

두모드간섭 현상을 이용한 4×4 열광학스위치 설계

정 명 선*, 김 정 근

광주대학교 컴퓨터전자통신공학부

E-mail : nanjms@hanmail.net, jeongkim@hosim.gwangju.ac.kr

Design of 4×4 Thermo-optic Switch using Two Mode Interference coupler

Myung-Sun Jung*, Jeong-Geun Kim

Division of Computer, Electronic & Communication Engineering
Gwangju University

Abstract

In this paper, we investigated the characteristics of 4×4 thermo-optic switch using two mode interference(TMI) coupler. We designed this matrix switch by using a configuration which combines a double Mach-Zehnder interferometer(MZI) switching unit. The average extinction ratio and average excess loss of the 4×4 thermo-optic switch was 33.7dB, 0.29dB, respectively.

I. 서론

최근 WDM은 광백본망에 없어서는 안될 중요한 존재로 성장하였으며, 이를 이용한 광백본망에 불가결한 것이 광스위치이다. 기존의 광백본망은 복수의 단파장(SONET/SDH) 네트워크를 멀티 대 멀티를 접속한 메쉬형의 구성이었다. 이후 1995년부터 대도시간 전송용량 부족이 심각해지면서 통신 사업자들은 복수의 파장을 이용한 WDM을 도입하여 두 지점간 고속화를 도모하기 시작하였다. 이와 같이 일대일 접속의 WDM 네트워크가 도입되자 복수의 WDM 네트워크를 상호 접속할 필요성이 대두되었는데, 여기서 없어서는 안될 것이 광스위치이다. 광스위치를 이용함으로써 멀티 대

멀티 접속의 WDM 네트워크를 구축할 수 있다. WDM이 향후 광백본망의 주류가 되고, 이 WDM에 필수적인 것이 광스위치라고 보았을 때 광스위치 도입 및 개발은 우리에게 시사하는 바가 매우 클 것으로 생각된다[1]. 본 논문에서는 OXC, OADM에 사용되어지는 4×4 열광학 스위치를 설계함에 있어 열광학 효과 원리를 바탕으로 열광학온도 계수가 실리카보다 큰 폴리머를 사용하였고, 동작파장 1.55 μm 와 상대굴절률차가 낮은 0.3%에서 기본모드와 제1고차모드를 가지는 두모드간섭 결합기를 이용하였다. 이 소자는 2×2 열광학 스위치를 double Mach-Zehnder 간섭계(MZI) 구조로 연결한 matrix 스위치이다. 이에 대한 4×4 열광학 스위치의 특성을 제시하였다.

II. 다중모드간섭(MMI) 현상

다중모드간섭(MMI : Multimode Interference)을 이용한 소자는 넓은 광대역, 편광의 무의존성, 저손실, 작은 크기, 제조의 용이성 등의 장점 때문에 최근에 많은 관심을 일으키고 있다[2]. 다중모드간섭 소자는 다중모드 도파로 내에서 존재할 수 있는 모드들의 위상 관계를 해석함으로써 광파의 도파축에 입사광의 전체 분포가 일정한 주기로 단일 또는 다중 형태로 재생되는 다중모드 도파로의 특성을 이용한다.

다중모드간섭은 다중모드 도파로 내에서의 self-

imaging 이론에 근거를 두어 해석된다. 이 self-imaging이란 입력파의 분포를 파의 진행방향으로 주기적인 간격마다 하나 또는 여러 개의 상(image)으로 재생시킬 수 있는 현상을 말한다. 즉, 광파의 전파방향으로 입사된 진계 분포가 일정한 주기로 단일 또는 다중형태로 재생되는 다중모드 도파로의 특성을 갖는다. 다중모드 도파로의 self-imaging은 그림 1과 같이 $y-z$ 평면상에 도파로 폭을 W_M , 입력필드를 $\psi(y,0)$, 광파의 진행방향을 z 축으로 나타내었다[3].

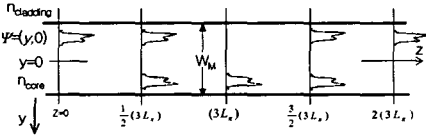


그림 1. 다중모드 도파로의 self-imaging

다중모드 도파로에는 기본모드를 포함한 여러 개의 고차모드들이 횡축으로 존재한다. 본 논문에서는 기본모드와 제1고차모드, 즉 두 개의 모드만을 가지는 TMI(Two Mode Interference)를 이용하였다.

일반적으로, 실효폭 W_{ev} 은 기본모드에 대응하는 실효폭에 의해 식 (1)과 같이 근사화할 수 있다.

$$W_{ev} \approx W_e = W_M + \left(\frac{\lambda_0}{\pi} \right) \left(\frac{n_c}{n_{eff}} \right)^{2\sigma} (n_{eff}^2 - n_c^2)^{-1/2} \quad (1)$$

여기서, $\sigma=0$ 일 때 TE 모드이고, $\sigma=1$ 인 경우에 TM 모드에 대응한다. 그리고 n_{eff} 는 코어의 유효굴절률이고, n_c 는 클래딩 굴절률이다.

식 (2)는 두 개의 최저차모드인 기본모드와 제1고차모드의 결합길이로서 L_x (beat length)로 정의된다.

$$L_x = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4n_{eff}W_e^2}{3\lambda_0} \quad (2)$$

III. 열광학 스위치의 원리

본 논문에서 제안한 두모드간섭 현상을 이용한 4x4 열광학 스위치는 2x2 열광학 스위치를 matrix array한 것이다. 그림 2를 보면, Mach-Zehnder 간섭계(MZI)의 구조는 입력단에 광을 입사하면 입사된 광들이 서로 근접해서 광 상호간의 간섭이 일어나는 첫번째 3dB TMI 결합기, 두 광이 위상차 $\Delta\phi$ 에 의해 π 만

큼의 위상천이를 격계된 후 두 번째 3dB TMI 결합기에서 상호작용하여 최종 출력단으로 나오게 된다[4].

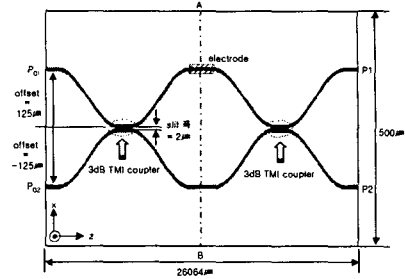


그림 2. 2x2 열광학 스위치의 구조

도파로에 온도 T 의 열을 가하면, 온도의 변화와 매질의 밀도 ρ 의 변화에 의해 도파로의 굴절률 n 이 변하게 된다. 온도에 대한 굴절률의 변화율을 열광학계수(thermo-optic coefficient)라 하고, 식 (3)과 같다[5].

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dT} &= \left(\frac{\partial n}{\partial \rho} \right)_T \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) + \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_\rho \\ &= - \left(\frac{\rho \partial n}{\partial \rho} \right)_T \gamma + \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_\rho \quad (3) \end{aligned}$$

폴리머인 경우 열팽창계수 ν 는 $2 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 이고, 열광학계수 dn/dT 는 $-1 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 이다.

IV. 4x4 열광학 스위치의 구조

본 논문에서는 TMI 현상을 이용한 것으로, 두 개의 모드, 즉 기본모드와 제1고차모드가 생기기 위한 TMI 폭의 조건은 상대굴절률차가 0.3%이었을 때 $16.4 \mu\text{m}$ 이었다. 이 조건에 맞게 설계하기 위해 TMI 도파로의 폭을 $16 \mu\text{m}$ 로 설정하였으며, 이 때 3dB TMI 결합기의 결합길이는 $1032 \mu\text{m}$ 이었다.

그림 2는 2x2 열광학 스위치의 구조를 보여주고 있다. 이 구조는 3dB TMI 결합기 두 개가 마흐젠더 형태로 종속 연결되어 있으며, 각각의 입력 및 출력 분기도파로에서의 방사손실을 줄이기 위해서 cosine bend 도파로를 사용하였고 충분한 곡률반경을 주었다. 기존의 단일 모드 광섬유와 쉽게 결합하기 위해 입·출력도파로 간격을 $250 \mu\text{m}$ 로 분리시켰다. 두모드간섭 현상은 두 개의 imaging 거리를 줄이고 소자의 길이를 줄이기 위해서 일반간섭을 이용하였고 3dB TMI 결합기 부분에서 공정상의 문제점을 보상하기 위해 slit 폭을 $2 \mu\text{m}$

로 하였다.

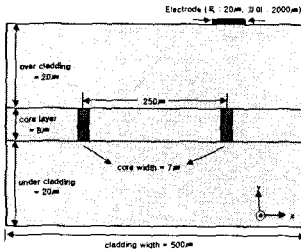


그림 3. 2×2 열광학 스위치의 전극 단면도

그림 3은 그림 2의 A-B 부분을 잘랐을 때 전극 단면도를 보여주고 있다. 도파로는 매립형 채널 도파로이고, 도파로의 재료는 열광학 온도 계수가 실리카보다 큰 폴리머를 이용하였다. 이 구조에서 전체 도파로 폭은 500 μm , 하부층 클래딩(under cladding)과 상부층 클래딩(over cladding)의 높이는 20 μm 로 같게 하고, 코어층(core layer)의 높이는 8 μm 로 설정하였다. 이에 따른 코어와 클래딩의 굴절률은 각각 1.44835, 1.444이다. 그리고 전극은 Mach-Zehnder 간섭계 영역의 위쪽 도파로에 놓았다. 여기서 전극폭은 20 μm , 길이는 z축으로 2000 μm 로 하였다.

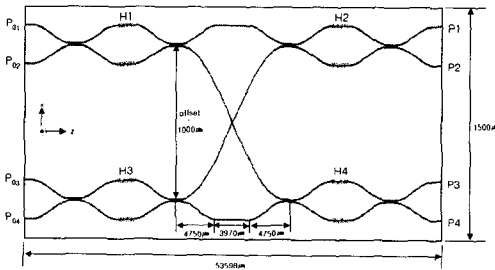
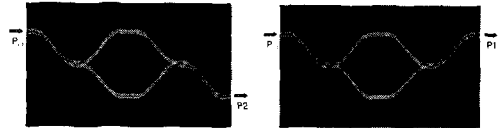


그림 4. 4×4 열광학 스위치의 구조

그림 4는 2×2 열광학 스위치를 matrix array한 4×4 열광학 스위치의 구조를 보여주고 있다. 전극은 Mach-Zehnder 간섭계 영역의 H1, H2, H3, H4에 각각 놓았다. 그림에서 본 것처럼 전극을 모두 8개 달았으나 본 논문에서는 Mach-Zehnder 간섭계의 두 arm 도파로 중 위쪽에만 전극전력을 가해 시뮬레이션을 하였다. 특히 중요하게 볼 점은 전송효율을 고려하여 offset을 1000 μm 로 주었으며, 2×2 스위치와 2×2 스위치 사이의 교차점 길이는 13470 μm 에서 최적화를 시켜 전체 도파로 길이가 53598 μm 가 되었다.

V. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 장에서는 앞장에서 제시한 두모드간섭 현상을 이용한 4×4 열광학 스위치를 설계하여 그 특성 결과를 제시하였다. 그림 5는 2×2 열광학 스위치의 광분포를 나타낸 것으로서, 그림 5(a)와 같이 P₀₁에서 광을 입사하면 전극전력을 인가하지 않았을 경우 P₂로 광이 출력된다. 그러나 그림 5(b)와 같이 Mach-Zehnder 간섭계의 위쪽 arm에 전극전력을 인가하면 굴절률이 변하여 위상을 변화시킬 수 있다. 결국 위상차에 의해서 P₁로 광이 출력되는 것을 볼 수 있다. 다시 말해, 도파로에 전극을 가하면, 온도의 변화와 매질의 밀도 변화에 의해 도파로의 굴절률이 변하게 된다. 온도에 따른 굴절률 변화는 폴리머의 온도에 대한 굴절률 변화, 즉 열광학 계수는 $-0.9 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$, 열전도율은 0.2[W/m/K]로 가정하였다.



(a) 전극전력 OFF 상태 (b) 전극전력 ON 상태

그림 5. 2×2 열광학 스위치의 광분포

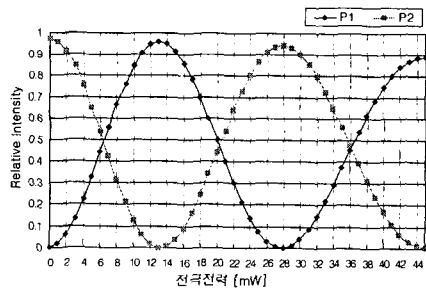
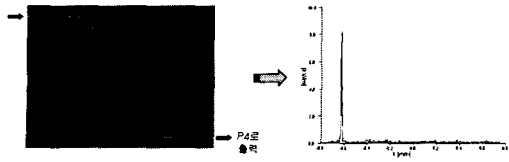
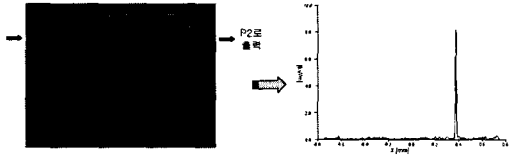


그림 6. 전극전력에 따른 출력전력

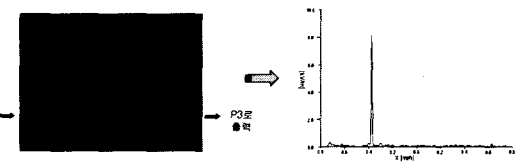
그림 6은 전극전력에 따른 광강도의 변화를 보여주고 있다. 전극전력을 0mW에서 45mW까지 각각 1mW씩 전력을 인가하여 이에 대한 광강도의 변화를 조사한 결과, P₀₁에서 광을 입사하였을 경우 cross 상태에서 bar 상태로 완전히 스위칭이 되어짐을 알 수 있었다. 구체적으로 말하자면, 전극전력이 13mW에서 bar 상태로 스위칭이 되었고, 전극전력이 28mW에서 다시 한번 cross 상태로 스위칭이 되었다는 것이다. 그 결과 전극전력이 13mW일 때 전송효율과 소광비는 각각 96%, 32dB이었다.



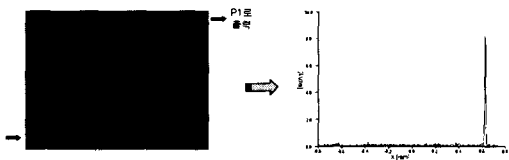
(a) P₀₁에 광을 입사하였을 경우



(b) P₀₂에 광을 입사하였을 경우



(c) P₀₃에 광을 입사하였을 경우



(d) P₀₄에 광을 입사하였을 경우

그림 7. 각 입력단에 광을 입사하였을 경우
광분포와 출력 스펙트럴 응답

그림 7은 P₀₁, P₀₂, P₀₃, P₀₄의 입력단에 광을 입사하였을 경우 광분포와 출력 스펙트럴 응답을 보여주고 있다. 가령, 전극전력을 인가하지 않으면 P₀₁에 광을 입사해도 첫번째 단의 2×2 열광학 스위치는 cross 상태로 전달되어지고, 두 번째 단의 2×2 열광학 스위치도 전극전력을 인가하지 않았으므로 또 다시 cross 상태가 되어 결국 P₄로 광이 출력되어지는 것을 그림 7(a)에서 볼 수 있다.



그림 8. H1, H2 전극전력 인가시

만약 그림 8과 같이 H1과 H2에 전극전력을 인가하였다면, 첫번째 단의 2×2 열광학 스위치는 위상이 변하여 bar 상태로 전달되어지고, 두 번째 단의 2×2 열광학 스위치도 전극전력을 인가하였으므로 bar 상태가 되어 결국 P1로 출력되어진다.

VI. 결론

본 논문에서는 두모드간섭현상을 이용한 4×4 열광학 스위치를 상대굴절률차 0.3%인 경우에 설계하여 히터 전력에 따른 스위칭 특성들을 제시하였다. 도파로의 재료는 온도에 따른 굴절률 변화율이 실리카보다 상대적으로 큰 폴리머를 이용하였다. 이 전송특성은 해석의 용이함과 해석시간을 줄이기 위해서 3차원구조의 도파로를 유효굴절률법(EIM)에 의해 2차원 구조의 도파로로 근사화시킨 후, 반사파에 의한 영향을 고려해 투명경계조건을 이용하였다.

시뮬레이션 결과, 2×2 열광학 스위치는 전극전력이 OFF 상태일 경우 소광비와 잉여손실은 각각 40dB, 0.12dB이고, ON 상태일 경우 32dB, 0.18dB이었다. 2×2 열광학 스위치를 matrix array한 4×4 열광학 스위치는 전극전력이 OFF 상태일 경우 평균 소광비와 평균 잉여손실은 각각 33.7dB, 0.29dB이고, ON 상태일 경우 33.7dB, 0.36dB이었다. 추후 과제로는 설계 결과를 바탕으로 마스크 제작 및 공정 의뢰하여 비교 검토하는 것이다.

참고문헌

- [1] IT정보센터, “광스위치 개발동향”, 주간기술동향 통권 1024호, 2001.11.28.
- [2] Juerg Leuthold and *et al.*, “Multimode Interference Couplers with Tunable Power Splitting Ratios,” *J.Lightwave Technology*, vol.19, no.5, pp.700-707, 2001.
- [3] Lucas B. Soldano, Erik C. M. Pennings, “Optical Multimode Interference Devices Based on Self-Imaging : Principles and Applications” *J. Lightwave Technology*, Vol.13, No.4, pp.615-627, April 1995.
- [4] Derk Hendrik Pieter MAAT “InP-Based Integrated MZI Switches for Optical Communication”, natuurkundig ingenieur, geboren te Middelstum, pp. 37-38, april 2001.
- [5] Murphy. Edmond J, “Integrated Optical Circuits : design and applications”, Marcel Dekker, pp. 239-298, 1999