

A Study on Thermal Conductivity Measurement and Optical Characteristics of Thin Films

權 赫 攬* · 李 晟 赫†
(Hyuk Rok Gwon · Seong Hyuk Lee)

Abstract - The present article investigates experimentally and theoretically thermal and optical characteristics of thin film structures through measurement of thermal conductivity of Pyrex 7740 and reflectance in silicon thin film. The 3ω method is used to measure thermal conductivity of very thin film with high accuracy and the optical characteristics in thin films are studied to examine the influence of incidence angle of light on reflectance by using the CTM(Characteristics Transmission Method) and the 633 nm He-Ne laser reflectance measurement system. It is found that the estimated reflectance of silicon show good agreement with experimental data. In particular, the present study solves the EPRT(Equation of Phonon Radiative Transport) which is based on Boltzmann transport equation for predicting thermal conductivity of nanoscale film structures. From the results, the measured thermal conductivity is in good agreement with the previous published data. Moreover, thermal conductivities are estimated for different film thickness. It indicates that as film thickness decreases, thermal conductivity decreases substantially due to internal scattering.

Key Words : Equation of Phonon Radiative Transport(포논 복사 전달 방정식: EPRT), 3ω method(3 오메가 방법), Characteristic Transmission Matrix(특성전달행렬: CTM)

1. 서 론

박막의 열전도율은 벌크의 열전도율과 많은 차이를 보이고 있으며 나노 스케일의 절연 박막(thin dielectric films)은 마이크로 전자장치, 레이저 시스템, 박막 센서 기술 및 광학 코팅 기술 등에 폭넓게 응용되기 때문에 최근 중요한 연구 영역으로 인식되고 있다[1-3]. 특히, 절연 박막의 열전도율과 광학 특성을 명확히 이해하는 것은 박막 센서 기술 혹은 차세대 광학 모듈 개발에 있어서 매우 중요하다. 기존의 매크로 스케일의 현상에 기초한 푸리에 전도 법칙(Fourier's conduction law)은 나노스케일 박막에서는 더 이상 사용할 수 없다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다[4]. 이 때문에 Chen은 볼츠만 이론에 근거하여 ballistic-diffuse 방정식을 제안하고 포논의 투과 및 반사에 대한 새로운 경계조건을 규정한 바 있다[5]. 이 방법을 사용하면 박막과 같은 나노스케일에서의 열전달현상까지 규명이 가능하다. 최근까지 보고된 대부분의 연구 결과들을 살펴보면 3ω 방법(3ω method)이 박막의 유효 열전도율을 측정하는 가장 확실한 방법으로 인식되고 있다. 또한 물질의 광학 특성은 입사된 광의 파장 길이와 물질의 굴절 지수(refractive index)에 따라 변화한다. 반면 다층 박막 구조는 기판위에 여러 층의 박막을 적층한 구조이므로 입사된 빛은 박막 사이의 경계면에서 여러 차례 반

사되고 투과된다. 반사되고 투과된 광의 위상은 빛의 파장, 박막의 두께와 복소 굴절 지수(complex refractive index)에 따라 변화하게 되고 파동의 간섭 효과에 의해 광의 진폭의 크기는 보강 또는 상쇄된다[6-7]. 따라서 박막 두께는 광의 파장 길이, 물질의 굴절 지수와 함께 다층 박막 구조에서 매우 중요한 변수가 된다.

본 연구의 주된 목적은 박막의 열전도율 측정과 광학특성을 분석하고 볼츠만 이론을 이용하여 박막 두께변화에 따른 열물성 변화를 고찰하는 것이다. 우선, 본 연구는 3ω 방법을 이용하여 절연체의 열전도율을 측정하고 기존 문헌 결과와 비교 검증하였다. 기본적으로 3ω 방법에 대한 이론을 소개하고 측정결과의 타당성을 분석한다. 또한 본 연구는 특성전달행렬(Characteristic Transmission Matrix: CTM)방법을 이용하여 실리콘 박막 구조의 광학적 특성을 수치 해석하였으며 633 nm의 He-Ne 레이저 시스템을 이용하여 입사각 변화에 따라 측정된 반사율을 이론 결과와 상호 비교한다. 마지막으로 볼츠만 수송 방정식에 근거한 포논 복사 전달 방정식(Equation of Phonon Radiative Transport: EPRT)을 이용하여 박막 두께변화에 따른 열전도율을 예측하여 물리적 특성을 분석하였다.

2. 실험 장치 및 측정 방법

2.1 3ω 방법을 이용한 열전도율 측정

본 연구에서는 Pyrex 7740의 열전도율을 측정하기 위해 3ω 방법을 사용하였다. 그림 1에 본 연구에서 사용된 샘플

* 非 會 員 : 中央大學 機械學科 碩士課程
† 교신저자, 正會員 : 中央大學 機械學科 助教授 · 工博
E-mail : shlee89@cau.ac.kr
接受日字 : 2007年 7月 12日
最終完了 : 2007年 8月 17日

의 측면도와 평면도가 나와 있다. 그림에서 보듯이 금 박막의 두께는 100 nm 이며 금과 Pyrex 7740과의 접합(adhesion)문제에 의하여 티타늄을 5 nm 적층 하였다. 또한 전압의 인가에 사용하는 패턴은 Fig. 1의 평면도에서 볼 수 있듯이 두 개의 패턴이며, 두 패턴 사이의 히터로 쓰이는 라인의 폭과 길이는 각각 15 μm과 1000 μm이다. 평면도에 나와 있는 1번과 2번 사이에 1ω의 주파수를 가지는 전류를 인가하게 되면 이 전류는 금 라인을 통과하면서 라인을 가열(Joule heating)하고 2ω의 주파수를 가진다. 히터의 저항은 온도에 비례하기 때문에 저항은 2ω의 주파수를 가지게 된다. 최종적으로 전압은 식 (1)과 같이 옴의 법칙에 따라 온도의 변화에 의존하는 3ω의 주파수가 생성된다. 온도에 비례하는 3ω의 주파수를 가지는 전압을 lock-in-amplifier(LIA)를 이용하여 획득한 후 열전도율을 구할 수 있다.

$$V_{3\omega} = I(\omega t)R_s(2\omega t) = \frac{I_0 R_{s,0} DT_{s,0}}{2} \sin(3\omega t - \pi - \phi) \quad (1)$$

물질 내 온도 변화가 존재하면, 열은 흐르며 열전달은 전도와 대류 그리고 복사의 조합에 의해서 일어난다. 그러나 일반적으로 상온의 고체 열전달에서 대류와 복사의 효과는 무시된다. Fig. 1의 아래와 같은 폭이 좁은 라인 히터에서의 온도 변화는 Carslaw와 Jaeger에 의해서 $K_0(qr)$ 에 비례하는 것을 알 수 있으며 식 (2)과 같이 표현 된다 [8].

$$\Delta T_{ac} = \frac{P}{l\pi k} K_0(qr) \quad (2)$$

여기서 P/l 은 단위 길이 당 발생하는 열의 크기이고 k 는 열전도율이며, $K_0(x)$ 는 수정된 베셀 함수(modified Bessel function)이다. D 는 열 확산율(thermal diffusivity)로서 k/C_p 로 표현된다. 만약 히터의 폭 r 이 $qr \ll 1$ 의 관계를 만족할 만큼 작다면, 식 (2)는 식 (3)과 같이 근사화가 가능하다.

$$\Delta T_{ac} = \frac{P}{l\pi k} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{D}{r^2} + \ln 2 - 0.5772 - \frac{1}{2} \ln 2\omega - \frac{i\pi}{4} \right] \quad (3)$$

최종적으로 열전도율은 3ω의 전압을 이용해서 측정할 수 있으며 $V_{3\omega}$ 은 다음 식 (4)와 같이 온도 ΔT_{ac} 에 관계되어 있다.

$$V_{3\omega} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} 2I_0 \cos \omega t \left[R + \frac{dR}{dT} T_{ac} \cos(2\omega t) \right] \cos(3\omega t) dt \quad (4)$$

$$= \frac{I_0 \alpha}{2} \Delta T_{ac}$$

여기서 α 는 히터의 저항 온도 계수(temperature constant of resistance: TCR)이고, I_0 는 히터를 지나는 전류이다. 서로 다른 두 주파수 ω_1 과 ω_2 에 대한 전압 $V_{3\omega 1}$ 과 $V_{3\omega 2}$ 의 차이를 이용하면 식 (5)를 통해 열전도율을 최종적으로 구할 수 있다.

$$k = - \frac{I_0^3 R \alpha}{4\pi l} \frac{\ln \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)}{V_{3\omega 1} - V_{3\omega 2}} \quad (5)$$

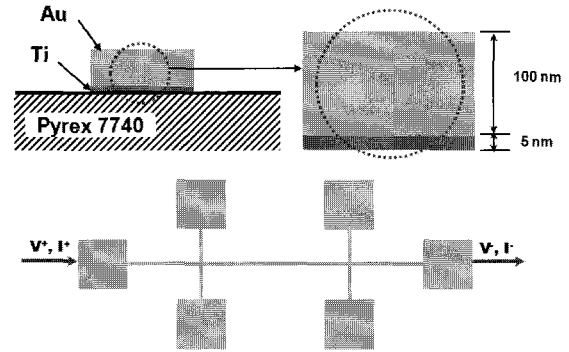


그림 1 3ω 신호의 측정을 위한 금 히터 패턴.
Fig. 1 Gold heater patterns for measurement of thermal conductivity using 3ω signal.

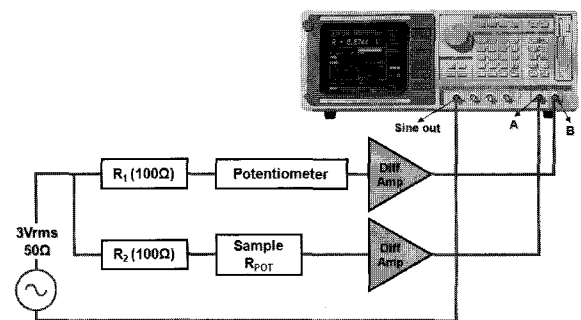


그림 2 오메가 방법을 이용한 열전도율 실험장치.
Fig. 2 Experimental apparatus for 3ω thermal conductivity measurement.

2.2 박막의 광학특성 측정

박막의 광학특성은 열전도율과 상관관계가 있고 포논들의 거동에 의한 열전도율 변화는 박막의 광학특성에도 영향을 미친다. 본 연구에서는 우선 Si와 SiO₂에 대한 박막광학특성을 633 nm의 He-Ne 레이저를 통해 측정하고 입사각 변화에 따른 반사율의 특성을 TE(transverse electric)과 TM(transverse magnetic) 파동에 대해 측정하여 박막의 광학특성에 대한 데이터를 획득하였다.

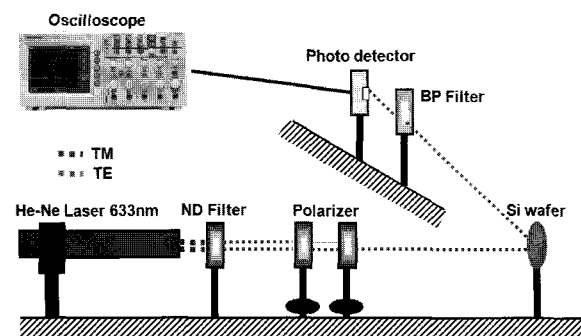


그림 3 박막광학특성 실험장치 개략도.
Fig. 3 Experimental apparatus for reflectance measurement.

3. 이론적 배경 및 수치해석기법

3.1 특성전달행렬

본 연구에서는 다층 박막 구조에 따른 광학 지수들의 변화를 고려하기 위해서 Fig. 1에서처럼 여러 개의 격자로 나눈 다층 박막 구조에 광학 이론을 적용하고 특성전달행렬 방법을 이용하여 반사율을 구한다[9]. 복소 굴절 지수 ($\tilde{n}_m = n_m - ik_m$)를 가진 m 번째 층의 두께, d_m 이고 m 번째 층의 특성전달행렬은 2×2 행렬, M_m ,으로 나타내며 식 (6)과 같다.

$$M_m = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_m d_m\right) & \frac{i}{n_m} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_m d_m\right) \\ i n_m \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_m d_m\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_m d_m\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

다층 박막 전체 층을 고려한 특성전달행렬, M 은 $\prod_{m=1}^N M_m$ 이다. 한편, 반사와 투과 Fresnel 계수는 다음과 같이 결정된다.

$$r = \frac{[M(1,1) + M(1,2)\tilde{n}_s]\tilde{n}_a - [M(2,1) + M(2,2)\tilde{n}_s]}{[M(1,1) + M(1,2)\tilde{n}_s]\tilde{n}_a + [M(2,1) + M(2,2)\tilde{n}_s]} \quad (7)$$

$$t_r = \frac{2\tilde{n}_a}{[M(1,1) + M(1,2)\tilde{n}_s]\tilde{n}_a + [M(2,1) + M(2,2)\tilde{n}_s]} \quad (8)$$

최종적으로 반사, 투과 Fresnel 계수를 이용하여 다층 박막 구조의 반사율(R)과 투과율(τ)을 다음과 같이 구할 수 있다[9].

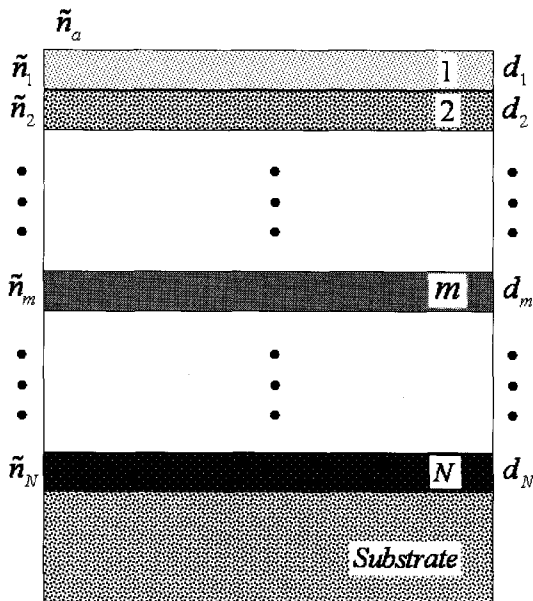


그림 4 다층 박막구조의 개략도.
Fig. 4 A schematic of the multi-layer structure.

$$R = |r|^2 \quad (9)$$

$$\tau = \frac{n_s}{n_a} |t_r|^2 \quad (10)$$

3.2 EPRT(Equation of Phonon Radiative Transfer)

박막의 두께가 포논의 평균자유거리와 비교하여 비슷하거나 얇으면, 포논은 벌크 물질에 비하여 보다 더 많이 경계면과 충돌하게 된다. 이러한 추가적인 충돌 매커니즘은 열 유속의 저항을 증가시키고, 결국 박막의 열 전도도를 낮춘다. 이러한 감소된 열전도율과 TBR(thermal boundary resistance)의 이론적인 연구는 볼츠만 방정식을 기초로 개발된 EPRT(equation of phonon radiative transport)를 이용하여 진행되었다[10]. 본 연구에서는 측정된 열전도율 및 TBR을 비교하기 EPRT를 이용하여 포논의 에너지 전달과정을 해석한다. 먼저 완화시간근사(relaxation time approximation)를 고려한 볼츠만 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla_r f = -\frac{f - f_0}{\tau(\omega)} \quad (11)$$

볼츠만 방정식을 포논강도로 나타내면 다음과 같은 EPRT 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{v} \frac{\partial I_w}{\partial t} + \mu \frac{\partial I_w}{\partial x} = \frac{I_w^0 - I_w}{v\tau_R} \quad (12)$$

위 식에서 포논이 균일하게 방사된다고 가정하면 공간에 대한 EPRT 방정식은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu \frac{dI}{dz} = \frac{I^0 - I}{\Lambda} \quad (13)$$

여기서 I 는 총 포논 강도(phonon intensity)이고, I^0 는 평형 포논 강도(equilibrium phonon intensity)이며 다음과 같이 가정한다.

$$I^0 = \frac{1}{4\pi} C v (T - T_{ref}) + I_{ref}^0 \quad (14)$$

여기서 Λ 는 벌크 재료의 평균 자유 경로(average MFP)이고, C 는 열용량(volumetric heat capacity), 그리고 v 는 포논 군속도(phonon group velocity)의 크기이다. I_w 는 포논 강도를 나타내며 복사방정식과 유사하게 해석될 수 있다. 따라서 EPRT를 해석하면 공간에서의 포논 강도 분포가 나오게 되고, 이 때 박막의 열전도율을 이론적으로 예측할 수 있다. 또한 국부적인 열 유속은 다음의 식 (15)와 같이 정의되며, 국부적인 온도 분포는 식(16)의 에너지 보존 조건을 사용하여 얻을 수 있다.

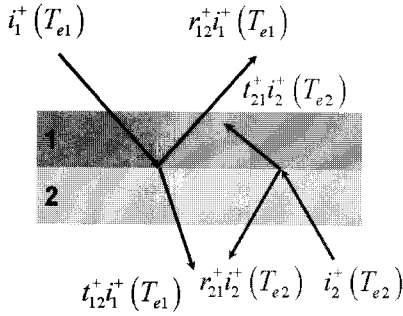


그림 5 경계면에서의 포논의 반사 및 투과.
Fig. 5 Transmission and reflection of phonon at an interface.

$$q(\xi) = \int_{\Omega=4\pi} I \cos\theta d\Omega = 2\pi \int_{-1}^1 \mu I d\mu \quad (15)$$

$$\frac{dq}{dz} = 0 \quad (16)$$

식 (15)와 (16)을 이용하여 평형상태의 포논 강도(equilibrium phonon intensity)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I^0(\xi) = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I d\mu \quad (17)$$

한편 확산 경계면(diffuse interface)에서도 그림 5와 같이 포논의 반사 및 투과가 일어나게 된다. 이 경계면에 대해서 유출되는 포논 강도(phonon intensity)는 다음과 같이 나타낸다.

$$I^+(0, \mu) = 2R_{d12} \int_{-1}^1 \Gamma(0, -\mu) \mu d\mu + T_{d21} I^0(T_e) \quad (18)$$

여기서 “+”와 “-”의 기호는 방향 코사인에 대한 앞뒤 방향으로 진행되는 포논을 의미하고, R_{d12} 와 T_{d21} 은 확산 반사율과 투과율을 각각 의미한다. 한편, 기관에서 유입되는 포논 강도는 $I^0(T_e)$ 이지만, 경계 면에서 기관의 평형 온도, T^* 는 T_e 와 같지 않다. 기관의 평형 온도는 박막에 투과되는 포논 강도와 방출되는 포논 강도를 통해서 다음과 같이 식 (19)로 나타낸다.

$$2I^0(T^*) = I^0(T_e) + R_{d21}^0(T_e) + 2T_{d12} \int_{-1}^1 \Gamma(0, -\mu) \mu d\mu \quad (19)$$

본 연구에서는 열 경계저항과 내/외부의 열전도도에 대한 이론적 해석을 수행한다. 우선 열경계저항(thermal boundary resistance: TBR)은 경계면을 통해 흐르는 열 유속에 대한 양쪽 면의 온도 차이의 비로 정의되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{T^0(\xi=0) - T^*}{q} \quad (20)$$

여기서 T^* 는 경계면에서 기관의 평형 포논 온도(equilibrium

phonon temperature)이다. 그리고 박막 내부의 열전도도는 다음과 같이 정의한다.

$$K_{int} = \frac{qh}{T^0(\xi_h) - T^0(\xi_h = 0)} \quad (21)$$

여기서 ξ_h 는 무차원 박막 두께이고, 최종적으로 외부 열전도도는 내부 열전도도와 열경계저항에 대한 상당 열전도도(equivalent thermal conductivity)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{ext} = \frac{qh}{T^0(\xi_h) - T^*} = \frac{1}{\frac{1}{K_{int}} + \frac{R}{h}} \quad (22)$$

4. 결과 및 고찰

먼저 본 연구에서는 그림 1과 같이 3 ω 방법을 이용하여 Pyrex 7740의 열전도율을 측정하였다. 그림 6에는 주파수 10 Hz~1000 Hz 영역에서 얻어진 3 ω 의 전압을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 실제 3 ω 의 전압신호는 In-phase 신호와 Out-of-phase 신호로 분리되어 있다. 식 (3)에서 볼 수 있듯이 전압신호의 Out-of-phase 부분을 이용하면 바로 열전도율을 구할 수 있으나, 실험적으로 In-phase 부분이 정확한 것으로 알려져 있으며[11-12], 선형적인 임의의 두 주파수 구간의 신호를 이용하면 그에 따른 온도변화 및 열전도율을 구할 수 있다. 그림 7의 결과를 이용, 식 (5)에 대입하면, Pyrex 7740의 열전도율은 1.208 W/m·K이며, 이 값은 문헌의 결과 1.16 W/m·K[13]와 비교할 때 오차 4 % 정도로 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

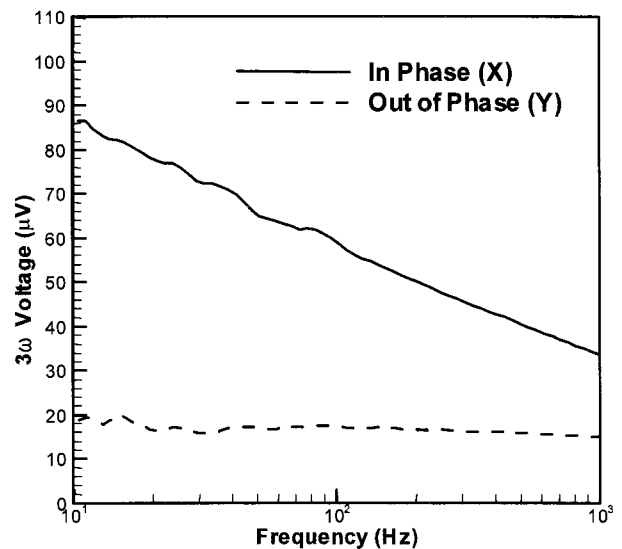


그림 6 주파수에 따른 in-phase와 out-of-phase 3 ω 전압 신호
Fig. 6 In-phase and out-of-phase signals of 3 ω voltage with respect to frequency.

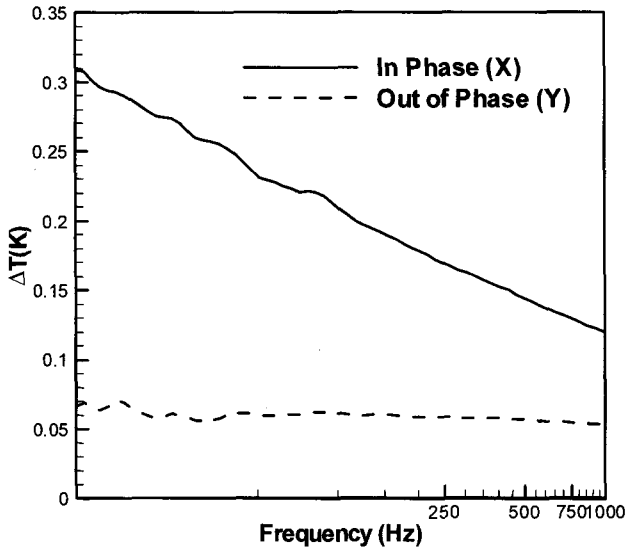


그림 7 히터 내 in-phase와 out-of-phase 온도변화.
 Fig. 7 In-phase and out-of-phase temperature difference in gold heater with respect to frequency.

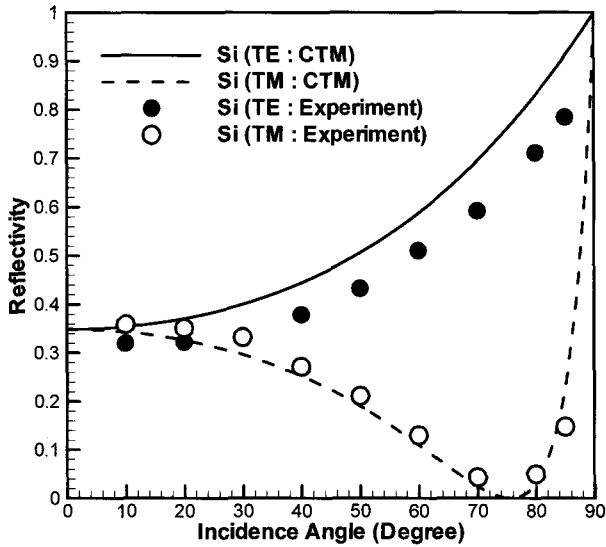


그림 8 Si 박막의 반사율의 수치해석과 실험값의 비교.
 Fig. 8 Comparison of predictions with measurement data for reflectance in Si materials.

또한 이러한 수치해석 결과를 검증하기 위해서 앞서 제시한 박막의 광학특성 측정을 위한 실험 장치를 이용하여 본 연구에서는 Si에 빛을 각도에 따라서 조사하여 그에 따른 반사율을 측정하였다. 이때 사용한 광원은 He-Ne laser 633 nm이고 편광기를 이용하여, 빛을 각각 TM, TE 편광시켜서 편광방향에 따른 반사율의 특성을 살펴보았다. 그림 8에서 알 수 있듯이, 실험과 수치해석이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 마지막으로 본 연구에서는 포논 강도에 대한 볼츠만 수송 방정식(BTE)에서 유도된 포논 복사 전달 방정식(EPRT)

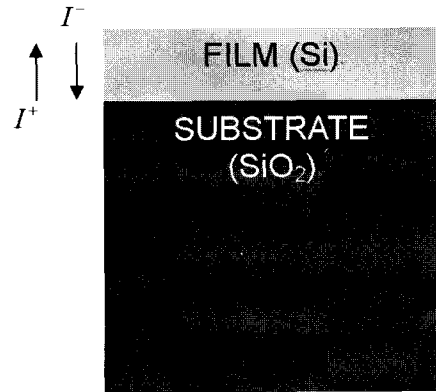


그림 9 열전도율을 측정하기 위한 박막과 기판의 개략도.
 Fig. 9 The schematic of thin film for the prediction of thermal conductivity.

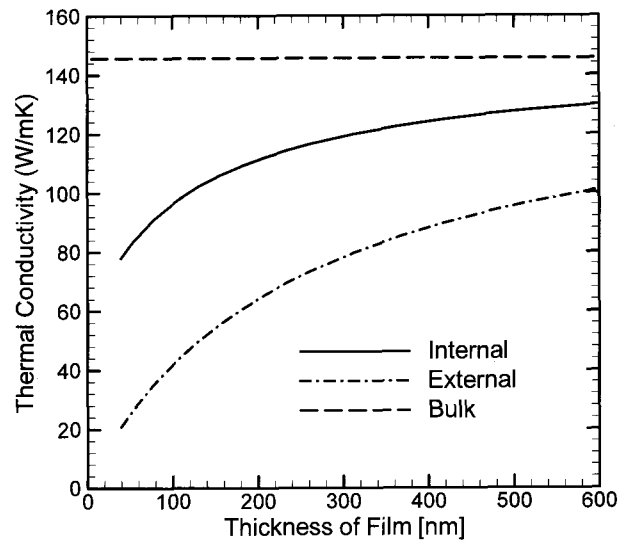


그림 10 박막 두께의 변화에 따른 열전도율.
 Fig. 10 The influence of film thickness on thermal conductivity.

을 사용하였으며, 그림 9는 수치해석에 사용한 박막과 기판 구조의 개략도이다. 기판에서의 복잡한 열전도 해석을 피하기 위해, 경계면에서 기판으로 전도되는 온도는 일정하다는 조건을 사용한다. 그림 10에서는 Si 박막의 두께에 따른 열전도율을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, internal 열전도율과 external 열전도율을 모두 두께가 얇아짐에 따라 감소하는 것을 알 수 있고 internal 열전도율의 감소는 내부 산란에 의한 것으로 판단된다. 특히, 박막의 두께가 커짐에 따라서 열전도율은 벌크값에 가까워짐을 볼 수 있으며 external 열전도율은 경계열저항(TBR)의 존재로 인해서 internal 열전도율보다 작게 나타남을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Pyrex 7740의 열전도율을 3ω 방법을 이용하여 측정하였고, 기존 문헌 값과 비교할 때 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 CTM을 이용하여 박막의 두께에 따른 광학적 특성을 알 수 있었고, 실험으로 Si의 각도에 따른 반사율을 측정하여 이를 CTM을 이용한 수치해석 결과와 비교하였으며, 잘 일치함을 알 수 있었다. 그리고 본 연구에서는 볼츠만 수송 방정식에 기초한 EPRT 방정식을 수립하고, 박막의 포논 열전달 해석을 수행하였으며, 이를 이용하여, 박막의 두께 변화에 따른 열전도율의 변화를 확인하였다. 특히, internal 열전도율의 감소는 내부 산란에 의한 것이며 external 열전도율은 경계열저항(TBR)의 존재로 인해 internal 열전도율보다 작게 나타남을 예측할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술 연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2005-003-D00042)

참 고 문 헌

[1] P. Lall, M. Pecht, and E.B. Hakim, "Characterization of Functional Relationship between Temperature and Microelectronic Reliability," *Microelectron. Rel.*, vol. 35, pp. 377, 1995.

[2] L.T. Yen, "Review of Heat Transfer Technologies in Electronic Equipment," *ASME J. Electron. Packag.*, vol. 117, pp. 333, 1995.

[3] K. Goodson and M. Flik, "Review of Heat Transfer Technologies in Electronic Equipment", *IEEE Trans. Comp. Hybrids, Manufact. Technol.*, vol. 15, pp. 715, 1992.

[4] A. Majumdar, "Microscale Energy Transport in Solids," edited by C-L. Tien, A. Majumdar, and F.M. Gerner, Chap. 1, Taylor & Francis, 1998.

[5] G. Chen, "Ballistic-Diffusive Equations for Transient Heat Conduction from Nano to Macroscales," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 124, pp. 320, 2002.

[6] M. Born and W. Wolf, "Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference,

and Diffraction of Light," 6th Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, Chap. 1, 1980.

[7] M. Q. Brewster, "Thermal Radiative Transfer and Properties," John Wiley & Sons, USA, Chap. 4, 1992.

[8] H. S. Carslow and J. C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids," Oxford University Press, pp. 193, 1959.

[9] M. Born and W. Wolf, *Principles of Optics: "Electromagnetic Theory of Propagation, Interference, and Diffraction of Light"*, 6th Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, Chap. 1, 1980.

[10] T. Zeng, G. Chen, "Phonon Heat Conduction in Thin Films: Impacts of Thermal Boundary Resistance and Internal Heat Generation," *J. Heat Transfer*, Vol. 123, pp. 340, 2001.

[11] D. Cahill, "Thermal Conductivity Measurement from 30 to 750 K: the 3ω Method," *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 61, pp. 802, 1990.

[12] D. Cahill, M. Katiyar, J. R. Abelson, "Thermal Conductivity of a-Si:H Thin Films," *Phys. Rev. B.*, Vol. 50, pp. 6077, 1994.

저 자 소 개



권혁록 (權赫摠)

1981년 1월 22일생, 2006년 중앙대학교 기계공학부 졸업, 2006년~현재 동 대학원 기계공학부 대학원 석사과정.

Tel : 02-820-5254

Fax : 02-814-9476

E-mail : shlee89@cau.ac.kr



이성혁 (李晟赫)

1971년 2월 1일생, 1993년 중앙대학교 기계공학부 졸업, 1999년 동대학원 기계공학 졸업(공학박사), 2004년~현재 중앙대학교 기계공학부 조교수.

Tel : 02-820-5254

Fax : 02-814-9476

E-mail : shlee89@cau.ac.kr