

반구형 SIL 을 이용한 미디어 내부 이중 근접장 광 기록계의 설계

김완진*, 최현†, 송태선*, 박노철*, 박영필*

Design of Cover Layer Incident Dual-Layer Near-Field Recording Optics with Hemispherical SIL

Wan-Chin Kim, Hyun Choi, Taesun Song, No-Cheol Park, Young-Pil Park

Key Words : 근접장 광기록, 미디어 내부기록, 반구형 SIL, aplanatic position, gap induced aberration

ABSTRACT

In this paper, we propose novel optics design for media inside near-field recording (NFR) using hemispherical solid immersion lens (HMS). To obtain strong advantage of data protection and high data capacity simultaneously, HMS based near field optics using aplanatic position of super hemisphere is designed. In this design, to improve small optical tolerance of this aplanatic position, additional aspheric lens surface is added on top of the HMS and it is combined with zoom optics which composed of two single lenses having low numerical aperture (NA). Also, to compensate chromatic aberration which happens seriously in optics using blue laser diode, diffractive optical element is used. Using zoom optics, additional aspheric lens surface, and diffractive optical element together, wavefront aberration and chromatic aberration are effectively reduced in broad range of cover layer thickness and wavelength variation. In addition, in this paper, effect of gap induced aberration is investigated by analyzing different behavior of each TM and TE wave for designed media inside dual-layer NFR optics.

1. 서론

고 기록 밀도를 갖는 광 정보저장 장치에 대한 요구로 기존의 far-field 광 기록 갖고 있는 회절한계를 극복할 수 있는 근접장 광 정보저장장치에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 근접장 광 저장장치에 대한 다양한 연구주제들 중에서 SIL(Solid Immersion Lens)를 이용한 광기록을 대표적으로 꼽을 수 있다. 최근에는 반구형 SIL 과 초반구형 SIL 을 사용하여 NA

2.0 이상을 갖는 광학계로 12cm 디스크에 120Gbyte 의 저장 용량을 달성한 연구결과들이 보고 되었다.^{1,2} 그러나 이러한 광학계들은 디스크 표면에 정보를 기록하여 디스크 표면 오염과 스크래치, SIL 에서 발생하는 열에 취약한 문제점이 있다.³ 이러한 디스크 표면 기록에 의해 발생할 수 있는 문제점들은 CD 와 DVD 와 같이 기록층 위에 보호층을 둔 미디어 내부기록방식을 채택함으로써 해결할 수 있다. 미디어 내부 기록방식은 보호층의 상대적으로 작은 굴절률로 인해 표면 기록에 비해 저장용량이 작아지는 단점이 있지만 이러한 단점은 기존의 DVD 와 BD 에서 구현 된 다층 기록 방식으로 극복할 수 있다.⁴

본 논문에서는 초반구형 SIL 의 aplanatic position 을 이용한 미디어 내부 이중 근접장 광

† 연세대학교 정보저장기기연구센터

E-mail: heak@yonsei.ac.kr

TEL: (02)2123-4677 FAX : (02)365-8460

* 연세대학교 정보저장기기연구센터

기록계를 설계하였다. 광학계 설계 시 고려된 사항은 크게 세가지가 있다. 첫 번째는 미디어 보호층의 두께 편차이다. BD의 경우, 보호층의 두께가 $100\mu\text{m}$ 이고 미디어 제작시 제작 오차로 인하여 발생하는 두께 편차는 대략 $\pm 3\mu\text{m}$ 이다. 따라서 광학계 설계시 이러한 두께 편차에 대응할 수 있도록 초반구형 SIL의 비구면을 추가시켰다. 두 번째로 고려한 사항은 짧은 파장 영역의 레이저에서 발생하는 파장변화로 인한 색수차이다. 색수차를 저감시키기 위해서 설계시 회절광학 소자를 추가시켰다. 세 번째로 고려한 사항은 두 기록층에 초점이 맺힐 수 있도록 Zoom 광학계를 설계하는 것이다. Zoom 광학계는 보호층의 두께 변화에 따라 발생하는 구면수차를 보정하는 역할도 할 수 있다.

또한 본 논문에서는 초반구형 SIL을 이용한 이층 근접장 기록 광학계의 설계와 최적화를 위해서 근접장 간격에 따라 발생하는 수차에 대한 해석을 수행하였다.

2. SIL을 이용한 내부 근접장 기록

그림 1에서는 미디어 내부 근접장 기록에 대한 개념도를 나타내었다. 디스크 표면에 기록하는 방식에서는 SIL 바닥면에 초점이 맺히기 때문에 evanescent wave가 회절한계 이하의 스팟으로 전파된다. 따라서 디스크 표면 기록인 경우에는 회절광학 영역에서의 근접장 터널링 현상을 이용하여 기록을 하게 된다. 또한 evanescent wave는 기하광학 영역에서도 존재하게 되는데 기하광학 영역에서의 evanescent wave 전파 현상을 이용하여 미디어 내부 근접장 기록을 하게 된다.⁵

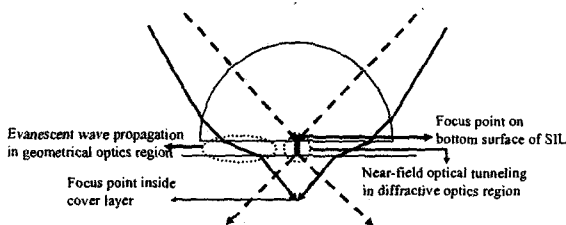


Fig. 1 Propagation of Evanescent wave in geometrical and diffractive optics region.

구 모양을 가진 렌즈에서 sine condition을 만족하는 aplanatic position은 두 곳이다. 첫 번째 지점은 반구의 aplanatic position으로 원의 중심부분이고 두 번째 지점은 초반구의 aplanatic position이다.

⁶ 이 두 지점에서는 구면수차와 비점수차가 없는 완벽한 상을 얻을 수 있다. 반구의 aplanatic position을 이용한 이층 근접장 광 기록은 F. Zijp와 M. Mark에 의하여 연구되었다.⁴ 보통 반구의 aplanatic position은 초반구의 aplanatic position에 비해 광학적으로 안정적이다.⁶ 그러나 반구의 aplanatic position을 이용할 경우 광학계 전체의 NA를 크게 하기 위해서 큰 NA를 갖는 대물렌즈를 사용해야 한다. 예를 들어 0.5의 NA를 갖는 대물렌즈와 2.086의 굴절률을 갖는 SIL을 이용하여 광학계를 설계한 경우 광학계 전체의 유효 NA값은 1.043이 된다. 그러나 큰 NA값을 갖는 대물렌즈를 사용할 경우 대물렌즈 자체의 구면수차값이 커지고 대물렌즈와 SIL을 정교하게 배열해야 하는 어려움이 있다. 따라서 비교적 작은 NA값을 갖는 대물렌즈를 사용하여 근접장 광학계의 유효 NA값을 크게 하기 위해서는 초반구의 aplanatic position을 사용하는 것이 유리하다. 예를 들어 0.4의 NA를 갖는 대물렌즈를 사용하면 시스템 전체의 유효 NA값은 1.4 이상이 된다. 따라서 초반구의 aplanatic position을 이용하여 미디어 내부 근접장 기록을 하는 경우 대물렌즈와 SIL을 배열하기가 더 쉽고 유효 NA값을 크게 할 수 있는 장점이 있다.

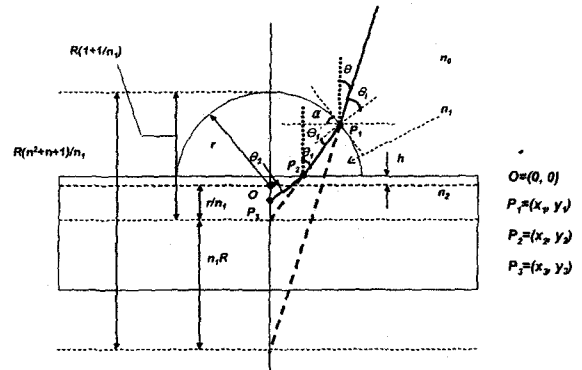


Fig. 2 Geometrical shape of truncated hemisphere and aplanatic position of super-hemisphere

그림 2는 SIL의 기하적인 모양과 초반구의 aplanatic position을 나타내었다. SIL의 굴절률이 미디어의 보호층과 다른 경우 aplanatic position과 SIL로 입사하는 각은 다음과 같은 수학적 식으로 표현할 수 있다.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{-x_1}{\sqrt{r^2 - x_1^2}} \right) \quad (1)$$

$$\alpha' = \tan^{-1} \left(\frac{n_1 z_1 + R}{x_1 n_1} \right) + \alpha - 90^\circ \quad (2)$$

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_0} \sin \theta'_i \right) \quad (3)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{n_1 x_1}{z_1 x_1 + R} \right) \quad (4)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) \quad (5)$$

$$NA_{eff} = n_2 \sin \theta_2 \quad (6)$$

$$x_2 = x_1 - \frac{n_1 x_1 (z_1 - h)}{z_1 n_1 + R} \quad (7)$$

$$z_3 = h - \frac{x_2}{\tan \theta_2} \quad (8)$$

따라서 1.44의 유효 NA 값을 갖고 SIL (LaSF35)의 굴절률 2.086, 보호층(cover layer)의 굴절률 1.6224인 광학계에서 초반구의 aplanatic position은 보호층의 표면에서부터 125 μ m 아래에 위치하며, SIL로 입사하는 입사각은 44°이 되어 한다는 것을 계산할 수 있다. 계산으로 나온 aplanatic position의 위치는 파면수차가 가장 작게 나오는 지점으로서 이 계산 결과를 이용하면 효과적으로 기록층의 위치를 정할 수 있다.

구형 SIL은 ball lens를 이온 밀링 공정으로 polishing하여 제작할 수 있으나 이러한 공정만으로 SIL의 두께공차 값을 만족시키기가 어렵다.⁴ 따라서 10nm 수준의 정밀한 두께 가공을 위하여 추가적인 FIB (focused ion beam) 공정을 거쳐야 한다.

3. 이층 근접장 광 기록계의 설계

3.1 이층 근접장 광 기록계의 설계시 고려사항

미디어 내부 이층 근접장 광 기록계의 설계시 광학계 성능을 위해 고려한 세가지 설계 요소가 있다.

첫 번째는 보호층의 두께와 기록층간의 거리 결정이다. 기록층 간 거리를 결정할 때 기록층간의 발생할 수 있는 crosstalk에 대한 영향을 고려하였다. NA 값이 1.5 정도 되는 광학계에서는 기록층간의 간격을 최소 3 μ m 이상으로 해야 적절한 신호를 얻을 수 있다.⁴ 다층 기록계에서 발생하는 가장 큰 crosstalk은 두 기록층에서 반사되어 나오는

빛이 간섭을 일으켜서 발생하는 crosstalk이다. 따라서 본 설계에서는 기록층간 간격을 10 μ m으로 설정하여 간섭이 적게 일어나도록 하였다. 또한 보호층과 기록층간 간격을 설정할 때 고려해야 될 사항은 미디어 제작할 때 발생하는 오차이다. 보통 스펀 코팅 방식으로 100 μ m 두께의 보호층을 쌓을 때 최소 3 μ m의 두께 오차가 발생한다. 따라서 광학계는 각 기록층에서 최소 4 μ m의 두께 오차에 대응할 수 있도록 설계되어야 한다.

다음으로 고려한 사항은 이층 기록시 층간 초점 변화 방식이다. 기존의 DVD와 BD의 다층 기록 시스템에서 층간 포커스 변화는 액츄에이터를 이용한 대물렌즈의 움직임으로서 가능하였다. 하지만 근접장 광학계에서는 SIL과 디스크의 간격을 근접장으로 유지시켜야 하므로 대물렌즈를 구동하는 것이 불가능하다. 따라서 근접장 광학계에서 포커스 변화는 콜리메이터 렌즈를 구동하거나 zoom 광학계를 추가시켜야 한다. 따라서 본 논문에서는 콜리메이터 렌즈와 대물렌즈 사이의 두 개의 singlet 렌즈를 통하여 이층 기록을 위한 zoom 광학계를 구성하였다.

마지막으로 고려한 사항은 색수차 보상 방법이다. 광 정보저장기기에서 높은 저장 밀도를 달성하기 위하여 짧은 파장을 갖는 레이저를 사용한다. 하지만 짧은 파장의 레이저를 사용할수록 파장 변화에 따른 굴절률의 변화가 심해지게 되고, 이에 따른 색수차 또한 커지게 된다. 따라서 본 논문에서는 역 굴절률을 갖는 회절광학 소자를 이용하여 색수차를 크게 감소시켰다.⁷

3.2 이층 근접장 광 기록계의 초기 설계

본 논문에서는 405nm의 파장을 갖는 청자색 레이저 다이오드, 콜리메이터 렌즈, 두 개의 singlet 렌즈로 이루어진 zoom 광학계, 그리고 SIL과 대물렌즈를 사용하여 이층 근접장 광 기록계의 초기 설계를 하였다. SIL은 405nm 파장대에서 2.086의 높은 굴절률을 갖는 LaSF35를 사용하였으며, 보호층은 405nm 파장대에서 1.6224의 굴절률을 갖는 Poly-carbonate를 사용하여 설계하였다. 시스템의 최대 유효 NA 값을 1.62까지 크게 할 수 있었지만 각층에서 안정적인 두께 공차값을 확보하기 위하여 설계 NA 값을 1.44로 정하였다. 1.44의 유효 NA 값은 12cm의 CD 크기 디스크의 70Gbytes 이상을 저장할 수 있다. 식(1)~(8)을 이용하면 유효 NA가 1.44일 때 aplanatic position은 미디어 표면에서부터 125 μ m 아래에 위치하게 된다. 그림

3은 반구형 SIL을 이용한 이중 근접장 광 기록계의 개략도이다.

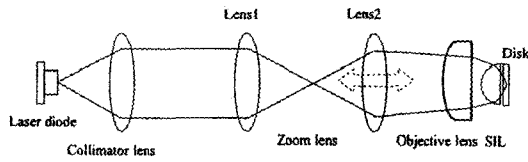


Fig. 3 Initially designed optics layout for media inside NFR with hemisphere SIL

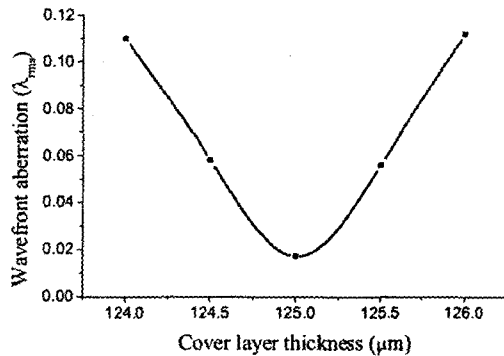


Fig. 4 Optical performance of initially designed NFR optics

그림 4에서는 초기 설계된 근접장 광학계의 보호층 두께에 따른 수차값 변화를 그래프로 나타내었다. 초기 설계된 광학계에서는 기록층이 125μm일 때 수차가 제일 적게 발생한다. 따라서 이중 기록을 위하여 기록층 간 간격을 10μm로 하고 기록층을 각각 120μm, 130μm로 정하였다. 그러나 그림 4에서 나타났듯이 초기 설계된 광학계는 이중 기록을 위한 충분한 성능을 보이지 못하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이중 기록이 가능하도록 설계를 보완하여 각 기록층으로 정한 120μm, 130μm 영역에서 파면수차 값이 적게 나오도록 해야 한다.

3.3 이중 근접장 광 기록계의 설계 최적화

SIL을 이용한 광학계에서 보호층에 의한 구면 수차는 SIL과 보호층의 굴절률의 차이에서 기인한다. 따라서 이러한 보호층에서 유발되는 수차를 줄이기 위하여 SIL의 표면에 SIL보다 작은 굴절률을 갖는 비구면을 추가하였다. 이 추가된 비구면은 역 구면수차를 유발하여 초기 설계된 광학계

에서 발생하는 구면수차를 보정할 수 있도록 설계되었다. 그림 5에서 보완 설계된 대물렌즈와 반구형 SIL의 모습을 개략적으로 나타내었다. 추가된 비구면은 glass molding을 이용한 photo-polymer replication 방식으로 제작될 수 있다.

비구면 replication 공정을 그림 6에 간략하게 나타내었다.

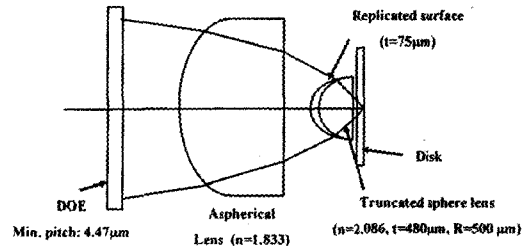
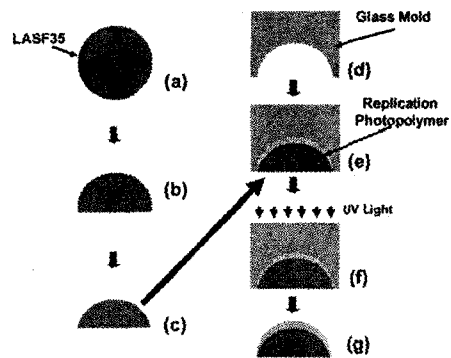


Fig. 5 Optimized optics layout for media inside NFR with hemisphere SIL



- (a) Commercial ball lens having high refractive index, 2.086.
- (b) Rough polishing by use of ion milling process
- (c) Fine polishing and flattening by use of focused ion beam milling process
- (d) Glass mother mold for the replication of aspheric lens surface
- (e)-(f) Photopolymer replication process by use of aspheric glass mold and UV curing
- (g) Fabricated HMS with an additional aspheric surface

Fig. 6 Fabrication concept of the HMS and replication process of aspheric lens surface

또한 색수차를 보정하기 위하여 대물렌즈 앞에

회절광학소자를 배치하였다. 회절광학소자는 91.5%의 회절효율을 갖고 최소 피치는 4.47 μm 이다.

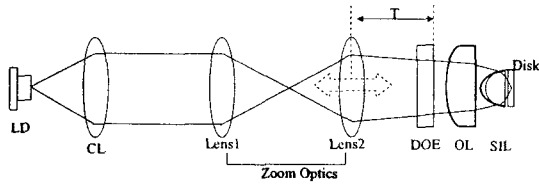


Fig. 7 New layout of objective lens and hemisphere SIL unit

Table 1 Performance of optimized media inside NFR optics.

Recording layer	NA	Wavefront aberration
1st Recording layer (120 μm)	1.44	0.0178 λ_{rms}
2nd Recording layer (130 μm)	1.43	0.0142 λ_{rms}

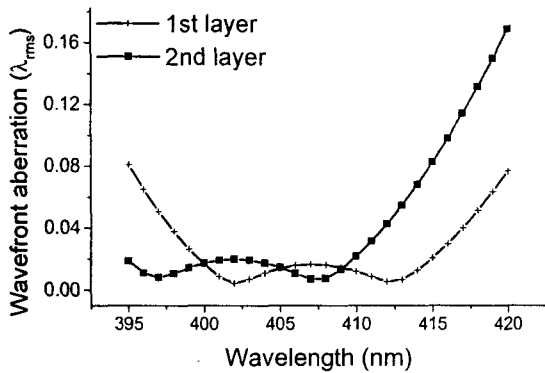


Fig. 8 Compensation of chromatic aberration

그림 7 은 최적화된 광학계의 개략도이고 표 1 은 최적화된 광학계의 성능을 나타낸 표이다. 기록층을 미디어 표면에서부터 120 μm 와 130 μm 로 설정하여 각각 기록층에서 수차가 적게 나올 수 있도록 광학계를 최적화 설계하였다. 그림 8 은 최적화된 광학계의 색수차 특성을 나타내었다. 회절광학 소자를 사용함으로써 400nm 에서 410nm 에 이르는 넓은 파장영역에서 수차가 작게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 9 와 표 2 는 보호층 두께 변화에 따른 파면 수차 값을 표시하였다. Zoom

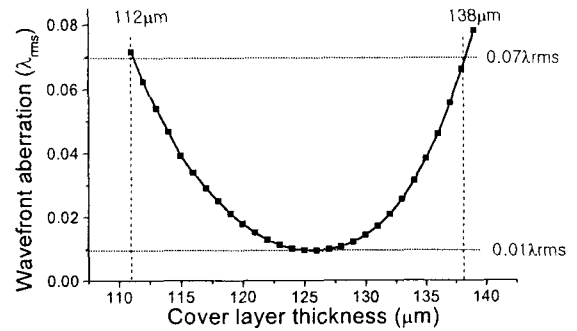


Fig. 9 Wavefront aberration by the thickness variation of cover layer

Table 2 Wavefront variation by thickness variation of cover layer

Cover layer thickness (μm)	Wavefront aberration (λ_{rms})	T(mm)
139	0.0780	12.800
135	0.0382	13.427
130	0.0142	14.581
125	0.0095	15.019
120	0.0178	15.461
115	0.0390	15.918
111	0.0716	16.291

Table 3 Tilt and decenter tolerances of lens 1 and 2 in zoom optics, objective lens, and hemisphere SIL

Recording layer	Decenter	Tilt
Lens 1	1st	17 μm 1°
	2nd	30 μm 2°
Lens 2	1st	12 μm 1.1°
	2nd	7 μm 1.35°
OL	1st	1.05 μm 0.04°
	2nd	1.1 μm 0.04°
SIL	1st	1.2 μm 0.2°
	2nd	1.3 μm 0.22°

광학계의 추가된 비구면을 사용 하여 보호층 두께

110 μm 에서 138 μm 까지 모두 회절한계 이하의 수차 값(<0.07 λrms)을 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 따라서 최적화된 광학계는 120 μm 와 130 μm 의 기록층에서 발생할 수 있는 두께 오차(< $\pm 4\mu\text{m}$)에 모두 대응할 수 있다. 그리고 설계된 각 광학부품들의 tilt 와 decenter 마진에 대하여 표 3 에 요약 정리하였다.

4. 근접장 간격에 따른 수차 분석

근접장을 이용한 결상 광학계에 대해 선행되었던 연구결과들을 보면 근접장 간격에 따른 구면수차와 비점수차가 발생하는 것을 알 수 있다.^{4,8} 따라서 본 논문에서는 SIL 과 근접장 간격, 그리고 보호층으로 이루어진 시스템을 multiple beam 간섭 현상으로 고려하여 근접장 간격에 따라 발생하는 수차를 분석하였다.

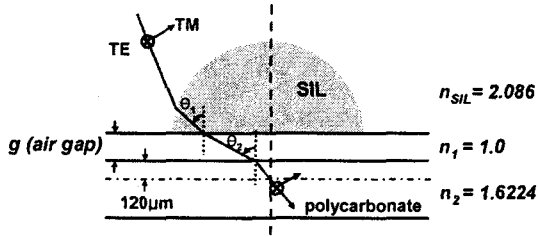


Fig. 10 Configuration of three-layer system consist of SIL, air, cover layer.

근접장 간격에 따라 발생하는 수차의 원인은 TM wave 와 TE wave 의 광량과 위상 차이 때문이다. 따라서 TM wave 와 TE wave 의 광량과 위상의 투과 상수에 대한 정보를 알면 TM wave 와 TE wave 광량과 위상 차이를 계산 할 수 있다. TM wave 와 TE wave 의 투과 상수와 프레넬 반사 상수는 다음 식들과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{\perp, //} = \frac{t_{23}t_{12} \exp(i\beta)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(i2\beta)} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 g \cos \theta_2 \quad (10)$$

$$r_{\perp ij} = \frac{\cos \theta_i - (n_{ji}^2 - \sin^2 \theta_i)^{\frac{1}{2}}}{\cos \theta_i + (n_{ji}^2 - \sin^2 \theta_i)^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

$$r_{//ij} = \frac{n_{ji}^2 \cos \theta_i - (n_{ji}^2 - \sin^2 \theta_i)^{\frac{1}{2}}}{n_{ji}^2 \cos \theta_i + (n_{ji}^2 - \sin^2 \theta_i)^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

여기에서 i, j 는 1,2,3 이고, $n_{ji} = n_j/n_i$ 이다. 식 (11) 과 (12) 는 수직 편광된 빛과 수평 편광된 빛의 프레넬 반사 상수를 각각 표현한 식이다. 또한 각 방향으로의 투과 상수는 $t_{ij} = 1 + r_{ij}$ 로 구할 수 있다. C_0 벡터를 defocus 와 구면수차와 같은 대칭 수차로 정의하였고 C_1 벡터를 비점수차와 같은 비대칭 수차로 정의하면 식 (13), (14)로 표현할 수 있다.⁸

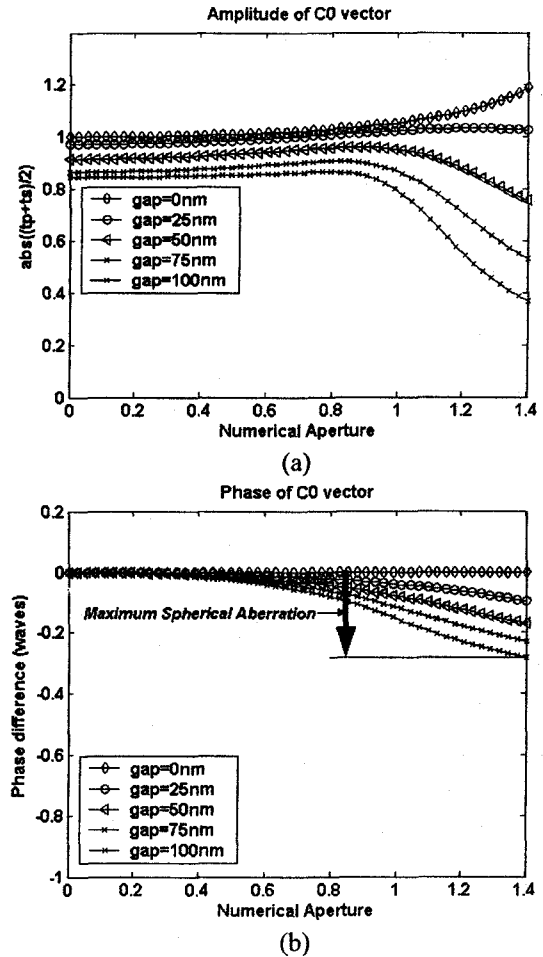


Fig.11 Amplitude and phase profiles of C_0 vector for designed NFR optics

(a) Amplitude profile of C_0 vector for designed NFR optics

(b) Phase profile of C_0 vector for designed NFR optics

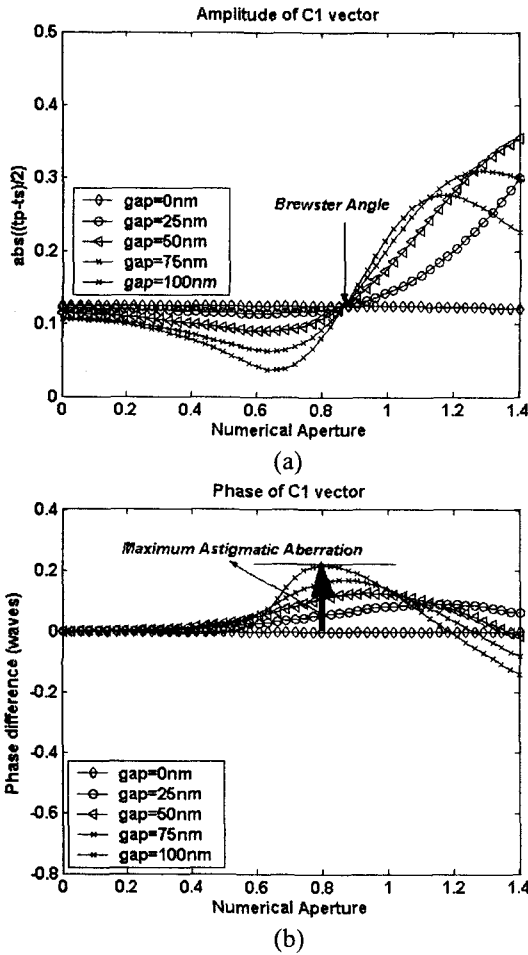


Fig. 12 Amplitude and phase profiles of C_1 vector for designed NFR optics.

(a) Amplitude profile of C_1 vector for designed NFR optics.

(b) Phase profile of C_1 vector for designed NFR optics.

$$C_0 = \frac{t_{//} + t_{\perp}}{2} \quad (13)$$

$$C_1 = \frac{t_{\perp} - t_{//}}{2} \quad (14)$$

t_{\perp} 와 $t_{//}$ 벡터가 유전체의 특성을 나타내는 복소수이므로 C_0 와 C_1 벡터 역시 복소수로 표현된다

. 그림 11 과 12 에 설계된 미디어 내부 근접장 광 기록계의 C_0 와 C_1 벡터의 입사각에 따른 크기와 위상 정보를 나타내었다.

결과를 분석해보면 100nm 이하의 근접장 간격을 유지할 때는 구면수차가 비점수차보다 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 구면수차는 NA 가 1 이상이 되는 영역에서 매우 심각하게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 비점수차는 NA 값이 0.8 부근의 영역에서 구면수차에 비하여 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 브루스터 각 부근에서 TM wave 와 TE wave 의 위상차이가 크게 발생함에 따른 현상이다. 근접장 광 기록계에서 근접장 간격이 100nm 보다 커지면 근접장 간격에 의해 유발되는 수차의 양이 많아지지만 실제 기록계에서 간극 제어에 의해 근접장 간격이 100nm 보다 커지는 경우는 거의 없을 것이므로 근접장 간격에 의해 발생하는 수차의 영향은 거의 없을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 초반구의 aplanatic position 을 이용한 이중 미디어 내부 근접장 광 기록계를 설계하였다. 광학계의 NA 는 첫번째 기록층과 두번째 기록층에서 각각 1.44 과 1.43 이며 기록층의 두께는 초반구의 aplanatic position 을 고려하여 120 μ m 와 130 μ m 로 선정하였다. 광학계의 성능 향상을 위하여 보호층의 두께 공차 보상을 위한 비구면과 zoom 광학계, 그리고 색수차를 보상하기 위한 회절광학소자를 설계하였다. 따라서 설계된 광학계는 각 기록층에서 발생할 수 있는 $\pm 4\mu$ m 의 두께 오차에 대응할 수 있으며 400nm 에서 410nm 의 파장변화에 안정적인 광학 특성을 나타낸다.

또한 근접장 간격에 따른 구면수차와 비점수차의 발생량을 분석하였는데 근접장 간격이 100nm 이하 일 경우에 근접장 간격에 의해 발생하는 수차는 크지 않을 것이라는 결론은 얻었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터(R11-1997-042-11001-0)의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Shinoda M, Saito K, Ishimoto T, Kondo T, Nakaoki A, Ide N, Furuki M, Takeda M, Akiyama Y, Shimouma T, Yamamoto M (2005) High density near field optical disk recording. *Japanese Journal of Applied Physics* 44: 3537-3541
- [2] Verschuren CA, Zijp F, Lee J-I, Eerenbeemd JMA, Mark MB, Urbach HP (2005) Near Field Recording on First-Surface Write-Once Media with a NA=1.9 Solid Immersion Lens. *Japanese Journal of Applied Physics* 44: 3564-3567
- [3] Someren B, Zijp F, Kesteren HW, Mark MB, Verschuren CA, Awano H, Ota N (2002) Blue Zero-Field Magnetic Amplifying Magneto-Optical System (MAMMOS) Recording. *Japanese Journal of Applied Physics* 42:1078-1079
- [4] Zijp F, Mark MB, Lee J-I, Verschuren CA, Balistrei MLB, Urbach HP, Aa MAH, Padiy AV (2004) Near field readout of a 50GB first-surface disk with NA=1.9 and a proposal for a cover-layer incident, dual-layer near-field system. *Proc. SPIE* 5380: 209-223
- [5] Marchant AB (1990) *Optical recording*. Addison-Wesley Publishing Company, pp 102-106
- [6] Born M, Wolf E (2002) *Principle of Optics*. 7th edn. Cambridge University Press, pp152-160
- [7] Sohn J-S, Lee M-B, Kim W-C, Cho E-H, Kim T-W, Yoon C-Y, Park N-C, Park Y-P (2005) Design and fabrication of diffractive optical elements by use of gray-scale photolithography. *Applied Optics* 44: 506-511
- [8] Jo JS, Milster TD, Erwin JK (2002) Phase and amplitude apodization induced by focusing through an evanescent gap in a solid immersion lens microscope. *Opt. Eng.* 41: 1866-1875