

근접장 이진 홀로그래프의 다중화, 다층화 및 병렬 저장

김 경 영, 강 진 구, 이 병 호
 서울대학교 전기공학부 국가지정 홀로그래피 기술 연구실

Multiplexed, Stack-wise, and Parallel Recording of Near-field Binary Holograms

Kyoung-Youm Kim, Jingu Kang, and Byoung-ho Lee
 National Research Laboratory of Holography Technologies
 School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - We present experimental results on the multiplexed and stack-wise recording of near-field holograms. Experiments on angular multiplexing show that the angular selectivity of near-field hologram is better than that of the conventional hologram. Experiments on stack-wise recording prove that near fields originated from sub-diffraction-limit-size objects could be stored in a photorefractive crystal at 2 mm apart from the crystal surface. In addition, to improve the data access and transfer time, silicon nano-aperture array was introduced and applied to the near-field holographic storage.

1. 서 론

근접장을 이용한 광학적 정보저장 기술[1-5]은 진행광을 사용하던 종래의 방식이 갖는 기본적인 저장 밀도 한계를 극복할 수 있는 차세대 고밀도 저장 방식으로 최근 주목을 받고 있다. 이중 근접장 홀로그래피 기술[3-5]은 다중화, 다층화 저장이 가능하기 때문에 다른 방식(자기광학, 상천이, 광화학 등)에 비해 저장밀도를 크게 높일 수 있는 장점이 있다. 근접장 홀로그래프는 근접장 주사 현미경(NSOM)을 사용하여 자료를 저장 및 재생하는 방식이 일반적이는데 이는 자료의 병렬 저장이 불가능하고 스캐닝(scanning) 시간이 오래 걸리기 때문에 정보의 전송 속도가 현저히 떨어지는 문제점을 갖는다. 이를 해결하기 위해서는 병렬 저장이 가능한 array 방식의 새로운 근접장 저장 기술이 필요하다. 본 논문에서는 각도 다중화, 3차원 저장방식을 이용한 근접장 홀로그래프의 저장 및 재생 결과를 보고하고 이어서 실리콘 나노 aperture array를 이용한 병렬 저장 및 재생의 가능성에 대해 살펴본다.

2. 근접장 홀로그래프

2.1. 원리

그림 1에 일반적인 신호빔의 종류를 나타내었다[4].

- 1) 공기 중과 광굴절 결정 내에서 모두 진행하는 파,
- 2) 공기 중에서는 감쇠하는(evanescent) 파이지만 결정 내에서는 진행하는 파, 3) 공기 중과 광굴절 결정 내에서 모두 감쇠하는 파의 세가지 종류가 있는데 근접장 홀로그래프가 기존의 홀로그래프와 다른 점은 신호원(object)과 저장물질 사이의 거리가 아주 가까워서 두 번째 종류의 파를 추가로 저장할 수 있다는 점이다. (세 번째 종류의 파는 근접장 홀로그래프로도 저장할 수 없으며 이에 해당하는 신호빔의 정보는 없어버린다.)

그림 2에 근접장 홀로그래프의 저장 및 재생 과정을 간단히 나타내었다[4]. 신호빔으로 NSOM의 광섬유 탐침에서 나오는 빛을 이용한다. 광섬유 탐침의 끝단의 크기는 약 100 nm정도 되는데 이는 광원으로 사용하는

He-Ne 레이저의 파장($\lambda=633$ nm)에 비해 아주 작기 때문에 진행광(propagating light) 뿐만 아니라 근접장(near-field)이 발생된다. 이중 그림 1의 두 번째에 해당하는 신호빔의 경우 광섬유 탐침이 NSOM의 shear-force 감지에 의해 저장 물질인 광굴절 결정에서 10 nm 이내의 거리까지 가까이 갈 수 있기 때문에 충분히 광굴절 결정에 도달할 수 있다. 기준빔으로는 레이저에서 나오는 가우시안 빔을 그대로 사용하였는데 광섬유 탐침에서 나오는 빛과 기준빔이 광굴절 결정에서 만났을 때 그 겹치는 영역은 가우시안 빔의 spot size(~ 1 mm)에 비해 아주 작기 때문에 가우시안 빔을 거의 평면파로 근사해서 생각할 수 있다. 따라서 그림 2의 (b)에서처럼 반대방향으로 진행하는 빔을 광굴절 결정에 입사시키면 이는 기록에 사용한 기준빔의 공역위상(phase-conjugated) 빔으로 근사될 수 있기 때문에, 저장되었던 광섬유 탐침에서 발생되었던 진행파, evanescent 파의 공역위상 빔이 재생되어 스캐닝하면서 정보를 읽고 있는 NSOM의 광섬유 탐침으로 결합(coupling)되게 된다. 그림 3에 그림 2의 방식으로 저장 및 재생된 단일 spot의 이미지를 나타내었다.

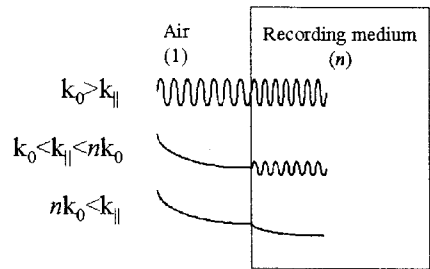


그림 1. 세 종류의 신호빔. k_0 는 공기 중에서의 파수 벡터의 크기, n 은 광굴절 결정의 굴절률, $k_{||}$ 은 광굴절 결정의 표면 방향의 파수벡터의 크기를 나타낸다.

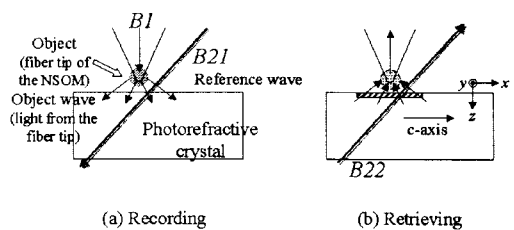


그림 2. 근접장 홀로그래프의 저장 및 재생 과정.

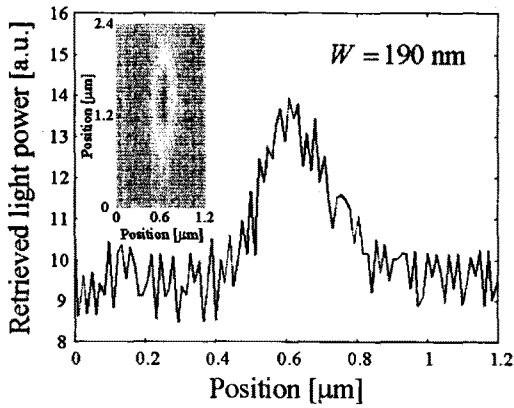


그림 3. 그림 2의 방식으로 저장 및 재생된 단일 spot의 이미지의 예.

그림 3의 삽입그림(inset)에는 저장된 spot의 2차원 이미지가 나타나 있는데 광굴절 결정의 c축과 평행한 방향으로의 spot 크기는 190 nm이지만 이와 수직인 방향으로의 크기는 1 μm 로 상당히 큰데 이는 그림 2에서 알 수 있듯이 신호빔과 기준빔이 만드는 간섭 패턴, 즉 격자(grating)가 대부분 c축 방향으로 형성되기 때문이다.

2.2. 각도 다중화 저장

홀로그래피 메모리가 자기광학, 광화학, 상전이 등을 이용한 다른 방식의 광학적 메모리에 비해 갖는 가장 큰 장점은 같은 물리적 장소에 여러 개의 자료를 독립적으로 기록 및 재생이 가능하다는 다중화 저장에 있다고 할 수 있다. 마찬가지로 근접장 홀로그래피도 다른 근접장 저장 방식에 비해 다중화가 가능하다는 점에서 그 저장 밀도가 획기적으로 증가할 수 있음을 쉽게 알 수 있다.

그림 4와 5에 광섬유 탐침과 광굴절 결정사이의 거리를 다르게 했을 때의 저장된 spot의 크기와 각도 선택도를 비교하여 나타내었다. 탐침과 결정 사이의 거리가 10 nm일 경우 탐침에서 발생한 근접장 성분(그림 1에서의 두 번째 신호빔)이 결정에 도달할 수 있으므로 회절 한계보다 훨씬 작은 240 nm 크기의 spot이 저장됨을 알 수 있으며, 이 경우의 각도 선택도가 근접장이 도달하지 못할 정도로 탐침과 결정이 떨어져서 같은 실험을 했을 경우의 값보다 좋음을 알 수 있다. 이를 통해서 근접장 홀로그래피의 각도 다중화 저장이 가능함을 알 수 있고 그 각도 선택도도 기존의 홀로그래피에 비해 좋기 때문에 더 나은 저장 밀도를 기대할 수 있다.

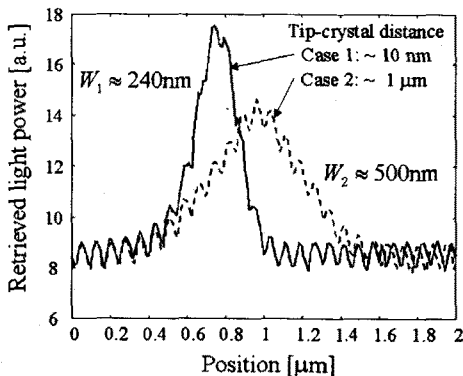


그림 4. 재생된 spot 이미지.

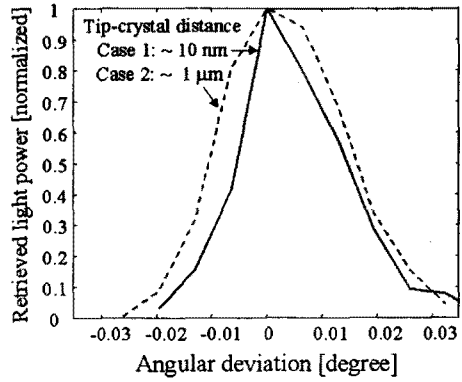


그림 5. 그림 4의 각 spot의 재생시 각도 선택도.

2.3. 다중화 저장

보통의 근접장 홀로그래피는 저장 대상인 신호원에서 수~수십 nm 정도 떨어져 있는 저장물질-가령 광굴절 결정-의 표면에 기록되는 것이 보통이다. 만약 그 이상의 거리에서 즉 저장물질의 표면이 아닌 벌크 내부에서도 저장이 가능하다면 이는 일종의 근접장 홀로그래피의 stack화, 다중화 저장이 가능하게 된다. 그림 1에서 알 수 있듯이 두 번째 종류의 신호빔이 광굴절 결정 안에서는 진행하기 때문에 근접장 홀로그래피를 반드시 광굴절 결정의 표면과 그 근방에서만 저장할 필요는 없으며 결정 깊숙한 내부에서도 저장이 가능하리라는 예측이 가능하다. 물론 신호원에서 나온 신호빔이 급격히 퍼지는 경우라면 (예를 들어 근접장 주사 현미경의 탐침을 신호원으로 할 경우) 너무 깊이는 갈 수 없지만 어느 정도의 내부까지는 근접장 홀로그래피의 기록이 가능해진다.

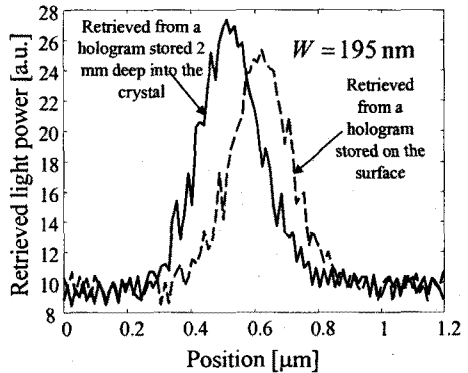


그림 6. 근접장 주사현미경의 탐침을 신호원으로 하고 광굴절 결정 표면과 그로부터 2 mm가량 들어간 위치에서 저장한 두 spot의 재생 결과.

그림 6에 근접장 주사현미경의 탐침을 신호원으로 하고 광굴절 결정 표면과 그로부터 2 mm가량 들어간 위치에서 저장한 두 spot의 재생 결과를 나타내었다(5). 결정에서의 깊이 조절은 기준빔의 중심 위치로 조절했으며 두 경우에 기준빔이 서로 겹치지 않도록 하기 위해 (cross-talk이 없는 경우) 신호빔의 spot크기인 2 mm를 저장하는 두 spot사이의 거리로 삼았다. 탐침과 광굴절 결정의 간격은 10 nm이었다. 그림에서 알 수 있듯이 재생되는 spot의 크기는 모두 195 nm 정도로 사용한 He-Ne 레이저의 파장 (633 nm)의 반 (빛의 회절 한계)에 비해 모두 훨씬 작은 값으로 근접장 신호빔

이 기록되었음을 알 수 있다. 즉 광굴절 결정의 표면에서 2 mm 떨어진 곳에서도 근접장 홀로그래프의 기록과 재생이 가능함을 알 수 있다. 이를 이용하면 stack 방식의 다중화 근접장 홀로그래프가 가능해 지기 때문에 여러 가지 다중화 기술 이외의 새로운 고밀도 저장 방식이 되리라 생각한다.

2.4. 병렬 저장

앞에서 살펴본 NSOM을 이용한 근접장 홀로그래프의 기록 및 재생 방식은 1) 하나의 probe를 사용하고, 2) shear-force를 감지하면서 스캐닝을 하기 때문에 한번에 하나씩의 정보만 기록/재생이 가능하고 또한 그 정보 전송 속도(data access/transfer time)가 느리다는 문제점을 갖고 있다. 이를 해결하기 위해서는 1) 여러개의 probe를 사용하고, 2) contact-mode 방식의 스캐닝 방법을 도입할 필요가 있다. 이를 위해서 최근 반도체 공정을 이용한 나노 aperture array에 대한 연구가 많이 수행되고 있다[6-7].

그림 7에 비등방 wet etching을 이용하여 제작한 실리콘 나노 aperture array중 하나의 aperture의 전자현미경(SEM)사진을 나타내었다. 높은 균일성 및 고밀도 array를 위해서는 SOI 웨이퍼를 사용하는 것이 좋지만[6-7] 본 연구에서는 보통의 Si(100) 웨이퍼를 사용하여 제작하였다.

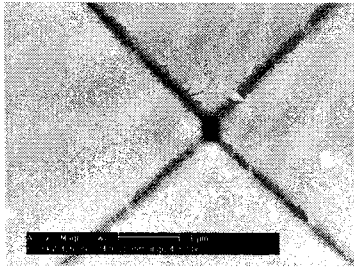


그림 7. 실리콘 나노 aperture array의 전자현미경(SEM)사진.

그림 8과 9에 제작된 aperture array를 이용하여 홀로그래프를 기록 및 재생하는 방식과 그 방법에 의해 기록 및 재생된 근접장 홀로그래프를 나타내었다. 앞에서 언급했듯이 aperture array는 NSOM probe의 경우와 달리 contact-mode에서 동작하기 때문에 홀로그래프 재생 시 그 재생시간이 NSOM을 이용한 경우에 비해 1000 배 이상 빨라짐을 확인할 수 있었다.

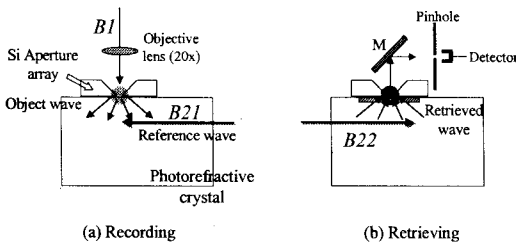


그림 8. Aperture array를 이용하여 근접장 홀로그래프를 기록 및 재생하는 방식.

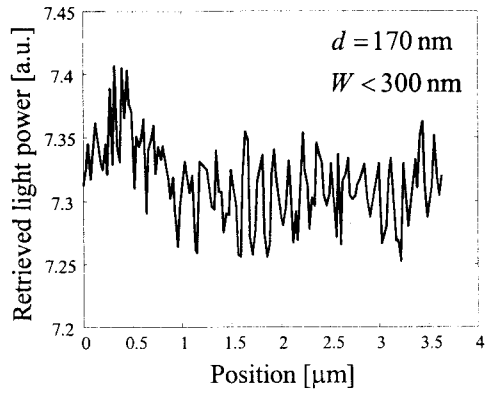


그림 9. 그림 8의 방식에 의해 기록 후 재생된 근접장 홀로그래프. d 는 aperture의 크기, W 는 재생된 spot의 크기이다.

3. 요약

본 논문에서는 근접장 홀로그래프의 저장 밀도를 높이기 위한 각도 다중화 저장, stack-wise 저장 방식에 대한 실험 결과를 보고 하였다. 또한 NSOM을 이용한 방식의 느린 자료 접근 및 전송 시간을 개선하기 위한 실리콘 나노 aperture array를 이용한 홀로그래프 저장 및 재생 방식 및 그 실험 결과를 제시하였다. 제안된 방식들은 근접장 광 메모리의 저장 용량을 증가시키는데 큰 역할을 하리라 생각된다.

(감사의 글)

본 연구는 과학기술부의 국가지정 연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] B. D. Terris, H. J. Mamin, D. Rugar, W. R. Studenmund, and G. S. Kino, "Near-field optical data storage using a solid immersion lens," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, pp. 388-390, 1994.
- [2] E. Betzig, J. K. Trautman, R. Wolfe, E. M. Gyorgy, P. L. Finn, M. H. Kryder, and C.-H. Chang, "Near-field magneto-optics and high density data storage," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, pp. 142-144, 1992.
- [3] S. I. Bozhevolnyi and B. Vohnsen, "Near-field optical holography," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 77, pp. 3351-3354, 1996.
- [4] K.-Y. Kim and B. Lee, "Holographic approach to record and retrieve subwavelength-size objects using optical near-field," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, pp. 1835-1840, 2001.
- [5] K.-Y. Kim and B. Lee, "Recording of optical near fields in remote locations by near-field holography," *Opt. Lett.*, vol. 26, November 2001, to be published.
- [6] M. B. Lee, M. Kourogi, T. Yatsui, K. Tsutsui, N. Atoda, and M. Ohtsu, "Silicon planar-apertured probe array for high-density near-field optical storage," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 3566-3571, 1999.
- [7] M. B. Lee, N. Atoda, K. Tsutsui, and M. Ohtsu, "Nanometric aperture arrays fabricated by wet and dry etching of silicon for near-field optical storage application," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 17, pp. 2462-2466, 1999.