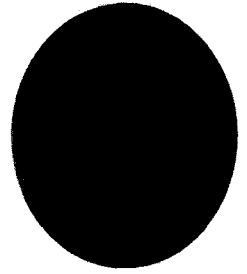


홀로그래프 메모리 기술



이 병 호

서울대학교 전기공학부

김 은 수

광운대학교 전자공학과

1. 배 경

최근 급속히 발달하고 있는 정보통신 산업은 과거 독립적으로 성장해오던 가전기기, 컴퓨터, 통신, 방송, 영상, 오락 등 여러 산업들이 서로 융합된 고도의 기술 집약적 멀티미디어(multimedia) 산업으로 변모해 가고 있다. 21세기의 고도 정보화 사회에서의 새로운 멀티미디어 정보환경을 위해서는 정보 저장매체의 초대용량화, 초고속화, 초소형화에 대한 요구가 더욱 절실해질 것으로 전망된다. 한 예로, 멀티미디어 정보통신의 총아라고 할 수 있는 주문형 비디오(VOD: video-on-demand)의 상용화를 위해서는 비디오 서버(server)의 용량이 10^3 TB 이상, 데이터 전달속도는 1 Gb/s 이상이 요구된다. 그러나, 기존의 반도체 메모리 기술, MOD(magneto-optic disc) 및 CD(compact disc) 등은 이러한 21세기 고도 정보화 사회에서 요구되는 막대한 양의 정보를 저장하고 처리하는데 있어서 기술적, 경제적 한계가 있음에 따라 새로운 차원의 차세대 초대용량 정보저장 매체 및 원천기술의 개발에 대한 필요성이 절실히 요구되고 있다.

DRAM, SRAM, 플래시 메모리(flash memory) 등의 반도체 메모리 기술은 매우 빠른 속도로 성장하여 왔으며 현재 1 Gb DRAM 기술까지 확보된 상태이나^[1], 궁극적으로 리소그래피(lithography) 기술의 한계로 인해 제한을 받고 있다. 한편, 현재 정보저장 미디어 분야에 빠른 속도로 확산되어 다양한 시장과 그 응용을 확대하고 있는 CD 광메모리 시스템의 경우, 음악 뿐만 아니라, 텍스트(text), 영상, 음향이 조합된 멀티미디어 제품의 기본이 되었으며, 비디오 게임, 백과사전, 지도 등 CD로 만들어진 멀티미디어 제품은 PC 사용자들에게 일반화되어 있다. 한 장의 CD는 640 MB(1시간 45분 가량의 음악이나 더블 스페이스된(double-spaced) 문서 30만 페이지 이상)의 용량을 갖지만, 방대한 데이터의 저장을 필요로 하는 병원 업무, 법률

회사, 정부기관, 도서관 등에서는 수백장의 디스크를 쌓아놓고 로봇팔을 이용하여 액세스(access)하는 주크박스(jukebox)를 이용하고 있다. 이와 같이 같은 크기의 CD에 보다 많은 용량의 데이터를 저장해야 할 필요성이 요구됨에 따라 좀더 짧은 파장을 갖는 레이저의 개발, 데이터 압축 방법의 연구, multi-level CD 및 DVD(digital versatile disc)의 개발을 위한 연구가 활발하며^[2] 향후 5년정도 이내에 저장용량을 50 GB로 늘릴 수 있을 것으로 기대하고 있다. 그러나, CD는 기본적으로 데이터 저장용 홈을 광원의 파장이하로 쪼개기 어렵다는 한계를 갖고 있다. 근접장(near-field)을 이용하여 이러한 한계를 완화시키려는 노력도 매우 활발하며^[2-4] TeraStor사에서는 궁극적으로 100Gb를 저장하는 5¼인치(inch) 디스크를 만들 수 있을 것이라고 주장하고 있다^[5]. 또한 마이크로머시닝(michromachining) 기술을 이용한 탐침(probe)을 사용하여 고밀도 메모리를 만들고자 하는 노력도 활발하다. 하지만, 이러한 방법들은 각 비트(bit) 단위로 기계적인 랜덤 액세스(random access)를 하여야 하기 때문에 데이터 처리속도의 한계를 가질 수밖에 없다는 점을 고려할 때 새로운 차원의 차세대 초고속, 초대용량 저장매체에 대한 관심은 갈수록 커질 전망이다. 이러한 문제의 해결책으로 최근 큰 주목하에 연구되고 있는 기술이 홀로그래프를 이용한 광메모리이다. 보통 홀로그래프라 하면 3차원 영상의 재현을 생각하지만, 보다 정확히는 홀로그래프란 저장될 때 사용된 광파를 똑같이 재생하는 것 또는 그 저장된 상태를 뜻하며, 홀로그래프 메모리에서는 2차원의 광패턴들을 저장하였다가 재생하게 된다. 저장 매체로는 주로 광굴절 크리스탈(photorefractive crystal)이 사용되며 2차원의 정보를 3차원의 체적 홀로그래프(volume hologram)으로 저장하게 된다. 이러한 저장 방법은 적절한 다중화(multiplexing) 기법에 의하여 공간적으로 겹쳐져서 저장된 정보라도 서로 분리하여 읽어낼 수 있으며 2차원 영상이 한꺼

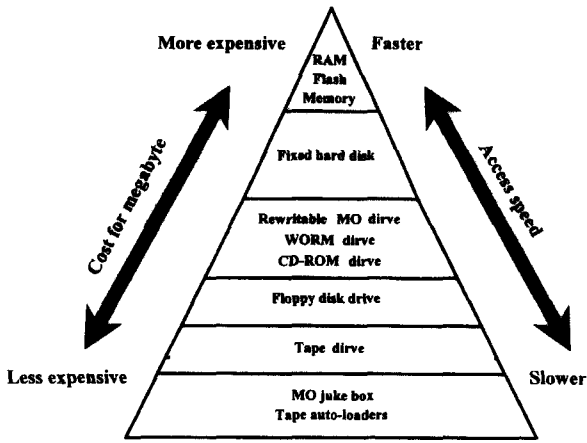


그림 1. 메모리 피라미드.

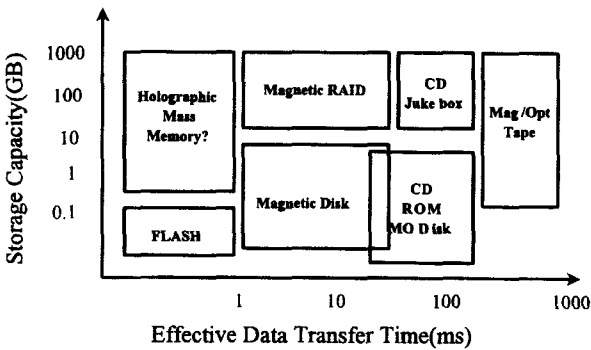


그림 2. 각종 메모리의 정보저장용량 및 데이터 전달시간.

번에 재생되는 페이지(page) 단위의 읽기를 구현하기 때문에 초대용량의 병렬(parallel) 액세스 초고속 메모리 시스템의 구현을 가능하게 한다^[6].

그림 1은 현재의 메모리 피라미드를 나타낸다. 아래로 갈수록 시장 규모가 크며 저장용량이 크고 가격이 저렴하지만 액세스 속도가 느리다. 반대로, 위로 갈수록 액세스 속도는 빠르지만 저장용량이 작으며 고가이다. 그림 2는 여러 가지 메모리에 대해 그 정보저장용량과 데이터 전달시간(data transfer time)을 보여준다. 자기/광 테이프는 정보저장용량은 크지만 데이터 전달시간이 크며, 플래시 메모리는 데이터 전달시간이 짧지만 저장용량이 작은 것을 볼 수 있다. 홀로그래프 메모리는 저장용량이 크면서도 데이터 전달속도가 빠른 메모리 기술이 될 수 있을 것으로 예측되어 활발한 연구가 이루어지고 있는 것이다.

이하에서는 이러한 홀로그래프 메모리의 기본 원리와 연구동향을 살펴보고자 한다.

2. 기본 원리 및 특징

광굴절 효과의 원리는 그림 3에서 살펴볼 수 있다^[7-12]. 광굴

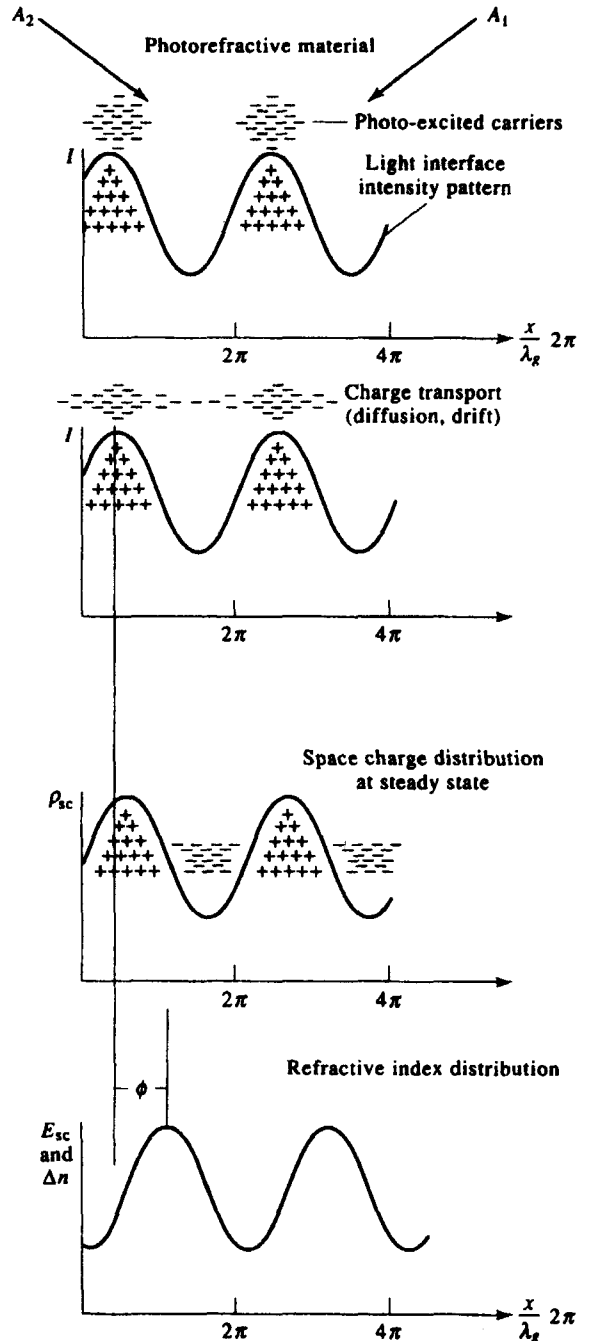


그림 3. 광굴절 효과의 원리. 위로부터, 두 빛의 간섭 패턴, 전자의 이동, 공간전하의 분포, 공간적인 전기장 패턴(굴절률의 변화 패턴은 부호를 제외하고는 이에 비례함).

절 물질에 두 개의 가간섭성(coherent) 빛(A_1 과 A_2)이 들어와서 그림과 같이 간섭 패턴, 즉, 빛의 세기(I)의 공간적(x 방향)인 변화 패턴을 만든다. 이때, 두 빛을 각각 기준빔(reference beam)과 정보를 실은 신호빔(signal beam 또는 object beam)이라 한다. 신호빔은 공간광변조기(SLM; spatial light modulator)에 의해서 원하는 2차원 패턴에 따라 변조된 빛이다. 광굴절 물질의 대표적인 예는 철(Fe)이 도우핑(doping)된 LiNbO_3

(lithium niobate) 크리스탈이다. 이러한 물질에 빛의 세기의 공간적인 변화 패턴이 생기면, 빛이 센 곳에서는 도우핑된 불순물에 의한 트랩(trap) 에너지 준위에 잡혀 있던 전자들이 광자(photon)를 흡수하여 전도대(conduction band)로 올라간다. 따라서, 전도대의 전자밀도의 분포가 고르지 않게 되므로 전자들이 확산된 후 다시 트랩 준위에 포획되어 움직일 수 없게 된다. 따라서, 이러한 일이 일어난 후에는 전자들은 빛의 세기가 약한 곳에 모여 있게 되고, 빛의 세기가 센 곳은 불순물 원자들이 양이온화되어 남게 된다. 이러한 공간적인 전자밀도(ρ_{sc}) 분포는 두 빛이 차단되어도 남아있다. 이는 공간적인 전기장(E_{sc})의 분포를 준다. 이것이 정보를 저장하는 원리이다. 이제 여기에 기준빔의 방향으로 정보를 읽기 위한 빛(probe beam)이 들어가면, 이 빛은 광굴절 물질내에서 공간적인 굴절률(Δn)의 분포 패턴(이를 홀로그램 또는 격자(grating)라 한다.)를 경험하게 된다. 이는, 저장되어 있는 공간적인 전기장의 분포가 전기광학 효과(electro-optic effect)에 의해서 전기장에 비례하는 굴절률 변화 패턴을 야기하기 때문이다. 광굴절 물질의 중요한 요구조건은 이러한 전기광학 효과가 커야 한다는 것이다. 정보를 읽기 위해 입사된 빛은 이러한 공간적인 굴절률 분포 때문에 회절하게 되며 이 회절된 빛은 원래 정보 기억시에 사용되었던 신호빔을 똑같이 재생하게 된다.

그림 4는 홀로그램 메모리 시스템의 기본 구조를 나타낸다. 레이저는 빔분할기(Beam splitter)에 의해서 기준빔(reference arm)과 신호를 신게 될 빔(object arm)으로 갈라진다. 후자는 SLM을 통과하면서 원하는 데이터에 의해 2차원 패턴으로 변

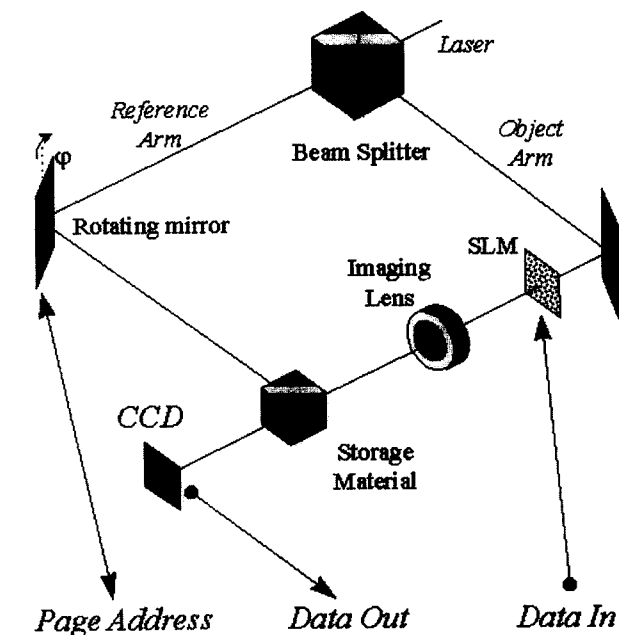


그림 4. 홀로그램 메모리 시스템의 기본 구조.

조된다. 이 빛이 광굴절 물질(storage material)내에서 기준빔과 간섭하여 정보저장을 하게 된다. 정보를 읽어낼 때에는 광굴절 물질에 기준빔(읽어낼 때의 기준빔을 보통 probe beam이라고 한다.)만을 조사한다. 그러면, 원래의 정보를 실은 신호빔이 재생되어 CCD(charge-coupled-device)와 같은 검출기 어레이(detector array)에 입사된다. 정보저장시의 간섭패턴은 광굴절 물질내에서 3차원적으로 생기게 되기 때문에 SLM의 2차원 패턴 정보를 광굴절 물질내에 3차원의 체적 홀로그램으로 분포시켜 저장하게 된다. 따라서, 이러한 메모리는 독특한 특성을 지니는데, 반도체 메모리 또는 CD의 경우 저장재료의 한 곳에 결함이 생기면 해당하는 정보를 잃게 되지만, 홀로그램 메모리의 경우 국부적 결함이 있어도 재생되는 영상 또는 패턴은 상대적으로 큰 영향을 받지 않는다. 이와 같이 하나의 영상 또는 패턴 페이지를 저장하고 공간적으로 이와 겹쳐서 또다른 데이터 페이지를 저장할 수 있다. 이를 다중화 기법이라 하는데 그 대표적인 예는 각도 다중화(angular multiplexing)이다. 그림 4에서 첫 번째 페이지를 저장하고, 두 번째 페이지를 저장할 때는 거울을 돌려서 입사하는 기준빔의 각도를 바꾸어 준다. 두 가지의 정보를 저장하는 영역이 전부 또는 일부 중첩되어도 이를 구별하여 읽어낼 수 있다. 해당 정보를 읽어내기 위해서는 해당하는 기준빔의 각도로 프로브 빔, 즉 정보를 읽기 위한 빔을 입사시키면 된다. 이는 바로, 정보가 체적 홀로그램으로 저장되어 있기 때문에 가능하다. 첫 번째 정보를 읽기 위한 각도로 프로브 빔이 입사되었을 때 광굴절 물질내의 각 부분에서는 빛이 두 가지의 격자 모두에 의해 회절이 되지만, 첫 번째 격자에 대한 경우 각 위치에서 회절된 빛이 같은 위상을 갖고 더해져서 최종적으로 광굴절 물질 밖으로 회절되어 나오게 된다. 그러나, 두 번째 격자에 대한 경우는 각 위치에서 회절된 빛의 위상관계가 서로 랜덤(random)하므로 최종적인 회절광을 내지 못한다. 마찬가지로, 두 번째의 각도로 프로브 빔이 입사되었을 때에는 두 번째 격자에 의한 회절빔만 나타난다. 이와 같이, 각도다중화의 원리는 브래그 각도의 부정합(Bragg angle mismatch)이다. 1 cm³의 광굴절 크리스탈의 경우 기준파의 각도가 0.001°만큼만 변해도 원래의 정보를 읽어낼 수 없다. 즉, 0.001° 각도 간격으로 다른 데이터 페이지들을 저장할 수 있다. 기준파의 각도를 10° 범위내에서 변화시킨다고 하면 1 cm³의 광굴절 크리스탈내에 10,000개의 데이터 페이지를 저장할 수 있다. CCD 어레이는 2,048×2,048개의 픽셀(pixel)을 갖는 것이 상용화되어 있으며, SLM의 경우 1,000/s의 프레임율(frame rate)을 갖는 1,024×1,024 픽셀 어레이가 개발중에 있다¹³⁾. 따라서, 1 cm³의 광굴절 크리스탈내에 1 Mb의 데이터 페이지를 10,000개 이상 저장할 수 있어 그 정보저장밀도가 10

Gb/cm³ 이상에 달한다. 정보저장량은 공간다중화^[14] 등의 기법으로 Tb급으로 확장시킬 수 있다. 또한, 각 데이터 페이지를 읽을 때의 액세스 시간은 검출기의 응답시간에 의해 제약받는데 이것이 100 μs 정도이므로 10 Gb/s 이상의 데이터율을 얻을 수 있다.

3. 연구 경과 및 동향

홀로그래프의 원리는 전자현미경을 연구하던 Gabor에 의해서 1948년에 착안되었지만, 실제 큰 주목을 받기 시작한 것은 1960년 레이저가 발명되고 나서였다. 1963년 Polaroid 사의 van Heerden이 체적 홀로그래프를 이용한 데이터 저장을 제안하였는데^[15] 이것이 홀로그래프 메모리 원리의 시초라고 할 수 있다. 광굴절 효과는 Bell 연구소의 Ashkin 등에 의해서 1996년에 발견되었고^[16] 이론적 바탕이 마련된 것은 구 소련의 Kukhtarev 등에 의해서이다^[17,18]. 많은 홀로그래프를 저장하기 위한 첫 번째 시도는 RCA의 Staebler 등에 의해서 이루어져서 철이 도우핑된 LiNbO₃(Fe:LiNbO₃)에 500개의 홀로그래프를 기록하는데 성공하였다^[19]. 또한, 프랑스의 Thomson CSF 사에서도 Huignard 등에 의해 광굴절 결정의 영역을 256개로 분할하여 각각에 10개의 홀로그래프를 기억할 수 있는 장치를 만들었다. 이러한 많은 노력에도 불구하고, 개발된 어느 시스템도 몇가지 기술적인 난제와 가격적인 부담으로 실용화되지 못하였다.

눈부신 발전을 해 온 반도체 메모리와 자기메모리에 가려서 빛을 보지 못하던 홀로그래프 메모리가 다시 큰 관심을 끌게 된 것은 1991년 Northrop 사의 Mok 등이 탱크, 지프, 그밖의 군용 수송장비들에 대한 영상 데이터를 Fe:LiNbO₃ 결정에 500개의

고해상 이미지로 저장 및 재생하는데 성공하고^[20] 곧이어 5,000개 영상의 저장 및 재생 실험에 성공하고서였다. 이를 필두로 1993년 California Institute of Technology의 Psaltis 교수 그룹은 160×110 비트로 구성된 1,000페이지의 디지털 데이터를 1 cm³의 Fe:LiNbO₃ 결정에 저장하였으며, 저장된 광메모리 데이터는 다시 재생되어 컴퓨터로 전송할 수 있었으며 이런 과정에서 에러(error)가 검출되지 않음으로 해서 디지털 메모리의 가능성을 확인하였다. 그후, 이 그룹은 개선된 시스템을 사용하여 각 페이지가 320×220 비트로 구성된 10,000개의 페이지를 기록할 수 있었다. 이 장치의 저장용량은 80 MB에 달하였다. 저장된 데이터는 컴퓨터에 저장되는 전형적인 랜덤 이진(binary) 패턴이었고 비트오율(BER; bit error rate)은 10⁻⁵이었다. 더 나아가서, 이 그룹은 공간다중화 기법을 사용하여 160,000개의 홀로그래프를 저장시킬 수 있었다. Psaltis 그룹은 최근에는 그림 5와 같이 광전자집적회로소자와 광굴절 결정을 렌즈없이 집적시키는 연구를 수행하고 있으며^[5], 또한, Dupont사의 광폴리머(photopolymer)를 사용하여 그림 6과 같은 홀로그래픽 디스크(holographic disc) 시스템을 개발하였는데^[5], 100

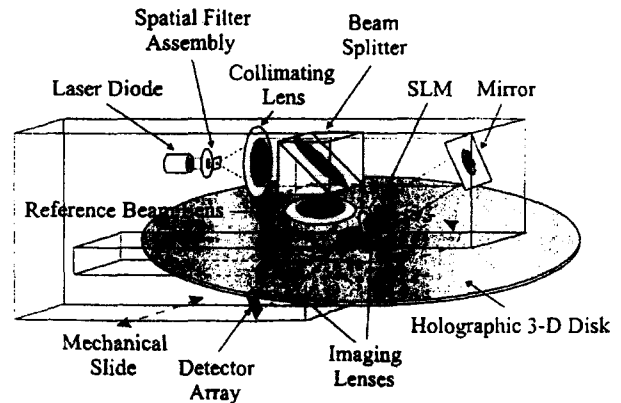


그림 6. 홀로그래픽 디스크 시스템^[5]. 아래의 그림은 4 bits/μm로 저장되어 있는 정보를 읽어낸 예를 보여준다.

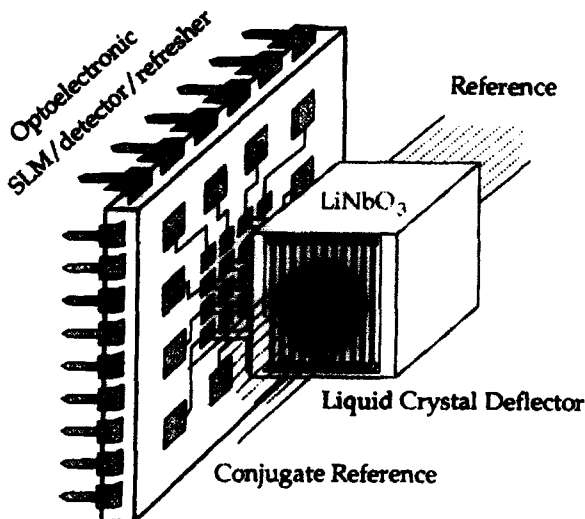


그림 5. 광전자집적회로소자와 광굴절 결정이 결합된 시스템^[5].



그림 7. Holoplex사의 HM-100 모델^[21].

μm 두께의 광폴리머에 대해 $10 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 의 저장밀도를 얻을 수 있었다. 이는 DVD의 경우와 비슷한 정도의 저장밀도이다. 저장밀도를 더욱 높이기 위해서는 홀로그래프의 두께를 증가시켜야 한다. 이를 위한 폴리머의 연구가 매우 활발하며, 한편으로는 1 mm 두께의 $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ 디스크를 사용하여 $100 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 의 저장밀도가 실험적으로 얻어지고 있다^[5]. Mok과 Psaltis가 설립한 벤처(venture)회사인 Holoplex^[21]는 HM-100이라는 상품명으로 홀로그래프 메모리 시스템을 시판하고 있다. 주요 판매 분야는 지문을 저장하고 재생하는 지문인식 시스템으로 이는 광폴리머를 사용한 디스크 시스템이다. 그림 7은 HM-100 모델을 보여주는데 그 크기는 8인치(inch)×8인치×3 $\frac{1}{2}$ 인치이며 영상을 100개의 gray-scale의 아날로그 상태로 저장한다.

또한, Stanford University의 Hesselink 교수 그룹도 매우 활발한 활동을 하고 있다. 이 그룹은 1994년에 압축된 영상 및 비디오 데이터를 홀로그래픽 메모리로 저장한 다음 재생하는 실험에 성공하였으며, 이 그룹은 그림 8에서 보듯이 에러 수정 코딩(error correction coding) 기법을 사용하여 10^{-7} 이하의 BER을 얻고 있다^[22]. Hesselink도 Optitek^[23]이라는 벤처회사를 만들고 시제품을 내고 있다.

한편, Rockwell Science Center의 Hong 박사 그룹도 선도적인 역할을 하고 있으며 이 그룹은 음향광학편향기(AOD; acousto-optic deflector)를 사용하여 전기적인 방법으로 각도다중화를 하고 있다^[24]. 즉, 기준빔의 각도를 바꾸기 위해서 거울을 기계적으로 회전시키는 것이 아니라 AOD에 rf(radio frequency) 신호를 가하여 레이저 빔을 편향시킴으로써 신뢰성이 높고 외부 충격에 강건한 시스템을 개발하고 있다. AOD 및 그 구동부가 저가 시스템을 만드는 데에는 장애요소가 되지만, Rockwell에서는 이를 군사용 등 특수 목적에 사용하는 시스템

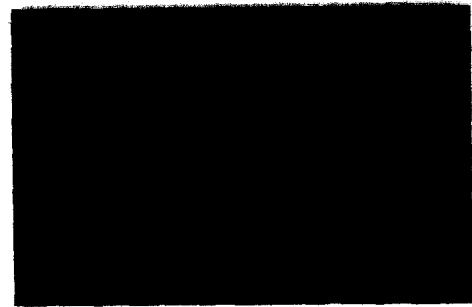
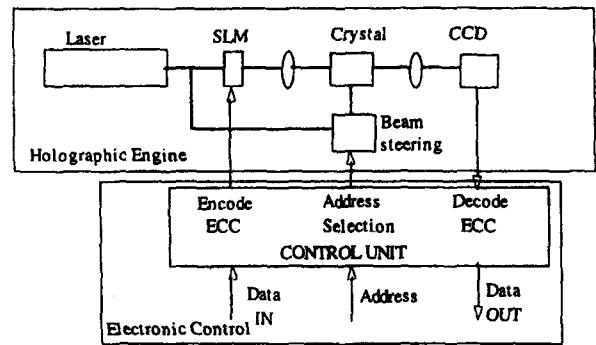


그림 8. 에러 수정 코드(ECC; error corection code) 기법을 사용한 홀로그래프 메모리 시스템^[22]. 아래의 그림은 저장 후 재생된 1.2 MB 정보의 영상. 이는 디지털화되어 저장되었고 재생 후는 다시 아날로그 영상으로 변환되었음.

으로 만들려고 노력하고 있다.

최근, 미국의 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)에서는 NSIC(National Storage Industry Consortium)을 통해 3천 2백만불 규모의 홀로그래프 정보저장 시스템(HDDS; Holographic Data Storage System) 및 광굴절 정보저장 매질(PRISM; Photorefractive Information Storage Materials) 개발 산·학 콘서시엄이 구성되어 1 Tb 저장용량과 1 Gb/s의 처리속도를 가진 광저장장치의 개발에 나섰다. IBM에서는 이러한 연구의 일환으로 1996년에 DEMON(Digital Holographic De-

표 1. DEMON 시스템의 특성^[12]

SYSTEM CONFIGURATION	
Storage medium:	$\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$
Storage volume:	0.65 cm^3
Page size:	320×240 pixels
Modulation code rate:	66%
STORAGE DEMONSTRATION	
Total data stored:	5.75 Mbyte of MPEG video
Number of pages stored:	450
Raw bit-error rate:	0 errors in 4.5×10^7 bits
Average diffraction efficiency:	$\sim 10^{-7}$
CURRENT PERFORMANCE	
Input data rate:	10 pages/s=500 kb/s
Output data rate to CCD buffer:	60 pages/s=3 Mb/s
Decoded to computer memory:	8.5 pages/s=450 kb/s
Capacity(at 3 Mbit/s BER $\sim 10^{-8}$):	1200 pages/s=55 Mbits
Volumetric density:	$8.5 \times 10^7 \text{ bits}/\text{cm}^3$

monstrator)이라는 홀로그래프 메모리 시스템을 만들었다. 표 1은 이의 특성을 보여준다^[12].

4. 국내의 연구

국내에서는 그동안 ETRI^[25,32], 강원대^[26], 경희대^[27], 광운대^[28,34], 부경대^[29], 부산대^[30], 서울대^[31,32], 성균관대^[33], 순천대^[25,34], 아주대, 영남대^[33], 충북대^[25,34] 등에서 소규모의 연구비로 연구가 수행되어 왔기 때문에 시스템의 개발보다는 주로 기초적인 물성특성 및 기본적인 응용실험이 대부분이었다. 최근에 이르러 3개의 대기업에서 홀로그래프 메모리의 가능성에 주목하고 연구팀을 구성하고 연구비를 투자하기 시작하였다.

본 장에서는 저자 중의 1인의 연구^[31,32]에 대해서 간략히 설명하고자 한다. 홀로그래프의 저장밀도를 높이기 위한 다중화 방법에는 앞에서 지적한 각도다중화와 공간다중화 외에도 파장다중화^[35], 위상코드다중화^[36] 등이 있다. 이중 위상코드다중화는 서로 직교하는(orthogonal) 코드로 구동된 SLM을 통과한 빛을 기준빔으로 사용하는 것이다. 그런데, 다중모드 광섬유에서 나오는 복잡한 광도(intensity) 분포의 스페클(speckle) 패턴을 기준빔으로 사용하면 위상코드다중화와 유사한 효과를 쉽게 얻을 수 있다. 그림 9와 같이 다중모드 광섬유에 PZT (piezoelectric transducer)를 사용하여 변형을 가하면 광섬유 끝에서 나오는 스페클 패턴이 변화하며 이를 이용해 기준빔의 각도나 위치를 변화시키지 않고 같은 위치에 서로 다른 홀로그래프를 저장할 수 있다. 이 방법은 만들 수 있는 유사(quasi) 직교패턴에 제약을 받지만, 이렇게 광섬유의 스페클 패턴을 이용하는 방법의 큰 장점은 간단한 시스템으로 홀로그래프의 선택도(selectivity)를 높일 수 있다는 것이며 여러 가지의 다중화 방법을 결합하여 사용할 수 있다는 것이다. 하나의 스페클 패턴으로 첫 번째 홀로그래프를 저장하고, 광섬유를 옆으로 이동시켜 같은 스페클 패턴으로 두 번째 홀로그래프를 저장할 때, 기준빔의 스페클 패턴들이 공간적으로 서로 중첩이 되어도 매우 작은

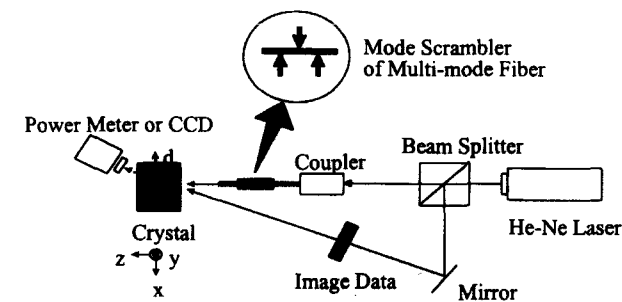


그림 9. 다중모드 광섬유의 스페클 패턴을 이용한 홀로그래프 메모리 시스템.

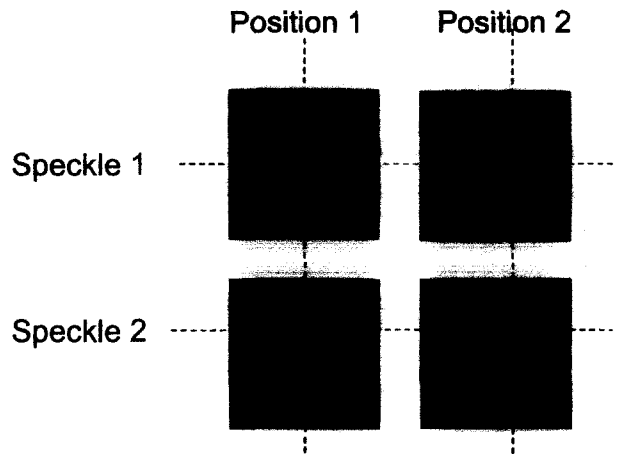


그림 10. 광섬유 스페클 패턴을 이용하여 공간 및 스페클 다중화 기법으로 저장된 영상의 재생 이미지, 공간다중화 간격은 10 μm 임.

상관관계(correlation) 때문에 그 움직이는 거리를 반으로 줄일 수가 있다^[31]. 따라서, 홀로그래프의 저장밀도를 증가시킬 수 있다. 그림 10은 이러한 방법으로 저장한 4개의 영상을 각각 재생하였을 때의 이미지(image)를 보여준다. 문자 A와 C, 그리고 B와 D는 각각 고정된 광섬유의 위치에 대해 그 스페클 패턴을 바꾸어 저장 및 재생된 것이고, A(C)와 B(D)는 서로 광섬유의 위치를 10 μm 이동시켜 저장하고 재생한 것이다. 공간적으로는 저장된 홀로그래프들이 전부 또는 부분적으로 중첩되

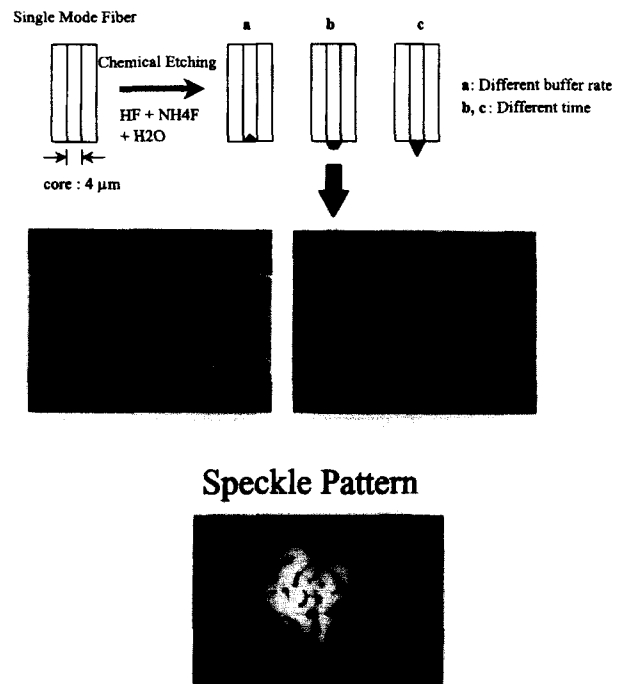


그림 11. 위로부터, 단일모드 광섬유의 테이퍼 식각과정, 식각된 광섬유 끝단의 SEM 사진, 이로부터 나오는 스페클 패턴.

어 있으나, 각각의 영상이 구별되어 재생된다. 이러한 스페클 패턴은 그림 11과 같이 단일모드 광섬유를 테이퍼(taper) 식각(etch)하여서도 만들 수 있다^[32]. 이러한 광섬유에서 나오는 기준빔도 그림 11에서와 같이 스페클 패턴을 띠며, 이를 이용하여서도, 홀로그래프의 위치선택도와 각도선택도를 2배씩 개선할 수 있다.

5. 결론 및 전망

이상에서 홀로그래프 메모리의 원리, 역사 및 연구동향을 간략히 살펴보았다. 현재 홀로그래프 메모리 시스템 개발의 가장 큰 제한요소는 저장매체이다^[5,12,37]. 보다 높은 회절효율과 작은 산란(scattering) 특성을 갖는 저장매체가 개발되어야 하며, 이에 대한 많은 연구가 수행중이다. 홀로그래프 메모리는 자기디스크, 테이프, CD 등 현재의 잘 확립된 정보저장 기술을 단일 내에 대체하리라고 기대하기는 어렵다. 하지만, 대용량 화상 데이터 베이스로부터 고해상도 화상을 재생하거나 디지털 VOD 서버 등 홀로그래프 저장장치가 가지는 중요한 장점을 이용할 수 있는 새로운 응용분야를 찾는 방향으로 발전해 갈 것으로 기대된다^[12]. 또한, 항공, 군사, 의료, 관공서, 도서관 등의 데이터 베이스(data base)와 3차원 입체 동화상 정보통신, 뉴럴 컴퓨팅(neural computing), 고급 워크스테이션(workstation) 서버 등 초대용량 정보저장능력과 초고속 데이터 전달률이 요구되는 분야에 이용되게 될 것이다.

참고문헌

- 전동수, "메모리 응용 동향과 주요과제," *전자공학회지*, 24권 6호, pp 57-74, 1997년 6월.
- 송태선, 김진용, "DVD 기술," *광학과 기술*, 1권 2호, pp. 32-42, 1997년 7월.
- O. Marti and R. Moller (ed.), *Photons and Local Probes*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1995.
- K. H. Kim, S.-K. Eah, B. Lee, C. H. Cho, and W. Jhe, "A novel digital feedback scheme of shear-force control in near-field scanning optical microscopy," *Review of Scientific Instruments*, **68**, No. 7, pp. 2783-2786, 1997.
- D. Psaltis, D. G. Stinson, G. S. Kino, and T. D. Milster, "Optical data storage: Three perspectives," *Optics and Photonics News*, **8**, No. 11, pp. 34-39, Nov. 1997.
- 김은수, "차세대 홀로그래픽 3차원 광메모리 시스템," *전자공학회지*, 24권 6호, pp. 75-87, 1997
- A. Yariv, *Optical Electronics*, 4th ed., Saunders College Publishing, Philadelphia, USA, 1991, Ch. 18.
- R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, Academic Press, San Diego, USA, 1992, Ch. 10.
- P. Yeh and C. Gu (ed.), *Landmark Papers on Photorefractive Nonlinear Optics*, World Scientific, Singapore, 1995.
- F. M. Davidson (ed.), *Selected papers on Photorefractive Materials*, SPIE Milestone Series, Vol. MS 86, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, USA, 1994.
- M. P. Petrov, S. I. Stepanov, and A. V. Khomenko, *Photorefractive Crystals in Coherent Optical Systems*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1991.
- D. D. Nolte, *Photorefractive Effects and Materials*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 1995.
- IBM Holographic Optical Storage Team, "Holographic storage promises high data density," *Laser Focus World*, pp. 81-93, Nov. 1996.
- S. Tao, D. R. Selviah, and J. E. Midwinter, "Spatioangular multiplexed storage of 750 holograms in an Fe:LiNbO₃ crystal," *Optics Letters*, **18**, pp. 912-914, 1993.
- P. J. van Heerden, "Theory of optical information storage in solids," *Applied Optics*, **2**, No. 4, pp. 393-400, 1963.
- A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, J. J. Levinstein, and K. Nassau, "Optically-induced refractive index inhomogeneities in LiNbO₃ and LiTaO₃," *Applied Physics Letters*, **9**, No. 1, pp. 72-74, 1966.
- N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin, and V. L. Vinetskii, "Holographic storage in electrooptic crystals. I. Steady state," *Ferroelectrics*, **22**, pp. 949-960, 1979.
- N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin, and V. L. Vinetskii, "Holographic storage in electrooptic crystals. II. Beam coupling-light amplification," *Ferroelectrics*, **22**, pp. 961-964, 1979.
- D. L. Staebler, W. J. Burke, W. Phillips, and J. J. Amodעי, "Multiple storage and erasure of fixed holograms in Fe-doped LiNbO₃," *Applied Physics Letters*, **26**, No. 4, pp. 182-184, 1975.
- F. H. Mok, M. C. Tackitt, and H. M. Stoll, "Storage of 500 high-resolution holograms in a LiNbO₃ crystal," *Optics Letters*, **16**, No. 8, pp. 605-607, 1991.
- <http://www.holoplex.com>
- L. Hesselink et al., *SPIE Proceedings*, **2778**, pp. 410, 1996.
- <http://www.optitek.com>
- I. McMichael, W. Christian, and J. Hong, "Compact volume holographic memory system with rapid acoustooptic addressing," *Proc. of 1994 IEEE Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals, and Applications*, Hawaii, July 1994, pp. 424-426.
- 김정희, 안준원, 김 남, 이권연, 안주현, "광정보저장을 위한 Fe-LiNbO₃ 결정의 결합특성분석," *Photonics Conference '97*, 1997년 11월, pp. 195-196.
- 이승우, 김준태, 차성도, 신승호, "광굴절 MgO:LiNbO₃ 결정에서 이광파 혼합조건에 따른 이득특성," *제2회 광정보처리 학술발표회 논문집*, 1997년 6월, pp. 76-80.
- 최안식, 정종래, 이재진, 최중호, 김민지, 백운식, 안준원, 김정희, 김남, "각 다중화된 디지털 홀로그래픽 데이터 저장시스

- 템," *Photonics Conference '97*, 1997년 11월, pp. 185-186.
28. 김달규, 최규식, 문홍섭, 김은수, "직교 위상코드 다중화 기법을 이용한 홀로그래피 데이터 저장 시스템," *제14회 광파 및 양자전자 학술 발표회 논문집*, 1997년 8월, pp. 39.
 29. 박연섭, 오용석, 박현실, 김민수, 신동학, 장주석, "광 폴리머 필름을 이용한 디지털 홀로그래피 메모리 시스템의 구현," *Photonics Conference '97*, 1997년 11월, pp. 189-190.
 30. 설문용, 윤태훈, 김재창, "노출계획에 의한 다중 홀로그램의 기록 및 재생," *Photonics Conference '97*, 1997년 11월, pp. 193-194.
 31. Yong Hoon Kang, Ki Hyun Kim, and ByoungHo Lee, "Volume hologram scheme using optical fiber for spatial multiplexing," *Optics Letters*, **22**, No. 10, pp. 739-741, 1997.
 32. Ki Hyun Kim, Yong Hoon Kang, and ByoungHo Lee, "Recording of volume hologram using a beam pattern from papered optical fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, Dec. 1997.
 33. Yeon H. Lee, Chong-Hoon Kwak, and El-Hang Lee, "Measurement of the c axis of a BaTiO_3 crystal by anisotropic Bragg diffraction," *Journal of the Optical Society of America B*, **13**, No. 12, pp. 2762-2766, 1996.
 34. 안준원, 김정희, 김남, 이권연, 김은수, "Fe-LiNbO₃ 결정의 광파결합특성을 이용한 광정보저장," *대한전자공학회 1997년도 추계종합학술대회 논문집*, 1997년 11월, pp. 953-958.
 35. G. A. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, "Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volum holograms," *Optics Letters*, **17**, No. 20, pp. 1471-1473, 1992.
 36. C. Denz, T. Rauch, K.-O. Muller, T. Heimann, J. Trumpfheller, and T. Tschudi, "Realization of a high-capacity holographic memory for analog and digital data storage based on phase-encoded multiplexing," *Proc. 1997 Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices*, Chiba, Japan, June 1997, pp. 232-233.
 37. J. Hong, private communication.