

초음파현미경을 이용한 나노 구조 박막 시스템의 비파괴평가

Nondestructive Evaluation of Nanostructured Thin Film System Using Scanning Acoustic Microscopy

Chiaki Miyasaka*, 박익근**[†], 박태성**

Chiaki Miyasaka*, Ik Keun Park[†]** and Tae Sung Park**

초록 최근 재료, 생물의학(biomedicine), 음향, 전자 등 다양한 분야에서 나노 구조를 갖는 박막 기술이 도입되면서 박막 계면의 수명과 내구성 확보를 위한 초고주파수의 초음파현미경을 이용한 정량적인 비파괴적 접합평가에 관한 연구가 큰 이슈가 되고 있다. 본 연구에서는 초음파의 집속, 누설탄성표면파의 발생과 $V(z)$ 곡선의 시뮬레이션 그리고 초고주파수 음향 이미징 기법을 이용하여 나노 스케일 구조를 갖는 박막 시험편의 접합계면을 평가하였다. $V(z)$ 곡선의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 접합계면에 존재하는 미세 결함(다라미네이션 등)의 검출 감도를 추정할 수 있었으며, 1 GHz의 초고주파수 디포커싱 모드로 박막 시험편의 접합계면에 존재하는 나노 스케일의 미세 결함을 음향 이미지로 가시화 할 수 있어 나노 구조를 갖는 박막의 접합계면의 비파괴평가에 초음파현미경이 매우 유용함을 알 수 있었다.

주요어: 초음파현미경, 나노구조 박막, 접합평가, $V(z)$ 곡선, 누설탄성표면파

Abstract In recent years, as nano scale structured thin film technology has emerged in various fields such as the materials, biomedical and acoustic sciences, the quantitative nondestructive adhesion evaluation of thin film interfaces using ultra high frequency scanning acoustic microscopy(SAM) has become an important issue in terms of the longevity and durability of thin film devices. In this study, an effective technique for investigating the interfaces of nano scale structured thin film systems is described, based on the focusing of ultrasonic waves, the generation of leaky surface acoustic waves(LSAWs), $V(z)$ curve simulation and ultra high frequency acoustical imaging. Computer simulations of the $V(z)$ curve were performed to estimate the sensitivity of detection of micro flaws(i.e., delamination) in a thin film system. Finally, experiments were conducted to confirm that a SAM system operating at a frequency of 1 GHz can be useful to visualize the micro flaws in nano structured thin film systems.

Keywords: Scanning Acoustic Microscopy(SAM), Nanostructured Thin Film, Adhesion Evaluation, Leaky Surface Acoustic Wave(LSAW), $V(z)$ Curve

1. 서론

최근 재료과학과 기술이 급속도로 발달하고 고 품질을 위한 요구사항이 점차 증가해 가고 있다. 이것은 나노 3D산업 및 항공우주 산업 분야에서의 요구가 더욱 그러하며, 특히 나노 구조

(nanostructured)를 갖는 박막 기술이 도입되면서 박막 계면의 수명과 내구성에 관련된 문제가 큰 이슈가 되고 있다. 박막(thin film)기술은 벌크재료에서 기대할 수 없는 높은 품질과 독특한 특성 때문에 재료, 생물의학(biomedical), 음향, 전자 등 압전 액츄에이터나 전자음향탐촉자로 구성된

MEMS 분야에서 널리 사용되고 있다[1]. 박막은 표면의 기능을 변화시켜 기판(substrate) 표면의 특성을 강화시킨 것으로 금속 도금, 광학 반사방지(optical anti-reflective) 코팅, 마찰과 마모에 대한 기계적인 저항, 부식이나 침식에 대한 화학적인 박막 등을 들 수 있다[2,3].

일반적으로 수명평가를 위한 재료의 특성을 평가하기 위해서는 품질 및 안전성 분석 자료가 수집된다. 이들 재료에 대한 평가는 대부분 설계단계에서 이루어지는 현미경분석 및 나노 인텐테이션법을 이용한 파괴적인 평가가 주이다. 기존의 높은 정밀도를 갖는 인장, 굽힘, 피로 등의 거시적이고 파괴적인 평가법을 직접적으로 마이크로/나노화되어가는 부품과 소재에 응용하는 것은 불가능하므로 최근에는 공기 중에서 나노 수준의 분해능을 갖고 표면을 관찰할 수 있는 원자현미경(atomic force microscopy; AFM)이 나노 및 박막기술에 큰 기여를 하고 있다[4,5]. 최근에는 표면분석을 위한 표면 이미지(topography) 관찰 외에 표층부에서의 나노 스케일 공간분해능(spatial resolution)의 정밀도 높은 기계적 물성 평가가 가능할 것으로 기대되는 초음파원자현미경(ultrasonic AFM; UAFM) 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[6-9].

이 초음파원자현미경 기술 역시 내부에 존재하게 되는 기공, 층간분리, 미접합면과 같은 나노스케일 구조의 박막 시험편(예를 들면 전기화학적/비전착성 금속식출(electrolessly)로 증착된 금속 박막)을 평가하는 것은 한계가 있다. 즉 표면 분석을 위해 고안된 이들 현미경을 나노구조 박막 시험편의 접합계면 등에 직접 적용하여 신뢰성이 있는 데이터를 확보하는 것은 어렵다는 것이다. 또한 다층의 나노 구조로 존재하는 시험편을 자르거나 제거하여 내부에 위치한 결함을 검출하려할 때 결함의 형상이 달라질 수 있고, 모든 결함이 검출된다는 보장이 없으며, 단단한 시험편은 층을 자르거나 제거하기 어렵고, 결함의 크기가 $1\ \mu\text{m}$ 이하이면 층을 제거하여 3차원 분포를 기본적으로 보기 어렵다는 문제를 안고 있다.

따라서 이러한 나노 스케일의 박막 시험편의 내부 구조를 시각화하고 특징을 추출하는 데 초음파의 기본 성질(예를 들어 반사, 투과, 굴절, 회절 등)을 활용하는 몇 가지의 비파괴적인 평가법이 제안되어 시도되고 있다. 그 중 한 가지는 "피코 초음파(picosecond acoustics)"[10,11]로 알려진 레

이저-초음파(laser-based ultrasonic) 기법으로 초음파의 파장이 대략 5에서 $500\ \text{nm}$ 범위에 해당되는 $10\ \text{GHz}$ 에서 $1\ \text{THz}$ 까지의 주파수 범위를 갖는 초음파를 발생하고 검출한다. 내부의 접합계면에서 반사되어 검출되는 초음파 에코는 접합 상태, 음속, 박막두께, 초음파 감쇠와 초고속 초음파 발생 메커니즘의 상세한 정보를 제공해 줄 것으로 기대하고 있으나 아직 만족할 만한 내부 구조의 높은 이미지 분해능을 제공하지 못하고 있다.

또 한 가지는 재료의 표층부(surface/subsurface), 내부(internal) 그리고 접합계면(interface)을 포함하는 미소 영역에서의 역학 특성 평가법으로 표면 근방의 미세한 탄성적 성질 변화를 초음파신호의 출력변화로 검출하여 "현미경"과 같은 음향 이미지를 얻고, 또한 고정밀도로 음속이나 감쇠계수와 같은 음향 특성을 정량적으로 측정해서 재료의 물성평가, 음향이방성, 쌍정 변형, 가공변질층, 박막의 두께 측정, 표층부의 잔류응력측정 등에 응용되고 있는 초고주파수를 이용하는 초음파현미경(scanning acoustic microscopy; SAM) 기법이다[12-16].

본 연구에서는 초음파현미경에서 $V(z)$ 곡선의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 접합계면에 존재하는 미세 결함(박리 등)의 검출 감도를 추정하고, $1\ \text{GHz}$ 의 초고주파수 초음파현미경 기법을 적용하여 나노 스케일 구조의 박막 시험편의 접합계면에 내재하는 미세결함을 음향 이미지로 가시화하여 평가하고자 한다.

2. 초고주파수 초음파현미경

2.1. 이미지 메커니즘

탐촉자의 음향렌즈를 구형으로 하여 초음파빔을 집속시켜 시험편에 조사하면 시험편의 표면과 내부의 재료 특성에 따라서 반사파와 투과파가 발생한다. 이 파들의 변화를 측정하여 화상으로 나타낸 것이 초음파현미경이다. Fig. 1은 초고주파수를 이용한 초음파현미경의 개략도를 나타내고 있으며, 이 시스템은 펄스파 대신에 톤버스트(tone-burst)파가 사용이 되고, 초음파의 파장은 Table 1에서와 같이 사용 주파수 범위 내의 물에서의 경우 대략 $15.0\ \mu\text{m}$ 에서 $1.5\ \mu\text{m}$ 정도이다. 이 시스템은 초음파를 시험체에 입사시켜 재료의 탄성 특성의 변화와 재료의 미세구조에 대한 이미지를 얻을 수 있다.

Table 1 Wavelength in water at various frequencies

| | | | | | | |
|------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Freq. (GHz) | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 |
| Wavelength (μm) | 15.0 | 7.5 | 3.7 | 2.5 | 1.8 | 1.5 |

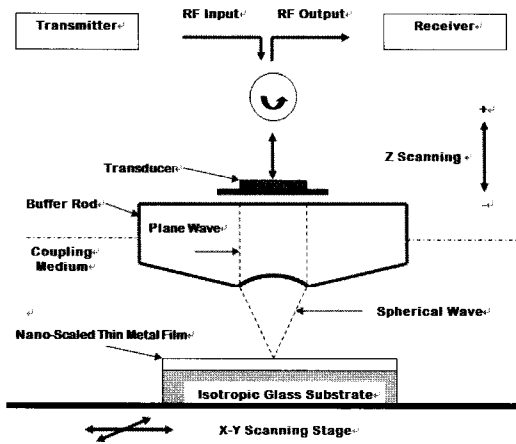


Fig. 1 Schematic diagram of a mechanical ultra high frequency scanning acoustic microscopy

즉 초음파는 물체의 표면뿐만 아니라 내부로도 입사되기 때문에 내부에 대한 정보를 이미지화 할 수 있다. 초음파 빔은($10^6 \mu\text{m}$ 크기 이하까지) 집속되고 또한 초고주파(100 MHz에서 3 GHz)를 사용하기 때문에 광학현미경 수준의 분해능을 가지게 된다. 이미지 이외에도 반사된 초음파의 진폭과 위상을 검출할 수 있고 이를 분석하면 재료의 탄성 특성을 정량적으로 측정할 수 있다.

또한 초음파 렌즈는 표면직하를 이미지화할 수 있도록 시편과 렌즈 사이의 거리를 정밀하게 이동할 수 있다. 시편의 표면을 이미지화할 때에는 초음파 렌즈가 시편 표면에 집속되게 하는 포커스 모드(focus mode, $z = 0 \mu\text{m}$)가 사용되며, 시편의 표면직하를 이미지화 할 때에는 탐촉자를 시편에 근접시켜 초점이 시편의 내부에 형성되도록 하여 이미지를 검출하는 디포커스 모드(de-focus mode, $z = -x \mu\text{m}$)를 사용한다. 이미징 메커니즘에서 중심주파수 f 인 톤버스트 RF 전기신호는 버퍼로드(buffer rod) 내부로 탄성파를 생성하기 위해 ZnO 탐촉자를 가진시켜 초음파를 발생시킨다. 발생한 초음파는 수신기에서 검출되며 이 때의 전기신호의 전압 범위는 300 mV에서 1 V이고 100 MHz에서 1 GHz까지의 주파수 범위로 작동할

때 약 30 dB에서 80 dB 정도 약해지므로 리시버에서 이 정도 증폭해야 한다.

2.2. V(z) 곡선

초음파현미경의 또 한 가지 중요한 특징은 V(z) 곡선 기술이다. 1979년 Weglein 등[17]은 음향 렌즈를 시험편에 디포커싱하였을 때 V(z) 곡선이라 불리는 음향 렌즈의 상부에 부착된 탐촉자의 전압의 변화가 시험편의 탄성 특성과 관련이 있다는 것을 알아냈다. 이 현상을 Parmon 등[18]은 광선추적법(ray tracing), Atalar는 푸리에 광학을 이용하여 모델링한 바 있다[19]. 이 주기적인 변화의 간격은 시험편의 재료 탄성 특성을 포함하며 액체를 통과하여 고체와 액체 사이의 계면을 통과하는 두 경로의 상호작용에 의한 결과이다. 이는 재료의 국소 부위에서 누설탄성표면파(leaky surface acoustic wave; LSAW)의 속도를 정밀하게 측정해 음속에 의한 재료의 특성을 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다[18,19]. Fig. 2에서와 같이 디포커스 모드에서는 렌즈 각도의 범위에서 입사하는 초음파 중 스넬의 법칙(Snell's law)에 의해 제2임계각(2nd critical angle)이 되는 부분에서 누설탄성표면파가 발생하여 메커니즘을 보여주고 있다.

V(z) 곡선은 다음의 식으로 표시된다[20].

$$V(z) = C^{-1} \int_0^{\infty} u^2(r) P^2(r) R\left(\frac{r}{f}\right) \exp\left[i2kz \sqrt{1 - \left(\frac{r}{f}\right)^2}\right] r dr \quad (1)$$

$$C = \int_0^{\infty} u^2(r) P^2(r) r dr \quad (2)$$

$$V(z) = C^{-1} \int_0^{\pi} u^2(\theta) P^2(\theta) R(\theta) \exp(i2kz \cos \theta) \sin \theta \cos \theta d\theta \quad (3)$$

$$C = \int_0^{\theta_c} u^2(\theta) P^2(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta \quad (4)$$

여기서 θ 는 렌즈의 반구경각이다.

$k_z = k \cos \theta$ 일 때, 식 (3)과 식 (4)은 아래와 같이 표현된다.

$$V(z) = C^{-1} \int_k^{k \cos \theta_c} Q^2(k_z) R(k_z) \exp(i2k_z z) dk_z \quad (5)$$

$$C = \int_k^{k \cos \theta_c} Q^2(k_z) dk_z \quad (6)$$

$$Q^2(k_z) = u^2(k_z) P^2(k_z) k_z \quad (7)$$

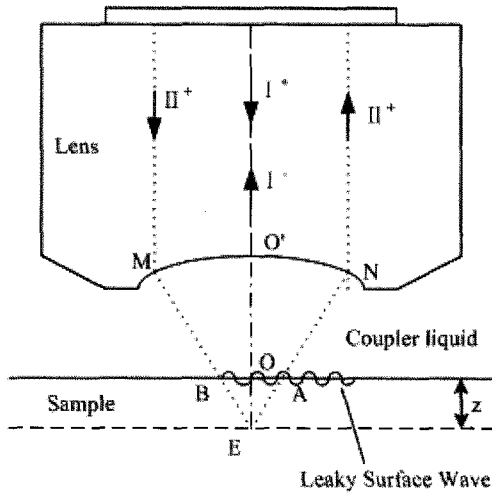


Fig. 2 Cross-sectional geometry of spherical acoustic lens, explaining the mechanism of the $V(z)$ curves

식 (5)로부터 다음의 식이 얻어진다.

$$F^{-1}\{V(z)\} = C^{-1}Q^2(k_z)R(k_z) \quad (8)$$

여기서 $F^{-1}\{ \}$ 는 푸리의 역변환이다.

식 (8)을 이용하여 $R(k_z)$ 의 위상과 진폭의 변화를 측정하여 재료의 특성을 평가하게 된다.

3. 나노 구조 박막 시험편 평가

3.1. $V(z)$ 곡선 시뮬레이션

초음파 이미지의 콘트라스트는 시험편의 반사율 함수에 의존하며 이는 시험편의 구조에 따른 음향 임피던스에 크게 영향을 받고, 시험편의 음향특성(음압 반사율, 감쇠와 음속 등)과 표면상태(표면 거칠기와 균열)는 음향 이미지 형성의 중요한 요소이다. 그러나 나노 스케일 구조를 갖는 박막 시험편은 표면과의 전파와 시험편 내에 존재하는 불연속 부가 콘트라스트의 중요한 요소가 된다. 음향렌즈와 시험편을 변수로 하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며 컴퓨터 시뮬레이션에 사용한 시험편과 음향렌즈(Olympus, model: A11G670)의 파라미터는 Table 1과 Table 2와 같다.

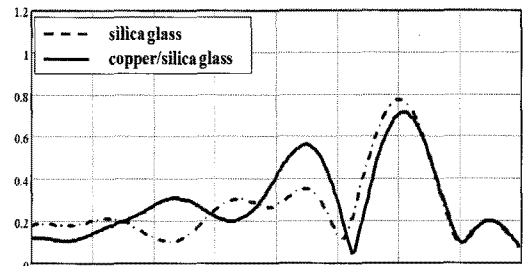
Fig. 3(a)은 1 GHz의 작동주파수의 음향렌즈에 의한 나노 스케일 구조를 갖는 구리(copper) 박막

Table 1 Parameters of acoustic lenses used to the computer simulation

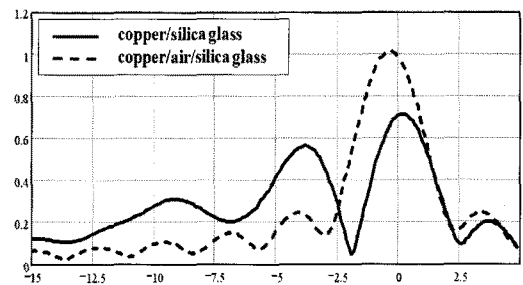
| | |
|--|----------------------|
| Frequency | 1.0 GHz |
| Buffer Rod | Sapphire |
| Radius of the transducer | 216.5 μm |
| Distance from the transducer to the back focal plane | 5033 μm |
| Focal distance | 144.38 μm |
| Aperture Angle | 120° |

Table 2 Parameters of the specimen used to the computer simulation

| | |
|---------------------------|--------------|
| Film | |
| Material | copper |
| Thickness of Film | 120 nm |
| Substrate | Silica Glass |
| Type of Defect | Delamination |
| Thickness of delamination | 1.0 nm |



(a)



(b)

Fig. 3 Calculated $V(z)$ curves in accordance with the acoustic lenses, operating frequencies at 1 GHz (a) for the nano-scaled thin film system wherein the material of the film is copper, thickness of the film is 120 nm, and the substrate is silica glass. (b) for the nano-scaled thin film system having the delamination (i.e., defective system) at the interface between the film and the silica glass substrate

시험편에서의 $V(z)$ 곡선의 감도(sensitivity)를 나타낸다. 여기서 박막의 두께는 120 nm, 기지는 실리카 글라스(silica glass)이다. 실선은 기지에 박막이 증착된 시험편에서의 $V(z)$ 곡선에서 나타내며, 점선은 실리카 글라스의 경우를 나타내고 있다. 그리고 Fig. 3(b)은 (a)의 경우와 대체로 같은 조건이나 박막과 실리카 글라스 계면에 박리가 내재한 경우이다. $V(z)$ 곡선에서 실선은 미세결함(박리)이 없는 경우이며, 점선은 박막 계면에 디라미네이션이 내재하는 경우이다. 이 $V(z)$ 곡선 감도의 시뮬레이션 결과로부터 박리가 있는 경우가 높은 인텐시티의 감도 차를 나타내고 있어 접합계면에 존재하는 미세결함의 검출에 유용함을 알 수 있다. 따라서 초음파현미경의 음향 이미지로 식별할 수 없는 정도의 접합계면의 미세결함도 $V(z)$ 곡선을 이용하면 높은 감도 차로 평가가 가능할 것으로 생각된다.

Fig. 4는 1 GHz의 작동주파수의 음향렌즈로 박막은 은(silver, longitudinal wave velocity: 5,900 m/s, shear wave velocity: 3,750 m/s, density: 2.2 g/cm)을 사용하였으며, 박막의 두께는 50 nm, 기지는 실리카 글라스(longitudinal wave velocity: 3,600 m/s, shear wave velocity: 1,600 m/s, density: 10.6 g/cm)인 나노 스케일 구조를 갖는 박막 시험편에서의 $V(z)$ 곡선의 감도(sensitivity)를 시뮬레이션 한 결과이다. $V(z)$ 곡선에서 실선은 은 박막 시험편, 점선은 실리카 글라스를 나타내고 있다. 박막의 두께가 50 nm 까지 $V(z)$ 곡선의 검출 감도의 차가 얻어짐을 알 수 있다.

3.2. 음향 이미지 평가

Fig. 5는 나노 구조의 은(silver) 박막 시험편의 표면 결함의 광학이미지를 나타내고 있다. 이 결함은 나노인덴테이션 시스템(Hysitron nano-indentation system, software; triboscope 3.5A, triboscope nano-mechanical test instrument with auto probe M5)으로 두 군데에 서로 다른 impact force(924.19 μN , 393.23 μN)로 표면 결함을 형성시킨 것이다. 그러나 393.23 μN 의 Impact Force로 표면에 아주 미세하게 형성한 나노인덴테이션 결함은 확인이 안되고 있다. 여기서 박막은 은이며 박막의 두께는 50 nm, 그리고 기지는 실리카 글라스를 사용하였으며 50배 대물렌즈(Olympus, model: UMPLANFL

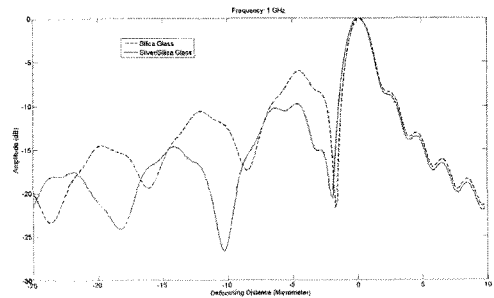


Fig. 4 $V(z)$ curve simulation for nano-scaled thin film system operating frequency at 1 GHz wherein the material of the film is silver, thickness of the film is 50 nm, and the substrate is silica glass

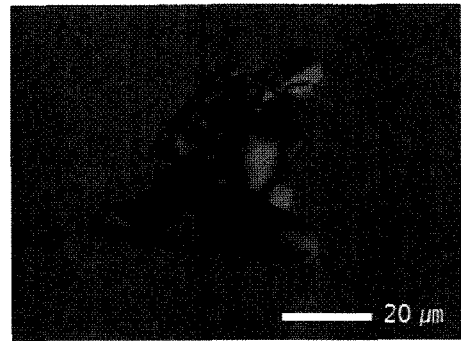


Fig. 5 Optical image, 50X objective lens is used to form the image

50X)를 부착한 광학현미경(Olympus, model: BX61)을 사용하여 이미지를 얻었다.

Fig. 6은 1 GHz의 작동주파수의 음향렌즈를 갖는 초음파현미경으로 나노 스케일의 구조를 갖는 은(silver) 박막 시험편의 표면과 표층부 계면의 음향 이미지를 측정된 결과이다. (a)는 음향렌즈를 표면에 접촉시킨 포커스 모드의 경우이고, (b)는 시험편의 두께 방향으로 $Z = -1.5 \mu m$ 만큼 디포커스 모드로 박막의 두께가 50 nm인 접합계면을 가시화한 음향 이미지로 박리(흰부분)를 선명하게 관찰할 수 있음을 보여주고 있다. 즉 광학 이미지로는 식별할 수 없었던 오른쪽 위 모서리 부분에 393.2 μN 의 impact force로 표면에 아주 미세하게 형성한 나노인덴테이션 결함을 선명하게 관찰할 수 있어 위 실험 결과로부터 1.0 GHz의 고주파수 음향 이미지 기법은 나노 구조 박막 시험편의 접합계면의 비파괴 평가에 유용함을 보여주고 있다.

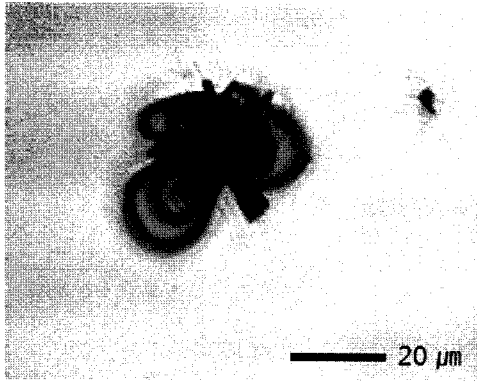
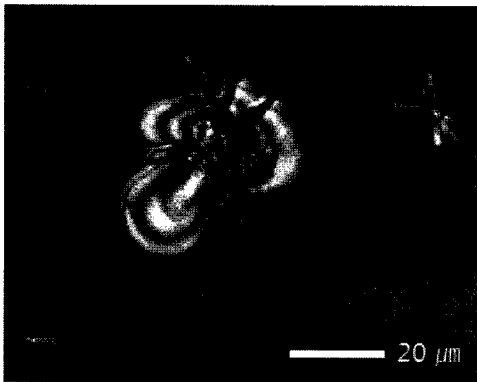
(a) ($Z = 0 \mu\text{m}$)(b) ($Z = -1.5 \mu\text{m}$)

Fig. 6 Acoustical image, (a) The acoustic lens is focused at the surface (denoted as $Z=0 \mu\text{m}$), (b) The acoustic lens is $-1.5 \mu\text{m}$ mechanically defocused toward the specimen (denoted as $Z=-1.5 \mu\text{m}$). The acoustic lens is operated at 1 GHz

4. 결론

초고주파수의 초음파현미경을 이용하여 나노 스케일의 구조를 갖는 박막 계면의 수명과 내구성 확보를 위해 비파괴적 평가를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) $V(z)$ 곡선의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 나노 스케일의 구조를 갖는 은(silver) 박막의 두께가 50 nm까지 $V(z)$ 곡선의 검출 감도의 차가 얻어짐을 알 수 있었다.
- 2) $V(z)$ 곡선의 시뮬레이션 결과 접합계면에 미세 결함(박리)이 내재하는 경우도 높은 인텐시티의 감도 차를 얻을 수 있어 나노 구조의 박막 접합 계면에 존재하는 미세 결함의 검출에 유용함을

알 수 있었다. 따라서 초음파현미경의 음향 이미지로 식별할 수 없는 정도의 접합계면의 미세 결함 검출에 $V(z)$ 곡선을 이용하면 유용할 것으로 생각된다.

- 3) 1 GHz의 초고주파수 초음파현미경의 디포커싱 모드를 적용하여 박막의 두께가 50 nm인 은(silver) 박막 계면의 음향 이미지를 측정된 결과, 접합계면에 내재하는 박리(흰부분)를 선명한 음향 이미지로 가시화 할 수 있음을 보여주고 있다. 그리고 광학 이미지로는 식별할 수 없었던 미세한 나노인텐테이션 결함을 선명하게 관찰 할 수 있어, 고주파수 초음파현미경 기법은 나노 스케일의 구조를 갖는 박막 시험편의 접합 계면의 비파괴적인 평가에 매우 유용함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2010-0013809)

참고문헌

- [1] Y. H. Son, K. Y. Kim, C. I. Lim, B. K. Lee and E. G. Chang "Ferroelectric properties of Sm-doped PZT thin film," J. Korea Institute of Electrical and Electronic Materials Engineerings, Vol. 17, No. 2, pp. 178-183 (2004)
- [2] H. S. Ju and Bernhard R. Tittmann, "Recent advances in scanning acoustic microscopy for adhesion evaluation of thin films," J. of Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 29, No. 6, pp. 534-549 (2009)
- [3] Z. Guo, J. D. Achenbach, A. Madan, K. Martin and M. E. Graham, "Modeling and acoustic microscopy measurements for evaluation of the adhesion between a film and a substrate," Thin Solid Films, Vol. 394, pp. 189-201 (2001)
- [4] U. Rabe and W. Arnold, "Acoustic microscopy by atomic force microscopy," Appl. Phys. Lett., Vol. 64, pp. 1493-1495 (1994)

- [5] K. Yamanaka and S. Nakano, "Quantitative elasticity evaluation by contact resonance in an atomic force microscope," *Appl. Phys.*, Vol. 66, pp. S313 (1998)
- [6] K. Yamanaka and S. Nakano, "Ultrasonic atomic force microscope with overtone excitation of cantilever," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. 3787-3792 (1996)
- [7] K. Yamanaka, H. Ogiso and O. Kolosov, "Ultrasonic force microscopy for nanometer resolution subsurface imaging," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, No. 2, pp. 178-180 (1994)
- [8] M. J. Bamber, K. E. Cooke, A. B. Mann and B. Derby, "Accurate determination of Young's modulus and Poisson's ratio of thin film by a combination of acoustic microscopy and nanoindentation," *Thin Solid Films*, Vol. 398-399, pp. 299-305 (2001)
- [9] T. S. Park, D. R. Kwak, I. K. Park and C. S. Kim, "Vibro-contact analysis of ultrasonic atomic force microscopy tip and its application to nano surface," *J. of Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 2, pp. 132-138 (2010)
- [10] C. Thomsen, H. T. Grahn, H. J. Maris and J. Tauc, "Surface generation and detection of phonons by picosecond light pulses," *Phys. Rev. B*, pp. 4129-4138 (1986)
- [11] H. N. Lin, H. J. Maris and L. B. Freund, "Study of vibrational modes of gold nanostructures by picosecond ultrasonics," *J. of Appl. Phys.*, Vol. 73, No. 1, pp. 37-45 (1992)
- [12] E. Chilla, T. Hesjedahl and H. J. Frohlich, "Nanoscale determination of phase velocity by scanning acoustic force microscopy," *Phys. Rev. B.*, Vol. 55, pp. 15852-15855 (1997)
- [13] S. Parthasarathi, B. R. Tittmann, and R. J. Ianno, "Quantitative acoustic microscopy for characterization of the interface strength of diamond-like carbon thin film," *Thin Solid Films*, Vol. 300, pp. 42-50, (1997)
- [14] I. K. Park, C. K. Lee, D. S. Cho and Y. K. Kim, "Nondestructive evaluation of ceramic/metal interface using the $V(z)$ curve of scanning acoustic microscope," *J. of Korean Welding and Joining Society*, Vol. 23, No. 2, pp. 59-65 (2005)
- [15] R. D. Weglein, "Acoustic microscopy applied to SAW dispersion and film thickness measurement," *IEEE. Trans. Sonics.*, Vol. SU-27. No. 2, pp. 82-86 (1980)
- [16] R. C. Bray, C. F. Quate, J. Calhoun, and R. Kock, "Film adhesion studies with the acoustic microscope," *Thin Solid Films*, Vol. 74, pp. 295-302 (1980)
- [17] R. D. Weglein, "A model for predicting acoustic materials signatures," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 34, pp. 179-181 (1979)
- [18] W. Parmon and, H. L. Bertoni, "Ray interpretation of the material signature in the acoustic microscope," *Electron. Lett.*, Vol. 15, pp. 684-686 (1979)
- [19] T. Endo, Y. Sasaki, T. Yamagishi, and M. Sakai, "Determination of sound velocities by high frequency complex $V(z)$ measurement in acoustic microscopy," *Jpn. Appl. Phys.*, Vol. 31, pp. 160-162 (1992)
- [20] C. Miyasaka and B. R. Tittmann, "Characterization of stress at a ceramic/metal joined interface by the $V(z)$ technique of scanning acoustic microscopy," *J. Pressure Vessel Technol.* Vol. 124, No. 3, pp. 336-342