
다중모드 평면 도파로와 홀로그램 필터를 이용한 광신호 교환의 광학적 구현

신 동 학*

Optical implementation of optical switching by use of a multimode planar waveguide and hologram filters

Dong-Hak Shin*

요 약

M 개의 다중모드 평면 도파로와 N 개의 홀로그램 필터를 이용하여 M 개의 입력단자와 N 개의 출력단자 사이에 광신호 교환을 수행할 수 있는 방법을 제안한다. 열광학 폴리머로 제작된 다중모드 평면 도파로는 광신호 교환을 위한 광신호 경로를 제공하고, 전기적 신호로 출력 스펙클 패턴을 변화시킨다. 다중모드 평면 도파로로부터 발생한 스펙클 패턴들은 연결 목적지를 결정하는 목적코드로 이용되며, 공간다중화된 홀로그램 필터에 의해 출력단자로 연결된다. 제안한 시스템에 대해 광신호 교환이 가능함을 실험적으로 보였다.

ABSTRACT

We present a method to implement an $M \times N$ switching system by use of an $M \times 1$ multimode planar waveguide and N hologram filters. The $M \times 1$ multimode planar waveguide provides the pass of optical signals and changes the output speckle patterns by applying an electrical signal. The complex speckle patterns generated from the multimode planar waveguide are recorded into the N hologram filters and used as the code for destination. The feasibility of our method is experimentally demonstrated.

키워드

광신호 교환, 멀티모드 평면 도파로, 홀로그램 필터, 스펙클 패턴

I. 서 론

최근 다중모드 광섬유에서 얻어지는 스펙클 패턴 (Speckle pattern)을 여러 형태의 광정보처리에 이용하려는 연구가 수행되어 왔다 [1-8]. Saffman과 Anderson은 스펙클 패턴을 광네트워크에 적용하여 새로운 다중화 방법을 제안하였고 [1], Yu 등은 다중모드 광섬유의 스펙

클 패턴을 홀로그래피 기술 또는 컴퓨터 기술로 처리해서 진동, 온도, 변위 등을 측정하는 연구를 수행하였다 [2,3]. 그리고 스펙클 패턴을 홀로그래피 메모리에 적용하여 체적홀로그래프를 기록하고 읽기 위한 기준빔으로 사용한 연구도 보고되었다 [4].

한편 저자는 이전에 스펙클 패턴을 광신호 교환 방법에 적용한 연구를 수행하였다 [5,6]. 이 연구에서는 스펙

클 패턴을 광신호 교환을 위한 목적지의 연결코드로 사용되었다. 스펙클 패턴을 발생하기 위해서 멀티모드 광섬유를 사용하였는데, 이 경우 광섬유를 고정하기 위한 장치 및 주위의 변화에 민감하게 변화되기 때문에 일정한 스펙클 패턴을 장시간 유지하는 것은 쉽지는 않았다. 또한 스펙클 패턴의 변화를 위해 입력 빔의 입사각이나 편광과 같은 기계적인 움직임을 이용하여 변화를 만들어 내기 때문에 빠른 스펙클 패턴의 변화를 만들어 낼 수 없다.

본 논문에서는 이런 문제점을 개선할 수 있으며, 집적화 기술을 이용하여 제작된 멀티모드 평면 도파로를 사용하는 광신호 교환 방법을 제안한다. 제안한 방법은 M 개의 다중모드 평면 도파로 (Multimode planar waveguide, MPW)와 N 개의 공간다중화된 홀로그램 필터(Hologram filter)를 이용하여 M 개 입력단자와 N 개 출력단자 사이에 광신호 교환을 수행한다. 멀티모드 평면 도파로는 광신호 교환을 위한 광신호 경로를 제공하고, 전기적 신호로 출력 스펙클 패턴을 변화시킨다. 멀티모드 평면 도파로로부터 발생한 스펙클 패턴들은 연결 목적지를 결정하는 목적코드로 이용되며, 홀로그램 필터에 의해 출력단자로 연결된다. 집적 평면 기술을 멀티모드 평면 도파로에 적용함으로써 물리적으로 안정된 특성을 얻을 수 있고, 전기적으로 빠른 스펙클 패턴의 변화를 만들어 낼 수 있다.

2장에서는 본 논문에서 제안하는 광신호 교환 시스템과 교환원리에 대해서 설명하고, 3장에서는 실제 제작한 멀티모드 평면 도파로의 광학적 테스트와 간단한 광교환 시스템에서 적용한 실험 결과를 보고한다.

II. 광신호 교환의 원리

그림 1은 본 논문에서 제안하는 M 개의 입력단자 (Input terminal)와 N 개의 출력단자 (Output terminal) 사이의 광신호 교환을 구현할 수 있는 방법을 보여준다. 이 방법은 크게 2가지 부분으로 나누어진다. 하나는 광신호 교환을 위한 스펙클 패턴을 만드는 M 개의 멀티모드 평면 도파로고, 다른 하나는 이들 스펙클 패턴들을 분리하기 위한 N 개의 공간다중화된 홀로그램 필터다. 각각의 입력측 멀티모드 평면 도파로는 입력 신호빔의 상태를 조절할 수 있는 전극(Electrode)을 포함한다. 이 전극

에서는 인가되는 전압에 의해서 입력측 멀티모드 평면 도파로의 굴절률 변화가 야기되며, 이를 통해서 출력 빔의 스펙클 패턴을 조절하도록 설계한다. 하나의 출력측 멀티모드 평면 도파로는 홀로그램 매질에 직접적으로 연결되어 있다. 홀로그램 매질 내에는 출력단자에 대응하여 연결되도록 N 개의 홀로그램 필터가 기록되어 있다.

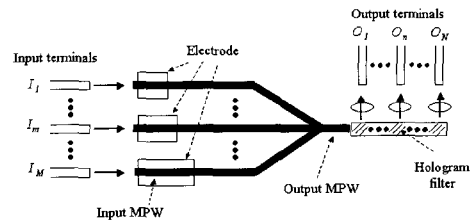


그림 1. M 입력단자와 N 출력단자 사이의 광신호 교환 시스템.

Fig. 1. Optical switching system between M input terminals and N output terminals.

사실 멀티모드 평면 도파로에 입력되는 빔은 모드 섞임 현상에 의해 스펙클 패턴으로 출력된다. 이 모드 섞임 현상은 일차적으로 선형적이고 결정적 과정(deterministic process)이다. 그러나 매우 복잡한 현상이어서 출력단에서 얻는 각 모드의 위상지연은 $[0, 2\pi]$ 범위에서 균일한 확률밀도 함수를 갖는 통계적으로 독립인 랜덤 변수로 취급된다. M 개의 입력 빔들을 각각의 입력측 멀티모드 평면 도파로에 하나씩 인가할 때, 출력측 멀티모드 평면 도파로에서는 M 개의 서로 다른 스펙클 패턴을 얻게 된다. 그리고 여기되는 모드의 수가 충분히 많으면 각 출력측 도파로에서 얻어지는 M 개의 스펙클 패턴들은 서로 직교하게 된다. 마찬가지로, 하나의 입력측 멀티모드 평면 도파로에서 N 개의 서로 다른 전압을 인가함으로써, 출력측 멀티모드 평면 도파로에서 서로 직교하는 N 개의 스펙클 패턴을 얻을 수 있다. 스펙클 패턴은 멀티모드 평면 도파로의 물리적 상태에 매우 민감하지만, 멀티모드 평면 도파로가 물리적으로 안정되어 있다면 이들 스펙클 패턴들은 시간적으로 변하지 않으며 또한 재생 가능하다. 따라서 본 논문에서 이론적으로 기술하는 방법에 대해서 충분히 멀티모드 평면 도파로가 안정되었다고 가정하고 설명한다.

그림 2에서 m 번째 입력측 멀티모드 평면 도파로에 인

호빔 I 를 입력전압 p ($p=1, 2, \dots, N$)로 인가하는 경우를 I_m^p 로 표시하자. 이것은 m 번째 입력단자에서 p 번째 출력단자로의 연결을 의미한다. 이때 출력측 멀티모드 평면 도파로에서 얻어지는 스펙클 패턴의 복소 전개분포를 E_m^p 로 나타내기로 하자. 그러면 m 과 n 번째 입력측 멀티모드 평면 도파로에 있는 전극들에 각각 입력상태 p 와 q 를 인가하여 얻은 2개의 스펙클 패턴 사이에는

$$\begin{aligned} \text{corr}(z) &= \int E_m^{p*}(x, z) E_n^q(x, z) dx \\ &= C \delta_{m, n} \delta_{p, q} \end{aligned} \quad (1)$$

가 성립된다 [4]. 여기서 C 는 양의 상수이고 $*$ 는 복소공액을 의미한다. $\delta_{m, n}$ 과 $\delta_{p, q}$ 는 Kronecker delta 함수이다. 첨자 m 과 n 은 1에서 M 까지의 정수이고, p 와 q 는 1에서 N 까지의 정수이다. 게다가 그림 2에서의 멀티모드 평면 도파로는 선형시스템으로 볼 수 있다. 즉, 두 개 혹은 그 이상의 입력 신호빔이 동시에 입력측 멀티모드 평면 도파로에 인가되면, 출력측 멀티모드 평면 도파로에서 얻어지는 스펙클 패턴은 각 입력 신호빔이 개별적으로 인가되었을 때의 출력 스펙클 패턴을 더한 것과 같다.

그럼 그림 3과 같이 n 번째 입력단자에서 q 번째 출력단자로의 광신호 교환을 고려하자. 그러면 n 번째 입력측 멀티모드 평면 도파로에 입력상태 $u_n=q$ 를 가지는 입력빔 I_n^q 을 인가되고, 출력측 멀티모드 평면 도파로에서 얻어지는 스펙클 패턴은 E_n^q 가 된다. 이 출력 스펙클 패턴이 공간다중화된 홀로그램 필터에 인가되면 q 번째 출력단자로 회절되는 빔은 다음과 같다.

$$\text{corr}(z_q) \propto \int \sum_{m=1}^M E_m^{q*}(x, z_q) E_n^q(x, z_q) dx \quad (2)$$

식 (2)로부터 단지 $m=n$ 인 경우에만 q 번째의 출력단자에 상관 침투값이 발생하며, 다른 경우에는 모두 0이 된다. 따라서 q 번째 출력에 상관 침투값이 나타남은 $m=n$ 일 때이므로 n 번째 입력단자가 q 번째 출력으로 광신호 교환이 되었음을 알 수 있다. 이와 같은 방식으로 여러 개의 입력단자가 여러 개의 출력단자로 동시에 독립적으로 광신호 교환이 될 수 있다.

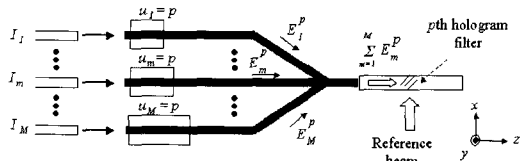


그림 2. p 번째 홀로그램 필터의 기록.
Fig. 2. Recording of p th holographic filter.

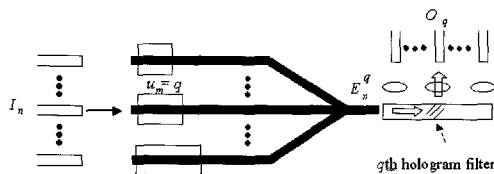


그림 3. q 번째 홀로그램 필터에 의해 광신호 교환.
Fig. 3. Optical switching by q th holographic filter.

III. 광신호 교환 실험

본 논문에서 제안하는 방법의 광신호 교환 시스템을 위한 멀티모드 평면 도파로의 제작에 대해 설명한다. 그림 4는 본 논문에서 제작한 멀티모드 평면 도파로의 구성도이다. 실제 제작된 멀티모드 평면 도파로는 그림 1의 시스템과 달리 그림 4와 같이 26 mm의 길이의 직선으로만 디자인되어 있으며, 4개의 입력과 출력을 가진다. 이것은 제작의 편의를 고려한 것으로, 제작한 멀티모드 평면 도파로의 개수가 많지 않기 때문이다. 즉 출력측의 멀티모드 평면 도파로가 1 mm 이하로 구현되었기 때문에 홀로그램 필터를 제작할 경우에 하나의 출력에서 나오는 패턴으로 고려하는 것이 가능하다. 물론 입력측 멀티모드 평면 도파로의 개수가 증가하게 되면 출력측 멀티모드 평면 도파로의 크기가 증가하기 때문에 그림 1에서 제안하는 방법과 같이 하나의 출력 멀티모드 평면 도파로를 가지는 방법이 요구된다. 이 멀티모드 평면 도파로는 열광학 폴리머를 이용하여 주분 제작되었으며 [9], 제작한 멀티모드 평면 도파로의 코어 직경은 그림 5(a)와 같이 가로가 48 μm 이고 세로가 36 μm 이다. 그림 5(b)는 제작한 하나의 도파로에 대한 단면 사진을 보여 준다. 그리고 각각의 입력측 멀티모드 평면 도파로 위에 놓인 전극은 그림 4와 같이 서로 다른 길이를 가지도록 설계하고 제작하였다. 이때 입력포트 1에서 4까지 각각

4, 8, 12, 16 mm의 길이로 구현되었다.

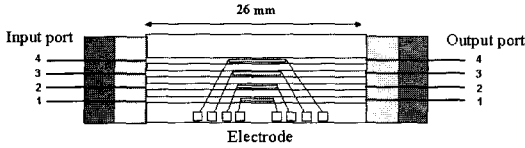


그림 4. 제작한 멀티모드 평면 도파로.
Fig. 4. Fabrication of multimode planar waveguide.

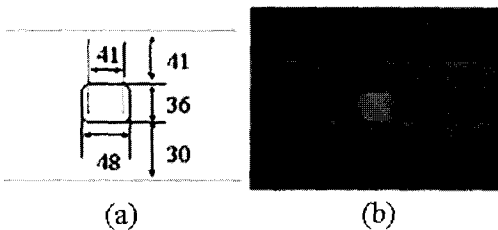


그림 5. 멀티모드 평면 도파로 코어의 크기와 단면 사진.

Fig. 5. Core size of multimode planar waveguide and its photography.

먼저 그림 6의 실험 구성도를 만들어서 제작된 멀티모드 평면 도파로에 대한 출력빔 테스트를 수행하였다. 멀티모드 평면 도파로는 광섬유와 연결시켰으며, 입력 광원은 633 nm의 He-Ne 레이저이다. 출력빔의 결과를 관측하기 위해 도파로의 출력측에서 10mm 정도 떨어진 곳에 CCD를 놓고 관측하였다. 그리고 멀티모드 평면 도파로 위에 놓인 전극에 서로 다른 입력전압을 인가한 후 출력빔을 관측하였다. 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 이것은 입력단자 1에서 입력단자 4까지에 대해서 0V와 2V가 인가된 경우의 출력 스펙클 패턴들을 보여준다. 입력단자에 따라 출력 스펙클 패턴이 다르고, 전압에 따라 출력 스펙클 패턴이 변화함을 확인할 수 있다.

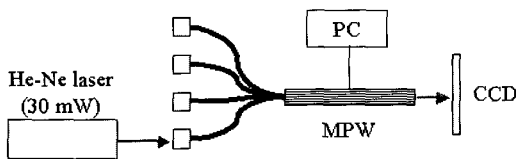


그림 6. 멀티모드 평면 도파로의 출력빔 검출을 위한 광학적 구성도.

Fig. 6. Optical setup for detecting output beam from the multimode planar waveguide.

실제 제작된 멀티모드 평면 도파로를 광신호 교환 실험에 이용하였다. 그림 8은 1×2의 간단한 광신호 교환 실험을 위한 실험 구성도이다. 입력 광원으로부터 빔분할기를 이용하여 두개의 빔으로 나누었다. 하나는 스펙클 패턴을 만들기 위해 하나의 입력단자에 인가되는 신호빔과 다른 하나는 홀로그램 필터를 기록하기 위한 기준빔이다. 신호빔은 입력포트 3에 광섬유를 통하여 인가되었다. 홀로그램 필터 제작을 위한 기록매질로는 광폴리머 필름을 사용하였다. 첫번째 홀로그램 필터의 기록은 그림 8에서 입력단자 3에 입사되는 멀티모드 평면 도파로의 전극에 전압을 0 V를 인가하였다. 그리고 멀티모드 평면 도파로를 통해 언어지는 스펙클 패턴을 기준빔으로 기록매질에 기록하였다. 두 번째 홀로그램 필터는 전압을 2 V로 인가하였고, 기준빔을 그림 8과 같이 2 mm 정도 이동을 시켜 기록하였다. 홀로그램 필터를 기록할 때 기준빔과 스펙클 패턴의 세기는 모두 약 1 mW로 하였다. 하나의 홀로그램을 기록하기 위한 기록시간은 3초이었다. 실험에서 얻는 회절효율은 모두 약 20% 정도였다.

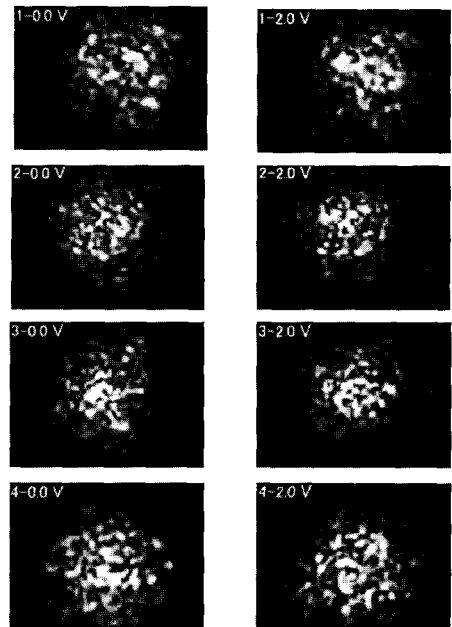


그림 7. 출력 스펙클 패턴의 예들.
Fig. 7. Examples of speckle patterns.

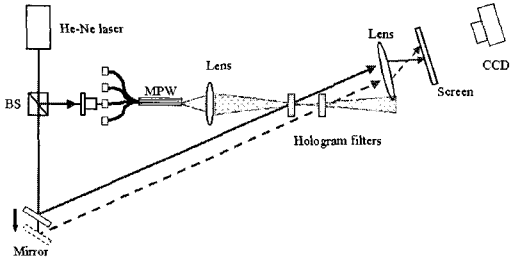


그림 8. 1×2의 광신호 교환을 위한 실험 구성도.
Fig. 8. Experimental setup for 1×2 optical switching.

홀로그램 필터를 완성한 후 기준빔을 차단하고 광신호 교환 실험을 수행하였다. 광신호 교환 실험 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9(a)는 전극에 0 V 인가할 경우에 출력이고, 그림 9(b)는 전극에 2 V를 인가하였을 때의 결과이다. 그림 9의 결과로부터 제안하는 방법으로 임의의 광신호 교환을 잘 수행할 수 있음을 알 수 있다. 그림 10은 그림 8의 구성도에서 스크린(Screen) 대신에 빔검출기를 한쪽 출력에 놓고 오실로스코프로 출력 빔의 빔세기를 측정 한 결과이다. 그림 10(a)는 입력단자 3의 전극에 50ms의 펄스신호를 인가하였을 때의 출력 결과이다. 50ms의 신호 변화에 대해서 일정하게 출력이 잘 나타남을 알 수 있다. 그리고 그림 10(b)는 제작한 광신호 교환 시스템의 라이징 타임을 나타내는 것으로 약 40ms 정도가 되었다. 이것은 싱글모드 도파로의 사용할 때보다 약 4배 정도 높은 값으로, 스펙클 패턴이 안정화되는 시간이 길다는 것을 알 수 있다.

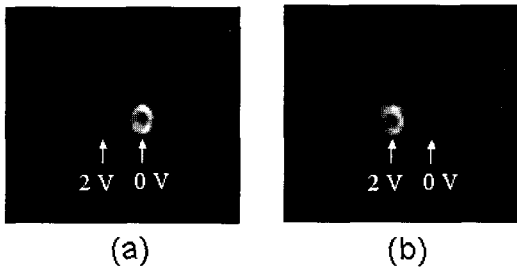


그림 9. 1×2 광신호 교환의 실험 결과.
Fig. 9. Experimental results for 1×2 switching.

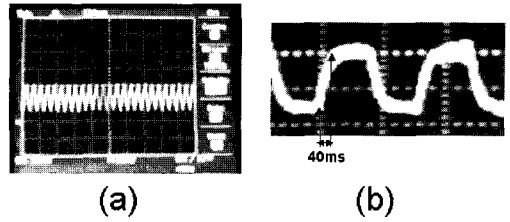


그림 10. (a) 펄스신호를 인가하였을 때의 출력파형.
(b) 확대 파형.
Fig. 10. (a) Output pulse when the pulse signals are applied. (b) Enlarged pulse.

IV. 결 론

결론적으로 멀티모드 평면 도파로와 홀로그램 필터를 이용한 간단한 구조의 광신호 교환 방법을 제안하고 기초적인 실험을 수행하였다. 멀티모드 평면 도파로는 열광학 폴리머로 제작되었으며, 전기적 변환으로 이루어졌다. 제작된 멀티모드 평면 도파로를 이용하여 1×2의 간단한 광신호 교환 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 임의의 독립적인 M×N 광신호 교환이 가능함을 확인하였다. 제안한 방법에 대해서 홀로그램 필터 부분을 보다 소형화 한다면 소형의 광신호 교환 장치로 구현하는 것이 가능하다.

참고문헌

- [1] M. Saffman and D. Z. Aderson, "Mode multiplexing and holographic demultiplexing communication channels on a multimode fiber," *Opt. Lett.*, 16, 300-302 (1991).
- [2] F. T. S. Yu, J. Zhang, K. Pan and D. Zhao, "Fiber vibration sensor that uses the speckle contrast ratio," *Opt. Eng.*, 34, 236-239 (1995).
- [3] S. Wu, S. Yin and F. T. S. Yu, "Sensing with fiber specklegrams," *Appl. Opt.*, 30, 4468-4470 (1991).
- [4] Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, "Volume hologram scheme using optical fiber for spatial multiplexing," *Opt. Lett.* 22, 739-741 (1997).

- [5] 장주석, 신동학, "광섬유 모드 스펙클 패턴을 이용한 광연결 및 교환," *Telecom. Review*, 9권 3호, 416-423, 1999.
- [6] 신동학, "다중모드 도파로와 홀로그래프 필터를 이용한 광신호 교환," 한국해양정보통신학회 논문지, 제 9권 제1호, pp. 199-203, 2005.
- [7] D. Z. Anderson, M. A. Bolshtyansky, and B. Ya. Zel'dovich, "Stabilization of the speckle pattern of multimode fiber undergoing bending," *Opt. Lett.* 21, 785-787 (1996).
- [8] Y. Jeong and B. Lee, "Effect of a random pattern through a multimode-fiber bundle on angular and spatial selectivity in volume holograms: experiments and theory," *Apt. Opt.* 41, 4085-4091 (2002).
- [9] S. Imamura, R. Yoshimura and T. Izawa, "Polymer channel waveguide with low loss at 1.3 μ m," *Elect. Lett.*, 27, 1342-1343 (1991).

저자소개

신 동 학(Dong-Hak Shin)



1996년 2월 부경대학교 정보통신
공학과 공학사

1998년 2월 부경대학교 전자공학과
공학석사

2001년 8월 부경대학교 정보통신공학과 공학박사

2001년10월-2004년8월 일본 도요하시 기술대학 연구원

2005년3월-2006년8월 광운대학교 3DRC 연구교수

2006년9월-현재 동서대학교 영상콘텐츠학과 연구교수

※ 관심분야: 광정보처리, 3D 디스플레이, 3D 영상처리