

차세대 홀로그래픽 3차원 광메모리 시스템

김 은 수

광운대학교 전자공학과

I. 배 경

최근 반도체, 컴퓨터, 통신, 소프트웨어등과 같은 정보통신 산업의 급속한 발전은 과거 독립적으로 발전해오던 가전기기, 컴퓨터, 통신, 방송, 영상, 오락등 여러 산업들이 서로 융합된 고도의 기술 지식 집약적 멀티미디어 산업으로 변모해 가고 있다.

이러한 21세기 고도 정보화 사회에서 매일 우리의 오감을 무차별하게 폭격하고 있는 천문학적인 숫자의 엄청난 정보를 보다 효과적으로 저장하고 필요에 따라 고속으로 정보를 꺼내볼 수 있는 차세대 초대용량 데이터 저장 기술은 과연 무엇일까? 사실 이 질문은 컴퓨터가 처음 등장한 이래로 끊임없이 추구되어온 과제이다. 더구나 기술발전 및 정보환경의 변화에 따른 새로운 멀티미디어 정보통신 서비스를 위해서는 저장매체의 초고속화, 초소형화 및 초대용량화가 더욱 가속화될 것으로 예상된다.

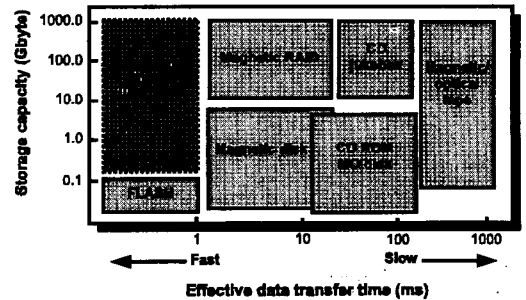
한 예로, 멀티미디어 정보통신의 총아라고 할 수 있는 주문형 비디오(VOD: video-on-demand)의 상용화를 위해서는 비디오 서버의 용량이 10^3 Tbyte 이상, 데이터 전달속도는 1Gbit/sec 이상이 요구되고 있다. 한편, 미국의 NSIC(National Storage Industry Consortium)에 의하면 멀티미디어 정보통신이 일상화되는 1999년도에 요구되는 총정보량은 3.5×10^3 Tbyte 이상의 천문학적 양이 될 것으로 전망하고 있다.

그러나, 기존의 반도체 메모리 기술, MOD(magneto-optic disc) 및 CD(compact disc) 메모리 기술등은 이러한 21세기 고도 정보화 사회에서 예견되는 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.

반도체 메모리는 현재 1Gbit 저장용량까지 개발되고 있으나 궁극적으로 기존의 반도체 제조기술은 광리소그래피(photolithography)에 기초한 것

으로 사용광의 파장과 렌즈의 해상도에 의해 제한되게 된다. 따라서, 현재로는 $0.1\mu\text{m}$ 이하의 반도체 메모리 게이트를 제작하기 위해서는 기존의 광리소그라피 기술은 근본적으로 불가능한 것으로 판단됨에 따라 새로운 접근 방식에 대한 연구 개발이 절실히 요구되고 있다. 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, 도서관등에서는 수백 장의 디스크를 쌓아놓고 로봇팔을 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 50Gbyte 정도로 늘릴 수 있을 것으로 기대하고 있다. 그러나, CD는 기본적으로 멀티미디어 정보통신을 위한 정보 저장용량 측면 뿐만 아니라 데이터 처리 속도면에서 근본적인 기술적 한계를 가지고 있다. 특히, 저장 용량 확대에 필요한 저장밀도 개선의 경우 현재 연평균 6% 정도에 그치고 있고, 데이터 저장용 호ם대 가시광선 파장이하로 쪼갤수 없어 저장용량의 한계를 가질 수밖에 없는 매체이며 더욱이 기계적인 랜덤 액세스 방식의 채용으로 데이터 처리 속도의 한계를 갖을 수밖에 없다는 점들을 고려할 때 새로운 차원의 차세대 초고속, 초대용량 저장매체에 대한 관심은 갈수록 커질 전망이다. 따라서, 기존의 CD와는 개념이 전혀 다른 새로운 방법으로 고속으로 Tbyte 이상의 막대한 데이터를 저장·처리할 수 있는 볼륨 홀로그래

(volume hologram) 3차원 광메모리 방식에 대한 상용화 연구가 최근 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 각설탕만한 크기의 비선형 광굴절결정매질(photorefractive materials)을 이용한 데이터의 볼륨 홀로그래프 저장 방식은 기존 2차원 메모리 개념이 아닌 3차원 입체 메모리 저장으로 그림 1과 같이 그 정보저장 용량은 21세기 고도정보화 사회에서 요구되고 있는 극초대용량(Tbyte 이상)의 데이터 저장용량과 저장된 정보를 초고속(μsec) 병렬 액세스 할 수 있는 장점을 동시에 제공할 수 있는 유일한 차세대 데이터 저장 시스템으로 분석되고 있다.



(그림 1) 정보저장 시스템의 성능분석

이 아이디어는 1963년 Polaroid사의 Van Heerden에 의해 처음으로 제안되어 많은 결과나왔으나 지난 30여년동안 광소자를 비롯한 광정보처리 기술이 반도체 메모리 기술 및 광자기 메모리 기술에 비해 상대적으로 발전되지 않아 실질적인 응용연구로 연결되지 못하였다. 그러나, 최근 효과적인 홀로그래프 기록 매질의 개발과 소형 반도체 레이저, LCD 공간 광 변조기, CCD 광 검출기 기술등과 같은 관련 광전자 소자의 발전, 그리고 멀티미디어 정보통신, 주문형 비디오, 네트워크 컴퓨팅, 개인 휴대 통신, 대용량 동화상 기록 미디어, 대용량 컴퓨터 서버, 첨단 군정보 체계, 뉴럴 컴퓨팅, 초대형 디지털 데이터베이스, 광 컴퓨터, 3차원 입체 및 실감 통신등 볼륨 홀로그래픽 광메모리의 장점을 최대한으로 이용할 수 있는 새로운 응용분야의 등장에 따라 차세대 홀로그래픽 3차원 광메모리 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

II. 연구동향

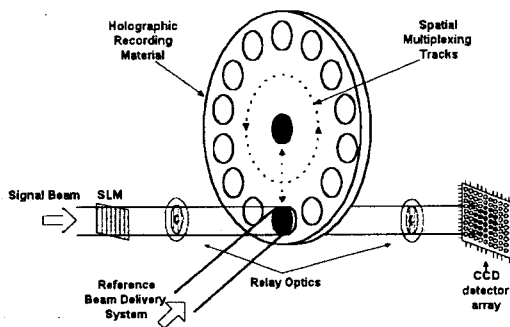
LiNbO₃, BSO, BaTiO₃ 등 비선형 광결정에서 광굴절 효과(photorefractive effect)가 발견된 이후 초대용량 홀로그래픽 3차원 광메모리로서의 그 잠재적인 응용 가능성들이 제시되면서 일찍이 미국을 비롯한 유럽, 일본 등지에서는 이에 대한 이론적, 실험적 연구가 활발히 지속되어 왔다.

1963년 Van Heerden에 의해 처음으로 볼륨 홀로그램을 이용한 3차원적 데이터 저장 시스템이 제시된 이후 광굴절결정을 이용하여 다수의 홀로그램을 고밀도로 다중화하여 저장하려는 시도가 1970년대 RCA의 J.J.Amodei 와 D.L.Staebler 박사등에 의해 이루어져 Fe:LiNbO₃ 결정에 500개의 홀로그램을 기록한 바 있다. 또한, 프랑스의 Thomson-CSF 사에서도 Huignard 등에 의해 광굴절 결정의 영역을 256개로 분할하여 10개의 홀로그램을 저장한 실험 결과를 제시한 바 있다. 그러나, 이와같은 볼륨 홀로그램 메모리에 관한 활발한 연구개발 노력에도 불구하고 그당시 반도체 및 자기메모리가 급속도로 발전하고 있었으므로 홀로그래픽 메모리는 실질적인 응용 시스템으로는 발전하지 못하고, 지난 30여년간 이에 대한 관한 관심은 뒷전에 사라져 있었다.

홀로그래픽 광메모리의 강력한 르네상스는 1991년 Northrop 사의 F.Mok 박사에 의해 이루어졌다. F.Mok 박사 그룹은 탱크, 지프, 그밖의 군용 수송 장비들에 대한 영상 데이터를 Fe:LiNbO₃ 결정을 이용하여 500개의 고해상 홀로그램 이미지로 저장 재생하는데 성공하였으며 1993년에는 5,000개의 고해상 홀로그램 데이터의 기록 및 재생에도 성공하였다.

이를 필두로 1993년 Caltech의 Psaltis 교수는 160×110 비트로 구성된 1,000페이지의 디지털 데이터를 1cm³의 Fe:LiNbO₃ 결정에 저장하였으며, 저장된 광메모리 데이터는 다시 재생되어 디지털 컴퓨터로 전송할 수 있었으며 이러한 데이터 전환과정에서 전혀 에러가 검출되지 않으므로서 홀로그래픽 메모리도 디지털 컴퓨터와 같은 데이

터 정확성을 가지고 있다는 것을 처음으로 제시하였다. 그후 개선된 시스템을 이용하여 각 페이지가 320×220 비트로 구성된 10,000 페이지 데이터를 기록한 실험결과를 제시하였다. 또한, Caltech의 D. Psaltis 그룹에서는 그림 2와 같이 광공분자 필름(100μm 두께)을 이용하여 기존의 2차원 CD기록 방식을 볼륨 홀로그램 개념의 3차원 CD로 확장함으로써 각 다중화 및 공간다중화 방식에 의해 10bits/μm² 정도의 데이터 저장 밀도를 얻었으며(기존 CD나 MOD의 경우 1bit/μm² 정도임) 기록 매질을 보다 두껍게 함으로써 100bits/μm² 정도의 높은 저장밀도를 간단히 얻을 수 있다.

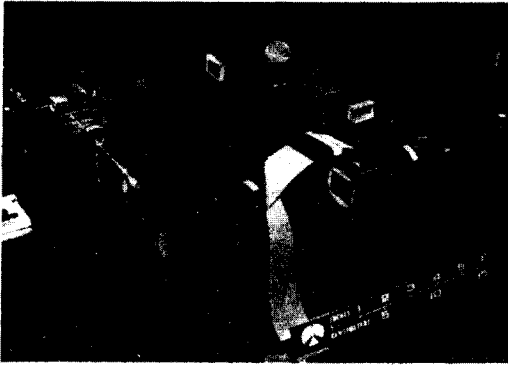


(그림 2) 홀로그래픽 3-D 디스크 메모리 시스템

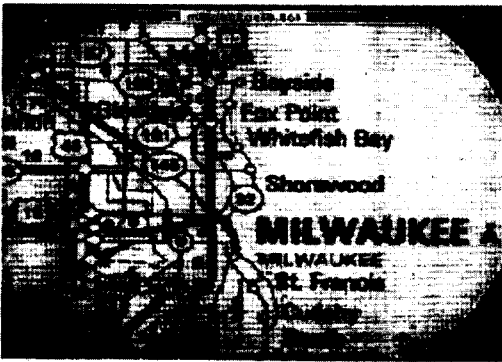
터면, 1994년 Stanford 대학의 Hesselink 교수팀에서는 디지털화되고, 압축된 영상 및 비디오 데이터를 홀로그래픽 메모리로 저장한 다음 재생하는 실험에 성공한바 있다. 실험에서 308 페이지의 홀로그램 데이터를 기록하였고 각 페이지는 4개의 영역으로 나누어 각 1,592비트의 자연 데이터를 사용하였다. 최근에는 Optitek라는 회사를 설립하여 홀로그래픽 광메모리 시스템의 실용화 제품을 개발하고 있다.

또한, Rockwell의 J. Hong 박사그룹에서는 1995년도에 그림 3과 같은 홀로그래픽 광메모리 시스템을 설계, 구성하여 실험을 통해(그림 4) 실용화 가능성을 제시하였으며 같은 해 Holoplex 사는 홀로그래픽 광메모리 시스템의 세계 최초의 상용화 모델인 HM-100을 출시하였다.

최근, 미국에서는 3천2백만발 규모의 홀로그램



〈그림 3〉 홀로그래픽 메모리 데모 시스템 구성도



〈그림 4〉 홀로그래픽 메모리로부터 재생된 영상

정보 저장 시스템(Holographic Data Storage System : HDSS) 및 광 굴절 정보 저장 매질 (Photorefractive Information Storage Materials : PRISM) 개발 콘소시엄이 구성되어, 1Tbit 저장 용량과 1Gbit/s의 처리 속도를 가진 광저장장치의 개발에 나섰다. 이들 콘소시엄에는 스탠포드대학의 연구진과 IBM, GTE, Rockwell 연구진이 공동연구를 하고 있으며, 향후 5년내에 데스크탑 크기의 1단계 홀로그래픽 광 메모리 시스템 개발을 계획(HDSS)하고 있다.

1996년도에는 IBM의 J. Ashley, G. T. Sincerbox 등이 PRISM/HDSS 프로그램의 일환으로 5.75Mbyte(MPEG) 저장용량의 DEMON (Digital Holographic Demonstrator) 시스템을 발표한 바 있다.

현재 세계적으로 홀로그래픽 광 메모리 시스템에 대한 연구 개발을 주도하는 그룹으로써 학계에서는 Stanford 대학의 L.Hesselink 교수와 Caltech의 D.Psaltis 교수팀 그리고, Arizona대학, Carnegie Mellon대학, Dayton대학 등이 활발한 연구를 하고 있으며, 연구소 및 산업체에서는 Rockwell의 J.Hong 박사그룹, Holoplex사의 F. Mok 박사그룹, Optitek 사의 Hesselink 박사그룹 그리고 IBM, Kodak, GTE, TI, SDL, Rochester Photonics, Tamarack등이 상업화를 위한 시스템 기술 개발에 주력하고 있다.

그러나, 국내에서는 이러한 광굴절매질을 이용한 차세대 초대용량 홀로그래픽 광메모리 시스템의 개발에 관한 연구는 전무한 상태이며 다만 광굴절 소자를 이용한 광정보처리에 관한 연구는 KIST, ETRI, 광운대, 과학원, 서울대, 부산대, 충북대, 순천대, 영남대 등에서 연구 하여 왔으며 최근에는 홀로그램 메모리를 구현하기 위한 기초적인 물성 특성 및 기본적인 응용 실험이 수행 되고 있다. 최근에는 삼성, LG, 대우 등에서 이에 대한 새로운 연구팀 구성 및 연구비 투자를 시작하고 있다.

III. 평면 및 볼륨 홀로그램

일반적으로 홀로그램을 기록할 때 기준파는 평면파를 사용한다. 만일, 물체파도 평면파를 사용하게 되면 간섭 패턴은 간단한 주기적인 정현파로 나타나게 되는데 이러한 정현파적인 굴절을 변화를 회절격자(grating)라고 한다. 하나의 평면파(혹은 grating)는 공간적인 정보를 갖고 있지 않기 때문에 일반적인 홀로그램은 이러한 물체의 공간적 정보를 기록하기 위해서 여러개의 회절격자로 구성된다. 이러한 물체의 공간적인 정보는 푸리에 광학에 의해 여러개의 평면파의 선형 중첩으로 표현 될 수 있다. 따라서, 기준 평면파와 간섭을 통해 각 평면파 성분은 기준빔과 회절격자를 형성하게 되므로 기록된 홀로그램은 서로 다른 파벡터

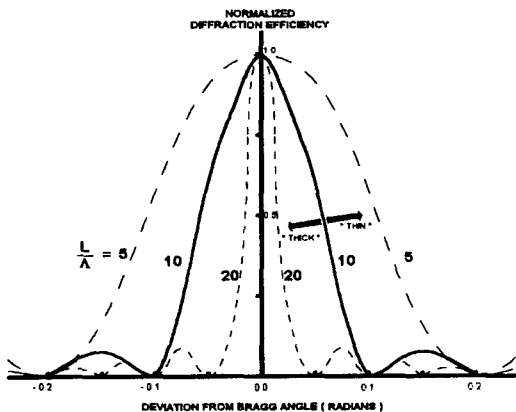
(wave vector)를 갖는 여러개의 회절격자로 구성된다. 초창기 홀로그래피에서는 기준빔과 물체빔 사이의 이러한 간섭패턴이 얇은 감광 필름에 기록되었는데 이를 평면 홀로그램이라 한다.

여기서, 평면(plane hologram 혹은 thin hologram) 및 볼륨 홀로그램(volume hologram 혹은 thick hologram)을 구분하기 위한 방법으로 회절영역의 관점에서 식(1)과 같은 매개변수인

$$Q = \frac{2\pi\lambda L}{m\Lambda} \quad (\Lambda = \frac{2\pi}{|k|}) \quad (1)$$

Q 값이 사용되는데 일반적으로, $Q > 1$ 인 경우를 Bragg 영역 회절이 일어나는 볼륨 홀로그램 영역이라 하고 $Q < 1$ 인 경우를 Raman-Nath 영역의 회절이 일어나는 평면 홀로그램 영역이라 구분한다. 위 식에서 L 은 회절격자의 두께이고, Λ 는 회절격자의 주기, k 는 회절격자의 파벡타 등을 나타낸다.

또다른 방법으로는 상대적인 각 선택도(angular selectivity) 관점에서 나눌 수 있는데 먼저 $(L/\Lambda) < 10$ 인 경우를 각 선택도가 완만한 평면 홀로그램 영역이라 하고 $(L/\Lambda) > 10$ 인 경우는 첨예한 각 선택도가 나타나는 볼륨 홀로그램 영역이라 한다. 즉, 그림 5와 같이 볼륨 홀로그램 영역인 경우에는 첨예한 각 선택도에 의해 Bragg 각에서 입사각이



(그림 5) L/Λ 값에 따른 각 선택도

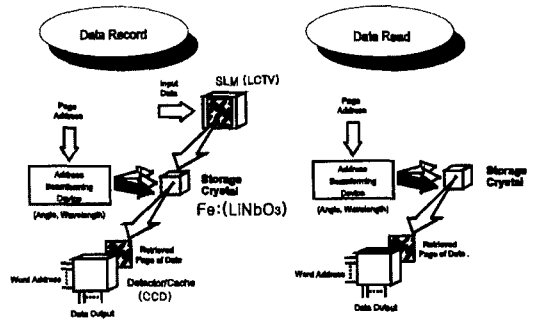
약간만 차이가 난다해도 회절격자로 부터의 회절 양이 급속히 떨어지게 된다.

즉, 평면 홀로그램에서는 일정한 입사각에 대해 여러개의 회절차수들이 존재하나 볼륨 홀로그램에서는 단 한개의 회절 차수만 존재하는데 이는 입사각이 Bragg조건을 만족하는 각도로 입사될 때만 회절이 발생하기 때문이다. 바로 이러한 볼륨 홀로그램의 회절 특성에 의해 홀로그래픽 광메모리 시스템의 고밀도 다중화 기록에서 요구되는 첨예한 각 선택도가 얻어지게 되는 것이다.

IV. 홀로그래픽 광메모리 시스템

1. 시스템 개요

그림 6은 홀로그래픽 광메모리 시스템의 일반적인 구성도를 나타낸 것으로 그림에서 2개의 레이저 빔(신호빔과 기준빔)이 광굴절 매질내에서 간



(그림 6) 홀로그래픽 메모리 시스템 구성도

섭이 일어나게 되면 광굴절 효과에 의해 매질내에 격자(grating)패턴이 형성되어 저장 된다. 입력 데이터가 결정내에서 격자패턴 형태로 저장되기 위해서는 우선 입력 데이터는 LC-SLM(liquid crystal-spatial light modulator)에 광세기 변조 형태의 입력 패턴(페이지)으로 만들어지게 된다. 청녹색 레이저 빔이 crossword 퍼즐패턴과 같은 LC-SLM 페이지 데이터를 통해 조사되고 렌즈에 의해 이미징되므로써 신호빔이 만들어지게 된다.

이러한 신호빔이 여러개의 각도로(혹은 파장으로 혹은 위상코드로) 정렬된 기준파(어드레스)와 순차적으로 광굴절 매질에서 만나게 되면 수천 페이지 이상의 홀로그래프 데이터가 고밀도 다중화되어 기록되게 된다. 이러한 기록과정을 거친 후에 특정 페이지의 데이터는 기록시 사용된 기준파와 동일한 각도로(혹은 파장으로 혹은 위상코드로) 기준파를 다시 입사시킴으로써 홀로그래프적으로 재생될 수 있다. 즉, 기준파가 광굴절 결정에 있는 격자를 통과할 때 원래의 페이지에 있는 정보의 영상을 재현하는 방향으로 회절되게 된다. 재현된 영상은 CCD와 같은 2차원 영상센서에 입사되어 한꺼번에 한 페이지에 저장된 정보를 모두 읽을 수 있으며 이 데이터는 다시 디지털 컴퓨터에 의해 전자적으로 저장, 처리된다.

2. 홀로그래픽 메모리의 특징

기존 메모리와 달리 홀로그래프 메모리는 방대한 저장밀도와 빠른 액세스 시간을 동시에 제공할 수 있는 유일한 차세대 기술로 제시되고 있다. 즉, 홀로그래프 메모리의 가장 큰 장점은 한페이지에 Mbit 정보를 갖는 수천 페이지 이상의 데이터를 동전 크기의 볼륨에 저장할 수 있다는 것이다. 이를 위해 각 페이지 데이터는 빔의 각도, 파장, 위상등을 변화시킬 수 있는 개개의 기준파와 간섭되어 저장된다. 또한 일정한 홀로그래프 페이지 그룹들은 기록매질의 두께를 통해 공간적으로 분리되어 적층될 수 있으므로 저장용량을 더욱 늘릴 수 있게 된다. 예를 들면 1Mbit의 페이지 데이터를 50만장의 홀로그래프로 기록했다면 500Gbit의 데이터 저장용량에 해당하는 것으로 기존의 RAID MOD 시스템과 비슷한 저장용량이 된다. 따라서, 기존의 RAID MOD 시스템의 저장용량 정도는 50개의 유니트를 공간적으로 다중화하여 간단히 확장될 수 있다. 최근에 한 유니트 볼륨 홀로그래프에 대한 다중화기록 실험에서 10,000페이지 이상의 고밀도 다중화가 가능하다는 실험 결과가 제시됨으로써 공간다중화 및 광기록매질의 적층화를 통해 Tbyte 이상 데이터 저장이 간단히 이루어 질 수 있다. 더욱이 각 페이지 데이터는 잠정적으로 1Mbit 이상

의 정보를 갖고 있고 $100\mu\text{s}$ (검출기 응답시간)에 단일 페이지의 병렬 판독이 가능하므로 $10\text{Gbit/s} = 1.25\text{Gbyte/s}$ 의 초고속 데이터 전달 속도를 간단히 얻을 수 있다.

이러한 볼륨 홀로그래프의 3차원적 다중화 기록과 한번의 액세스에 한 페이지에 있는 전데이터(1Mbit)가 동시에 재현될 수 있으며 홀로그래프 메모리는 기타 메모리 시스템과 달리 각 비트 데이터가 간섭 형태로 광기록 매질 전체에 분산저장되므로 매질의 결합등에 의한 데이터 손실이 거의 없는 redundancy를 갖고 있다.

또한, 전자적인 어드레싱 방법을 사용하는 홀로그래픽 광메모리 시스템은 기존의 기계적 어드레싱 방식의 CD메모리($10\mu\text{s}$ 이상)보다 훨씬 짧은 $10\mu\text{s}$ 의 랜덤액세스 시간을 갖는다. 즉 모든 데이터 페이지가 기준파 각도(Bragg조건)로서 정의된다면, 각 페이지는 빔 각도가 변하는 속도만큼 빠르게 기록 및 재생이 가능하므로 AOD(acousto-optic device)와 같은 전자적인 빔 스캐너를 이용하여 고속 랜덤 액세스가 가능하다. 따라서, 볼륨 홀로그래프 메모리 시스템은 Tbyte 이상의 데이터 저장밀도와 1Gbit/s의 데이터 전달속도(RAID MOD: 100Mbyte/sec, MOD: 10Mbyte/sec, CD: 1Mbyte/sec) 및 저장된 데이터의 랜덤액세스 시간이 $10\mu\text{s}$ (CD: 10ms이상)이하로 유지시킬 수 있기 때문에 기존의 어느 메모리 시스템보다도 초대형 저장용량과 초고속 데이터 처리 특성을 동시에 만족시킬 수 있는 유일한 차세대 메모리 기술이라 할 수 있다.

3. 광굴절 매질(Photorefractive Materials)

비선형 광굴절에 두 개의 광파를 교차시키면 그림 7에서 처럼 주기적인 공간섭 패턴에 의해 전하가 밝은 영역에서 보다 어두운 영역으로 이동하여 재배열되어 강한 공간전하장($\sim 10,000\text{V/cm}$)이 유도되고, 이 공간전하장의 전기광학효과(Pockels 효과)에 의해 전장의 세기에 비례하여 선형으로 굴절률의 변화가 유기되는 현상을 광굴절효과(photorefractive effect)라고 한다.

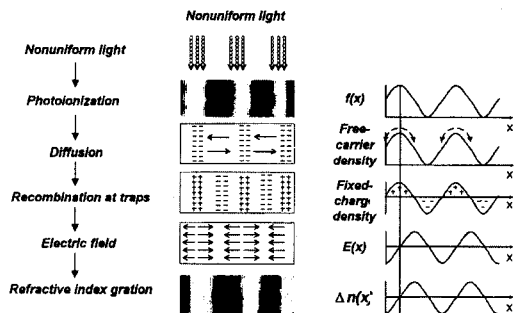
이러한 비선형 매질의 굴절률 변조는 볼륨 위상

홀로그래프와 같은 원리의 굴절률격자(refractive index grating)로 작용하게 된다. 이 효과는 1966년 Bell Lab.의 A. Ashkin등이 LiNbO₃ 결정에 강한 청녹색 파장의 레이저 광을 집속시켜 이들 결정의 굴절률이 광세기 분포에 비례하여 변화(처음에는 “optical damage”라고 생각함)하는 것을 관찰함으로써 최초로 발견되었다. 그러나, 1968년 F. S. Chen, J.J. LaMacchia 등은 이러한 결정내의 굴절을 변조가 파국적인 “optical damage”가 아닌 홀로그래프 영상의 3차원적 기록의 원리로 사용이 가능함을 제안한 이래로 J.J. Amodai, A.M. Glass 등에 의해 광정보저장 실험이 수행되었으며, 그 후 이 효과를 이용한 광범위한 응용분야가 연구발표되었다. 이러한 광굴절효과를 나타내는 강유전체 결정으로는 LiNbO₃, LiTaO₃, GaAs, BaTiO₃, KNbO₃, InP, Ba₂NaNb₅O₁₅, Sr_xBa_{1-x}Nb₂O₆(SBN), Bi₁₂SiO₂₀(BSO), Bi₁₂GeO₂₀(BGO), KNSBN, BSKNN 등이 있고 최근에는 유기물질인 광고분자(photopolymer)매질에서도 이 효과가 발견되었다.

광굴절 매질은 실시간적인 광정보처리, 강한 비선형 특성 및 여러 동특성등으로 여러분야에서 다양한 응용 가능성을 가지고 있다. 특히, 광메모리 응용에서는 초대용량의 정보저장 밀도(1TB/cm³), 병렬성, 장기저장, 높은 회절효율 및 높은 광굴절 민감도등으로 응용연구가 가장 활발히 진행되고 있다. 이러한 효과를 갖는 광굴절 매질은 정보를 3차원 볼륨형태로 저장하기 때문에 다가올 정보화 사회에서 대량의 정보를 저장하고, 많은 사용자에게 신속하게 정보를 접근할 수 있도록 하기 위한 초대용량 홀로그래픽 광메모리 시스템을 실현시킬 강력한 저장매질로 평가되고 있다. 특히, 광굴절 매질을 초대용량 정보저장 매체로 활용하기 위한 가능성 및 기폭제는 90년대에 접어들면서 성숙되기 시작한 관련정보산업 및 광전자 기술의 발전에 근거하지만, 무엇보다도 다가올 정보화 사회의 세계적 주도권 확보를 위한 요소기술로 인식되면서 시작되었다. 또한, 이러한 인식의 배경에는 1991년 F. Mok 등에 의해 LiNbO₃ 결정을 이용하여 발표된 500개의 각 다중화 홀로그래프 저장기법에서부터 시작된 고밀도 저장기술의 연구성과 및 상업화

가능성이 예측되면서 차세대 초대용량 저장매체로 각광받기 시작하였다. 한편, 홀로그래프 광메모리 소자의 또다른 형태가 유기물질인 광고분자(photopolymer)매질이다. Du Pont에 의해 개발된 초기 광고분자는 빛에 노출되었을 때 광굴절률의 변화가 아닌 화학적인 변화 현상을 이용하게 된다. 즉, 전기적인 전하가 여기되는 것이 아니고 광화학적(photochemical) 변화가 발생하여 고정되어 일단 정보를 기록하면 지우거나 다시 기록 할 수 없는 특성을 갖게 되므로, 이 홀로그래픽 광메모리 소자는 WORM(write-once or read-only memory)응용에 적합하였다.

한편, 최근 IBM과 Arizona 대학에서 광고분자



〈그림 7〉 광굴절 메카니즘

에서도 LiNbO₃ 결정과 같은 광 굴절 효과가 발생함이 발견된 이후 광굴절 고분자(photorefractive polymer)를 이용한 홀로그래픽 광메모리 시스템 구현에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

특히, 광굴절 고분자 소자는 결정 성장 및 도핑이 어렵고 가격이 비싼 기존 광굴절 결정에 비해 회절효율이 2500배 이상 높고 제조가 용이하며 가격이 매우 저렴하므로 차세대 홀로그래프 저장 매질로서 각광 받을 것으로 예상되고 있다.

더구나 광굴절 고분자 소자는 결정보다 유전상수가 매우 낮기 때문에 같은 포획 전하밀도에 대해 큰 전계의 형성이 가능하고 또한, 다양한 합성과 샘플제작이 쉽고 도핑과 제조과정등이 쉽다는 장점등이 있다.

그러나, 광굴절 고분자 매질이 홀로그래픽 광메모리 시스템의 기록 미디어로서 사용되기 위해서

는 광굴절 고분자 소자의 정보저장용량 뿐만 아니라 기록된 홀로그램 패턴의 회절효율의 극대화가 요구된다. 이러한 두가지 목표는 현재의 샘플(125 μm)의 두께를 증가시킴으로써 가능해진다. 즉, 샘플을 두껍게 만드는 방법으로 여러개의 광굴절 고분자 소자를 적층한 형태인 SVHOE(stratified volume holographic optical element)로 최근에는 총 950 μm 두께에 500 μm 의 고분자 샘플두께를 갖는 PMMA:DTNBI:C60 고분자를 이용한 4개층의 광굴절 고분자 소자가 개발되었다. 그러나 모든 새로운 매질에서와 같이 광굴절 고분자는 높은 회절효율과 응답속도 뿐만 아니라 안정도, 재연성, 반복적인 기록 및 판독에 대해서도 낮은 열화(fatigue)특성 및 온도에 대한 안정성등의 해결이 요구되고 있다. 특히, 광메모리에 응용하기 위해서는 암저장(dark storage) 시간이 길고 극소의 배경산란(높은 광투과도), 두꺼운 샘플합성, 기록 및 재생 사이의 비대칭성(비파괴 재현)등이 요구되고 있다.

4. 홀로그램 기록매질의 요구 특성

홀로그래픽 광메모리 시스템에서 사용되는 기록매질의 요구 특성을 살펴보면 먼저, 신호빔의 왜곡을 막고 산란광에 의한 잡음을 허용범위내로 유지하기 위해서 기록매질의 높은 광학적 특성 및 극히 낮은 산란 특성이 요구되며, 각 다중화에 의한 기록용량을 극대화하기 위해 볼륨 홀로그램의 Bragg효과를 최대한으로 이용할 수 있도록 두꺼운(thick) 기록 매질의 합성이 요구된다.

예를 들어, 100 μm 두께의 기록매질의 경우 Bragg조건에 의해 기준과의 변화는 0.25°정도가 허용이 되며 두께가 1mm인 경우는 0.025°로 더욱 작아지게 된다. 따라서, 저장 매질의 두께가 두꺼울수록 각 다중화방식에 의한 고밀도 홀로그램저장이 가능하게 된다.

1993년 F. Mok은 6mm두께의 LiNbO₃결정에 각 다중화 방법에 의해 5,000페이지의 홀로그램을 저장한 바 있다. 또 다른 요구 조건으로 높은 광굴절 변조특성은 보다 많은 홀로그램 영상을 고밀도로 다중화하여 기록할 수 있는 충분한 광굴절 변조범

위(dynamic range)를 보장하기 위한 것이며 또한, 기록매질의 입력 광세기에 대한 기록감도가 높게 되면 적당한 레이저 출력으로 고속의 데이터 기록도 가능하게 된다. 팩키징 및 신뢰도 관점에서 근적외선 레이저 다이오드의 사용이 선호되고 있기 때문에 근적외선 광감도가 높은 기록 매질이 또한 요구된다.

기록매질은 입력 광패턴에 의해 기록될 뿐만 아니라 연속적인 홀로그램 기록과정과 기록된 데이터의 반복적인 판독시 입사되는 빔에 대해 영향을 받지 않기 위한 고정(fixing)방법이 요구된다. 이러한 고정 방법은 특정 정보를 지우고 그 자리에 새로운 홀로그램 데이터가 기록될 수 있어야 함으로 가역적인 고정방법이어야 한다. 그러나, 의료영상, 금융전산, 위성원격탐사, 관공서 등에서 널리 응용되는 WORM(write-ones-read-many)의 경우에는 반복적인 판독에만 응용되므로 기록매질이 비가역적인 고정특성이 요구된다. 또한, 일단 기록된 홀로그램이 열화되지 않고 오랜시간 저장되기 위해서는, 화학적 변화가 없는 반영구적 기록매질 특성이 또한 요구된다.

마지막으로, 기록매질은 기존 CD정도의 미디어 가격정도와 경쟁할수 있는 저렴한 기록 미디어의 개발이 요구되고 있다.

5. 관련 소자기술

볼륨 홀로그래픽 광 메모리 시스템의 강력한 르네상스는 최근 몇 년사이의 관련 소자 기술의 발전에 크게 기인된다. 이러한 관련기술의 발전은 홀로그래픽 광메모리 시스템의 개발을 위한 요구에 의한 것이 아니라 가전 및 정보통신 시장의 급성장에 따른 것이다. 즉, 고해상 고속 CCD 영상검출어레이는 전자 카메라 및 캠코더를 위하여 개발되었으며 고해상 LC-SLM은 텔레비전과 컴퓨터 디스플레이를 위해서 그리고, 가시광선의 반도체 레이저는 CD, CD-ROM등을 위해서 개발된 것이다. 보통 상용 CCD카메라는 초당 40,000프레임(프레임당 128×128픽셀)의 초고속 시스템에서부터 초당 7프레임(프레임당 2048×2048픽셀)의 저속 시스템까지 다양하게 개발 되어 있다. 최근에는 초

당 1,000프레임(프레임당 1024×1024픽셀)을 갖는 고속 및 고해상 CCD영상 센서 시스템이 개발되고 있다.

CCD카메라는 홀로그래픽 메모리 시스템에서 매우 중요한 부분으로 입력 데이터 페이지에 있는 비트수, 데이터 픽셀의 크기 및 간격등이 모두 CCD칩의 픽셀크기에 의해 결정된다. CCD어레이는 x, y 방향에서 픽셀크기, 픽셀피치 뿐만아니라 픽셀의 갯수의 관점에서 데이터 입력소자(LC-SLM)와 잘 정합되어야 한다. 또한, CCD어레이는 제한된 레이저 전력으로 미약한 회절패턴을 비트에러없이 검출하기 위한 궁극적인 잡음의 한계를 결정하게 된다. 휴대용 TV로 사용되고 있는 LC-SLM은 320×240픽셀의 입력 영상 데이터가 비디오 프레임으로 처리되고 있다. 강유전체의 고속 SLM은 128×128픽셀 영상을 200 μ s속도로 영상 처리 할수 있으며 현재는 256×256픽셀영상 까지 가능하다. 또한, 고해상 프로젝션 디스플레이를 위한 액티브 매트릭스 SLM은 8비트의 그레이 준위를 갖는 2048×2048픽셀을 초당 80프레임의 속도로 처리할 수 있으며(2.7Gbit/s) 2진형은 초당 1,000프레임(4Gbit/s)까지 동작이 가능하다. 따라서, 이상의 관련소자 기술현황을 통해 살펴보면 홀로그래픽 광메모리 시스템 구성에 필요한 관련 소자로서 현재 충분한 고해상,고속 LC-SLM이나 CCD가 개발되고있고 고효율 소형 반도체 레이저 및 DPSS(Diode-Pumped Solid-State)레이저 개발이 이루어진 상태에 있으므로 향후 홀로그래픽 메모리 시스템의 상용화문제는 결국 시스템화 기술과 최적의 기록 매질 개발등에 의해 결정된다고 할 수 있다.

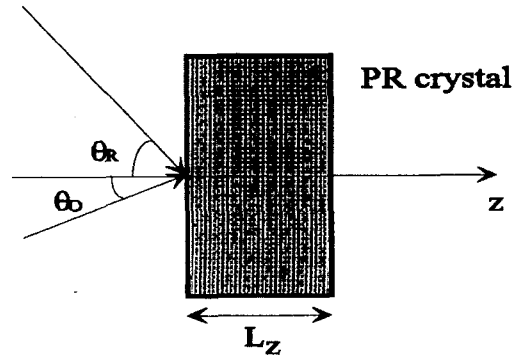
V. 다중화(Multiplexing)기록 및 고정(Fixing)

1. 각 다중화(Angular Multiplexing)

일반적으로 임의의 입력패턴 데이터와 특정각도로 입사되는 기준 평면파들간의 간섭으로 저장된 볼륨 홀로그래프를 재현 할 때, 특정 저장된 패턴 데

이터는 Bragg 조건에 의해 기록할 때 사용한 기준파와 동일한 각도로 입사하는 평면파에 대해서만 판독이 가능하다. 이러한 각 선택도는 기록매질의 두께에 따라 달라지게 되는데 결정이 두꺼울수록 기준파 입사각의 범위를 더욱 정확하게 조사하여야 한다. 예로써, 1mm두께의 결정의 경우 기준파 입사각이 0.01°이상 벗어나게 되면 재생상이 완전히 없어지게 되고 10mm 두께의 결정에서는 0.001° 이상 벗어나게 되면 없어지게 된다. 이러한 각 선택도는 하나의 기록 매질에 보다 많은 홀로그래프 데이터를 다중화하여 기록하는 각 다중화(angular multiplexing)기법을 가능케 하는 것이다. 그림 8의 두 개의 평면파에 의해 기록된 간단한 정현파 형태의 격자의 경우에 대해 가장 잘 설명되고 정량화될 수 있다.

볼륨 홀로그래프에서 각 선택도는 근사적으로 볼



〈그림 8〉 각 다중화 홀로그래프의 기하학적 구조

륨 grating의 회절 효율값이 최대값에서 떨어지기 시작하여 0이 되는 지점사이의 각도의 폭으로 식(2)와 같이 주어진다.

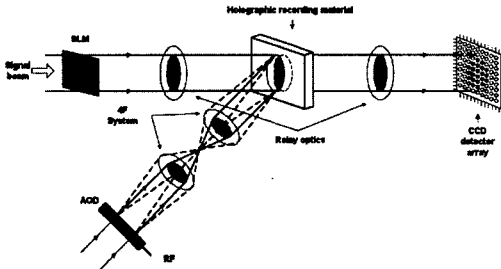
$$\Delta\theta_k = \frac{\lambda \cos\theta_0}{nL_z \sin(\theta_k + \theta_0)} \tag{2}$$

윗식에서 θ_0, θ_k 은 기준빔과 물체빔의 입사각을 n, L_z 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 홀로그램 데이터를 저장하기 위하여 식 (2)로 주어지는 각 증가분만큼 간격을 둔 기준빔들을 이용하여 동일평면에서 각 다중화시켜 기록할 수 있으며 복원시에도 cross talk가 없는 재현 영상을 얻을 수 있다. 즉, θ_1 에서 θ_2 까지의 기준빔의 각도 범위내에서 각 다중화될 수 있는 홀로그램의 갯수는 근사적으로 식 (3)과 같이 주어진다.

$$M \approx 1 + \frac{nL_z}{\lambda} |\cos\theta_1 - \cos\theta_2| \quad (3)$$

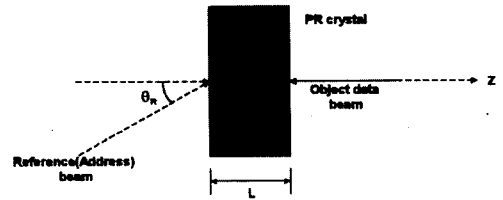
윗 식에서 $L_z=1cm$, $n=2.2$, $\lambda=0.5\mu m$, $\theta_1=92^\circ$ 그리고 $\theta_2=88^\circ$ (흔히 사용되는 실험값들임)의 경우 다중화 갯수는 $M \approx 3,071$ 정도가 됨을 알 수 있다. 그림 9는 AOD를 이용한 각 다중화 홀로그램 기록 시스템을 나타낸 것이다.



(그림 9) 각 다중화 기록 시스템

2. 파장 다중화(wavelength multiplexing)

파장 다중화 방식에서는 기준빔과 물체빔의 각은 일정하게 유지되지만 레이저의 파장은 노출시마다 변화되면서 홀로그램 데이터를 기록하게 된다. 기록된 홀로그램 데이터는 특정 어드레스 파장과 같은 파장의 기준빔을 사용해서 개별적으로 액세스 될 수 있다. 그림 10은 매질의 표면에 수직으로 들어가는 물체빔과 물체빔과 반대방향으로 진행하며 입사각인 θ_R 인 기준빔간의 간섭에 의해 기록되는 홀로그램의 기하학적 구조를 나타낸 것이다.



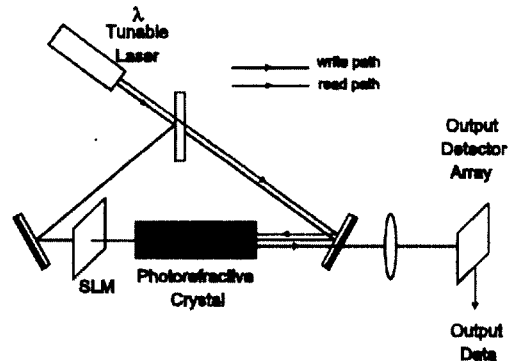
(그림 10) 파장 다중화 홀로그램의 기하학적 구조

여기서, 특정 홀로그램을 레이저 주파수가 ν (즉, $\frac{c}{\lambda}$)인 기준파로 기록한 뒤 같은 각도에서 $\nu - \Delta\nu$ 의 기준빔으로 홀로그램을 읽어냈을 때 허용가능한 레이저주파수 간격은 식(4)와 같이 주어진다.

$$\Delta\nu \approx \frac{c/n}{L_z(1 + \cos\theta_R)} \quad (4)$$

따라서, 식(4)로부터 주어진 파장에서 선택도는 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 820nm까지 가변될 수 있고, $L_z=1cm$ 이고 $n=2.2$ 라면, 허용가능한 주파수 간격은 $\Delta\nu=2.95GHz$ 가 된다. 따라서 최대 3,100개의 홀로그램을 하나의 광굴절



(그림 11) 파장 다중화 기록 시스템

매질내에 파장 다중화하여 기록할 수 있음을 알 수 있으며 그림 11은 파장 다중화 기록기법을 구현하는 단순한 구조의 한 예를 나타낸 것이다.

3. 위상코드 다중화(phase code multiplexing)

위상코드 다중화기법은 입력 데이터를 서로 직교 특성을 갖는 랜덤 위상코드의 기준파와 간섭을 통해 기록하고 재현시 특정 물체 패턴을 그와 대응하는 위상코드 패턴을 기준빔으로 하여 홀로그램을 조사 함으로써 판독해 낼 수 있다. 위상코드 다중화 기록 시스템은 각 다중화 기록방식에서 주사장치가 위상형 SLM으로 대체되고 telecentric optics가 퓨리에 렌즈를 대체하는 것을 제외하면 동일하다. 기준파의 SLM에는 Walsh-Hadamard 코드와 같은 직교코드군으로부터 하나의 위상코드가 입력된다. 각 위상코드 기준파는 많은 수의 평면파로 구성되기 때문에 위상코드 기술은 개개의 평면파에서 생기는 효과가 서로 평균화되기 때문에 홀로그램 재현시 보다 균일한 출력을 만들어내게 된다. 위상코드 다중화 기법에서의 문제점은 위상코드 소자인 기준빔의 위상형 SLM에 의해 나타난다.

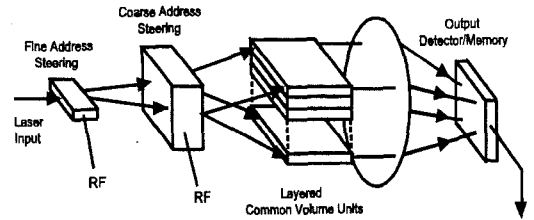
실제로 위상형 SLM은 화소간 위상의 불균일성과 각 화소의 위상변조 특성의 정확한 조정이 어렵기 때문에 위상코드의 직교특성이 약화되고 cross talk가 증가 된다. 더욱이 유한한 크기의 화소크기에 의해 cross talk가 증가될 수 있는데 이는 홀로그램 평면에서 평면파 성분들이 균일하지 않기 때문이다. 그런데, 이것은 각 화소의 크기를 줄여서 보다 균일한 평면파 성분들을 만들 수 있는 lenslet 어레이와 같은 미소광학계로 보완될 수 있다.

4. 공간 다중화(spatial multiplexing)

일반적으로 광굴절 매질에 저장되는 총 홀로그램 개수(M)와 홀로그램 회절 효율(η) 사이에는 식(5)와 같은 관계식이 주어진다.

$$\eta = \frac{\eta_{max}}{M^2} \left(\frac{\tau_c}{\tau_w} \right)^2 \quad (5)$$

윗식에서 η_{max} , τ_w , τ_c 는 최대 회절 효율, 기록 및 지움 시정수에 해당한다. 식(5)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 1Mbit의 데이터를 포함하고 있다고 하면 각각의 볼륨 홀로그램 유니트에서의 저장용량은 10Gbit로 제한될 수밖에 없다. 결과적으로 보다 많은 홀로그램 데이터를 저장하기 위한 방법으로 그러한 여러개의 볼륨 홀로그램 유니트를 공간적(spatially)으로 다중화함으로써 증가시킬 수 있다. 그림 12는 그러한 볼륨 기록 유니트의 어레이로 적층된 형태를 나타낸 것이다. 여기서, “coarse” 어드레스는 기록 및 판독빔을 적당한 층으로 편향시키고(공간 다중화) “fine”어드레스는 선택된 층의 볼륨 유니트내에서 특정 홀로그램페이지로 편향시키게 된다(각 다중화). 현재, AOD를 사용한 각 다중화 기법에서 1,000개의 위치에서 $20\mu s$ 의 고속 랜덤 액세스가 가능하다.



(그림 12) 공간 다중화 기록 시스템

5. 고정(fixing)방법

광굴절 결정 홀로그램을 이용하는데 있어서 가장 큰 문제점은 홀로그램이 읽어내는 빛에 의해 지워지고 따라서, 많은 수의 홀로그램을 기록하고 읽어 낼 때에 저장된 정보의 손실을 가져오게 된다는 점이다. 이러한 원하지 않는 홀로그램의 지워짐을 피하고 비파괴적으로 읽어 내는 것이 무엇보다 중요하며 많은 연구가 진행되어 왔다. 그중 가장 성공적으로 수행된 것이 홀로그램 고정(fixing)

이고, 열적(thermal) 방법과 전기적(electrical) 방법, 혹은 두가지 방법을 혼용하는 방법이 있다.

고정은 결정내에 존재하는 이온 결합의 열적으로 활성화된 운동으로 이루어지며 홀로그램을 기록하는 동안 또는 기록하고 난 후에 수행될 수 있다. 즉, 고온에서 이 이온 결합들이 전자에 의한 공간 전하 패턴을 중성화시킨다. 이 과정에서 전자에 의한 패턴은 상대적으로 안정하게 남아있기 때문에 이온에 의한 전하패턴은 원래의 홀로그램의 복제품으로 형성된다. 상온에서 이온패턴은 안정화되며, 전자들이 입사하는 빛에 의해 재배치될 때 순 공간 전하 패턴이 나타나며 따라서 고정된 홀로그램을 읽어낼 수 있다.

열적 고정은 고온에서 결정내에 상온에서는 지워지지 않는 보상이온 전하격자(compensating ionic charge grating)가 형성되는 것인데 LiNbO_3 , $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, KNbO_3 , 그리고 BaTiO_3 등의 광굴절 결정에서 사용되고 있다. 전기적 고정은 상온에서 광굴절 결정에 외부 전기장을 인가함으로써 얻어지는데, 상대적으로 간단하다는 이점은 있으나 $\text{Sr}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN: 75)와 BaTiO_3 등 제한된 종류에서만 성공적으로 사용되고 있다.

VI. 전 망

차세대 초대용량 정보저장 시스템으로서 가장 강력하고, 실현가능성이 높은 홀로그래픽 광 메모리 기술은 앞으로, 시스템화기술과 기록 미디어를 포함한 약간의 기술적 문제가 해결된다면 기존 정보저장 매체가 갖는 기술적 한계를 극복할 수 있는 새로운 차원의 원천 기술로 파악되고 있으며, 더욱이 이 기술이 실현될 경우 각설탕 크기의 미디어에 TByte급 이상의 초대용량 정보저장이 가능해질 뿐만 아니라, 초고속 병렬처리(1Gbit/s 이상)가 가능해 지기 때문에 기존 정보산업의 일대 지각변동이 예상되고 있다.

이러한 시스템은 CD, DVD, MOD 등과 같은 기존 메모리와 달리 차세대 멀티미디어 정보통신에

서 강력히 요구되는 초대용량 및 초고속 데이터 전송의 특성을 동시에 갖는 유일한 차세대 메모리 시스템으로 이와 같은 기술적인 특징은 상업적, 군사적 목적에 있어서 엄청난 응용 가능성을 제시해 주고 있다. 즉, 초대용량 데이터 베이스(항공, 군사, 의료, 관공서, 도서관)의 사용과 유지에서 뿐만 아니라 초대용량 디지털 비디오 서버, 3차원 입체 동화상 정보통신, 우주항공, 뉴럴 컴퓨팅, 네트워크, 컴퓨팅 및 워크스테이션 서버등에 홀로그래픽 대용량 메모리 시스템이 해결책을 제시해 주고 있다.

참 고 문 헌

- [1] I. McMichael et al., "Compact holographic storage demonstrator with rapid access," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 14, pp.2375-2379, May, 1996.
- [2] IBM Team, "Holographic storage promises high density," *Laser Focus World*, vol. 23, no. 11, pp. 81-93, Nov. 1996.
- [3] J. Hong et al., "Volume holographic memory systems: techniques and architecture," *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 8, pp. 2193-2230, Aug. 1995.
- [4] D. Psaltis & F. Mok, "Holographic Memories," *Sci. Am.*, vol. 273, no. 5, pp. 70-76, Nov. 1995.
- [5] J. Hong & D. Psaltis, "Dense holographic storage promise fast access," *Laser Focus World*, vol. 23, no. 4, pp. 119-124 Apr. 1996.
- [6] W. Moerner & N. Peyghambarian, "Advances in photorefractive polymers: Plastics for holography and optical processing," *Opt. & Photo. News*, pp 24-29, March 1995.
- [7] T. Higgins, "Optical storage light the multimedia future," *Laser Focus World*,

vol. 22, no. 9, pp. 103-111 Sep. 1995.

BYTE, pp. 179-182 Sept. 1992

[8] P. Asthana & B. Finkelstein, "Superdense optical storage," Spectrum, pp. 25-31, Aug. 1995.

[10] F. Yu & S. Jutamulia, Optical Storage and Retrieval, Marcel Dekker, New York, 1996.

[9] D. Psaltis, "Parallel optical memories, "

저자 소개



金 恩 洙

1955年 8月 1日生

1978年 2月 연세대학교 전자공학과 공학사

1980年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 공학석사

1984年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 공학박사

1981年 3月~현재

광운대학교 전자공학과 교수

1996年 1月~현재

대한전자공학회, 한국통신학회 이사, 전문위원장

1987年 2月~1988年 8月

미국 Caltech 전기공학과 객원교수

1989年 1月~1995年 12月

대한전자공학회, 한국통신학회 편집위원, 전문위원장

주관심 분야: 광정보처리, 홀로그래픽 광메모리, 3차원 입체 정보통신, 자동 표적 추적 및 식별, 뉴럴 컴퓨팅등