

표면파의 분산 특성을 이용한 Ni 박막의 두께 측정

Thickness Measurement of Ni Thin Film Using Dispersion Characteristics of a Surface Acoustic Wave

박태성*, 곽동열**, 박익근**†, 김미소***, 이승석***

Tae-Sung Park*, Dong-Ryul Kwak**, Ik-Keun Park**†, Miso Kim*** and Seung-Seok Lee***

초 록 본 연구에서는 박막 표면을 따라 전파하는 표면파의 속도 분산성을 이용하여 박막의 두께를 비파괴적으로 측정할 수 있는 기법을 제안하였다. 표면파의 분산성을 이용하여 박막의 두께를 측정하기 위하여 전자빔증착법(E-beam evaporation)을 이용하여 Si(100) 웨이퍼 위에 니켈의 증착시간을 제어함으로써 두께가 다른 니켈 박막시편편을 제작하였다. 제작된 시편편의 실제 증착된 박막의 두께를 확인하기 위하여 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 박막의 단면사진을 촬영하여 두께를 확인하였다. 그 후에 두께가 다른 시편편에서의 표면파의 속도를 초음파현미경(scanning acoustic microscope)의 V(z) 곡선법을 이용하여 표면파의 속도를 측정하고 실제 측정된 두께와 표면파 속도와의 상관성을 확인하였다. 박막의 두께가 증가함에 따라 표면파의 속도는 감소하는 경향성을 나타내었다. 결론적으로 본 연구에서 제안한 표면파의 속도 분산성을 이용하여 나노 스케일 니켈 박막의 두께를 측정하는 기법이 가능성이 있음을 확인하였다.

주요용어: 초음파현미경, V(z) 곡선, 분산 특성, 표면파 속도, 박막 두께

Abstract In this study, we suggest a method to measure the thickness of thin films nondestructively using the dispersion characteristics of a surface acoustic wave propagating along the thin film surface. To measure the thickness of thin films, we deposited thin films with different thicknesses on a Si (100) wafer substrate by controlling the deposit time using the E-beam evaporation method. The thickness of the thin films was measured using a scanning electron microscope. Subsequently, the surface wave velocity of the thin films with different thicknesses was measured using the V(z) curve method of scanning acoustic microscopy. The correlation between the measured thickness and surface acoustic wave velocity was verified. The wave velocity of the film decreased as the film thickness increased. Therefore, thin film thickness can be determined by measuring the dispersion characteristics of the surface acoustic wave velocity.

Keywords: Scanning Acoustic Microscopy, V(z) Curve, Dispersion, Surface Wave Velocity, Thin Film Thickness

1. 서 론

나노기술은 원자나 분자 정도의 작은 크기 단 위에서 물질을 합성하고, 조립, 제어하며 혹은 그 성질을 측정, 규명하는 기술을 말한다. 나노기술은 21세기의 새로운 산업을 주도할 핵심기술로 경제 성장을 이끌며 기존 기술의 한계를 극복할 돌파기술로서 필요성이 증대되고 있다. 이러한

이유로 나노기술은 바이오, 화학, 에너지, 반도체, 자동차, 태양전지, 정보통신, 디스플레이(유연기판) 등 다양한 산업분야에 걸쳐 적용되고 있으며 나노기술과 새로운 산업에 대한 기대는 날로 확산 증가되고 있는 실정이다[1-4].

일반적으로 나노기술은 여러 가지 유전체 박막, 반도체 박막, 금속박막을 선택적으로 반도체 기판 또는 유리 위에 형성시키는 과정을 거치게

[접수일: 2014. 3. 31, 수정일: 2014. 4. 17, 게재확정일: 2014. 4. 17] *한양대학교, **서울과학기술대학교, ***한국표준과학연구원 †Corresponding Author: Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea (E-mail: ikpark@seoultech.ac.kr)

된다. 즉, 박막 고유의 전기적, 화학적, 특성을 이용하거나, 반도체의 전기적인 특성을 바꾸기 위해 확산이나 이온 주입 공정으로 원하는 특성의 소자를 제조하는 일련의 과정이다. 이들 박막을 특정한 용도로 응용하기 위해서는 박막의 두께, 조성, 조도, 그리고 다른 물리적·광학적인 특성을 정밀하게 측정할 필요가 있다. 또한 최근에는 이러한 박막들이 점점 더 고집적화 되어감에 따라 박막의 특성에 큰 영향을 미치는 인자인 박막의 두께를 포함한 막의 물성을 좀 더 정확하게 제어하고 측정해야 할 필요성이 증가하고 있다.

현재 금속박막의 두께를 측정하는 대표적인 방법으로는 α -step 또는 원자력간현미경(atomic force microscope; AFM)과 같은 표면 profilometer를 이용하거나, 고분해능 주사전자현미경 (scanning electron microscope; SEM)을 이용하는 방법이 있다. 표면 profilometer에 의한 두께 측정의 원리는 시편에 절연성의 폴리이미드(polyimide; PI) 테이프를 부착하여 단차(step)를 형성시켜 박막이 있는 부분과 없는 부분의 차이를 측정하는 것이다. 하지만 이러한 방법들은 단차를 형성하기 어려운 경우나 기관 표면이 평평하지 않은 경우에는 측정이 어렵다는 단점이 있다. SEM을 이용한 방법은 박막을 기관 위에 증착한 후, 시편을 절단하여 단면을 관찰하여 두께를 측정한다. SEM을 이용한 방법은 박막의 두께 측정에 대한 오차가 작지만, 연성이 좋은 박막시편을 절단할 경우, 기지와 막 사이의 경계가 명확하지 않거나 박막의 두께가 매우 얇거나 박막이 형성되어 있는 기관의 표면이 매끄럽지 않을 경우에는 두께를 정밀하게 측정하기는 매우 어렵다[6]. 따라서 본 연구에서는 기존의 기법들의 문제점을 보완·해결하기 위한 기법으로 초음파현미경을 이용하여 표면파를 속도를 측정함으로써 박막의 두께를 비파괴적으로 측정할 수 있는 기법을 제안하고자 한다.

2. 관련 이론

이론적으로 $V(z)$ 곡선은 정반사성 음파 (specularly reflected acoustic waves)와 누설표면파 (leaky surface acoustic wave)의 간섭에 의해 설명될 수 있다. Fig. 1에서와 같이 만약 음향렌즈의 반구경각(half aperture angle)이 표면파를 발생시

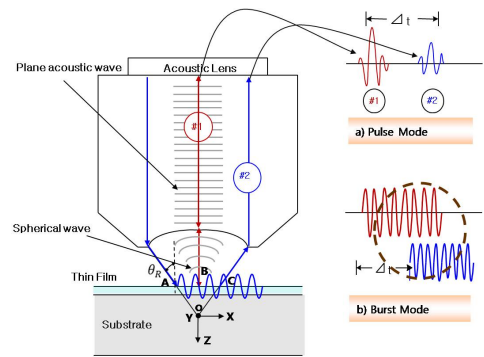


Fig. 1 Schematic diagram showing the principle of the $V(z)$ curve

키기 위한 임계각보다 클 경우 누설표면파(leaky surface wave)는 접촉매질과 시험편의 계면에서 발생된다. 이 때 표면파는 시험편 표면을 따라 전파하고(경로 #2) 임계각에서 접촉매질로 에너지를 방사한다. 이 때 사용되는 모드가 버스트 모드(burst mode)일 경우 누설표면파는 정반사성 음파(경로 #1)와 서로 간섭을 일으키게 되고 이러한 간섭이 음향렌즈와 시험편 간의 거리에 따라 전압이 주기적으로 변화하는 그래프를 형성하게 된다. 이러한 현상에 의해 발생하는 전압 변화의 그래프를 $V(z)$ 곡선이라고 한다. 즉, 탐촉자가 음향렌즈 쪽으로 이동하면서 전압은 변화하게 되고 이 전압의 변화는 주기적인 특성을 가지게 된다. 이 주기성을 가지는 전압의 그래프에서 피크와 피크 또는 골과 골 사이의 간격을 측정함으로써 표면파의 속도를 측정할 수 있다.

$V(z)$ 곡선으로부터 표면파의 속도를 계산하기 위한 위해 다양한 모델들이 적용되어 왔다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 표면파의 속도를 계산하기 위해 Ray모델을 사용하였다. Ray 모델에서 만약 샘플과 렌즈 사이의 거리가 z 라고 할 때 경로 #1과 #2의 위상지연은 다음과 같이 표현될 수 있다[7,8].

$$\begin{aligned} \delta_{\#1}(z) &= -2\overline{BO} \cdot k_{\omega} = -2 \cdot z \cdot k_{\omega} \\ \delta_{\#2}(z) &= \overline{AOC} \cdot k_{\omega} + \overline{AC} \cdot k_{sample} \end{aligned} \tag{1}$$

식(1)로부터 두 경로의 상대적인 위상차는 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta z = \delta_{\#2}(z) - \delta_{\#1}(z)$$

$$\Delta z = 2z \cdot \left[k_w \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos\theta_R} \right) + k_R \cdot \tan\theta_R \right] \quad (2)$$

여기서 k_w 와 k_R 은 파수이며, 식(2)를 파수와 스텔의 법칙을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta z = \frac{\nu_w}{2 \cdot f \cdot (1 - \cos\theta_R)} \quad (3)$$

식(3)을 누설탄성파의 식으로 정리하면 식(4)와 같다. 따라서 시험체에서 얻어진 $V(z)$ 곡선으로부터 Δz 를 측정함으로써 누설탄성표면파의 속도를 계산할 수 있다.

$$V_R = \frac{\nu_w}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{\nu_w}{2 \cdot f \cdot \Delta z} \right)^2}} \quad (4)$$

3. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 박막 두께에 따른 표면파의 속도의 변화를 측정하여 박막 두께에 따른 표면파의 분산 특성을 확인하고자 하였다. 두께가 다른 박막시험편을 제작하기 위하여 대면적 증착이 가능하고, 증착 속도 조절이 용이하며 기판의 온도를 넓은 범위에 걸쳐 조절할 수 있어 결합력이 강한 산화물 등 거의 모든 재료에서 사용이 가능할 뿐만 아니라 기판과의 뛰어난 결합력과 증착물이 매우 높은 순도를 가진 박막을 얻을 수 있는 전자빔증착법(E-beam evaporation)을 이용하여 박막을 증착하였다[9-11]. 증착을 위한 기판은 직경이 6 inch인 Si 웨이퍼를 사용하였으며 증착 전에 알코올, 아세톤, 증류수 순으로 초음파세척을 행한 후, 질소가스로 표면을 완전히 건조시켜 사용하였다. 세척된 Si 웨이퍼 위에 Ni 박막을 각각 100, 200, 400, 600, 800, 1000 nm 두께로 증착될 수 있도록 예비 시험편을 만들어 증착물을 계산하여 시간을 제어하여 시험편을 제작하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 초음파현미경(Olympus; UH3)으로 400 MHz의 작동 주파수를 가지는 탐촉자가 사용되었으며 산화아연(Zinc Oxide)의 렌즈가 사용되었다. 이 때 렌즈의 직경

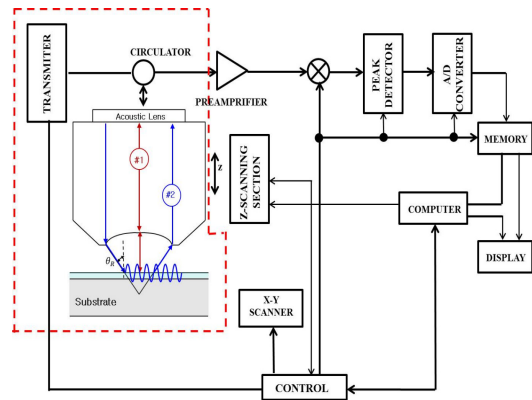


Fig. 2 Schematic diagram of scanning acoustic microscopy

은 383 μm , 구경각은 120°, 그리고 포커싱 거리는 577.52 μm 이다. 그리고 접촉매질로는 탈염수(deionized water)가 사용되었다. 초음파의 속도는 매질에서의 온도에 따라 영향을 받을 수 있다. 따라서 매질에서 온도에 따른 표면파의 속도 변화를 최소화하기 위하여 샘플 스테이지에 히터를 장착하여 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 온도를 21.5°C로 일정하게 유지할 수 있도록 하여 실험하였다.

4. 결과 및 고찰

앞서 언급한 바와 같이 표면파의 속도는 박막의 두께에 따라 속도의 분산성을 가지게 된다. 따라서 두께에 따른 속도 분산성을 규명하기 위해서는 단면의 두께를 정확하게 측정하여야 한다. Fig. 3은 박막의 두께를 측정하기 위하여 주사전자현미경을 이용하여 단면의 이미지를 측정하고 니켈 박막의 두께를 측정하였다. 측정 오차를 줄이기 위하여 각 시험편에 대한 3포인트 씩 두께를 측정하고 평균값을 사용하였다. Table 1은 각각의 시험편에서 측정된 두께를 나타내고 있다. 시험편 #1, 2, 3, 5, 6에서는 증착물을 제어하여 예상된 두께에 근접하게 니켈 박막이 증착된 것을 확인할 수 있다. 반면에 시험편 #4에서는 600 nm 정도로 증착 두께를 예상하였으나 실제 측정된 두께는 300 nm 정도로 두께가 측정되었다. 두께가 측정된 시험편은 초음파현미경을 이용하여 $V(z)$ 곡선을 획득하고 Δz 를 측정하여

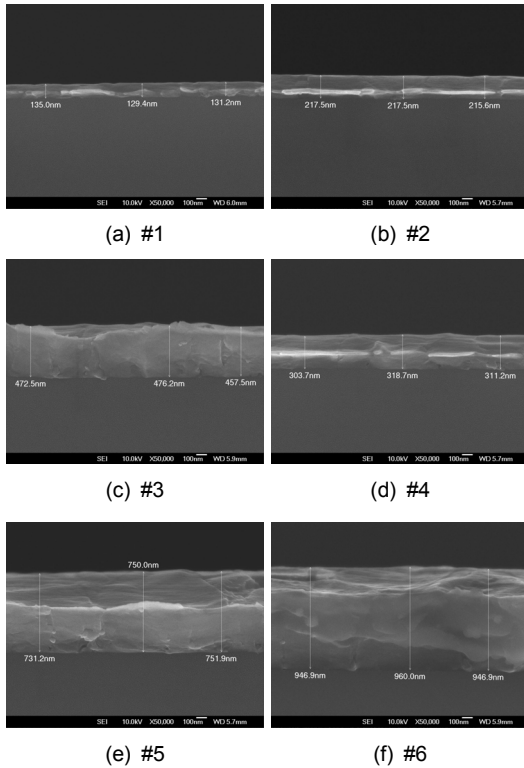


Fig. 3 Cross sectional image by SEM

Table 1 Measured thickness of nickel films

unit : [nm]

No	#1	#2	#3	#4	#5	#6
P1	135.0	217.5	472.5	303.7	731.2	946.9
P2	129.4	217.5	476.2	318.7	750.0	960.0
P3	131.2	215.6	457.5	311.2	751.9	946.9
Mean Value	131.8	216.8	468.7	311.2	744.3	951.2

Table 2 SAW velocity in thin film system

unit : [m/s]

Sample No.	#1	#2	#3	#4	#5	#6
P1	4,772	4,619	4,325	4,476	4,315	4,661
P2	4,805	4,632	4,295	4,523	4,295	4,116
P3	4,763	4,607	4,325	4,476	4,285	4,107
P4	4,777	4,607	4,315	4,454	4,179	3,942
P5	4,791	4,607	4,315	4,454	4,161	3,935
P6	4,777	4,595	4,285	4,465	4,143	3,912
Mean Value	4,782	4,611	4,310	4,475	4,230	4,021

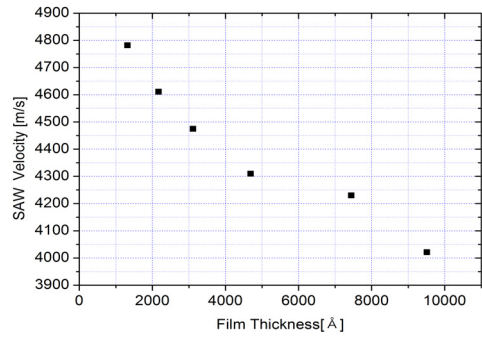


Fig. 4 The change of the surface wave velocity in accordance with film thickness

식(4)를 이용하여 속도를 계산하였다. 각각의 시험편에서는 측정 오차를 줄이기 위해 한 시험편에서 센서를 이동하면서 6포인트씩 표면과의 속도를 측정하였다. Table 2는 각 시험편에서 측정된 표면과의 속도를 나타내고 있다. 두께가 증가함에 따라 속도가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 박막의 두께 변화에 따라 표면파가 속도 분산성 때문에 감소하는 것으로 생각된다. 시험편 #4에서는 실제 두께가 600 nm 정도였으나 공정상의 오류로 인해 약 300 nm 정도로 증착이 되었으며, 표면과의 속도 결과에서도 표면과의 속도가 4475 m/s로서 시험편 #2와 시험편 #3번의 속도 사이 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 실제 측정된 두께에 따른 속도의 변화를 나타내었다. 그림에서와 같이 두께가 증가함에 따라 속도가 명확하게 분산성을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 나노 스케일의 박막 두께를 표면과의 속도 분산성을 이용하여 비파괴적으로 측정할 수 있는 기법을 제안하였다. 박막 두께에 따른 속도 분산성을 확인하기 위하여 Si(100) 웨이퍼 위에 전자빔증착법을 이용하여 다양한 두께를 가지는 니켈 박막을 증착시간을 제어하여 증착하였다. 실제 증착된 박막의 두께를 측정하기 위하여 주사전자현미경을 이용하여 단면을 측정하여 두께를 측정하였다. 다양한 두께로 증착된 시험편에서의 두께에 따른 속도 분산성을 확인하

기 위하여 초음파현미경의 $V(z)$ 곡선법을 이용하여 표면파의 속도를 측정하고 실제 측정된 두께와 표면파의 속도와 상관성을 확인하였다. 박막의 두께가 증가함에 따라 표면파의 속도 분산성으로 인해 속도가 감소하는 경향을 나타내었다. 결론적으로 본 연구에서 제안한 표면파의 속도 분산성을 이용하여 나노 스케일 박막의 두께를 측정하는 기법의 가능성을 확인하였다. 이는 향후 이론적인 분산선도와의 비교-검증을 통해 정량화된 기법으로 활용 가능할 것으로 생각된다. 또한 좀 더 다양한 재료 및 두께에 시험 자료를 데이터베이스화 함으로써 실제 사용되는 박막의 두께에 대한 정량적 데이터로 활용 가능할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2013M2A2A9043274), (2013R1A2A2A05005713), (2013R1A6A3A01021545)

참고문헌

- [1] H. S. Ju and B. R. Tittmann, "Recent advances in scanning acoustic microscopy for adhesion evaluation of thin films," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 6, pp. 534-549 (2009)
- [2] C. S. Kim and I. K. Park "Review of micro/nano nondestructive evaluation technique(I): surface and subsurface investigation," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 2, pp. 198-209 (2012)
- [3] C. S. Kim and I. K. Park "Review of micro/nano nondestructive evaluation technique(II): measurement of acoustic properties," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 4, pp. 418-439 (2012)
- [4] V. Natarajan, "Micro and nano science and technology: naval perspective," *Science Spectrum, Defence Research & Development Organization*, pp. 237-244 (2009)
- [5] A. Bonaccorsi and Grid Thoma, "Institutional complementarity and inventive performance in nano science and technology," *Research Policy*, Vol. 36, pp. 813-831 (2007)
- [6] J. J. Yun and W. J. Lee, "Determination of thin film thickness by EDS analysis and its modeling," *Journal of The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, Vol. 25, No. 8, pp 647-650 (2011)
- [7] R. D. Weglein, "A model for predicting acoustic materials signatures," *Applied Physics Letter*, Vol. 34, No, pp. 179-181 (1978)
- [8] M. Duquennoy, M. Ourak, W. M. Xu, B. Nongailard and M. Ouafouh, "Observation of $V(z)$ curves with multiple echoes," *NDT&E International*, Vol. 28, No. 3, pp. 147-153 (1995)
- [9] C. H. Lee, S. I. Kim and H. S. Shin, "A study on the characteristics of MgO thin film prepared by electron beam," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 39, No. 12, pp. 1117-1176 (2002)
- [10] K. Machida, H. Uchiike and H. Sasaki, "Surface analysis comparison of vacuum evaporation and thick-film printed MgO films in ac plasma displays," *The Society for Information Display Symposium*, 531 (1992)
- [11] H. Uchiike and S. Harada, "Annealing process of evaporated MgO films in ac plasma display," *The Society for Information Display Symposium*, 444 (1991)