

주사탐침열파현미경을 이용한 1 차원 나노구조체의 정량적 열전도도 측정기법[§]

박경배* · 정재훈* · 황광석* · 정의한* 권오명*[†]

* 고려대학교 기계공학과

Quantitative Method to Measure Thermal Conductivity of One-Dimensional Nanostructures Based on Scanning Thermal Wave Microscopy

Kyung Bae Park*, Jae Hun Chung*, Gwang Seok Hwang*, Eui Han Jung* and Oh Myoung Kwon*[†]

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received February 21, 2014 ; Revised August 26, 2014 ; Accepted September 1, 2014)

Key Words: Thermal Conductivity(열전도도), Scanning Thermal Wave Microscopy(주사열파탐침현미경), Nanostructure(나노구조체), Thermal Contact Resistance(열접촉저항)

초록: 본 연구에서는 나노스케일의 공간 해상도를 가지는 주사탐침열파현미경(scanning thermal wave microscopy, STWM)을 이용하여 1 차원 나노구조체의 열전도도를 정량적으로 측정하는 방법을 제시한다. 먼저, 1 차원 나노구조체의 열확산도를 측정하기 위한 STWM의 원리를 설명한 후, 정량적인 열확산도 측정을 위한 이론적 해석 과정을 설명한다. STWM을 이용한 본 측정기법은 열파가 이동한 거리에 따른 상대적인 위상지연만을 가지고 열확산도를 측정하여 열전도도를 구하기 때문에 탐침과 나노구조체 사이의 열접촉저항 및 나노구조체와 열원간의 열접촉저항의 영향을 받지 않으며, 나노구조체에 인가되는 정확한 열유속을 구할 필요가 없다. 따라서 기존의 측정 기법들에 비해 측정이 매우 단순하면서도 정량적인 측정이 가능하다.

Abstract: We present a method to quantitatively measure the thermal conductivity of one-dimensional nanostructures by utilizing scanning thermal wave microscopy (STWM) at a nanoscale spatial resolution. In this paper, we explain the principle for measuring the thermal diffusivity of one-dimensional nanostructures using STWM and the theoretical analysis procedure for quantifying the thermal diffusivity. The STWM measurement method obtains the thermal conductivity by measuring the thermal diffusivity, which has only a phase lag relative to the distance corresponding to the transferred thermal wave. It is not affected by the thermal contact resistances between the heat source and nanostructure and between the nanostructure and probe. Thus, the heat flux applied to the nanostructure is accurately obtained. The proposed method provides a very simple and quantitative measurement relative to conventional measurement techniques.

- 기호설명 -

q : 단위길이 당 열유속(W/m)
 k : 열전도도 ($W/m \cdot K$)
 h : 열전달계수($W/m^2 \cdot K$)
 α : 열확산도 (m^2/s)

ρ : 밀도 (kg/m^3)
 C_p : 정압비열 ($J/kg \cdot K$)

1. 서론

최근 몇 년 동안 나노 기술과 재료 과학의 발전에 따라 저차원 나노구조체의 정량적 열전도도 측정 기법이 중요한 이슈가 되고 있다. 예를 들어 광전자 장치 및 전자 회로의 소형화에 따라 국소적 발열 문제를 해결하기 위해 열전도도가 높은

[§] 이 논문은 대한기계학회 2013년도 학술대회(2013. 12. 18.-20., 강원랜드) 발표논문임

[†] Corresponding Author, omkwon@korea.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

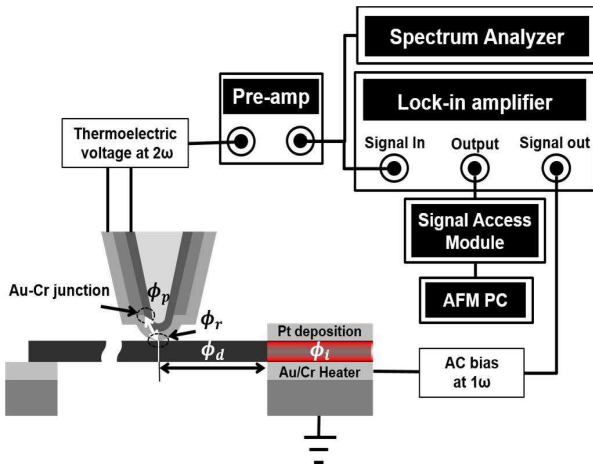


Fig. 1 Experimental setup of scanning thermal wave microscopy

저차원 나노구조체인 그래핀과 카본나노 튜브를 방열 소재로 사용하고 있다.^(1,2)

또한 고효율의 열전소자 개발을 위해 열전도도가 매우 낮은 BiTe 계열의 나노선을 적극적으로 활용하고 있다.^(3,4)

나노선의 경우 지름이 포논평균자유행로(Phonon mean free path)보다 작아지면 소재 내부에서 포논 산란 효과가 커져 열전도도가 벌크값과 달라지게 된다. 또한 표면적 대 체적비(Surface-to-Volume Ratio)가 비약적으로 커져 소재의 표면효과 영향으로 인해 열전도도가 벌크값과 다르게 된다.⁽⁵⁾ 따라서, 나노스케일에서의 저차원 구조체들의 열전도도를 정량적으로 측정하는 것은 다양한 분야에서의 기술 혁신에 있어서 매우 중요한 역할을 수행한다.

나노스케일에서의 열전도도 측정 연구는 정량적인 측정 방법의 부재로 인해 측정값들에 대한 신뢰성이 상당히 떨어지는 편이다.⁽⁶⁾ 예를 들어, Thermal bridge method는 열원과 나노 구조체 사이의 열접촉저항으로 인해 정확한 파워를 측정하기 어렵고, Thermal bridge의 구조상 소재 내부에서의 열전달 현상을 이미징 할 수가 없다.⁽⁷⁻⁸⁾ 또한 Raman spectroscopy 의 경우 공간 해상도가 1 μ m 수준으로 나노스케일에서의 측정에는 적합하지 않고, 온도와 라만쉬프트 사이의 선형성이 매우 떨어지기 때문에 측정의 정확성이 매우 낮다.⁽⁹⁾

본 연구에서는 나노스케일의 공간해상도로 열파(Thermal wave)의 진폭 및 위상지연(Phase lag)에 대한 정량적인 측정이 가능한 주사탐침열현미경(Scanning thermal wave microscopy, STWM)의 원리를 설명한 후, 이를 구현하기 위해 필요한 샘플의 열적 설계 및 정량적인 열확산도 측정을 위해 열파의 주파수 영역을 확보하기 위한 이론적 해석 과정을 설명한다.⁽¹⁰⁾

STWM은 열파가 이동한 거리에 따른 위상지연의

상대적인 차이만을 이용하여 열확산계수(Thermal diffusivity)를 측정하며, 이를 통해 열전도도(Thermal conductivity)를 구하게 된다. 따라서 나노선에 인가되는 파워에 영향을 받지 않으며 탐침과 나노선 접점에서의 열접촉저항 등에 의해 측정 결과가 교란 받지 않는다. 또한 고주파의 교류전류를 사용하기 때문에, 탐침과 시편 사이의 공기를 통한 열전달의 영향을 제거할 수 있고, 직류계측에 비해 신호 대 잡음비가 크다. 그리고 열파의 주파수 조절을 통해 공간해상도를 나노스케일 수준으로 향상시킬 수 있기 때문에 높은 해상도로 정량적인 열전도도를 구할 수 있다.

2. 측정 원리

2.1 STWM의 원리

Fig. 1은 STWM을 활용한 나노선로 전달되는 열파의 진폭 및 위상지연을 측정하는 방법을 도식적으로 보여주고 있다. 열원에 1f 주파수의 교류전류를 가하면 2f 주파수의 열파가 열원에서 발생한다. 발생한 열파는 나노선을 통해, 팁-샘플 접점, 탐침의 첨단, 그리고 열전쌍의 순서로 전달된다. 이렇게 전달된 열파($T_{2\omega}$)는 열전쌍에서 2f 주파수의 열전전압($V_{2\omega}$)을 발생시킨다($V_{2\omega} = S \cdot T_{2\omega}$). 2f 주파수의 열전전압의 신호 대비 잡음비(Signal-to-Noise ratio)를 높이기 위해 전치증폭기(Preamplifier)를 사용한다. 그리고 증폭된 신호를 주파수대역 분석기(Spectrum analyzer)와 락인증폭기(Lock-in amplifier)로 각각 넣어준다. 주파수대역 분석기는 증폭된 2f 주파수의 열전전압의 신호 대비 잡음비를 확인할 수 있다. 락인증폭기는 증폭된 2f 주파수의 열전전압의 진폭과 위상지연을 측정하여 원자력현미경 컴퓨터에 넣어준다. 이때 주사탐침열현미경(Scanning thermal microscopy, SThM) 탐침을 원자력현미경(Atomic force microscopy, AFM)을 통해 나노선의 표면 위에 주사시킴으로써 샘플 표면에 전달된 열파의 진폭과 위상지연을 연속적으로 측정할 수 있게 된다. 이렇게 열전쌍을 통해 측정된 열파의 위상지연은 다음과 같은 성분으로 구성된다.

$$\phi_t = \phi_i + \phi_d + \phi_r + \phi_p \tag{1}$$

여기서, ϕ_i 는 탐침의 열전쌍에서 측정되는 위상지연, ϕ_d 는 열파가 이동한 거리에 따른 위상지연, ϕ_r 는 열원 주변의 단열조건에 위상 지연, ϕ_p 는 탐침 끝과 샘플 표면 접점에서의 열접촉저항에 의한 위상 지연, ϕ_t 는 탐침의 열시상수(Thermal time constant)에 의해 발생한 위상지연을 의미한다.

주사탐침열현미경 탐침이 나노선의 표면 위를 주사함으로 열원 주변의 단열조건, 팁-샘플 접점에서의 열접촉저항, 그리고 탐침의 열시상수에 의해 발생하는

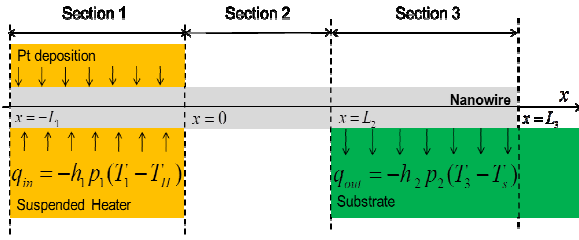


Fig. 2 Schematic diagram of the heat transfer paths along the nanowire

위상지연들(ϕ_i, ϕ_s, ϕ_p)는 거리에 따른 변화가 일정하므로 위상지연 상대적인 차이에는 영향을 주지 않는다.

$$\frac{d\phi_i}{dx} = \frac{d\phi_d}{dx} \quad (2)$$

결과적으로 식 (2)에서 볼 수 있듯이 측정되는 전체 위상지연 요소의 상대적인 차이와 열파가 이동한 거리에 따른 위상지연의 요소의 상대적 차이는 동일한 값을 가지게 된다.

ϕ_d 는 열파가 전달되는 매질의 열적 특성에 의해서 발생하며 1 차원 열파의 경우에는 아래와 같이 주어진다.^(10,11)

$$\phi_d = (\sqrt{\pi f / \alpha})d \quad (3)$$

여기서 f, d, α 는 각각 열파의 주파수, 열파가 이동한 거리, 매질의 열확산도를 의미한다. 식 (2)에서 알 수 있듯이, 열파가 진행한 거리와 그에 따른 위상지연값을 측정하게 되면 매질의 열확산계수를 구할 수 있으며, 결과적으로 매질의 열전도도 또한 얻을 수 있게 된다($\alpha = k/(\rho C_p)$).

2.2 열접촉저항의 영향을 포함한 수학적 모델링

STWM 을 이용한 정량적인 열확산도를 측정하기 위해서는 열접촉저항의 영향을 무시할 수 있는 주파수범위를 구해야 한다. Fig. 1 을 보면 나노선의 양단이 열원과 기관 양쪽에 접촉이 되어있는 것을 볼 수 있다. 만약 열파가 나노선에서 전부 소실되지 않고 기관과 접촉된 곳까지 진행이 된다면 나노선과 기관의 온도구배에 의해 열유속이 발생한다. 이 열유속을 방지하기 위해서는 나노선과 기관의 계면에 의한 열접촉저항을 무시할 수 있는 주파수 범위를 구해야 한다. 또한 열원에서 나노선으로 이동하는 열유속을 통해 본 측정 기법이 인가되는 파워에 영향 받지 않음을 보여준다.

Fig. 2 를 보면 열원과 나노선이 접촉되어 있는 부분, 나노선 브릿지 부분, 나노선이 기관과 접촉되어 있는 부분으로 총 3 개의 구간으로 나눌 수 있으며, 각 구간을 1 구간($-L_1 < x < 0$), 2 구간($0 < x < L_2$), 3 구간($L_2 < x <$

L_3)으로 명명한다. 1 구간과 3 구간은 열원과 기관에 접촉에 의한 열유속이 존재하고 있으며, 2 구간의 나노선은 브릿지가 주변 열적환경과 충분히 유격되어있어 공기를 통한 열전달이 없다고 가정한다. 이러한 열적 환경을 고려한 지배 방정식과 경계조건들은 다음과 같다.

G.E.s

$$\begin{aligned} kA_c \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - h_1 p_1 (T_1 - T_h) &= \rho C_p A_c \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad \text{for, } -L_1 < x < 0 \\ kA_c \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} &= \rho C_p A_c \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad \text{for, } 0 < x < L_2 \\ kA_c \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} - h_2 p_2 (T_3 - T_s) &= \rho C_p A_c \frac{\partial T_3}{\partial t} \quad \text{for, } L_2 < x < L_3 \end{aligned} \quad (4)$$

B.C.s

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1(-L_1)}{\partial x} &= 0, \quad T_1(0) = T_2(0), \quad \frac{\partial T_1(-L_1)}{\partial x} = 0 \\ T_1(0) &= T_2(0), \quad T_2(L_2) = T_3(L_2), \quad \frac{\partial T_1(0)}{\partial x} = \frac{\partial T_2(0)}{\partial x} \\ \frac{\partial T_2(L_2)}{\partial x} &= \frac{\partial T_3(L_2)}{\partial x}, \quad \frac{\partial T_3(L_3)}{\partial x} = 0 \\ q_{in} &= -h_1 p_1 (T_1 - T_h) \quad \text{for, } -L_1 < x < 0 \\ q_{out} &= -h_2 p_2 (T_3 - T_s) \quad \text{for, } L_2 < x < L_3 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $k, A_c, \rho, C_p, T_2, L_1, L_2, L_3, q_{in}, h_1, p_1, T_h, T_H, q_{out}, h_2, p_2, T_3, T_s$ 는 각각 나노선의 열전도도, 나노선의 단면적, 나노선의 밀도, 나노선의 정압비열, 나노선 브릿지의 온도, 나노선이 열원과 접촉된 길이, 나노선 브릿지의 길이, 나노선이 기관과 접촉된 길이, 열원과 나노선의 온도차이에 인해서 발생하는 열유속, 열원과 나노선의 계면에 의한 열전달 계수, 열원과 접촉하는 나노선의 단위길이당 표면적, 구간 1 에서 나노선의 온도, 열원의 온도, 나노선에서 기관의 온도차이에 인해서 발생하는 열유속, 나노선과 기관의 계면에 의한 열전달 계수, 기관과 접촉하는 나노선의 단위길이당 표면적이다.

복소온도($T(x,t) = \theta(x)e^{i\omega t}$, $T_H = \theta_H e^{i\omega t}$, $T_s = \theta_s e^{i\omega t}$)를 식 (4)와 (5)에 대입하여, 각 구간별 지배방정식의 일반해를 구하면 아래와 같이 구간별 복소온도의 진폭을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_1(x) &= C_1 \cosh(Ax) + C_2 \sinh(Ax) + \frac{h_1 p_1 \theta_H}{kA_c A^2} \quad \text{for, } -L_1 < x < 0 \\ \theta_2(x) &= C_3 \cosh(Bx) + C_4 \sinh(Bx) \quad \text{for, } 0 < x < L_2 \\ \theta_3(x) &= C_5 \cosh(Dx) + C_6 \sinh(Dx) + \frac{h_2 p_2 \theta_s}{kA_c D^2} \quad \text{for, } L_2 < x < L_3 \end{aligned} \quad (6)$$

$$A = \sqrt{\frac{h_1 p_1 + \rho C_p A_c i \omega}{kA_c}}, \quad B = \sqrt{\frac{\rho C_p i \omega}{k}}$$

$$D = \sqrt{\frac{h_2 p_2 + \rho C_p A_c i \omega}{kA_c}}$$

여기서, θ , θ_H , θ_s , ω 는 각각 나노선의 복소온도의 진폭, 열원의 복소온도 진폭, 시편의 복소온도 진폭, 열파의 각주파수(angular frequency)이다. 그리고 $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 는 각 구간별 일반해의 임의상수(arbitrary constant)이며 식 (6)과 식 (5)으로 연립방정식을 만들어 수치해석프로그램의 도움으로 임의상수를 얻을 수 있다. 열전도도를 제외한 나머지 물성들($h_1, h_2, p_1, p_2, A_c, \rho, C_p$)은 기존의 문헌 값을 이용하여, 임의상수를 얻은 식 (6)을 통해 열전도도에 따른 위상지연 분포의 변화만을 모사할 수 있다.

3. 계측 조건

3.1 열원 제작 조건

이번 장에서는 STWM 을 이용한 정량적인 열확산도를 계측을 하기 위해 각 구간 별로 요구되는 열적환경에 따른 열원 제작 조건에 대해 설명한다. 열원과 나노선의 접촉하는 구간은 브릿지로 열원을 만들어 주변환경과 열적으로 단열시켜야 한다. 열원을 브릿지 형태로 만들지 않으면 열원에서 발생한 열파가 공기를 통해 기관에서 나노선으로 전달이 된다. 그리고 집속이온빔(Focused ion beam, FIB)를 사용해 하여 나노선과 열원의 열적접촉을 높이기 위해 나노선 위에 Pt 증착을 한다. 나노선 브릿지 구간에서는 나노선을 주변 열적환경과 충분히 유격을 시켜 열원에서 나노선으로 전달된 열파가 나노선으로만 전달이 되게 한다. 그리고 나노선 브릿지의 길이는 나노선과 기관의 접촉구간에서 열유속이 발생하지 않을 정도로 충분히 확보해야 하기 때문에 나노선의 브릿지 길이를 1 차원 열파의 침투거리를 사용하여 결정한다.

나노선을 통과하는 1 차원 열파의 침투거리는 다음과 같은 식으로 표현한다.⁽¹²⁾

$$d = \sqrt{2\alpha / \omega} \quad (7)$$

여기서, d , α , ω 는 각각 열파의 침투거리, 나노선의 열확산도, 열파의 각주파수이다.

본 연구진은 열전소재로 여러 분야에 사용하고 있는 Bi_2Te_3 나노선의 물성을 통해 나노선 브릿지의 길이를 결정했다. 알려진 Bi_2Te_3 나노선의 열전도도(k)는 1.37W/mk , 정압비열(C_p)은 157 J/kgK , 밀도(ρ)는 7642 kg/m^3 을 사용하여 나노선의 열확산도(α)인 $1.14 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ 을 얻는다.^(13,14) 열파의 각주파수는 STWM 의 공기를 통한 탐침과 시편 사이의 열전달 영향을 배제할 수 있는 주파수 6.4kHz 를 사용한다.^(10,11) 위에서 얻은 Bi_2Te_3 나노선의 열확산도와 열파의 각주파수를 통해 나노선을 통과

하는 1 차원 열파의 침투거리(d)는 $7.53\mu\text{m}$ 를 얻는다. 나노선 브릿지의 길이는 1 차원 열파의 침투거리보다 길어야 하기 때문에 $8\mu\text{m}$ 로 결정한다.

나노선과 기관이 접촉된 구간에는 열파가 모두 소실되어야 하는 구간이기 때문에 별도의 열적설계를 요구하지 않는다. 하지만 본 계측기법은 주사탐침열현미경의 탐침을 나노선 위에 주사하기 때문에 구조적 안전을 위해 기관과 열원의 높이 단차가 없는 것이 좋다.

3.2 열접촉저항을 무시하는 주파수 영역

이번 장에서는 Bi_2Te_3 나노선의 열접촉저항을 무시하는 주파수 영역을 확인해 본다. 식 (6)을 사용하기 위해서 Bi_2Te_3 나노선의 크기(L_1, L_2, L_3, A_c), Bi_2Te_3 나노선의 열물성(k, ρ, C_p), 열원과 나노선, 나노선과 기관의 접촉계면에서 발생하는 단위길이당 열전달계수(h_1p_1, h_2p_2)를 결정해야 한다. 여기서 Bi_2Te_3 나노선의 L_2, k, ρ, C_p 의 값은 이전 장에서 1 차원 열파의 침투거리를 이용하여 나노선 브릿지의 길이를 구했을 때 결정을 했다. 나노선의 총길이($L_1+L_2+L_3$)를 $20\mu\text{m}$, 나노선의 지름을 200nm 라고 일 때 각 구간의 길이(L_1, L_2, L_3)를 각각 $3\mu\text{m}, 8\mu\text{m}, 9\mu\text{m}$ 로 가정한다. 열원과 나노선, 나노선과 기관의 접촉계면에서 발생하는 단위길이당 열전달계수(h_1p_1, h_2p_2)는 Pt 증착의 유무에 따른 열원과 카본나노섬유의 접촉계면에서 발생하는 열접촉저항을 참조하여 열원과 나노선의 접촉계면에서 발생하는 단위길이당 열전달계수(h_1p_1)를 0.0179W/mK , 나노선과 기관의 접촉계면에서 발생하는 단위길이당 열전달계수(h_2p_2)를 0.0161W/mK 을 사용하였다.⁽¹⁵⁾

열원과 나노선의 접촉계면에서 발생하는 단위길이당 열전달계수의 변화에 따른 위상지연 분포도를 구한다. Fig. 3 은 열파의 주파수가 5, 10, 20kHz 일 때 각각의 주파수에서 열원과 Bi_2Te_3 나노선의 접촉계면에 의한 열접촉저항의 변화에 따른 진폭과 위상지연 분포도의 결과이다. 각 주파수에 따른 진폭과 위상지연 분포도를 보면 열원과 Bi_2Te_3 나노선의 접촉계면에서 발생하는 열접촉저항의 변화에 따라 진폭은 달라지지만 거리에 따른 상대적인 위상지연 차이가 동일한 것을 확인 할 수 있고 이를 통해 본 계측 기법이 인가되는 파워에 영향 받지 않음을 보여준다.

나노선과 기관의 접촉계면에서 발생하는 단위길이당 열전달계수의 변화에 따른 위상지연 분포도를 구한다. Fig. 4 는 열파의 주파수가 5, 10, 20kHz 일 때 각각의 주파수에서 Bi_2Te_3 나노선과 기관의 접촉계면에 의한 열접촉저항의 변화에 따른 진폭

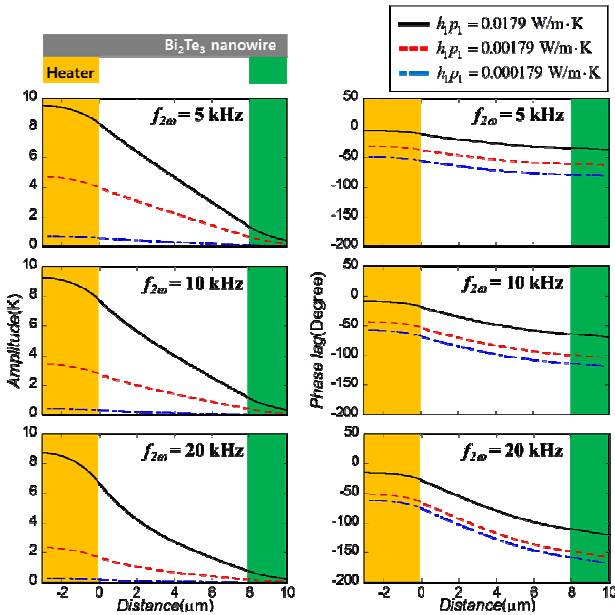


Fig. 3 Amplitude and Phase lag distribution due to changes in the thermal contact resistance by the contact interface of heat source and Bi₂Te₃ nanowire when 5, 10, 20kHz of thermal wave frequency

과 위상지연 분포도의 결과이다. 각각의 주파수에 따른 진폭과 위상지연 분포도를 보면 열원에서 3 μ m 이내의 위상지연 분포도를 보면 주파수가 증가함에 따라 나노선과 기판의 접촉계면에서 발생하는 열접촉저항의 변화에 따른 영향이 무시되는 것을 확인할 수가 있다.

결과적으로 Bi₂Te₃ 나노선의 경우 STWM 을 이용한 정량적인 열확산도를 계측하기 위해서는 열접촉저항의 영향을 무시할 수 있는 열파의 주파수범위는 20kHz 이하다. 하지만 열파의 주파수가 커지면 커질수록 나노선에 전달되는 열파의 길이가 짧아져 주사탐침열현미경의 탐침으로 나노선 위를 주사 할 때에 위치에 따라서 신호대비잡음비가 작아져 계측이 불가능한 구간이 생긴다. 그렇기 때문에 주파수대역 분석기를 통해 2f 열전전압의 신호대비잡음비가 충분한 구간을 확인하는 작업을 필요로 한다.

4. 결 론

우리는 본 계측 방법이 기존의 측정 기법들에 비해 계측이 매우 단순하면서도 정량적인 계측이 가능하여 앞으로 신뢰성 있는 다양한 나노소재의 열전도도 값을 제공하여 열전소재 및 방열 소재 개발에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다. 본 연구는 1 차원 나노구조체에 대해서만 다뤘지만 다양한

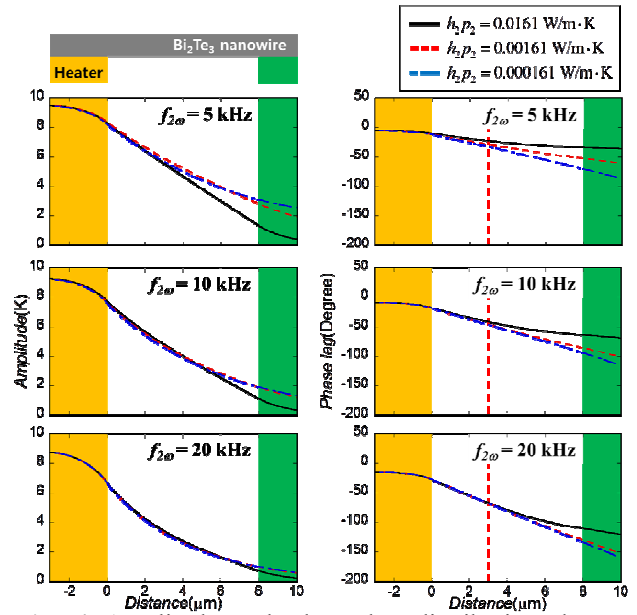


Fig. 4 Amplitude and Phase lag distribution due to changes in the thermal contact resistance by the contact interface of Bi₂Te₃ nanowire and substrate when 5, 10, 20kHz of thermal wave frequency

나노구조체에도 적용하는 것이 가능하다. 그래서 본 연구진은 1 차원 나노구조체의 열전도도 계측 실험을 성공한 뒤 2 차원 나노구조체의 열전도도, 동일 소재의 결정계면에서의 열전도도 변화 등에 대해 추가 연구를 진행할 것이다.

참고문헌 (References)

- (1) Freitag, M., Steiner, M., Martin, Y., Perebeinos, V., Chen, Z., Tsang, J.C. and Avouris, P., 2009, "Energy Dissipation in Graphene Field-Effect Transistor," *Nano Lett.*, Vol.9, pp. 1883~1888.
- (2) Tong, T., Zhao, Y., Delzeit, L., Kashani, A., Meyyappan, M. and Majumdar, A., "Dense Vertically Aligned Multiwalled Carbon Nanotube Arrays as Thermal Interface Materials," *IEEE Trans. Compon. Pack. Manuf. Technol.*, Vol. 30, pp. 92~100.
- (3) Chen, Z.G., Han, G., Yang, L., Cheng, L. and Zou, J., 2012, "Nanostructured Thermoelectric Materials: Current Research and Future Challenge," *Prog. Nat. Sci.*, Vol. 22, 535~549.
- (4) Kim, W.C., Zide, J., Gossard, A., Klenov, D., Stemmer, S., Shakouri, A. and Majumdar, A., 2006, "Thermal Conductivity Reduction and Thermoelectric Figure of Merit Increase by Embedding Nanoparticles in Crystalline Semiconductors," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 96, 045901.
- (5) Rojo, M. M., Calero, O.C., Lopeandia, A. F., Rodriguez-Viejo, J. and Martin-Gonzalez, M., 2013, "Review on

- Measurement Techniques of Transport Properties of Nanowires,” *Nanoscale*, Vol. 5, 11526.
- (6) Christofferson, J., Maize, K., Ezzahri, Y., Shabani, J., Wang, X. and Shakouri, A., 2008, “Microscale and Nanoscale Thermal Characterization Techniques,” *J. Electron. Packag.*, Vol. 130, 041101
- (7) Zhou, J., Jin, C., Seol, J. H., Li, X. and Shi, L., 2005, “Thermoelectric Properties of Individual Electrodeposited Bismuth Telluride Nanowires,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, 133109.
- (8) Mavrokefalos, A., Moore, A.L., Pettes, M.T., Shi, L., Wang, W. and X. Li, 2009, “Thermoelectric and Structural Characterizations of Individual Electrodeposited Bismuth Telluride Nanowires,” *J. Appl. Phys.*, Vol.105, 104318.
- (9) Ocariz, A., Sanchez-Lavega and Salazar, A., 1997, “Photothermal Study of Subsurface Cylindrical Structures. II. Experimental Results,” *J. Appl. Phys.*, Vol.81, 7561.
- (10) Kwon, O., Shi, L., Majumdar, A., 2004, “Scanning Thermal Wave Microscopy,” *J. Heat Transf.-Trans. ASME*, Vol. 125, 156.
- (11) Chung, J. Kim, K., Hwang, G., Kwon, O., Lee, J., Park, S. and Choi, Y., 2010, “Nanoscale Range Finding of Subsurface Structures by Measuring the Absolute Phase Lag of Thermal Wave,” *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 81, 053701.
- (12) Arpaci, V.S, 1966, “Conduction Heat Transfer”, pp. 324~335
- (13) Rojo, M.M., Grauby, S., Rampnoux, J.M., Caballero-Calero, O., Martin-Gonzalez, M. and Dilhaire, S., 2013, “Fabrication of Bi₂Te₃ Nanowire Arrays and Thermal Conductivity Measurement by 3 ω Scanning Thermal Microscopy,” *J. Appl. Phys.*, Vol. 113, 054308.
- (14) Gorbachuk, N. P., Bolgar, A. S., Sidorko, V. R. and Goncharuk, L. V., 2004, “Heat Capacity and Enthalpy of Bi₂Si₃ and Bi₂Te₃ in the Temperature Range 58-1012K”, *Powder Metall. Met. Ceram.*, Vol. 43, pp. 284~290.
- (15) Yu, C., Saha, S., Zhou, J., Shi, L., Cassell, A. M., Cruden, B. A., Ngo, Q. and Li, J., 2006, “Thermal Contact Resistance and Thermal Conductivity of A Carbon Nanofiber,” *J. Heat Transf.-Trans. ASME*, Vol. 128, pp.234~239.