

근접장 이론을 이용한 고밀도 저장 장치용 렌즈의 이론적 설계와 수치적 설계

이문도#, 박재혁*, 박노철*, 박영필**

Theoretical and Numerical Lens Design Using Near Field Theory for High Density Storage Device

Moondo Yi#, Jaehyuk Park*, Nohcheol Park*, Youngpil Park**

ABSTRACT

In optical storage device system, there are several research topics to increase its recording density. The main idea is reducing wave length of laser diode and magnifying the number of numerical aperture (NA). In conventional optical system NA cannot be over the unity in the air because of its diffraction limit. But it is possible to overcome its limitation of unity in near field using Solid Immersion Lens. In this work, the mathematical Solid Immersion Lens (SIL) design process was illustrated by using near field theory. Also, numerical SIL design parameters were calculated by means of CODE V. Through the work, we propose the new type of SIL for high density optical recording systems.

Key Words : High Density Storage(고밀도 저장), Solid Immersion Lens (고체잠입렌즈), Total Internal Reflection(내부전반사), Near Field(근접장), Effective Numerical Aperture(유효 개구수)

1. 서론

1982 년 650MB 의 용량을 가진 CD(Compact Disc)가 상용화 된 이후 레이저 광을 이용한 기록 재생 기기들의 용량을 늘이기 위한 여러 가지 방법들이 개발 되고 있다. 일반적으로 레이저 광을 이용한 정보저장매체들의 기록 용량을 확대하기 위해서는 그 기록 마크를 작게 하여야 한다. 이 기록 마크는 사용하는 레이저의 파장 λ 와 렌즈의 개구수 NA 에 의하여 (1)의 식으로 결정된다.

$$d = 0.82 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

여기서 d 는 렌즈를 통하여 집광된 빔의 파면이 평면이 되는 지점의 직경을 의미한다. 식(1)을 바탕으로 두 가지 방향으로 기록 마크를 작게 하는 연구가 활발히 진행 중이다. 첫 번째로는 파장 λ 를 짧게 하여 d 를 작게 하는 것이다, 둘째는 NA 값을 크게 하여 d 값을 작게 하는 것이다.
2,3,4,5

접수일: 2003 년 3 월 12 일; 게재승인일: 2003 년 7 월 11 일
교신저자: 연세대학교 기계공학과
E-mail: sexymild@yonsei.ac.kr, Tel: (02) 2123 -4677
* 연세대학교 기계공학과
** 연세대학교 기계공학부

Table 1 에서 현재 상용화 된 저장 장치에서 사용 중인 λ 와 NA 를 비교하였다.

Table 1 Beam spot diameter depends on λ and NA

Media	λ (nm)	NA	d (μm)	용량 (GB)
CD	780	0.45	1.42	0.65
DVD	660	0.60	0.90	4.7
Blu-Ray	405	0.85	0.39	27

여기서 NA 는 식 (2) 로 나타내어진다.

$$NA = n \sin \theta \quad (2)$$

여기서 n 은 빛이 통과하는 매질의 굴절률이다.

$n_{air} = 1.0003$ 이므로 NA 는 공기 중에서 1 보다 클 수가 없게 된다. 그러나 근접장 이론의 소멸파(Evanescent Wave)를 이용하여 이 값을 1 이상으로 만들어 집광되는 빔의 직경을 더욱 작게 할 수 있다.

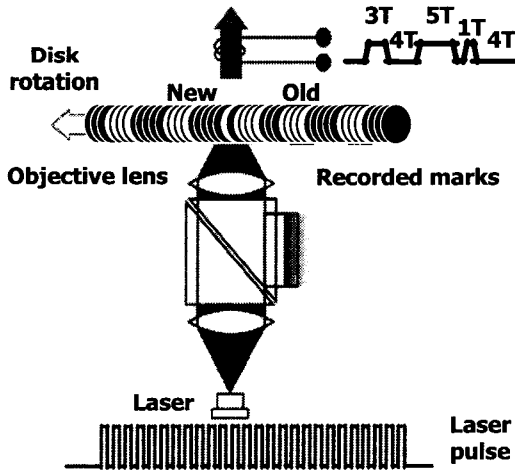


Fig. 1 Schematic diagram of laser pump MFM

위와 같은 원리를 기본으로 기록밀도를 더욱 향상 시키기 위하여 광자기 기록 및 재생 기술이 도입되고 있다. 광자기 기록에 있어서는 레이저 펄프 자체변조 방식을 이용하여 기록마크를 극소화한다. Fig. 1 에서와 같이 레이저를 펄스로 구동하면서 자체변조를 신호의 길이에 따라 발생하면서

기록을 수행한다. 이 극소화된 기록 마크를 MSR (Magnetically induced Super Resolution), MAMMOS (Magnetic AMplifying Magneto-Optical System), DWDD (Domain Wall Displacement Detection) 등의 방식을 이용하여 재생을 할 수 있다.^{6,7}

2. 렌즈설계

2.1 근접장의 기본개념

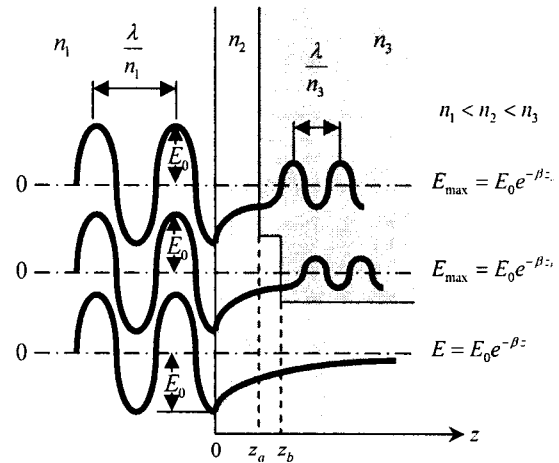


Fig. 2 The behavior of evanescent wave propagation

Fig. 2 에서 임의의 파장 λ 를 가지는 광의 에너지는 임의의 굴절률 n_1, n_2, n_3 을 가지는 매질을 통과함에 있어서 중간에 존재하는 매질 n_2 의 간격에 따라 매질 n_1 에서의 에너지 E_0 가 매질 n_3 로 (3)식에 따라 전달 된다.⁸

$$E_{\max} = E_0 e^{-\beta z} \quad (3)$$

여기서,

$$\beta = k_2 \sqrt{\frac{\sin^2 \theta}{n_2^2} - 1}, \quad k_2 = \frac{2\pi n_2}{\lambda}, \quad n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \theta \geq \theta_{TIR}$$

이다. 여기서 θ_{TIR} 은 광이 매질 n_1 에서 매질 n_2 로 입사할 경우의 내부전반사가 발생하는 각도이다. 식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 매질 n_1 과 n_2 의 간격을 사용하는 파장 이하로 무한히 작게 하면 매질 n_1 의 전반사 이상의 각도에서도 광에

너지가 매질 n_3 로 전달 된다. 따라서 식 (2)에서
의 각도 θ 를 θ_{TR} 이상으로 크게 하는 것이 가능
하게 되어 NA 값을 크게 하는 것이 가능하다.
그러므로 식 (1)에 의하여 집광되는 광의 직경을
더욱 작게 하여 기록 밀도를 높일 수 있게 된다.

2.2 렌즈의 이론적 설계

기록밀도를 높이기 위한 방법으로 근접장에서
발생하는 소멸파를 이용하기 위한 SIL 렌즈 이론
적인 모델을 Fig. 2 에서 보였다.

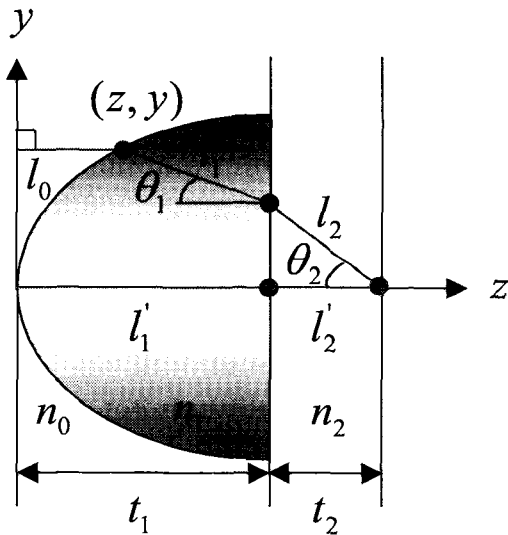


Fig. 3 Theoretical model of SIL

Fig. 3 에서 SIL 렌즈에 평행하게 입사하여 굴절
한 후 미디어로 다시 굴절하여 초점에 맺히는 입
사의 광 경로 l_0, l_1, l_2 와 광축 z 를 따라 초점에
이르는 경로 l'_1, l'_2 사이에는 페르마의 원리(Fermat's
principle)에 따라 식 (4)의 관계가 성립한다.

$$l'_1 + l'_2 = l_0 + l_1 + l_2 = const \quad (4)$$

따라서,

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

z 의 좌표는 식 (5)로 정리 된다.

$$z = \frac{n_1 t_1 \left(1 - \frac{1}{\cos \theta_1} \right) + n_2 t_2 \left(1 - \frac{1}{\cos \theta_2} \right)}{n_0 - \frac{n_1}{\cos \theta_1}} \quad (5)$$

또한 SIL 의 y 좌표의 값은 식 (6)과 같다.

$$y = (t_1 - z) \tan \theta_1 + t_2 \tan \theta_2 \quad (6)$$

한편 스넬의 법칙(Snell's Law)으로부터 식 (7)
의 관계를 알 수 있다.

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2 \right) \quad (7)$$

따라서 SIL 렌즈의 형상을 설계하기 위해서는
 θ_2 의 값을 -90° 부터 $+90^\circ$ 까지 변화 시키면서
식 (7)로부터 θ_1 의 값을 구하고 이 값을 식 (5)에
대입하여 SIL 렌즈의 z 좌표 값을 알아내고 다시
이 좌표 값을 식 (6) 대입하여 SIL 렌즈의 y 좌표
값을 구하는 것으로 이론적인 SIL 의 형상을 설계
할 수 있다. θ_2 의 값의 변화에 따라 y 좌표의 최
소값부터 최대값까지의 차이가 SIL 의 직경이 된
다. 또한 $y = y_{max}$ 에서의 θ_2 를 θ_m 이라고 하면 설
계한 SIL 의 NA 값은 식 (8)과 같다.

$$NA_{eff} = n_2 \sin \theta_m \quad (8)$$

이 값은 매질 n_1, n_2 사이의 내부 전반사 각도
이상이 되므로 식 (2)부터 구할 수 있는 NA 값
보다 큰 NA_{eff} 를 얻을 수 있다.¹

따라서 $d = 0.82 \frac{\lambda}{NA_{eff}}$ 가 되어 보다 작은 집

광 된 광의 직경을 실현할 수 있게 된다.

일반적인 광 저장 장치와 비교할 경우 매질
 n_1 은 대물렌즈에 해당하고 매질 n_2 는 기록매체에
해당한다. 또한 n_1 과 n_2 는 같은 재질을 사용하므
로 굴절률이 같게 되어 $n_1 = n_2$ 된다. 이 경우 SIL
의 향상은 식 (9)로 표현된다.

$$z(y) = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} \quad (9)$$

여기서, $c = \frac{n_1}{a(n_1 - n_0)}$, $k = -\left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2$,

$a = t_1 + t_2$ 이다.

2.3 렌즈의 물성치 및 기본 설정 값

SIL 구체적인 설계를 위하여 사용한 재료의 물성치 및 기본 설정 값들을 Table 2 에 보였다.

Table 2 Basic parameter value for design

기호	값	설명
n_0	1.0003	공기의 굴절률
n_1	1.57964236478	SIL 의 굴절률
n_2	n_1	기록 보호층의 굴절률
t_1	4.0mm	SIL 의 두께
t_2	0.1mm	기록 보호층의 두께
λ	660nm	사용 파장

Table 2 의 값들을 기준으로 식 (5)~(8)을 이용하여 구한 값들을 Table 3 에 보였다.

Table 3 Characteristic value of SIL by theory

기호	값	설명
θ_m	50.7349 deg	최대 입사각
NA_{eff}	1.223	개구수
EPD	3.8858	입사동
d	442.5 nm	집광 빔의 직경
c	0.6650	렌즈의 중심 곡률
k	-0.4010	코닉 상수

MATLAB 을 이용하여 이론적인 식들을 계산하고 SIL 형상을 Fig. 4 에 나타내었다.

2.4 CODE V 를 이용한 SIL 설계

CODE V 를 이용하여 이론적으로 설계한 SIL 을 수치적으로 다시 설계를 수행하여 Table 3 에서 보인 주요 파라미터들을 구하여 비교 분석하였다.

CODE V 를 이용한 수치 해석을 통하여 Seidel

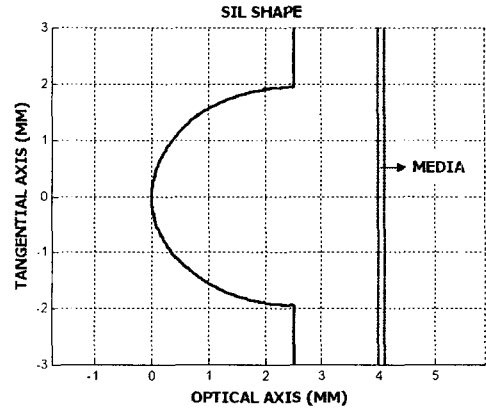


Fig. 4 The shape of SIL by theory

의 5 수차(구면 수차, 코마 수차, 비점 수차, 만곡 수차, 왜곡 수차)들의 값을 최소로 하도록 최적화 하였다. 최적화를 수행하기 하여 DEL 명령을 사용하여 1600 개의 광선을 생성한 후 그중 입사동으로 입사되는 광선 1256 개를 이용하였다. Fig. 5 에 CODE V 를 이용하여 설계한 SIL 의 형상을 보였다.

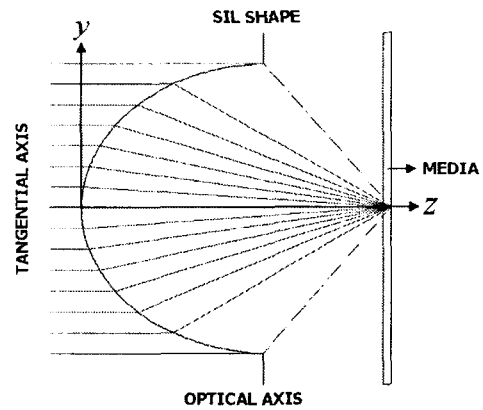


Fig. 5 The shape of SIL by CODE V

각종 수차들의 최적화를 수행하면서 그 것들로 인한 파면수차의 합이 사용파장의 0.07λ 이하가 되어야 한다는 마레샬 조건(Marechal Criterion)을 만족 하도록 하였다. Table 4 에서는 CODE V 를 이용한 SIL 의 특성을 보여준다.

MTF(Modulation Transfer Function)의 경우 SIL

에 입사각이 각각 $0^\circ, 0.02^\circ$ 인 경우에 대한 MTF 를 Fig. 6 에 나타내었다. 일반적으로 광 기록 재생 기기용 렌즈계의 MTF 의 경우 공간 주파수의 증가에 따라 도중에 증감이 발생하지 않아야 사용이 가능하다. 공간 주파수에 따라 크기의 증감이 발생할 경우 정보를 판독하지 못하게 된다.

Table 4 The characteristic value of SIL by CODE V

기호	값	설명
θ_m	50.0965 deg	최대 입사각
NA_{eff}	1.212	개구수
EPD	3.8840	입사동
d	446.5 nm	집광 빔의 직경
c	0.6646	렌즈의 중심 곡률
k	-0.4007	코닉 상수

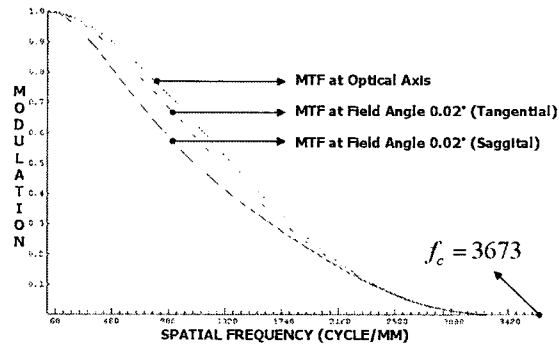


Fig. 6 Modulation Transfer Function of SIL

최대로 판독이 가능한 공간 주파수의 값은 식 (10)과 같다.

$$f_c = \frac{2NA_{eff}}{\lambda} \quad (10)$$

본 설계에서의 이론적인 값은 $f_c = 3673$ 이 되어 Fig. 6 의 MTF 의 값과 잘 일치함을 알 수 있다.

LSF(Line Spread Function)로부터 광의 에너지 분포를 알 수 있으므로 이 그림으로부터 집광된 광의 대략적인 직경을 확인 할 수 있다. Fig. 7 에 보는 집광된 빔의 직경의 위치 즉, 파면 수차가 평면으로 나타나는 위치를 보였다. 가로축의 한 눈금의 간격은 약 $0.5\mu m$ 이다.

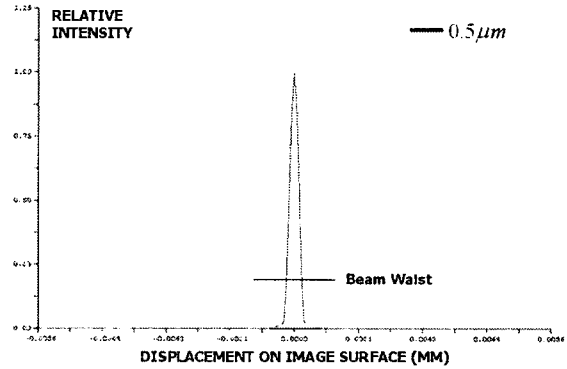


Fig. 7 Line Spread Function of SIL

3. 설계 결과 분석 및 제작

Table 5 Comparison of parameter value

기호	이론	CODE V	차이
θ_m	50.7349 deg	50.0965 deg	+1.258%
NA_{eff}	1.223	1.212	+0.899%
EPD	3.8858	3.8840	+0.046%
d	442.5 nm	446.5 nm	-0.904%
c	0.6650	0.6646	+0.060%
k	-0.4010	-0.4007	+0.075%

Table 5 에 이론적으로 구한 SIL 의 특성 값과 CODE V 를 이용한 특성 값들을 비교하였다. 각 값들은 1% 이하의 오차로 대부분 일치하였다. 목적에 맞는 렌즈 시스템을 설계하기 위하여는 대부분 수치적인 방법이 이용된다. 이론적인 방법만을 이용할 경우 기하광학적인 측면에서만 렌즈를 설계하게 되므로 각종 수차 특성을 파악할 수 없다.

본 연구에서는 이론적인 방법을 이용하여 Table 3 에서 보인 값들을 만족하고 동시에 각종 수차들을 제거하기 위하여 CODE V 를 이용하여 최적화를 수행하였다. 최적화를 위하여 식 (9)를 확장하여 식 (11)과 같이 하였다.

$$z(y) = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + Ay^4 + By^6 + Cy^8 + Dy^{10} + Ey^{12} + Fy^{14} + Gy^{16} + Hy^{18} + Jy^{20} \quad (11)$$

설계한 렌즈의 실제 가공을 위한 실용적인 측면을 고려하여 F, G, H, J 의 값은 0으로 처리하고 A, B, C, D, E 의 계수 값을 구하여 최적화하였다. 그 결과를 Table 6에 보였다.

Table 6 Aspheric coefficient by CODE V

계수	값	비고
A	-0.173786E-03	4 차 비구면 계수
B	+0.182749E-03	6 차 비구면 계수
C	-0.974989E-04	8 차 비구면 계수
D	+0.248984E-04	10 차 비구면 계수
E	-0.246951E-05	12 차 비구면 계수

비구면 계수들의 차수를 늘리면서 각종 수차들을 작게 할 수 있다. 그러나 가공상의 한계로 인하여 일반적으로 12차 항까지 고려한다.

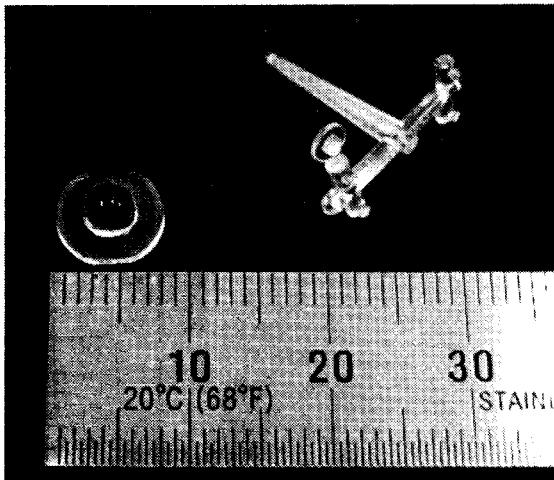


Fig. 8 The manufactured SIL

Fig. 8에서 Table 5와 6을 기준으로 금형을 제작한 후 사출 성형한 SIL의 사진이다. 그림의 우측 상단은 4개의 캐비티 중 한 개만을 이용하여 사출 성형한 것을 나타내고 눈금자와 비교한 것은 이것으로부터 떼어 낸 후의 모습이다.

Fig. 9에서는 사출 성형된 SIL의 간섭무늬를 측정하는 것이다. 프린지의 중심이 약간 일치하지 않은 것은 측정 시 렌즈가 약간 기울어진 것에 기인한다. 또한 이 간섭무늬를 통하여 사출된 SIL의 외형상의 이상이 없음을 알 수 있다.

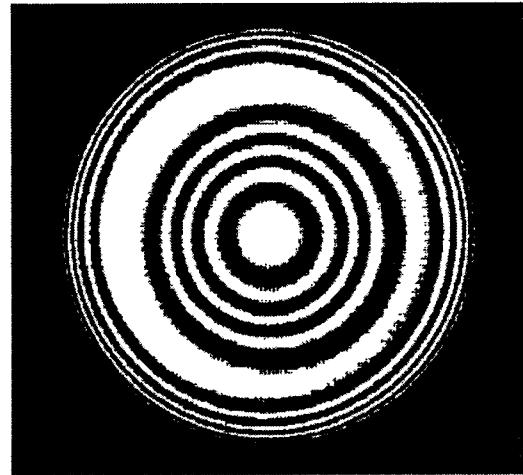


Fig. 9 Interference fringe pattern of manufactured SIL

4. 결론

본 연구를 통하여 근접장 이론, 페르마 원리 및 스넬의 법칙을 이용한 SIL의 이론적인 방법을 보였다.

이를 통하여 SIL의 기본 특성 값을 구하였다. 이 값들은 기하 광학적인 부분만을 만족하므로 이 값을 유지하면서 파동 광학적으로도 만족시키기 위하여 CODE V를 이용한 수치해석 방법을 수행하였다.

이 두 가지 방법을 통하여 구한 SIL의 기본 특성 값들이 서로 잘 일치함을 확인하였고 구체적인 SIL의 제작을 위한 최적의 값을 구하였다.

지금까지의 결과를 바탕으로 다음의 연구들을 계획하고 있다.

이론적인 방법을 통하여 구한 SIL의 특성 값들과 수치해석을 이용하여 최적화를 수행한 후 얻은 값들을 바탕으로 실제 가공을 수행한다.

SIL가공 후 BPA(Beam Profile Analyzer)와 WEA(Wave Front Analyzer)를 이용하여 각종 수차 값과 파면 수차를 측정하여 상호 비교하여 렌즈의 성능을 분석하고자 한다.

또한 PC(Phase Change) 미디어 및 MO(Magneto Optical) 미디어에 직접 기록을 수행하여 기록 마크를 TEM(Transmission Electron Microscope) 및 MFM(Magnetic Force Microscope)으로 확인하여 기존의 CD 및 DVD 미디어의 기록 마크와 비교 평가하고자 한다.

현재 상용화된 재료에 대하여 연구를 수행한 결과를 굴절률에 다른 여러 재료에 대하여 수행하여 고밀도 기록을 위한 광학적 파라미터에 대한 연구를 좀 더 깊게 수행 하고자 한다.

8. Michael A. Paesler, Patric J. Moyer, Near-Field Optics Theory : Instrumentation, and Applications, A Wiley-Interscience Publication, New York pp. 146-148.

후 기

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

참고문헌

1. Song, Tae-Sun, Kwon, Hyuck-Dong, Yi, Moon-Do, Yoon, Yong-Joong, Jung, Kyoung-Sung, Park, No-Cheol and Park, Young-Pil, "Aspherical Solid Immersion Lens for Highly Efficient Optical Head in Near-Field Recording,"
2. Betzig, E., Trautman, J. K., Wolfe, R. E., Gyorgy, M., Finn, P. L., Kryder, M. H. and Chang, C. H., "Near-field Magneto-Optics and High Density Data Dtorage," Appl. Phys. Lett. 61 (2), pp. 142-144, July 13, 1992.
3. Terris, B. D., Mamin, H. J., Rugar, D., Studenmund, W. R. and Kino, G. S., "Near-field Optical Data Storage using a Solid Immersion Lens," Appl. Phys. Lett. 65 (4), pp. 388-390, July 25, 1994.
4. Tom D. Milster, "Near-field Optics : A New Tool for Data Storage," Proceedings of the IEEE, Vol. 88, No. 9, pp. 1480-1490, September 2000.
5. Chekanov, A., Birukawa, M., Itoh, Y. and Suzuki, T., "A High Numerical Aperture Solid Immersion Lens Magneto-optical Recording System," IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 35, No. 5, pp. 3100-3105, September 1999.
6. Hiroyuki Awano and Norio Ohta, "Magneto-optical Recording Technology Toward 100 Gb/sq. in.," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 4, No. 5, pp. 815-820, September/October 1998.
7. Sbiaa, R., Stavrou, E., Chekanov, A., Birukawa, M., Itoh, Y. and Suzuki, T., Fellow, IEEE, "High Density Magneto-Optical Recording Using Solid Immersion Lens with Magnetic Field Modulation," IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 36, No. 5, pp. 2276-2278, September 2000.