

홀로그래픽 데이터 저장장치

Holographic Data Storage System; HDSS

□ 김 수 길 / 호서대학교 전기정보통신공학부

I. 서 론

최근 급속히 발전하고 있는 정보통신 산업은 과거 독립적으로 발전해오던 가전기기, 컴퓨터, 통신, 방송, 영상, 오락등 여러 산업들이 서로 융합된 고도의 기술 지식 집약적 멀티미디어 산업으로 변모해 가고 있다. 21세기 고도 정보화 사회에서의 새로운 멀티미디어 정보환경을 위해서는 정보저장매체의 초고속화, 초소형화 및 초대용량화에 대한 요구가 더욱 절실해질 것으로 전망된다.

한 예로, 멀티미디어 정보통신의 총아라고 할 수 있는 주문형 비디오(VOD : video-on-demand)의 상용화를 위해서는 비디오 서버의 용량이 10³TB이상, 데이터 전달속도는 1Gbit/sec 이상이 요구된다. 그러나, 기존의 반도체 메모리 기술, MOD(magneto-optic disc) 및 CD

(compact disc) 메모리 기술 등은 이러한 21세기 고도 정보화 사회에서 예견되는 막대한 양의 정보를 저장하고 처리하는 데 있어서 기술적·경제적 한계가 있음에 따라 새로운 차원의 차세대 초대형 정보저장 매체 및 원천기술의 개발에 대한 필요성이 절실히 요구되고 있다.

반도체 메모리기술은 현재 1Gbit DRAM기술까지 확보된 상태이나, 궁극적으로 리소그라피(lithography)기술의 한계로 인해 제한을 받고 있다.[1]

한편, 현재 정보저장 미디어 분야에 빠른 속도로 확산되어 다양한 시장과 그 응용을 확대하고 있는 기존 CD 광메모리 시스템의 경우, 음악 뿐만 아니라 텍스트, 영상, 음향이 조립된 멀티미디어 제품의 기본이 되었으며, 비디오 게임, 전자장치, 백과사전, 지도등 CD로 생산된 멀티미디어 제품은 PC 사용자들에게 일반화되어 있다. 한

장의 CD는 640Mbyte(1시간 45분가량의 음악이나 더블 스페이스된 문자 30만 페이지 이상)의 용량을 갖지만 방대한 데이터의 저장을 필요로 하는 병원 업무, 법률회사, 정부기관, 도서관 등에서는 수백 장의 디스크를 쌓아놓고 로보트 팔을 이용하여 액세스하는 주크박스를 이용하고 있다. 이와같이 같은 크기의 CD에 보다 많은 용량의 데이터를 저장해야할 필요성이 대두됨에 따라 최근 엔지니어들은 CD의 용량을 높이는 방법으로 좀더 짧은 파장을 갖는 반도체 레이저의 개발, 데이터 압축 방법 연구, Multiple-level CD 및 DVD (digital versatile disk) 개발 등의 연구에 몰두하고 있으며 향후 5년 정도 이내에 저장용량을 50 GB로 늘릴 수 있을 것으로 기대하고 있다. 그러나, CD는 기본적으로 데이터 저장용 홈을 가시광선 파장이하로 쪼갤 수 없어 저장용량의 한계를 가질 수밖에 없는 매체이며, 더욱이 기계적인 랜덤 액세스 방식의 채용으로 데이터 처리 속도의 한계를 가질 수밖에 없다. 이외에 마이크로 머시닝(micromachining) 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 수 밖에 없다는 점을 고려할 때 새로운 차원의 초고속, 초대용량 저장매체에 대한 관심은 갈수록 커지고 있다.

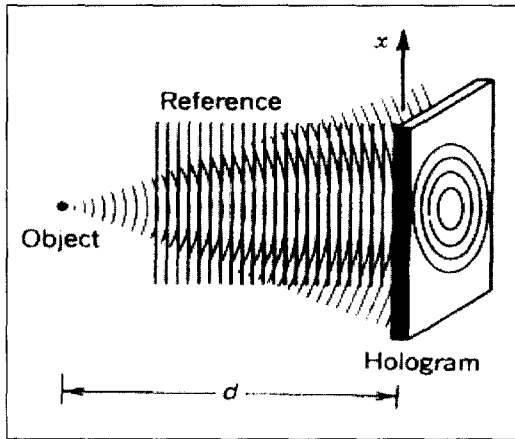
이러한 문제의 해결책으로 최근 선진국을 중심으로 활발히 연구되고 있는 기술이 홀로그래피를 이용한 광메모리이며, 저장매체로는 주로 광굴절 결정(photorefractive crystal)과 광폴리머(photopolymer)가 사용되며, 2차원의 정보를 3차

원의 체적홀로그래피로 저장하는 방식이다. 이러한 저장방법은 적절한 다중화(multiplexing) 기법에 의하여 공간적으로 겹쳐져서 저장된 정보라도 서로 분리하여 읽어낼 수 있으며, 2차원 영상이 한꺼번에 재생되는 페이지(page)단위의 읽기를 구현하기 때문에 초대용량의 병렬 액세스 초고속 메모리시스템의 구현을 가능하게 한다.[2] 홀로그래피 메모리는 저장용량이 크면서도 데이터 전달률이 빠른 메모리 기술이 될 수 있을 것으로 예측되어 전 세계적으로 연구가 활발히 이루어지고 있다.[3]

II. Holography란 무엇인가?

데니스 게이버(Denis Gabor)가 전자현미경상을 개선하는 방법으로, 전자 현미경에 이용되고 있는 전자렌즈를 사용하지 않고, 전자선의 파면을 기록하고, 그 다음 전자선보다도 파장이 긴 빛으로 상을 확대하여 재생하는 방법을 생각하였으며, 그 당시에는 간섭성이 좋은 코히어런트한 전자선을 얻을 수 없었으므로 수은등을 이용하여 기록과 재생실험을 하였던 데, 이것이 홀로그래피의 시초라고 할 수 있다. 수은등의 빛은 파장폭이 좁기는 하지만 코히어런트한 빛이라고 하기에는 부족하기 때문에 기록가능한 피사체에는 한계가 있었다.[4]

레이저가 발명되어 코히어런트한 빛을 사용할 수 있게 되자 홀로그래피의 연구는 급속히 진전되었으며, 여러분야에 응용이 되기 시작하였다. 홀로그래피의 연구가 진전되면서 여러 형식의 기록 재생방법이 개발되어 많은 분야에서 이용하게 되었다. 또 최근에는 간단한 영상의 기록과 디스



〈그림 1〉 한 점광원에 의한 홀로그램

플레이뿐만 아니라 파면간섭에 따른 측정이라든지, 새로운 광학소자로서 이용되고 있다.

〈그림 1〉과 같이 한 점에서 퍼지는 구면파와 기준파와의 간섭을 생각 생각하여보자. 이 때, 구면파를 가로지르는 평면위에서는 중심으로부터 멀어질수록 간격이 조밀해지는 동심원들이 모인 간섭무늬가 만들어진다. 이 곳에 감광재료를 놓으면, 두 파의 위상차에 따라 동심원들의 반경이 변화하는 프레넬 윤대판(Fresnel zone plate)과 같은 형태의 간섭무늬가 기록된다. 피사체의 다른 점으로부터 나오는 구면파도 비슷한 윤대판을 만드는데, 이 점들의 위치가 서로 달라 윤대판의 중심도 서로 다르게 되고, 이 점들과 감광재료면까지의 거리가 다르면, 동심원들의 반경들이 변화하는 형태에도 차이가 생긴다.(중심에서 멀어질수록 간격이 가늘어진다.) 일반적으로, 피사체로부터 나오는 빛의 파면을 다수의 구면파가 모인것이라고 생각하면, 이것과 평면기준파(또는 구면 기준파)와의 간섭무늬를 기록한 것은 결국 수 많은 윤대판의 중첩이라고 생각할

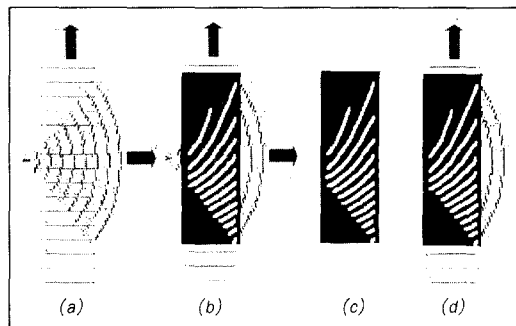
수 있다.

이와 같이 간섭무늬를 기록한 것을 홀로그램, 이 기술을 홀로그래피라 하는데, 이것은 파면의 모든 정보를 기록하고 있다는 의미에서, 그리스어로 전부라는 뜻의 홀로라는 단어를 써서 명명한 것이다. 홀로그램에는 피사체의 위치, 기준광의 상태 등에 따라 프레넬 홀로그램, 프라운 호퍼 홀로그램, 푸리에 변환 홀로그램, 영상 홀로그램, 무지개 홀로그램, 컴퓨터 홀로그램 등으로 분류된다.

III. Holography를 이용한 HDSS

광기록 방법의 목표는 대상물체로부터의 물체광을 기록하고 후에 이것을 재현하도록 하는 데 있다. 사진기록에 있어서 이 과정은 물체의 상을 대상물체의 빛의 강도만으로 기록하는 필름으로 대치함으로써 이루어진다. 이후 현상된 필름에 빛을 조사함으로써 기록된 광강도 모양 즉, 대상물체의 상이 재현된다.

반면에 홀로그래픽 기록의 경우는 대상물체로부터 반사된 물체광의 강도뿐만 아니라 방향도



〈그림 2〉 체적홀로그램의 기록과 재생원리

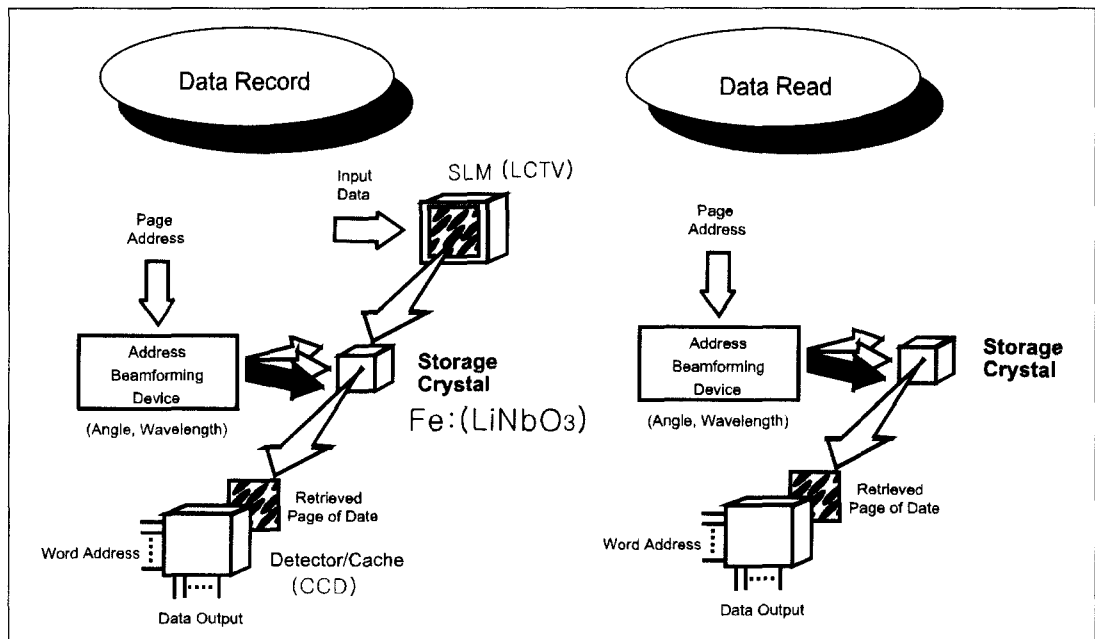
기록한다. <그림 2(a)>에 나타난 것처럼 대상물체의 빛의 강도와 방향은 물체광과 기준광의 간섭에 의해서 구성되며, <그림 2(b)>에서 보듯이 물체광과 기준광은 간섭무늬를 만든다. 이렇게 형성된 간섭무늬는 <그림 2(c)>에서 보듯이 간섭무늬의 강도에 반응하는 물질속에 기록된다. 마지막으로 <그림 2(d)>에서 보듯이 기록된 간섭무늬에 기준광을 조사함으로써 대상물체의 3차원상인 홀로그램을 재현하게 된다.

이러한 체적 홀로그램의 본연의 성질을 이용하면, 각각 다른 기준광을 가지고 저장 물질의 같은 장소에 많은 홀로그램을 기록함으로써 작은 입방체 내부에 방대한 데이터를 저장하는 것이 가능하며, 이러한 원리를 이용하여 대용량의 정보를 저장하고자 하는 것이 홀로그래픽 데이터 저장장치(HDSS)이다. 다중화 방법(multiplexing)을

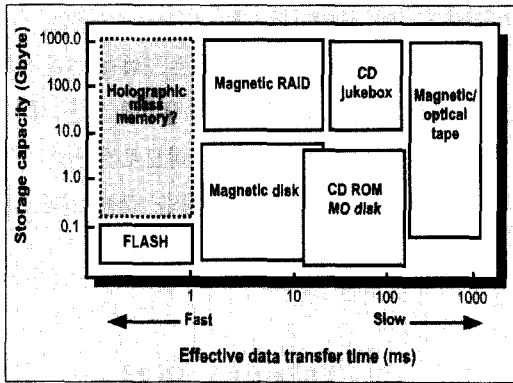
이용하면 2진 데이터의 페이지(Page)단위로 구성되는 수백에서 수천 개의 홀로그램을 같은 장소에 저장할 수 있다. 즉, 동일 장소에 많은 데이터를 페이지 단위로 기록 재생하므로써 높은 저장 밀도 및 빠른 데이터 전달율을 갖는 기록 및 재생이 가능하게 된다.

IV. HDSS의 특징

일반적으로 HDSS는 <그림 3>과 같이 광굴절 매질에 정보를 저장한 다음에 기준빔만을 이용하여 정보를 재생하는 구조를 가지고 있다. HDSS는 데이터를 페이지단위로 기록 및 재생하므로 페이지 형태의 병렬 액세스가 가능하므로 높은 데이터 전달률(Gbits/s)과 짧은 액세스 타임



<그림 3> 기록 및 재생을 위한 HDSS의 구성도



〈그림 4〉 저장용량과 데이터 전송속도에 따른 광저장장치 기술

(Access Time: 100 μ s 이하)의 실현이 가능하며 (〈그림 4〉 참조), 데이터가 기존의 광학 및 자기 기록 방법과 같이 얇은 필름이나 디스크의 면상에 저장되지 않고 저장 매체의 체적 속에 중첩되어 분포하게 되므로 매우 높은 데이터 밀도 (100 Gbit/cm³)를 구현하는 것이 가능하다.

또한, 기존의 테잎이나 디스크의 경우 저장 매체 상에 결함이 발생할 경우 중요한 데이터의 복구할 수 없는 손실이 발생하나, 홀로그래픽 저장 매체에 결함이 발생하는 경우에는 데이터가 완전히 손실되지 않고 홀로그램을 조금 어렵게 하므로 원 데이터의 복구가 가능하다. 즉, 높은 신뢰도 (Reliability)의 구현이 가능하다.

마지막으로, Holographic 기록과 재생은 홀로그램에 맺히는 기준광의 정확한 위치에 덜 민감하다. 즉, 홀로그램을 저장하는 저장 매체의 위치가 어떤 이유로 변경되어도 기록 시와 동일한 회절 거울의 각도만 유지된다면 홀로그램에 맺히는 기준광의 초점의 위치에는 크게 영향을 받지 않는다. 즉, HDSS는 광 디스크 등의 광 메모리 시스템에 비하여 진동 문제에 대하여 강인하다는 것을 의미한다.

V. 다중화 기록

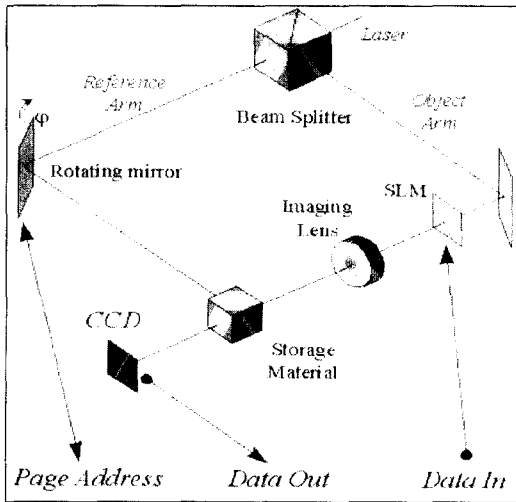
HDSS를 구현하고 높은 데이터 저장 밀도를 얻기 위한 방법이 다중화 기술인데, 지금까지 연구된 방법은 크게 어드레스의 각도가 저장된 영상의 입력주소가 되는 각다중화, 가변되는 파장의 광원을 이용하는 파장 다중화, 서로 직교하는 위상을 이용하는 위상코드 다중화와 이러한 다중화를 결합시킨 혼합다중화 방법 등이 연구되고 있다. 이에 대한 간단한 원리와 특징을 살펴보면 다음과 같다.[35]

1. 각 다중화(Angular Multiplexing)

일반적으로 임의의 입력패턴 데이터와 특정각도로 입사되는 기준 평면파들간의 간섭으로 저장된 체적 홀로그램을 재현할 때, 특정 저장된 패턴 데이터는 Bragg조건에 의해 기록할 때 사용한 기준파와 동일한 각도로 입사하는 평면파에 대해서만 판독이 가능하다. 이러한 각 선택도는 기록 매질의 두께에 따라 달라지게 되는데 결정이 두꺼울수록 기준빔의 입사각의 범위를 더욱 정확하게 조사하여야 한다. 예로써, 1 mm 두께의 결정의 경우 기준빔의 입사각이 0.01° 이상 벗어나게 되면 재생상이 완전히 없어지게 되고 10 mm 두께의 결정에서는 0.001° 이상 벗어나게 되면 없어지게 된다. 기록시 데이터의 첫 페이지를 Crystal에 기록한 후, 기준빔의 각도를 첫 번째 홀로그램의 재생상이 완전히 사라질 때까지 증가시키고 이때, 다시 새로운 데이터를 입력시켜 Crystal에 기록하게 된다. 이러한 과정을 각다중화(Angular Multiplexing)라고 하며 이 과정의 반복을 통하여 데이터를 Crystal 내부에 중첩 기록하게 되는

것이다.

이러한 각 선택도는 하나의 기록 매질에 보다 많은 홀로그래픽 데이터를 다중화하여 기록하는 각 다중화(Angular Multiplexing)기법을 가능케 하는 것이다. <그림 5>는 각다중화에 의한 기록방법을 보여주고 있다. 그림에서 Beam Splitter에 입사한 레이저는 기준빔과 물체빔으로 나누어지고 물체광은 입력된 데이터에 따라서 픽셀들이 이루는 명암의 2진 데이터의 한 페이지 단위로 공간 광변조기(SLM: Spatial Light Modulator)에 의해서 변조되고, 이때 각각의 페이지는 회전 거울(Rotating Mirror)의 각도를 조금씩 달리하는 기준빔에 대응하여 작성된다. 이후 물체빔과 기준빔은 홀로그래픽을 기록하기 위한 저장 매체 내부에서 간섭을 일으키고 이 때 발생하는 간섭 무늬의 강도에 따라서 저장 매체 내부의 운동전하(Mobile Charge)의 광유도 현상이 발생하고 이러한 과정을 통하여 간섭무늬가 기록된다. 저장 매체에 기록된 데이터를 읽어 내기 위해서는 기



<그림 5> 각 다중화 기록 시스템

준빔만을 저장 매체에 조사하면 간섭무늬는 기준빔을 회전 시켜 원래의 픽셀의 명암으로 구성되는 바둑판 무늬로 복원되고 이후 읽어진 상을 CCD(Charge Couple Device) 위에 비추어 원래의 데이터로 복원하게 된다.

이때 각각의 기준빔은 기록시와 동일하도록 회전거울에 의해서 각도가 조절되어야 한다. 이와 같이 재생시 기준빔은 기록시 사용된 기준빔과 반드시 정확히 일치하도록 해야 하므로 회전거울을 구동시키는 기구의 각도 분해능에는 엄격한 정밀도가 요구된다. 체적 홀로그래픽에서 각 선택도는 근사적으로 격자의 회절 효율 값이 최대값에서 떨어지기 시작하여 0이 되는 지점사이의 각도의 폭으로 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\Delta\theta_k = \frac{\lambda \cos\theta_0}{nL_s \sin(\theta_r + \theta_0)} \quad (1)$$

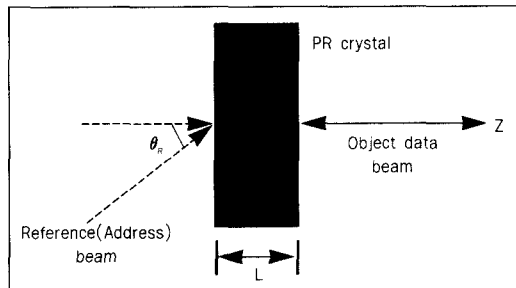
윗식에서 θ_0, θ_r 은 물체빔과 기준빔의 입사각을 n, L_s 는 매질의 굴절률, 두께를 각각 나타낸다. 윗식의 각 선택도는 물체빔의 입사각이 작은 경우 비교적 정확하며 수식에서 각 선택도는 물체빔과 기준빔의 사잇각이 90도가 될 때 가장 우수하게 나타나고 이 각도를 정점으로 각 선택도는 대칭적으로 떨어지기 시작함을 알 수 있다. 동일 기록 매질내에 다수의 홀로그래픽 데이터를 저장하기 위하여 식 (1)로 주어지는 각 증가분만큼 간격을 둔 기준빔들을 이용하여 동일평면에서 각 다중화시켜 기록할 수 있으며 복원 시에도 cross talk가 없는 재현 영상을 얻을 수 있다. 즉, θ_1 에서 θ_2 까지의 기준빔의 각도 범위 내에서 각 다중화될 수 있는 홀로그래픽의 개수는 근사적으로 식 (2)와 같이 주어진다.

$$M \approx 1 + \frac{nL_z}{\lambda} |\cos\theta_1 - \cos\theta_2| \quad (2)$$

윗 식에서 $L_z = 1 \text{ cm}$, $n = 2.2$, $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$, $\theta_1 = 92^\circ$, 그리고 $\theta_2 = 88^\circ$ 의 경우 다중화 개수는 $M \approx 3,701$ 정도가 됨을 알 수 있다.

2. 파장 다중화(Wavelength Multiplexing)

파장 다중화 방식에서는 기준빔과 물체빔의 각은 일정하게 유지되지만 레이저의 파장은 노출시마다 변화되면서 홀로그래프 데이터를 기록하게 된다. 기록된 홀로그래프 데이터는 특정 어드레스 파장과 같은 파장의 기준빔을 사용해서 개별적으로 액세스 될 수 있다. <그림 6>은 매질의 표면에 수직으로 들어가는 물체빔과 물체빔과 반대방향으로 진행하며 입사각인 θ_R 인 기준빔간의 간섭에 의해 기록되는 홀로그래프의 기하학적 구조를 나타낸 것이다.



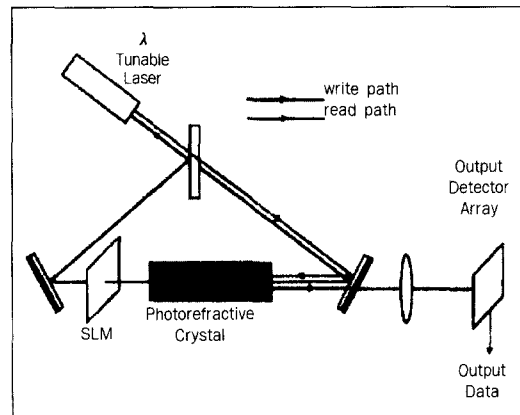
<그림 6> 파장 다중화 홀로그래프의 기하학적 구조

여기서, 특정 홀로그래프를 레이저 주파수가 ν (즉, $\frac{c}{\lambda}$ 인 기준파로 기록한 뒤 같은 각도에서 $\nu - \Delta\nu$ 의 기준빔으로 홀로그래프를 읽어냈을 때 허용 가능한 레이저주파수 간격은 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\Delta\nu \approx \frac{c/n}{L_z(1 + \cos\theta_R)} \quad (3)$$

따라서, 식 (3)으로부터 주어진 파장에서 선택되는 기준빔이 물체빔에 대하여 반대방향으로 진행하고 있을 때($\theta_R = 0$) 가장 우수함을 알 수 있는데, 이는 그러한 기하학적인 구조가 가장 높은 공간 주파수 격자를 만들어내기 때문이다.

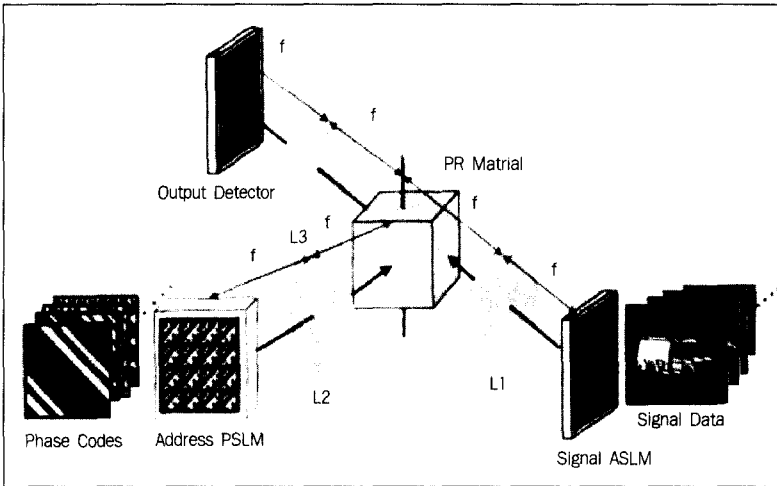
한 예로 주어진 레이저의 파장이 9,146 GHz의 주파수 대역폭에 해당하는 800에서 820 nm 까지 가변될 수 있고, $L_z = 1 \text{ cm}$ 이고 $n = 2.2$ 라면, 허용 가능한 주파수 간격은 $\Delta\nu = 2.95 \text{ GHz}$ 가 된다. 따라서 최대 3,100개의 홀로그래프를 하나의 광굴절 매질내에 파장 다중화하여 기록할 수 있음을 알 수 있으며, <그림 7>은 파장 다중화 기록 방법을 구현하는 단순한 구조의 한 예를 나타낸 것이다.



<그림 7> 파장다중화 기록 시스템

3. 위상코드 다중화(Phase Code Multiplexing)

위상코드 다중화기법은 입력 데이터를 서로



〈그림 8〉 위상코드 다중화 방법

가될 수 있는데 이는 홀로그램 평면에서 평면파 성분들이 균일하지 않기 때문이다. 그런데, 이것은 각 화소의 크기를 줄여서 보다 균일한 평면파 성분들을 만들 수 있는 lenslet 어레이와 같은 미소광학계로 보완될 수 있으며, 〈그림 8〉은 위상코드

직교 특성을 갖는 랜덤 위상코드의 기준파와 간섭을 통해 기록하고 재현시 특징 물체 패턴을 그와 대응하는 위상코드 패턴을 기준빔으로 하여 홀로그램을 조사함으로써 판독해 낼 수 있다. 위상코드 다중화 기록 시스템은 각 다중화 기록방식에서 주사장치가 위상형 SLM으로 대체 되고 telecentric optics가 퓨리에 렌즈를 대체하는 것을 제외하면 동일하다. 기준파의 SLM에는 Walsh-Hadamard 코드와 같은 직교코드군으로부터 하나의 위상코드가 입력된다. 각 위상코드 기준파는 많은 수의 평면파에서 생기는 효과가 서로 균일한 출력을 만들어내게 된다. 위상코드 다중화 기법에서의 문제점은 위상코드 소자인 기준빔의 위상형 SLM에 의해 나타난다.

실제로 위상형 SLM은 화소간 위상의 불균일성과 각 화서의 위상변조 특성의 정확한 조정이 어렵게 때문에 위상코드의 직교특성이 약화되고 cross talk가 증가된다. 더욱이 유한한 크기의 화소크기에 의해 cross talk가 증

다중화 방법을 보여주는 예를 나타낸 것이다.

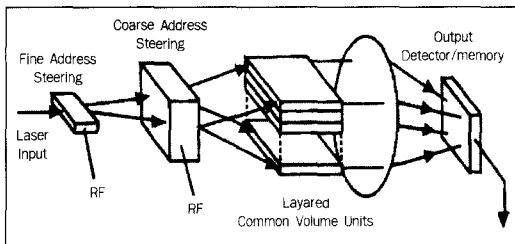
4. 공간 다중화(Spatial Multiplexing)

일반적으로 광굴절 매질에 저장되는 총 홀로그램 개수(M)와 홀로그램 회절 효율(η)사이에는 식 (4)와 같은 관계식이 주어진다.

$$\eta = \frac{\eta_{\max}}{M^2} \left(\frac{\tau_c}{\tau_w} \right)^2 \quad (4)$$

윗식에서 η_{\max} , τ_c , τ_w 는 최대 회절 효율, 기록 및 지움 시정수에 해당한다. 식 (4)의 결과는 기록된 모든 홀로그램 데이터가 똑같은 회절 효율을 갖도록 설계할 경우 주어지는 식으로 $\eta_{\max} = 1$, $\tau_c = \tau_w$ 이고 10,000개의 홀로그램을 저장했을 때 결과적인 회절 효율은 약 10⁻⁸ 정도로 주어지며 그 이하로 내려가게 되면 잡음등에 의해 상용 CCD로는 신호 검출이 불가능하게 된다. 따라서, 각 홀로그램이 1 Mbit의 데이터를 포함하고 있다

고 하면 각각의 체적 홀로그래프 유니트에서의 저장용량은 10 Gbit로 제한될 수밖에 없다. 결과적으로 보다 많은 홀로그래프 데이터를 저장하기 위한 방법으로 그러한 여러 개의 체적 홀로그래프 유니트를 공간적(spatially)으로 다중화함으로써 증가시킬 수 있다. <그림 9>는 그러한 체적 기록 유니트의 어레이로 적층된 형태를 나타낸 것이다. 여기서, "coarse" 어드레스는 기록 및 판독빔을 적당한 층으로 편향시키고(공간 다중화) "fine" 어드레스는 선택된 층의 체적 유니트내에서 특정 홀로그래프 페이지로 편향시키게 된다(각 다중화). 현재, AOD를 사용한 각 다중화 기법에서 1,000개의 위치에 20 μ s의 고속 랜덤 액세스가 가능하다.



<그림 9> 공간 다중화 기록 시스템

VI. 광굴절 매질[6][7]

가장 매력적인 기록 물질중의 하나가 광굴절 매질(Photorefractive Materials)인데, 이것의 전형적인 예가 Fe-LiNbO₃(Iron-doped Lithium Niobate)이다. 이러한 광굴절 매질에서 기록은 Drift와 Diffusion에 의해서 간섭무늬의 밝은 영역에서 어두운 영역으로 움직이는 운동 전하의 광유도 현상에 의해서 가능하게 된다. 이러한 전하의 분리는 전기장을 발생하며 선형 광전효과

(Linear Electro-Optic Effect)에 의해서 굴절률의 변화를 발생시킨다. 이러한 물질 내부의 홀로그래프는 물질의 종류에 따라서 어두운 곳에서 수일에서 수년동안 유지가 가능하나 가열(Heating) 및 조사(Illumination)에 의해서 지울 수 있으므로 이러한 성질을 갖는 물질은 Erasable Data Storage를 위해서 사용될 수 있다.

현재 유용한 HDSS를 개발하는데 있어서 두 가지 종류의 문제점이 지적되고 있다.

첫째는, 구할 수 있는 최적의 기록 물질조차도 감도(sensitivity)의 결함과 기록시 데이터를 소거하는 커다란 단점을 가지고 있다는 점이다.

둘째는, LCD 공간 광변조기 및 CCD 검출장치 등과 같이 현재 구현된 기술들은 이러한 HDSS에 거의 적용이 가능하지만, 효율의 개선 및 최적화 그리고 완벽한 단일 시스템으로 통합해야만 하는 문제가 남아 있다.

광굴절 매질 내부에 저장된 홀로그래프의 휘발성(Volatility)문제는 오래 전부터 알려진 사실이다. 1970년대 RCA 연구실의 한 그룹은 이 문제를 해결하기 위하여 광굴절 매체인 LiNbO₃ 내부의 홀로그래프를 어떻게 하면 고정시킬 수 있는가에 대해서 연구를 수행하였다.[8] 연구 결과, 기록 후 열처리 공정을 수행하면, 데이터의 소실 없이 데이터를 읽을 수 있는 홀로그래프를 만들 수 있다는 사실을 알아내었다. 이에 따라서 열처리를 이용한 Holographic Read Only Memory의 시제품이 현재 등장하고 있다.

그러나 데이터를 각각의 Crystal 내에 입력하고, 그것을 열적으로 처리해야만 하는 공정이 필요하다라는 것은 가격적인 면에서 문제가 있으므로 Holographic Storage의 특성이 매우 중요시되는 응용분야에만 한정되어 사용될 수밖에 없는

단점이 있다.

기록 물질에 있어서 읽고 쓸 수 있는 성질을 가진 보다 진보된 해답은 소위 Gated Photorefractive Material이라고 하는 것으로, 이러한 물질은 다른 파장을 갖는 어떤 제2의 광선이 존재하지 않으면 읽고 쓰는데 사용된 광선의 파장에는 영향을 받지 않고 둔감한 성질을 나타낸다. Gated Photorefractive Material을 이용한 기록 원리는 특정 파장을 갖는 한 광선이 기록 물질을 순간적으로 쓰기가 가능하도록 민감화 시키고 이어 나머지 파장을 갖는 광선으로 민감화된 기록 물질에 쓰기를 하는 것이다.

무기 광굴절 매질(Inorganic Photorefractive Material) 이외의 기록 물질은 많이 알려져 있지는 않으나 궁극적으로는 이러한 물질은 위에서 언급한 문제점을 해결하는데 많은 개선이 있을 것으로 기대된다. 현재 실제로 분자의 광전 반응을 통해서 굴절을 변화를 야기하기 위해 전하의 광발생(Photogeneration)을 사용하는 유기 중합체 광굴절 매질(Organic Polymeric Photorefractive Material)의 개발이 상당히 진전되고 있다. 또한 굴절을 변화를 발생시키기 위해 광화학(Photochemistry)반응을 이용하려는 시도도 진행되고 있다.

포토폴리머(Photopolymer)로 알려진 이러한 홀로그래픽 저장 물질은 Du Pont에서 처음으로 개발하였으며 빛에 노출되었을 때 광굴절 변화(Photorefractive Change)를 하지 않고 대신에 광화학적 변화를 하게 된다. 따라서 빛에 노출되었을 때 광굴절 매질과 같은 전기적 전하의 여기 현상은 발생치 않으며 광화학적으로 영구적인 변화가 일어나게 되므로 한번 저장된 정보는 지울 수 없으며 다시 기록하는 것도 불가능하게 된다.

따라서 이러한 종류의 저장 물질은 Write-once 혹은 Read-only Memory에 적합하다고 할 수 있다.

더욱이 포토폴리머는 같은 두께를 갖는 LiNbO_3 보다도 2,500배 이상의 회절 효율(Diffraction Efficiency)을 갖는 특징이 있어 WORM(Write Once Read Many)형태의 HDSS의 저장 물질로 각광 받고 있다.

또한 현재 IBM과 Arizona 대학교를 중심으로 LiNbO_3 와 같은 광굴절 효과를 나타내는 포토폴리머를 개발하고 있는 중이다. Polymeric Holographic Material이 각광을 받으며 개발되고는 있으나 아직은 저장 물질로써 여러 우수한 장점을 가지고 있는 LiNbO_3 를 대체하는 것은 시기 상조이다. 한 예로 Iron 및 Cerium이 첨가된 LiNbO_3 은 고가의 장치를 요구하는 녹색 레이저보다 염가로 구성 가능한 적색 레이저에 민감하게 작용하며 현재 용이하게 구입이 가능한 큰 장점을 지니고 있다.

Ⅶ. 국내외 개발동향

1960년대에 Polaroid Corporation의 P.J. Van Heerden이 데이터 저장에 Holography를 이용하는 방법을 제안하였는데, 이것이 HDSS를 구성하는 원리의 시초라고 할 수 있다. [9]이후 1960년대 후반에 이르러 Bell 연구소와 RCA 연구소를 중심으로 HDSS에 대한 연구와 데이터를 Crystal 내에 3차원으로 저장하는 방법에 대한 연구가 본격적으로 시도됐다.

많은 홀로그램을 저장하기 위한 첫 번째 시도는 1970년대 초반으로 거슬러 올라간다.

이 당시 RCA 연구소에서 500개의 홀로그램을 Fe-LiNbO₃에 저장하였고, 뒤이어 550개의 고해상도 영상을 광에 민감한 폴리머에 저장하는데 성공하였다. 이후 Thomson CSF에서 256개의 기억 장소를 갖고 각각의 기억 장소는 10개의 홀로그램을 기억할 수 있는 장치를 개발하였다. 이 장치는 비교적 많은 개수의 홀로그램을 기억할 수 있었음과 동시에 공학적으로도 매우 잘 구성된 시스템이었다.

이러한 많은 연구 노력에도 불구하고 개발된 어느 시스템도 몇몇 기술적인 난제와 가격적인 부담으로 인하여 실용화되지는 못하였다. 또한 1970년대에서 1980년대 말까지의 반도체 메모리와 자기 메모리의 눈부신 발전은 홀로그래픽 메모리의 필요성을 감소시켰고, 세인의 관심속에서 멀어져 갔다. 그러나 1990년대에 이르러 멀티미디어시대의 도래와 함께 많은 정보를 기록하고, 빠른 데이터전달이 요구되는 시스템에 대한 필요가 증가함에 따라서 홀로그래픽 메모리에 대한 관심이 고조되었고, 홀로그래픽 메모리의 르네상스가 시작되었다.

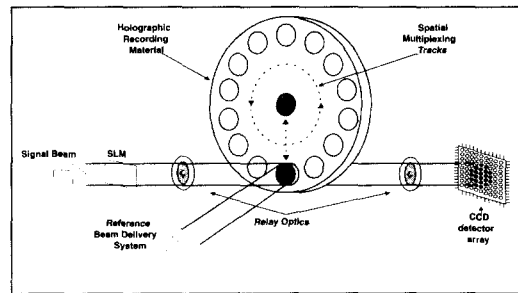
1. 미국

정부 산하기관인 DARPA (Department of Defence Advanced Research Project Agency)의 자금 지원하에 홀로그램을 이용한 차세대 대용량 저장장치를 개발하기 위하여 광굴절 저장물질을 개발하는 PRISM(Photorefractive Information Storage Materials) 프로젝트와 시스템 및 관련 부품을 개발하기 위한 HDSS(Holographic Data Storage System) 프로젝트가 산·학·연 콘소시엄 형태로 국책과제로 진행되고 있으며, 상

기 국책과제 연구 및 참여기관의 개별적인 연구를 통하여 괄목할 만한 성과를 이룩하였다. PRISM에는 19.5백만불이 투입되었고, HDSS에는 32.2백만불이 투입되었다. 이것이 홀로그래픽 정보저장장치 개발의 기폭제가 되었고 데모시스템들이 만들어졌다. 주요한 연구결과들은 다음과 같다.[3]

1) Caltech

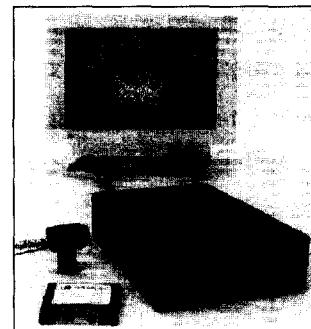
Dupont사의 광폴리머를 사용하여 홀로그래픽 디스크 시스템을 개발, 현재 광 폴리머 개선을 통하여 100 bits/ μm^2 의 저장밀도를 갖는 홀로그래픽 디스크를 연구하고 있다.



〈그림 10〉 홀로그래픽 디스크 메모리 시스템

2) Holoplex

HM-100이라는 상품명으로 홀로그램 메모리 시스템을 시판중, 주요 응용 분야는 지문을 저장/재생하는 지문인식 시스템이며 대용량 저장장치로의 상품화에 주력하고 있다.



〈그림 11〉 Holoplex의 지문인식 시스템

3) Optitek(SIROS)

벤처 자본가의 자금 지원을 바탕으로 조만간 홀로그래픽 대용량 저장장치를 상용화할 예정이라고 발표, 본 기술 분야 관련 최고의 경쟁력을 갖추고 있다.

4) Rockwell

군사용 자동 목표 추적등 특수 목적에 사용하는 홀로그래픽 메모리 시스템을 개발하고 있다.

5) IBM

HOST(Holographic Optical Storage Test Platform)라는 저장물질 개발용 범용 평가 분석 장치와 광폴리머, 광굴절 결정 개발을 추진, DEMON(Digital Holographic Demonstrator)을 개발하였다.

2. 유럽

프랑스, 영국, 이탈리아 및 스위스 등이 참여한 범 유럽적인 산·학·연 연구 콘소시엄이 BRITE-EuRAM이라는 프로젝트명으로 구성되어 항공용의 자동 물체 인식 장치 및 자동 물체 추적장치, 공장 자동화용 형상 인식 장치에 응용이 가능한 초고속 홀로그래픽 디지털 광상관기 및 대용량 저장장치를 개발 중이며 상기 프로젝트의 참여기관으로는 프랑스의 Thomson-CSF, 영국의 British Aerospace, 이탈리아의 DIST, University of Genoa, 스위스의 IMT 등이 참가하고 있다.

3. 일본

현재 CD/DVD 계열의 광 저장장치 시장을 석

권하고 있는 일본은 그 동안 홀로그래픽 대용량 저장장치의 개발에 다소 미온적인 태도를 견지하였으나, 최근 들어 이 분야에 대한 연구개발이 매우 활성화되고 있는 추세이다. 이러한 극적인 반전의 배경은 홀로그래픽 대용량 저장장치의 상용화가 최근에 미국을 위주로 급진전되고 있다는 판단에 근거하고 있다. 일본의 광 저장장치 업체의 기술력 및 제품력으로 미루어 볼 때 본 기술분야에서 조만간 미국의 수준에 근접할 수 있으리라 판단된다. SONY사는 DVD와 호환 가능한 홀로그래픽 디스크에 관련된 연구를 중점적으로 수행 중이며, Hamamatsu Photonics사는 홀로그래픽 광상관기를 이용한 보안용 실시간 인식 장치에 관하여 연구하고 있고, SLM과 같은 소재부품 개발에 적극적인 의지를 보인다. 이외에 Matsushita 사 및 NTT 등은 네트워크 스토리지에 응용 가능한 홀로그래픽 대용량 저장장치에 대하여 연구가 진행 중이다.

4. 국내

국내 기업체로는 대우전자, 삼성전자에서 차세대 대용량 저장장치로 부각될 홀로그래픽 디지털 기억장치의 가능성에 주목하여 수년 전부터 이 분야에 대한 기반 기술 관련 연구를 시작하였고, 국내 연구소로는 ETRI, 대학에서는 강원대, 경희대, 광운대, 부경대, 부산대, 서울대, 성균관대, 순천대, 아주대, 영남대, 충북대, 호서대 등에서 소규모의 연구비로 연구가 수행되어 광굴절효과에 대한 기초적인 물성 특성 및 기본적인 응용실험을 하고 있으며, 특히 삼성전자, 대우전자, 서울대의 경우 디지털 홀로그래픽 시스템을 구축중인 단계에 이르고 있다.[10] 최근에는 국가차원의 원천기

술확보를 위하여 산업자원부에서 주관하여 KETI(전자부품연구원)를 중심으로 하여 민간, 대학, 국공립연구소 등이 참여하는 "차세대 대용량 정보저장장치 개발"사업이 활발히 이루어지고 있다.[11]

Ⅷ. 결 론

HDSS는 앞에서 언급한 여러 가지 장점에도 불구하고, 이러한 시스템의 개발에 있어서 가장 큰 제한 요소들은 저장매체와 가격문제이다. 보다 높은 효율과 작은 산란 특성 및 긴 저장시간을 갖는 저장매체가 개발되어야 하며, Megabyte당 비용이 대체 기술과 비교하여 경쟁력이 있기 위해서는 오늘날 Optical Library 제품을 뛰어 넘는 초대용량의 데이터저장이 요구된다. 성공적으

로 경쟁력 있는 HDSS를 개발해 내기 위해서는 요소 부품 기술, 신호처리 기술 및 특히 저장 물질 개발 등에 있어서 기술적 진보가 해결 해야할 과제로 남아 있다.

이러한 문제들이 해결된다면 CD, DVD, MOD 등과 같은 기존 메모리와 달리 차세대 멀티미디어 통신에서 요구되는 초대용량 및 초고속 데이터 전송 특성을 갖는 유일한 차세대 메모리 시스템으로 생각되며, 이와 같은 기술적인 특징은 상업적, 군사적 목적에 있어서 다양한 응용 가능성을 제시해 주고 있다. 즉, 항공, 군사, 의료, 관공서, 도서관 등의 데이터 베이스와 3차원 입체 동화상 정보통신, 뉴럴 컴퓨팅, 고급 워크스테이션 서버 등 초대용량 정보저장 능력과 초고속 데이터 전달률이 요구되는 분야에 이용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 전동수, "메모리 응용 동향과 주요과제," 전자공학회지, 24권 6호, pp. 57-74, 1997.
- [2] 김은수, "차세대 홀로그래픽 3차원 광메모리 시스템," 전자공학회지, 24권 6호, pp. 75-87, 1997.
- [3] 김은수, "광저장 장치의 해외시장 및 기술개발 전망과 대응방안 연구," 정보통신학술연구과제, pp. 158-182, 2000.
- [4] D. Gabor, "A new microscope principle," Nature, vol. 161, pp. 777-778, 1948.
- [5] J. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, "Volume holographic memory systems: techniques and architecture," Opt. Eng., vol. 34, no. 8, pp. 2193-2203, 1995.
- [6] D. Psaltis, D. G. Stinson, G. S. Kino, and T. D. Milster, "Optical data storage: Three perspectives," Optics and Photonics News, vol. 8, no. 11, pp. 34-39, 1997.
- [7] D. D. Nolte, *Photoconductive Effects and Materials*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 1995.
- [8] D. L. Staebler, W. J. Burke, W. Phillips, and J. J. Amodei, "Multiple storage and erasure of fixed holograms in Fe-doped LiNbO₃," Appl. Phys. Lett., vol. 26, no. 4, pp. 182-184, 1975.
- [9] P. J. van Heerden, "Theory of optical information storage in solids," Appl. Opt. vol. 2, no. 4, pp. 393-400, 1963.
- [10] 이병호, 김은수, "홀로그램 메모리 기술," 광학과 기술, 2권 1호, pp. 46-53, 1998.
- [11] 전자부품연구원, "차세대 대용량 정보저장장치 개발사업," 제 1차 workshop, 2000.

필자소개



김수길

- 1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 졸업.
- 1991년 2월: 서울대학교 대학원 전기공학과 공학석사.
- 1997년 2월: 서울대학교 대학원 전기공학부 공학박사.
- 1997년 4월~8월: 공학연구소 특별연구원
- 1997년 - 현재: 호서대학교 전기정보통신공학부 정보제어공학과 재직.
- 주관심분야: 홀로그래픽 메모리, 3차원 디스플레이, 광센서