

論文97-34D-11-7

식각된 불규칙 단면을 갖는 단일모드 광섬유를 이용한 광굴절 체적 홀로그래ムの 기록

(Photorefractive Volume Hologram Recording by Single-mode Fiber with Irregularly Etched Facet)

金其鉉*, 姜龍勳*, 李竝浩*

(Ki Hyun Kim, Yong Hoon Kang, and Byoung-ho Lee)

요 약

광섬유 테이퍼에서 나오는 빛을 기준 빔으로 하여 체적 홀로그래ム을 기록하였다. 단일모드 광섬유를 화학적으로 식각하여 광섬유 테이퍼를 만들었으며, 여기에서 발생하는 불규칙한 빔 패턴을 이용하여 체적 홀로그래ムの 저장 밀도를 증가시킬 수 있음을 실험적으로 보였다. 이 방법에 의한 경우 체적 홀로그래ムの 공간적 선택도가 일반 단일모드 광섬유를 사용했을 때에 비해 두배 정도 증가하였으며, 이를 불규칙 위상 평면을 사용한 경우로 모델링하여 이론적으로도 확인하였다.

Abstract

Volume hologram was recorded using reference beam from optical fiber taper. A single mode fiber was chemically etched to make a taper structure, and we showed experimentally that the referencing by the irregular beam pattern from this taper structure could increase the storage density of photorefractive volume hologram. The spatial selectivity of the volume hologram with this method was increased by two times compared to the normal single mode fiber referencing case. A theoretical analysis with randomly phased plane model also confirmed the results.

I. 서 론

홀로그래ム은 두 빛이 간섭을 일으킬 때 생기는 빛의 공간적인 강도변화(간섭 패턴)를 기록하여 영상 및 정보를 저장하는 방식이다. 이러한 홀로그래ム을 $LiNbO_3$ 와 같은 광굴절 물질을 이용하여 3차원으로 구현하면 저장용량이 크게 늘어난다는 사실은 이미 오래 전에 제시되었다. 3차원 기록의 이론적인 저장 밀도는 $V/(\lambda/n)^3$ 으로 표시된다. 여기서 V 는 홀로그래ム 기록 물질의 체적이며, λ 는 기록에 사용되는 광원의 파장이

고 n 은 기록 물질의 굴절율이다. 따라서 $1cm^3$ 의 체적에 기록할 수 있는 정보의 양은 (λ/n) 의 값이 가시광선의 경우 $1\mu m$ 보다 작으므로 $1Tb$ 이상이 된다. 그러나 실제적인 저장밀도는 기록된 정보 상호간의 영향(crosstalk)으로 인하여 감소하게 된다^[1]. 체적 홀로그래ム에 저장된 정보는 기록할 때 사용된 두 빛중 하나의 빛(기준 빔; reference beam)만을 사용하여 재생하게 되는데 기록할 때 사용한 기준 빔과 동일한 형태의 빛으로만 저장된 정보를 읽어낼 수 있다. 따라서, 기준 빔을 바꿔 가면서 정보를 저장하거나 읽어내는 과정은 메모리에 번지지정을 해주는 과정과 동일하다. 기준 빔을 변화시키는 방법으로 파장 변화 방법과 입사각 변화 방법 및 위상 변화 방법이 주로 사용된다^[2-4]. 이러한 기준 빔을 변화시키는 방법의 하나로 기

* 正會員, 서울大學校 電氣工學部

(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

接受日字:1997年8月1日, 수정완료일:1997年10月15日

록된 정보간의 상호 누화(crosstalk)를 줄이고 기록 밀도를 높이기 위하여 불규칙 위상 평면을 사용하는 방식이 개발되었으며^[5], 불규칙 패턴의 효과는 파장의 선택도를 높여주어 파장 변화 방식에서도 기록밀도를 높이는 역할을 하는 것으로 밝혀졌다^[6]. 한편, 체적 홀로그램은 광 저장장치 뿐 아니라 광 연결에도 사용되는 소자이므로, 이를 보다 손쉽게 구현하기 위해 광섬유를 사용하는 것이 가능하다. 또한 광섬유는 광 집적회로와 홀로그램 광 저장장치의 병렬 연결에 매우 유용한데, 이는 광섬유의 코어가 작아 광원 및 광 검출기의 면적을 줄이는 역할을 할 수 있고, 위치의 이동이 자유로와 빛의 정렬이 손쉬운 장점이 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 광섬유를 체적 홀로그램의 기록에 적용하되, 기록밀도를 높이기 위해 광섬유에서 나오는 빛이 불규칙 패턴을 갖도록 하였다. 최근 저자들은 다중모드 광섬유에서 모드간의 결합으로 발생하는 불규칙 패턴을 이용한 체적 홀로그램의 기록을 제안하였으며^[7-9], 본 논문에서는 식각된 단일모드 광섬유를 이용하여 불규칙 위상평면의 효과를 얻는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 단일모드 광섬유에서 불규칙 위상평면의 효과를 얻기 위해 광섬유를 화학적으로 식각하였으며, 광섬유의 코어부분에 테이퍼(taper) 모양의 미세 패턴을 형성하였다. 광섬유로부터 나오는 빔은 제작된 테이퍼 구조에 의해 불규칙한 형태가 되고 이를 이용하면 체적 홀로그램을 광섬유를 이용하여 손쉽게 다룰 수 있으면서, 저장밀도를 증가시킬 수 있게 된다.

II. 광섬유 테이퍼의 제작

단일모드 광섬유에서 나오는 빔의 형태는 가우스(Gauss) 분포와 거의 유사한 LP₀₁ 모드이다. 이러한 가우스 분포의 균일한 빔 패턴에 변화를 주기 위해 광섬유를 식각하여 단면에 작은 구조를 만들었다. 그림 1에 미세 구조의 테이퍼를 만드는 과정이 나타나 있다. 제작은 근접장 광학 현미경(near-field optical microscope)에 사용되는 탐침 제작 방법을 이용하였다^[10]. 이 방법은 광섬유의 코어와 클래딩 간의 식각율이 식각액의 조성에 따라 달라진다는 점을 이용한 것이다. HF:NH₄F:H₂O의 비율이 1:1.7:1을 기준으로 NH₄F의 양이 더 많아지면 (a), (b)와 같이 코어 부분이 뾰족한 형태의 테이퍼가 만들어지며, NH₄F의 양이

더 적을 경우 속으로 들어간 형태의 콘이 만들어진다. (a)는 식각의 중간 과정이고 (b)는 (a)와 동일한 식각 용액에서 충분한 시간이 경과한 후에 최종적으로 만들어지는 탐침의 모습이다. 본 논문에서는 (a)형태로 식각된 광섬유를 사용하였다. (c)는 제작된 광섬유 테이퍼의 전자현미경 사진이다. 왼쪽 사진은 코어와 클래딩을 모두 보여주며, 오른쪽 사진은 그 중 코어 부분만 확대한 것이다. 미세 구조는 광섬유의 코어 부분에만 만들어져 있고 코어에서 나오는 빛이 이 부분을 통과하면서 불규칙 패턴을 형성하게 된다.

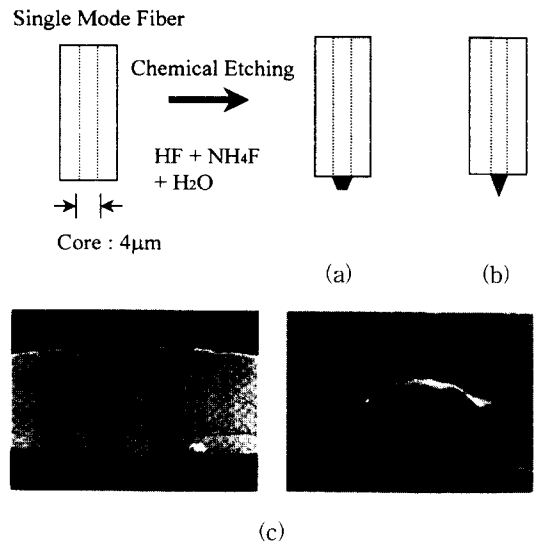


그림 1. 광섬유 테이퍼의 제작: (a),(b)는 식각 시간이 다른 경우의 테이퍼 구조를 나타낸다. (c)는 (a)의 전자현미경 사진이다.

Fig. 1. Fabrication of optical fiber taper: (a),(b) are the taper structure with different etching time. (c) is the SEM picture of (a).

III. 실험 및 결과

그림 2는 식각된 광섬유를 이용하여 체적 홀로그램을 기록하는 실험 구성도이다. 광원으로 파장이 633nm, 출력 10mW인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 광원에서 나온 빛은 두개로 갈라지며, 하나의 빛(object beam)에는 기록될 정보가 실리게 되고 다른 하나의 빛(기준 빔)은 광섬유에 입사되어 번지 지정에 사용하게 된다. 두 빛의 각도는 30도로 하였다. 정보를 실는 방법으로는 공간 광 변조기(spatial light modulator)가 주로 이용되며 2차원으로 정보를 저장

하게 되나, 본 논문에서는 제안하는 아이디어의 타당성 확인에 주 목적이 있기 때문에 공간 광 변조기를 사용하지는 않았다. 체적 홀로그래프의 기록 물질로는 광 굴절 효과(photorefractive effect)를 갖는 $Fe:LiNbO_3$ 을 사용하였다. 두 빛을 이용하여 체적 홀로그래프를 기록한 후 광섬유에서 나온 기준 빔만을 사용하여 기록된 홀로그래프를 읽어내게 된다. 읽는 과정에서 광 굴절 크리스탈의 위치를 이동시켜가면서 회절되어 나오는 빛의 강도를 측정하였다. 그림 3의 (a)는 식각 시간을 조금씩 다르게 하면서 만들어진 광섬유 테이퍼를 이용하여 측정한 결과이고, (b)는 테이퍼 형태의 광섬유를 이용한 결과와 식각 처리되지 않은 단일 모드 광섬유를 이용한 결과를 비교한 것이다. 그림 3의 그래프에서 가로축은 그림 2에서 x 축 방향으로의 크리스탈 위치 이동을 뜻한다. 즉, 체적 홀로그래프를 저장시킨 후, 광 굴절 크리스탈과 기준 빔의 상대적 위치를 변화시켜 가면서 probe하는 실험을 수행한 것이다. 그림 3(a)에서 식각 시간이 15-45분 사이일 때 결과에 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 그림 3(b)에서 테이퍼 광섬유에 대한 데이터는 그림 3(a)의 경우를 평균 낸 것이다. 그림 3(b)에서 식각 처리된 광섬유를 이용하여 체적 홀로그래프를 기록하고 읽어낼 때 기록물질의 위치가 $2\mu m$ 이동하면 회절되어 나오는 빛의 강도가 반으로 감소한다는 것을 알 수 있다. 반면에 일반 광섬유의 경우에는 $4\mu m$ 위치에서 절반으로 감소한다는 것을 보여준다.

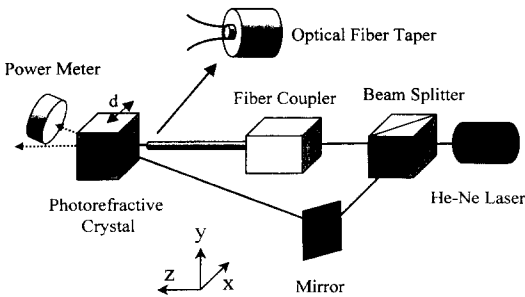
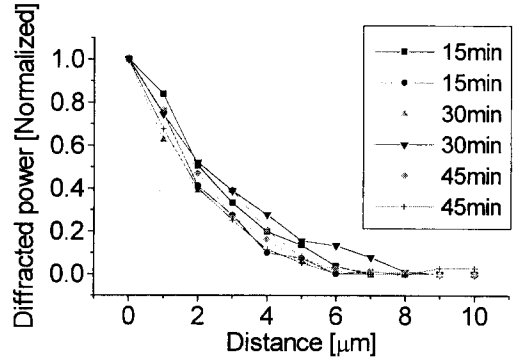


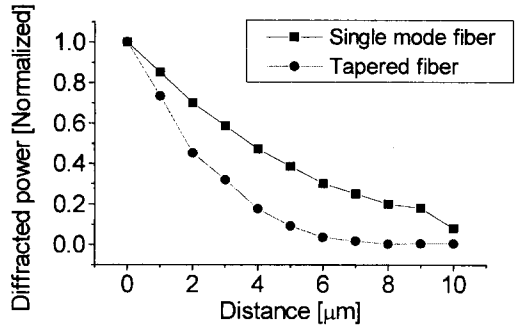
그림 2. 실험 구성도
Fig. 2. Experimental Setup.

이것은 식각 처리된 광섬유를 사용하여 체적 홀로그래프를 기록하면 일반 광섬유를 사용하여 기록하는 것에 비해 각 정보간 간격을 좁힐 수 있어 기록 밀도가 높아짐을 의미한다. 이러한 결과는 다중모드 광섬유를 이용했을때의 기록밀도 상승 효과와 거의 동일한 크기

이다^[7]. 아울러 이 결과를 이용할 경우 기록물질의 위치를 바꾸어 가면서 체적 홀로그래프를 저장하는 홀로그래프 디스크 등의 기록 방식에 있어서 저장지 위치 간격을 줄일 수 있어 매우 유용할 것이며^[11], 광 연결 소자 구현시 각 연결점 간의 거리를 좁힐 수 있게 할 수 있을 것이다.



(a)



(b)

그림 3. 실험 결과
(a) 테이퍼를 이용한 referencing
(b) 테이퍼를 이용한 결과와 일반 단일모드 광섬유를 이용한 결과의 비교

Fig. 3. Experimental results.
(a) Referencing using tapered fiber
(b) Comparison between tapered fiber referencing and normal single mode fiber referencing

IV. 이론적 모델과의 비교

일반 광섬유와 식각 처리된 광섬유와의 다른 점은 식각된 광섬유를 통과하여 나온 빛의 공간적인 분포가 불규칙한 형태를 갖는다는 점이다. 이러한 기준 빔의

영향을 해석하기 위해, 불규칙 위상 평면에서 회절되는 빔(beam)을 사용한 경우에 대한 이론적 모델링 기법^[12,13]을 적용하였다. 그림 4(a)는 적용 모델과 식각 처리된 광섬유에서 나온 빔의 모양이다. 광섬유 코어의 직경은 4 μm 이고 광섬유 단면에서의 빛의 세기 분포는 가우스 분포와 거의 유사하므로, 식각 처리된 광섬유의 효과를 그림과 같이 4 μm 의 크기로 집속되어진 빔에 불규칙 위상 평면이 놓여져 있는 것으로 가정하였다. 불규칙 위상평면을 지난 빔이 다시 퍼져나가면서 체적 홀로그래ムの 기준 빔 역할을 하게 된다. 이 기준 빔(E'_{in})을 이용하여 기록된 정보를 읽을 때 체적 홀로그래ムの 내부에 새겨진 격자구조 $\gamma(\mathbf{r}_i)$ 에 의해 회절되어 나오는 빛(E_{out})은 다음 식으로 표시된다^[12, 13].

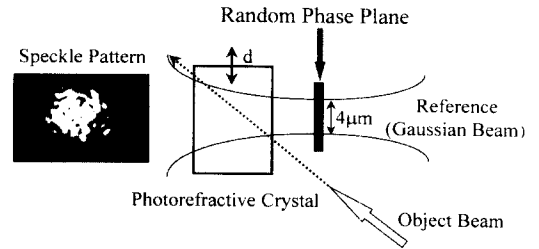
$$E_{out}(\mathbf{r}) = k^2 \int d^3r_i G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i) \gamma(\mathbf{r}_i) E'_{in}(\mathbf{r}_i) \quad (1)$$

여기에서 $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i)$ 는 그린(Green)함수를 나타내며 k 는 파수(wavenumber)이고, $\gamma(\mathbf{r}_i) = \gamma_o E_{in}^*(\mathbf{r}) \cdot E_{obj}(\mathbf{r})$ 으로 표시된다(γ_o : 상수, $E_{in}(\mathbf{r})$: 정보기록시 사용된 기준빔, $E_{obj}(\mathbf{r})$: object beam). 불규칙 패턴의 효과는 홀로그래ム 기록시 $E_{in}(\mathbf{r})$ 에 포함되어 $\gamma(\mathbf{r}_i)$ 에 나타내게 되고 probe시에는 $E'_{in}(\mathbf{r})$ 에 나타난다. $E_{in}(\mathbf{r})$ 의 패턴을 x, y 축 방향으로 각각 $\Delta x, \Delta y$ 만큼 이동시킨 패턴이 $E'_{in}(\mathbf{r})$ 라고 할 때, 식 (1)에 각 변수들의 표현 식을 대입하면 아래와 같은 최종 식이 얻어진다.

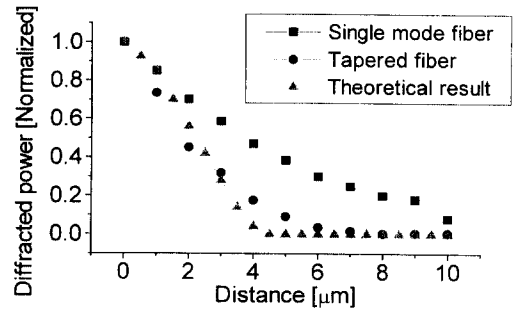
$$E_{out}(\mathbf{r}; \Delta x, \Delta y) = C \int dp_x, dp_y \text{sinc}\left(\frac{kp_x L_1}{2R}\right) \text{sinc}\left(\frac{kp_y L_2}{2R}\right) \times (W_1 - \Delta x - p_x)(W_2 - \Delta y - p_y) \exp\left[-\frac{\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}{R}\right]. \quad (2)$$

윗식에서 불규칙 패턴에 나타나는 셀의 평균적인 크기(correlation length)를 R_c 로 나타내고 불규칙 패턴에 입사되는 빛의 x, y 축으로의 크기를 W_1 과 W_2 로 나타냈으며, Δx 와 Δy 는 체적 홀로그래ム 결정의 이동거리를 나타낸다. 불규칙 패턴에서의 W_1 과 W_2 의 값은 각각 4 μm 이며, x, y 축 방향으로의 저장된 홀로그래ムの 크기 L_1, L_2 는 1mm이다. R 은 광섬유 끝부분에서 홀로그래ム까지의 거리로서, 4mm이며, C 는 상수이다. 그림 3에 나타난 far field speckle 패턴이 4 μm 직경의 코어에서 나와 퍼진 것임을 알고 있으므로 far field pattern의 randomness를 측정하여 빔의 확대 비율을 적용하면 광섬유 단면에서의 광파에 대한 셀의 평균적

인 크기(광섬유 단면에서의 random pattern의 평균적인 크기)를 계산할 수 있다. 그 값은 0.5 μm 였다. 식 (2)에 상수 값들을 대입하여 체적 홀로그래ム 결정의 이동에 따라 회절되어 나오는 빛의 강도 변화를 계산한 결과를 그림 4 (b)에 나타내었다. 일반 단일 모드 광섬유의 곡선과 비교하여 볼 때 식각된 광섬유를 사용한 경우가 이론적 모델과 잘 일치함을 알 수있다. 이는 불규칙 패턴에 의해 저장된 정보는 위치이동에 따라 저장된 정보와 이동된 기준 빔간의 상관관계(correlation)가 없어지기 때문이다. 따라서 식각된 광섬유에 의해 만들어지는 불규칙 패턴이 기록밀도를 높인다는 사실을 이론적 계산으로도 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. (a) 이론적 모델과 테이퍼로부터 발생되는 빔 패턴 (b) 이론적 결과와 실험결과와의 비교

Fig. 4. (a) Theoretical model and beam pattern from tapered fiber (b) Comparison between theoretical result and experimental result.

V. 토론 및 결론

본 논문에서는 단일모드 광섬유를 화학적 식각과정을 거쳐 테이퍼를 만들고 이것을 사용하여 체적 홀로그래ム을 기록하였다. 식각된 광섬유의 기록 밀도가 일

반 단일모드의 경우보다 두배 높아짐을 알 수 있었고, 이러한 사실을 이론적 모델로도 확인하였다. 본 논문에서 제시된 방법은 체적 홀로그래프의 위치 이동에 따른 선택도를 간단한 방법으로 높일 수 있으므로 위치 이동 방식의 광 기억장치에 쉽게 적용이 가능할 것으로 보이며, 특히 광섬유를 사용함으로써 광 집적 회로와의 광연결 구현 등에 배열의 형태로 사용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

※ 본 연구는 한국 과학재단 핵심전문연구지원에 의한 것 입니다(과제번호: 97-2083)

참 고 문 헌

- [1] H. Lee, "Cross-talk effects in multiplexed volume holograms," *Opt. Lett.*, vol. 13, no. 10, pp. 874-876, 1988.
- [2] S. Yin, H. Zhou, F. Zhao, M. Wen, Z. Yang, J. Zhang, and F. T. S. Yu, "Wavelength multiplexed holographic storage in a sensitive photorefractive crystal using a visible light tunable diode laser," *Opt. Commun.*, vol. 101, no. 5-6, pp. 317-321, 1993.
- [3] X. An and D. Psaltis, "Experimental characterization of an angle-multiplexed holographic memory," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 18, pp. 1913-1915, 1995.
- [4] C. Alves, G. Pauliat, and G. Roosen, "Dynamic phase-encoding storage of 64 images in BaTiO₃ photorefractive crystal," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 22, pp. 1894-1896, 1994.
- [5] H. Lee and S. K. Jin, "Experimental study of volume holographic interconnects using random patterns," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 18, pp. 2191-2193, 1993.
- [6] J. H. Jang, Y. H. Kang, and H. Lee, "Effect of an irregular pattern on wavelength selectivity in a volume hologram," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 23, pp. 2426-2428, 1995.
- [7] Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, "Volume hologram using optical fiber for spatial multiplexing," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 739-741, 1997.
- [8] Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, "Volume hologram referencing with optical fiber tip," *Tech. Dig. IEEE LEOS Annual Meeting*, vol. 1, Boston, MA, Nov. pp. 268-269, 1996.
- [9] 강용훈, 김기현, 이병호, "광섬유를 이용한 위치 다중화 구조의 체적 홀로그래프", *한국광학회지*, 제8권 제3호, pp. 241-244, 1997년 6월
- [10] T. Pangaribuan, S. Jiang, and M. Ohtsu, "Two-step etching method for fabrication of fibre probe for photon scanning tunnelling microscope," *Electronics Lett.*, vol. 29, no. 22, pp. 1978-1979, 1993.
- [11] D. Psaltis, M. Levene, A. Pu, G. Barbastathis, and K. Curtis, "Holographic storage using shift multiplexing," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 7, pp. 782-784, 1995.
- [12] S. K. Jin and H. Lee, "Optical connections using irregular patterns as object waves in a volume hologram," *Opt. and Quant. Elect.*, vol. 27, pp. 503-510, 1995.
- [13] Y. H. Kang, J. H. Jang, H. Lee, and S. K. Jin, "Analysis of the diffracted wave from a volume hologram stored with an irregular pattern," *Opt. and Quant. Elect.*, vol. 29, pp. 11-19, 1997.

저 자 소 개



金 其 鉉(正會員)

1969년 12월 20일생. 1992년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1994년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1994년 3월 ~ 현재 서울대학교 대학원 전기공학부 박사과정 재학중. 주관심분야는 체적 홀로

그램, 광 전송 및 센서, 근접장 광학 등임

姜 龍 勳(正會員)

1970년 6월 14일생. 1992년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1994년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1997년 8월 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(공학박사). 현재 삼성전자 근무

李 竝 浩(正會員) 第 33卷 A編 第 1號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 조교수