특집 | 광 메모리

블루레이 디스크 및 픽업 기술 (The Key Technologies for Blu-ray)

서 훈*, 김태경**

1. 개요

고도 정보화 사회의 요구에 부응하여 12-cm 광디스크는 CDs, DVDs 및 최근에 개발이 진행된 블루레이 디스크(Blu-ray Disc: 이후, BD라 칭함) 표준화는 각각 1982, 1996, 2002년에 시작되어 고밀도, 고성능의 기술개발로 전개가 되고 있다. 각 매체의 기록용량은 그림 1에 나타낸 것처럼 0.8GB, 4.7GB 그리고 BD의 경우 27GB(통상은 25GB까지 기록함) 까지 대응이 되도록 되어있다.

레이저 광과 대물렌즈에 의한 집광 스폿을 이용하여 정보를 기록하거나 기록된 정보를 재생하는 광디스크 장치에서, 기록용량은 집광되는 스폿 에 의해 결정된다. 레이저광의 파장 λ와 대물렌즈 개구수 NA(Numerical Aperture)라 할 때, 집광 스폿 크기는 다음과 같이 결정된다. 그림 2에 각 기록 매체 별 집광 스폿 직경을 나타내었다.

따라서 광디스크의 고밀도화를 위해 광디스크 정보기록면 에 맺히는 스폿의 크기를 줄이려면, 단파장의 광원과 개구수가 높은 대물렌즈의 채용이 필수적이다. 650nm 적색 광원과 개구수 0.6 대물렌즈를 사용한 DVD의 용량이 4.7GB인데 비해 BD의 경우, 405nm의 청색 광원과 NA 0.85의 대물렌즈를 사용하여 DVDs의 약 5배인 25GB의 용량을 달성하였다. 이러한 용량은 가령 24Mbps의 전송속도로 HDTV 디지털 방송을 2시간 이상 녹화하기 위한 용량에 해당한다.

이러한 고 용량의 기록매체 및 시스템 기술을 달성하기 위해 상기의 단파장 및 고 NA 대물렌즈기술 채용 이외에도 레이저 빔이 투과하는 기판(커버층)의 두께를 0.1mm로 얇게 하여 수차(aberration)를 줄여 주고 있다. 커버층

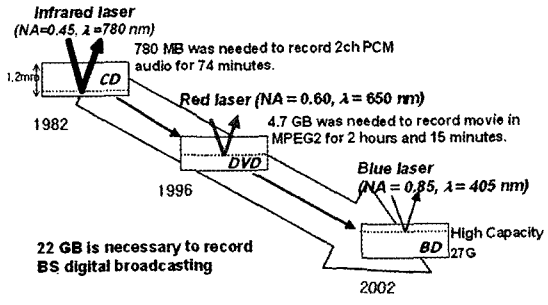


그림 1. Consumer용 광디스크 기술의 전개

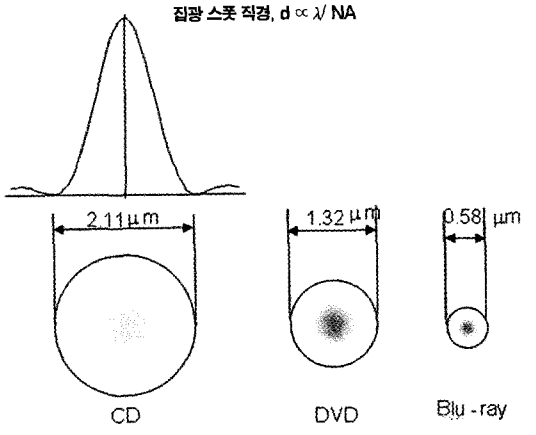
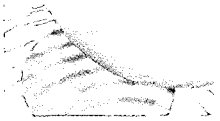


그림 2. 집광 스폿 직경 비교

* LG전자기술원 소자재료연구소 책임연구원
** 삼성전자 DM연구소 수석연구원



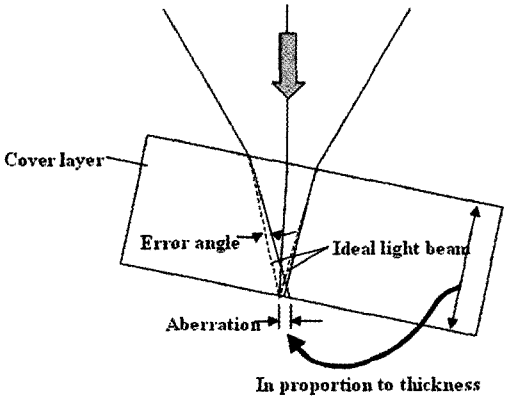


그림 3. 디스크 경사 의한 수차 발생

의 두께가 얇게 될수록 대물 렌즈의 레이저 빔 집광 성능은 좀더 쉽게 달성이 된다. 이를 조금 더 자세히 설명을 하면, 고 NA 에서 대물 렌즈의 광축이 디스크 표면의 수직으로부터 벗어 나면 광집속 성능의 열화(aberration)가 발생하는데, 이 수차량은 NA의 3승에 비례하고 커버층의 두께에 비례하여 증가한다. 그림 3에 기판 이상적인 광축에서 벗어날 때 굴절각에 이상이 발생하여 초점위치에서 수차가 발생함을 나타내었다. 이러한 설계에 의해 수십 마이크로 미터 이상의 요구 사양과 디스크 표면 오염에 대한 신호열화 방지 및 커버층 양산성 등을 고려하여 0.1mm 두께로 설정이 되었다.

BD의 특징의 하나로 기록층이 2개인 2층형(Dual Layer) 디스크가 있는데 이 경우 1층형(Single Layer)의 2배인 54GB(통상은 50GB까지 기록함)의 용량까지 대응이 된다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 2층형 디스크의 경우 기준 기록층인 L0와 25 ㎛ 정도의 간극을 두고 L1 층이 있고 이 L1층과 디스크 표면의 거리는 75㎛으로 되어 있다. 이와 같이 BD 커버층의 기준 두께는 100㎛ 인바, 2층형의 경우에도 L0층이 기준면으로 100㎛의 광투과층 두께를 형성 하고 있다. 이와 같이 하여 고 개구수 대물 렌즈에 대해서도 기존의 DVD 수준의 오차 허용치(Tolerance)를 달성 하고 있다.

이 외에도 BD의 특징으로 트랙 포맷은 기록 매체에 형성되어있는 한쪽 그루브에 기록 하고 있는데, 이는 반복기록형(Rewritable), 1회 기록형(Recordable) 그리고 재생 전용형(ROM) 포맷 간의 확장 전개의 용이성 및 광 픽업의 설계의 용이성 등의 이유로 채용이 되었다. 그림 5에

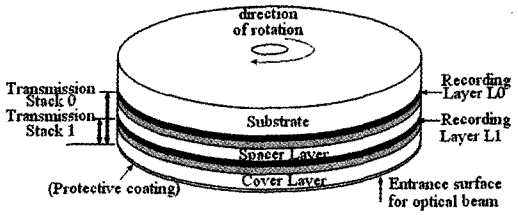


그림 4. 2층형 BD (Dual Layer BD)

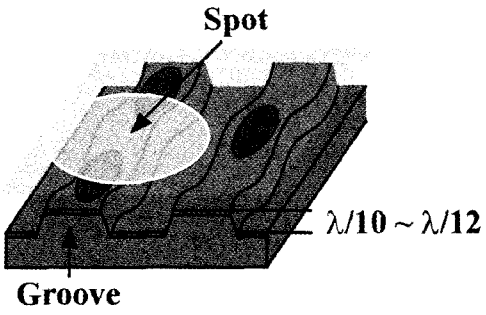


그림 5. 그루브 기록(Groove Recording)

표 1. 블루레이 디스크 사양

Capacity	23.3/25/27GB(single layer)
Wave length of the laser	405nm
Numerical Aperture	0.85
Data transfer rate	36Mbps
Diameter of the disc	120mm
Thickness of the disc	1.2mm
Center hole diameter	15mm
Recording method	Phase change
Signal modulation	1-7PP
Data track	Groove recording
Addressing method	Wobble
Visual data	MPEG-2 video
Audio data	AC3,MPEG-1-Layer2, etc.
AV multiplex method	MPEG-2 Transport Stream

는 반복 기록형 BD에서 채용되고 있는 그루브 기록을 나타내었다. 이 그루브 기록은 또한 디스크 상의 어디에 정보를 기록하면 좋을지 드라이브에 알려 주기 위한 어드레스(address)방식으로 워블(wobble) 을 반영하고 있다. 표 1에는 이러한 BD의 사양을 종합하여 나타내었다.

이 글에서는 이러한 고밀도 정보 저장을 위한 블루레이 기록매체 기술과 픽업에 대한 기술 등을 소개 하고자 한다.

블루레이 디스크 및 픽업 기술(The Key Technologies for Blu-ray)

2. 기록매체 기술

기록매체로는 결정질과 비정질 간의 가역적인 상변화(Phase-Change) 기록재료를 이용한 반복기록형(BD-RE), CD-R이나 DVD-R에서 구현한 것 과 같은 비가역적인 1회 기록형(BD-R) 그리고 디스크내부에 미세한 요철을 구성해 두고 반사층을 구성한 재생 전용형(BD-ROM)이 있다. 이 글에서는 이들 3가지 타입의 블루레이 디스크의 개발 상황에 대해 소개 하고자 한다.

2.1 반복 기록형 블루레이 디스크 (BD-Rewritable)

레이저 조사에 의해 유기되어 비정질-결정질 간에 생기는 가역적 상변화 현상을 응용하고 반복기록 가능한 광디스크를 만드는 시도는 1970년대에 처음 시작되어 20년이 지난 1990년대에 들어서 CD-RW, DVD-RAM 등으로 기술이 발전이 되었다[1,2]. 이후에 청자색 레이저 대응 상변화 광디스크 및 시스템 기술의 계속적인 발전에 의해[3,4] 반복기록형 블루레이 디스크 기술이 가능하게 되었다. 또한 신뢰성을 보상할 수 있는 많은 기술을 투입하는 것에 의해 디스크 한면 당 직경 120mm에서 50GB의 대용량을 실현 하고 있다[5].

기록 재생에 사용하는 레이저 빔을 적색에서 청색 대역으로 단파장화하고 대물렌즈의 NA를 크게 하는 것은 고밀도 측면에서는 장점이 있으나 파장의 변화와 레이저 빔 직경이 작아지면서 문제점도 발생하고 있는데 이를 표 2에 나타내었다.

표 2에서 알 수 있듯이 광디스크에서 연구과제가 되는 것은 첫째, 청색파장에 적합한 광학특성을 가지는 재료, 둘째, 재생 광을 높이는 연구, 셋째, 결정화 속도가 큰 재료의 연구가 필요하다. 추가적으로 BD를 실현함에 있어서는 레이저 노이즈의 저감, 광검출기의 신호 개선 등이 필요하다.

현재, 가장 현재, 가장 잘 연구되고, 실제로 제품에 적용되어 있는 상변화 재료는 그림 6에 나타내는 GeTe-Sb2Te3계(GeSbTe계)[7]와 Sb-Te(+α)계 (SbTe계)의 2개이다[1]. 전자는 반복기록 가능 횟수가 크다고 하는 특징을 가져 PD나 DVD-RAM에 사용되어 왔다. 한편, 후자는 반사율이 크다는 특징에서 CD-RW나 DVD-RW에

표 2. 레이저빔의 단파장화 및 고 NA에 따르는 상변화 기록의 과제[6]

	항 목	구동 메커니즘
1	상변화에 수반되는 광학적 변화량이 감소	굴절률 변화량(특히 상각계수 k) 이 작아짐
2	재생 파워의 상한이 저하	작은 광스폿에 집속되므로 파워밀도가 증가함
3	검출기의 S/N이 저하	현행 Si계 센서 감도 저하
4	보다 큰 결정화 속도를 갖는 재료가 필요하게 됨	광스폿이 작게 되므로 디스크에 빔조사 시간이 짧아짐

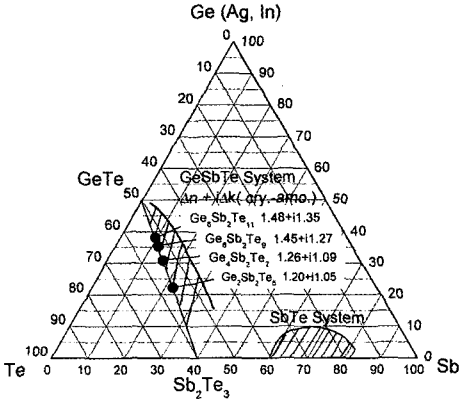


그림 6. 대표적인 2가지 상변화 재료계

적용 되어 왔다. BD에서는 본격적인 검토가 행해진 결과, 상기 어떠한 재료계 에서도 기본적인 성능을 달성할 수 있는 것으로 연구 되어 있다.

2.1.1 GeTe-Sb2Te3계(GeSbTe계)

청색 파장에 적합한 굴절율 변화를 크게 하기 위해 종래의 Ge2Sb2Te5 조성보다도 GeTe 성분비를 증가시킨다는 방향으로 신호 변화량과 반복 성능을 양립시키는 막조성 및 다층막 구조의 최적화를 시험해 보고 있다. 그림 6과 같이, BD 파장(405nm)에서의 굴절율 변화는 GeTe에 접근할 수록 커진다[8]. 다만 GeTe 조성 그 자체는 체적변동이 크게 반복되면 파괴되기 쉽고, 결정화 속도가 적은 등의 이유로 기록막에는 부적당하다. 또 이 재료계에 재생 내구성을 향상하는 방법으로서도, GeTe성분을 증대하면 결정화 온도의 상승으로 이어져 유효한 것을 알았다. 일반적으로 물질의 결정화 핵 생성과 결정 성장이라는 과정에 의하지만, 핵 생성 빈도는 기록막에 접하는 재료층의 조성을 선택하는 것으로 제어할 수 있다. 그래서, 계면층 재료를 연구하여 핵 생성 빈도를 최적화하는 것으로 재생광의 상한치를 향상시킬 수 있다.

2.1.2 Sb-Te+α계(SbTe계)

다른 하나의 재료계는 Sb-Te를 주성분으로 하는 조성이다. AgInSbTe나 AgGeInSbTe, Ge(Sb70Te30)-Sb 등이 보고 되고 있는데[9,10] 공통점은 Sb70Te30 근방의 단일상 조성을 Base로 Ge나 Ag, In 등의 원소를 더하여 결정화 속도나 결정화 시간 등을 제어하고 있는 점에 있다. 주요 원소인 Sb와 Te의 농도비 Sb/Te를 높이면 결정화 속도가 높아지지만 재생 내구성은 저하한다는 경향을 보인다. 그래서 결합을 강화하는 Ge, In, Ag 등을 첨가 원소로 더하고, 그 농도를 최적화하는 것으로 고속 결정화 성능과 재생광에 대한 내구성의 양립 균형을 꾀하고 있다.

2.1.3 반복 기록형 블루레이 디스크의 제조방법

단일층(Single Layer)의 경우 SbTe계 재료를 이용하여 시험 제작한 BD-RE 디스크의 단면 구성도를 그림 7에 나타내었다[10]. 표면에 그루브 깊이(Gd) 20~25nm 정도의 광 가이드용 요철 형태의 연속 그루브가 Spiral상으로 형성된 두께 1.1mm의 폴리카보네이트 수지 기판상에 6층 기록막을 종래의 순서와는 반대로 금속층(열확산층과 반사층의 기능)에서 순차적으로 sputtering법에 의해 적층 하고, 마지막으로 두께 100㎛ 두께의 수지 커버층을 형성한다. 여기서 반사층으로는 주로 Ag합금재료가 이용되고 유전체층의 경우 ZnS-SiO2 복합체 재료가 이용이 된다. 계면층의 경우 기록층의 상변태속도 및 기록마크의 안정성 등을 위해 구성이 되고, 산화물이나 질화물계를 이용하고 있다. 그림 8은 개발된 디스크를 이용하여 반복 기록에 따른 신호변동을 살펴본 결과, 1만회 까지 특성 열화가 나타나지 않은 것을 나타내었다[10].

2층 BD의 경우는 상기 제1의 기록층(L0층)을 형성한 후, 제 2의 기록층(L1층)용의 Guide Groove를 형성하는 공정이 Key 기술이 된다. 여기에서는 L0층 위에 투명 수지 Stamper를 사용해 Guide Groove를 구비한 자외선 경화 수지층을 전사하는 공정이 사용된다. 그 후에, 그 위에 역시 6층으로 이루어지는 L1층을 형성한다. 기록 재생시에 L0층 - L1층간에 광학적 · 열적 상호 교란 영향이 생기지 않는 최소의 두께로서 상기 중간층은 약 25㎛ 두께로 한다. 또 Lens와 L0층과의 거리를 단층 Disk의 경우와 같은 0.1mm로 한다는 의미로, Cover층의 두께는 75㎛ 두께로 했다. 단층, 2층 모두 신호의 기록 재생은 Cover층을 통해 행한다. Lens면과 Disk면과의 간격이

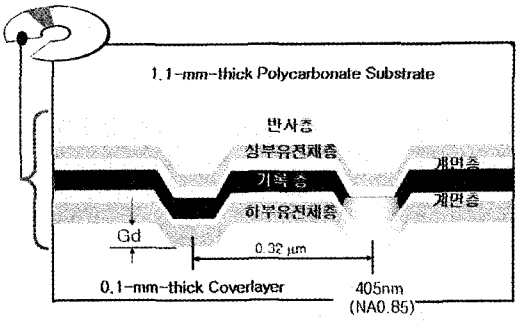


그림 7. 반복 기록형 블루레이 디스크 구조(Single Layer)

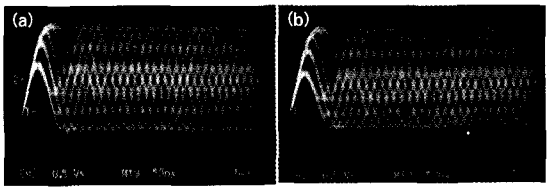


그림 8. a) Conventional equalized eye pattern after initial recording.
b) Eye pattern after 10,000 direct overwrite at 2x speed
(i.e. 72Mbps)

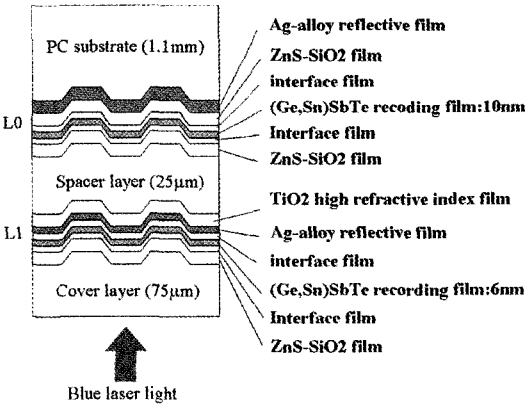


그림 9. 2층형 BD-RE 디스크 구조(Dual Layer)

0.1-0.3mm정도로 적기 때문에 안정된 기록 재생 동작을 하기 위해 Cover층이나 중간층의 두께 변동은 ±2㎛이하의 오차 이내로 얻고 있다. L1층의 경우 비정질 마크와 결정질 바탕(Matrix)간의 투과도 특성의 균형을 요구하며[11], L1층의 투과성을 높이기 위해 금속 반사층 위에 존재하는 TiO2 와 같은 고 굴절률의 최상부 유전체층이 제안되고 있다[12]. 또한 투과도 특성이 균형을 유지하면서 결정화 속도를 높이기 위해 GeSbTe계에 Sn을 첨가한 GeSbTeSn 기록층이 제안되고 있다[13]. 그림 9에 이를 적용한 2층형 블루레이 상변화 디스크의 다층 박막 구조를

나타내었다[5].

2.1.4 고속기록 BD-RE

BD는 기준 기록속도(User Data Transfer Rate)가 36Mbps의 값을 가지는데 이는 DVD-RW의 약 3배에 해당하며, HD급 비디오 기록이 가능하게 된다. 더욱이 반복 기록형 매체에서 이 이상의 기록속도는 PC나 방송기기에의 확대적용이 가능하므로 다양한 응용이 가능해진다. 현재 BD 규격에서는 1배속(36Mbps) 및 2배속(72Mbps)까지 대응이 되도록 정해져 있고 매체가 개발이 되어 왔다. 최근의 기술상황은 4x(i.e., 144Mbps) 까지 개발이 전개 되어 오고 있다. 그림 10에 고배속 기록용 BD-RE 제안 구조를 나타내었다[14].

고배속 매체에 대해서는 3가지 요소 기술이 제안되고 있는데, 첫째로 디스크 선속도가 20m/s에서 데이터 전송속도 144Mbps으로 기록하기 위해서는 포커싱 제어가 어려운데 이에 영향을 많이 주는 커버층의 표면상태가 아주 평탄할 것[15], 고속기록/소거에 적합한 높은 결정화 속도를 유지할 것[14], 고속기록시 기록된 비정질 마크의 경계 형태에 변형을 유발하는 레이저 에 의한 매체 내부의 잔열을 줄여 주기 위해 고속냉각속도의 박막 재료 및 구조를 제안하고 있다[14]. 이후에도 더 높은 고배속에 대한 연구는 계속 이어지리라 예상된다.

2.1.5 디스크 보호용 하드 코팅

BD는 디스크 얇은 커버층을 채용한 구조 이므로 스크래치나 지문 등이 디스크 표면에 발생하면 신호 에러율이 커지거나 트래킹 서보 등에 악영향을 주게 되는데, 이를 방지 하기 위한 방법으로 BD-RE의 경우 초기 개발시에는 카드릿지를 채용하는 경우가 있었다. 최근에는 이런 카드릿지가 없는 디스크 형태(Bare Disc)에서 문제점을 해결한 방법이 커버층 표면에 2~3mm 정도의 보호용 하드코팅이 개발되어 왔다[16,17,18]. 이런 bare type의 경우 레코더나 드라이버의 크기를 줄일 수 있고 디스크의 총 생산 단가를 낮출 수 있다는 장점이 있고, 사용자의 입장에서는 기존의 CD나 DVD에서의 사용환경이나 방법과 동일한 편리함을 제공받게 된다. 하드코팅재료는 여러 가지가 시도되어 왔으나 콜로이드 형태의 실리카 분산 자외선 경화 수지(colloidal-silica-dispersed UV-curable resin)가 가장 우수한 것으로 제안되고 있다[16]. 또한 지문

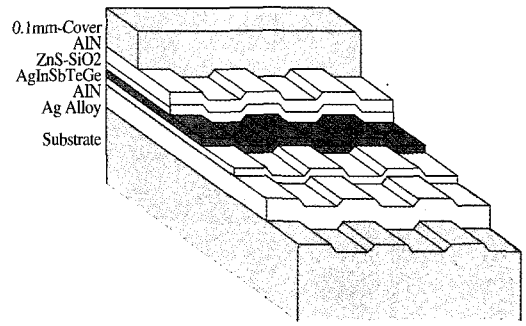


그림 10. 고배속 기록용 BD-RE 제안 구조(4x)

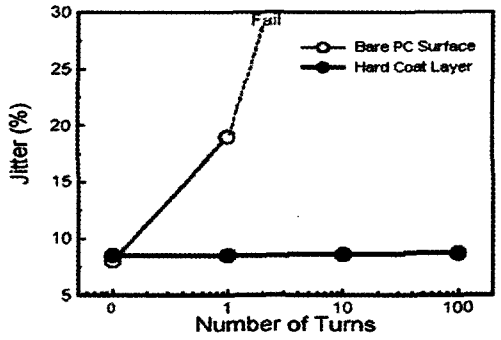


그림 11. 디스크 표면 마모테스트(Taber abrasion test) 후의 지터 변화
(Wheel: CS-10F, Load: 500 gf.)

에 대한 저항성을 증가를 위해 하드코팅에 윤활제(Silicone (metha)acrylates) 를 첨가 하거나[16], 불소계 화합물 재료로 표면처리[17,18] 하는 방법이 개발 되었다. 그림 11에는 디스크 표면 마모테스트(Taber abrasion test) 후의 지터특성 변화를 나타내었다[17]. 그림에서 알 수 있듯이 100회 마모 테스트 이후에도 지터 열화가 거의 나타나고 있지 않는 것을 알 수 있다.

2.2 1회 기록형 블루레이 디스크 (BD-Recordable)

1회 기록형 디스크의 경우 R(Recordable) 또는 WORM (Write Once, Read Many) 이라고 칭한다. BD-R에는 유기 색소계(Organic Dye-Based)와 무기계(Inorganic)으로 나눠진다.

2.2.1 유기색소계 BD-R

CD-R이나 DVD-R은 위상변조방식을 이용하고 기록을 하고 있는데 유기색소 기록막의 열분해와 기판의 열변형

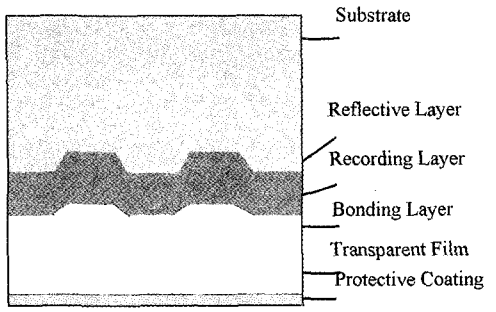
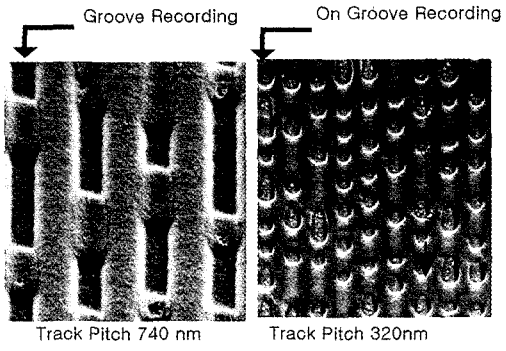


그림 12. 유기색소계 BD-R 디스크 단면구조



(a) DVD-R (4.7 GB) (b) Dye Based BD-R (23.3 GB)

그림 13. 유기색소계 Recordable 광디스크에서 기록pit의 SEM 관찰사진

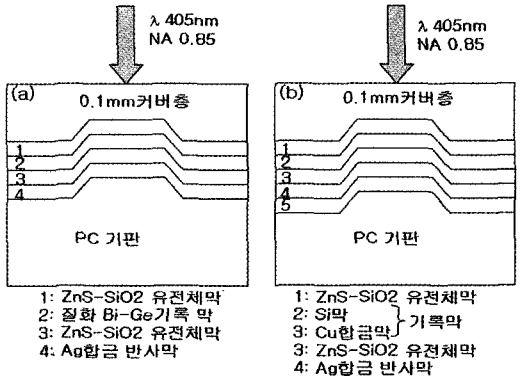
이 기록 메커니즘으로 생각 되어지고 있다[19]. BD-R에서는 이러한 열분해 및 열변형을 이용한 연구개발[20]과 반사율 변조 방식을 이용한 연구개발[21]이 진행되고있다. 그림 12에 유기색소계 BD-R용으로 제안된 구조[20]를 나타내었다. 유기색소층은 기존의 스핀코팅기술을 이용하여 제작이 가능하며 색소층과 기판 사이에는 금속 반사층을 형성한다. 기록막 상부에는 0.1mm 두께의 커버층을 형성한다. 기록 테스트한 디스크의 기록마크(여기서는 pit 형성)의 주사 전자현미경사진(SEM)을 그림 13에 나타내었다.

2.2.2 무기계 BD-R

ROM 디스크와 호환성을 유지 하기 위해서 CD-R이나 DVD-R에서는 ROM처럼 높은 반사도가 요구 되었다. 하지만 블루레이 규격에서는 상변화광 디스크인 BD-RE를 기반으로 하고 있으므로 BD-R도 12~24%의 반사도를 범위로 하고 있는 BD-RE와 호환성을 유지하고 있다. 추가로 BD-R에서는 고 기록속도가 요구되고 있으므로 무기계 재료를 이용한 BD-R의 설계는 유기색소계에 비해 유리한 점이 있다.

무기계 BD-R의 경우, BD-RE와 마찬가지로 반사율 변조 방식을 취하고 있다. 제작은 스퍼터링법을 이용한다.

그림 14에 나타내 바와 같이 대표적으로 제안된 무기계 BD-R 디스크 구조를 살펴보면, 그림(a)는 단일기록막 상분리형으로 Bi-Ge Nitride를 이용하여 기록막을 구성하고 기록막의 양측을 유전체로 보호하고 금속반사층을 둔 4층막구조[22]로 기록용량 25GB에 대응하고 데이터 전송속도 36Mbps(i.e. 1X)에서 기록파워 4.9mW로 평가시 Limit equalizer 이용하여 지터치(LEQ Jitter) 5.7%의 양호한 특성을 얻고 있다. 또한 72Mbps(i.e. 2X)에서는 기록파워 5.7mW에서 지터치 6.0%의 값을 얻어서 실용화 가능한 수준의 값을 나타내고 있다. 그림(b)는 기록막을 2중층으로 구성한 것으로 레이저 빔에 의해 2층이 혼합 또는 합금화하는 것에 의해 기록하는 것으로 Si막과 Cu합금막을 적층하여 기록막으로 하여 기록시 합금화가 이루어진다. 전체적으로는 5층막의 구조이다[23]. 25GB 대응하여 기록속도 1X, 2X에서 기록파워 5mW 이내 지



(a) 단일층 상분리형 (b) 2중층 기록막형

그림 14. 제안되고 있는 무기계 BD-R의 구조

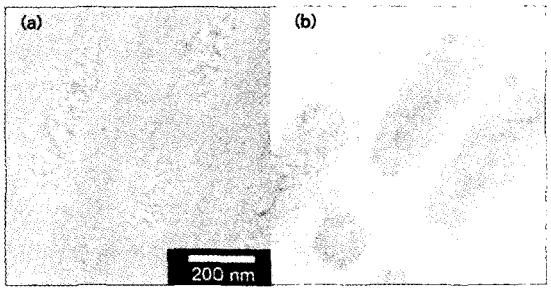


그림 15. 무기계 BD-R 기록마크의 투과전자현미경 사진

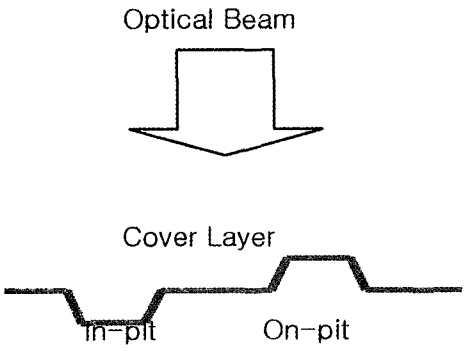


그림 16. BD-ROM에서의 pit 형상도

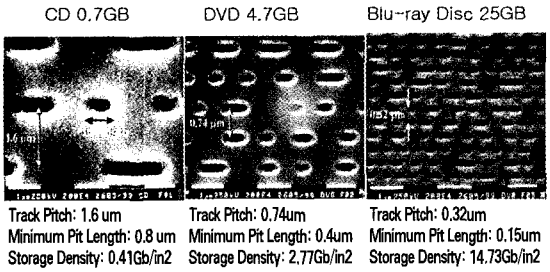


그림 17. CD, DVD 및 BD-ROM의 SEM 사진

터치가 6.5% 이하의 값이 얻어 졌고, 고속화 가능성 연구 결과는 4X 에서 기록파워 5.5mW 이내, 지터치가 8% 이하의 값이 얻어져 고배속 대응의 가능성을 보여주고 있다[23]. 그림 15에는 이들 디스크의 기록 마크의 투과전자 현미경 사진을 나타내었다.

2.3 재생전용 블루레이 디스크 (BD-Read Only Memory)

BD-ROM 디스크의 경우 기판의 표면에 미세한 pit를 정보로 하여 사전에 PC기판 사출 제작 시 형성하여 두고 이 위에 반사층을 형성하고 커버층을 형성 하는 방법으로 제작이 되는데, 이때 pit의 방향에 따라 레이저빔이 전파해 갈 때 오목한 형상을 만나게 되는 경우 In-pit 이라 하고, 반대로 볼록한 경우 On-pit이라 하는데, 이 두 가지가 규격에서 허용이 되어있다. 이는 디스크 제조공정의 에서의 다양한 가능성을 염두에 둔 것이다. 그림 14에 이들 형상을 나타내었다.

이러한 pit을 제조하기 위한 폴리카보네이트 사출공정을 위해 스탬퍼 라고 하는 금형을 사전 제작하여야 하는데, 이를 위한 방법으로 제시된 것은 상전이금속 마스터링(PTM: Phase Transition Metal Mastering), 액체침적 원자외선 마스터링(Deep-UV Liquid Immersion Mastering) 및 전자빔 마스터링(EBM: Electron Beam Mastering) 등이 있다. 그림 18에는 PTM방법으로 제작된 Dual Layer BD-ROM의 지터 특성을 나타내었다. 두 층에서 나온 신호의 품질이 동일한 수준임을 알 수 있다.

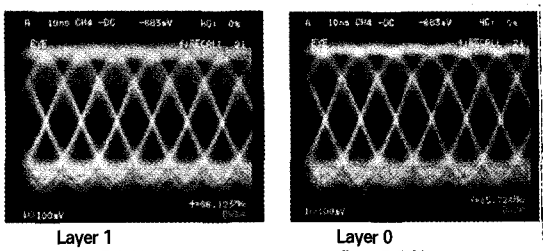


그림 18. Dual Layer BD-ROM의 지터

3. 픽업(Pick-up) 기술

광디스크의 고밀도화를 위해 광디스크에 맺히는 스폿의 크기를 줄이려면, 단파장의 광원과 개구수가 높은 대물렌즈의 채용이 필수적이다. 650nm 적색 광원과 개구수 0.6 대물렌즈를 사용한 DVD의 용량이 4.7GB인데 비해 BD의 경우, 405nm의 청색 광원과 개구수 0.85의 대물렌즈를 사용하여 25GB의 용량을 달성하였다.

렌즈 성능의 이상적인 상태와의 차이를 수차라고 부르는데, 광디스크용 렌즈의 경우 파면수차 WFA(Wave front aberration)를 이용하여 표현한다. 광디스크의 두께오차에 의해 발생하는 구면수차 W_{40}과, 광디스크의 경사에 의해 발생하는 코마수차 W_{31}은 아래와 같은 관계가 있다[24].

$$W_{40} = \frac{n^2-1}{8n^3}(NA)^4 \Delta d$$

$$W_{31} = -\frac{d}{2}\frac{n^2(n^2-1)\sin\theta\cos\theta}{(n^2-\sin^2\theta)^{5/2}}NA^3$$

여기서, Δd는 두께오차, θ는 디스크의 경사각, n은 기판의 굴절율, d는 기판의 두께 를 나타낸다.

따라서 DVD에 비해 구면수차가 6배 이상 발생하는 BD의 경우 기판두께 오차의 허용량이 줄었으나, dual

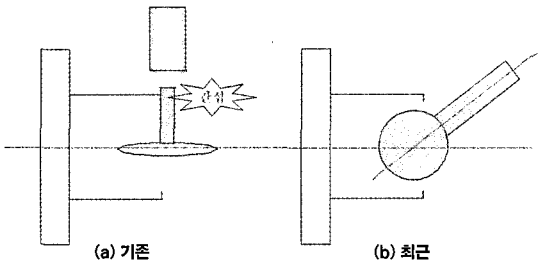
layer 의 경우 층간 간섭을 배제하기 위한 spacer layer의 두께를 고려하면 구면수차의 보정이 필수적이 되었다. 반면에 개구수가 커진데 반해 기판두께를 0.6mm에서 0.1mm로 줄여 코마수차의 발생량을 DVD와 거의 동일한 수준으로 억제하였다.

이 글에서는 고개구수 대물렌즈의 개발상황, 각종의 수차를 보정하는 기술 그리고 기존의 DVD와 CD를 호환하는 기술 등에 대해 소개하겠다.

3.1 대물렌즈

대물렌즈의 개구수가 0.7 이상의 경우, LD 파장변화에 의한 색수차를 제거하기 위해 저분산재료를 사용해야 하는데, 이 경우 재료의 굴절율이 작기 때문에 면의 곡율이 커져 렌즈성형에 필요한 금형가공이 곤란해진다. 즉, 그림 19(a)와 같이 렌즈 볼록면부 금형의 정점과 최외주부 광축방향의 깊이 새그(Sag)가 깊어지면서 금형가공시 바이트가 들어가는 각도의 한계를 넘어버리게 된다. 이러한 각도의 한계는 약 50~55도로 여겨졌으나, 그림 19(b)와 같이 바이트를 기울여 가공하는 방법이 개발되어 금형가공시의 한계가 높아지게 되었다.

또한 렌즈성형시의 렌즈면간의 편심허용량이 NA 0.6의 경우 10um 정도인데 반해, NA 0.85의 경우 수um 이



(a) 기존 (b) 최근

그림 19. 금형 가공법

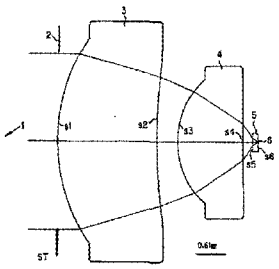


그림 20. 2군 렌즈[25]

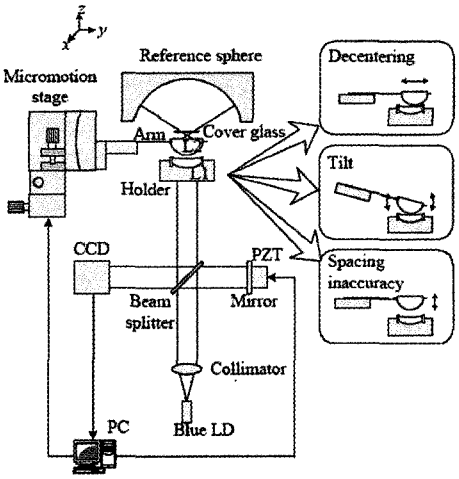


그림 21.

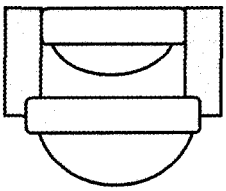


그림 22. 압입방법

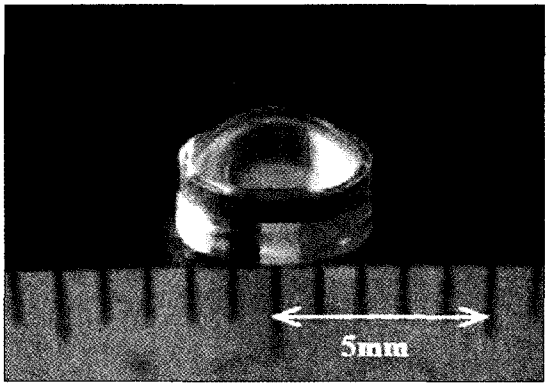


그림 23. NA 0.85 글래스 대물렌즈

내로 높여야한다. 따라서, BD 초기에는 굴절력을 분산시켜 각각의 렌즈의 금형과 성형에 요구되는 정도를 완화한 그림 20과 같은 2군 렌즈가 이용되었다. 그러나 이 경우 각 렌즈를 정밀하게 조립해야 되는 문제가 남게 되었다.

이 문제를 해결하기 위해, 그림 21[26]과 같이 간섭계를 이용하여 렌즈간 기울기, 동심 및 렌즈간 거리를 독립적으로 조정하는 방법이 이용되기도 하였다. 그러나 근래에는 양산성을 고려하여 수지로 제작된 경통에 압입방식으로 기울기 0.02deg, 동심도 3um 렌즈간 거리 1um을 달

표 3.

	디스크		픽업허용오차
	두께오차	DL	
BD	±5um	25um	±3um
DVD	±30um	55um	±33um

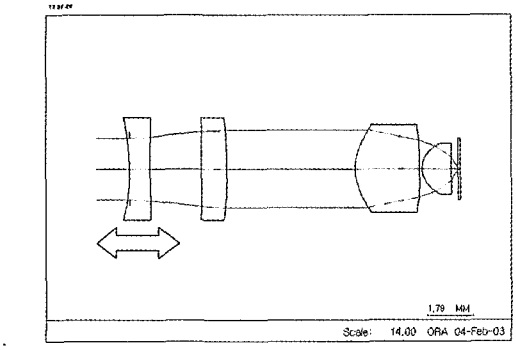


그림 24. Beam expander법

성하였다[27].

그러나 2군 렌즈의 경우 동심도를 확보하기 위해서는 렌즈의 작동거리가 0.2mm 내외로 짧아져 디스크와의 충돌 가능성이 높아지는 단점이 있다.

단매렌즈를 이용한 NA 0.85 대물렌즈는 2001년에 처음 보고되었으며[28], 2군 렌즈와 비교해 작동거리가 0.5mm로 길고, 조립의 과정이 필요없는 장점이 있다. 플라스틱 대물렌즈는 흡습, 복굴절, 온도에 의한 굴절율 변화의 문제가 있었지만, 최근 저흡습, 저복굴절의의 플라스틱이 사용되면서 습도와 복굴절에 대해 개선되고 있다. 그러나 글래스와 비교해 굴절율이 낮고 굴절율의 온도변화가 크다는 문제점이 남아있어, NA 0.85의 경우 픽업내부의 온도변화 ±40도에 대해 구면수차가 0.2λrms로 커서, 현재는 글래스 대물렌즈가 사용되고 있다.

3.2 구면수차 보정기술

표 3에 디스크의 규격과 픽업의 허용오차를 나타냈다. DVD의 경우, 픽업의 허용오차가 디스크 두께의 변동량을 커버하지만, BD의 경우 디스크간의 제조오차도 커버하지 못하므로 이의 보상이 필수적이다.

25um에 해당하는 ±125mλ의 구면수차를 포함하여, 조립된 픽업의 각 부품에서 발생하는 구면수차, 광원의 파장변화에 기인하는 구면수차 등을 고려하여 보상 범위를 결정해야 한다.

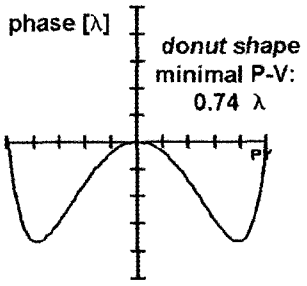


그림 25. Donut형 위상

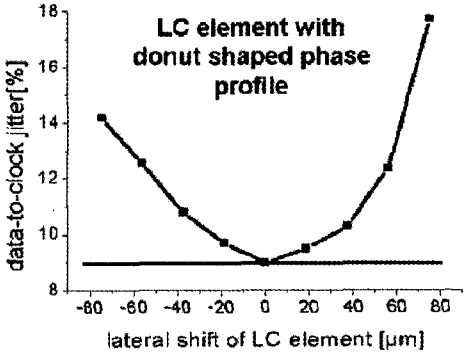


그림 26. 편심과 지터

구면수차를 보정하는 방법은 Beam Expander를 이용하는 방법과 액정소자를 사용하는 방법이 있다.

- Beam Expander 방법

그림 24와 같이 모터를 구동하여 콜리메이팅 렌즈나 빔익스팬더의 한 렌즈군을 이동시켜 대물렌즈에 입사하는 발산각도를 조절하여 보정하는 방식이다. 약 ±2mm 이동으로 ±300mλ의 보상이 가능하다.

- 액정소자 방법

투명전극이 설치된 두 글래스 기판에 액정을 봉입하고 전압을 인가하면, 전압에 비례하여 액정분자가 회전하여 굴절율이 변화되는데, 이 원리를 이용하여 구면수차 보정에 필요한 위상분포를 능동적으로 보정하는 방식이다. 기판두께 변화가 25um일 때 발생하는 구면수차는 대물렌즈에 의한 거리 조정 후, 그림 25와 같이 Donut 형태일때 위상분포의 P-V가 최소가 된다.

초기에는 그림 27(a)와 같이 segment 형의 소자로 반대의 위상을 발생하여 보상하였으나, 그림 28에 나타낸 바와 같이 잔존 수차가 크다는 문제가 있었다. 최근에

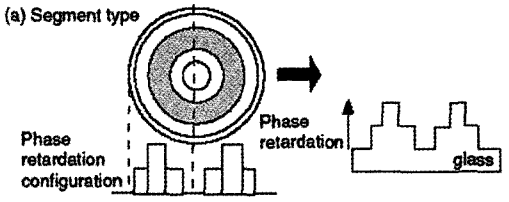


그림 27. 액정소자의 분류

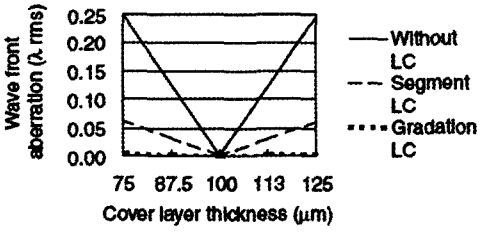


그림 28. 액정소자의 잔존수차

(b)와 같은 gradation 형의 개발로 거의 완벽한 Donut위상의 발생이 가능해졌다[29]. 그러나 이러한 Donut형 구조는 위상발생량이 최소라는 장점이 있는 반면에 대물렌즈와의 동심도 공차가 매우 엄격하다. 편심량에 따른 지터 특성을 보여주는 그림 26에서 알 수 있는 바와 같이 20~30um 이내로 대물렌즈와의 동심도가 유지되어야 한다. 따라서 액정소자는 대물렌즈와 같이 액츄에이터에 탑재되어야 하고 동심도를 엄격하게 규제해야 하며 또한 액정을 구동하기 위한 추가 배선도 마련되어야 한다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여, 액정소자를 렌즈와 같이 발산각을 조절하는 그림 29와 같은 Parabolic 형태의 제품개발이 현재 진행 중 이다[30]. Parabolic형 구조는 원리적으로 대물렌즈와의 동심도에 영향을 받지 않으므로 액츄에이터로부터 분리할 수 있어, 조립 문제, 액츄에이터 가동부 무게 감소에 의한 배속 등에 있어 유리하나, 액정분자의 굴절율 차에 한계가 있어 렌즈 사이에 액정을 삽입한 방식 등이 제안되고 있다. 특히 액정의 경우 편광에 의존하기 때문에, 디스크에의 입사와 출사에 각각 대응하는 소자를 pair로 사용해야 하는데, 이 경우 투과율 감소와 가격 상승이라는 문제점이 발생한다.

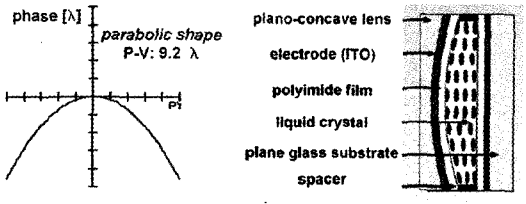


그림 29

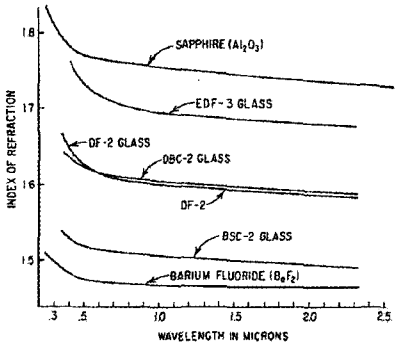


그림 30. 광학유리의 굴절율

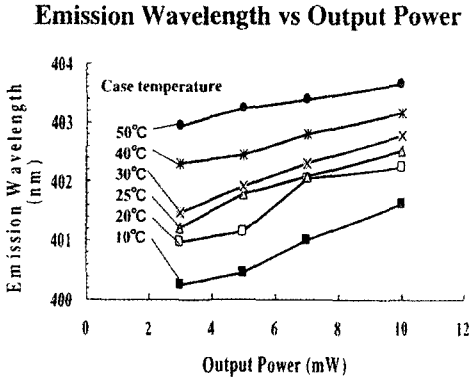


그림 31. LD의 모드호핑

3.3 색수차 보정기술

광학유리의 분산은 파장이 짧아질수록 커지는 경향이 있는데, 청색파장 영역에서 그림 30과 같이 급격하게 증가한다[31]. 광픽업에서 사용하는 레이저 다이오드는 온도와 출력의 변동에 따라 파장이 길어지는 그림 31과 같은 모드호핑 특성을 갖는다. 파장이 변동할 경우 디스크의 정보면을 읽는 스폿이 커지게 되는데, 디스크와 대물렌즈 사이의 거리를 추종하는 액츄에이터에 의해서 온도변화와 같은 굴절율의 완만한 변화의 보상은 가능하다. 그러

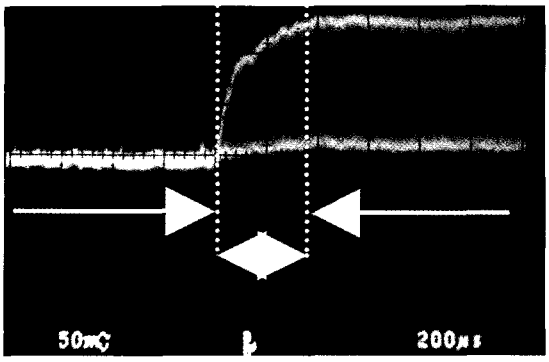


그림 32. 색수차에 의한 기록 재생 특성

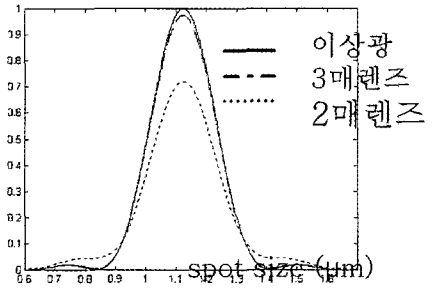


그림 33. 색수차에 의한 스폿

나 디스크에 정보를 기록하고 재생하는 절환과정에서 발생하는 출력의 급격한 변동은, 액츄에이터가 추종하는 주파수 영역보다 매우 빠르기 때문에, 액츄에이터가 추종하는데 걸리는 시간 동안은 기록과 재생에 문제가 발생한다

그림 32는 기록과 재생을 반복한 후, 연속으로 재생한 신호를 나타내는데, 액츄에이터가 추종하지 못한 영역에서 기록이 불완전함을 알 수 있다.

이러한 기록과 재생시의 출력 전환에 따른 파장 변동량은 BD의 경우 약 1nm에 해당하며, 이에 따른 디스크에서의 초점 어긋남에 의한 광량변동은 그림 33과 같다. 이를 보상하는 방법으로 여러 매의 렌즈를 조합한 방법과 HOE를 사용하는 방법이 있다.

아베수 v로 정의하는 분산은 다음과 같이 정의된다.

$$v=(nd-1)/(nF-nC)$$

여기서 n은 각각 파장 d=588nm, F=486nm, C=656nm에서의 굴절율을 나타낸다.

그림 34는 고분산 글래스와 저분산 글래스를 조합하여 색수차를 보정한 3매 구성 대물렌즈로, 1nm파장 변동

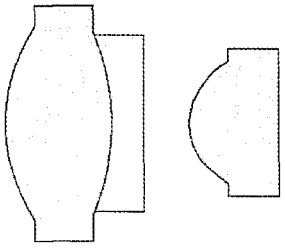


그림 34. 3매 대물렌즈

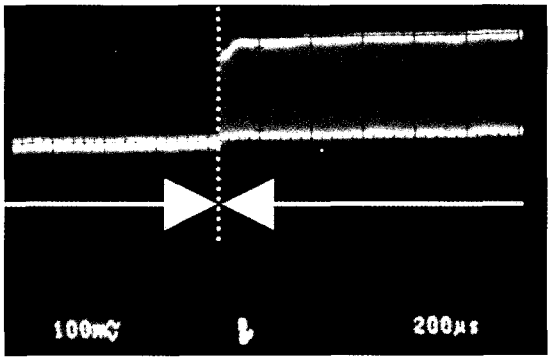


그림 35. 색수차가 보정된 신호

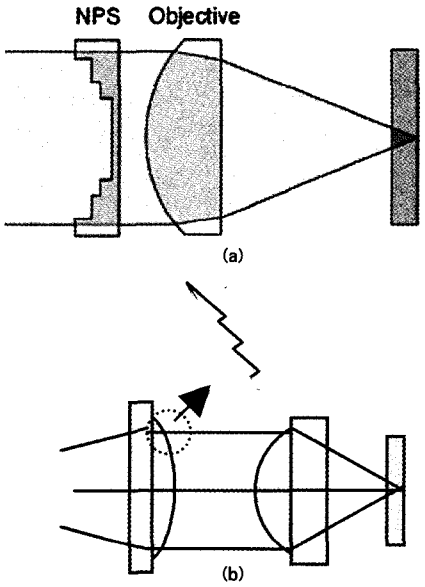


그림 36. HOE에 의한 색수차 보정 방법

에 대해 초점 어긋남을 90nm 이하로 보정한 예를 나타낸다[32]. 이 경우 그림 35과 같이 기록과 재생 절환시에도 데이터의 불연속이 생기지 않음을 알 수 있다.

모든 광학유리의 경우 v〉0인데 반해, HOE의 경우 회절각은 파장에 비례하므로 -3.5의 값을 갖는다. 따라서 그림 36과 같이 굴절렌즈와 HOE을 조합하여 색수차의 보

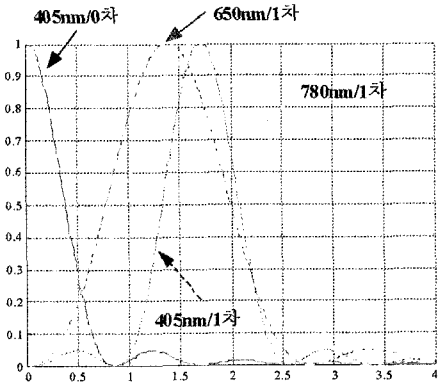


그림 37. HOE의 깊이와 효율

표 4. 대물렌즈 제원

Items	BD	DVD/CD
Mass(mg)	60	10
Focal Length(mm)	1.76	2.35/2.33
Working Distance(mm)	0.50	1.24/0.87
Numerical Aperture	0.85	0.60/0.47

정이 가능하다[33].

3.4 호환기술

현재 시판되는 거의 모든 DVD 드라이브가 CD를 지원하듯이, BD 픽업에서도 DVD와 CD를 호환하는 것이 보편적일 것으로 예상된다. 현재 DVD용 광픽업에서 CD 디스크를 호환하는 가장 일반적인 방법은 전면회절형 대물렌즈를 사용하는 것이다. 이 방식은 파장 650nm와 780nm의 두 광원을 사용하고 두 광 모두 1차로 회절된다. 그림 35는 Blazed 형 회절소자의 깊이에 따른 회절효율을 나타낸다. 깊이 1.5㎛ 근방에서 두 파장 모두 1차 회절효율이 98%를 만족한다.

그러나 BD용 NA0.85 대물렌즈는 아직 단매 렌즈로 성능을 확보하기 어려울뿐만 아니라, 회절렌즈를 조합한 경우에도 회절효율과 CD에서의 짧은 작동거리가 문제로 남아있다. 따라서 기존에 개발된 DVD/CD용 렌즈와 BD 전용의 대물렌즈를 조합한 2조 구성의 방법이 개발되었다. 대물렌즈의 배치는 트랙킹을 위한 위상변동을 없애기 위해 두 개의 렌즈 모두 디스크의 래디얼 방향으로 고정적으로 배치하는 방법과 탄젠셜 방향으로 배치하는 방법이 제안되고 있다. 전자의 경우 디스크의 최내주와 최외주를 모두 재생하기 위해서 디스크를 회전시키는 스핀들

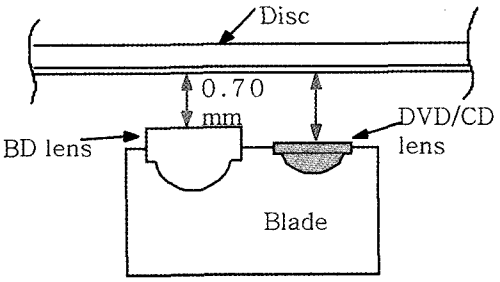
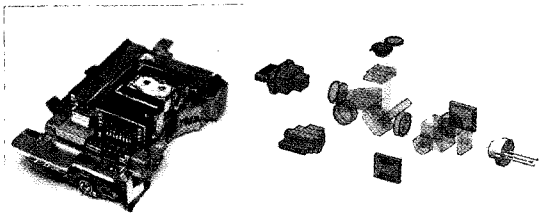
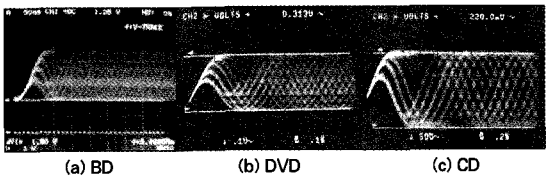


그림 38. 2조렌즈 구성시 중립위치



(a) 2조 렌즈 픽업 (b) 광학계 구성

그림 39. 2조 렌즈 픽업의 구성도



(a) BD (b) DVD (c) CD

그림 40. 2조 호환픽업에 의한 재생신호

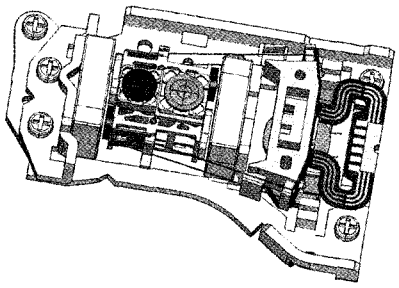


그림 41. 2조 렌즈 픽업

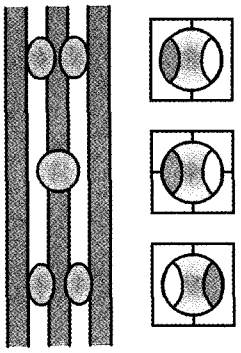


그림 42. 5빔 트랙킹방법

모터의 로우터(rotor) 크기를 29mm에서 26nn로 줄여야 되고, 후자의 경우 내외주 이동시 트랙킹 신호의 위상변동을 제거하는 기술이 필요하다.

또한 2조의 대물렌즈를 한 개의 액츄에이터에 배치하기 위해서는, 서로 상이한 작동거리를 고려하여 대물렌즈와 디스크간 충돌을 방지하도록 결정하여야 한다. 표 4에 DVD/CD용 대물렌즈와 BD용 대물렌즈의 제원을 나타냈고, 그림 38에 배치된 렌즈의 중립위치를 나타낸다.

그림 39에 2조의 대물렌즈를 사용한 BD/DVD/CD용 호환픽업의 구조도를 나타냈다.

그림 40에는 2조 렌즈 픽업을 이용하여 각 디스크를 재생한 RF신호를 나타낸다.

그림 41는 디스크의 탄젠셜방향으로 배치된 픽업의 구조도를 나타낸다. 이 방법의 경우, 전술한 바와 같이 기존의 스핀들 모터를 사용하여 디스크의 내외주의 재생이 가능하다는 장점이 있지만, 트랙킹을 위한 위상차의 변동을 보정하는 방법이 필요하다[34]. 그림 42는 5개의 빔을 이용하여 위상차가 항상 180도가 되도록 하여 DPP 신호를 안정화시키는 구조를 나타낸다.

최근에 그림 43과 같이 HOE와 Glass 대물렌즈를 조합한 BD/DVD/CD 호환 방법이 발표되고 있으나[35], 아직 제품에는 채용되지 못하고 있다. CD 디스크에서의 작동거리가 0.3mm로 짧고, CD의 회절효율이 낮은 문제점등에 대한 성능개선이 요구되고 있다.

3.5 Dual Layer 디스크 재생

BD에서는 기록용 디스크에서도 dual layer 구조에 의해 용량 50GB를 달성한다. 그림 43에서와 같은 dual layer BD 기록형 디스크에는 나선형의 트랙이 있어, 여기서 회절 되어 나온 야구공 모양의 push-pull 정보를 이용하여 스폿이 트랙의 중심을 벗어나지 않도록 트랙킹을 하게 된다. 일반적으로 사용하는 트랙킹 방법으로 2개의 보조 빔을 이용한 DPP(Differential push-pull)를 사용하는데, 재생하지 않는 다른 층에서의 신호가 트랙킹 신호에 영향을 주게 된다. 따라서 이를 보정하는 방법으로 편광 HOE를 사용하여 그림 44과 같이 디스크로 돌아오는 광의 중앙부를 검출기 바깥으로 회절 시킴으로써 stray 광으로부터 트랙킹 신호를 안정화 시킬 수 있다. 그림 45는 보정 전후의 트래킹 신호를 나타내었다.

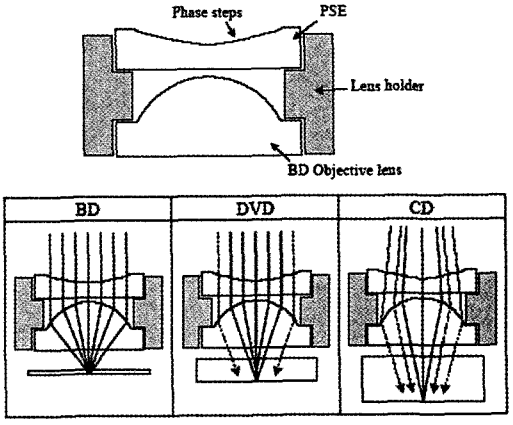


그림 43. HOE+글래스 대물렌즈 조합 호환방식

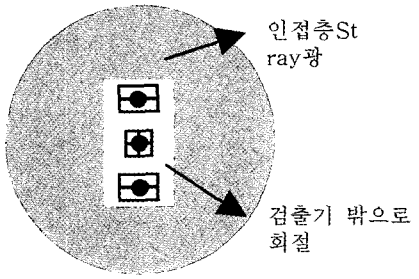


그림 44. 편광 HOE에 의한 stray광 차단

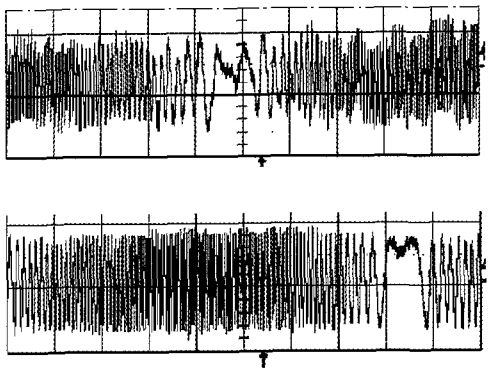


그림 45. 트랙킹 신호(상: 보정전, 하:보정후)

4. 맺음말

HD 방송을 2시간 이상 기록하는 25GB 용량 및 4시간 이상 기록하는 50GB Dual Layer BD 디스크 규격이 제정되고, 이에 대응하는 레코더가 여러 회사에서 발매되었다. BD는 데이터 저장 용량을 늘리는 가장 확실하고 안정된 방법으로 405nm의 광원과 개구수 0.85의 대물렌즈를

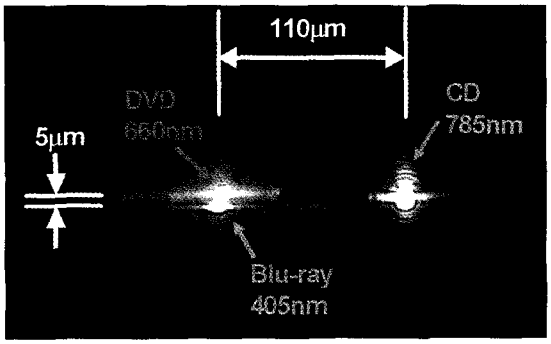


그림 46. 3파장 LD

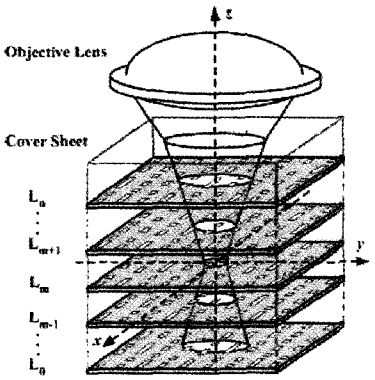


그림 47. 다층 디스크구조

이용하였다.

BD는 규격제정 초기부터 BD-RE / R / ROM 간의 호환성을 기본으로 하여 출발 했으며 BD-RE의 경우 그 기술의 모태가 되고 있다. 다음 세대를 위한 고속기록 매체 연구는 계속 될 전망이다. BD-R의 경우는 여러가지 기록재료나 다층박막 구조가 제안되고, 실용화를 위한 연구개발이 진행되고 있다. CD나 DVD의 규격과 같이 블루레이 디스크 규격에 있어서도, 대용량 고속 기록에 저렴한 매체에 대한 요구는 강하고, BD-R의 역할은 크게 될 것이다. BD-ROM의 경우 디지털 영상 등의 컨텐츠 사업 등과의 밀접한 연관을 지니고 지금까지의 규격완성 및 기술개발을 발판으로 금년부터는 본격 가동이 시작될 것이다. 이를 뒷받침 하는 안정되고 저렴하고 고수율 양산공정 및 재료기술은 이의 성공의 열쇠가 될 것이다. BD-ROM 개발 시 구현 되었던 고밀도 마스터링 기술은 향후 테라바이트급 초대용량 메모리에의 연계 가능성 타진을 위해 관련 장치 및 프로세스의 개선이 계속 이어질 전망이다.

BD 픽업용 광원과 대물렌즈 등의 핵심부품의 기술은 확보되었으나, 아직은 대량생산에 필요한 수율 향상이 중요한 이슈중의 하나로 남아있다. 그리고 DVD/CD를 호환하는 가장 간단한 구조의 픽업 개발이 진행 중이다.

또한 HD DVD 진영과의 규격의 대립도 BD를 보급하는 중요한 문제로 남아있다. 이 BD기술이 Digital Hi-vision 시대에 굉장한 활약을 하여 세상에 도움이 되는 것을 기대 하고 있다. 향후에는 BD/DVD/CD용의 광원이 한 개의 package에 내장된 픽업과, 8층 디스크 구조에 의해 200GB용량[36]을 달성하기 위한 BD규격의 출현이 예상되며 이를 위한 선행 기술 개발이 요구된다.

5. 후기

본 글은 크게 BD 디스크 관련 부분과 픽업 관련된 부분으로 구성이 되어 있는 바, 디스크 관련은 LG 전자 기술원의 서훈 책임 연구원이, 픽업 부분은 삼성전자 DM 연구소 김태경 수석연구원이 맡아 주셨습니다.

참고문헌

[1] H. Iwasaki et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 31 (1992) 461.
[2] I. Satoh et al: Proc. SPIE 4085 (2000) 283.
[3] Y. Kasami et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 39 (2000) 756
[4] H. Seo et al.: Tech. Digest of ISOM2003 We-F-40 (2003) 150.
[5] N. Yamada et al.: ODS2001, Santa-Fe, Proc. 4342, (2001) 55.
[6] N. Yamada: Optronics No.5 (2003) 144.
[7] N. Yamada et al. : J. Appl. Phys. 69 28) (1991) 2849
[8] N. Yamada et al.: Proc. SPIE, 4342 (2002) 55.
[9] M. Horie et al.: Proc.SPIE 4090 (2001) 135.
[10] H. Seo et al. : Proc.SPIE 5380(2004) 504.
[11] K. Narumi et al. : Tech. Digest of ISOM2001 Fr-K-02 (2001) 202.
[12] T. Nishihara et al.: Spring conference of Jpn. Appl. Phys., 29a-ZH-4, (2002) 1155.
[13] R. Kojima et. al.: Jpn. J. Appl. Phys. Vol.40 (2001) 5930-5937.
[14] T. Kato et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 1664.
[15] T. Komaki et al: Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 3922.
[16] N. Hayashida et al.:Jpn. . Appl. Phys. 42 (2003) 750.
[17] M. Y. Han et al.: Tech. Digest of ISOM2003 We-PP-11 (2003) 310.
[18] T. S. Kang et al.: Proc. SPIE 5380 (2004) 720.
[19] Y. J. Huh et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 36 (2002) 7233.
[20] Y. Usami et al.: ODS 2003. TuE32 (2003) 225
[21] Y.Sabi et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) 1056.
[22] Y. Hosoda et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004) 4997.

블루레이 디스크 및 픽업 기술(The Key Technologies for Blu-ray)

[23] H. Inoue et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) 1059.
[24] 村山章 외, "광디스크기술", 라디오기술특선 p.62-63
[25] 일본 공개특허 평10-123410
[26] M.Sato et. al, "High-Numerical-Aperture Objective Lens for Blue Laser Disk System", Jpn. J. Appl. Phys. vol.40 (2001) p1790
[27] 長島耕一외, "Optronics" (2003) No5 p.128
[28] M. Itonaga et al., "NA=0.85 Single Objective Lens for High Density Optical Disk System", Tech. Dig. ISOM (2001) p. 26
[29] Y.Suzuki et. al., "Numerical Simulation Method for a liquid-Crystal Aberration Compensation Device", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.42(2003), p.869
[30] H.Ritcher et. al., "Syatem aspects of Dual-layer Phase-Change Recording with High Numerical Aperture Optics and Blue Laser", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.42(2003), p.956
[31] W. Smith, "Modern Optical Engineering", McGraw Hill, New York, (1966), Chap.12, p. 336.
[32] T.Kim et. al., "Three-Element Objective Lens with Numerical Aperture of 0.85", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.41(2002), p.1840
[33] B.Hendricks et al., "High-NA Achromativ Objective Lens", Tech. Dig. ISOM/ODS (2002) p. 395
[34] N.Inoue, "400nm Laser and 3 Wavelength Compatible Optical Pickup Unit", BDA Japan Seminar", (2005)
[35] K.Koike et al., "BD, DVD abd CD Compatible Objective Lens Assembly", Tech. Dig. ISOM (2004) p. 248
[36] I.Ichimura et al., "Proposal for Multi-Layer Blu-ray Disc Structure", Tech. Dig. ISOM (2004) p. 52

약 력

서 훈

1988년-현재: LG전자기술원 소자재료연구소 책임연구원
1986년 : 고려대학교 금속공학과 학사
1988년 : 한국과학기술원 재료공학과 석사
1999년~ : 한국과학기술원 신소재공학과 박사 과정중
E-mail: seoh@lge.com

김태경

1990년-현재 : 삼성전자 DM연구소 수석연구원
1989년 : 서울대학교 핵공학과 공학석사
1987년 : 서울대학교 핵공학과 공학사
E-mail: tk_kim@samsung.com