0.633	2.5	+ 10	-
Si	1.55	3.5	+ 20	148

그림 4는 유한요소법(FEM)을 이용하여 그림 2에서와 같이 방열용 트렌치가 없는 구조와 그림 3에서와 같이 방열용 트렌치가 있는 구조에 대하여 열전극으로부터 발생한 열의 확산을 각각 전산모의 하였다. 이때 열 분포 등고선의 간격은 0.1 K이다. 트렌치가 없는 구조인 그림 4(a)는 전극에서 발생된 열이 초기에는 두 도파로 사이의 온도차를

주게되나 시간이 지남에 따라 점차 온도차이를 크게 하지 못하고 열 분포 등고선이 실리콘 기판이 있는 하부 쪽 보다 전극을 중심으로 좌우로 매우 넓게 고루 퍼지는 현상을 보이게 된다. 따라서 이 경우는 지속적으로 많은 열의 공급을 필요로 하게 되어 더 많은 전력의 소모를 가져오는 문제를 야기한다. 반면 트렌치가 있는 구조인 그림 4(b)는 열 분포 등고선이 인근 도파로로 퍼지는 것이 아니라 하부 트렌치 쪽으로 이어짐을 볼 수 있다. 따라서 방열용 트렌치가 없는 경우에 비해 방열용 트렌치를 삽입한 경우에는 열전극에서 발생된 열이 굴절률을 높이고자 한 특정 도파로와 인접한 다른 광도파로간의 온도차를 그림 4(a)에 비해 크게 한다. 따라서 전력의 소모 측면에서 보면 트렌치가 없는 구조에 비해 트렌치가 있는 구조가 열광학 효과를 증대시킬 수 있으며 또한 열확산에 의한 광모드 퍼짐 현상 또한 감소시킨다.

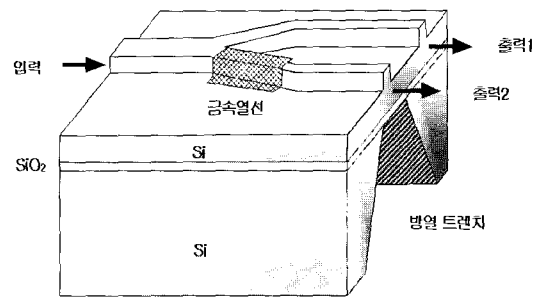


그림 3. 후면 트렌치 구조를 갖는 열광학 SOI 1x2 switch의 구조.  
Fig. 3. Structure of back side trrenched structure.

### 3. 열확산을 개선한 광스위치 제작

본 연구에는 스위칭에 필요한 전력을 감소시키는 방법으로 그림 3과 같이 열전극이 있는 도파로 하부의 실리콘 기판층(두께 500  $\mu\text{m}$ )에 트렌치를 형성하였다. 트렌치의 구조는 실리콘 기판의 두께인 깊이 500  $\mu\text{m}$ , 가로 1.2 mm, 세로 9 mm이며, 열전극의 길이와 같게 설계하여 열전극에서 발생하는 열이 인접 광도파로로 확산되는 것을 최대한 억제하도록 설계하였다. 또한 트렌치에서 공기중으로의 열의 방출 효과를 증대시키기 위해 트렌치 표면에는 열전도성이 큰 알루미늄을 증착하여, 스위치 외부로 방출되지 않고 잔류되어 인접 도파로에 영향을 주는 확산 현상을 효과적으로 억제하도록 하였다.

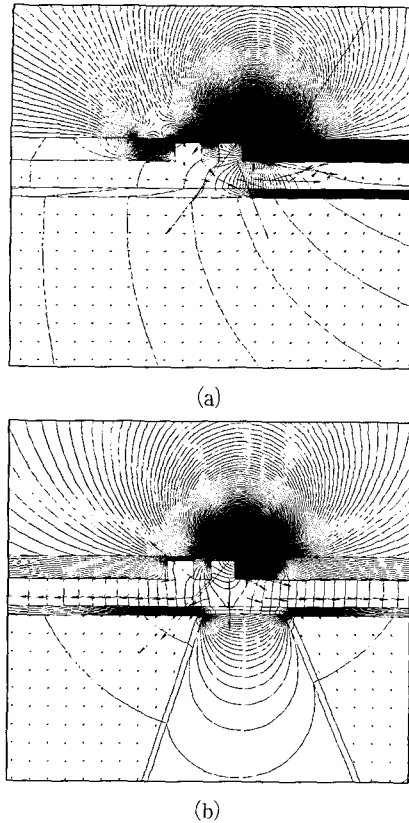


그림 4. SOI 1×2 광스위치의 열 분포 전산모의.  
(a) 트랜치가 없는 SOI 광 스위치의 경우  
(b) 트랜치를 가지는 SOI 광 스위치의 경우.

Fig. 4. Simulation of thermal distribution in SOI 1×2 optical switch (a) case of SOI 1×2 optical switch without trench structure, (b) case of SOI 1×2 optical switch with backside trench structure.

그림 5에는 본 연구에서 제작된 SOI 광스위치의 공정도를 나타낸 것이다. 실리콘 도파로를 식각하기 위해서 본 논문에서는  $Cl_2$ ,  $SF_6$  가스를 이용한 RIE 공정을 사용하였고, 식각 작용을 활성화하기 위해서  $O_2$  가스를 사용하였다. SOI 열 광학 스위치 제작 과정은, i) KOH를 이용한 1차 트랜치 식각을 SOI 웨이퍼 뒷면에 형성한 후, ii) 역조명 사진전사법을 이용하여 광스위치 구조를 제작하였고, iii) 이후 KOH를 이용하여 2단계 silicon 기판의 트랜치 공정을 수행하여 잔류 silicon 제거한 후, iv) buried  $SiO_2$ 의 일부를 제거한 후 알루미늄을 증착한다.

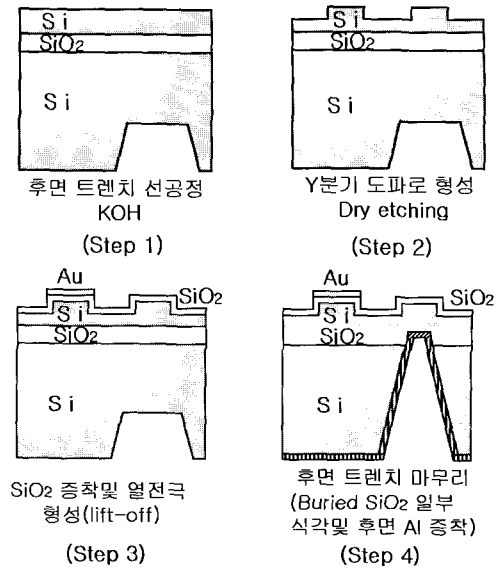


그림 5. 후면 트랜치 구조를 갖는 열광학 SOI 1×2 switch의 공정순서.

Fig. 5. Fabrication-flow of SOI 1×2 switch with backside trench structure.

#### 4. 측정 결과

제작된 스위치를 측정하기 위한 측정 장치는 그림 6과 같다. 제작된 SOI 광스witch는 측정을 위해 양단면을 원하는 길이 만큼 dicing을 한 후, 이를 알루미늄이나 파우더를 이용하여 광스위치의 입사면을 양면 경면화 하였다. 레이저 다이오드에서 나오는  $1.55 \mu m$  파장의 입력 광을 편광기를 이용하여 원하는 편광상태로 만들고, 이 광을 tapered 광섬유를 이용해 제작된 소자에 butt coupling 시켰다. 출력 포트에서 나오는 출력광을 10배 대물 렌즈를 이용하여 IR 카메라를 통하여 광결합 상태를 확인하였으며, 이후 광스위치의 열전극에 인가된 DC 파워에 따른 각 포트별 출력광의 세기를 단일 모드 광섬유를 이용하여 측정하였다.

그림 7은 IR 카메라로 측정된 광스위치의 출력광 패턴으로, 열전극에 인가된 신호의 세기에 따라 출력광의 경로가 변경되는 특성을 보여준다. 그림 8은 SOI 광스위치 아래면에 방열용 트랜치가 없는 구조인 그림 2 구조의 경우와 방열용 트랜치가 있는 그림 3 구조를 갖는 광스위치에 대한 동작 특성을 비교한 것이다. 누화특성에서는 두 개의 경우 모두 약 20 dB 이상을 유지하는 반면 그림 8(a)의 경우에

비해 그림 8(b)의 경우 두 개의 도파로 간의 광출력이 같아지는 소비전력은 약 1.8 watt에서 약 0.7 watt로 감소하였으며, 또한 완전한 on-off 스위칭을 위해 필요한 구동전력 또한 약 4 watt에서 약 1.5 watt로 감소되는 특성을 보여주었다.

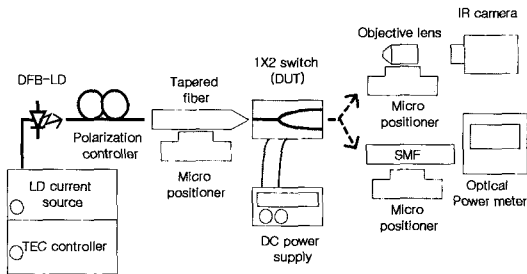


그림 6. 광스위치 측정 시스템.  
Fig. 6. Optical switch measurement system.

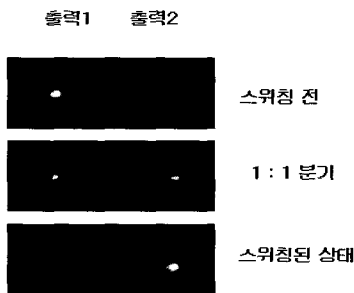
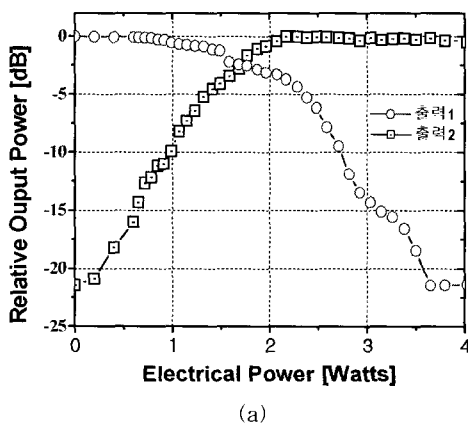
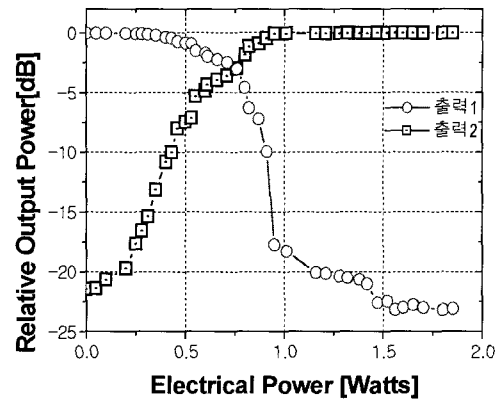


그림 7. IR 카메라에 의한 스위칭된 출력광 패턴.  
Fig. 7. Switched output beam pattern captured by IR camera.



(a)



(b)

그림 8. 구동전력에 따른 SOI 1×2 광스위치의 출력특성 (a) 트렌치 없는 구조 (b) 트렌치 있는 구조.

Fig. 8. Output power characteristics of SOI 1 × 2 optical switches as a function of driving power (a) without backside trench structure, (b) with backside trench structure.

## 5. 결론

본 연구에서는 열광학 스위치의 누화특성을 유지 하면서 소비전력을 줄이기 위한 새로운 구조의 1 × 2 열광학 스위치를 설계 및 제작 하였다. 제작된 트렌치 1×2 열 광학 스위치의 누화는 약 22 dB로 측정되었다. 완전한 on-off 스위칭을 위한 소비전력은 약 1.8 watt 이다. 이 값은 트렌치 구조에서 중간 SiO<sub>2</sub> 층을 8000 Å 정도 제거한 트렌치형 광스위치의 누화 및 소비전력 특성으로 중간 SiO<sub>2</sub>층의 두께에 따라 광스위치의 소비전력 특성은 변화를 가져올 수 있으며, 중간 SiO<sub>2</sub>층의 두께를 최소화하는 것은 제작 공정상의 한계에 의해 제약을 받게된다. 또한 전극의 길이를 최적화함으로써 보다 더 소비전력의 낮추기 위한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

이 연구는 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 수행되었음. (KRF-1999-041-E00218)

### 참고 문헌

- [1] A. Layadi, A. Vonsovici, R. Orobttchouk, D. Pascal, and A. Koster, "Low-loss optical waveguide on standard SOI/SIMOX substrate", Optics Comm., Vol. 146, No. 1, p. 31, 1988.
- [2] S. L. Tsuo and P. C. Peng, "Design and simulation of a  $2 \times 2$  N SOI optical power splitter", Microwave and Optical Tech. Lett., Vol. 32, No. 4, p. 307, 2002.
- [3] Shyh-Lin Tsao, Jiang-Hung Tien, Tsai, and Chun-Wei, "Simulations on an SOI grating-based optical add/drop multiplexer", IEEE J. on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 8, No. 6, p. 1277, 2002.
- [4] C. K. Tang and G. T. Reed, "Highly efficient optical phase modulator in SOI waveguides", Electronics Lett., Vol. 31, No. 6, p. 451, 1995.
- [5] Chongdae Park, "Design and characteristics of thermo-optic  $1 \times 2$  switch using asymmetric SOI waveguide", SPIE's International Symposium on Asia-Pacific Optical and Wireless Comm., p. 14, October 2002, Shanghai, China.
- [6] 양우석, 김우경, 이승태, 박우정, 장현수, 윤대호, 이한영, "초고속 광변조기 제작을 위한  $\text{LiNbO}_3$  도파로의 건식식각", 전기전자재료학회논문지, 16권, 8호, p. 731, 2003.
- [7] 김성구, 윤형도, 윤대원, 박계춘, 이 진, "저손실  $\text{Ti:LiNbO}_3$  광도파로제작 및 BPM 해석", 전기전자재료학회논문지, 11권, 5호, p. 400, 1998.
- [8] 김성구, 윤형도, 윤대원, 박계춘, 이 진, 유용택, "X-Cut  $\text{LiNbO}_3$  광도파로제작 및 Ti 두께에 따른 Near-field 특성변화", 전기전자재료학회 논문지, 11권, 2호, p. 731, 2003.