

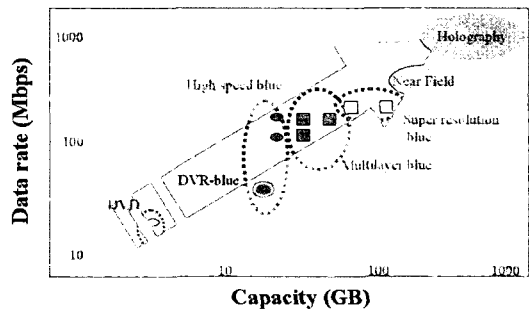
홀로그래픽 메모리의 원리와 현황

이병호, 한승훈 (서울대학교 전기 컴퓨터공학부)

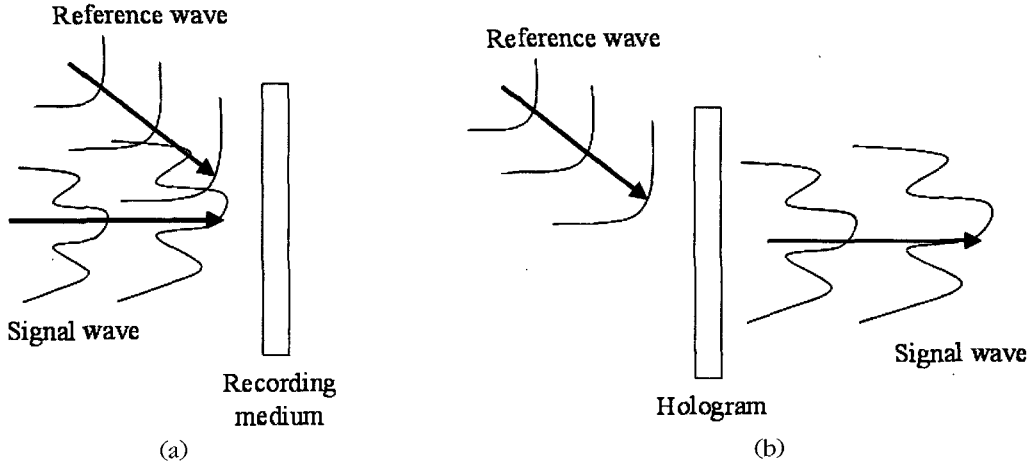
1. 서론

광 정보저장 기기는 그 동안 산업적으로 성공적인 발전을 해 왔다. CD, DVD와 같은 상품들은 거의 모든 가정과 직장, 그리고 컴퓨터에서 쓰이며, 그 정보 저장 용량과 정보 전달율에 있어서 계속적인 향상을 가져 오고 있다. 그림 1에서 보듯이 이러한 개발 추이는 100 GB 급 저장 용량 및 300 Mb/s 급 정보 전달율을 가지는 시스템을 DVD 기술의 연장 선상에서 가능하게 하고 있다. 하지만 이러한 CD, DVD 방식의 제품에 있어서는 그 이상에 대한 기술적인 한계가 예상되며, 이를 극복하기 위해 근접장(near field) 기술과 홀로그래피 (holography) 기술이 각각 준비되고 있다.^[1-3] 근접장 기술의 경우 1 보다 큰 높은 개구수(numerical aperture)를 가지는 렌즈계로 광학적 탐침을 만들기 때문에 100 nm 수준의 spot을 이용할 수 있지만, 그 반대급부로 수십 nm 수준으로 탐침을 광디스크에 접근시켜야 하므로 기계적인 시스템 부담이 커지게 된다. 이에 반하여 홀로그래피 기술은 다수의 정보를 정보 페이지로 만들어

서 기록 매질에 체적 형태로 증첩 기록하기 때문에 정보 용량과 전달 속도를 ~1 TB급과 ~10 Gb/s 급으로 증가시키면서도 그 요구되는 기계적인 정밀도는 근접장 방식에 비해 완화되는 경향이 있다. 이러한 홀로그래피를 이용한 holographic data storage(HDS) 기술을 상품화 할 수 있는 시장으로는 하드디스크 드라이브(HDD), HDD와 DRAM을 보완하는 extended DRAM, 대용량 백업장치, 그리고 DVD 기술 대체 등이 제안되어 있다.^[1-5] 본 고에서는 이러한 HDS에 대해 그 기술적인 원리와 중요 이슈 및 현재 기술 개발 동향을 정리하고 앞으로의 전망에 대해서 살펴보고자 한다.



〈그림 1〉 광 정보 저장기기 로드맵^[1]

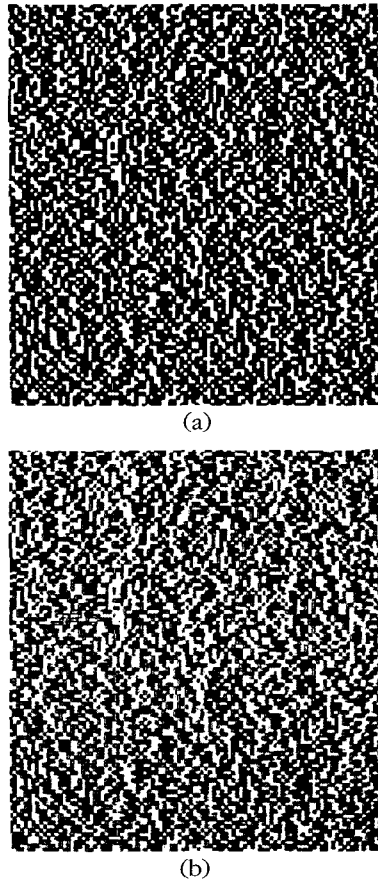


〈그림 2〉 홀로그래피의 원리 (a) 기록, (b) 재생

II. HDS의 원리

그림 2는 홀로그래피의 기록 및 재생의 개념을 보여준다. 가간섭성(coherency)을 가지는 레이저 광원을 통해서 만들어지는 신호빔(signal wave, 저장할 정보)과 기준빔(reference wave)이 기록 매질에 동시에 조사되면 두 광파의 공간적인 간섭패턴이 매질의 굴절률의 변조 형태로 기록된다. 이후에, 기록된 정보를 재생해 낼 때는 기준빔만을 다시 조사시켜 주는데, 이는 저장된 정보(매질의 굴절률 변조)에 의해 회절된다. 이렇게 회절된 빛은 원래의 신호빔을 그대로 재생한다. HDS의 경우 그림 3과 같이 2차원 배열의 데이터 bit들로 구성되는 정보 페이지가 신호빔으로 쓰이게 되며, 기준빔과의 간섭패턴이 저장되어야 하므로 만들어지는 홀로그래피의 부피가 광파의 파장에 비해 수천 배 (1 mm 수준)가 되는 특성을 가진다.

이와 같은 홀로그래피 원리에 의해서 만들어지는 HDS는 그림 4 (a)와 같은 형태로 그



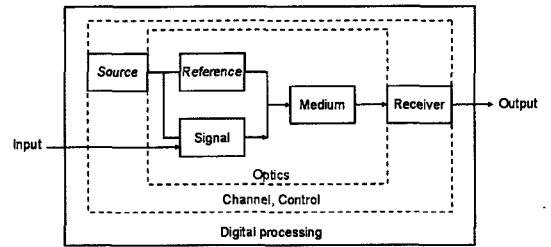
〈그림 3〉 HDS에 저장하는 정보 페이지의 예 (a) 기록되는 정보 (b) 재생된 정보

시스템을 이해할 수 있다. 그림 4(a)에서의 광학 시스템은 그림 4(b) 또는 그림 4(c)와 같이 구성된다. 레이저 광파가 carrier로 이용되는데, 이는 2차원의 공간 광 변조기(spatial light modulator, SLM)를 통하여 다수의 bit 정보(~1 Mbit 급)를 갖는 정보 페이지 형태로 변조된 후, 기록매질 안에서 기준빔과 간섭하여 기록된다. 기록매질로는 그림 4(b)와 같은 광굴절(photorefractive) 결정^[1]과 그림 4(c)와 같은 광폴리머(photopolymer)^[4]가 있는데, HDS로는 후자가 주로 쓰인다.

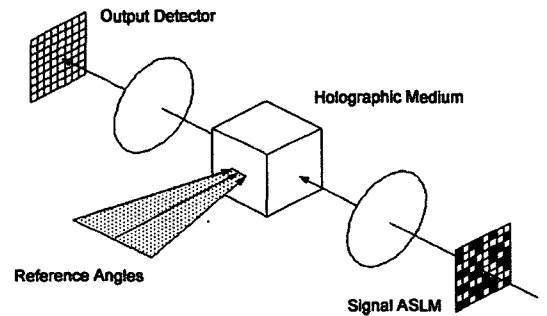
기록된 정보를 재생할 때에는 기준빔만을 조사시키며, 재생된 광파는 수신기인 2차원의 detector 열로 들어옴으로써 정보 재생이 이루어진다. HDS의 가장 중요한 특징은 기록시의 기준빔을 달리함에 따라 각각 다른 정보페이지들을 완전히 또는 일부 겹치는 저장매질 체적 안에 중첩시켜 기록하고(다중화), 이를 각각 해당하는 기준빔을 사용하여 구별하여 선택적으로 정보 페이지 단위로 읽어 낼 수 있다는 점이다. 이를 통하여 기존의 광정보 저장기기보다 저장용량 및 정보 전달율을 획기적으로 증가시킬 수 있게 된다. 이러한 다중화 기법에는 각도 다중화, 이동 다중화, 위상 다중화 등 다양한 기법이 제안되어 있다.^{[1]-[6]} 결과적으로 최종 시스템에 다중화되어 기록된 정보페이지들의 홀로그램들은 굴절율의 변조폭이 매우 작게 되며, 3차원 공간 주파수 영역에서 이들은 고유의 공간 주파수 체적을 확보하는 형태로 (마치, 라디오 통신 시스템에서 시간 주파수 영역을 서로 구분하여 나눠 쓰는 것처럼) 만들어지게 된다. 이 경우 재생시, 기준빔의 에너지에 대해 재생되는 신호빔의 에너지의 비율(회절효

율)은 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 수준으로 매우 낮게 된다.^[4, 5]

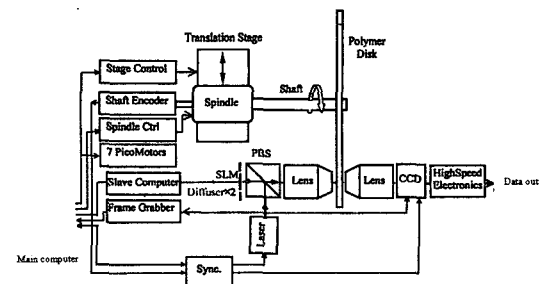
이러한 HDS를 구현하는 데는 그 기록 매질이 시스템의 성능과 구조에 큰 영향을 미치게 된다. HDS을 현실화하는 것과 관련하여 중요한 매질의 평가 요소에는 광학적 특성, 민감도, dynamic range (M-number,



(a)



(b)



(c)

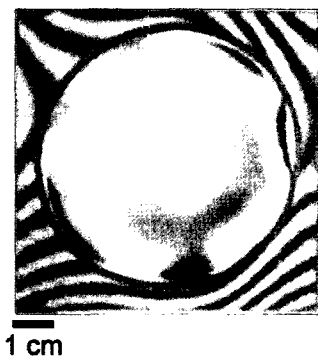
〈그림 4〉 HDS (a) 시스템 개념도, (b) 광굴절 결정 매질을 사용한 광학시스템 및 다중화 개념도^[1], (c) 광폴리머를 사용한 디스크형 광학 시스템^[4]

M/#), 휘발성 등이 있다. 광학적 특성으로는 기록 매질 자체가 광학 시스템의 요소로 존재하므로 그 광학적인 왜곡 및 산란 효과가 매우 작을 것이 요구되며, 민감도 측면에서는 기록시 작은 양의 광 조사만으로도 홀로그램의 큰 굴절을 변조를 얻어낼 것이 요구된다. 또한 dynamic range는 하나의 체적에 얼마나 많은 홀로그램 정보 페이지를 다중화할 수 있는냐와 연관되는 것으로써, 이것이 시스템을 결정하는 데 큰 영향을 미친다. 또한 WORM (write once read many) 형태의 정보 보관용 제품과 관련하여 기록된 정보의 지속가능한 시간을 나타내는 휘발성도 매질을 평가하는 중요 요소가 된다. HDS용 기록 매질로써 이러한 요구 조건을 만족시키는 제품은 Aprillis 사의 CROP photopolymer와 InPhase 사의 Tapestry photopolymer media가 존재하며, 후자의 경우가 현재 실용적인 시스템 개발에 많이 채택되고 있다(그림 5).

다음으로 이러한 HDS를 구성하는데 쓰이는 주요 소자 기술은 다음과 같다. 이러한 소자 기술의 성능과 가격은 최종 HDS의 성능 및 가격과 관련하여 제품화 설정에 영향을

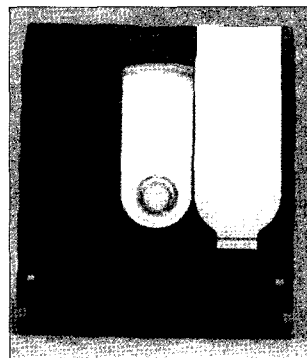
미치게 된다. 우선 광원으로서는 청색 파장의 레이저 다이오드가 DVD 기술 개발과 연계되어 HDS에 실용적으로 사용 가능하도록 현재 개발되고 있으며, 정보 페이지를 생성하는 SLM 또한 정보 저장과 재생 속도를 충분히 빠르게 할 수 있는 수준으로 Ferroelectric Liquid Crystal on Silicon (F-LCoS) 액정디스플레이 기술과 Digital Micromirror Device (DMD) 기술에 기반하여 제품화 되고 있는 상황이다. 또한 수신단의 detector 열로써는 500 frame/s 급 초고속 신호처리가 가능한 CMOS camera용 chip 구현이 보고되었다 (InPhase). 따라서 이러한 주요 요소 부품 기술이 충분히 개발되었고, 앞으로 더욱 성숙될 것임에 따라 HDS가 진입할 수 있는 시장도 더욱 넓어지게 될 것임을 예측할 수 있다.

마지막으로 전체적인 통신시스템의 특성인 채널 특성은 가간섭성 레이저 광을 사용하는 데서 오는 광학적인 잡음과 수신단의 detector 열에 존재하는 전기적인 잡음의 효과가 복합되어서 만들어 진다(그림 6). 이는 일반적인 통신 채널에서의 Gaussian 잡음 분포와는 구분되는 일종의 Rician 잡음 분포를



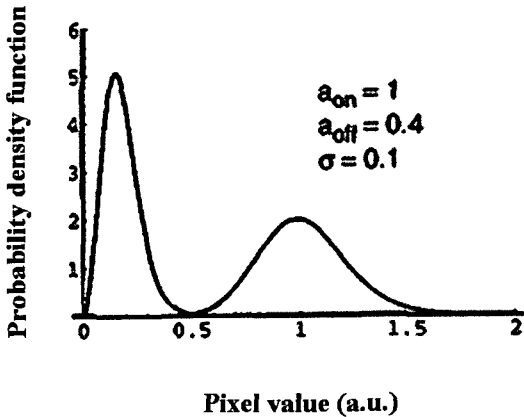
1 cm

(a)



(b)

〈그림 5〉 InPhase 사의 Tapestry media (a) 광학적 편평도 간섭계 패턴⁷⁾ (b) 제품용 카트리지



〈그림 6〉 HDS의 확률분포함수 특성[8]

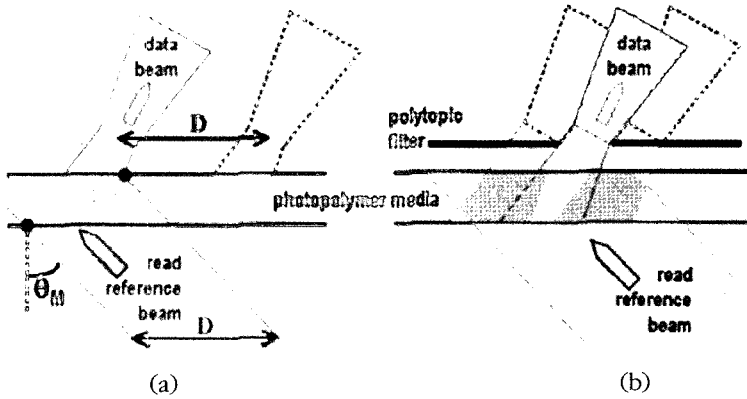
가지게 된다.^[8] 이러한 잡음 분포를 배경으로 하여서 HDS에서는 2차원의 정보 페이지에서 오류가 발생하기 때문에 2차원에 걸쳐서 오류정정 코드, 균등화(equalization) 기법, 인터리빙(interleaving) 기법 등을 적용해야 하며 이는 기존의 광 정보 저장기기에서의 상황과는 다른 디지털 정보처리 기술을 요구하게 한다.

III. HDS 개발 현황

HDS 제품의 본격적 개발은 미국의 InPhase Technologies사와 일본의 OPTWARE사에 의해 이루어지고 있는데, 각각 전문 광정보 백업 장치와 DVD 호환/대체 광 디스크 개발에 있어서 세계적인 선도를 하고 있다. 최근에 개최되었던 Optical Data Storage 2005 학회에서 InPhase사는 100 Gbit/in² 저장용량 및 200 Mb/s급 정보 전달율을 가지는 시제품을 보고하였으며, OPTWARE 회사는 40 Gbit/in² 급 저장용량을 보고하였다.^[9-12] 다음에서는 각 회사의 핵심 기술 및 관련된 이슈들을 살펴본다.

1. InPhase

InPhase사의 대표적인 기술은 Tapestry 매질을 기반으로 한 polytopic 다중화와 최근에 발표된 4/3 oversampling과 관련된 고속 정보처리 기술이 있다.^[9, 10] 앞서 소개한 HDS 시스템의 모든 요소에 대해 기술을 개발하고 있으며, 이는 그들이 목표로 삼고 있는 전문 광 백업 저장장치 및 고품질 video 시장에 대한 시제품을 제작하는 토대가 되었다. Tapestry 매질의 경우, 그 M/#가 매우 크기 때문에, 기존의 방식과 차별되는 polytopic 다중화라는 기법을 시스템에 적용할 수 있었다.^[8](그림 7) 그림 7(a)의 경우, 기존의 각도 다중화와 이동 다중화를 결합시키는 방식을 보여주고 있다. 기준빔(reference beam)과 신호빔(data beam)이 중첩되는 곳에서 각도 다중화를 하여 여러 정보 페이지를 저장한 후, D만큼 공간 상으로 이동시켜서 다음 홀로그램들의 다중화를 하게 된다. 여기서 D는 기준빔의 직경 수준으로 이루어지게 되며, 매질의 많은 부분을 기록에 사용하지 않게 됨을 알 수 있다. 이와 비교하여 polytopic 다중화의 경우(그림 7(b))에는 그 상대적인 이동 다중화의 이동 거리 D가 신호빔의 초점상에서의 크기(Nyquist filter) 수준으로 결정됨을 알 수 있다. 즉 이동 다중화 이전의 각도 다중화된 홀로그램 정보 페이지들과, 이동 다중화 후 각도 다중화된 정보 페이지들 간에 공간적인 중첩이 이루어지는 것이다. 이 경우, 여러 홀로그램들이 계속 중첩됨에 따라 회절효율이 낮아지는 문제가 발생하게 되지만, InPhase사의 경우는 그들의 향상된 기록매질 특성(M/#)이 충분히 이를



〈그림 7〉 Polytopic 다중화 기법 개념도 (a) 기존의 각도 및 이동 다중화 결합 방식 (b) 제안된 polytopic 다중화 기법⁽⁹⁾

보상해 주므로 이러한 기법을 시스템에 도입할 수 있었다. 따라서 그들이 목표로 하는 고밀도 정보 저장기기를 세계에서 가장 선도적인 수준으로 개발해 낼 수 있었다.

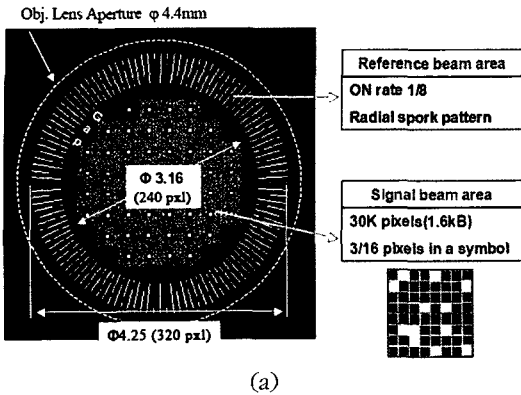
2. OPTWARE

OPTWARE 사는 기존의 CD, DVD 기술의 연장선 상에서 이를 대체할 수 있는 시스템을 만들기 위해서 collinear 홀로그래피 기법을 시스템의 골격으로 사용하였다[11, 12]. 이 기법은 홀로그램 기록시의 신호빔과 기준빔을 하나의 공통 광축으로 전파하게 하여 이들이 기록 매질 앞에서 대물렌즈에 의해 초점이 맺히면서 서로 간섭하여 기록되게 하는 기법이다. 이를 위해 OPTWARE에서 사용하고 있는 신호빔과 기준빔 축상 배열 형태는 그림 8(a)와 같다. 가운데 부분이 디지털 정보 페이지가 되며, 그 주변부에 기준빔에 해당하는 광파가 방사형으로 배열되어 있다. 이러한 패턴의 신호빔과 기준빔 조합이 매질 내에서 간섭하여 홀로그램을 기록하게 되고, 재생시

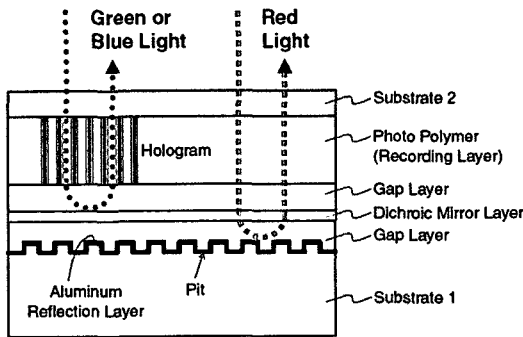
는 기준빔 패턴만을 조사시킴으로써 기록된 신호빔들이 추출되게 된다 (그림 8(b)). 이 경우 홀로그램 기록이 되는 photopolymer 밑의 층에 dichroic 거울층이 존재하기 때문에 재생되는 신호빔이 반사되어 원래의 광학계로 도파하게 됨을 알 수 있고, 이를 이용하여 기존의 CD, DVD의 pickup 시스템과 유사한 형태로 HDS를 개발할 수 있다. 또한 dichroic 거울층 밑으로 기존의 CD, DVD와 호환될 수 있는 pit 형태의 정보들 및 servo 제어 정보를 만들어 놓고 이를 다른 파장의 광원으로 처리할 수 있게 함으로써 그들이 목표로 하는 호환성 문제를 해결하고 있다.

3. 표준화

이와 같은 HDS가 실제로 개발이 완성되어 감에 따라 InPhase 사와 OPTWARE 사를 중심으로 전략적 기술 제휴를 맺고, 또 표준화를 이루어 내려는 움직임이 매우 활발하게 이루어 지고 있다. 각 회사 모두 광학, 매질, 소자, 그리고 서보 및 시스템 기술에 있어서 세



(a)



(b)

〈그림 8〉 Collinear 홀로그래피 (a) 신호빔과 기준빔 패턴⁽¹¹⁾ (b) 기록 매질 디스크 구조⁽¹²⁾

계적인 굴지의 기업들과 공동 개발 및 제휴 관계를 맺어 연구를 진행하고 있으며, 최근에는 OPTWARE 사 쪽에서 ECMA(European Computer Manufacturers Association)에 홀로그래픽 정보 저장기기와 관련된 표준화 기구를 만드는 작업을 시작하였다. 여기서 그들은 collinear 홀로그래피 기술에 기반한 HVD(Holographic Versatile Disc) 시스템을 표준화에 채택되도록 시도하고 있으며, 이에 InPhase 사도 같이 참여하여 표준화 작업에 상호 작용하고 있다. OPTWARE 사는 2006년 말까지 30 GB급 용량의 소형 HVC(Holographic Versatile Card) 제품을 출시할

계획을 발표한 바 있으며, InPhase 사는 300 GB급 용량의 드라이브 시스템을 2006년 경에 완성할 것이라고 발표하였다.

IV. 결론

이상에서 살펴 본 바와 같이 HDS는 차세대 광정보 저장기기로써 기존 기술들의 한계를 뛰어넘는 기술적 우월성을 가짐이 분명하다. 새로운 저장기기 제품을 만들어 내는 것이기 때문에 매질에서부터 소자, 신호처리 기술까지를 아우르는 총체적 개발이 요구되며, 이는 시장 창출 및 변화와 연관하여 매우 복잡한 상호 작용이 이루어지게 한다. 국내의 경우, 산학연에 걸쳐서 그 동안 HDS의 각 분야에 걸친 연구가 전개되어 왔다. 대우전자, 서울대, 한양대, 충북대, 삼성종합기술원, 화학연구원 등 여러 연구 기관에 걸쳐서 많은 관련된 전문가들과 기술들이 분포하고 있는 상황이다. LG전자, 삼성전자 등 국내 전자회사들이 광 정보저장 기기에서 세계적인 우위를 확보하고 있다는 점을 감안할 때, 이와 같이 현재 확보할 수 있는 국내 기술들과 세계적인 선도 기업들과의 전략적인 개발의 조합을 정교히 만들어 나감으로써, 차세대 광 정보저장 기기에 있어서도 많은 기여 및 가치 창출을 할 수 있을 것이다.

 참고 문헌

- [1] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280, August 2004.
- [2] 이병호, "회절광학소자, 3차원 디스플레이, 광메모리의 원리와 현황," Exhibition OSK 2005 Special Session, pp. 79-150, 2005년 2월.
- [3] 이병호, "광기술 연구개발 현황-홀로그래피 국가지정연구실," 광학과 기술, 제 5권 3호, pp. 38-47, 2001년 7월.
- [4] National Storage Industry Consortium (USA), *International Workshop on Holographic Data Storage*, Nice, France, March 1999.
- [5] H. J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox, eds., *Holographic Data Storage*, Springer-Verlag, 2000.
- [6] J. Ashley, M.-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, B. Marcus, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, and G. T. Sincerbox, "Holographic data storage," *IBM J. Res. Develop.*, vol. 44, no. 3, pp.341-368, May 2000.
- [7] L. Dhar, A. Hale, H. E. Katz, M. L Schilling, M. G. Schnoes, and F. C. Schilling, "Recording media that exhibit high dynamic range for digital holographic data storage," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 7, pp. 487-489, April 1999.
- [8] C. Gu, G. Sornat, and J. Hong, "Bit-error rate and statistics of complex amplitude noise in holographic data storage," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 14, pp. 1070-1072, July 1996.
- [9] K. Anderson, E. Fotheringham, A. Hill, B. Sissom, and K. Curtis, "High speed holographic data storage at 100 Gbit/in²," *Optical Data Storage 2005*, ThE2, July 2005.
- [10] M. R. Ayres, A. Hoskins, and K. Curtis, "Image oversampling for holographic data storage," *Optical Data Storage 2005*, ThE4, July 2005.
- [11] H. Horimai, X. Tan, and Jun Li, "Collinear holography," *Appl. Opt.*, vol. 44, no. 13, pp. 2575-2579, May 2005.
- [12] K. Ishioka, K. Tanaka, N. Kojima, A. Fukumoto, and M. Sugiki, "Optical collinear holographic recording system using a blue laser and a random phase mask," *Optical Data Storage 2005*, ThE3, July 2005.

저자소개



이 병 호

1994년 9월 - 현재 서울대학교 근무, 현재 정교수
 2002년 8월 - 2003년 8월 University of California
 at Santa Barbara 방문 교수
 1999년 8월 - 2004년 국가지정 홀로그래피기술 연
 구실 운영
 2002년 2월 제 5회 젊은과학자상 수상
 2002년 8월 국제광공학회(SPIE) Fellow
 2005년 3월 미국광학회(OSA) Fellow
 주관심 분야 3차원 디스플레이, 회절광학 소자, 홀로그
 램 응용, 광섬유 격자, 다파장 레이저 등



한 승 훈

2000년 2월 서울대학교 전기공학부 학사
 2005년 8월 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부
 Ph.D.
 2005년 9월 - 현재 서울대학교 반도체공동연구소 연
 구원
 1999년 8월 - 2004년 국가지정 홀로그래피기술 연
 구실 참여
 주관심 분야 홀로그래피 응용 및 광자 결정, 나노/바이
 오 광학