

레이저 초음파를 이용한 체적종파의 박막 내 전파특성 연구

Propagation of Bulk Longitudinal Waves in Thin Films Using Laser Ultrasonics

김윤영

Yun Young Kim

초 록 본 논문에서는 나노스케일 금속박막 내에서 체적종파가 전파하는 특성을 연구하였다. 실리콘(100) 기판 위에 150 nm 두께의 크로뮴 혹은 알루미늄 박막을 적층하여 시편을 제작하였으며, 펨토초 레이저 시스템으로 구성된 시간영역 열반사율 기법(time-domain thermoreflectance technique)을 이용하여 박막 표면으로부터 여기된 탄성파가 박막과 기판의 계면에서 반향될 때 발생하는 신호를 검출하였다. 체적종파의 거동을 모사하는 열탄성 방정식을 수치해석적으로 풀어 측정값과 곡선맞춤함으로써 박막의 체적종파 속도와 탄성계수를 평가할 수 있었으며, 결과를 문헌값과 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 본 연구로부터 확립된 레이저 계측법은 나노재료의 특성평가에 적합함을 보여주며, 이는 기존의 접촉식·과피식 검사법의 한계를 뛰어넘을 대안을 제시한다.

주요용어: 레이저 초음파, 체적종파, 박막, 물성평가

Abstract This paper presents the investigation of the propagation behavior of bulk longitudinal waves generated by an ultrafast laser system in thin films. A train of femtosecond laser pulses was focused onto the surface of a 150-nm thick metallic (chromium or aluminum) film on a silicon substrate to excite elastic waves, and the change in thermoreflectance at the spot was monitored to detect the arrival of echoes from the film/substrate interface. The experimental results show that the film material characteristics such as the wave velocity and Young's modulus can be evaluated through curve-fitting in numerical solutions. The material properties of nanoscale thin films are difficult to measure using conventional techniques. Therefore, this research provides an effective method for the nondestructive characterization of nanomaterials.

Keywords: Laser Ultrasonics, Longitudinal Bulk Wave, Thin Film, Characterization of Nanomaterials

1. 서 론

3차원 낸드플래시 메모리와 DRAM 메모리, 그리고 실리콘관통전극(through-silicon via, TSV)과 같은 오늘날의 반도체 기술은 집적도를 높이기 위하여 수직적층화가 이루어지고 있다. 이에 따라 소자의 구조적 종횡비는 기하급수적으로 증가하고 있으며, 그 결과 기존에는 나타나지 않았던 기계적 불량현상들이 새롭게 대두되고 있다[1]. 박막증착, 어닐링(annealing), 노광, 식각, 세정, 평탄화 등 통상 여러 단계의 공정과정을 거치는 과

정에서 발생하는 열응력, 표면장력, 박막의 잔류응력 등으로 인하여 계면박리, 좌굴, 균열, 무너짐 등 다양한 파손사례가 관찰되며, 이는 제품의 개발기간을 지연시키고 비용을 증가시키는 주요 원인이 된다.

나노소자의 기계적 불량을 방지하기 위해서는 정확한 물성에 기반한 응력설계가 선행되어야 하는데, 박막재료의 물성은 크기효과(scale effect)와 모재효과(substrate effect)로 인하여 벌크(bulk)재료의 값과는 다른 경우가 많으며[2], 같은 재료라고 하더라도 증착 방법이나 공정 온도, 그리고 가스

유량 등의 공정조건에 따라 바뀌기 때문에[3] 재료의 특성길이와 공정방법을 반영하는 평가법이 요구된다.

나노재료의 기계적 물성을 측정할 수 있는 대표적인 방법은 나노압입시험법(nanoindentation test)이다. 다이아몬드 혹은 구 모양의 압입자를 시편의 표면에 가하여 하중-변위 데이터를 얻고, 압흔을 분석하여 재료의 기계적 특성을 정량적으로 평가할 수 있다[4]. 하지만, 모재효과를 분리하기 힘들고, 압입 과정에서 발생하는 소성, 점탄성, 파괴, 점착 등의 복합적인 현상을 통합적으로 고려할 수 없는 한계가 있다. 따라서, 기존의 접촉식 측정법의 단점을 극복할 수 있는 비파괴검사법의 필요성이 대두된다. 또한, 전자기음향탐촉자(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)을 이용하여 50 μm 두께의 니켈 박판의 탄성계수를 측정하는 방법이 보고되었으나[5], 박판보다 더 얇은 나노미터 단위의 박막에 대한 물성측정방법이 요구된다.

시간영역 열반사율 기법(time-domain thermo-reflectance technique, TDTR)은 펨토초의 펄스폭을 갖는 레이저광을 박막의 표면에 조사시켜 온도변화에 따른 반사율의 변화를 측정함으로써 재료의 특성을 평가하는 방법으로, 일반적으로 나노스케일 박막의 열전도도 혹은 열확산도와 같은 열물성 측정법에 활용되어 왔다[6,7]. 하지만, 박막이 레이저 펄스를 흡수할 때에 발생하는 국소적인 열팽창에 의하여 탄성파가 여기되고, 이로부터 체적종파(bulk longitudinal wave)가 표면의 수직방향으로 전파되므로 이러한 파동의 특성을 분석함으로써 매질(박막)의 기계적 물성치를 알 수 있다[8,9].

따라서, 본 연구에서는 TDTR 기법을 이용하여 박막 내에서 전파하는 체적종파의 특성을 분석함으로써 나노스케일 박막의 기계적 물성을 평가하고자 한다. 재료의 열탄성 거동을 묘사하는 지배방정식의 해를 수치해석적으로 구하고, 이를 실험값과 곡선맞춤함으로써 크로뮴(Cr) 혹은 알루미늄(Al) 박막의 탄성계수와 체적종파 속도를 평가하였다. 이로부터 나노스케일 재료의 특성 평가에 적합한 비접촉·비파괴식 측정법을 확립하고자 한다.

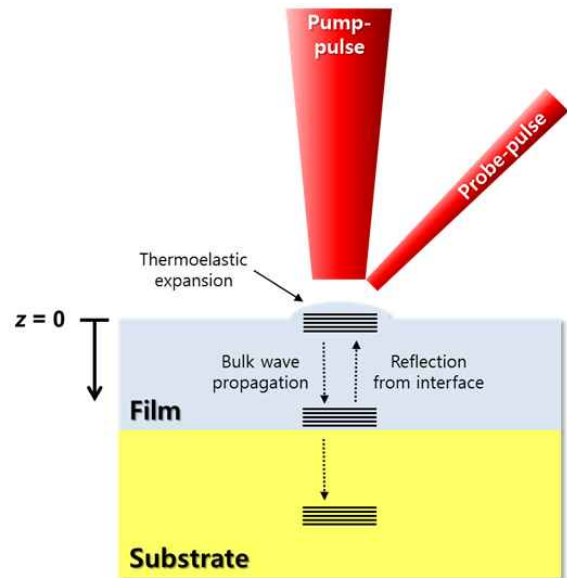


Fig. 1 A schematic of the time-domain thermo-reflectance method to study the behavior of bulk longitudinal wave in a thin film

2. 이론 및 수치해석

박막 내에서 전파하는 체적종파의 거동을 예측하기 위하여 열탄성 미분방정식의 해를 수치해석적으로 구하였다. Fig. 1과 같이 박막의 표면에 펄스파를 조사하면 국소적인 열팽창이 주기적으로 일어나 탄성파가 여기된다. 박막의 깊이 방향(+z)으로 전파하는 체적종파가 박막과 기판의 경계에 도달하면 일부는 반사되어 돌아오는데, 이러한 열탄성 거동을 묘사하기 위해서는 다음과 같이 결합되어 있는 열전도 방정식과 파동 방정식의 해를 구해야 한다:

$$\begin{aligned} \kappa_{ij} T_{,ij} + W &= \rho C_v \dot{T} \\ c_{ijkl} u_{l,kj} - B_{ij} T_{,j} &= \rho \ddot{u} \end{aligned} \quad (1)$$

이 때, κ_{ij} 는 열전도도 텐서를, T 는 온도를, ρ 는 밀도를, C_v 는 비열을, c_{ijkl} 는 강성 텐서를, u_i 는 변위 벡터를, B_{ij} 는 열응력 텐서를 나타낸다. 또한, 레이저 펄스를 열전도 방정식의 열원으로 고려한다면 다음과 같이 표현된다:

$$W = \frac{\beta(1-R)}{2} e^{-\beta z} I(t) \quad (2)$$

식(2)에서 $\beta = 4\pi k_0/\lambda$ 는 레이저광의 흡수 깊이를 나타내며, k_0 는 흡광계수를, λ 는 레이저 파장을 뜻한다. R 은 반사도이며, $I(t)$ 는 시간에 따른 레이저 펄스의 함수를 표현한다. 이는 펄스의 반폭치 τ 에 따라 다음과 같이 기술된다.

$$I(t) = \begin{cases} I_0 \sin^2\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), & 0 < t < \tau \\ 0, & t < 0 \text{ or } t > \tau \end{cases} \quad (3)$$

이 때, I_0 는 레이저광의 강도를 뜻한다.

필름과 기판의 경계면에서 온도와 변위는 연속적이어야 하므로 경계조건은 다음과 같다:

$$T^f|_{z=d} = T^s|_{z=d} \quad (4)$$

$$(\kappa_{ij}^f T_{,j}^f \cdot \hat{n})|_{z=d} = (\kappa_{ij}^s T_{,j}^s \cdot \hat{n})|_{z=d} \quad (5)$$

$$u^f|_{z=d} = u^s|_{z=d} \quad (6)$$

$$(c_{ijkl}^f u_{k,l}^f)|_{z=d} = (c_{ijkl}^s u_{k,l}^s)|_{z=d} \quad (7)$$

이 때, 상첨자 f 와 s 는 각각 박막과 기판을 뜻하며, d 는 박막의 두께를 뜻한다. 또한, 박막의 표면에서 공기중으로의 전도 혹은 대류 열전달은 무시할 수 있으며, 자유 표면력(traction-free) 경계조건을 만족한다:

$$T_{,j}|_{z=0} = 0 \quad (8)$$

$$\sigma_{ij}|_{z=0} = [c_{ijkl} u_{k,l} - B_{ij} T]_{z=0} = 0 \quad (9)$$

마지막으로, 박막은 초기휴지(initially at rest) 상태에 있으므로 초기조건은 다음과 같다:

$$u|_{t=0} = \dot{u}|_{t=0} = T|_{t=0} = \dot{T}|_{t=0} = 0 \quad (10)$$

체적종파의 거동을 살펴봄에 있어서 박막 두께 방향으로의 열탄성 거동에 관심이 있기 때문에 1차원 가정을 적용할 수 있으며, 이로부터 지배방정식의 해를 구한다. 수치해석을 위하여 2차 정확도의 Crank-Nicolson 유한차분법(finite difference method)을 사용하면 식(1)의 열탄성 방정식은 아래와 같이 이산화된다:

$$\begin{aligned} & \frac{\kappa}{2} \left[\frac{(T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}) + (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n)}{\Delta x^2} \right] \\ & + \frac{1}{2} (W_i^{n+1} + W_i^n) = \rho C_v \left[\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \right] \\ & \frac{c}{2} \left[\frac{(u_{i+1}^{n+1} - 2u_i^{n+1} + u_{i-1}^{n+1}) + (u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n)}{\Delta x^2} \right] \\ & - \frac{B}{2} \left[\frac{(T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}) + (T_{i+1}^n - T_{i-1}^n)}{\Delta x} \right] = \rho \frac{u_i^{n+1} - 2u_i^n + u_i^{n-1}}{\Delta t^2} \end{aligned} \quad (11)$$

이로부터 T 와 u 에 대한 값을 계산할 수 있다. 유한차분법을 이용한 수치해석에 관한 방법은 참고문헌[10]에 자세히 기술되어 있다.

3. 실험방법

3.1. 시편 제작

전자빔 증착기(e-beam evaporator, Edwards 社 Auto 306)을 사용하여 150 nm 두께의 크로뮴과 알루미늄 박막을 각각 4인치 실리콘(100) 기판 위에 증착하였다. 증착시 챔버의 압력은 3×10^{-6} Torr로 유지되었으며, 텅스텐 필라멘트에 4.7 kV의 직류전압과 4.5 mA의 전류를 가하여 0.16 nm/s의 증착률을 얻었다. 시편의 두께는 증착기 내에 장착된 석영진동자(quartz crystal film thickness monitor)를 이용하여 제어되었다.

3.2. 체적종파 측정

박막 내에 체적종파를 발생 및 검출하기 위하여 시간영역 열반사율 측정장치를 사용하였다.

Fig. 2는 실험장치의 개략도를 보여준다. 5 W 출력의 연속발진 레이저(continuous wave laser, Spectra-physics 社 Millenia Pro)로부터 나오는 532 nm 파장의 광원은 Ti:sapphire 오실레이터(oscillator, Spectra-physics 社 Tsunami)를 통과하여 파장 780 nm, 펄스폭 120 fs, 반복율 80 MHz를 갖는 펄스파로 변하고, 이는 다시 광선 분할기 (beam splitter)에서 10:1의 강도비를 갖는 펌프(pump) 광과 프로브(probe) 광으로 분배되어 시편에 입사된다. 전자는 표면에서 흡수되어 박막을 국소적으로 가열하며, 후자는 열반사율의 변화를 측정을 위해 표면으로부터 반사되어 락-인 증폭기(lock-in amplifier, Stanford Research Systems 社 SR830)가 연결된 광검출기(photodetector, Thorlabs

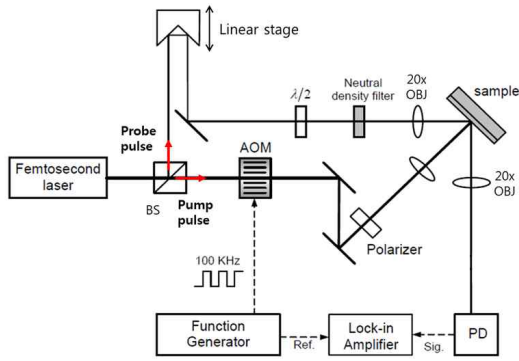


Fig. 2 A schematic of the experimental apparatus. AOM: acousto-optic modulator, BS: beam splitter, PD: photodetector

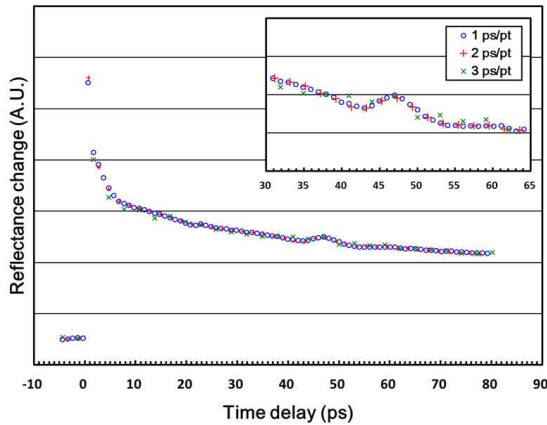


Fig. 3 A calibration result for the measurement resolution using the 150-nm Cr/Si(100) sample. The inset shows a zoomed image of the signal. Note that 3 ps/pt is not enough to capture the acoustic pulse shape.

社 PDA10A)로 짐속 조사된다. 박막의 표면에서 두께 방향으로 열전도가 일어나는 과정에서 열반사율의 감소가 발생하는데, 이는 역반사 거울이 장착된 광경로 지연기(National Aperture社 MM-4M-EX)를 이용하여 측정되었다. 이 때, 측정의 분해능을 설정함에 있어서 결과의 해상도를 높이려면 실험시간이 많이 소요되는 단점이 있기 때문에 최적화가 필요하다. 따라서, Fig. 3에서 보이는 것처럼 캘리브레이션(calibration)을 통하여 2 ps/pt로 값을 설정하였다. 또한, 광경로 지연기의 반복 재현성으로 인하여 ±0.6 ps의 오차가 존재하며, 이는 추후 논의될 탄성계수의 오차범위에 반영되도록 하였다. 모든 실험과정은 LabVIEW 기반의 컴퓨터 인터페이스를 이용하여 자동화되어 이루어진다.

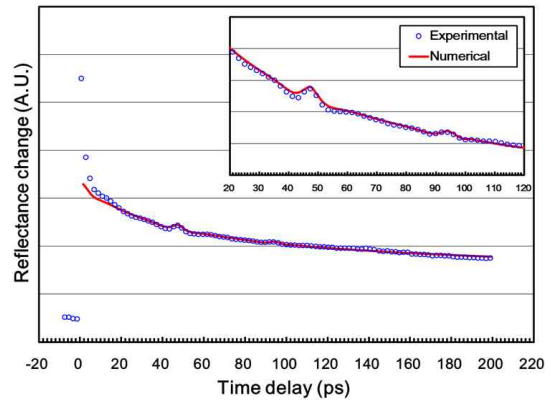


Fig. 4 Thermoreflectance measurement data of the 150-nm Cr/Si(100) sample and the best-fit of the numerical solution. The inset shows a zoomed image of the signal.

4. 결과 및 고찰

4.1. 크로뮴 시편의 측정 결과

Fig. 4는 150 nm 두께의 크로뮴 시편으로부터 측정된 열반사율의 변화를 보여준다. x 축은 프로브 펄스의 광경로 지연시점을 나타내며, y 축은 락-인 증폭기에서 측정된 전압값으로, 이는 반사도의 변화에 비례한다. 펌프광이 가해진 시점($t = 0$)에서 박막의 에너지 흡수에 따른 온도 상승으로 인하여 열반사율의 급격한 증가가 발생한다. 하지만, 시간이 지남에 따라 두께방향으로 열전도가 일어나므로 표면온도의 감소에 따른 열반사율의 저하가 나타난다. 이와 더불어, $t = 47$ ps와 94 ps의 지점에서 박막과 기판의 경계면으로부터 반향된 체적종파가 관찰되는데, 이는 압광효과(piezo-optic effect)에 의하여 열반사도 변화곡선의 국소 부위에 추가적인 펄스 형태의 신호로 나타난다. 이로부터 크로뮴 박막 내에 전파하는 체적종파의 속도(v_{bulk})를 알 수 있는데, 다음의 계산식을 사용하여 그 결과를 구할 수 있다:

$$v_{bulk} = 2d/t \tag{12}$$

여기에 $d = 150$ nm와 $t = 47$ ps를 대입하면 6383 m/s의 값을 얻으며, ±0.6 ps의 오차를 고려했을 때에 약 ±81 m/s의 오차범위를 갖는다.

또한, 박막의 탄성계수(E_C)를 추출하기 위하여 수치해석을 수행하였으며, 이 때 사용된 물성값

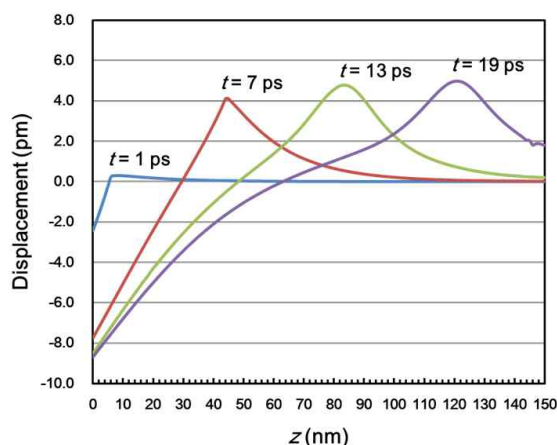


Fig. 5 Numerical solutions for the displacement propagation behavior in the Cr film

을 Table 1에 기재하였다. Fig. 4에 실선으로 표시한 곡선이 그 결과이며, 오차범위를 고려하여 $E_{Cr} = 260 \pm 5$ GPa의 값을 얻었다. 또한, Fig. 5는 수치해석 결과로부터 박막의 열탄성 거동에 따른 변위값을 보여주고 있는데, 최대 변위점이 6 ps 마다 약 38 nm씩 전파하는 것을 알 수 있다. 이로부터 6333 m/s의 속도가 계산되며, 이는 위의 실험값과 오차범위 내에서 일치한다.

4.2. 알루미늄 시편의 측정 결과

Fig. 6은 150 nm 두께의 알루미늄 시편으로부터 측정된 열반사율의 변화를 보여준다. 크로姆의 결과와 마찬가지로 $t = 0$ 시점에서 레이저 펄스의 흡수에 의한 열반사도 증가와 더불어 시간이 지남에 따라 열전도에 의한 온도 하강으로 인한 지수함수적 감소 그래프가 관찰된다. 또한, $t = 48$ ps 지점에서 Al/Si 경계면으로부터 반향된 체적중과가 박막의 표면에 도달하는 것이 관찰되며, 식(12)를 이용하여 그 속도를 계산했을 때 6250 ± 78 m/s의 결과를 얻었다. 또한, Table 1에 기재된 물성값을 사용하여 곡선맞춤을 한 결과, $E_{Al} = 65 \pm 5$ GPa의 값을 얻었다.

4.3. 결과 고찰

본 실험법을 사용하여 얻은 결과를 참고문헌에서 보고된 값과 비교하여 Table 2에 기재하였다. 먼저, 크로姆의 경우 영률(Young's modulus)은 일

Table 1 Parameters for the curve-fitting of Cr and Al measurement data[11,12]

	Cr	Al	Si(100)
Density (kg/m ³)	7190	2700	2330
Specific heat (J/kgK)	447	900	700
Thermal conductivity (W/mK)	90	237	148
Young's modulus (GPa)	-	-	130
Poisson's ratio	0.21	0.33	0.25
Coefficient of thermal expansion (μ /K)	4.9	24.0	2.6
Absorptance	3.44	8.57	-
Reflectivity	0.57	0.88	-

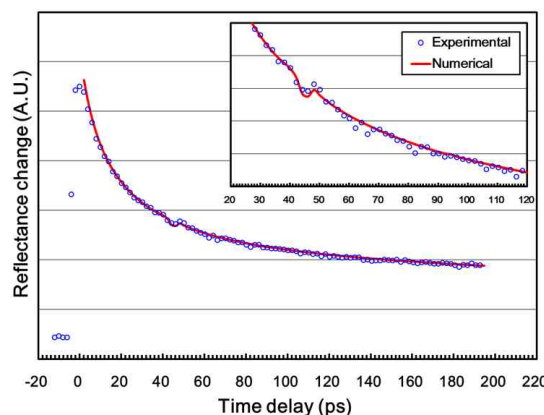


Fig. 6 Thermoreflectance measurement data of the 150-nm Al/Si(100) sample and the best-fit of the numerical solution. The inset shows a zoomed image of the signal.

반적으로 279 GPa 내외의 값을 갖는 것으로 알려졌다[11,12], 증착방법, 두께 및 측정법에 따라 많은 변화를 보인다. Knight 등[13]은 전기도금법을 이용하여 130~144 μ m 두께의 크로姆 코팅을 만들었고, 펄스 레이저와 마이켈슨 간섭계를 이용하여 영률을 측정한 결과 175~211 GPa 범위의 값을 얻었다. Schneider와 Tucker는 1~7 μ m 두께의 코팅에 대하여 thin film analyzer를 이용하여 평가한 결과 185~215 GPa의 측정값을 얻었다[14]. 또한, Nilsson 등[15]은 50~83 nm의 두께를 갖는 크로姆 마이크로 캔틸레버를 제작하여 원자간력 현미경(atomic force microscopy)를 이용한 굽힘시험을 한 결과 37~69 GPa의 값을 얻었는데, 이는 재료의 크기효과에 기인한 것이라고 보고하였다.

Table 2 A comparison of Young's moduli and bulk longitudinal wave velocities of chromium and aluminum films [13-19]

Material	Reference	Thickness [μm]	Fabrication Technique	Characterization technique	Young's modulus [GPa]	Bulk wave velocity [m/s]
Cr	Present study	0.150	E-beam evaporation	Time-domain thermorefectance	260±5	6383±81
	[13]	130	Electrodeposition	Laser ultrasonic	211	6040
		144			175	6419
	[14]	1~7	-	Thin film analyzer	185~215	-
	[15]	0.050~0.083	Thermal evaporation	Force-mediated atomic force microscopy	37~69	-
Al	Present study	0.150	E-beam evaporation	Time-domain thermorefectance	65±5	6250±78
	[16]	0.050~0.400	Direct current magnetron sputtering	Thin film stress tester	59.28~74.14	-
	[17]	0.083	Evaporation	Microelectromechanical (MEMS) actuator test	69	-
	[18]	0.19	Direct current magnetron sputtering	MEMS resonator test	99	-
					102	-
					33	-
					75	-
	0.25			43	-	
[19]	12.7×10 ³	-	Ultrasonic (pulse-echo)	-	6400	

크로뮴의 체적종파 속도와 관련하여 Knight 등 [13]은 6040~6419 m/s의 측정값을 얻었으며, 이는 본 연구결과(6383±81 m/s)와 유사한 정도이다.

알루미늄의 경우, 본 연구로부터 65±5 GPa의 영률과 6250±78 m/s의 체적종파 속도가 측정되었다. 이는 일반적으로 통용되는 값($E_{Al} = 70$ GPa, $v_{bulk} = 6374$ m/s)과 유사한 정도이며, 참고문헌 [16-19]에 보고된 DC 스퍼터링 혹은 진공증착된 박막의 값과 비교했을 때에도 같은 수준임을 알 수 있다. 따라서, 본 연구로부터 확립된 레이저 계측법은 나노재료의 기계적 물성평가에 적합함을 보여주며, 이는 기존의 접촉식·파괴식 검사법의 한계를 뛰어넘을 대안을 제시한다.

5. 결론

본 논문에서는 나노미터의 두께를 갖는 크로뮴 혹은 알루미늄 박막 내에서 체적종파가 전파하는 특성을 연구하였다. 실리콘 기판 위에 150 nm 두께의 박막을 적층하여 시편을 제작하였으며, 시간영역 열반사율 측정법을 이용하여 탄성파를 여

기·검출하였다. 체적종파의 거동을 모사하는 열탄성 방정식을 수치해석적으로 구하여 측정값과 곡선맞춤함으로써 박막의 체적종파 속도와 탄성계수를 평가할 수 있었으며, 결과를 문헌값과 비교하여 타당성을 검증하였다. 본 연구가 제시하는 레이저 비파괴평가법은 나노재료의 특성평가에 적합함을 보여주며, 물성에 기반한 나노소재의 구조적 설계에 일조할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1C1A1A01053635).

References

- [1] K. Chang, Y. Y. Kim, J. Sue, H. Lee, W. Chung, K. Lee, Y. Park, E. Jung and I. Chung, "The novel stress simulation method for contemporary DRAM capacitor arrays,"

- 2013 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, Glasgow, UK, pp. 424-427 (2013)
- [2] Y. Y. Kim, H. A. Alwi, R. Awang and S. Krishnaswamy, "Effects of deposition time duration on thermal diffusivity of hydrogenated amorphous carbon films," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 50, No. 12R, 125602 (2011)
- [3] Y. Y. Kim, H. A. Alwi, R. Awang and S. Krishnaswamy, "Influence of radio frequency power on thermal diffusivity of plasma enhanced chemical vapor deposition-grown hydrogenated amorphous carbon thin-films," *Journal of Applied Physics*, Vol. 109, No. 11, 113503 (2011)
- [4] H. Lee and J. H. Lee, "Evaluation of material characteristics by micro/nano indentation tests," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 32, No. 32, pp. 805-816 (2008)
- [5] D. J. Lee, Y. Cho, K. W. Jang, S. H. Cho and B. Y. Ahn, "Measurement of elastic constants of thin metallic foil by guided wave dispersion characteristics," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 1, pp. 1-46 (2012)
- [6] C. A. Paddock and G. L. Eesley, "Transient thermoreflectance from thin metal films," *Journal of Applied Physics*, Vol. 60, No. 1, pp. 285-290 (1986)
- [7] D. G. Cahill, W. K. Ford, K. E. Goodson, G. D. Mahan, A. Majumdar, H. J. Maris, R. Merlin and S. R. Phillpot, "Nanoscale thermal transport," *Applied Physics Reviews*, Vol. 93, No. 2, pp. 793-818 (2003)
- [8] G. A. Antonelli, B. Perrin, B. C. Daly and D. G. Cahill, "Characterization of mechanical and thermal properties using ultrafast optical metrology," *MRS Bulletin*, Vol. 31, No. 8, pp. 607-613 (2016)
- [9] Y. Y. Kim and S. Krishnaswamy, "Non-destructive evaluation of material properties of nanoscale thin-films using ultrafast optical pump-probe methods," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 2, pp. 115-121 (2012)
- [10] J. D. Anderson, "Computational Fluid Dynamics," McGraw-Hill, Singapore (1995)
- [11] D. E. Gray, "American Institute of Physics Handbook," McGraw-Hill, New York (1982)
- [12] G. Simmons and H. Wang, "Single Crystal Elastic Constants and Calculated Aggregate Properties: A Handbook," MIT Press, Cambridge (1971)
- [13] B. Knight, J. Braunstein, J. F. Cox and J. Frankel, "Laser-ultrasonic characterization of electrodeposited chromium coatings," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 18, pp. 365-372 (1999)
- [14] D. Schneider and M. D. Tucker, "Non-destructive characterization and evaluation of thin films by laser-induced ultrasonic surface waves," *Thin Solid Films*, Vol. 290-291, pp. 305-311 (1996)
- [15] S. G. Nilsson, X. Borrise and L. Montelius, "Size effect on Young's modulus of thin chromium cantilevers," *Applied Physics Letters*, Vol. 85, No. 16, 3555 (2004)
- [16] M. Chinmulgund, R. B. Inturi and J. A. Barnard, "Effect of Ar gas pressure on growth, structure, and mechanical properties of sputtered Ti, Al, TiAl, and Ti₃Al films," *Thin Solid Films*, Vol. 270, No. 1-2, pp. 260-263 (1995)
- [17] B. Rashidian and M. G. Allen, "Electro-thermal microactuators based on dielectric loss heating," *IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems*, Fort Lauderdale, Florida, USA, pp. 24-29 (1993)
- [18] A. Reddy, H. Kahn and A. H. Heuer, "A MEMS-based evaluation of the mechanical properties of metallic thin films," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 16, No. 3, pp. 650-658 (2007)
- [19] Y. H. Kim, J. K. Lee, and H. C. Kim, "Observation of shear wave modes in the echoes of the longitudinal wave transducer," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 15, pp. 987-994 (1996)