

음향현미경을 이용한 layer 의 두께측정에 관한 연구

고 대 식*, 김 흥 기, 전 계 석
 경희대학교 전자공학과

A study on the measurement of layer thickness using acoustic microscope.

Dae-sik Ko*, Heung-ki Kim, Kye-suk Jun
 Kyung Hee Univ. Electronics

Abstract

In this paper, a methodology for determination of the thickness of layer on a substrate using reflection acoustic microscope has been presented. It has been shown that the amplitude and the phase of reflection coefficient of the layer-substrate composite has been used for measurement of layer thickness, acoustic velocity, mass density of the layer material. The reflection acoustic microscope operating at a frequency of 15 MHz has been used for the experiment and the measured acoustic impedance value for aluminum sample has agreed with the published data, and the measured layer thickness for silver-glass composite has agreed with that measured using micrometer.

본 논문에서는 반사형 음향현미경을 이용하여 층상구조물에 대한 layer 의 두께, 음향속도, 밀도등을 측정하는 방법을 제시하고자 한다. 층상구조물에 대한 이론적인 고찰을 통하여 반사계수를 구하고 이물상호간의 관계를 이용하여 layer 의 두께, 음향속도 및 밀도등을 동시에 측정할 수 있는 방법을 연구분석하였다. 실험은 중심주파수 5 MHz, 초점거리가 6cm 인 음향변환기의 제 3 고조파에서 행하였으며 알루미늄 기판, 은-유리 층상구조물에 나타난 실험 결과를 비교분석하였다.

2. 층상 구조물(layer-substrate)에서의 반사 계수와 layer 의 두께측정

층상구조물에서의 반사 계수를 고찰하기 위하여 그림 1 과 같은 기하학적 구조를 이용할 수 있다.

서 론

반사형 음향현미경 시스템 은 재료의 표면 및 표면 근처(subsurface) 에 존재하는 미소결함의 검출과 재료의 탄성특성의 측정하는데 널리 이용되고 있다. (1,3,4)

음향현미경은 1973 년 Lemons 가 처음으로 개발하였으나 이것은 투과모드에서 동작하였기 때문에 두께가 큰 샘플의 탐상에 불리하였다.

1978 년 Atalar 는 음향현미경을 반사모드에서 동작시켜 두께가 큰 재료에 적용할 수 있는 반사형 음향현미경을 개발하였다. 음향현미경을 이용하여 결함을 검출하고자할 경우는 탄성표면파를 여기할 수 있도록 초점거리가 짧고 aperture angle 이 큰 음향렌즈를 사용하지만 최근에는 초점거리가 길고 상대적으로 angle 은 작은 렌즈를 사용한 비파괴 검사방법이 연구되고 있다. (1,2,5)

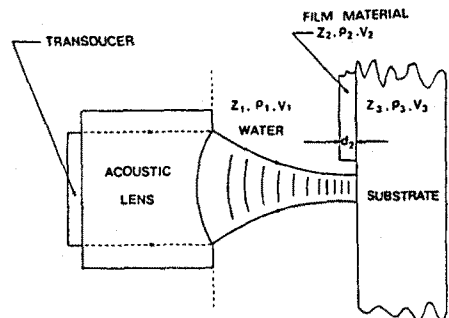


Fig.1 Acoustic beam incident on a substrate with a layer material.

음향 변환기에 의하여 어진된 음향파는 음향 렌즈에서 어느정도 집중되지만 초점거리가 길고 상대적으로 numerical aperture가 작은 음향렌즈에서는 음향파의 far-field 패턴으로서 해석 할 수 있다. 그러므로 층상 구조물에 입사되는 음향파는 평면파로 간단히 해석 할 수 있고 기판의 두께는 입사 음향파의 펄스 폭이 기판을 통과하는 시간보다 작다면 무한대로 가정 할 수 있다. 따라서 물-기판간의 반사 계수 r_{13}

$$r_{13} = \frac{Z_3 - Z_1}{Z_3 + Z_1} = |r_{13}| \angle \gamma_{13} \quad \text{-----(1)}$$

여기서 $z_1 = \rho_1 v_1$, $z_3 = \rho_3 v_3$, 이고 z_1, z_3 는 각각 물과 기판의 음향 임피던스이며 ρ_1, ρ_3, v_1, v_3 는 각각의 밀도와 음향속도이다. Z_1 은 알고있으므로 r_{13} 을 측정하면 미지의 기판에 대한 음향임피던스를 결정할 수 있다. 같은 방법으로 층상구조물의 입력임피던스를 구하면 [1]

$$Z_4 = Z_2 \left(\frac{Z_3 \cos K_2 d_2 + j Z_2 \sin K_2 d_2}{Z_2 \cos K_2 d_2 + j Z_3 \sin K_2 d_2} \right) \quad \text{-----(2)}$$

여기서 $Z_2 = \rho_2 v_2$ 이다. 결과적으로 층상구조물의 복소 반사계수는 다음과 같다.

$$r_{123} = \frac{Z_4 - Z_1}{Z_4 + Z_1} = |r_{123}| \angle \gamma_{123} \quad \text{-----(3)}$$

layer의 두께는 매우 작으므로 layer 내에서의 음향감쇠는 무시할 수 있고 기판에서 반사된 음향파와 층상구조물에서 반사된 음향파 사이에 발생하는 위상차는

$$\Delta \phi = 2 K_1 d_2 \quad \text{-----(4)}$$

여기서 K_1 은 물에서의 파수이고 layer의 두께가 d_2 이므로 왕복거리에 해당하는 $2 d_2$ 항이 고려되었다.

그림 2-(a), 는 layer와 layer의 두께의 변화에 따른 반사계수의 진폭을 시뮬레이션 한 것이다. 그림 2에서 반사계수의 진폭은 layer의 두께가 1/4 파장에 해당하는 지점을 중심으로 대칭적인 구조를 나타내었으며 대칭축과 일치하는 layer의 두께에 해당하는 음향주파수를 공진주파수라고 할 수 있다. 그리고 대부분의 layer에서는 반사계수의 진폭이 layer의 두께가 증가함에 따라 1/4파장두께에 이르기까지 감소하지만 만약 layer의 임피던스가 물의 임피던스보다 작거나 기판의 임피던스보다 큰 layer에서 ($Z_3 < Z_2 < Z_1$) 반사계수의 진폭은 layer의 두께에 따라서 증가하며 역시 1/4 파장두께에서 최대값이 발생함을 볼 수 있다. 이와같이 대부분의 layer는 그림 2의 진폭곡선을 통하여 1/4 파장두께를 분명히

$$Z_1 = 1.49 \times 10^5 \text{ gm/cm}^2 \text{ sec (water)}$$

$$Z_3 = 12.9 \times 10^5 \text{ gm/cm}^2 \text{ sec (glass)}$$

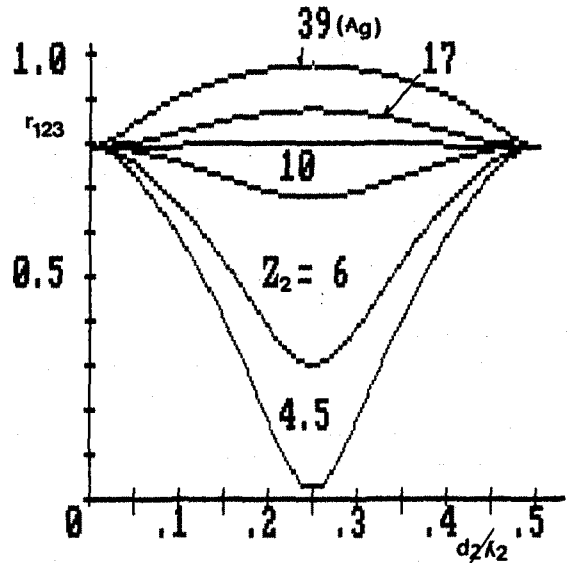


Fig. 2 Amplitude of reflection coefficient of layer-substrate composite by variation of the layer thickness and layer material.

구별할 수 있으나 그 곡선이 매우 완만하여 공진주파수를 찾기 어려운 매질도 있음을 알 수 있다. 이러한 경우는 결합용액을 물 대신에 Liquid Gallium과 같이 임피던스가 큰 매질로 대체하여 공진 주파수를 용이하게 결정하며 그림 3은 Si 기판에 Gallium 결합용액을 사용하고 반사계수의 진폭을 시뮬레이션한 것으로서 Z_2 가 큰 매질에 대해서도 물을 사용한 경우에 비하여 예리한 형태를 나타내고 있어서 최대 혹은 최소점을 결정하기가 용이하다.

한편 공진주파수에서 식(2)의 $K_2 d_2$ 는 $\pi/2$ 와 같으므로 $Z_4 = Z_2^2 / Z_3$ 이며 공진시의 반사계수는 $r_{123}^{\hat{}} = \frac{Z_2^2 - Z_3 Z_1}{Z_2^2 + Z_3 Z_1} = |r_{123}^{\hat{}}| \angle \gamma_{123}^{\hat{}}$ 이다.

따라서 layer의 임피던스는 $Z_2^2 = \frac{1 + \hat{r}_{123}}{1 - \hat{r}_{123}} \cdot Z_3 Z_1$ 과같이 간략화 된다.

여기서 Z_1, Z_3 는 알고있는 파라미터이고 \hat{r}_{123} 는 측정가능하므로 Z_2 를 구할 수 있으며 공진주파수에서 위상차는

$$\Delta \phi = 2 K_2 d_2$$

$$Z_1 = 17.48 \times 10^5 \text{ gm/cm}^2 \text{ sec (gallium)}$$

$$Z_3 = 22.95 \times 10^5 \text{ gm/cm}^2 \text{ sec (Si)}$$

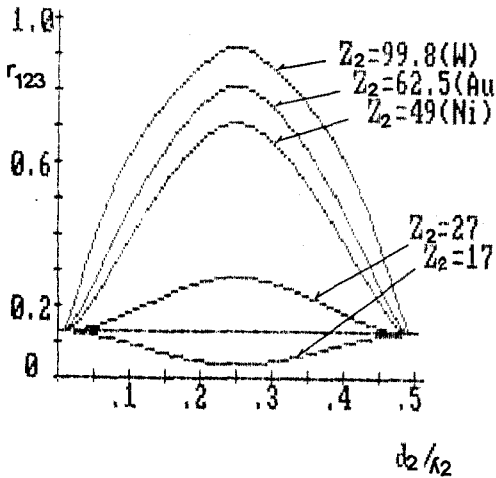


Fig. 3 Amplitude of reflection coefficient .
(Gallium is used as a coupling medium.)

그러므로 공진주파수에서의 위상차를 측정하면 d_2 를 구할 수 있고 layer 의 음향속도는 $V_L = f_R \lambda_L = 4 d_2 f_R$ 의 관계에서 구할 수 있으며 밀도는 $\rho_2 = Z_2 / V_L$ 의 관계에서 쉽게 결정할 수 있다.

3. 실험 및 고찰

본 연구에서 사용한 음향변환기는 음향렌즈가 병합된 것으로서 중심주파수가 5MHz 이고 초점거리는 6cm 이었으며 그림 4 는 실험장치의 블록선도이다.

그림 4 에서 pulse generator 와 waveform generator에 의하여 tone burst 파를 구성하고 음향 변환기에 인가하였으며 샘플로부터 반사되어온 신호를 오실로스코프로 측정하였다. 이때 각 장치들 간에는 동기신호에 의하여 연결하였기 때문에 반사신호의 진폭과 위상을 고정하여 측정할 수 있으며 스크의 스케일은 측정한계와 정확도에 중대한 영향을 미친다. 본 실험에서는 100 MHz 디지털 storage 오실로스코프를 사용하였고 기판의 임피던스를 측정하기 위하여 알루미늄 기판을 선택하였으며 음향현미경의 반사전압을 측정한 다음 (1)식을 이용하여 기판의 임피던스를 구한 결과는 $17.1 \times 10^5 \text{ gm/cm}^2 \text{ sec}$ 로서 문헌에서 발표된 값과 잘 일치하였다. layer 의 두께측정을 위한

샘플(증상구조물)은 압전물질등에 전극을 부착할 때 사용하는 스크린 프린터를 이용하여 유리 기판에 은(silk)을 50 μ m 두께로 코팅하고 15MHz 에서 음향현미경을 동작시켜 반사계수의 진폭과 위상을 측정하였으며 (2), (3), (4) 식을 이용하여 은의 두께를 산출하면 55 μ m 이다. 같은 방법으로 layer 의 두께를 변화시키면서 행한 실험 결과는 마이크로미터로 측정 한 결과와 일치하였다. 이와같이 반사형 음향현미경은 비파괴 검사 장비로서 뿐만 아니라 layer 의 특성조사에도 응용할 수 있으며 앞으로 동작주파수를 수백 MHz 대로 높인다면 반도체 산업등의 박막측정등에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

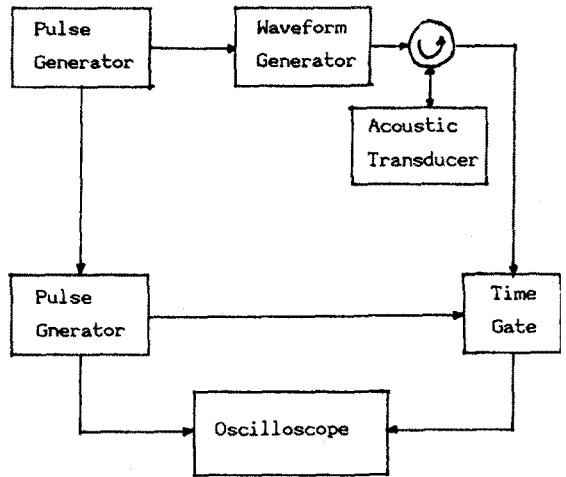


Fig. 4 Block diagram of experimental equipment.

4. 결론

본 논문에서는 반사형 음향현미경 시스템을 이용하여 기판의 음향임피던스와 증상구조물에서 layer 의 두께를 측정하는 방법을 연구분석하였다.

증상구조물에 대한 반사계수의 이론적 고찰을 통하여 반사계수의 진폭과 위상은 기판의 음향임피던스를 비롯한 layer 의 두께, 음향속도, 밀도등과 같은 재료의 탄성특성을 측정하는데 중요한 파라미터임을 알 수 있었다.

실험을 위하여 중심주파수 5MHz 인 반사형 음향현미경을 구성하고 제 3 고조파(15 MHz)에서 시스템을 동작시켜 알루미늄 기판에 대한 음향임피던스를 측정 한 결과는 문헌에 주어진 값과 잘 일치하였으며 이를 이용하면 복합재료등과 같은 미지의 샘플에 대한 음향임피던스 측정이 용이함을 알 수 있었다.

유리기판에 은 layer 를 코팅한 층상구조물에서 layer 의 두께를 변화시켜가면서 layer 의 두께를 측정할 결과는 마이크로미터로 측정할 결과와 일치하였다.

이와같이 음향현미경 시스템은 음향이미지 장비로서 뿐만아니라 층상구조물등에 대한 비파괴 검사 장비로서도 우수하며 반도체산업의 박막측정을 위한 연구가 계속되어져야 하겠다.

REFERENCE

- [1] . C.C.LEE, C.S.Tsai, Xin Cheng, "Complete Characterization of Thin-and Thick-film Materials Using Wideband Reflection Acoustic Microscopy", IEEE Transaction on Sonics & ultra, Vol. Su-32, No. 2, 1983.
- [2] . J.K.Hang, C.S. Tsai, "Reflection Acoustic Microscopy for thick specimens " School of Engineering, Univ. of California, september 1983.
- [3] . K.Liang, B.T.Khuri-Yakub, S.D.Bennett, and G.S.Kino, " Phase Measurment in Acoustic Microscopy ", IEEE Ultrasonic Symposium, 1983 .
- [4] . J.I.Kushibiki and N.Y.Chubachi, "Material Characterization by Line - Focus Beam Acoustic Microscope ", IEEE Trans. on Sonics and Ultra, Vol.Su-32, No.2, 1985.
- [5] . D.L. Folds and C.D. Loggins, " Transmission and Reflection of Ultrasonic Waves in Layered Media ", J. Acoust. Soc. Am. Vol 62, No. 5, November, 1977.
- [6] . R.D.Weglein, "Acoustic Micro-Metrology" ,IEEE Transactions on Sonics and Ultra, Vol .SU-30, No.2, March 1985.