접촉 공진 힘 현미경 기술을 이용한 플립 칩 범프 재료의 국부 탄성계수 측정

김대현 · 안효석* · 한준희**†

서울과학기술대학교 NID융합기술대학원

*서울과학기술대학교 기술경영융합대학

**한국표준과학연구원

Measurement of Local Elastic Properties of Flip-chip Bump Materials using Contact Resonance Force Microscopy

Dae-Hyun Kim, Hyo-Sok Ahn* and Junhee Hahn**†

Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology

*College of Business and Technology, Seoul National University of Science and Technology

**Korea Research Institute of Standards and Science

(Received May 30, 2012; Revised July 2, 2012; Accepted July 8, 2012)

Abstract – We used contact resonance force microscopy (CRFM) technique to determine the quantitative elastic properties of multiple materials integrated on the sub micrometer scale. The CRFM approach measures the frequencies of an AFM cantilever's first two flexural resonances while in contact with a material. The plain strain modulus of an unknown or test material can be obtained by comparing the resonant spectrum of the test material to that of a reference material. In this study we examined the following bumping materials for flip chip by using copper electrode as a reference material: NiP, Solder (Sn-Au-Cu alloy) and under filled epoxy. Data were analyzed by conventional beam dynamics and contact dynamics. The results showed a good agreement (~15% difference) with corresponding values determined by nanoindentation. These results provide insight into the use of CRFM methods to attain reliable and accurate measurements of elastic properties of materials on the nanoscale.

Keywords – CRFM(접촉 공진 힘 현미경), elastic modulus(탄성 계수), AFM(원자힘 현미경), under bump metallization(UBM)

1. 서 론

마이크로 또는 나노구조 재료의 구성 물질에 대한 국부 탄성 특성을 정량적으로 측정하기 위하여 구축한 접촉 공진 힘 현미경(CRFM, contact resonance frequency microscopy)장치를 사용하여 플립 칩용 범프 재료의 탄성 특성을 측정하고 영상화하였다. CRFM 방법은 AFM 캔틸레버가 물질과 접촉한 상태에서 두 개의 접촉 공진 주파수를 측정하는 방법으로 탄성 계수를 알

고 있는 기준 물질에 대한 접촉 공진 주파수와 비교하여 측정하고자 하는 물질의 탄성 계수를 산출할 수 있다[1-5]. 본 연구에서는 전극 물질인 구리를 기준 물질로 선택하였으며 측정 결과를 나노압입(Nanoindentation) 시험 결과와 비교하였다. CRFM 방법으로 플립 칩 범프 재료의 탄성 계수를 정량적으로 산출할 수 있었으며 재료의 경계면에 대한 선명한 탄성 계수 영상을 얻을 수 있었다. 또한 다양한 물질에 대하여 CRFM 측정 기술을 보편적으로 사용하기 위한 선결조건들을 검토하였다.

†주저자 · 책임저자 : juny@kriss.re.kr

Fig. 1. Schematic of experimental CRFM apparatus.

Fig. 2. Under bump metal for flip-chip used in experiment.

2. 실험방법

2-1. 시험 장치 및 시편

Fig. 1은 본 연구를 위하여 구축한 CRFM 장치의 도식도이다. 상용 원자힘 현미경(Asylum, MFP-3D)에 공진 주파수를 추적하기 위한 DFRT (Dual frequency resonance tracking)[6] 기능을 설치하였다.

이 실험을 위하여 사용한 캔틸레버는 Nanoworld 사의 NCL 제품으로 재질은 실리콘이고 길이 224 μm , 폭 38 μm , 두께 7 μm , 사용 전 팁 반경은 10 nm 이하이다. 이 캔틸레버의 허공에서의 첫 번째(f_1^0)와 두 번째(f_2^0) 공진주파수는 각각 165~175 kHz와 1,020~1,040 MHz 이었으며 스프링 상수는 40 N/m이었다. 시험에 사용한 캔틸레버의 스프링 상수는 Thermal noise method로 직접 측정하였다. 팁 반경이 20 nm 이하로 작은 캔틸레버로 CRFM 시험을 하는 경우, 시험 중 팁 마모로 인한 접촉 공진 주파수의 변동이 발생할 수 있다. 이 영향을 최소

화하기 위해 본 시험 전에 기준 물질에 대해 접촉 모드로 예비 스캔을 하고 접촉 공진주파수를 측정하였다. 본 시험 후에도 동일 기준 물질에 대하여 접촉 공진 주파수를 측정하여 시험 전후의 값이 유사함을 확인하였다.

CRFM 결과 비교를 위한 나노 압입 시험을 위해서는 MTS 사의 Nano indenter XP DCM (Dynamic contact module)을 사용하였다.

시편은 플립 칩용 범프 금속(UBM, under bump metalization)인 NiP, Solder(Sn-Au-Cu alloy)와 충전용 에폭시이며 구리 전극을 기준 물질로 사용하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 시편의 광학 현미경 사진이다.

2-2. 측정 분석

CRFM 방법은 AFM 탐침의 허공에서의 공진 주파수와 피측정 물질과 접촉한 상태에서의 공진 주파수를 측정하고 기준 물질에 대한 접촉 공진 주파수 측정값과 비교하여 피측정 물질의 탄성 물성을 정량적으로 구하는 기술이다. 길이, 폭, 두께, 밀도 그리고 탄성계수가 각각 L , w , b , ρ , E 인 캔틸레버의 스프링 상수는 $k = Eb^3w/(4L^3)$ 이다. 그리고 팁과 시편이 접촉한 상태에서 측정되는 상대 접촉 강성(k/k_{lever})은 식 (1)와 같이 표현되며 시험에서 측정한 접촉 공진 주파수를 이용하여 팁과 시편의 상대 접촉 강성을 구할 수 있게 된다[7].

$$\frac{k}{k_{\text{lever}}} = \frac{2}{3}(x_n L \gamma)^3 \frac{(1 + \cos x_n L \cosh x_n h)}{D} \quad (1)$$

여기에서 γ 는 L_v/L (L_v : 팁 부착지점까지의 캔틸레버 길이, L : 캔틸레버 전체 길이)이며 $x_n L$ 과 D 는 아래와 같다.

$$x_n L = x_n^0 L \sqrt{\frac{f_n}{f_n^0}} \quad (2)$$

$$D = [\sin x_n L (1 - \gamma) \cosh x_n L (1 - \gamma) - \cos x_n L (1 - \gamma)$$

$$\sin x_n L (1 - \gamma)] [1 - \cos x_n L \gamma \cosh x_n L \gamma -$$

$$[\sin x_n L \gamma \cosh x_n L \gamma - \cos x_n L \gamma \sinh x_n L \gamma]$$

$$[1 + \cos x_n L (1 - \gamma) \cosh x_n L (1 - \gamma)]$$

식(1)를 통해 계산된 상대 접촉 강성을 통해 측정하고자 하는 시편의 탄성 특성을 결정하기 위해서는 팁과 시편의 접촉 역학을 고려하여야 한다[8]. 팁이 평면 시편과 접촉하여 직경이 $2a$ 인 접촉면이 생성된 경우

팁과 시편 사이의 수직 접촉 강성 k 는 다음과 같다.

$$k = 2aE^* \quad (3)$$

여기서 E^* 는 tip-시편 계의 유도 탄성계수이며 탄성적으로 등방성인 물질의 경우, 시편과 팁의 탄성 계수 E_s , E_{tip} 과 의 관계식은 식 (4)로 표현된다.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_{tip}^2)}{E_{tip}} + \frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} \quad (4)$$

여기서 ν 는 Poisson's ratio이다.

식 (3)로부터 E^* 를 산출하기 위해서는 접촉 반경 a 를 알아야 한다. 원칙적으로는 a 를 직접 측정하거나 혹은 R 과 F_N 을 실험적으로 측정하고 아래 식(5)을 사용하여 a 를 결정한다.

$$a = \sqrt[3]{\frac{3RF_N}{4E^*}} \quad (5)$$

그러나 실제로는, 측정 시편(아래 첨자 s로 표시함)과 기준 시편(아래첨자 ref로 표시함)에 대하여 동일 하중 F_N 으로 시험하고 비교 측정하는 방법을 사용한다. 이 경우 E_{ref}^* 값을 알고 있어야 한다. 이와 관계된 식은 다음과 같다.

$$E^* = E_{ref}^* \left(\frac{k_s}{k_{lever}} / \frac{k_{ref}}{k_{lever}} \right)^m \quad (6)$$

여기서 Hertzian 접촉의 경우 m 은 3/2이고 flat punch의 경우 m 은 1이다. 실험에 의해 얻은 k_s/k_{lever} 값과 k_{ref}/k_{lever} 로부터 식 (6)을 사용하여 E^* 를 얻으며 식 (4)을 사용하여 시편의 압입탄성계수 E_s 을 얻는다. 실제 캔틸레버 팁 형상은 보통 반구와 평면의 중간 형상을 갖는다.

3. 실험결과

Fig. 3은 UBM의 Cu/NiP 경계 부분과 Epoxy/Cu 경계 부분에 대한 CRFM 영상 측정 결과이다. Fig. 3의 (a)와 (b) 사진은 각각 Cu/NiP과 Epoxy/Cu 경계 부분에 대한 표면 높낮이 측정(Topography) 결과이며 Fig. 3의 (c)와 (d)는 각각 Cu/NiP과 Epoxy/Cu 경계 부분의 접촉 공진 주파수 측정 영상이다. 그리고 Fig. 3의 (e)와 (f)는 각각 (c)와 (d)로부터, 캔틸레버 동역학과 접촉역학 이론을 사용하여, 계산한 탄성 계수 영상이다. 표면의 높낮이 영상에 비하여 두

Fig. 3. CRFM images of border between Cu and NiP and Epoxy and Cu of flip-chip under bump: (a), (b), (c) and (d) are images of topography and contact resonance frequency determined in the border area between Cu and NiP and Epoxy and Cu respectively. (e) and (f) are images of elastic modulus E_s calculated from contact resonance frequency images (c) and (d) respectively. Black box in (e) and (f) indicates the area used to calculate the average of elastic modulus E_s .

영역이 더 뚜렷이 구별됨을 알 수 있다. Fig. 3(a), (c), (e)에서 왼쪽 부분이 기준 물질인 Cu이고 오른쪽이 NiP이며 Fig. 3(b), (d), (f)에서는 왼쪽 부분이 Epoxy 이고 오른쪽이 기준 물질인 Cu이다.

이와 같이 측정한 각 물질에 대한 영상 자료로부터 일정 부분(예, Fig. 3(e), (f)의 검은 상자 안쪽)의 값을 평균하여 그 값을 Table 1에 나타내었다. UBM 재료인 NiP, Solder (SAC)와 충진제인 에폭시의 탄성 계수를 전극인 Cu를 기준 물질로 사용하여 계산하였으며 그 결과를 같은 물질에 대해 나노 압입 시험 방법으로 측정한 결과와 비교하였다. Table 1에서 m 은 캔틸레버 팁의 형상 상수로서 완전 구형인 경우 1.5

Table 1. Elastic modulus of UBM determined by CRFM and nanoindentation ($m=1$, Hertzian contact, $m=1.5$, flat-punch contact)

Samples	E_{sample} (GPa)		
	$m=1.0$	$m=1.5$	Indentation
Cu(ref)	129.8 ± 1.9	129.8 ± 1.9	129.8 ± 1.9
NiP	227.4 ± 9.4	319.5 ± 25.0	247.5 ± 2.6
Solder	125.0 ± 6.3	122.9 ± 9.1	57.2 ± 2.3
Epoxy	16.8 ± 0.9	7.3 ± 0.5	3.9 ± 0.06

이며 완전 평면인 경우 1.0 이다. CRFM 측정을 위해 캔틸레버 탐침과 샘플이 접촉된 상태에서 측정하면, 실제 캔틸레버 탐침의 형상은 완전 구형과 완전 평면 상태의 중간 형태가 되며 그 m 값은 1.0과 1.5 사이 값이라고 생각할 수 있다. 따라서 CRFM 방법으로 분석한 양 끝(m 이 1.0인 경우와 1.5 인 경우) 탄성 계수 값 사이에 나노 압입 시험 방법으로 측정한 값이 존재하는 경우, CRFM 방법으로 측정한 탄성 계수는 일정한 불확도 범위 안에서 일치한다고 말할 수 있다.

CRFM 으로 측정한 NiP의 탄성 계수는 $227.40 \sim 319.50$ GPa로 나노 압입 시험 결과인 247.5 GPa가 그 범위 안에 있었으나 Solder와 Epoxy의 경우, 두 방법에 의한 결과가 다소 차이를 보였다. 그 이유는 시험을 위해 사용한 캔틸레버가 NiP의 탄성계수를 측정하기 위해서는 적당하였으나, solder와 epoxy의 탄성계수를 측정하기 위해서는 스프링 상수가 너무 컸기 때문으로 생각된다[9,10]. 이와 같은 결과는 CRFM 방법으로 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 기준 물질뿐만 아니라, 적절한 캔틸레버의 선택이 중요함을 의미한다.

Fig. 4는 이번 시험에서 사용된 Cu와 NiP 그리고 Solder에 대한 나노 압입 시험 결과이며 압입 깊이에 따른 각 물질의 경도와 탄성계수를 나타낸다. Table 1에 표시한 값은 Fig. 4의 $\longleftrightarrow$ 표시 범위의 측정값 평균과 표준 편차이다.

4. 결 론

CRFM 방법으로 측정한 NiP의 탄성값은 나노 압입 시험 방법으로 측정한 탄성값과 유사한 결과를 보였으나, Solder와 Epoxy에 대한 측정 결과는 다소 차이가 있었다. CRFM 방법으로 신뢰성 있는 나노 탄성 측정 결과를 얻기 위해서는 캔틸레버 스프링상수, 팁 형상

Fig. 4. Nanoindentation hardness and elastic modulus of UBM: (a) Cu, (b) NiP and (c) Solder.

및 마모 상태, 시편의 표면 상태 (표면 산화, 표면 흡착 물층(Absorbed water layer), 표면 거칠기 등의 다양한 변수들을 고려해야하며 기준 물질과 측정 물질간의 물성 상관관계 또한 고려해야 할 것이다[9,10]. 이처럼 측정에 따른 몇 가지 조건에 대해서 선결되어야

할 부분이 있으나 이번 연구를 통해서 CRFM 측정기술은 나노구조 및 나노 구조 물질의 국부 탄성 측정에 매우 유효한 기술임을 확인하였다.

참고문헌

1. G. Stan and W. Price., "Quantitative Measurements of Indentation Moduli by Atomic Force Acoustic Microscopy using a Dual Reference Method," *Review of scientific instruments*, Vol. 77, 103707, 2006.
2. M. Preghenella, A. Pegoretti, and C. Migliaresi., "Atomic Force Acoustic Microscopy Analysis of Epoxy-silica Nanocomposites," *Polymer testing*, Vol. 25, pp. 443-451, 2006.
3. G. Stan, S. Krylyuk, A. V. Davydov, M. D. Vaudin, L. A. Bendersky, and R. F. Cook., "Contact-resonance Atomic Force Microscopy for Nanoscale Elastic Property Measurements : Spectroscopy and image," *Ultramicroscopy*, Vol. 109, pp. 929-936, 2009.
4. D. C. Hurley, M. Kopycinska-Müller and R. H. Geiss., "Quantitative Elastic-property Measurements at the Nanoscale with Atomic Force Acoustic Microscopy," *Advanced Engineering Materials*, Vol. 7, No. 8, pp.713-717, 2005.
5. D. C. Hurley., "Applied Scanning Probe Methods Vol. 11," *Springer Handbook*, pp. 97-138, 2009.
6. B. J. Rodriguez, C. Callahan, S. V. Kalinin, and R. Proksch., "Dual-frequency Resonance-tracking Atomic Force Microscopy," *Nanotechnology*, Vol. 18, 475504, 2007.
7. B. Bushan and H. Fuchs., "Applied Scanning Probe Methods vol. II," *Springer*, p. 37, 2006.
8. K. L. Johnson., "Contact Mechanics," *Cambridge university press*, 1985.
9. D. C. Hurley, K. Shen, N. M. Jennett, and J. A. Truner., "Atomic Force Acoustic Microscopy Methods to Determine Thin-film Elastic Properties," *Journal of applied physics*, Vol. 96, No. 4, pp. 2347-2354, 2003.
10. D. C. Hurley, Kopycinska-Müller, A. B. Kos, and R. H. Geiss., "Nanoscale Elastic-property Measurements and Mapping using Atomic Force Acoustic Microscopy Methods," *Measurement science and technology*, Vol. 16, pp. 2167-2172, 2005.