

# 차등 3 $\omega$ 기법을 이용한 다층 유전체 박막의 열전도도 측정 및 검증

신상우\* · 조한나\*\* · 조형희<sup>†</sup>

## Measurement and Verification of Thermal Conductivity of Multilayer Thin Dielectric Film via Differential 3 $\omega$ Method

Sang-Woo Shin, Han-Na Cho, Hyung-Hee Cho

**Key Words:** Thermal Conductivity, Differential 3 $\omega$  Method, Multilayer Thin Dielectric Film, Protective Layer, Heat Spreading Effect

### ABSTRACT

In this study, measurement of thermal conductivity of multilayer thin dielectric film has been conducted via differential 3 $\omega$  method. Also, verification of differential 3 $\omega$  method has been accomplished with various proposed criteria. The target film for measurement is 300 nm silicon dioxide and this thin film is covered with various thicknesses of upper protective layer. The upper protective layer is inserted between the target film and the heater line for purpose of electrical insulator or anti-oxidation barrier since the target film may be a good electrical conductor or a well-oxidizing material. However, the verification of differential 3 $\omega$  method has not been conducted. Thus we have shown that the measurement of thermal conductivity of thin films with upper protective layer via differential 3 $\omega$  method is verified to be reliable as long as the proposed preconditions are satisfied. Experimental results show that the experimental errors tend to increase with aspect ratio between upper protective layer thickness and width of the heater line due to heat spreading effect.

### 기호설명

$k$	: 열전도도	[W/m-K]	$d_F$	: 박막의 두께	[m]
$D$	: 열확산계수	[m <sup>2</sup> /s]	$d_S$	: 기판의 두께	[m]
$T_h$	: 열선의 온도	[K]	$d_U$	: 보호층의 두께	[m]
$T_s$	: 기판의 온도	[K]	$l$	: 열선의 길이	[m]
$T_f$	: 박막의 온도	[K]	$2b$	: 열선의 폭	[m]
$C_p$	: 비열	[J/kg-K]	$f$	: 주파수	[Hz]
$\rho$	: 밀도	[kg/m <sup>3</sup> ]	$\omega$	: 각주파수	[rad/s]
<hr/>			$V$	: 전압	[V]
<sup>†</sup> 책임저자, 연세대학교 기계공학부			$R$	: 저항	[ $\Omega$ ]
E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr			$a$	: 저항온도계수	[K <sup>-1</sup> ]
TEL: (02)2123-2828 FAX: (02)312-2159			$P$	: 전력	[W]
* 연세대학교 대학원 기계공학부			$q^{-1}$	: 열투과깊이	[m]
** 연세대학교 기계공학부			<hr/>		

## 1. 서론

최근 들어 반도체 산업이 급속도로 발전함에 따라 CMOS 기술의 스케일은 지속적으로 감소하고 있다. 이렇게 회로의 크기가 감소함에 따라 스위칭 속도 또한 지속적으로 빨라지지만 연결부 등에서의 부동적인 RC 지연(RC delay) 시간으로 인해 silicon dioxide나 silicon nitride와 같은 낮은 유전율의 박막을 요구하게 된다. 이러한 유전체 박막들은 보통 정보저장 미디어의 다층박막,<sup>(1-3)</sup> 고출력 광학기기,<sup>(4)</sup> 박막 센서, 마이크로 집적소자 등 다양한 기기에 사용된다. 허나 이러한 기기들의 성능향상은 열적인 문제점들로 인해 한계를 가진다. 고로 열적 문제점들을 극복하고 기기들의 성능을 최대화하기 위해서는 기기에서의 열해석이 우선시 되어야 하지만, 마이크로/나노 스케일에서 물질의 열물성치는 벌크(bulk) 물질과 현저히 다른 양상을 가지기 때문에 정확한 열해석을 수행하기 위해 박막에서의 실험적인 열전도도 측정이 필수적이라고 할 수 있다.

Fig. 1은 MO disk에서 근접장 기록(Near Field Recording)에 의한 TbFeCo 박막의 온도분포를 수치 해석하여 나타낸 그림이다. Fig. 1(a)는 TbFeCo의 벌크 열전도도 값을 사용한 결과이고 Fig. 1(b)는 기존의 데이터를 바탕으로 간접적으로 추측된 열전도도 값을 사용하여 계산된 그림이다. TbFeCo 박막의 열전도도는 그것의 크기가 마이크로/나노 스케일에 다다를수록 급격히 변화하기 때문에 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 온도의 분포 또한 완연하게 달라진다. 고로 박막 물질의 열전도도 측정이 사전에 이루어져야 있어야 올바른 열해석이 가능해짐을 알 수 있다.

현재까지 박막의 열전도도 측정에는 가열 형태, 가열 방법, 열류의 방향 등에 따른 여러 가지 측정 방법이 발전되어 왔는데, 보통 입력 열류(heat flux)에 의해 야기된 정상상태의 온도 구배를 통해 열전도도가 결정된다. 하지만, 복사열 손실에 의한 때문에 고온에서는 무시할 수 없을 정도의 열손실이 측정 대상으로부터 발생하게 된다.  $3\omega$  기법은 간접적으로 박막의 열전도도를 구하는 기법으로, 측정 대상에서 매우 작은 온도 변화로 인해 복사열 손실을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다.<sup>(5)</sup> 본 연구에서 사용된 차등  $3\omega$  기법은  $3\omega$  기법을 응용하여 제안된 기법으로 다층

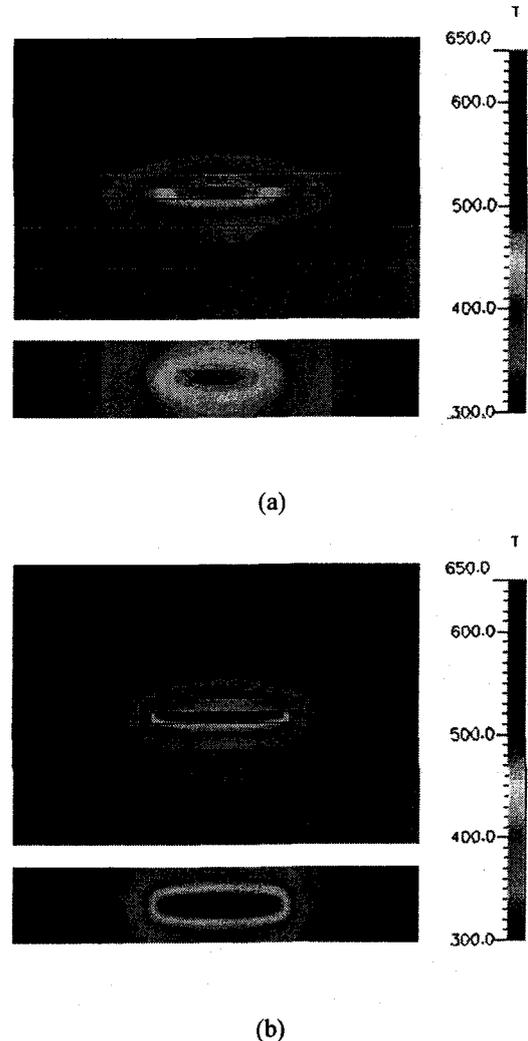


Fig. 1 Temperature distribution of MO disk by NFR simulation: (a) bulk thermal properties applied for analysis,  $K_{TbFeCo}=40$  W/mK; (b) predicted thermal properties applied for analysis,  $K_{TbFeCo}=4$  W/mK

박막에서의 열전도도 측정이 가능하다.<sup>(6)</sup>

허나, 현재까지 보호층이 증착된 시편의 열전도도 측정은 어떠한 검증도 이루어 지지 않은 상태에서 진행되고 있고, 또한 차등  $3\omega$  기법을 적용하는 데 있어서 보호층의 두께, 열물성치 등에 대한 각종 기준 역시 미흡한 실정이다.<sup>(7)</sup> 고로 본 논문에서는 차등  $3\omega$  기법을 사용하여 다양한 두께의  $SiN_x$  보호층이 증착된 300 nm의  $SiO_2$  박막의 열전도도를 측정하여 검증하고 보호층의 두께가 실험 결과에 미치는 영향을 제시하였다.

## 2. 실험 이론

### 2.1 3 $\omega$ 기법

3 $\omega$  기법은 전기적인 신호로부터 열전도도를 계산해내는 간접적인 열전도도 측정 기법이다. Fig. 2는 기판과 박막으로 구성된 시편위에 증착되어있는 금속 열선의 형상을 보여주고 있다. 이 금속 열선은 실험 시 히터와 온도측정센서의 기능을 동시에 갖는다.

금속 열선에  $\omega$ 의 주파수를 가진 입력 교류 전류를 흘려주면 주울 가열(Joule heating)에 의해 시편의 표면은 2 $\omega$ 의 주파수로 가열된다. 측정 대상 박막이 열적으로 얇고, 또한 열전도도가 기판의 열전도도에 비해 매우 작은 값을 가지고 있다면 박막에서의 온도 변화는 금속 열선에서의 온도 변화와 기판에서의 온도 변화의 차이라고 말할 수 있다. 금속 열선에서의 온도 변화는 3 $\omega$ 의 주파수를 가지는 전압신호를 이용하여 구할 수 있다. 3 $\omega$  전압신호는 금속 열선의 전기적 저항이 온도에 의해 변화하기 때문에 발생한다. 금속 열선에서의 온도 변화는 다음과 같다.

$$\Delta T_H = \frac{2V_{3\omega}}{\alpha V_{1\omega}} \quad (1)$$

또한 기판에서의 열투과깊이(thermal penetration depth)가 박막에서보다 작다면 기판에서의 온도 변화는 해석적으로 구할 수 있다. 이러한 가정들을 이용하여 구한 확산 방정식은 다음과 같다.

$$\Delta T_S(\omega) = \frac{P}{l\pi k_S} \int_0^\infty \frac{\sin^2(kb)}{(kb)^2(k^2+q^2)^{1/2}} dk \quad (2)$$

결국 1차원 열전도 방정식에 의해 열전도도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k_F = \frac{Pd_F}{2bl\Delta T_F} \quad (3)$$

### 2.2 차등 3 $\omega$ 기법

차등 3 $\omega$  기법은 기존의 3 $\omega$  기법을 응용하여 제안된 기법으로 다층 박막의 열전도도를 구할 수 있다. 본 연구에서는 측정대상이 되는 박막

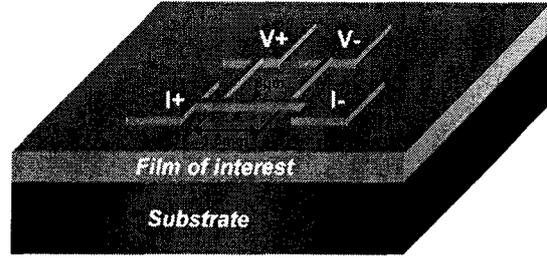


Fig. 2 Schematic of the sample for 3 $\omega$  method

위에 보호층을 증착하였는데, 보호층은 보통 산화방지막 혹은 절연막으로 사용된다.

차등 3 $\omega$  기법에서 관심 박막의 열전도도는 관심 박막이 포함된 시편과 관심 박막을 제외한 나머지 박막들로 이루어진 시편의 온도 차이를 이용하여 관심 박막의 열전도도를 간접적으로 구해낸다. 계산된 열전도도는 다음과 같다

$$k_F = \frac{d_F}{2} \left[ \left( \frac{\Delta T_{Hbl}}{P} \right)_{R+F} - \left( \frac{\Delta T_{Hbl}}{P} \right)_R \right]^{-1} \quad (4)$$

### 2.3 시편의 전제 조건

3 $\omega$  기법을 이용하여 박막의 열전도도를 구하는데 있어서 정확한 값을 얻기 위해선 측정 시편에서 세 가지의 선행 조건이 만족되어야 한다. 첫째, 반-무한 기판(Semi-infinite substrate) 조건으로 기판은 열적으로 충분히 두꺼워야한다. 이는 곧 측정 시편의 열투과깊이보다 기판의 두께가 훨씬 두꺼워야함을 의미한다. 둘째, 선 열원 가정(Line source approximation) 조건으로 금속 열선의 너비는 열투과깊이보다 충분히 작아야 한다. 셋째, 1차원 전도 조건으로 박막은 열적으로 충분히 얇고, 박막의 열전도도는 기판보다 훨씬 작아야 한다. 열투과깊이는 열원이 시편에 영향을 미칠 수 있는 범위를 나타내는 특성길이이므로 다음과 같이 표현된다.

$$q^{-1} = \sqrt{\frac{D}{i2\omega}} \quad (5)$$

이 특성길이는 열파동(thermal wave)의 파장으로서, 한 사이클의 교류 가열에 의해 열이 확산하는 깊이를 의미한다.

앞에서 언급한 정성적인 조건들을 T. Borca-

Tasciuc가 정량적인 조건들로 제시하였다.<sup>(12)</sup> 첫 번째 조건은 기판에서의 열투과깊이가 기판의 두께에 비해 작을 때 만족하는데, 1%의 오차 내에서 정량적 기준은 다음과 같다.

$$qd_S > 5 \quad (6)$$

두 번째 조건은 선 열원 가정으로 반-무한 기판에서  $3\omega$  기법이 1%의 오차범위 내에서 만족하려면 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$qb < 0.2 \quad (7)$$

위 조건은 결국 선 열원 가정이 1%의 오차 내에서 성립하기 위해서는 열투과깊이가 금속 열선의 너비에 비해 2.5배 이상 커야 됨을 말해주고 있다.

끝으로 마지막 조건은 박막에서의 열 확산(heat spreading)을 최소화시키기 위해 필요한 조건이다. 열 확산에 의한 오차는 1차원 열전도 가정에 의해 발생하는데, 박막의 두께와 열선의 너비간의 종횡비 및 박막과 기판의 열전도도 차이의 증가가 오차의 증가를 야기한다. 예를 들어 박막과 기판간의 열전도도 비가 0.2일 경우, 종횡비가 0이면 1차원 가정에 의한 오차는 5%인 반면 종횡비가 0.1이 되면 오차는 15%로 증가된다. 고로 열 확산 현상은 실험 오차에 있어서 매우 치명적인 요인이 된다는 것을 알 수 있다. 결국 측정 박막과 보호막에서 발생하는 2차원적인 열전달을 최대한 억제하는 것이 매우 중요하다.

### 3. 실험 구성

#### 3.1 시편 제작

Fig. 3는 실험 시편의 구성을 나타내는 그림이다. 첫 번째 시편은 300 nm의 단일  $\text{SiO}_2$  박막으로서  $3\omega$  기법을 이용하여 열전도도를 측정하였다. 그 외의 시편들은 차등  $3\omega$  기법을 검증하기

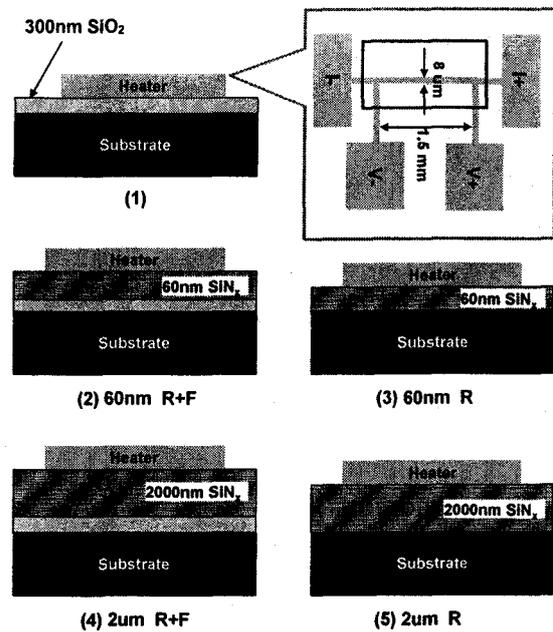


Fig. 3 Compositions of experiment samples

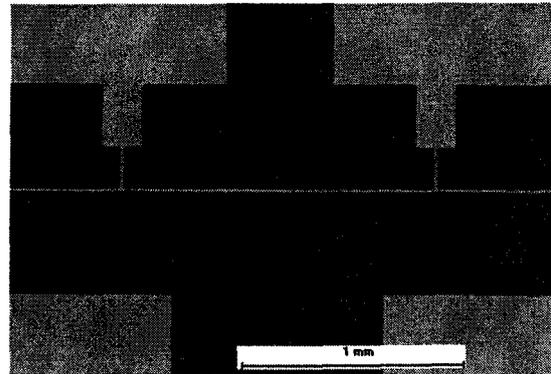


Fig. 4 Photograph of the heater line

위해 60 nm와 2  $\mu\text{m}$  두께의  $\text{SiN}_x$  보호층을 추가 증착하여 제작하였다. R+F 시편은 관심 박막이 포함된 시편을 나타내고 R 시편은 관심박막이 제거된 기준 시편을 의미한다.

실험 시편은 두 번 혹은 세 번의 증착 공정과 한 번의 노광 공정, 그리고 끝으로 식각 공정으로 완성시킨다.  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{SiN}_x$ 의 증착은 PECVD 공정으로, 그리고 300 nm의 금(Au) 열선과 10 nm의 크롬(Cr) adhesion layer는 thermal evaporation 공정을 사용하였다. 열선은 길이 1.5 mm, 폭 8  $\mu\text{m}$ 으로 패터닝(patterning)하였다.

### 3.2 실험 장치

시편을 가열하게 될 열원은 함수 발생기 (function generator)를 이용하여 발생시킨다. 발생된 교류 입력전류는 열선을 통과하면서  $3\omega$ 의 전압신호를 발생시키고 이 신호는 락-인 앰프 (lock-in amplifier)를 사용하여 검출해낸다.  $3\omega$  전압 검출 시 정밀도를 확보하기 위해서는  $1\omega$ 의 전압신호를 사전에 제거해 주어야 하는데 이는  $3\omega$  신호의 크기가  $1\omega$  신호에 비해 수천 배 가량 작기 때문이다.  $1\omega$  신호는 실험 시편과 직렬로 설치된 가변 저항기를 통해 제거해 낼 수 있다. 실험 시편에서의 전압 강하량과 가변 저항기에서의 전압 강하량의 비는 8비트의 정확도를 갖는 multiplying DAC칩을 사용하여 얻어내며 이로써 얻어진 동일한 크기의 두 전압 성분이 락-인 앰프를 통과하여  $3\omega$  신호를 얻어낼 수 있다. 위에서 제시한 전 과정은 LabVIEW 프로그램을 사용하여 PC로 원격 제어하였다.

위 과정이 끝나면 금속 열선의 길이와 폭을 현미경을 통해 측정하여 정확한 값으로 보정한다. 이 과정은 습식 식각 공정의 불확실성에 의해 야기되는 부정확한 열선의 크기에 기인한다. 현미경에 의해 촬영된 열선의 형상은 Fig. 4에 제시되어 있다.

## 4. 실험 결과 및 토의

Fig. 5는 300 nm  $\text{SiO}_2$  박막의 열전도도를 상온에서  $3\omega$  기법으로 측정된 결과 그래프이다. 교류 입력 전류의 주파수에 따른 열선과 기판의 온도변화를 보여주고 있는데, 측정된 열선의 온도변화( $\Delta T_H$ )가 계산된 기판의 온도변화( $\Delta T_S$ )보다 크다는 것을 알 수 있다. 이 두 온도변화의 차이를 통해 박막에서의 온도변화를 알 수 있고 이를 통해 박막의 열전도도를 구할 수 있다.

실험 결과 상온에서의 300 nm  $\text{SiO}_2$  박막의 열전도도는 0.85 W/mK로 측정되었다. 이는 기존의 연구와 유사한 값이며 벌크물질의 열전도도보다 낮은 값이다.<sup>(8)</sup>

Fig. 6와 Fig. 7은 보호층이 증착된 300 nm  $\text{SiO}_2$  박막의 상온에서의 열전도도를 차등  $3\omega$  기법으로 구한 결과 그래프이다. Fig. 6는 보호층이

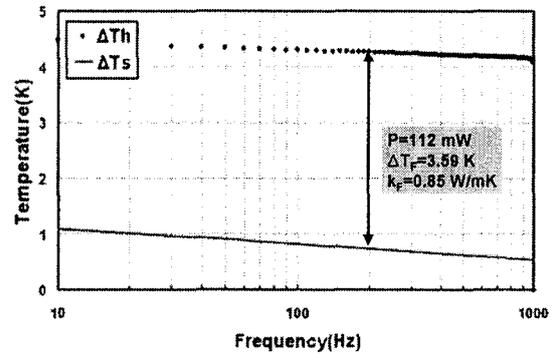


Fig. 5 Temperature oscillation of 300nm  $\text{SiO}_2$  thin film and Si substrate

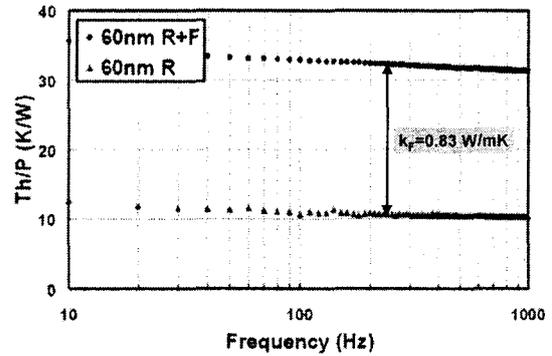


Fig. 6 Temperature oscillation of 300nm  $\text{SiO}_2$  thin film with 60nm upper protective layer and reference sample

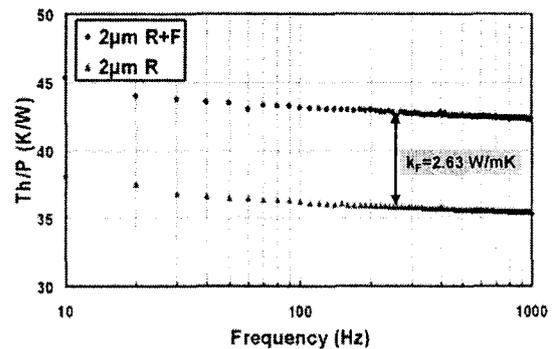


Fig. 7 Temperature oscillation of 300nm  $\text{SiO}_2$  thin film with 2  $\mu\text{m}$  upper protective layer and reference sample

60 nm일 경우 입력 전류의 주파수에 따른 두 가지 시편의 박막에서의 온도변화를 나타내고 있고, Fig. 7은 마찬가지로 보호층이 2  $\mu\text{m}$ 일 경우

측정된 온도 변화 그래프이다. 보호층이 60 nm일 경우 획득한 SiO<sub>2</sub> 박막의 열전도도는 0.83 W/mK로 Fig. 5에서 보인 3 $\omega$  기법으로 측정한 열전도도 값과 매우 유사함을 알 수 있다. 그러나 보호층이 2  $\mu$ m인 경우 측정된 SiO<sub>2</sub> 박막의 열전도도는 2.63 W/mK로써, 앞에서 제시한 값들보다 세 배 이상 큰 값이 측정되었다. 이는 측정 시편이 앞에서 제시한 전제조건에 부합하지 않기 때문이다.

앞에서 언급하였듯이 시편이 만족해야 할 세 가지 전제 조건 중 첫 번째 조건은 보호층은 열적으로 충분히 얇아야 한다는 것, 즉, 보호층에서의 열투과깊이가 보호층의 두께보다 두꺼워야 한다. 본 실험에서 보호층의 두께가 60 nm와 2  $\mu$ m일 때 입력주파수가 1000 Hz인 경우 열투과깊이는 각각 9.2  $\mu$ m과 9.9  $\mu$ m으로 계산되었다. 이로써 첫 번째 조건은 만족함을 알 수 있다.

그럼에도 불구하고 보호층이 2  $\mu$ m의 경우 타 결과 값들에 비해 오차가 매우 크게 나타난다. 이는 결국 보호층에서의 열확산효과가 매우 크게 발생하기 때문이라고 보인다. 3 $\omega$  기법에 있어서 박막의 열전도도는 1차원 열전도 가정을 통해 계산되는데 이는 열의 2차원적인 확산을 고려하지 않은 것으로 열이 투과해야 할 깊이가 깊어질수록 2차원적인 열확산으로 인한 오차가 커지게 된다. 즉, 보호막의 두께와 열선의 너비간의 종횡비가 커질수록 1차원 열전도 가정에 의한 오차가 증가하게 되는 것이다. 또한 보호층의 열전도도가 관심 박막에 비해 클수록 오차가 증가한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 차등 3 $\omega$  기법을 여러 기준으로 검증하였고 이를 토대로 SiN<sub>x</sub> 보호층이 증착된 SiO<sub>2</sub> 박막에서의 열전도도를 측정하였다.

열전도도를 측정함에 있어서 불가피한 실험상의 불확실성은 종종 발생한다. 나아가 박막에서의 열전도도는 두께, 온도, 증착공정, 경계 물질 등 다양한 인자들에 의해 변하기 때문에 더욱더 정확한 열전도도의 측정이 필요하다. 고로 다양한 경우에 대해 물질의 정확한 열전도도를 측정하고 검증하는 작업은 한층 더 정확한 열해석을 가능케 할 것이다.

## 참고문헌

- (1) Raashe, D. and Klahn, S., 1991, "Influence of the Thermal Conductivity of MO-disks on Its Recording Performance," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 93, pp. 365
- (2) Schultz, M. D., Freedman, J. M., Weng, R. S., and Kryder, M. K., 1991, "Dynamic Thermal Profiling in Magneto-optic Recording Thin Films," *Journal of Applied Physics*, Vol. 69, pp. 4948
- (3) Kim, S. S., Ahn, Y. M., Lee, K. G., and Gill, B. L., 1996, "Measurement of Thermal Conductivities of SiN and TbFeCo Films," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, No.5, pp. 4093
- (4) Guenther, A. H., McIver, J. K., 1998, "The Role of Thermal Conductivity in the Pulsed Laser Damage Sensitivity of Optical Thin Films," *Thin Solid Films*, Vol. 163, pp. 203
- (5) Cahill, D. G., 1990, "Thermal Conductivity Measurement from 30 to 750 K: 3 $\omega$  method," *Review of Science Instrument*, Vol. 61, No. 2, pp.802
- (6) Borca-Tasciuc, T., Kumar, A. R., and Chen, G., 2001, "Data Reduction in 3 $\omega$  Method for Thin-film Thermal Conductivity Determination", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 72, No. 4, pp. 2139
- (7) Borca-Tasciuc, T., Liu, W., Liu, J., Zeng, T., Song, D. W., Moore, C. D., Chen, G., Wang, K. L., Goorsky, M. S., 2000, "Thermal Conductivity of Symmetrically Strained Si/Ge Superlattices," *Superlattices and Microstructures*, Vol. 28, No. 3, pp. 199
- (8) Lee, S. M., and Cahill, D. G., 1997, "Heat Transport in Thin Dielectric Films," *Journal of Applied Physics*, Vol. 81, No. 6, pp. 2590-2595