

論文2000-37SD-6-8

# 크기가 다른 전극폭을 갖는 4분기 광도파로형 열광학스위치 (4-Branch Waveguide Thermo-Optic Switch With Unequal Width Heaters)

宋 炫 采 \*, 李 泰 衡 \*, 申 相 永 \*\*

(Hyun-Chae Song, Tae Hyung Rhee, and Sang-Yung Shin)

## 요 약

다분기 열광학 스위치는 스위칭 상태에 따라 요구되는 소비전력의 차이가 큰 단점이 있다. 이를 개선하는 방법으로 전극형태에서 외측전극폭을 내측전극폭에 비해 크게 설계하고 굴절률차이가 큰 코어와 클래드 물질을 사용하여 상부클래드의 두께를 얇게 하는 방법을 제안한다. 제안된 형태의 4분기 열광학스witch는 테플론과 폴리이미드계 폴리머 물질을 사용하여 제작되었고 1550 nm 파장대에서 그 특성을 측정하였다. 제작되어진 4분기 열광학스witch는 310~390 mW 정도의 소비전력에서 -16 dB 이하의 누화 특성을 나타 내어 스위칭 상태에 따른 소비전력의 차가 줄었을 뿐만 아니라 스위칭에 필요한 소비전력도 상당히 줄었다. 그리고 4.7 dB 정도의 삽입손실과 1 ms 이하의 스위칭 속도를 얻었다.

## Abstract

A multi-branch thermo-optic switch has a problem that driving powers in the switching states are different from each other; the power consumption for the inner output port is more than twice as large as that for the outer output port. In this paper, to solve this problem unequal width heaters and the waveguide structure with a thin overcladding layer are proposed in a four-branch thermo optic switch. The proposed structure is fabricated with the polymer materials with high index difference, Teflon and polyimides. The fabricated device was measured at the wavelength of 1550 nm. The measured characteristics exhibit the smaller difference in the power consumption between the switching states and the driving power less than the previous four-branch thermo-optic switch with equal width heaters. As for the device performance, the crosstalk is better than -16 dB at about 310~390 mW, the insertion loss is 4.7 dB, and the switching time is less than 1 ms.

## I. 서 론

앞으로의 고속, 대용량의 정보를 전송하기 위한 광회

\* 正會員, 三星電子 情報通信 光素材事業部

(Opt. Comm. Products Division, Applied Optics Research Group, Information & Communication Business, Samsung Electronics Co., LTD.)

\*\* 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Dept. of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

接受日字:2000年1月25日, 수정원료일:2000年5月12日

선 분배기(optical cross connect switch)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데 이를 위한 대용량의 MxN 매트릭스 스위치(matrix switches)에 대한 수요가 급증하고 있다<sup>[1,2]</sup>. 일반적으로 매트릭스 공간 스위치는 출구가 2 개인 Y자형 광도파로 형태의 2분기(two-branch) 스위치를 기본 형태로 하여 이를 직,병렬로 연결함으로써 그 출력수를 확장한다. 그러나 이러한 방법들은 출력수가 증가함에 따라 소자의 전체 길이가 상당히 길어지기 때문에 이로 인하여 확장이 제한된다. 대용량의 매트릭스 공간 스위치를 구현하는데 있어 전체 소자의 길이를 줄이고 소자길이를 통한 광손실을 최소화하기 위하여 단위 길이당 많은 출구수를 갖는

다분기(multi-branch) 광도파로형태의 광스위치를 단위 소자로 사용하는 것은 큰 장점이 있다.

지금까지 다양한 형태의 다분기 광스위치(multi-branch optical switch)에 대한 연구들이 있어 왔다<sup>[3,4]</sup>. 최근에는 다른 물질에 비해 상대적으로 큰 열광학계수를 갖는 폴리머 물질을 사용한 다분기 열광학스위치가 발표되었다<sup>[5,6]</sup>. 그러나 이러한 다분기 열광학스witch는 스위칭 상태에 따라 소비되는 전력의 차이가 크다는 단점이 있다. 다분기 열광학스위치의 경우 스위칭 상태에 따라 구동하는 여러 개의 전극이 있다. 이들 중 외측(outer side)에 위치한 전극에서 발생된 열은 내측(inner side)에 있는 전극에 비해 바깥쪽으로 상대적으로 많이 퍼지게 되어 실질적으로 광도파로에 미치는 온도변화가 적다. 그래서 외측전극을 구동하게 되는 내측출구로의 스위칭이 내측전극을 구동하게 되는 외측출구로의 스위칭에 비해 더 많은 전력을 소비하게 된다. Propstra et al.이 발표한 3분기 열광학스witch는 외측출구로의 스위칭에는 75 mW의 전력이 소비되는데 반해 내측출구로의 스위칭에는 이보다 5 배정도가 큰 370 mW가 소비되었다<sup>[3]</sup>. 그리고 저자에 의해 발표된 4분기 열광학스switch의 경우 외측출구로에서 500 mW, 내측출구로에서 1000 mW 이상의 전력이 소비되어 스위칭 상태에 따라 소비전력이 2 배 이상 차이가 났다<sup>[6]</sup>. 이러한 소자를 단위소자로 하여 매트릭스 스위치를 구성할 경우 각 스위칭 상태에 따라 구동전압이 다르기 때문에 전체 스위치의 구동회로가 복잡해지는 단점이 있다. 그러므로 다분기 열광학스switch를 매트릭스 스위치의 단위소자로 사용하기 위해서는 스위칭 상태에 따른 소비전력의 차이를 줄이는 것이 중요하다.

본 논문에서는 다분기 열광학스switch에서의 스위칭 상태에 따른 소비전력의 차이를 줄이기 위하여 두 가지의 접근을 하였다. 첫째로 열의 퍼지는 현상을 최소화 하는 것이다. 열의 퍼지는 현상은 외측전극에서 발생된 열이 광도파로에 미치는 영향을 저하시키는 중요한 원인이다. 전극에서 발생된 열이 많이 퍼지지 않고 광도파로에 영향을 미치게 하기 위해서는 열을 발생시키는 전극과 광도파로 사이의 간격이 작아야만 한다. 즉 상부클래드의 두께를 줄임으로 열의 퍼짐을 최소화 할 수 있다. 둘째로는 동일한 전압을 인가하더라도 내측전극보다 외측전극에 더 많은 전력을 공급하게 함으로서 외측전극에서 발생된 열의 퍼짐으로 인해 저하된 온도차를 보상하게 하는 것이다. 이를 위하여 우리는

외측전극의 폭을 내측전극에 비해 상대적으로 넓게 설계하였다. 이러한 두가지의 접근을 통하여 우리는 4분기 열광학스switch의 스위칭 상태에 따른 전력차이를 줄이고 스위칭을 위한 소비전력도 줄일 수 있었다.

## II. 크기가 다른 전극폭을 갖는 4분기 광도파로형 열광학스위치

본 논문에서 제안한 4분기 열광학스switch의 구조는 그림 1 과 같다. 4분기 광도파로의 기본 구조에 4개의 전극으로 구성되어 있다<sup>[6]</sup>. 광도파로의 폭은  $6 \mu\text{m}$ , 분기 각은  $0.06^\circ$  이고 외측 전극폭  $W_1$  은  $10 \mu\text{m}$  로서 내측 전극폭  $W_2$  의  $6 \mu\text{m}$  보다 크다. 내측전극과 외측전극은 분기영역에서 각각 점진적으로 서로 가까워져 접지(GND)로 연결 되어진다. 이것은 각각의 스위칭 상태에서 입력 광도파로에서 광의 진행방향으로 좌우로 볼 때 점진적인 굴절률의 변화를 느끼게 하기 위함이다.

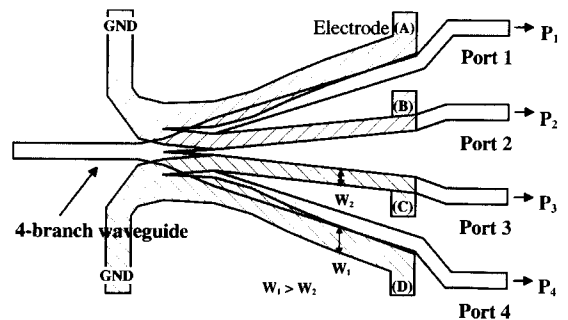


그림 1. 크기가 다른 전극폭을 갖는 4분기 광도파로형 열광학스switch의 구조

Fig. 1. Configuration of the 4-branch waveguide thermo-optic switch with unequal width heaters.

하부클래드, 코어, 상부클래드로 구성된 3층 구조의 광도파로에서 상부클래드의 두께에 따른 전극단면의 온도분포를 계산하여 인접한 광도파로간의 유효온도차이를 계산하였다. 그림 2 (a) 는 스위치의 단면과 이때 계산된 온도분포를 나타낸다. 실리콘 기판 위에 각각  $10 \mu\text{m}$ ,  $4.5 \mu\text{m}$  두께의 하부클래드와 코어가 있고 상부클래드의 두께  $H$  를 변화 시켜가면서 스위치의 단면에서 유한요소법을 사용하여 온도분포를 계산하였다. 온도분포가 계산되면 코어층의 중심을 따라 유효온도(effective temperature)를 계산하여 인접한 광도파로 사이에서 실제 도파광이 겪는 온도차를 계산할 수 있

다. 유효온도는 광모드분포와 온도분포와의 중첩적분값으로서 다음식으로 계산된다<sup>[5]</sup>.

$$\Delta T_{eff,i} = \iint_{-\infty}^{\infty} \Delta T(x,y) \cdot I_{norm,i}(x,y) \cdot dx dy$$

$\Delta T(x,y)$  : 전극으로부터 유기된 온도분포

$I_{norm,i}(x,y)$  : i번째 광도파로를 지나는 광의 세기 분포

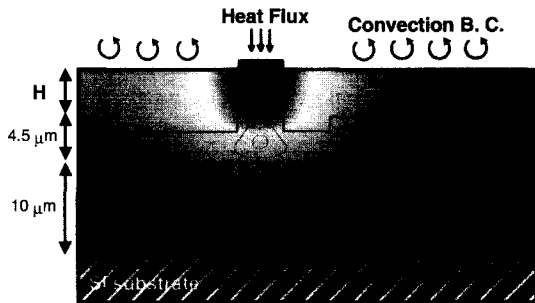
그림 2 (b) 는 상부클래드의 두께 H 가 1.3~7.3  $\mu\text{m}$  일때 코어층 중심을 따라 계산된 유효온도를 나타낸다. 이 그래프에서 알 수 있듯이 상부 클래드의 두께가 얇을수록 인접한 광도파로간의 유효온도차가 커지는 것을 알 수 있다. 즉 상부클래드의 두께가 얇을수록 열원으로 사용된 전극과 광이 지나가는 광도파로 사이의 간격이 줄어들고 발생된 열의 퍼지는 영향이 줄어들어 온도를 높이고자 원하는 광도파로와 원하지 않는 광도파

로 하면 동일한 굴절률의 변화(유효온도차)를 얻기 위하여 필요한 전력의 차가 작아지기 때문에 열광학스위치의 소비전력을 줄이는 역할을 한다.

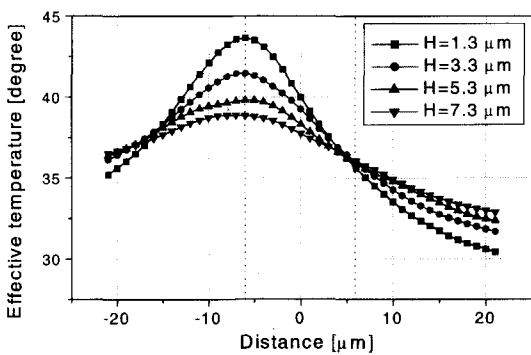
그러나 상부 클래드의 두께를 얇게 하는 것이 열의 퍼짐을 억제하고 광스위치의 소비전력을 줄인다고 해서 무한정 얇게 할 수 있는 것은 아니다. 일반적으로 광도파로를 지나는 광이 금속층을 보면 이로 인한 도파손실을 겪게 되는데 이러한 금속손실(metal loss)을 막기 위하여 상부클래드의 두께를 충분히 두껍게 해야 한다. 따라서 도파광의 금속손실을 최소화 하면서 상부클래드의 두께를 줄이는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 조건을 만족시키기 위하여 코어와 큰 굴절률 차이를 갖는 물질을 상부클래드로 사용하였다. 코어와 굴절률차이가 크면 상부클래드의 두께가 얇더라도 이로 인한 금속손실을 막을 수 있기 때문이다. 그래서 하부클래드와 상부클래드 물질로는 1.2 % 굴절률차이가 있는 폴리이미드(polyimide)계 폴리머를 사용하였고 상부클래드로는 코어와 15 % 굴절률 차이를 갖는 테플론(teflon)을 사용하였다. 유효굴절률법(effective index method)을 이용하여 손실을 계산해 보면 상부클래드의 두께가 1.1  $\mu\text{m}$  이상일 때 이로 인한 금속손실은 0.01 dB/cm 이하로서 거의 무시할 만하다.

그림 3 은 전극폭의 변화에 따른 스위치 단면에서의 유효온도분포의 영향을 살펴보기 위하여 외측전극폭이 내측전극폭과 동일할 경우와 이보다 클 경우 외, 내측 출구로의 각 스위칭 상태에 따른 스위치 단면에서의 유효온도분포를 계산한 것이다. 외측전극폭  $W_1$ 과 내측 전극폭  $W_2$  가 동일할 경우 외측출구로의 스위칭 [0111]<sup>(1)</sup>에서는 스위칭에 필요한 충분한 유효온도차  $\Delta T$ 를 얻을 수 있는 반면 내측출구로의 스위칭 [1011]에서는 port1과 port2사이의 온도차  $\Delta T_{12}$  의 값이 다른 유효온도차에 비해 작다.

이것은 외측출구에 비해 내측출구로의 스위치에서 더 많은 전력이 요구되는 원인이 된다. 그런데 외측전극폭  $W_1$ 이 내측전극폭  $W_2$  보다 커지면 그림에서 보듯이 [0111] 상태일 경우  $\Delta T_{12}$  은 거의 변화가 없지만



(a)



(b)

그림 2. 상부클래드의 두께에 따른 유효온도분포 영향 (a) 온도분포 (b) 유효온도

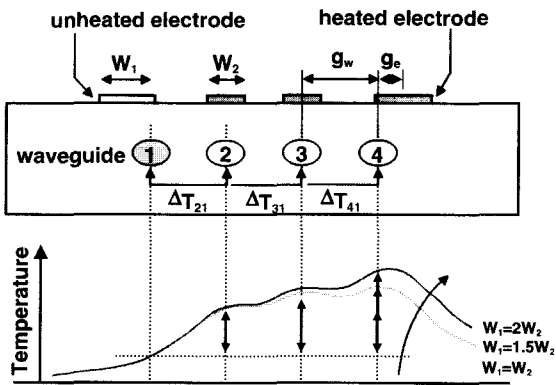
Fig. 2. Effect of the thickness of overcladding layer on the effective temperature distribution.

(a) Temperature distribution (b) Effective temperature.

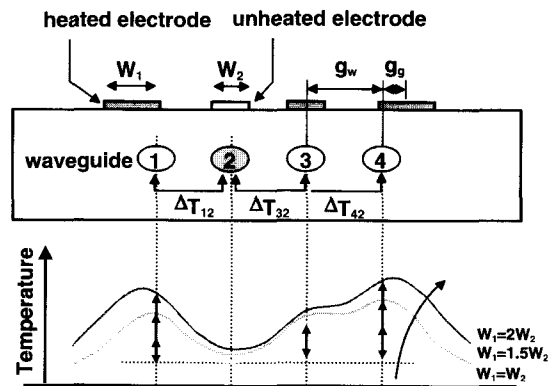
로 사이의 유효온도차를 더 크게 할 수 있다. 다른 말

(1) 스위칭 상태에서 '0'는 해당 전극에 전원을 인가하지 않았을 때를 나타내고 '1'은 전원을 인가할 때를 나타낸다. 그래서 [0111], [1011], [1101], [1110]는 각각 출구 1, 2, 3, 4로의 스위칭 상태를 나타낸다.

$\Delta T_{31}$ ,  $\Delta T_{11}$  은 점점 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 [1011] 상태일 경우 외측전극의 폭  $W_1$  의 크기에 따라  $\Delta T_{32}$  의 변화는 거의 없는 반면  $\Delta T_{12}$ ,  $\Delta T_{42}$  의 크기가 점점 커진다. 특히 [1011] 상태에서  $\Delta T_{12}$  의 크기가 개선되고 있는 것에 주목할 수 있다. 이러한 개선은 내측 출구로의 스위칭 [1011] 상태에서 문제가 되었던 port 1 과 port 2 사이의 누화를 개선시키고 전체 스위치의 스위칭 상태에 따른 소비전력의 편차를 줄인다.



(a)



(b)

그림 3. 크기가 다른 전극폭의 유효온도분포 영향

(a) [0111] (b) [1011]

Fig. 3. Effect of the unequal width heaters on the effective temperature distribution.

(a)[0111] (b) [1011]

그러나 외측전극의 폭을 제한 없이 크게 할 수 있는 것은 아니다. 동일 전압에서 전극폭 비에 비례하여 외측전극에서 소비되는 전력이 내측전극에서 소비되는 전력에 비해 더 크기 때문에 외측전극의 폭이 내측전극의 폭에 비해 과다하게 커지면 도리어 이로 인하여

스위칭 상태에 따른 전력편차가 커지게 된다. 뿐만 아니라 [0111] 상태의  $\Delta T_{41}$ 과 [1011] 상태의  $\Delta T_{42}$ 의 값이 다른 출구 간의 온도차에 비해 너무 커지고 이것은 분기영역에서 발생할 수 있는 고차모드의 결합으로 이어져 도리어 port 1과 port 4 그리고 port2 와 port 4 사이의 누화를 나쁘게 할 수 있다.

본 논문에서는 [0111] 상태의  $\Delta T_{41}$ 과 [1011] 상태의  $\Delta T_{42}$  의 값이 다른 온도차에 비해 너무 커지지 않고 넓은 전극폭의 효과를 가질 수 있도록 하기 위하여  $W_1 < 2W_2$ 의 범위에서  $W_1$  의 값을 결정하였다. 즉 내측 전극 폭이 광도파로의 폭과 동일하게  $6 \mu\text{m}$  이기 때문에 외측전극의 폭은  $10 \mu\text{m}$  정도로 설계하였다. 그리고 광도파로와 외측전극 간의 상대적인 위치인  $g_e$  는 광도파로간의 간격  $g_w$  에 따라 온도분포를 계산하여 각 광도파로 간의 유효온도차의 편차가 최소가 되는 위치로 결정하였다.

### III. 4분기 열광학스위치의 제작 및 측정

제안된 4분기 열광학스witch는 폴리머 물질을 재료로 하여 립모양의 광도파로형태로 제작되었다. 그림 4 에서 보듯이 하부클래드와 코어는 1.2 % 굴절률차를 갖는 폴리이미드계 폴리머를 사용하였고 상부클래드는 코어와 15 % 굴절률 차이를 갖는 테플론(teflon)을 사용하였다. 하부클래드  $6.5 \mu\text{m}$ , 코어  $4.2 \mu\text{m}$ , 식각깊이는  $1.3 \mu\text{m}$  이고 상부클래드의 두께는  $1.8 \mu\text{m}$  로서 상당히 얇게 제작되었다.

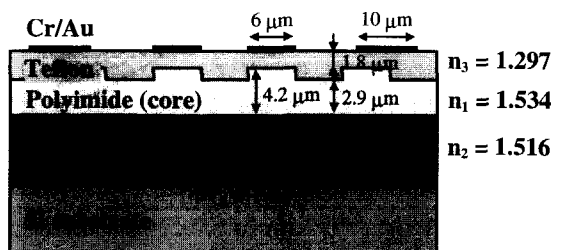


그림 4. 제작되어진 열광학스위치의 단면구조

Fig. 4. Cross-section of the fabricated thermo-optic switch.

제작된 광스witch는  $1550\text{nm}$  파장대에서 측정되었다. TE 편광에서  $310\sim 390 \text{ mW}$  정도의 소비전력에서  $-16 \text{ dB}$ 이하의 누회특성을 나타내었고  $4.7 \text{ dB}$  의 삽입손실,

1 ms 이하의 스위칭 속도를 보였다. 스위치의 각 스위칭 상태를 동일한 전압으로 구동할 경우 내, 외측 전극의 폭이 다르기 때문에 서로 간의 소비되는 전력이 차이가 난다. 이로 인하여 스위칭 상태에 따라 소비전력의 편차가 생긴다. 이 소자의 경우 모든 스위칭 상태에서 -16 dB 이하의 누화특성을 얻기 위하여 17.5 V 이상의 구동전압이 필요하다. 이때 내측전극에서는 80 mW, 외측전극에서는 157 mW의 전력이 각각 소비된다. 따라서 내측출구로의 스위칭 [1011], [1101]에서는 390 mW의 전력이 소비되고 외측출구로의 스위칭 [0111], [1110]에서는 310 mW의 전력이 소비되어 약 20%의 소비전력에서의 편차가 발생한다. 광스위치의 인가 전력에 대한 각 출구에서의 광세기를 살펴 보면 그림 5와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 내측출구로의 스위칭 [1011], [1101] 상태는 현저하게 개선되어 300mW 정도에서 -20 dB 이하의 누화 특성을 나타내지만 외측출구로의 스위칭 [0111], [1110]에서는 -16 dB 정도에서 누화특성이 포화되는 것을 알 수 있다. 그리고 [0111]에 비해 [1110]의 누화특성이 조금 좋지 않은데 이것은 폴리머 코팅과 광도파로 및 전극 패턴 제작시 생길 수 있는 불균일성과 정렬오차로 인하여 스위치 성능의 대칭성이 깨진 것으로 생각된다. 전반적인 특성으로 볼 때 외측전극폭을 크게함으로써 내측출구로의 스위칭 상태가 크게 개선되고 스위칭 상태에 따른 소비전력 편차를 상당히 줄일 수 있음을 볼 수 있다. TM 모드에서의 스위칭 특성은 TE 모드와 거의 비슷한 경향을 나타내었으나 TE 모드에 비해 누화특성이 저주한 -14 dB 정도를 나타내었다. 이것은 소자 제작시 나타나는 스트레스(stress) 문제에 기인한 것으로 밝혀졌다<sup>7)</sup>. 설계시 코아와 굴절률차가 큰 물질로서 테플론(teflon)을 사용하였는데 이 물질은 코아 물질인 폴리이미드와 열팽창계수 차이가 커서 코팅후 베이킹(baking) 단계에서 각 층 간의 큰 스트레스를 여기서킨다. 이러한 스트레스는 특히 TM 모드에서 인근 광도파로로의 결합현상을 일으켜 스위치의 누화성능을 저하시켰다. 이러한 문제는 굴절률차이가 크면서 비슷한 열팽창계수를 갖는 다른 물질을 코아와 클래드의 물질로 선택함으로써 해결할 수 있다.

설계단계에서 스위치의 성능은 -20 dB 이하의 누화 특성을 나타내었지만 실제 제작 후 측정단계에서 -16 dB 정도로 저하되었다. 이러한 원인으로는 설계시 고려하지 못한 소자의 특성들이 포함된다. 소자 제작시 4분

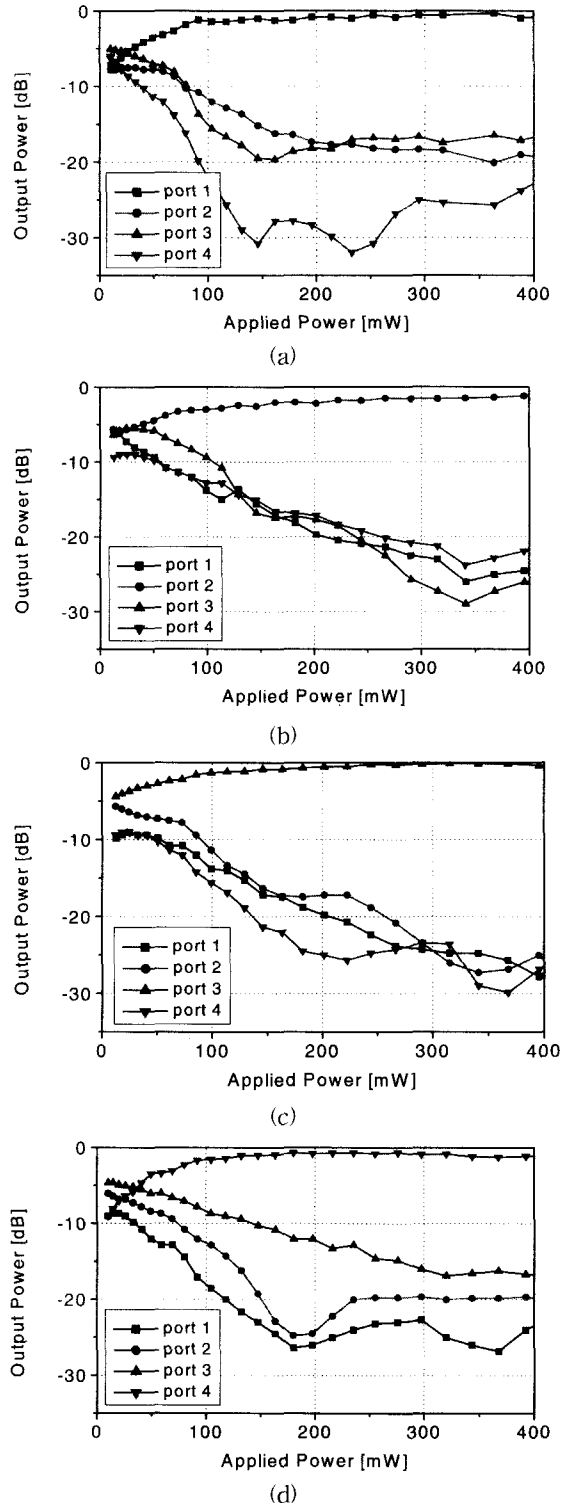


그림 5. 인가 전력에 따른 출력 광세기 변화  
 (a) [0111] (b) [1011] (c) [1101] (d) [1110]  
 Fig. 5. Measured transfer characteristics.  
 (a) [0111] (b) [1011] (c) [1101] (d) [1110]

기 광도파로의 분기영역에서 분기점이 무디어 지게 되는 경향이 있어 실제  $1\mu\text{m}$  내외의 무딘 정점(blunted vertex)이 발생하는데 이것은 스위치의 누화특성을 저하시킨다<sup>[8]</sup>. 또한 다분기 열광학스위치의 구조상 전극간의 간격이 넓은 출력쪽에 비해 전극간의 간격이 좁은 분기영역에 열이 집중되는 현상이 발생한다. 이러한 현상도 무딘 정점과 함께 스위치의 특성을 저하시킴을 빔전파방법(beam propagation method)을 통하여 확인할 수 있었다. 분기영역에 열이 집중되는 현상과  $1\mu\text{m}$  정도의 무딘 정점의 크기를 고려하여 수치모사한 결과 외측출구의 경우  $-14\text{ dB}$ , 내측의 경우  $-25\text{dB}$  정도의 누화특성을 보여 외측출구에서의 현저한 누화특성의 저하를 나타내었다. 이것은 분기영역에 집중된 열로 인하여 큰 굴절률 변화가 생긴데다가 입력광이 무딘 정점으로 갑작스런 굴절률변화를 겪기 때문에 이로 인하여 입력광이 분기영역에서 고차모드로 결합되는 확률이 높아진 것으로 해석할 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 다분기 광스위치의 누화특성을 개선시키기 위하여 중요하게 고려되어야 할 점은 광도파로의 패턴을 형성할 때 분기영역의 무딘 정점의 크기를 최소화하는 것과 분기영역에서의 급격한 굴절률 변화를 줄이는 전극구조나 방법을 모색하는 것으로 생각된다.

#### IV. 결 론

4분기 열광학스위치에서 내, 외측으로의 스위칭 상태에 따라 요구되는 소비전력의 차이를 줄이고 열이 퍼지는 현상으로 인한 스위칭 성능의 저하를 개선하기 위하여 굴절률의 차이가 큰 폴리머 물질을 코아와 클래드 물질로 사용하여 상부클래드의 두께를 얇게 하고 전극구조에서는 내측전극폭에 비해 외측전극폭을 넓게 설계하였다. 이렇게 함으로서 스위칭 상태에 따른 소비전력의 차를 줄일 수 있을 뿐 아니라 스위칭에 필요한 소비전력도 상당히 줄일 수 있었다. 제작된 크기가 다른 전극폭을 갖는 4분기 열광학스위치는  $310\sim 390\text{ mW}$  정도의 소비전력에서  $16\text{ dB}$  이하의 누화특성을 나타내었고 삽입손실은  $4.7\text{ dB}$ , 스위칭 속도는  $1\text{ ms}$  이하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. Okamoto, A. Watanabe, and K. Sato, "Optical path cross-connect node architectures for photonic transport network," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 1410-1422, 1996.
- [2] A. Watanabe, S. Okamoto, and K. Sato, "Optical path crossconnect node architectures with high modularity for photonic transport networks," *IEICE Trans. Comm.*, vol. E77-B, no. 10, pp. 1220-1229, 1994.
- [3] K. Mitsunaga, K. Murakami, M. Masuda, and J. Koyama, "Optical LiNbO<sub>3</sub> 3-branched waveguide and its application to a 4-port optical switch," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 20, pp. 3837-3842, 1980.
- [4] M. Belanger and G. L. Yip, "Theoretical and experimental investigation of an active three-branch Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide switch," *Appl. Opt.*, vol. 28, no. 1, pp. 53-59, 1989.
- [5] K. Propstra, T. Hoekstra, A. Borreman, and M. Diemeer, "First thermo-optic 1x3 digital optical switch," *ECIO'97*, Stockholm Sweden, 1997.
- [6] H.-C. Song, S.-Y. Shin, W.-H. Jang, and T. H. Rhee, "1x4 thermo-optic switch based on four-branch waveguide," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 18, pp. 1546-1548, 1999.
- [7] R. Moosburger, E. Brose, G. Fischbeck, C. Kostrzewa, B. Schuppert, and K. Petermann, "Robust digital optical switch based on a novel patterning technique for oversized polymer rib waveguides," *Proc. ECOC*, TuC.1.5, pp. 67-69, Oalo, 1996.
- [8] J. J. G. M. van der Tol, J. W. Pedersen, E. G. Metaal, Y. S. Oei, F. H. Groen, and P. Demeester, "Sharp vertices in asymmetric Y-junctions by double masking," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 249-254, 1994.

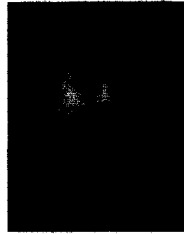
저 자 소 개



宋 泓 采(正會員)

1970년 11월 13일생. 1993년 2월 경  
북대학교 전자공학과 공학사. 1995  
년 2월 한국과학기술원 전기및전자  
공학과 공학석사. 1995년 3월 한국  
과학기술원 전기및전자공학과 박사  
과정. 1999년 9월~현재 삼성전자

정보통신 광소재사업팀 기술개발그룹 선임연구원. 주  
관심 분야는 PLC 소자 설계 및 제작



李 泰 衡(正會員)

1962년 11월 19일생. 1987년 6월  
Tennessee 주립대 B.Chem. 1989년  
12월 Rensselaer Polytechnic  
Institute M.S. 1994년 6월  
Rensselaer Polytechnic Institute  
Ph.D. 1995년 3월~현재 삼성전자

정보통신 광소재사업팀 기술개발그룹 선임연구원. 주  
관심 분야는 PLC 소자 설계 및 제작

申 相 永(正會員) 第34卷 D編 第 11號 參照