

Multiplexed, Stack-Wise, and Parallel Recording of Near-Field Binary Holograms

金京濂\* · 姜晋求\*\* · 李竝浩\*\*\*  
(Kyoung-Youm Kim · Jingu Kang · ByoungHo Lee)

**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, a silicon nano-aperture array was introduced and applied to the recording of near-field holograms.

**Key Words** : Near-field hologram, near-field recording, multiplexing, stack-wise recording, optical data storage, near-field scanning optical microscope, nanometric aperture array

1. 서 론

지난 20년 동안 근접장 광학(near-field optics)은 학계와 산업계의 많은 관심 하에서 집중적인 연구가 이루어졌다. 그 결과로 최근에는 초기의 고분해능 광학현미경의 영역을 넘어서 분광기(spectroscopy), 고밀도 광메모리, 원자광학 등의 여러 광학의 분야에서 새로운 응용의 가능성을 제시하고 있다 [1]. 근접장 광학은 기존의 광학 시스템이 사용하던 진행광(propagating light)과는 근본적으로 다른 성질의 근접장(기본적으로 짧은 거리(short-range)에서의 전자기적 상호작용)을 연구하는 분야이다. 진행광은 발생된 후 그 발생원(source)과는 독립적으로 진공이나 유전체를 시간과 공간상에서 진동하는 파의 형태로 진행하는데 비해 근접장은 발생 후에도 그 발생원에 종속되어 존재하고 공간상에서 진행하지 못하는 빛의 형태이다. 파의 형태로 진행하는 진행광은 회절이라는 기본적인 성질을 갖기 때문에 이를 사용했을 기존의 광학 시스템은 최근 회절 한계에서 비롯되는 여러 가지 한계에 부딪혀 왔다. 근접장은 회절의 특성을 가지지 않기 때문에 이런 여러 한계를 극복할 수 있는 방안으로 최근 집중적인 연구가 이루어지고 있다.

CD나 DVD같은 기존의 광메모리 시스템에서 그 저장 용량을 결정하는 가장 중요한 요소는 바로 집광된 빛의 spot의

크기이다. 이 크기가 작을수록 기록 매체에 저장할 수 있는 자료의 크기도 작아지고 따라서 같은 면적에 저장할 수 있는 자료의 양(저장 용량)도 커지게 되는 쉽게 알 수 있다. 하지만 이 집광된 빛의 spot의 최소 크기(s)는 임의로 줄일 수 있는 것이 아니라 앞에서 언급한 회절현상 때문에  $0.6\lambda/NA$  ( $\lambda$ 는 빛의 파장, NA는 집광에 사용된 렌즈의 numerical aperture)로 주어진다[2]. 따라서 s를 작게 하는, 즉 저장 용량을 증가시키는 가장 쉬운 방법은 사용하는 빛의 파장을 짧게 하는 것이고 CD( $\lambda=780$  nm)에 비해 DVD( $\lambda=650$  nm)시스템의 메모리 용량이 큰 기본적인 이유이다.

이런 진행광을 사용하던 종래의 방식이 갖는 기본적인 저장 밀도 한계를 극복할 수 있는 차세대 고밀도 저장 방식으로 최근 주목을 받고 있는 것이 근접장을 이용한 광학적 정보저장 기술(NFR; near-field recording[3-9])이다. 이의 기본적인 접근 방식은 회절의 성질을 갖지 않는 근접장을 사용해 정보를 기록 및 재생한다는 것이다. 이 방식에서는 근접장 발생원의 크기가 s에 해당한다고 할 수 있기 때문에 그 크기를 임의로 작게 할 수 있으므로 광기록 매체의 저장 용량을 획기적으로 증가시킬 수 있음이 이미 광화학[4], 자기광학[5], 상천이[6], 혹은 홀로그래피[7] 방식을 이용한 근접장 메모리의 개발을 통해 입증되었다. 이중 근접장 홀로그래피 기술은 다중화, 다층화 저장이 가능하기 때문에 앞에서 언급한 다른 방식에 비해 저장밀도를 크게 높일 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 각도 다중화, 3차원 저장방식을 이용한 근접장 홀로그래프의 저장 및 재생 결과를 보고하고 이어서 실리 콘 나노 aperture array를 이용한 병렬 저장 및 재생의 가능성에 대해 살펴본다.

\* 非 會 員 : 서울대학교 電氣·컴퓨터工學部 工學博士  
 \*\* 非 會 員 : 서울대학교 電氣·컴퓨터工學部 碩士課程  
 \*\*\* 正 會 員 : 서울대학교 電氣·컴퓨터工學部 副教授·工博  
 接受日字 : 2002年 2月 7日  
 最終完了 : 2002年 6月 4日

2. 본 론

2.1 원 리

그림 1에 일반적인 신호빔의 종류를 나타내었다[8]. 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 세 가지 종류가 있는데 근접장 홀로그램이 기존의 홀로그램과 다른 점은 신호원(object)과 저장물질 사이의 거리가 아주 가까워서 두 번째 종류의 신호빔을 추가로 저장할 수 있다는 점이다. (세 번째 종류의 파는 근접장 홀로그램으로도 저장할 수 없으며 이에 해당하는 신호빔의 정보는 잃어버린다.)

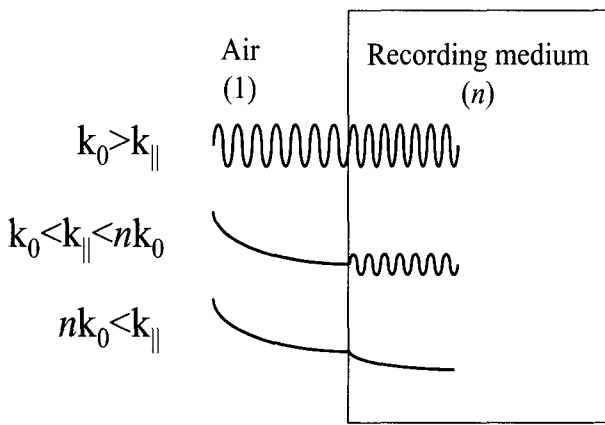


그림 1 세 종류의 신호빔.  $k_0$ 는 공기 중에서의 파수 벡터의 크기,  $n$ 은 광굴절 결정의 굴절률,  $k_{||}$ 은 광굴절 결정의 표면 방향의 파수벡터의 크기를 나타낸다.

Fig. 1 Three kinds of object waves.  $k_0$  is the wavevector in air,  $n$  the refractive index of the crystal, and  $k_{||}$  the wavevector along the surface of the crystal.

신호원의 크기가, 다시 말해 저장하려는 정보의 크기가 빛의 파장보다 작아짐에 따라 두 번째와 세 번째 종류의 신호빔이 차지하는 비중이 점점 커지는데, 기존의 홀로그램으로 이런 작은 크기의 신호원에서 발생된 신호빔을 저장할 경우 첫 번째 종류의 신호빔만 저장된다. 따라서 기록된 홀로그램의 재생시 원래 신호에 대한 모든 정보가 재현되는 것이 아니라 그 중 기록되었던 진행파 성분만 재생되고 재생된 진행파는 회절 현상 때문에 빛의 회절한계라고 불리는  $\lambda/2$ 의 크기 이하로 집광될 수 없기 때문에 재생되는 신호의 크기가 파장의 반 이하의 크기로 줄어들 수 없게 된다. 이에 비해 근접장(두 번째 종류의 신호빔)까지 저장되는 근접장 홀로그램은 재생되는 신호빔이 근접장 성분을 포함하기 때문에 그 재생가능한 저장 정보의 최소 크기가 회절한계에 무관하게 된다. 따라서 저장하고자 하는 정보의 크기가 작을수록, 즉 고밀도로 정보를 저장하고자 하는 경우 기존의 홀로그램이 한계를 드러낼 수밖에 없다. 따라서 이럴 경우에는 앞에서 말한 두 번째, 혹은 세 번째 종류의 신호빔을 저장하는 근접장 홀로그램이 필요하게 된다.

그림 2에 본 연구진이 제안한 근접장 홀로그램의 저장 및 재생 과정을 간단히 나타내었다[8]. 신호빔으로 근접장 주사현미경(near-field scanning optical microscopy ; NSOM)의 광섬유 탐침에서 나오는 빛을 이용한다. 본 실험에 사용된 광섬유 탐침은 화학적 식각 방식( $[\text{NH}_4\text{F}(40\text{wt.}\%)] : [\text{HF}(50\text{wt.}\%)] : [\text{H}_2\text{O}] = 1.7 : 1 : 1$  용액에서 50분 식각후 다시  $10 : 1 : 1$ 의 용액에서 90분간 식각)을 통해 제작되었다[8]. 홀로그램의 기록이라는 특성상 광투과율(throughput)이 좋아야 하므로 급속은 코팅되지 않았다[8]. NSOM의 탐침으로 사용되는 광섬유 탐침의 끝단의 크기는 약 100 nm 정도 되는데 이는 광원으로 사용하는 헬륨-네온 레이저의 파장( $\lambda = 633 \text{ nm}$ )에 비해 아주 작기 때문에 진행광(propagating light) 뿐만 아니라 근접장(near-field)이 충분히 발생하게 된다. 발생된 근접장 신호빔 중 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( $\sim 1 \text{ mm}$ )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 공액위상(phase-conjugated) 빔으로 근사될 수 있기 때문에, 저장되었던 광섬유 탐침에서 발생되었던 진행파, evanescent 파의 공액위상 빔이 재생되어 스캐닝 하면서 정보를 읽고 있는 NSOM의 광섬유 탐침으로 결합(coupling)되게 된다. 그림에서 짐작할 수 있듯이 기준빔과 광섬유 탐침과의 상호작용이 존재하고 여기서 발생된 빛도 광굴절 결정에 저장되게 된다. 하지만 이 성분은 재생시 공액위상 빔이 생성되더라도 광섬유 탐침으로 결합되는 효율이 낮기 때문에 전체적인 광학적 이미지에 큰 영향을 끼치지 못한다.

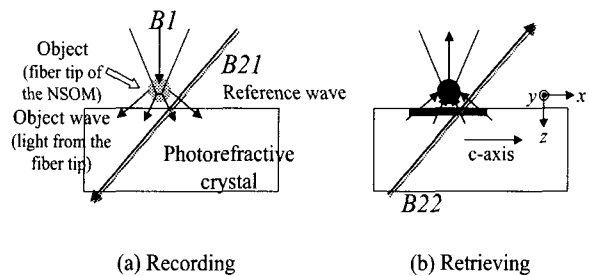


그림 2 근접장 홀로그램의 저장 및 재생 과정.  
Fig. 2 Schematic representation of (a) the recording and (b) the reconstruction of a near-field hologram.

그림 3에 일반적인 근접장 저장 방식과 홀로그래픽 근접장 저장 방식의 차이를 나타내었다. 일반적인 자기광학, 상천이를 이용한 근접장 저장은 그림 3(a)에 나타나 있듯이 파장 이하의 크기를 갖는 광원을 이용하여 저장 물질의 표면에 파장 이하의 크기의 성질변화를 유도하는 방식으로 정보를 기록한 후 이를 진행광을 이용하여 각종 산란(scattering) 과정을 통해 변화된 빛의 투과 혹은 반사 특성을 관측함으로써 정보를

재생한다. 이런 저장 방식의 핵심적 요소는 성질 변화된 부분의 크기임을 쉽게 짐작할 수 있으며 따라서 저장 물질의 표면이 아닌 곳에서는 성질 변화된 부분의 크기를 과장이하로 유지할 수 없으므로 근접장 저장이 불가능해진다. 이에 반해 홀로그래픽 근접장 저장 방법은 그림 3(b)에 표시되어 있듯이 기록이 되었던 원래의 정보원(여기서는 과장크기 이하의 광원) 자체를 공액위상 재생방식(phase-conjugation retrieving)을 통해 재생(reconstruction)하고 이 재생된 이미지를 읽기 때문에 재생된 이미지의 크기가 중요한 반면 저장 물질에 기록되는 영역의 크기는 문제가 되지 않는다. 여기서 원래의 과장크기 이하(좀더 정확히 회절한계보다 작은 크기)의 정보원이 재생되려면 근접장 성분이 없이 진행광 성분만으로는 불가능하므로 근접장 성분이 기록되어 재생됨으로써 회절한계보다 작은 크기의 정보원이 재생 가능해 진다는 것이 근접장 홀로그래프의 기본 원리이다. 따라서 재생되는 정보원이 중요하기 때문에 저장영역의 크기 혹은 겹쳐쓰기가 가능해 지고 이것이 바로 본 논문의 후반부에서 살펴볼 다중화, 다중화 저장 및 재생을 가능하게 하는 홀로그래픽 저장 방식의 강점이 된다.

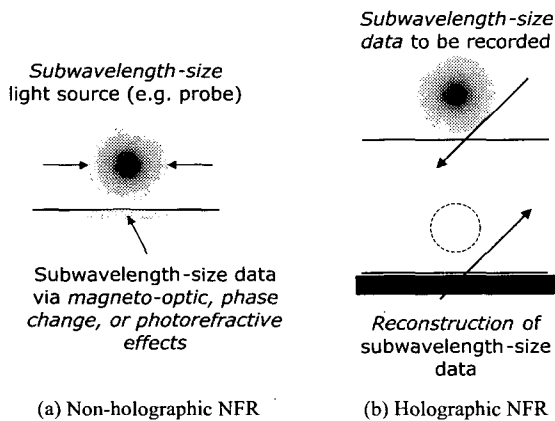


그림 3 일반적인 근접장 저장 방식과 홀로그래픽 근접장 저장 방식의 차이.

Fig. 3 Comparison between the holographic and conventional non-holographic near-field recording systems.

광원으로는 10 mW 헬륨-네온 레이저( $\lambda=633$  nm)를 사용하였으며 여기서 나온 빛은 빔분리기를 통해 B1과 B2로 나누어진다. B1은 NSOM 시스템으로 결합되어 광섬유 탐침에서 신호빔을 발생시킨다. B2는 또 한번 빔분리기를 통해 B21과 B22로 나누어지는데, 전자는 홀로그래프의 저장시 기준빔으로, 후자는 세기를 약하게 한 후(attenuated) 재생시 기준빔의 공액위상 빔으로 Fe:LiNbO<sub>3</sub> 결정(10mm×10mm×5mm)에 입사하게 된다. 그림 4에 그림 2의 방식으로 저장 및 재생된 단일 spot의 이미지의 예를 나타내었다.

그림 5에는 그림 2의 방식으로 저장 및 재생된 단일 spot의 단면재생도를, 삽입그림(inset)에는 저장된 spot 전체의 2차원 이미지가 나타나 있는데 광굴절 결정의 c축과 평행한 방향으로의 spot 크기는 200nm이지만 이와 수직인 방향으로의 크기는 1 $\mu$ m로 상당히 큰데 이는 그림 2에서 알 수 있듯

이 신호빔과 기준빔이 만드는 간섭 패턴, 즉 격자(grating)가 대부분 c축 방향으로 형성되기 때문이다.

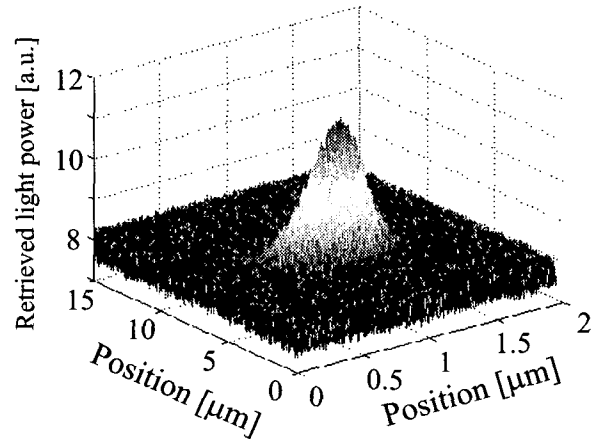


그림 4 그림 2의 방식으로 저장 및 재생된 단일 spot의 이미지의 예.

Fig. 4 Retrieved image of a single spot.

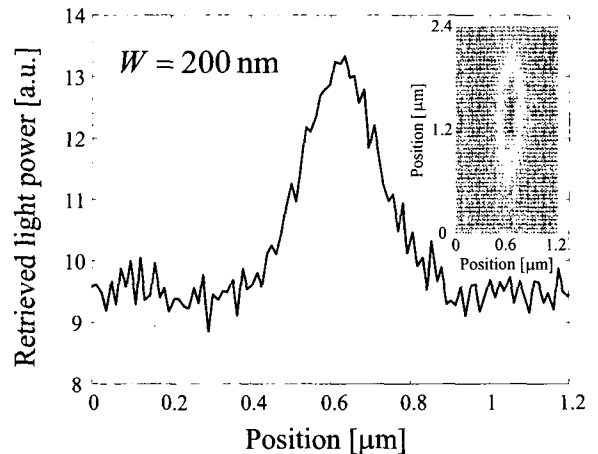


그림 5 그림 2의 방식으로 저장 및 재생된 단일 spot의 단면재생도. 삽입그림은 저장된 spot 전체의 2차원 이미지 (여기서 색에 따른 해당 데이터 값은 그림 4를 참조).

Fig. 5 Distribution of the retrieved light power across the single-spot with its overall image (inset).

## 2.2 각도 다중화 저장

홀로그래픽 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 홀로그래프도 다른 근접장 저장 방식에 비해 다중화가 가능하다는 점에서 그 저장밀도가 획기적으로 증가할 수 있음은 쉽게 알 수 있다. 하지만 근접장 홀로그래프의 영역에 있어서는 아직 four-wave mixing을 통한 일시적 신호빔의 재생이나[7] 단일한 spot의 저장에 대한 연구만이 이루어

지고 있을 뿐이다[7,8]. 여기에서는 근접장 홀로그래프의 각도 다중화에 대한 실험 결과를 보고한다.

그림 6에 홀로그래프의 저장과 재생시의 광섬유 탐침과 광굴절 결정사이의 거리(본 논문의 실험에서 이들 두 거리 값은 항상 같도록 유지됨)가 10nm와 1μm의 두 가지 경우에 대해 홀로그래프의 저장 및 재생을 수행하고 각각의 경우에서 저장된 spot의 크기를 비교하여 나타내었다.

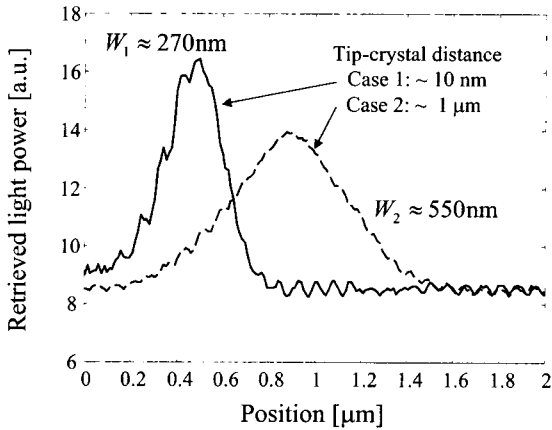


그림 6 광섬유 탐침과 광굴절 결정사이의 거리가 10nm일 경우(실선)와 1μm일 경우(점선)의 저장된 spot의 이미지.

Fig. 6 Distributions of the retrieved light power across the single-spots stored with the tip-crystal distances of 10nm (solid) and 1 μm (dotted).

광섬유 탐침과 광굴절 결정과의 거리가 10nm로 두고 저장과 재생을 수행한 경우 재생되는 신호빔의 spot 크기는 270nm 이하로 Rayleigh의 한계보다 작은 값이다. 이는 탐침에서 발생된 근접장 성분(그림 1에서의 두 번째 신호빔)이 결정에 도달해서 저장된 후 재생되었음을 의미하는 것으로써 본 실험방법의 적합성을 보여주는 것이다.

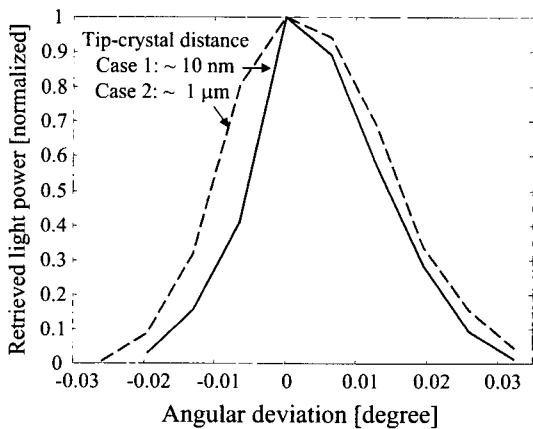


그림 7 그림 6의 각 spot의 재생시 각도 선택도.  
Fig. 7 The angular selectivity of retrieved spots shown in Fig. 4.

반면에 광섬유 탐침과 광굴절 결정과의 거리가 1μm로 두고 저장과 재생을 수행한 경우 재생되는 신호빔의 spot 크기는 550nm로써 빛의 파장과 거의 비슷함을 알 수 있다. 이는 근접장 성분의 신호빔이 광섬유 탐침에서부터 멀리 도달하지 못하기 때문에 결정에 기록되지 않았기 때문이다. 그림 7에 그림 6의 각 경우에 해당하는 각도 선택도를 비교하여 나타내었다. 탐침과 결정 사이의 거리가 10nm일 경우의 각도 선택도가 근접장이 도달하지 못할 정도로 탐침과 결정이 떨어져서 같은 실험을 했을 경우의 값보다 좋음을 알 수 있다. 이는 근접장 홀로그래프의 저장 시에 공기 중에서는 감소하지만 저장 매체 안에서는 진행과가 되는, 즉 그림 1에서의 두 번째 종류의 신호빔의 k 벡터가 홀로그래프의 저장에 기여를 하여 훨씬 좋은 각도 선택도를 주기 때문으로 생각된다.

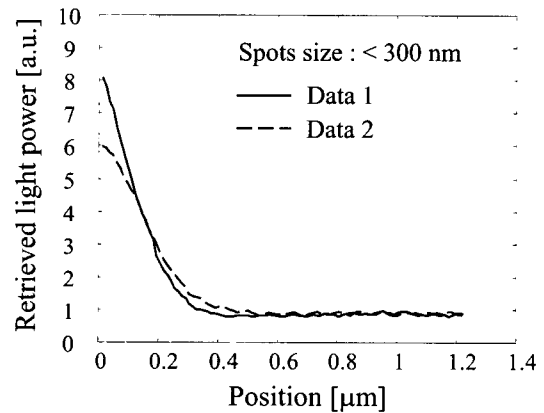


그림 8 각도 다중화 방식으로 동일 위치에 저장된 두 spot의 이미지.

Fig. 8 Distributions of the retrieved light power across angularly multiplexed recorded spots.

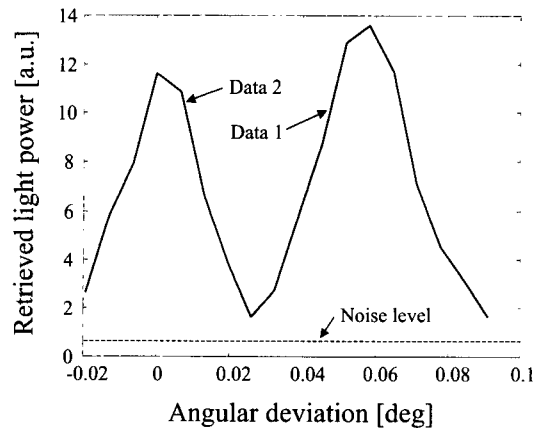


그림 9 그림 8의 spot들의 재생시 각도 선택도.  
Fig. 9 The angular selectivity of the angularly multiplexed recorded spots shown in Fig. 6.

이러한 각도 선택도를 이용한 각도 다중화된 근접장 홀로그래프의 재생 결과가 그림 8과 9에 나타나 있다. 앞의 실험결과를 통해서 근접장 홀로그래프의 각도 다중화 저장이 가능함

을 알 수 있고 그 각도 선택도도 기존의 홀로그래피에 비해 좋기 때문에 더 나은 저장 밀도를 기대할 수 있다.

2.3 다층화 저장

보통의 근접장 홀로그래프는 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 가능하다는 이는 일종의 근접장 홀로그래프의 stack화, 다층화 저장이 가능하게 된다. 그림 1에서 알 수 있듯이 두 번째 종류의 신호빔이 광굴절 결정 안에서는 진행하기 때문에 근접장 홀로그래프를 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 홀로그래프의 기록이 가능해 진다.

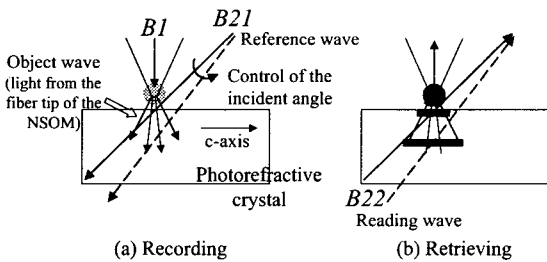


그림 10 근접장 홀로그래프의 stack화 저장 및 재생 과정.

Fig. 10 Schematic representation of the stack-wise (a) recording and (b) retrieving processes of near-field holograms.

그림 10에 본 연구진이 제안한 근접장 주사 현미경의 탐침을 사용한 근접장 홀로그래프의 다층화 저장 및 재생 과정을 간단히 나타내었다[9]. 다른 방식의 메모리와는 달리 홀로그래픽 메모리의 경우 데이터의 저장의 위치는 신호빔과 기준빔의 교차 영역이 되므로 그림 10에서처럼 기준빔의 중앙 위치를 조절함으로써 인해 근접장 홀로그래프의 저장 위치를 결정할 수 있다. 하지만 이 경우 기준빔의 위치까지 신호빔이 도달했는지가 중요한 요소가 되는데 특히 근접장 주사 현미경의 광섬유 탐침의 aperture의 크기가 작으면 작을수록 빛이 빨리 퍼지기 때문에 탐침으로부터 너무 멀리 떨어져 있으면 단위 면적당 빛의 세기가 너무 약해서 기준빔과 충분한 변조 깊이(modulation depth)를 갖도록 간섭할 수가 없어서 홀로그래프가 형성이 되지 않기 때문이다. 기준빔의 입사각도, 즉 k벡터의 방향을 조절함으로써 기준빔의 중앙 위치를 조절하는 방식을 취했는데 이는 만약 입사각을 유지하면서 기준빔을 이동시켜 홀로그래프의 저장 위치를 바꾸게 되면 여러 개의 홀로그래프를 저장했을 경우에 재생시 read-out빔이 동시에 여러 층의 저장된 홀로그래프 영역을 지나기 때문에 재생되는 신호를 구분하기가 힘들기 때문이다. 하지만 입사각을 변화시켜

서 홀로그래프의 저장 위치를 바꾸는 방식은 일종의 각도 다중화 효과를 주기 때문에 read-out빔이 입사시 하나의 저장 정보만 재생하게 된다.

그림 11에 광원으로 헬륨-네온 레이저를 사용하고 저장 물질로 광굴절 결정인 Fe:LiNbO<sub>3</sub>를 사용하여 결정 표면으로부터 2mm 떨어진 위치에 저장 후 재생한 근접장 홀로그래프를 나타내었다. Spot의 크기가 160nm로 회절 한계 보다 작은 크기의 spot을 재생하였음을 보여준다. 즉 광굴절 결정의 표면에서 2mm 떨어진 곳에서도 근접장 홀로그래프의 기록과 재생이 가능함을 알 수 있다.

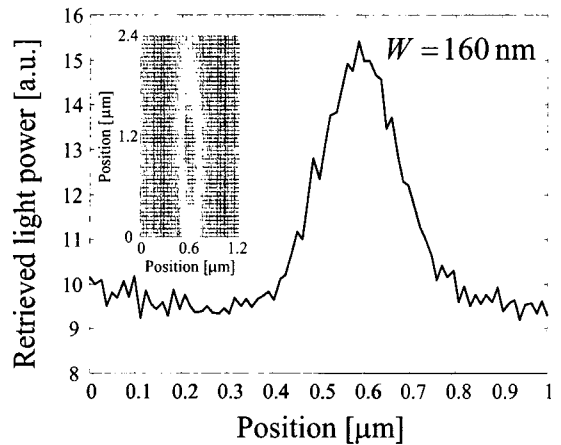


그림 11 광굴절 결정의 표면에서 2mm 떨어진 곳에서 저장 후 재생된 spot의 이미지.

Fig. 11 Distribution of the retrieved phaseconjugated light power across the retrieved spot for the hologram stored at 2mm apart from the crystal surface.

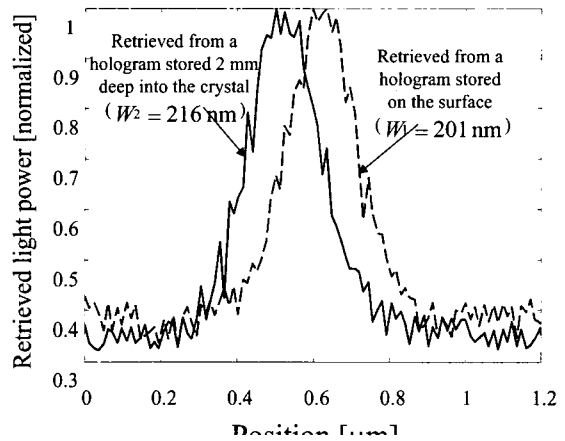


그림 12 광굴절 결정 표면과 그로부터 2mm가량 떨어진 위치에서 저장된 두 spot의 재생 결과.

Fig. 12 The same as Fig.11 for the stack-wisely stored holograms recorded on (long-dashed) and at 2mm apart (solid) from the crystal surface.

그림 12는 위의 성질을 이용하여 3차원적으로, 광굴절 결정 표면과 그로부터 2mm가량 떨어진 위치에서, 저장한 두

spot의 재생 결과를 나타내었다[9]. 결정에서의 깊이 조절은 기준빔의 중심 위치로 조절했으며 두 경우에 기준빔이 서로 겹치지 않도록 하기 위해 (cross-talk이 없는 경우) 신호빔의 spot크기인 2mm를 저장하는 두 spot 사이의 거리로 삼았다. 탐침과 광굴절 결정의 간격은 10nm이었다. 그림에서 알 수 있듯이 재생되는 spot의 크기는 200~220nm 정도로서 사용한 헬륨-네온 레이저의 파장 (633nm)의 반 (빛의 회절 한계)에 비해 모두 훨씬 작은 값으로 근접장 신호빔이 기록되었음을 알 수 있다. 이를 이용하면 stack 방식의 다중화 근접장 홀로그램이 가능해 지기 때문에 여러 가지 다중화 기술 이외의 새로운 고밀도 저장 방식이 되리라 생각한다.

2.4 병렬 저장

앞에서 살펴본 NSOM을 이용한 근접장 홀로그램의 기록 및 재생 방식은 1) 하나의 탐침을 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) 여러 개의 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[10-11].

그림 13에 비등방 wet etching을 이용하여 제작한 6×6 실리콘 나노 aperture array중 하나의 aperture의 전자현미경 (SEM)사진과 그의 제작 방식을 나타내었다. 높은 균일성 및 고밀도 array를 위해서는 SOI 웨이퍼를 사용하는 것이 좋지만[10-11] 이 논문에서는 보통의 Si(100) 웨이퍼를 사용하여 제작하였다. 이 웨이퍼는 525±15μm의 두께를 갖는데 이 ±15μm의 두께 변화가 제작된 aperture array의 aperture 크기의 불균일도에 큰 영향을 주는데 이는 1μm의 두께 변화가 aperture 크기에 1.414μm 정도의 변화를 가져오기 때문이다. 또한 KOH 용액의 국부적인 온도 및 농도의 차이, Si 웨이퍼 안쪽으로 파고든 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 층의 두께의 차이 등이 전체적인 aperture 크기의 불균일도에 큰 영향을 줄 수 있다.

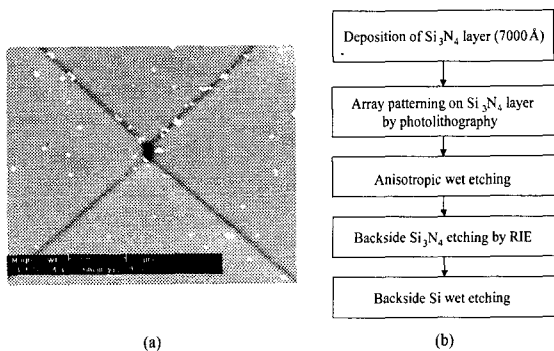


그림 13 실리콘 나노 aperture array. (a) 전자현미경 (SEM)사진, (b) 제작 방식.

Fig. 13 Si nano aperture array (a) SEM picture, (b) schematic representation of the fabrication procedure of the aperture array.

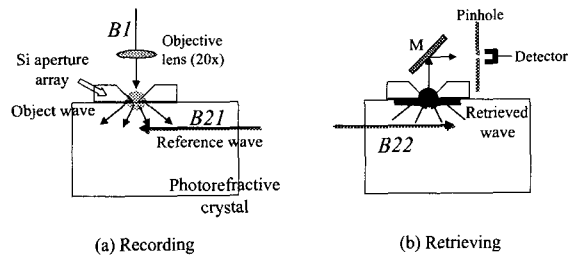


그림 14 Aperture array를 이용하여 근접장 홀로그램을 기록 및 재생하는 방식. M은 거울.

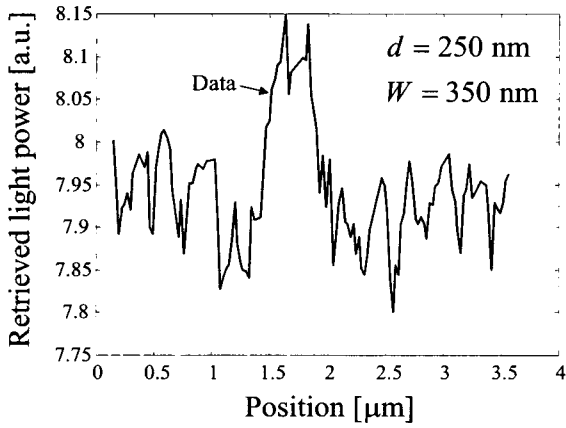
Fig. 14 Schematic representation of the (a) recording and (b) reading of a near-field hologram using the nanometric Si aperture array. M is a mirror.

그림 14에 제작된 aperture array를 이용하여 홀로그램을 기록 및 재생하는 방식을 나타내었다. 자세한 실험 방식은 그림 2의 경우와 비슷한데 다음과 같다. 광원으로는 35mW 헬륨-네온 레이저(λ=633nm)를 사용하였으며 여기서 나온 빛은 빔분리기를 통해 B1과 B2로 나누어진다. B1은 대물렌즈를 통해 집광후 aperture array중의 하나로 입사하여 신호빔을 발생시킨다. B2는 또 한번 빔분리기를 통해 B21과 B22로 나누어지는데, 전자는 홀로그램의 저장시 기준빔으로, 후자는 세기를 약하게 한 후(attenuated) 재생시 기준빔의 공액위상빔으로 Fe:LiNbO<sub>3</sub> 결정(10mm×10mm×10mm)에 입사하게 된다.

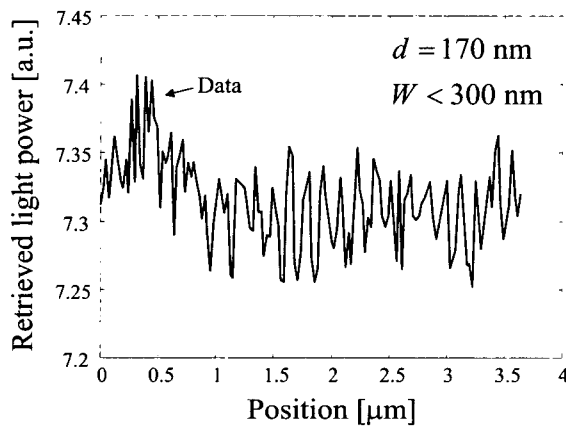
그림 15에 제작된 6×6 aperture array중의 (3,4), (3,5) aperture를 이용하여 기록 및 재생된 근접장 홀로그램을 나타내었다. (3,4) aperture(a)의 크기는 250 nm, (3,5) aperture(b)는 170 nm 정도의 크기를 갖는다. 본 연구에서는 아직 광원에서 입사하는 빛(B1)을 선택적으로 각각의 aperture에 입사시키거나 혹은 각각의 aperture에서 재생된 빛을 선택적으로 감지하는 시스템을 제작하지 못했기 때문에 두 개의 aperture에서 동시에 홀로그램을 기록 및 재생하지 않고 두 개의 홀로그램을, 기준빔 및 결정의 위치 및 방향은 변화시키지 않고 일정하게 유지하면서 B1의 위치(기록의 경우)와 광감지기(재생의 경우)의 수평 방향(광굴절 결정의 표면방향)만을 변화시켜 가면서 순차적으로 기록 및 재생하였다. 하지만 이런 방식이 nanometric aperture array를 이용한 근접장 홀로그램의 병렬 저장 및 재생의 가능성은 충분히 제시할 수 있다고 판단된다.

재생된 spot의 크기는 (a) 350nm, (b) 300nm 이었는데 그림에서 알 수 있듯이 aperture의 크기가 작아질수록 재생되는 spot의 크기는 작아지지만 신호 대 잡음비가 나빠지는 것을 알 수 있다. 따라서 이 둘을 적절히 고려한 최적의 aperture 크기에 대한 연구가 필요하리라고 판단된다. 또한 앞에서 언급했듯이 aperture array는 NSOM probe의 경우와 달리 contact-mode에서 동작하기 때문에 홀로그램 재생시 그 재생 시간이 NSOM을 이용한 경우에 비해 크게 단축할 수 있는데 본 연구에서는 근접장 홀로그램의 저장 후 NSOM probe로 1.5 μm×3 μm의 영역을 non-contact 모드(shear force 감지 매커니즘을 이용한) 스캐닝을 이용하여 재생하는 경우 약 4~5분 정도 소요되는 데 비해 contact 모드인 aperture array

를 이용한 스캐닝(재생)은  $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ 의 영역을 앞의 경우와 같은 해상도를 유지하면서 0.5초 이하의 짧은 시간에 수행할 수 있음을 확인하였다. 이는 홀로그램 재생시 그 재생 시간을 NSOM을 이용한 경우에 비해 1000배 이상 개선할 수 있음을 확인한 것이라 할 수 있다.



(a)



(b)

그림 15 그림 14의 방식에 의해 기록 후 재생된 spot의 이미지. d는 aperture의 크기, W는 재생된 spot의 크기이다.

Fig. 15 Retrieved images of spots stored using the (a) (3,4) and (3,5) elements of the fabricated aperture array. d: aperture size, W: spot size (FWHM).

### 3. 결 론

본 논문에서는 근접장 홀로그램의 저장 밀도를 높이기 위한 각도 다중화 저장, stack-wise 저장 방식에 대한 실험 결과를 보고하였다. 먼저 본 연구진이 제안한 근접장 홀로그램 저장 방식을 통해 빛의 회절한계 이하의 크기인 200nm 보다 작은 크기의 spot를 저장하였으며 또한 이를 각도 다중화시켜 저장할 수도 있음을 보였다(각도 선택도: 0.01도). 여기서는 각도 다중화의 경우만 살펴보았지만 이동(shift), 위상(phase), 및 파장 다중화 방식과 같은 다른 다중화 방식도 쉽게 적용할 수 있음을 그림 2의 저장 방식을 통해서 알 수 있

다. 또한 홀로그래피 방식을 통해서 근접장을 발생원으로부터 상당히 떨어진 위치에까지 저장 가능함을, 저장 물질인 광굴절 결정의 표면에서 2mm 떨어진 곳에서 200nm이하의 spot을 저장 및 재생함으로써 확인하였고 이를 이용한 stack화 저장의 가능성도 제시하였다. 마지막으로 NSOM을 이용한 방식의 느린 자료 접근 및 전송 시간을 개선하기 위한 실리콘 나노 aperture array를 이용한 홀로그램 저장 및 재생 방식 및 그 실험 결과를 제시하였다. 제안된 방식들은 근접장 광메모리의 저장 용량을 증가시키는데 큰 역할을 하리라 생각된다.

### 감사의 글

연구는 과학기술부의 국가지정 연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. Ohtsu, Near-Field Nano/Atom Optics and Technology, ed. M. Ohtsu (Springer-Verlag, Tokyo, 1998).
- [2] A. B. Marchant, Optical Recording (Addison-Wesley, Inc., Reading, Massachusetts, 1990) Chap. 1.
- [3] 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.
- [4] S. Jiang, J. Ichihashi, H. Monobe, M. Fujihira, and M. Ohtsu, "Highly localized photochemical processes in Lb films of photo chromic material by using a photon scanning tunneling microscope" Opt. Commun., vol. 106, pp. 173-177, 1994.
- [5] 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.
- [6] S. Hosaka, T. Shintani, M. Miyamoto, A. Hirotsune, M. Terao, M. Yoshida, K. Fujita, and S. Kammer, "Nanometer-sized phase-change recording using a near-field optical microscope with a laser diode, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 35, pp. 443-447, 1996.
- [7] S. I. Bozhevolnyi and B. Vohnsen, "Near-field optical holography," Phys. Rev. Lett., vol. 77, pp. 3351-3354, 1996.
- [8] 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.
- [9] K.-Y. Kim and B. Lee, "Recording of optical near fields in remote locations by near-field holography," Opt. Lett., vol. 26, pp. 1800-1802, 2001.

- [10] 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.
- [11] 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.



**이 병 호(李 竝 浩)**

1987. 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1989. 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업  
 (공학석사)  
 1993. University of California, Berkeley  
 Department of Electrical Engineering and  
 Computer Science 졸업 (Ph. D)

1994. 9~현재. 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 근무. 현 부교수.  
 2000. IEEE Senior Member  
 2002. SPIE Fellow  
 주관심분야는 홀로그래피, 광섬유소자, 3차원 디스플레이 등.  
 Tel : 02-880-7245  
 Fax : 02-873-9953  
 E-mail : byoungho@plaza.snu.ac.kr

저 자 소 개



**김 경 영(金 京 謙)**

1997. 서울대학교 전기공학부 졸업(공학사)  
 1999. 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업  
 (공학석사)  
 2002. 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업  
 (공학박사)

주관심분야는 근접장 광학, 홀로그래픽 메모리, 나노소자 모델링 등.  
 Tel : 02-880-7252  
 Fax : 02-873-9953  
 E-mail : vraptor@hanmir.com



**강 진 구(姜 晋 求)**

2001. 서울대학교 전기공학부 졸업(공학사)  
 2001.3~현재. 서울대학교 대학원 전기·컴퓨터공학부 석사과정  
 주관심분야는 근접장 홀로그램, 광섬유 소자 등.

Tel : 02-880-7252  
 Fax : 02-873-9953  
 E-mail : jin207@hanmir.com