

유한요소법을 이용한 Super-ROM 디스크 구조의 열 분포 해석

Simulations of time dependent temperature distributions of Super-ROM disk structure using finite element method

안덕원^{*}, 유천열^{*}

Duck-Won Ahn and Chun-Yeol You

Abstract

It is widely accepted that the reading mechanism of Super-RENS (super-resolution near field structure) and Super-ROM (super-resolution read only memory) is closely related with non-linear temperature dependent material properties such as refractive indices, phase change. Furthermore, the dynamic change of the temperature distribution also an essential part of reading mechanism of Super-RENS/ROM. Therefore, the knowledge of the temperature distribution as a function a time is one of the important keys to reveal the physics of reading mechanism in Super-RENS/ROM. We calculated time-dependent temperature distribution in a 3-dimensional Super-ROM disk structure when moving laser beam is irradiated. With a help of commercial software FEMLAB which employed finite element method, we simulated the temperature distribution of ROM structure whose pit diameter is 120-nm with 50-nm depth. Energy absorption by moving laser irradiation, time variations of heat transfer processes, heat fluxes, heat transfer ratios, and temperature distributions of the complicate 3-dimensional ROM structure have been obtained.

Key Words: Super-RENS, Super-ROM, Finite Element Method, Super-resolution

기호설명

C_p	specific heat per unit mass
k	thermal conductivity
P_0	incident power
Q	source term induced by laser heating
R_0	exp(-1) radius of Gaussian beam
T	temperature
t	time
V	velocity of laser
	Greek Symbols
μ_a	absorption coefficient
ρ	mass density
$\chi(t)$	pulse shape

1. 서론

멀티미디어 기술의 발달과 인터넷의 보편화로 인하여 개인이 필요로 하는 정보량은 급속도로 증가하고 있다. 이에 따라 정보를 읽고, 쓰고 저장하는 저장매체 기술의 발달도 뒤따르게 되었다. 그 중 광 정보저장장치기술은 광원의 단파장화와 NA (numerical aperture)의 증가로 인한 기록 피트 크기의 감소에 의해 빠르게 고밀도화가 이루어지고 있다.

그러나 이와 같은 기술개발에도 불구하고 빛이 가지는 물리적 특성인 회절한계로 인해 기존의 방법을 이용한 고밀도화는 실질적인 한계에 도달했다. 광의 회절한계를 극복하기 위한 수단으로 근접장 광기록 기술을 이용한 SIL(solid immersion lens), SPR(scanning probe recording)등이 모색되어지고 있지만 여러 가지 근본적인 문제로 인하여 실용화가 어려운 상황이다. 반면에 Super-RENS 기술은 기존 광픽업 헤드를 그대로 이용하면서

[†] 인하대학교 자연과학대학 물리학과
E-mail : cyyou@inha.ac.kr
^{*} 인하대학교 자연과학대학 물리학과
논문접수일 (2005년 3월 30일)

미디어의 구조를 초해상 근접장 구조로 바꾼 것만으로 광 회절한계를 초월한 작은 크기의 피트의 기록, 재생이 가능하도록 고안한 방법으로 정보의 기록밀도를 120 GB/in² 으로 높일 수 있는 새로운 기록방식으로 활발히 연구되고 있다 [1].

그러나 Super-RENS의 연구에 있어서 물성의 비선형적 온도 의존성이나 근접장 현상 등의 난해함 등이 reading mechanism을 이해하는데 큰 걸림돌이 되고 있다. 따라서 초해상 현상을 이해하기 위해서는 움직이는 레이저 빔의 조사에 따른 온도분포 해석이 필수적으로 선행되어야 한다.

본 연구는 유한요소법을 이용한 상용 소프트웨어인 FEMLAB을 사용하여 회절한계보다 작은 피트를 가진 Super-ROM디스크 구조에 움직이는 레이저 빔을 입사 시켰을 때, 다층박막내의 시간에 따른 온도분포를 계산하였다 [2,3].

2. 모델의 이론

각 층에 주어진 specific heat C_P 와 thermal conductivity x 에 대해서 heat conduction 방정식은 다음과 같이 주어진다 [4].

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T = Q(x, y, z, t) \quad (1)$$

이때 $T(x, y, z, t)$ 는 각 위치와 시간에 대한 온도를 의미하고 $Q(x, y, z, t)$ 는 레이저 빔에 조사에 의해 생성된 열원을 의미한다.

$$Q(x, y, z, t) = Q_{laser}(x, y) \cdot Q_{absorb}(z) \cdot \chi(t) \quad (2)$$

위 식은 열원의 항을 각 성분으로서 표현한 것이다. $Q_{laser}(x, y)$ 항은 x, y 평면상에 조사된 레이저 power density를 의미하며, $Q_{absorb}(z)$ 는 각 층의 에너지 흡수에 의한 heat-generating rate을 의미하고 $\chi(t)$ 는 시간에 변화에 따른 레이저 펄스의 형태를 표시한다.

레이저 빔에 의한 각층에 대한 x, y 평면상의 가우시안 강도 분포식 으로서 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$Q_{laser}(x, y) = \frac{P_0}{\pi R_0^2} \exp\left\{-\frac{(x-Vt)^2 + y^2}{R_0^2}\right\} \quad (3)$$

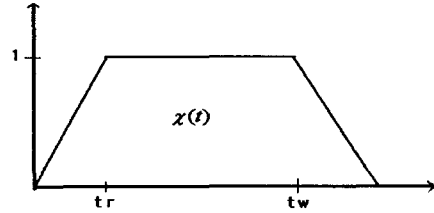


Fig. 1 Trapezoid pulse shape as a function time.

여기서 P_0 는 초기입사 power이고 R_0 는 빔의 초점크기 (spot size)이고 $I(x, y, z)$ 가 보통 빔의 최고 출력밀도 I_0 의 e^{-1} 가 되는 위치의 크기가 되는 지점에서 레이저 빔의 직경을 정의했다. 레이저 빔을 각층에 조사 시키면 입사된 레이저 빔과 각 층간의 물리적 상호작용에 의해서 에너지 흡수 현상이 일어난다. 이런 작용을 Lambert-Beer 법칙으로 에너지 흡수에 대한 표현을 단순화 하여 나타내었다 [4].

$$Q_{absorb}(z) = \mu_a \exp[-\mu_a z] \quad (4)$$

이때의 μ_a 는 흡수계수이고 침투깊이는 역수 $1/\mu_a$ 로 나타낼 수 있다.

그리고 시간의 변화에 의한 전형적인 펄스의 형태를 나타내는 함수인 $\chi(t)$ 는 Fig. 1과 같이 나타내며, 다음과 같이 표현이 가능하다 [5].

$$\chi(t) = \begin{cases} \frac{1}{t_r} t & : 0 \leq t \leq t_r \\ 1 & : t_r \leq t \leq t_w \\ 1 - \frac{t-t_w}{t_r} & : t_w \leq t \leq t_w + t_r \end{cases} \quad (5)$$

3. FEMLAB을 이용한 프로그램 해석

유한 요소법(Finite Element Method)은 연속체를 유한요소로 분할하고, 전체 시스템을 작은 요소의 집합체로써 표현하는 방법으로서 수치 해석적으로 연속적 해가 아닌 각 분할점에서의 해를 수치 해석적으로 구하는 방법으로 공학 전 분야에 걸쳐 널리 사용되고 있다. 특히 디스크 구조에서 온도 분포를 구할 때 많이 사용되는 Mansunpur의 유한차분법 (finite difference method)은 요소의 크기가 균일하기 때문에 전 공간을 같은 사이즈로

Table 1 Thermal and optical parameters of Super-ROM disk

Layer	Thickness (nm)	k (W/mK)	C_p (J/kgK)	Refractive index n
Substrate (PMMA)	∞	0.2	1500	1.46
Reflector (aluminum)	30	240	1000	1.2-6.9i

분할하여 계산양이 방대하게 된다. 또한 피트와 같은 3차원적인 복잡한 구조를 표현하기에 적합하지 않다 [6]. 반면, 유한요소법(finite element method)의 장점은 복잡한 구조에서 관심 있는 영역에 대하여만 자세히 계산을 할 수 있으므로 계산시간을 단축시킬 수 있다.

본 연구에서는 상용화 된 유한요소 프로그램인 FEMLAB을 이용하여 문제를 해석하였다. Fig. 2는 회절한계보다 작은 피트를 가진 Super-ROM 디스크 구조의 모식도이고 Fig. 3 (a)는 수치 해석적 방법으로 해를 구하기 위하여 Fig. 2 모식도를 작은 요소의 집합체로 분할한 그림이다. Fig. 3 (b)는 본 연구를 통해 얻은 Super-ROM 디스크 구조의 전형적인 온도분포 값을 나타낸 그림이다.

4. 결과

현재 사용되는 CD-ROM 이나 DVD-ROM의 피트 직경이 각각 $0.74 \mu m$, $0.4 \mu m$ 인데 비해 본 연구에서는 계산에 사용된 ROM구조는 피트의 직경이 120 nm이고 깊이가 50 nm 이다. 열원으로 사용된 레이저의 power는 4 mW이고 파장은 405 nm, 빔의 반경은 238 nm 와 속도는 8 m/s 으로 계산하였다. 그리고 각 층의 물리상수 값들은 Table 1 제시되어있다.

Fig 4와 5 에서 나타난 온도분포 값들은 Super-ROM 디스크 층사이의 계면에서의 온도 분포와 트랙의 중심에서의 단면의 온도 분포를 나타낸 것이다. 각 층의 온도 분포는 색깔로 표현을 하였는데, 같은 색은 같은 온도를 나타내고, 각 색의 온도는 우변 막대 그래프로 표시되어 있다. 각 그림에 표시된 시간은 레이저 빔이 조사되기 시작한 이후의 시간을 나타내고 있다.

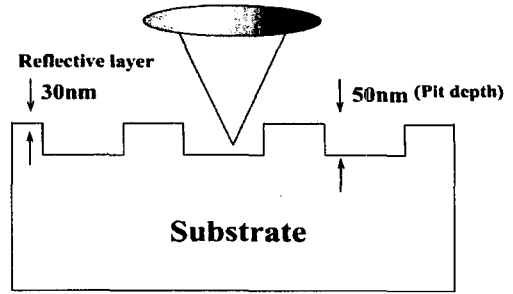


Fig. 2 Structure of Super-ROM disk.

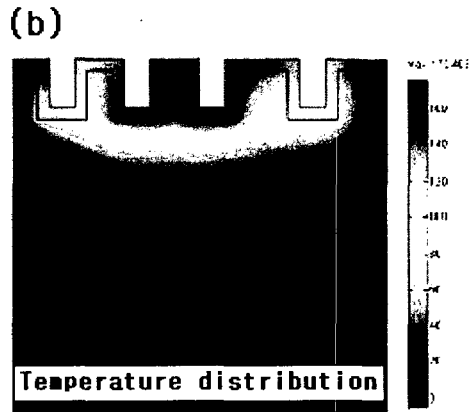
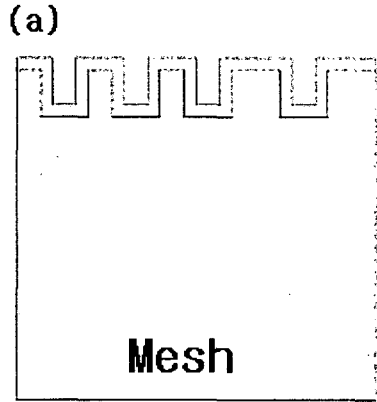


Fig. 3 (a) Cross section view of mesh and (b) temperature distribution of Super-ROM disk.

유한요소법을 이용한 Super-ROM디스크 구조의 열 분포 해석

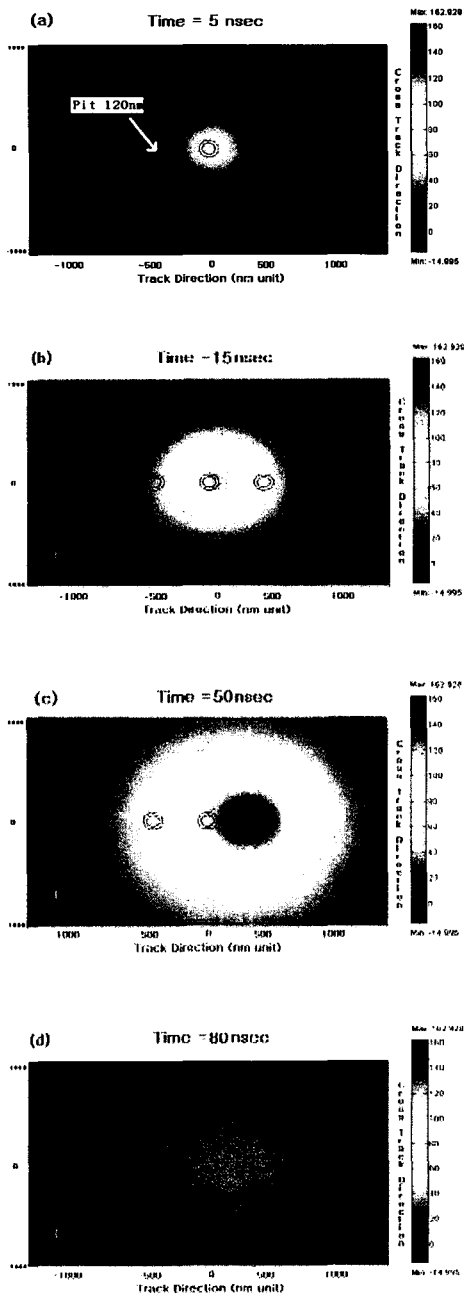


Fig.4 Top view of temperature distributions in Super-ROM disk. Horizontal direction is track direction, and vertical direction is radial direction of the disk. Laser beam is moving from left to right.

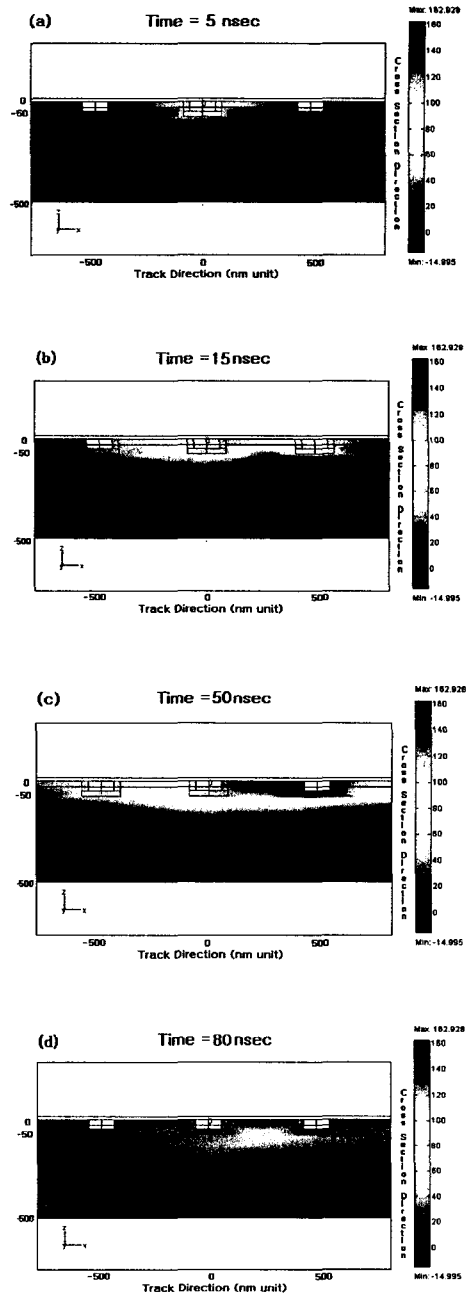


Fig.5 Cross section view of temperature distributions in Super-ROM disk. Horizontal direction is track direction, and vertical direction is depth direction of the disk.

먼저 Fig. 4 (a) 를 보면 레이저 pulse가 조사되기 시작한 후 5 nsec의 온도분포를 보이고 있는데, 레이저 빔이 가우시안 분포이므로 온도의 변화도 반경에 따른 대칭성을 나타내고 있다. 또한 가운데 피트의 반사층 (Al)에서 가장 먼저 온도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 레이저 흡수가 가운데 피트의 반사층에서 가장 많이 발생하므로 반사층부터 온도가 증가하기 시작한다.

(b) 는 $t = 15$ nsec 를 보여주는데, 가운데 피트의 반사층(Al) 중심의 온도 약 100 C 정도로 상승함을 알 수 있고 흡수된 열이 옆으로 점차 빠르게 확산됨을 볼 수 있다. 전체적으로 온도의 분포가 약간 오른쪽으로 이동했음을 알 수 있는데, 이는 레이저 빔이 8 m/s의 속도로 이동하기 때문이다. $t = 50$ nsec인 경우는 바로 레이저 빔이 꺼지기 직전인데, 레이저 빔의 이동에 의해서, x 방향의 대칭성이 깨어진 것을 확연하게 확인할 수 있다. 이때 중심 부분의 온도는 거의 160 C 확인할 수 있고, 또한 단면도에서도 x 방향의 대칭성이 깨져 있음을 알 수 있다. 레이저의 파워를 끈 후 약 30 nsec가 지난 후 $t = 80$ nsec는 위의 평면도와 단면도에서 보는 바와 같이 빔의 중심이었던 부분을 중심으로 상당히 넓은 영역에 걸쳐서 균일한 50 C ~ 60 C 온도분포를 보임을 확인할 수 있다. 이 정도 시간에서는 이미 충분한 냉각이 이루어졌음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

FEMLAB으로 계산된 온도분포 값을 통하여, 레이저 조사에 의한 에너지 흡수 및 열전달과정, 열속, 열전도율, 반사층 온도에 대한 공간 및 시간에 대한 변화 값을 알 수 있었다.

Super-ROM디스크 정보재생과정에서 발생하는 초해상현상은 레이저에 의해 입사된 박막내의 온도분포변화에 따른 비선형적인 물성의 변화가 밀접한 관련이 있을 것으로 알려져 있다. 완성된 온도분포계산 프로그램은 초고밀도 광디스크의 개발을 위한 물질 재료의 개발 및 이들을 조합한 광/열 특성 설계에 활용 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] J. Tominaga, 1998, "An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film", Applied Physics Letters, Vol.73, No.15, pp. 2078-2080.
- [2] COMSOL AB, FEMLAB User's Guide, 2004 (<http://www.comsol.com>).
- [3] T. Kikukawa, 2001, "High-Density Read-only Memory Disc with Super Resolution Reflective layer", Jpn .J. Appl. Phys. Vol.40, pp.1624-1628.
- [4] M. K Loze, 1997, "Temperature distributions in semi-infinite and finite-thickness media as a result of absorption of laser light", Applied Optics, Vol.36, No.2, pp.494-507.
- [5] O. W. Shih, 1994, "A multilayer heat conduction solution for magneto-optical disk recording", J. Appl. Phys. Vol.75, No.9, pp.4382-4395.
- [6] M. Mansuripur, 1982, "Laser-induced local heating of multilayers", Applied Optics, Vol.21, No.6, pp. 1106-1114.