

타원형 고체잠입렌즈를 이용한 근접장 광자기 기록

박재혁*(연세대 대학원 기계공학과), 이문도(연세대 대학원 기계공학과)
박노철(연세대 정보저장공학과), 박영필(연세대 기계공학과)

Magneto-Optical Recording in Near-Field using Elliptic Solid Immersion Lens

J. H. Park(Mecha. Eng. Dept. YSU), M. D. Yi(Mecha. Eng. Dept., YSU)
N. C. Park(CISD. YSU), Y. P. Park(Mecha. Eng. Dept., YSU)

ABSTRACT

In conventional optical data storage numerical aperture (NA) cannot be over 1 because of diffraction limit. To overcome this limitation, solid immersion lens(SIL) have produced a great interest in near-field optical data storage. In conventional optical recording method, the dual lens system using object lens and SIL had been studied generally. But the conventional SIL system has some critical problems that must be solved. The problems are heat, contamination, alignment of optical components and so on. To solve these problems, this work proposes enhanced SIL which has several advantages for mechanical and optical issues. This new SIL system named elliptic SIL(ESIL) can use evanescent energy in near-field more effectively. In addition, because of applying the inside recording unlike previous surface recording, ESIL can clear up the problems. The design and analysis of ESIL are executed by using CODE V. Also, in this paper we composed actual data recording system and achieved recording experiment by applying ESIL to magneto-optical recording. In conclusion, we analyze the improvement of aerial density and the reasonability of application to real data storage system.

Key Words : 타원형 고체잠입렌즈(Elliptic solid immersion lens:ESIL), 광자기 기록(Magneto-optical recording), 근접장(Near-field), 소멸파 에너지(Evanescent energy)

1. 서론

1990년대 초반 이래로 광 저장 장치의 고용량화를 실현하기 위해서 고체잠입렌즈(solid immersion lens : SIL)에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 대부분 대물렌즈와 고체잠입렌즈를 이용하여 광을 고체잠입렌즈의 바닥면에 집광시켜 기록과 재생을 하는 표면 기록방식이 연구되었으며, 이러한 연구는 높은 개구수(NA)를 실현할 수 있었으나 고체잠입렌즈와 미디어 사이의 열과 오염, 그리고 렌즈의 조립 등에 있어서의 기계적인 오차 등 심각한 문제를 유발하였다. 이에 우리는 앞서 언급된 문제들을 해결함과 동시에 소멸파 에너지를 이용하여 정보저장 장치의 고용량화에 있어서 핵심 기술이라

할 수 있는 근접장 기록 기술을 효과적으로 광 저장 장치에서 실현함으로써 높은 개구수(NA>1)의 달성이 가능한 새로운 개념의 고체잠입렌즈를 제안하였다.

또한 자기(FDD, HDD), 광(ODD), 그리고 광자기(MO) 등 다양한 방식의 정보저장 장치 중, 특히 자기 기록방식에 비해 자기의 영향에 보다 뛰어난 안전성을 가지고 광 기록방식에 비해 보다 높은 데이터 전송률을 가지는 등 우수한 성능을 가진 광자기 방식은 차세대 저장 장치로써 많은 관심과 연구가 진행되고 있다.

이에 본 연구에서는 근접장 이론에 근거하여 제안된 새로운 형태의 고체잠입렌즈를 광자기 기록방식에 적용하여 기록을 수행하고, 향상된 기록밀도

에 관하여 다루었다.

2. 렌즈의 설계

2.1 렌즈의 이론적 설계

새로운 SIL의 설계결과는 타원의 모양을 가지며, ESIL(Elliptic SIL)이라 명명하였다. 이 SIL은 대물렌즈 없이 광을 디스크에 입사시켜 기록층에 집광시키기 위해 시준 렌즈(Collimating lens)로부터 평행광이 조사된다. ESIL의 설계개념은 Fig. 1을 통해서 설명되며, 식 (1)과 식 (2)의 페르마의 원리(Fermat's principle)와 식 (3)의 스넬의 법칙(Snell's law)으로부터 유도된다.

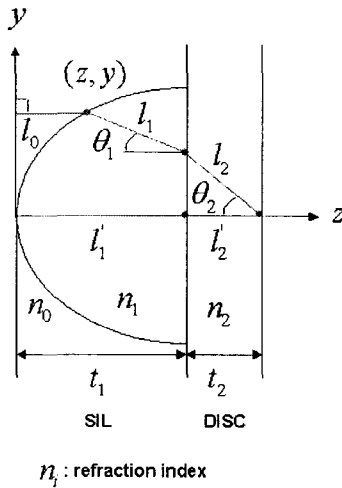


Fig. 1 The geometrical shape of ESIL

$$l_1' + l_2' = l_0 + l_1 + l_2 = \text{const} \quad (1)$$

$$n_1 t_1 + n_2 t_2 = n_0 z + n_1 \frac{(t_1 - z)}{\cos \theta_1} + n_2 \frac{t_2}{\cos \theta_2} \quad (2)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2 \right) \quad (3)$$

n_0, n_1, n_2 는 각각 공기와 렌즈, 그리고 보호층의 굴절율이고, t_1, t_2 는 각각 SIL과 보호층의 두께를 나타내며 θ_2 는 보호층으로의 최대 입사각을 나타낸다. 식 (2)를 z 에 대해 정리하면 식 (4)와 같게 된다.

$$z = \frac{n_1 t_1 \left(1 - \frac{1}{\cos \theta_1}\right) + n_2 t_2 \left(1 - \frac{1}{\cos \theta_2}\right)}{n_0 - \frac{n_1}{\cos \theta_1}} \quad (4)$$

또한 SIL의 y 좌표에 대한 식은 식 (5)와 같다.

$$y = (t_1 - z) \tan \theta_1 + t_2 \tan \theta_2 \quad (5)$$

SIL의 형상은 (z, y) 의 궤적으로 표현되며 식 (4)와 (5)로부터 SIL의 기하학적 정보를 얻을 수 있으며, 개구수에 대한 시뮬레이션이 가능하다.

ESIL은 표면기록이 아닌 디스크의 보호층을 렌즈의 일부로 고려하는 개념으로, 내부기록을 함으로써 기존의 표면기록에서 유발되는 각종 문제들이 발생하지 않는다. 또한 유효 개구수는 다음과 같이 정의된다.

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

SIL의 굴절율이 커짐에 따라 SIL의 비구면쪽의 표면적은 작아진다. 즉 곡률의 변수는 크게 변하지 않는다. 따라서 기계적인 정밀도는 향상되며 반사 손실을 감소시킬 수 있다. $n_1 = n_2$ 의 특별한 경우에는 렌즈와 디스크 사이에서는 굴절없이 광이 진행하며, SIL의 형상은 타원이 된다.

$$n_0 z + n_1 \sqrt{x^2 + (z-a)^2} = n_1 a \quad (7)$$

여기서 $a = t_1 + t_2$ 이다. 타원방정식은 광학 시스템의 매개 변수로서 표현될 수 있다.

$$\frac{(z-A)^2}{A^2} + \frac{x^2}{B^2} = 1 \quad (8)$$

여기서 $A = a \frac{n_1}{n_1 + n_0}$, $B = a \sqrt{\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0}}$ 이고, 이심

률은 $e = a \frac{n_0}{n_1 + n_0}$ 이다.

또한 렌즈의 비구면 형상을 표현하는 일반적인 수학공식은 다음과 같이 표현되며,

$$z = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2x^2}} + Dx^4 + Ex^6 + Fx^8 + \dots \quad (9)$$

$$c = \frac{n_1}{a(n_1 - n_0)} \quad (10)$$

c 는 곡면의 극에서의 곡률, $k = -\frac{n_0^2}{n_1^2}$ 는 konic 상

수, 그리고 D, E 그리고 F는 각각 4, 6, 8차 변형상수이다. 이 변형상수는 $n_1 = n_2$ 일때 타원이 되므로 0이 된다.

2.2 렌즈의 수치적 설계

렌즈의 수치적 설계와 시뮬레이션을 위해 CODE V를 이용하였다. ESIL은 660nm의 광원을 사용하고 ESIL과 보호층은 각각 PC(Poly Carbonate)를 사용하는 것으로 설계하였다. 시뮬레이션은 렌즈의 사용 가능 여부에 대한 척도인 MTF(Modulation Transfer Function)와 렌즈의 성능에 있어서 그 성능의 열화와 밀접한 관계를 갖는 파면 수차에 대해 수행하였다. 설계를 위한 기본값은

Table 1 에 보였다.

Table 1 Required values for design

Symbol	Value	Explanation
n_0	1.0003	Refractive index of air
n_1	1.57964236478	Refractive index of ESIL
n_2	1.57964236478	Refractive index of substrate
l_1	4.0mm	Thickness of ESIL
l_2	0.1mm	Thickness of substrate
λ	660nm	Wavelength of laser

ESIL 은 수차에 대한 성능 열화에 대해 안정적인 특성을 위하여 0.1mm 로 설계되었으며, 시뮬레이션을 통하여 얻은 유효 개구수는 $NA_{eff} = 1.212$ 이다. Fig. 2 는 CODE V 를 이용하여 ESIL 의 형상을 표현한 것이다.

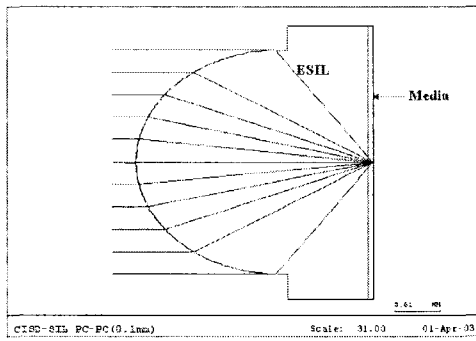


Fig. 2 The shape of ESIL obtained by CODE V

MTF 선도는 전체의 공간주파수에 있어서 렌즈의 입력에 대한 출력의 대비를 보여주며 렌즈 평가의 척도로서 매우 중요한 정보를 포함한다.

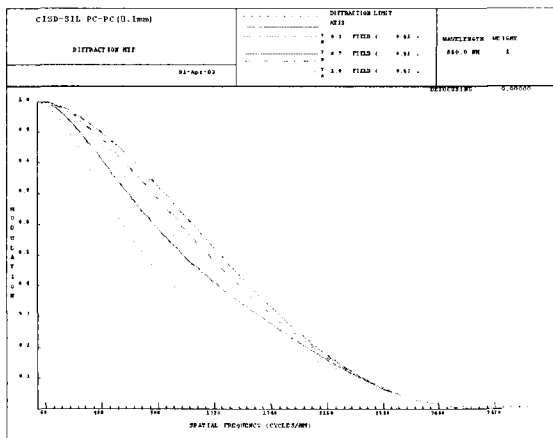


Fig. 3 Modulation Transfer Function (MTF) curve

실제로 정보저장기기의 기록의 재생에 있어서 MTF 선도는 데이터의 분해능에 직접적으로 관련하며, 선도에서 공간주파수에 따라 기울기 값이 음에서 양으로 바뀌게 되면 정보의 판독이 불가능하게 된다. Fig. 3 은 0.01, 0.02, 0.03deg.의 필드에 대한 MTF 선도를 보여주며, 안정적인 성능을 보임을 확인할 수 있다.

파면수차 역시 0.01, 0.02, 0.03deg.의 필드에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 파면수차는 마샬의 종속조건(Marshall's criterion)에 의해 평가되며, 파면수차가 0.07λ 가 넘지 않아야 한다는 조건이다. Table 2 는 ESIL 의 각 필드에 대한 RMS 파면수차의 값이다. Table 2 에서 보는 바와 같이 0.01, 0.02deg.의 필드에 대해 ESIL 은 만족할 만한 성능을 보이며, 0.03 deg.에 대해서는 성능이 다소 열화되는 것을 확인할 수 있으나, 이는 갭 센싱과 기울기에 대한 서보를 통하여 해결될 수 있다.

Table 2 RMS wave-front aberrations

Field	0.01 deg.	0.02 deg.	0.03 deg.
Wave-front aberration	0.0278λ	0.0556λ	0.0841λ

3. 광자기 기록 실험

3.1 실험 구성

본 실험은 앞서의 설계과정을 통해 제작된 새로운 개념의 ESIL 을 실제 광자기 기록 시스템에 적용하고, 기록된 마크의 기록밀도에 있어서 향상여부를 평가하기 위한 것이다. Fig. 4 는 본 실험을 위해 꾸며진 광자기 기록 시스템의 실험장치 사진이다. 전체적인 실험 장치는 기록된 마크를 재생하는 재생기는 배제되었으며, 기록만을 위한 장치이다. 실험 장치는 크게 광학계, 자기계, 그리고 이송계로 나눌 수 있다.

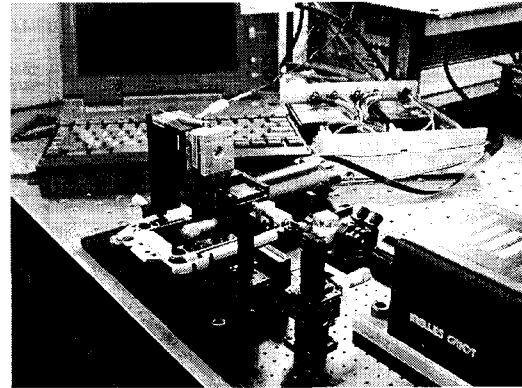


Fig. 4 Experimental setup for magneto-optical recording using elliptical solid immersion lens(ESIL)

광학계는 레이저 다이오드와 각종 광학 부품으로 구성되어 있으며, 자기계는 기록에 있어서 필요한 충분한 자기장을 형성할 수 있는 자기 헤드, 그리고 이송계는 기록을 위한 미디어와 미디어의 이송을 위한 데크와 모터, 컨트롤러로써 구성되었다. 광원으로는 파장 660nm의 레이저를 사용하였고 외부자장의 세기는 약 150 Oe이다. 실험에 사용된 미디어는 TbFeCo 층을 기록층으로 하고 그 상하에 SiN 유전체층이 유리 기판 위에 올려진 광자기 미디어를 사용하였다.

3.2 실험 결과

광자기 기록 마크는 편광현미경에 의해 확인이 가능하며 기록 마크의 크기를 확인할 수 있다. 편광현미경 이미지의 음영에서 기록된 부분은 밝게 나타난 부분이다.

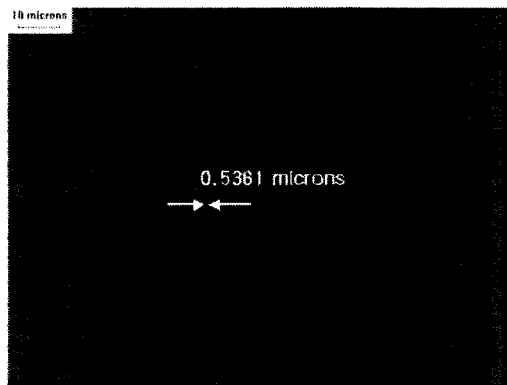


Fig. 5 The recorded mark by polarizing microscope

Fig. 5는 기록 출력 8mW, 이송속도 0.1m/s 하에서 기록된 마크를 보여주고 있다. 일반적으로 기록된 마크의 직경은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$d = \frac{\lambda}{NA_{eff}} \quad (11)$$

앞서 구한 유효 계구수 값과 사용파장을 대입하여 구하면 마크의 직경은 544.5nm로 계산되며, 본 실험을 통해 얻은 값은 536.1nm이다. 실험과 시뮬레이션을 통해 얻은 결과가 거의 일치하며 타당한 결과라는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 기존의 광 정보저장장치에서 회절 한계로 인해 NA가 1 이상 실현되는 것을 극복할 수 있는 방법으로 제안된 기존의 SIL 시스템을 보완한 새로운 형태의 ESIL을 설계하고, 이를 광자기 기록 시스템에 적용하였다. 시뮬레이션을 통해 정

보저장장치에의 적용가능성을 확인하였고, 실험을 통해 시뮬레이션 결과와 부합됨을 확인하였다. 실제로 일반적인 적색광을 사용하는 ODD의 마크와 비교했을 때, CD는 1.73 μm , DVD는 1.10 μm 이나, ESIL은 536.1nm으로 향상된 기록밀도를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

후 기

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2001-003-E00113)

참고문헌

1. TaeSun Song, Hyuck-Dong Kwon, Moon-Do Yi, Yong-Joong Yoon, Kyoung-Sung Jung, No-Cheol Park and Young-Pil Park, "Aspherical Solid Immersion Lens for Highly Efficient Optical Head in Near-Field Recording," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 42, 2003, pp. 1082-1089
2. E. Betzig, J. K. Trautman, R. Wolfe, E. M. Gyorgy, P. L. Finn, M. H. Kryder and C. H. Chang, "Near-field magneto-optics and high density data storage," *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* 61 (2), 13 July 1992, pp. 142-144
3. B. D. Terris, H. J. Mamin, D. Rugar, W. R. Studdenmund and G. S. Kino, "Near-field optical data storage using a solid immersion lens," *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* 65 (4), 25 July 1994, pp. 388-390
4. Tom D. Milster, "Near-field optics : A new tool for data storage," *Proceedings of the IEEE*, VOL. 88, NO. 9, September 2000, pp. 1480-1490
5. A. Chekanov, M. Birukawa, Y. Itoh, and T. Suzuki, "A High Numerical Aperture Solid Immersion Lens Magneto-optical Recording System," *IEEE Transactions on Magnetics*, VOL. 35, NO. 5, September 1999, pp. 3100-3105
6. S. Hashimoto, H. Matsuda and Y. Ochiai, "Recording experiments in magneto-optical disks using ultrathin Co/Pt and Co/Pd media," *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* 56 (11), 12 March 1990, pp. 1069-1071
7. R. Sbiaa, E. Stavrou, A. Chekanov, M. Birukawa, Y. Itoh, and T. Suzuki, Fellow, IEEE, "High Density Magneto-Optical Recording Using Solid Immersion Lens with Magnetic Field Modulation," *IEEE Transactions on Magnetics*, VOL. 36, NO. 5, September 2000, pp. 2276-2278