

## 도메인 확장형 광자기 디스크의 온도분포 및 재생신호 시뮬레이션

양재남 · 조순철\*

숭실대학교 정보통신전자공학부  
서울특별시 동작구 상도 5동 1-1, 156-743

(2004년 2월 24일 받음, 2004년 4월 15일 최종수정본 받음)

도메인 확장형 광자기 디스크 시스템(magnetic amplifying magneto-optical system; MAMMOS)의 기록마크 시뮬레이션을 위한 온도분포와 재생신호를 연구하였다. 정지된 디스크에서 레이저 빔에 의한 기록층과 이웃하는 층들의 온도 분포를 계산하였으며, 마크 크기와 길이 및 위치를 계산하였다. 또한 마크 모양에 따른 재생신호의 크기, 기록층에 기록되는 마크의 재생신호 및 판독층에서 확대된 재생신호를 시뮬레이션 하였다. 간소화된 열전달 특성 모델을 계산함으로써, 기록층과 인접한 층에서의 온도분포를 시간의 함수로 계산하였다. 마크 크기는 디스크가 회전할 때 기록 빔 펄스 파형에 의한 온도분포로부터 계산하였으며, 기록 빔 펄스 파형으로부터 디스크의 온도분포를 이용하여 마크의 길이와 위치를 계산하였다. 재생신호는 디스크의 반사도 패턴과 가우시안 빔의 컨볼루션 연산을 이용하여 계산하였다. 판독층에서 빔 크기만큼 확대된 도메인의 재생신호가 기록층에서의 초승달 모양 마크에 의한 재생신호보다 2배 이상 증가되는 것을 알 수 있었다.

**주제어** : MAMMOS, 광자기 기록, 재생신호, 온도분포, 도메인 확장형 광자기 디스크

### I. 서 론

대용량의 멀티미디어 정보 및 고화질 HDTV(high definition television) 기술의 발달에 따라 고밀도 기록을 위한 광자기 기록[1]의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다. 현재 광자기 디스크에 대한 연구로는 기록층에 기록된 매우 작은 마크(0.1  $\mu\text{m}$  이하)를 판독층에서 확장하여 재생 시 큰 신호를 얻는 도메인 확장형 광자기 디스크(magnetic amplifying magneto-optical disk)에 대한 연구가 가장 활발히 진행되고 있다[2].

광자기 디스크의 기록마크 시뮬레이션을 위한 열전달 특성에 대한 모델링은 인접한 마크들과의 상호 반응에 의한 마크 모양의 변형, 기록 밀도 등을 예측하는데 매우 유용하다. 광자기 디스크에 대한 열전달 모델링은 Green's Function Approach 방법 등이 있다[3]. 다층 구조의 광자기 디스크의 온도분포 및 열전달 현상은 O. W. Shin[4]에 의해 발전되었으며 열전달 방정식을 해석하기 위해 Green's Function을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

그러나 Green's Function을 이용하여, 열전달 현상을 모델링 할 경우 매우 복잡한 수식과 연산이 필요하므로, 이를 간소화시킨 모델들이 등장하게 되었다[5, 6]. 이들 중 하나로, A. H. M. Holtslag에 의해 제안된 Effective Layer Model 이 있다[7]. 이 모델을 사용하면 디스크내의 각 층들의 열적 특성과 시간에 따른 열전달 특성을 해석할 수 있다.

광자기 디스크의 재생 신호를 계산하기 위한 모델은 A. B. Marchant[8], V. B. Jipson[9]등에 의해 제안되었다. 재생 신호

는 집속된 빔의 반사 및 회절현상을 계산하여 모델링 할 수 있으며, Y. Tanaka[10], Sci-Joon Oh[11] 등은 양끝이 반원형인 간단한 마크 모양을 가정하여 반사 신호를 계산하였다.

본 연구에서는 디스크의 온도분포와 기록 마크의 크기 및 길이와 위치를 계산하였다. 또한 도메인 확장형 광자기 디스크의 기록층에 기록되는 초승달(crescent) 모양 마크의 재생신호와 판독층에서 레이저 빔 크기만큼 확장된 마크의 재생신호를 계산하고 비교하였다. 기록층의 온도분포와 이에 따른 기록 마크는 간소화된 열전달 모델을 이용하여 계산하였다. 재생신호는 가우시안(Gaussian) 빔과 마크의 반사 패턴의 컨볼루션(convolution)으로 Visual C++를 이용하여 계산하였다.

### II. 연구방법

광자기 디스크 내에서의 온도 분포와 인접한 층에서의 온도분포를 해석하기 위해 A. H. M. Holtslag에 의해 제안된 Effective Layer 모델[7]을 사용하였다. 재생신호는 Visual C++를 이용하여 가우시안 빔과 마크의 반사 패턴[10, 11]을 컨볼루션하여 계산하였다.

#### 2.1. 온도 분포 모델링

Fig. 1은 실제 계산에 이용된 디스크의 구조를 나타낸다. 기관층, 기록층, 보호층 등 3개의 층으로 구성되며, 기록층은 다시 3개의 층으로 구성된다. 디스크 면에 수직 방향이 z 방향이며, 원점은 기록층과 보호층의 경계면에 있고 z의 증가 방향은 위쪽이다.

\*Tel: (02) 820-0636, E-mail: jschul@ssu.ac.kr

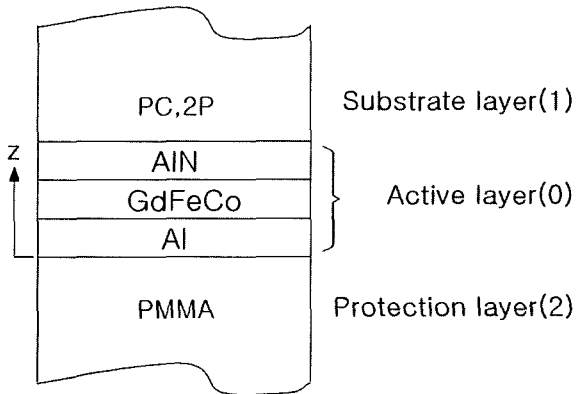


Fig. 1. Disk structure for temperature distribution calculation.

기록층에서 좌표  $x, y$ 와 시간의 함수로서의 온도분포  $T$ 는 식 (1a)와 같다.

$$T(x, y, t) = \frac{\delta Q_A}{c_1 \delta_1 + c_0 h + c_2 \delta_2} \frac{\exp[-(x^2/A^2 + y^2/B^2)]}{\pi AB} \quad (1a)$$

여기서,

$$A^2 = A_0^2 + 4\tau, \quad B^2 = B_0^2 + 4\tau, \quad C^2 = C_0^2 + 4\tau \quad (1b)$$

$$\tau = \int_0^t D(t') dt' = D_\infty t + 2 \frac{(D_0 - D_\infty)}{\gamma} [\sqrt{\gamma t} - \ln(1 + \sqrt{\gamma t})] \quad (1c)$$

$$D_0 = \frac{\sum \lambda_0 h_i}{\sum c_0 h_i}, \quad D_\infty = \frac{\lambda_1 \sqrt{\pi D_1} + \lambda_2 \sqrt{\pi D_2}}{c_1 \sqrt{\pi D_1} + c_2 \sqrt{\pi D_2}} \quad (1d)$$

$$\gamma = \left( \frac{c_1 \sqrt{\pi D_1} + c_2 \sqrt{\pi D_2}}{c_0 h} \right)^2 \quad (1e)$$

$$c_0 h = \sum c_{0i} h_i \quad (1f)$$

$A_0, B_0$ 는  $x, y$  방향으로의 가우시안 빔 계수를 나타낸다.  $A, B$ 는 열적 임펄스 응답의 확산 길이를 나타내며, 이는 레이저 빔의 크기와 열 확산에 의해 발생된 확산 정도를 길이로 나타내는 계수이다.  $\delta Q_A$ 는 면적  $S$ 를 갖는 표면에서 흡수된 전체 열의 양을 나타낸다.  $D$ 는 time dependent thermal diffusivity,  $c$ 는 heat capacity,  $\lambda$ 는 thermal conductivity이다. 여기서 아래첨자 1, 0, 2는 각각 기판층, 기록층, 보호층을 나타낸다.  $\delta_1$ 와  $\delta_2$ 는 기판층과 보호층의 effective thermal thickness이며  $h$ 는 기록층의 두께이다.  $h_i$ 에서의 아래첨자  $i$ 는 기록층을 구성하고 있는 각각의 층을 나타낸다.

기판층과 보호층에서의 온도분포는 식 (2a) 및 식 (3a)과 같다.

$$T_1(x, y, z, t) = T(x, y, t) f_1(z, t) \quad (2a)$$

$$f_1(z, t > 0) = \exp(-(z-h)^2/4D_1 t) \quad (2b)$$

$$f_1(z, 0) = 0 \quad (2c)$$

$$T_2(x, y, z, t) = T(x, y, z) f_2(z, t) \quad (3a)$$

$$f_2(z, t > 0) = \exp(-z^2/4D_2 t) \quad (3b)$$

$$f_2(z, 0) = 0 \quad (3c)$$

## 2.2. 재생신호 모델링

기록 마크에서 반사된 재생신호를 시뮬레이션하기 위하여 Fig. 2(a)와 같이 빔 스팟(spot)과 Fig. 2(b)와 같이 기록 마크를 모델링 하였다[10]. 마크의 형태는 온도분포 모델링을 통해 일정 온도 이상인 부분이 자화 반전이 일어나 마크를 형성한 것으로 생각함으로써 얻어질 수 있다. 본 논문에서는 이를 간단화하여 Fig. 2(b)와 같은 형태를 사용하였다. 재생신호를 구하기 위한 방정식은 식(4)와 같다. 식 (4)에서  $R(x, y)$ 는 디스크의 반사 패턴을 나타내고, 마크내의 반사도는 일정하다고 가정하며,  $P(X-x, Y-y)$ 는 가우시안 빔의 강도를 나타낸다.

$$V(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) \cdot P(X-x, Y-y) dx dy \quad (4)$$

식 (5)는 디스크에 기록된 마크의 반사도 패턴을 계산하기 위한 모델이다.

$$R(X, Y) = \begin{cases} 1, & \left(\frac{X}{b}\right)^2 + \left(\frac{Y}{a}\right)^2, & X < 1 \\ 1, & -a \leq Y \leq a, & 0 \leq X \leq d \\ 1, & \left(\frac{X-d}{b}\right)^2 + \left(\frac{Y-d}{a}\right)^2 \leq 1, & X > d \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5a) \quad (5b) \quad (5c) \quad (5d)$$

입사하는 레이저 빔 강도는 빔 스팟의 강도가 가우시안 함수 분포를 갖는다고 가정할 때, 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

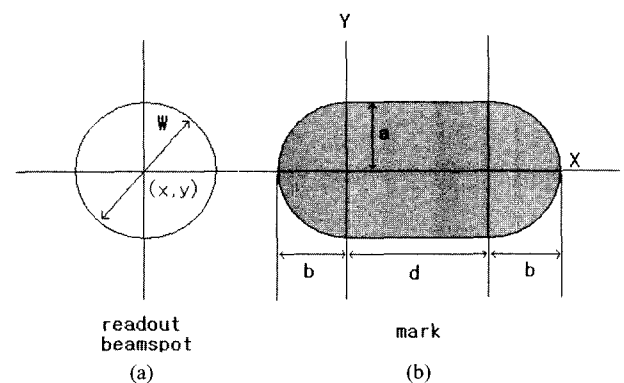


Fig. 2. Space model for laser beam and mark reflectivity.

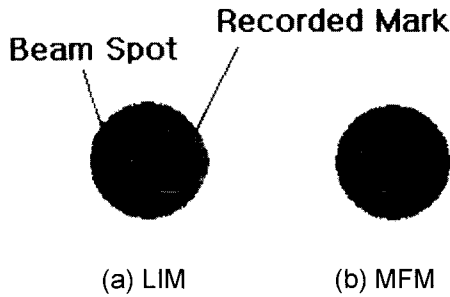


Fig. 3. Mark shape for (a) LIM and (b) MFM method.

$$P(X-x, Y-y) = A \cdot \exp \left[ -2 \cdot \frac{(X-x)^2 + (Y-y)^2}{\left(\frac{w}{2}\right)^2} \right] \quad (6)$$

이 때  $A$ (power factor)는 집중된 빔의 중심에서의 강도이고  $w$ 는 빔 중심 강도의  $1/e^2$ 이 되는 빔의 직경이다.  $(X, Y)$ 는 빔의 중심이 되는 좌표이고  $(x, y)$ 는 상대적인 위치를 나타내는 변수가 된다. 집중된 빔 스팟 크기를 나타내는  $w$ 는 레이저 다이오드에서 나오는 광선의 파장을 대물렌즈의  $NA$  (numerical aperture)로 나눈 값으로 정의되므로 power factor,  $\lambda$ ,  $NA$ 를 입력 변수로 하여 빔 스팟 크기를 결정할 수 있도록 하였다.

Fig. 3(a)와 (b)는 각각 LIM(light intensity modulation)과 MFM(magnetic field modulation) 기록방법에 의해 형성되는 최소 마크의 모양을 나타낸다.

재생 신호 계산을 위한 계수는 timing windows, linear velocity, track pitch, wavelength,  $NA$ 이다. 이들 값으로 ISO의 DVD 4.7 GB 사양을 사용하였으며, 각각 17.1 ns, 8.2 m/s, 615 nm, 650 nm, 0.6이다. LIM의 경우 PWM(pulse width modulation) 방법을 이용하여 마크를 기록할 때, 기록된 최소 마크의 길이는  $0.42 \mu\text{m}$ 이며, MFM의 경우 최소 마크의 길이는  $0.07 \mu\text{m}$ 이다. 빔의 강도가 가 되는 빔의 폭  $w$ 는  $1.2 \mu\text{m}$ 이다. MFM 방법에 의한 마크(초승달 모양)를 형성하기 위해 EFM\*(eight fourteen modulation) 변조 코드를 이용하였으며, 최소 마크를 형성하는 3T 마크에서 마지막 1T 마크를 반전 시킴으로써 초승달 모양의 마크를 형성 하였다. MFM의 경우 외부 자기장의 스위칭에 의해 마크의 크기가 결정되므로 스위칭 주기를 짧게 하면 LIM에 비해 적은 크기의 마크를 기록 할 수 있다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1. 온도 분포 계산

Fig. 4(a)는 기록된 마크의 반경을  $0.5 \mu\text{m}$ 로 가정하고, 마

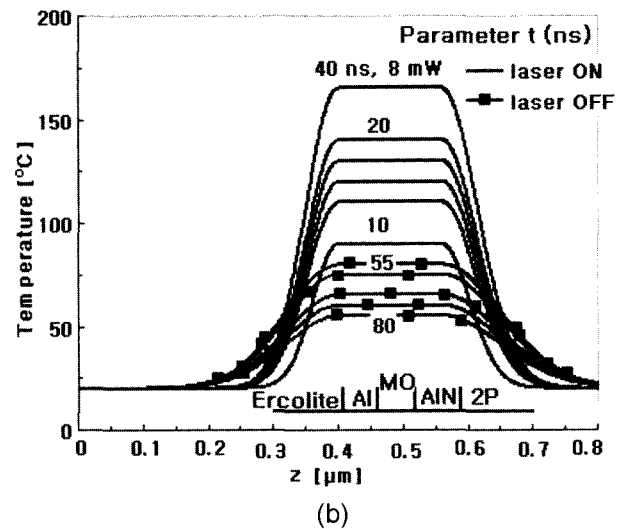
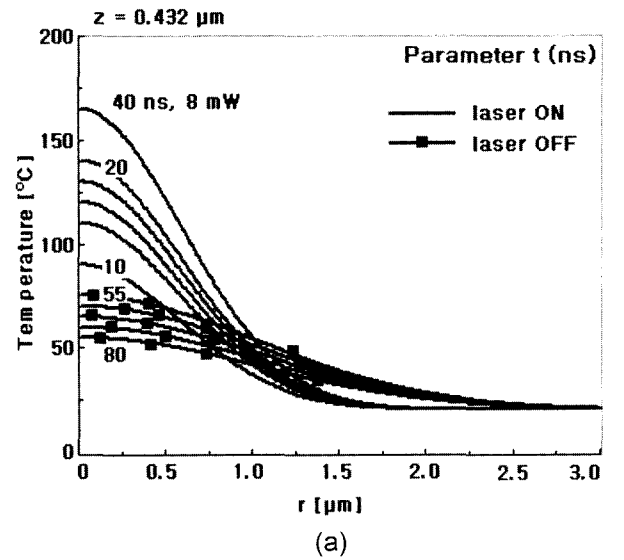


Fig. 4. Temperature distribution for a laser spot at rest (a) at the interface of the Al and MO layer as a function of the radius  $r$ , (b) as a function of  $z$  from  $t=0$  to 80 ns.

크의 중심에서 거리  $3.0 \mu\text{m}$ 까지의 온도 분포를 시간을 계수로 하여 나타내었다. 레이저빔이 입사되지 않을 때, 디스크의 온도는 상온인  $20^\circ\text{C}$ 로 가정했다.  $40 \text{ ns}$ 의 주기를 갖는 펄스 형태의 레이저가 디스크에 입사되었을 때 기록층인 Al 층과 GdTbFe 층 사이( $z = 0.432 \mu\text{m}$ )에서의 온도 분포를 거리  $r$ 의 함수로 나타낸다.  $40 \text{ ns}$ 에서 기록층의 온도는 최고로 상승하며, 이후 레이저의 파워가 꺼지므로 온도가 급격히 감소됨을 알 수 있었다. Fig. 4(b)는 기록층과 인접한 층으로의 열 확산을 나타낸다. 이때, 보호층과 기판층의 열 확산 계수는 각각  $0.12 \mu\text{m}^2/\mu\text{s}$ , 기록층을 구성하는 GdTbFe의 열 확산 계수 값은  $13 \mu\text{m}^2/\mu\text{s}$ 를 사용하였다. 기록층에 인접한 두 층의 열 전달 특성은 층을 구성하는 물질의 열확산 계수의 크기에 크

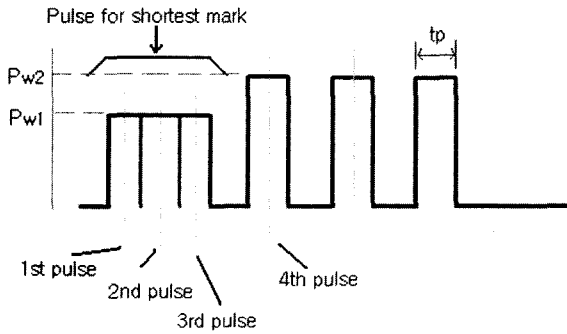


Fig. 5. Recording waveform composed of unit light pulses.

게 영향을 받는다. 광자기 디스크에서 열전달에 의한 마크 모양의 변형을 줄이기 위해 기록층에 인접한 층들의 열 확산 계수가 매우 작아야 된다.

다음은 마크 형성을 위한 기록 빔 펄스 파형과 이에 의한 디스크 내의 온도분포의 한 예를 살펴본다. Fig. 5는 마크를 형성하기 위한 기록 빔 파형이다[12]. 이는 마크 에지(mark edge) 기록 방법의 한 형태이며, LIM 기록 방법이다. 기록 파형에서의 최소 마크는 3개의 단위 펄스들로 구성된다. 이 보다 긴 마크는 4번째, 5번째 펄스 등을 가하여 얻어지며, 마크 형태의 폭의 크기를 일정하게 유지하기 위해 연속적인 빔 대신에 펄스 형태를 사용한다.

Fig. 6은 최소 마크를 형성하기 위해 3개의 펄스가 인가된 직후의 온도분포를 나타낸다. 레이저 파장, NA, 디스크의 속도는 각각, 650 nm, NA = 0.6,  $v = 10$  m/s이다. 그리고 펄스의 주기  $t_p = 20$  ns,  $P_{w1} = 4.5$  mW,  $P_{w2} = 8.0$  mW이다. 각각의 펄스에 의해 발생한 온도분포와 이들을 더한 최소 마크의 온도 분포를 빔 스폿의 진행 방향(x)의 함수로 보여준다. 일정 온도 이상인 부분은 자화가 반전되어 기록되며, 이 부분이 마크의 위치와 길이를 결정한다. 온도 0.8(arbitrary unit)에서 자화가 반전된다면 Fig. 6에서 마크의 길이는 0.65 nm, 마크 에지

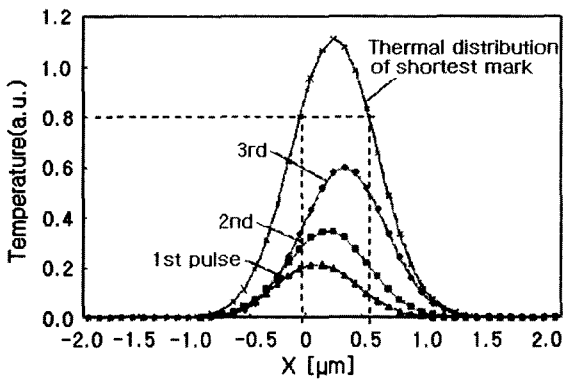


Fig. 6. Temperature distribution for a recording waveform shown in Fig. 5 :  $T_p = 20$  ns,  $v = 10$  m/s, wavelength = 650 nm, NA = 0.6.

의 위치는 0와 0.65 nm에 존재함을 알 수 있다. 기록 펄스의 길이에 비례하여 마크의 길이가 제어 됨 을 알 수 있다.

### 3.2. 재생신호 계산

Fig. 7은 Fig. 3에서 보인 바와 같은 최소 마크의 모양에 따른 재생신호의 크기를 나타낸다. 신호 진폭은 상대적으로 정규화된 값이다. Fig. 7(a)는 LIM 방법에 의한 재생신호이며, 신호 크기는 0.57 V이고, Fig. 7(b)는 MFM 방법을 이용하여 기록된 마크를 재생했을 경우의 재생신호이며, 이때 신호 크기는 0.16 V이다. 재생된 신호는 기록된 마크의 크기에 비례하므로 LIM 신호의 크기가 3.5배 정도 크을 알 수 있다. 이와 유사하게 도메인 확장형 광자기 디스크의 경우 기록층에 기록된 초승달 모양의 매우 작은 마크를 판독층에서 빔 스폿 크기만큼 확장시켜 재생하므로 기록 밀도를 높이면서 재생 신호의 크기를 증가시킬 수 있다.

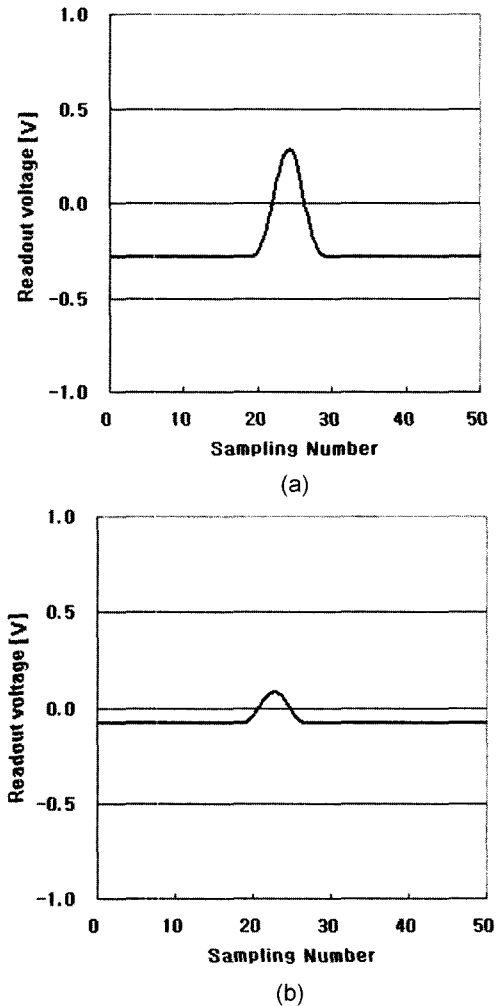


Fig. 7. Readout signal amplitude from shortest mark using (a) LIM method (mark length=0.42 μm), and (b) MFM method (mark length=0.054 μm).

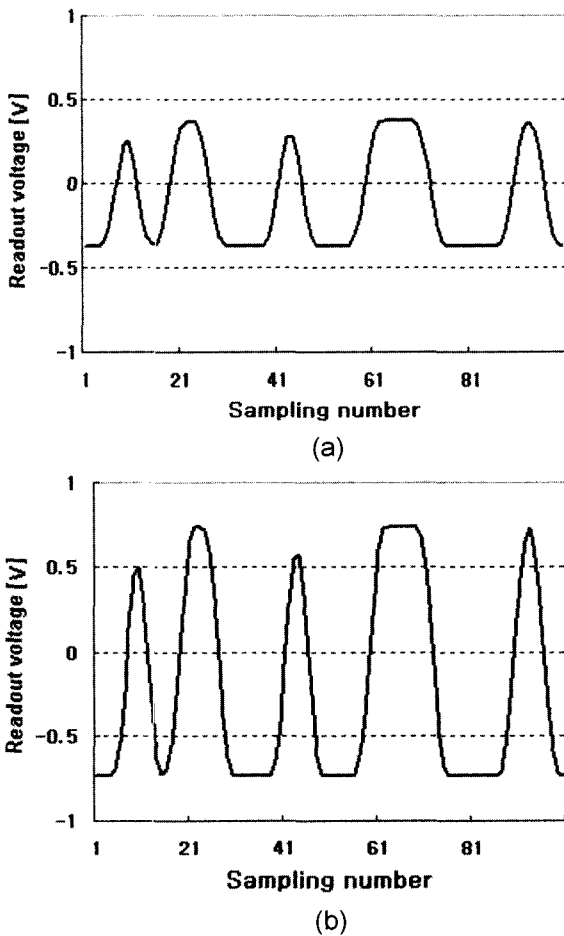


Fig. 8. Readout signal from (a) recording layer and (b) readout layer.

Fig. 8은 MFM 기록 방법에 의해 랜덤 마크를 기록하여 얻어진 마크의 기록층(Fig. 8(a))과 판독층(Fig. 8(b))의 재생신호 크기이다. 이 때, 변조 코드는 EFM+ 코드로 설정했으며, 랜덤 마크 열은 3T 마크에서 11T 마크까지 포함한다. 최소 마크의 길이(3T)는  $0.057\ \mu\text{m}$ 이며, 11T 마크의 길이는  $0.456\ \mu\text{m}$ 이다. 기록층에 기록된 최소 마크의 재생신호는 0.6 V이며, 판독층에서 확장된 도메인의 재생신호는 1.2 V이다. 따라서, 판독층에서 빔 크기만큼 확장된 도메인의 경우 재생시 원 신호 크기의 2배로 증가됨을 알 수 있었다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 도메인 확장형 광자기 디스크 시스템의 온도분포와 재생신호를 연구하였다. 정지된 디스크에서 레이저 빔에 의한 기록층과 이웃하는 층들의 온도분포를 계산하였으

며, 디스크가 회전할 때 마크 크기 및 길이와 위치를 계산하였다. 또한 마크 모양에 따른 신호의 크기, 기록층에 기록되는 마크의 재생신호 및 판독층에서 확대된 재생신호를 시뮬레이션 하였다.

간소화된 열전달 특성 모델을 계산함으로써, 기록층과 인접한 층에서의 온도분포를 시간의 함수로 계산하였으며, 기록 빔 펄스 파형으로부터 디스크의 온도분포를 이용하여 마크의 길이와 위치를 예측할 수 있었다. 재생신호는 디스크의 반사도 패턴과 가우시안 빔의 컨볼루션 연산을 이용하여 계산하였다. 재생신호의 계산을 위해, 4.7 GB DVD 디스크의 표준 규격인 레이저 파장 =  $650\ \text{nm}$ ,  $NA = 0.6$ , 디스크의 속도 =  $8.2\ \text{m/s}$ 를 사용하였다.

LIM과 MFM 기록 방법에 의해 기록된 최소 마크의 재생신호를 계산한 결과 약 3.5배 정도 차이가 있음을 알 수 있었다. 또한 판독층에서 마크가 레이저 빔 크기만큼 확대 되었을 때는 기록층에서의 신호 크기보다 2배가량 크게 됨을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

#### 참 고 문 헌

- [1] Terry W. McDaniel, Handbook of Magneto-Optical Data Recording, Noyes Publication(1996).
- [2] H. Awano, S. Ohnuki, H. Shirai, N. Ohta, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 4257(1996).
- [3] Burgenr, M. L., and Reedy, R. E., *J. Appl. Phys.*, **53**, 4357 (1982).
- [4] O. W. Shin, *J. Appl. Phys.*, **75**, 4382(1994).
- [5] Douglas J. Nelson and Brian Vick, IEEE InterSociety Conference on Thermal Phenomena, 245(1994).
- [6] S. J. Greaves, H. Muraoka, Y. Sugita and Y. Nakamura, *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 3859(1999).
- [7] A. H. M. Holtslag, *J. Appl. Phys.*, **66**, 1530(1989).
- [8] A. B. Marchant, Optical Recording-a Technical Review, Addison-Wesley(1990).
- [9] V. B. Jipson, and C. C. Williams, *Appl. Opt.*, **22**, 2202(1983).
- [10] Yasuaki Tanaka, T. Tanabe, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 590(1992).
- [11] Sei-Joon Oh, Soonchul Jo and Soon-Gwang Kim, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 2210(1998).
- [12] Takeshi Maeda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 504(1997).

## Simulation of Temperature Distribution and Readout Signal of Magnetic Amplifying Magneto-optical System

Jaenam Yang, and Soonchul Jo\*

*School of Electronic Engineering, Soongsil University 1-1, Sangdo 5-Dong, Dongjak-Ku, Seoul 156-743, Korea*

(Received 24 February 2004, in final form 15 April 2004)

Read out signal and temperature distribution of magnetic amplifying magneto-optical disk were studied. Temperature distribution of recording layer and adjacent layers were calculated when the disk was at rest. Mark size, length and location were simulated from a chain of recording beam pulses. In addition, signal amplitude depending on the shape of the marks, readout signals from the recording layer and amplified marks of the readout layer, were simulated. Simplified thermal conduction model was used to calculate the temperature distribution of recording and adjacent layers as a function of time as well as to calculate the mark size, length and location. Readout signal was calculated by the convolution of the disk reflectivity and the Gaussian beam intensity. Readout signal from the mark in the readout layer amplified to the size of the laser beam turned out to be twice as large as the signal from the crescent shaped mark in the recording layer.

**Key words :** MAMMOS, magneto-optic recording, readout signal, temperature distribution, domain expansion magneto-optic disk