
다중모드 도파로와 홀로그램 필터를 이용한 광신호 교환

신동학*

Optical switching by use of a multimode waveguide and hologram filters

Dong-Hak Shin

요 약

$M \times 1$ 의 다중모드 도파로와 N 개의 홀로그램 필터를 이용하여 M 개 입력단자와 N 개 출력단자 사이에 광신호 교환을 수행할 수 있는 방법을 제안한다. 광신호 경로는 $M \times 1$ 의 다중모드 도파로를 사용하고, 이것으로부터 발생하는 스페클 패턴들을 연결 목적지를 결정하는 목적코드로 이용한다. 제안한 시스템에 대해 광신호 교환이 가능함을 실험적으로 보였다.

ABSTRACT

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

키워드

광교환, 멀티모드 도파로, 홀로그램

I. 서 론

최근 다중모드 파이버에서 발생하는 스페클 패턴을 이용하여 홀로그래피 메모리나 광신호 교환과 같은 응용시스템에 대한 연구가 있었다 [1,2]. 홀로그래피 메모리에서는 광섬유로부터의 스페클 패턴을 체적홀로그램을 기록하고 읽기 위한 기준 빔으로 사용하였다[1]. 우리는 이전의 논문에서 다중모드 광섬유 커플러에서 발생하는 스페클 패턴을 이용한 광신호 교환 방법을 제안하였다[2]. 다중모드 광섬유 커플러는 신호빔의 경로로 사용되고 그 스페클 패턴은 목적지의 연결코드로 사용되었다. 그러나 출력빔의 효율이 출력단자의 개수가 증가할수록 출력빔이 약해지며, 각 출력단자에 서로 다른 홀로그램 필터를 구성하기 때문에

시스템적으로 복잡한 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이런 문제점을 개선할 수 있으며, 간단한 도파로형 광신호 교환 시스템을 구현할 수 있는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 $M \times 1$ 의 다중모드 도파로(Multimode waveguide, MW)와 N 개의 공간다중화된 홀로그램 필터를 이용하여 M 개 입력단자와 N 개 출력단자 사이에 광신호 교환을 수행한다.

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 방

법을 보여준다. 이 방법은 크게 2가지 부분으로 나누어진다. 하나는 광신호 교환을 위한 스펙클 패턴(목적지 코드)을 만드는 $M \times 1$ 다중모드 도파로이고, 다른 하나는 이들 스펙클 패턴들을 분리하기 위한 N 개의 공간다중화된 홀로그램 필터이다. 각각의 입력측 도파로는 입력 신호빔의 상태를 조절할 수 있는 조절부(Control part)를 포함한다. 이 조절부에서는 입사빔의 각도조절, 입력빔의 편광, 그리고 입력 도파로의 굴절률 변화 등을 조절할 수 있도록 설계될 수 있다. 하나의 출력측 도파로는 홀로그램 매질에 직접적으로 연결되어 있다. 홀로그램 매질내에는 출력단자에 대응하여 연결되도록 N 개의 홀로그램 필터가 기록되어 있다.

사실 다중모드 광섬유 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 출력 단에서 얻는 각 모드의 위상지연은 $[0, 2\pi]$ 범위에서 균일한 확률밀도 함수를 갖는 통계적으로 독립인 랜덤 변수로 취급된다 [3,4]. 이러한 모드들이 합해져서 나타나는 스펙클 패턴은 다중모드 도파로의 물리적 상태에 따라 달라질 수 있다. 예를 들면 입사빔의 입사각, 빔편광, 그리고 도파로의 굴절률 변동 등으로 상태가 변한다. 그러므로 M 개의 입력빔들을 각각의 입력측 도파로에 하나씩 인가할 때, 출력측 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 도파로에서 N 개의 서로 다른 물리적 입력 상태를 인가함으로써, 출력측 도파로에서 서로 직교하는 N 개의 스펙클 패턴을 얻을 수 있다. 다중모드 도파로가 물리적으로 안정되어 있다면, 이들 스펙클 패턴들은 시간적으로 변하지 않으며 또한 재생 가능하다.

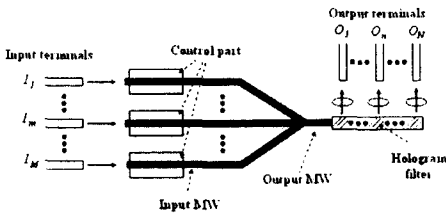


그림 1. 다중모드 도파로와 홀로그램 필터를 이용한 $M \times N$ 광신호 교환.

Fig. 1 The $M \times N$ switching system by use of a multimode waveguide and hologram filters

그림 2에서 m 번째 입력측 도파로에 신호빔 I 를 입력상태 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 도파로에서 얻어지는 스펙클 패턴의 복소 전개분포를 E_m^p 로 나타내기로 하자. 그러면 m 과 n 번째 입력단자에 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 2(a)에서의 다중모드 도파로는 선형 시스템으로 볼 수 있다. 즉, 두 개 혹은 그 이상의 입력 신호빔이 동시에 입력측 도파로에 인가되면, 출력측 도파로에서 얻어지는 스펙클 패턴은 각 입력 신호빔이 개별적으로 인가되었을 때의 출력 스펙클 패턴을 더한 것과 같다.

한편 입력단자에서 출력단자로 신호를 보낼 때 이 신호를 분리하기 위해 그림 2과 같이 공간다중화된 홀로그램 필터를 이용한다[5]. 이 경우 스펙클 패턴은 식 (1)의 성질을 이용하여 쉽게 분리하여 검출할 수 있다. 하나의 홀로그램 필터는 중첩되어 있는 스펙클 패턴들 중에서 특정한 하나의 스펙클 패턴을 분리할 수 있다. 그림 2(a)는 p 번째 공간다중화된 홀로그램 필터를 기록하는 방법을 설명한다. 모든 입력 단자에 입력 신호빔이 동시에 입력되고 각각의 조절부의 상태가 동일하게 한다. 즉 $u_1 = u_2 = \dots = u_M = p$. 그러면 출력측 도파로에서 얻어지는 중첩된 스펙클 패턴은 $\sum E_m^p$ 이 된다. 이 중첩된 스펙클 패턴을 p 번째의 기준빔과 함께 홀로그램 매질에 기록한다. 그러면 매질 내에는 $\sum E_m^{*p}$ 에 비례하는 굴절률 변화 Δn 이 얻어진다. 그러면 p 번째의 홀로그램 필터가 완성된다. 이와 같은 동일한 과정을 N 개의 출력단자에 대해 순차적으로 반복한다. 기록매질의 서로 다른 공간에 홀로그램 필터를 제작하기 위해서는 위치이동기를 이용하여 기준빔을 이동시킨다. 모든 홀로그램 필터를 제작한 후, 기준빔을 차단한다.

그림 2(b)와 같이 n 번째 입력단자에서 q 번째 출력단자로의 광신호 교환을 고려하자. 그러면 n 번째 입력측 도파로에 입력상태 $u_n=q$ 를 가지는 입력빔 I_n^q 을 인가되고, 출력측 도파로에서 얻어지는 스펙클 패턴은 E_n^q 가 되다. 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 첨두값이 발생하며, 다른 경우에는 모두 0이 된다. 따라서 q 번째 출력에 상관 첨두값이 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.

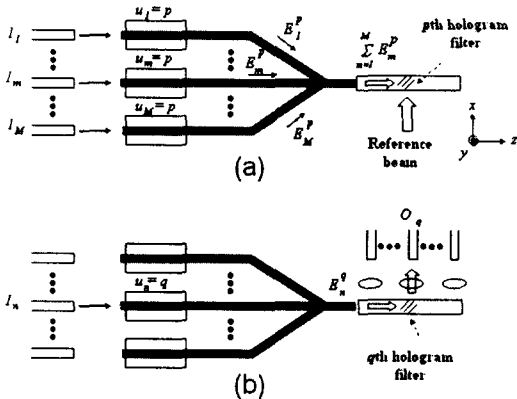


그림 2. (a) 홀로그램 필터의 기록. (b) 홀로그램 필터의 재생.

Fig. 2 (a) The recording and (b) the reading for a hologram filter.

III. 광신호 교환 실험

본 논문에서 제안하는 방법에 대해 2x2의 간단한 광신호 교환이 가능한 기초적인 광학적 실험을 수행하였다. 광학적 실험 구성도를 그림 3에 나타내었다. 멀티모드 도파로는 2x1 구조의 다중모드 광섬유 커플러를 사용하였으며, 광섬유의 코어 직경은 200 μm 이다. 실험에서 사용한 광원은 514 nm의 아르곤이온 레이저이고, 빔분할기를 이용하여 기준빔과 신호빔으로 분리하였다. 신호빔은 미

러와 빔분할기를 이용하여 두 개의 서로 다른 경로를 가지는 빔으로 분리시켰다. 각각의 빔은 멀티모드 커플러의 서로 다른 입력단자로 입력된다. 홀로그램 필터 제작을 위한 기록매질로는 Fe가 0.015% 도핑된 LiNiO3 광굴절 결정을 사용하였다. 서로 다른 스펙클 패턴을 발생시키기 위한 조절부로서 2개의 반파장지연기(HWP1, HWP2)를 그림 3과 같이 각각의 입력단자 앞에 사용하였다. 이 경우 입력 신호빔의 편광을 조절하기 때문에 서로 직교하는 2 종류의 스펙클 패턴을 얻을 수 있다. 이들을 가지고 2개의 공간 다중화 홀로그램을 기록한다. 이때 홀로그램 기록 때의 편광을 일치시키기 위해 추가적인 반파장지연기(HWP3)를 사용하였고, 기준빔을 이동시키기 위해 x축 이동기를 사용하였다.

먼저 첫 번째 홀로그램 필터를 기록하는 실험을 설명한다. 첫 번째 홀로그램 필터로 기록하기 위해서는 그림 3에서 입력단자 I_1 와 입력단자 I_2 를 모두 개방하고, 반파장지연기를 모두 0도에 두었다. 이 경우 입사빔의 편광은 수직편광이다. 그러면 멀티모드 커플러를 통해 얻어지는 스펙클 패턴은 입력단자 I_1 과 입력단자 I_2 에서 각각 얻은 스펙클 패턴의 중첩이다. 이 중첩된 스펙클 패턴을 첫 번째 기준빔으로 기록매질에 기록하였다. 그러면 첫 번째 홀로그램 필터가 완성된다. 두 번째 홀로그램 필터는 반파장 지연기를 모두 45도 회전시킨다. 그러면 입력빔의 편광을 수평편광이 된다. 입사빔의 편광의 변화로 인해 스펙클 패턴이 변화한다. 그리고 기준빔은 x축 이동기에 의해 2 mm 정도 뒤로 이동한 뒤 기록매질에 입사된다. 이동된 기준빔으로 두 번째 홀로그램 필터를 완성하였다. 두 개의 홀로그램을 기록할 때 기준빔과 스펙클 패턴의 세기는 모두 약 2 mW로 하였다. 하나의 홀로그램을 기록하기 위한 기록시간은 2분이었다. 실험에서 얻은 회절효율은 약 1%정도였다. 이렇게 낮은 회절효율은 멀티모드 커플러의 마운트가 미세한 움직임에 의해 홀로그램이 잘 기록되지 않은 것으로 생각된다.

2개의 홀로그램 필터를 완성한 후 기준빔을 차단하였다. 그림 4는 스펙클 패턴을 기록한 2개의 홀로그램 필터를 이용하는 광신호 교환 실험 구성도이다. 그림 4(a)는 입력단자 I_1 로부터 출력단자 O_1 또는 O_2 로의 광신호 교환 구성도이며, 그림 4(b)는 입력단자 I_2 로부터의 광신호 교환 구성도이다. 먼저 입력단자 I_1 에서의 광신호 교환에 대해 설명한다. 그림 4(a)에서 입력단자 I_1 에만 빔이 입사되고, 입력단자 I_2 는 차단된다. 이때 출력된 빔을 결정하기 위해서는 홀로그램 기록에 사용한 스펙클 패턴이 중요한 목적지 코드로 사용되어진다. 먼저 입력단자 I_1 앞에 놓여있는 반파장지연기(HWP1)를 0도가 되도록 할 경우의

스펙클 패턴은 첫 번째 홀로그램 필터를 기록한 패턴과 일치한다. 따라서 식 (2)에 의해 첫 번째 홀로그램 필터로부터 빔이 회절되어 CCD에 검출된다. 이에 대한 CCD로 검출된 실험결과를 그림 5(a)에 나타내었다. 반면에 반파장지연기(HWP1)가 45도인 경우의 스펙클 패턴은 두 번째 홀로그램 필터에 기록한 패턴과 일치함으로 두 번째 홀로그램 필터

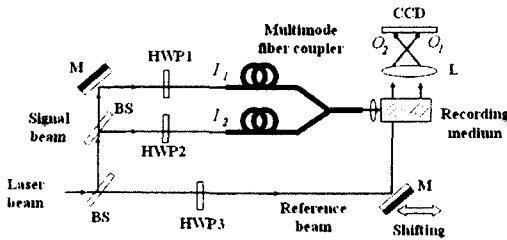


그림 3. 2x2 광신호 교환의 실험 구성도.
Fig. 3 Experimental setup for 2x2 optical switching.

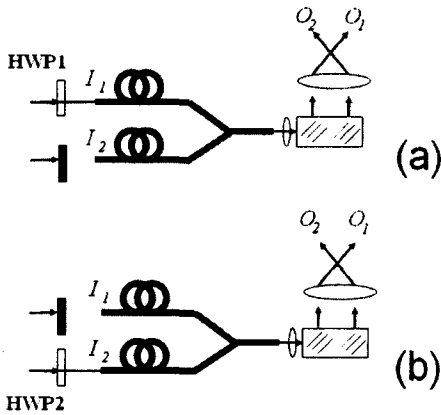


그림 4. (a) 입력단자 I_1 로부터의 광신호 교환. (b) 입력단자 I_2 로부터의 광신호 교환.
Fig. 4 (a) Optical switching from the I_1 input port. (b) Optical switching from the I_2 input port.

로부터 빔이 회절되며 이를 그림 5(b)에 나타내었다. 동일한 방법으로 입력단자 I_2 로부터 광신호 교환을 수행한다. 그림 5(c)는 반파장지연기(HWP2)가 0도일 경우이고 그림 5(d)는 45도인 경우이다. 그림 5의 결과로부터 제안하는 방법으로 임의의 광신호 교환을 잘 수행할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

결론적으로 다중모드 도파로와 홀로그램 필터를 이용한 간단한 구조의 광신호 교환 방법을 제안하고 기초적인 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 임의의 독립적인 $M \times N$ 광신호 교환이 가능함을 확인하였다. 제안한 방법에 대해서 집적광학기술을 이용하여 소형의 광신호 교환 장치로 구현하는 것이 가능하다[6].

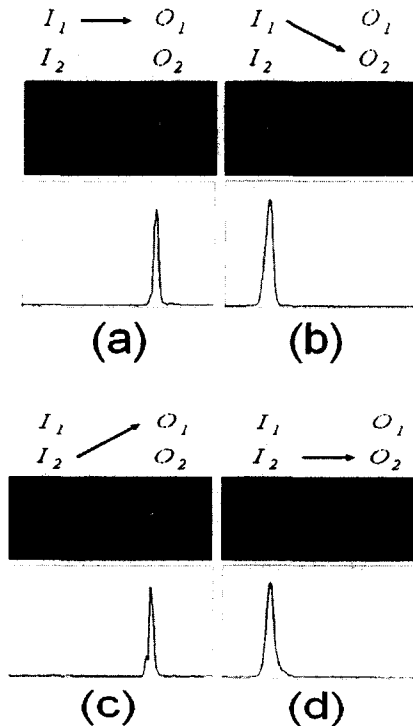


그림 5. 광신호 교환의 실험 결과.
Fig. 5 Experimental switching results.

참고문헌

[1] Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, "Volume hologram scheme using optical fiber for spatial multiplexing," *Opt. Lett.* 22, 739-741 (1997).
[2] J.-S. Jang, D.-H. Shin, J.-Y. Yang, and S. I. Jeong, "Holographic-CDMA-based optical interconnection and switching using multimode fiber couplers," in *Proceedings of International Conference on Fiber Optics*

- and Photonics (PHOTONICS-96, Madras, India, Dec. 9-13, 1996) 467-472.
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] A. Vander Lugt, "Signal detection by complex spatial filtering," *IEEE Trans. Inform. Theory* IT-10, 139-145 (1964).
- [6] X. Lu, D. An, L. Sun, Q. Zhou, and R. T. C "Polarization-insensitive thermo-optic switch based on multimode polymeric waveguides with an ultralarge optical band-

width," *Appl. Phys. Lett.* 76, 2155-2157 (2000).

저자 소개

신동학(Dong-Hak Shin)



1996년 2월 부경대학교 정보통신공학과 공학사

1998년 2월 부경대학교 전자공학과 공학석사

2001년 8월 부경대학교 정보통신공학과 공학박사

2001년 10월-2004년 8월 일본 도요하시기술대학 연구원
2004년 9월-현재 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 조교