

압력센서의 배선을 위한 다층 박막의 지지조건 변화에 따른 잔류응력 평가

심재준* · 한근조[†] · 한동섭*

(2003년 5월 23일 접수, 2004년 3월 2일 심사완료)

Evaluation of the Residual Stress with Respect to Supporting Type of Multi-layer Thin Film for the Metallization of Pressure Sensor

Shim Jae Joon, Han Geun Jo and Han Dong Seup

Key Words: MEMS(미세기전시스템), Metallization(금속화 공정;배선), Residual Stress(잔류응력) Thin Film (박막)

Abstract

MEMS technology applying to the sensors and micro-electro devices is complete system. These microsystems are made by variable processes. Especially, the metallization process has very important functions to transfer the power operating the sensor and signal induced from sensor part. But in the structures of MEMS the local stress concentration and deformation are often yielded by an irregular geometrical shape and different constraint. Therefore, this paper studies the effect of supporting type and thickness ratio about thin film of the substrate on the residual stress variation when the thermal loads is applied to the multi-layer thin film fabricated by metallization process.

Specimens were made from several materials such as Al, Au and Cu. Then, uniform thermal load was applied, repeatedly. The residual stress was measured by FE Analysis and nano-indentation method using AFM. Generally, the specimen made of Al induced the larger residual stress than that of made of other materials. Specimen made of Cu and Au having the low thermal expansion coefficient induces the minimum residual stress. Similarly, the lowest indentation length was measured by nano-indentation method in the Si/Au/Cu specimen. Particularly, clusters are created in the specimen made of Cu by thermal load and the indentation length became increasingly large by cluster formation.

기호설명

NTL : 열하중이 가해지지 않은 조건
TL : 열하중이 가해진 조건
OF : 일단 고정지지 조건
BF : 밀단 고정지지 조건
CTE : 선형 열팽창 계수

1. 서론

정보혁명이 시작되는 20세기를 맞이하면서, 전자공학은 급속하게 발전하고 있으며, 특히 집적회로 제조기술은 집적도를 상당히 향상시키면서 컴퓨터와 무선통신 등의 크기를 소형화시키고 있다. 이러한 집적회로 제조기술은 기계공학에서 접근할 수 있는 미세구조물 가공기술로 응용됨으로써 미세전기기계시스템(MEMS)이 탄생되었다. MEMS 기술로 만들어진 시스템은 수 밀리미터의 크기이지만 그 자체로 완전한 시스템이고, 다양한 센서(속도계, 가속도계, 압력계, 온도계), HDD 헤드, 내시경, 세포 또는 DNA 조작기, 유체 소자(마이크

[†] 책임자, 회원, 동아대학교 기계공학과

E-mail : gjhan@daunet.donga.ac.kr

TEL : (051)200-7650 FAX : (051)200-7656

* 동아대학교 일반대학원 기계공학과

로 펌프와 밸브), 마이크로 미러, TV Projector 등 여러 곳에 적용되어 실용화되고 있다.⁽¹⁾

MEMS 구조물의 구동을 위해 공급되어야 하는 전력과 센서부에서 생성되는 정보를 전달하는 통로인 배선은 시스템을 구성하기 위해서는 필수적인 요소로, 금속재료를 박막미세가공(surface micro-machining)에 의해서 제작된다. 이러한 박막미세가공은 모재의 표면에 박막을 적층하거나 에칭하여 원하는 형상을 구현하는 방식으로, 집적회로 공정과 유사하나 가공소재 및 재료의 물리적 특성과 가공된 미세구조물의 기하학적인 형상 차이로 많은 문제점이 야기되고 있다.⁽²⁻⁴⁾

특히, 배선의 기하학적인 형상과 배선이 가지는 지지조건에 차이로 발생된 국부적인 응력집중과 변형은 미세한 배선에 응력이동(stress migration)이나 전기적 이동(electro-migration)이 발생하여 원하는 수명 이전에 파손이 되기도 한다. 이러한 문제점은 단순하게 배선의 폭이나 두께를 증가하여 해결하고 있는 실정이다.^(5,6)

본 연구에서는 다층박막을 가진 미세구조물에서 발생할 수 있는 다양한 지지조건을 단순한 모델로 구현하고, 이후 각 지지조건에서 다양한 금속재료를 사용하여 시험편을 제작한다. 그리고 외부에서 열하중을 부가하여 박막에 과도한 응력을 발생시킨다. 발생된 과도한 응력은 외력이 제거된 이후에도 잔류응력으로 남게 된다. 이때, 잔류응력의 크기로서 미세 구조물의 지지조건과 박막의 두께비가 금속박막에 미치는 영향성을 평가하고자 하였다. 열하중에 의해서 발생하는 잔류 응력은 유한요소법(Finite Element Method)과 주사탐침 현미경(Scanning Probe Microscope)을 이용한 압입시험⁽⁷⁻¹⁰⁾을 통하여 구하고, 결과값을 분석하여 실제 배선 설계 시에 적용할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 유한요소해석

2.1 유한요소모델 및 재료물성치

이층박막의 두께 변화가 잔류응력에 미치는 영향을 분석하기 위해, 우선 박막의 두께를 0.2~20μm로 변화를 주어 10개의 모델을 생성하였으며, 이때 실리콘 기판의 치수는 10×5×0.5(mm)로, 각각은 길이, 폭, 두께를 나타낸다. 또한, 다양한 금속

재료에 따른 영향을 분석하기 위해 배선에 대표적으로 사용되는 알루미늄, 구리, 금을 조합하여 해석모델을 6 개로 분류하였다.

이후 두 개의 박막 중 하나를 5μm로 고정하고, 다른 박막의 두께를 0.2~20μm로 변화하면서 각각 10개의 모델로 생성하여, 잔류응력에 미치는 영향이 큰 금속재료를 찾아가 하였다. 전체적으로, 12개의 모델을 다양한 두께비에 대해서 해석을 수행하였다. 그리고, 박막에 사용되는 금속 재료의 탄성해석을 위한 기계적 특성은 Table 1에 나타내었고, 잔류응력해석을 위해 재료의 비선형 특성도 고려하였다.

유한요소해석은 MEMS 구조물의 응력해석에 범용적으로 사용하고 있는 ANSYS 5.7을 사용하였고, 해석에 사용된 요소는 8절점 3자유도를 가진 요소이다. 또한, 금속 박막의 각 계면사이에는 완전히 결합된 것으로 가정하여 공유하는 절점을 모두 일치시켰다.

2.2 지지조건 및 하중조건

단순한 압저항 압력센서를 Fig. 1에 나타내고 있으며, 배선은 압전저항 형태의 센서부에서부터 시작하여 구조물의 외곽부까지 연결되어 있고, 동일한 두께와 재료를 가지고 제작하였다. 우선 박막의 센서부는 기판과 다층박막이 외부하중에 대해 충분히 자유롭게 변형이 가능하나, 구조물의 외곽부는 밀부분이 완전히 고정되어 외부하중에 대해 기판과 다층박막의 움직임을 제한하게 된다. 그러므로, 배선의 지지조건은 대표적으로 Fig. 2(a)일단고정지지와 (b)밀단고정지지와 같이 두 가지로 분류하였고, 각각의 지지조건에 따른 이층박막의 잔류응력 특성을 분석하였다.

또한, 미세 구조물은 패키징에 의해 외부와 단절되어 측정되는 압력 이외에 다른 임의적인 하중은 전달되지 않으나, 사용되는 환경에 따라 미세 구조물에 외부의 열이 내부로 전달되거나 또는 구조물 내부에서 열이 발생할 수 있으며, 이러한 열은 실리콘 기판과 금속박막의 열팽창계수의 차이로 인해 상당히 큰 열하중으로 구조물에 작용될 수 있다. 특히 금속재료로 제작되는 배선과 기판사이의 열팽창계수 차이로 금속박막에는 큰 응력이 발생되므로, 본 연구에서는 측정압력과 같은 외부하중을 제외하고, 순수하게 100℃ 열하중만을 부가하였다.

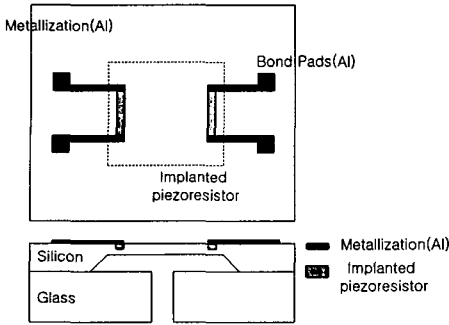


Fig. 1 Simplified schematic shape of pressure sensor with piezoresistor

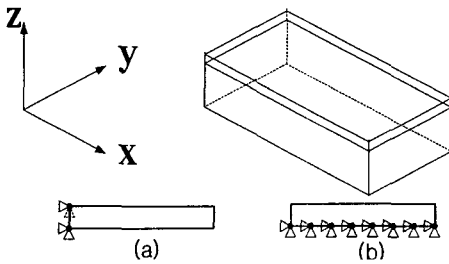


Fig. 2 Fabricated specimens shape with respect to each supporting type

Table 1 Mechanical properties of each material

	E	Poisson's ratio	CTE at 20°C
Si	190GPa	0.202	$2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Al	70GPa	0.35	$23.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Cu	130GPa	0.34	$16.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Au	78GPa	0.44	$14.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Table 2 The thickness of thin film on the specimens evaporated by each material

	Si/Al/Cu	Si/Au/Cu
1st layer thickness	170nm	70nm
2nd layer thickness (Cu)	160nm	160nm
total thickness	330nm	230nm
substrate thickness	$0.5 \times 10^6 \text{nm}$	

3. 압입 시험

유한요소 해석에서 수행된 모든 조건에 대해 시험편을 제작하기보다는, 높은 응력값 차이를 보이는 두 모델을 선정하고, 시험편을 제작하였다. 시험편은 각 조건에 대해 6개를 제작하고 측정된 값은 각 시험편에서 수행하여 구해진 값을 평균으로 나타내었다.

압입시험을 위한 시험편은 0.5mm 두께를 가진 n-type 실리콘 기판을 $10 \times 5(\text{mm}^2)$ 의 크기로 자른 다음, 세척한 이후에, 바스켓(basket)방식을 채택한 JEOL사의 JEE-400을 사용하여 금속화공정(thermal evaporation)을 수행하여 제작하였으며, 재료마다 각각의 바스켓을 사용하여 시험편 제작 시 발생하는 오염을 최소화하였다. 그리고 2차 박막을 형성하기 전에 시험편을 진공에 저장시켜 1차 박막의 표면에 발생할 수 있는 산화막을 최소화하였다.

금속 박막 두께를 측정하기 위해 두께 측정용 시험편을 금속화 공정을 할 때마다 제작하여 KLA-TENCOR사의 α -step(AS 500)를 사용하여 두께를 측정하여 Table 2에 나타내었다. 금의 두께가 70nm로 비교적 낮고, 알루미늄과 구리가 거의 유사하였다. 그리고, 전체 금속 박막의 두께는 200nm 이상이다.

잔류응력의 경향을 분석하기 위해, 제작된 모델은 Si/Al/Cu, Si/Au/Cu이며, Fig. 2에서 나타난 각각의 지지조건을 구현하기 위해, glass로 제작된 고정지그에 2-ton 에폭시(Devcon)를 사용하여 시험편의 한 쪽 끝단과 밑단을 완전히 고정하였다. 이후 열하중을 부가하기 위해 100°C의 노에서 20분간 유지하여 기판 및 박막의 온도가 동일하게 유지될 수 있도록 하였다. 고온에서는 각각의 금속재료와 실리콘의 계면에서 확산 반응 등의 화학적인 반응이 발생할 수 있으므로 열하중조건을 100°C 정도로 낮게 설정하였다.

일반적으로 압입시험에서 구하는 값은 경도값인데, 이 경도값은 부가된 하중에 대한 면적값으로 표현된다. 하지만, 본 연구에서는 경도값 대신에 압입면적을 표현할 수 있는 압입길이 차이로 결과값을 비교하였다. 압입 시험에 사용된 압입자의 형상은 사면체(berkovich type)이고, Multimode SPM(DI사)에 의해 압입 시험을 수행하고, 이후에 압입된 흔적의 표면형상을 측정한다. 측정된 표면형상으로부터, DI사에서 제공되는 이미지해석 프

로그그램에 의해 압입깊이를 구하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 유한요소해석

열하중에 의해서 기관과 금속 박막에서 발생하는 잔류응력은 시험편에서 발생하는 최대상당응력, 각 층의 길이방향 응력과 전단응력으로 나누어서 분석하였다.

4.1.1 일단 고정지지

열팽창계수 차이로 열하중에 의해 전체구조물이 굽혀지는 현상이 발생하였으며, Si/Au/Cu와 Si/Au/Al 시험편에서는 0.036mm와 0.029mm만큼 처짐이 발생하였고, 잔류변형율은 0.03×10^{-2} mm와 0.38×10^{-2} mm로, Si/Au/Cu인 경우에는 잔류변형율이 매우 낮다. 또한, 발생하는 응력도 전체적으로 밀단 고정지지보다 높게 발생하고 있다.

Fig. 3은 2개의 박막이 동일한 두께로 변화하면서 발생하는 상당잔류응력을 나타낸다. x축은 기관의 두께에 대한 박막의 두께비로 무차원화하여 나타내었다. 두께비가 4×10^{-4} 인 경우에 Si/Cu/Al과 Si/Au/Al로 제작된 시험편에서 가장 높은 상당 잔류응력이 81.9MPa로 발생하였으며, 두께비가 4×10^{-2} 인 경우에 Si/Cu/Al은 63.7MPa이 Si/Au/Al에는 66.7MPa이 발생하므로 두께에 의해서 알루미늄의 변형이 제한되고 있음을 알 수 있다.

그리고 Si/Au/Cu보다 Si/Cu/Au 시험편에서 두께비가 증가할수록 응력값의 감소가 더 크게 발생하나 최소잔류응력은 Si/Au/Cu 시험편에서 두께비가 4×10^{-2} 일 때 6.5MPa이 발생하였다. 반면에 열팽창계수가 큰 알루미늄이 포함된 시험편에서 대체적으로 응력이 크게 나타남을 알 수 있다.

특히, 두번째 층의 박막이 알루미늄인 경우는 첫번째 층 박막의 재료에 관계없이 거의 유사한 응력값을 나타내는 데, 이것은 구리나 금에 비해 상대적으로 큰 열팽창계수가 큰 알루미늄이 잔류응력 값에 지배적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 반면에 알루미늄을 첫번째 층에 사용하고, 두번째 층에 열팽창계수가 낮은 재료를 사용하게 되면, 열에 의한 팽창을 양쪽 면에서 억제하는 효과가 나타나게 된다. 그러므로, 두께비가 4×10^{-4} 인 경우에, 52.0MPa이 발생한 Si/Al/Cu 시험편에서는 Si/Cu/Al 시험편에서 발생한 잔류응력값보다

36.5%가 감소하는 효과를 얻었고, 또한, 두께가 증가할수록 감소비율은 최대 49.6%로 증가함을 알 수 있다.

그리고, 전단잔류응력은 두께비의 증가에 따라서 점차 증가하여, Si/Cu/Al인 시험편에서 두께비가 4×10^{-2} 일 때, 실리콘과 구리 사이의 계면에 최대 2.26MPa이 발생하나 그 값은 작다.

또한, Fig. 4는 금속 박막 각각의 두께변화가 잔류응력값에 미치는 영향을 평가하기 위해, 우선 첫번째 박막의 두께를 5 μ m로 고정하고, 두 번째 박막의 두께를 변화하면서 해석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 대체적으로 동일 두께변화와 유사한 경향을 나타내고 있다. 전체 두께가 동일한 지점(25 μ m)에서 발생하는 응력값은 두 번째 박막의 두께가 변화되는 Si/Al/Au 시험편인 경우에는 47.1MPa이 발생하였고, 동일 두께비에 대한 시험편에서 응력값은 46.44MPa로 조금 낮게 발생하였으나 그 차이는 미비하다. 그리고, 전단잔류응력의 최대는 Si/Cu/Al 시험편에서 3.30MPa로 동일 두께비보다는 증가하였으나 발생하는 값은 매우 작다.

이층박막인 경우에 두 박막의 두께비를 동일하게 제작하는 것보다 하나의 박막 두께만을 증가시키는 것이 제작에 더욱 용이할 것으로 사료된다.

Fig. 5에서는 일단고정지지에서 Si/Au/Al 시험편에 열하중이 가해졌을 때, 발생하는 길이방향의 응력분포도를 나타내고 있으며, 열팽창계수가 큰 금속재료에 의해 아래로 처짐이 발생하고 있다. 길이방향의 응력은 일단 고정되는 지점에서 최대로 -244.3MPa이 발생하였다. 또한, Fig. 6에서는 동일 조건에서 열하중을 제거한 이후에 금속 박막에 남아 있는 상당 잔류응력값을 나타내고 있다. 온도가 낮아지면서, 금속 박막이 수축되어, 시험편이 위쪽 방향으로 변형되었고, 70.7MPa의 인장 잔류응력이 발생되고 있음을 알 수 있다.

4.1.2 밀단 고정지지

대체적으로 알루미늄이 적용된 시험편에서 응력이 크게 발생하고, 동일한 두 박막의 두께가 증가할수록 응력의 변화는 거의 없다. 그리고, 이층박막에서 알루미늄의 위치에 따라 잔류응력값은 상당히 민감하여 증착 순서에 따라 2배 정도의 차이가 발생하였다. 동일 두께를 가진 밀단 고정지지 시험편에 대한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

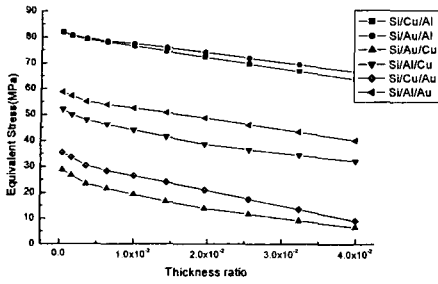


Fig. 3 Residual stress with respect to thin film thickness ratio in each specimen with one edge fixed constraint

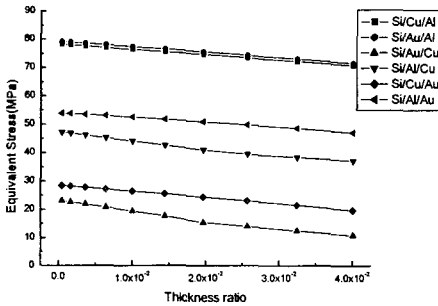


Fig. 4 Residual stress with respect to 2nd thin film thickness ratio in each specimen with one edge fixed constraint

두께비 4×10^{-2} 에서 Si/Cu/AI과 Si/Cu/Au 시험편에서는 58.0MPa과 3.8MPa이 발생하였고, 동일한 두께비를 가진 일단고정지지인 경우는 66.1MPa과 9.1MPa이 발생하여, 각각 12.4%와 58.3%의 잔류응력이 감소하는 현상이 발생되고 있다. 그리고 축방향 잔류응력도 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 첫 번째와 두 번째 박막 각각의 두께를 변화시키면서 수행한 잔류응력값은 두 박막의 두께를 동일하게 증가하였을 때와 거의 동일하게 발생하였다.

전단잔류응력도 두께비가 4×10^{-2} 일 때 Si/Au/AI 시험편에서 최대 2.28MPa이 발생하였다. Fig. 8은 일단 고정 지지된 Si/Au/Cu 시험편에서 두께비가 2×10^{-2} 일 때 상당 잔류응력분포를 나타내고 있다. 최대가 0.58MPa의 상당잔류응력이 발생되므로, 열하중에 매우 안정적이라고 할 수 있다.

4.2 압입 시험

각 시험편에서 발생한 압입 길이를 Table 3에 나

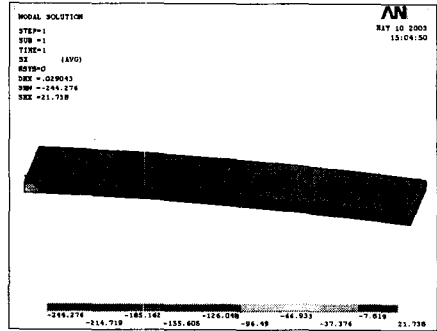


Fig. 5 Longitudinal stress distribution of Si/Au/AI specimen subjected to the thermal load under one edge fixed supporting type

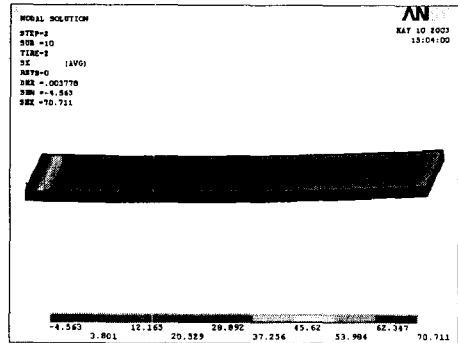


Fig. 6 Longitudinal residual stress distribution of Si/Au/AI specimen removed the thermal load under one edge fixed supporting type

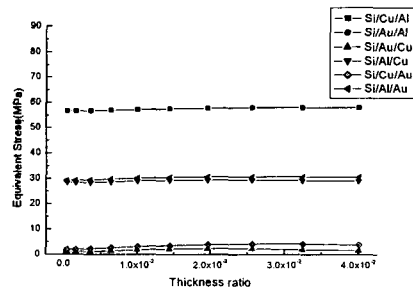


Fig. 7 Residual stress with respect to thin film thickness ratio in each specimen with bottom fixed constraint

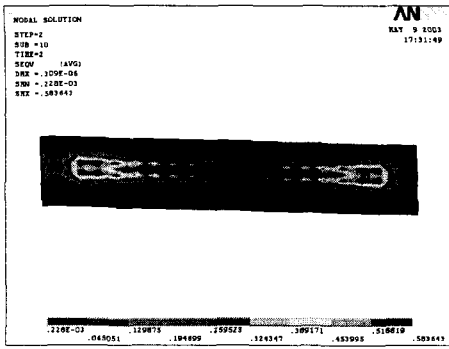


Fig. 8 Equivalent residual stress distribution of Si/Au/Cu specimen removed the thermal load under bottom fixed supporting type

Table 3 The length of indentation induced on each different material

Material	Au-Cu	Al-Cu
NHT	129nm	141nm
One Fixed HT	146nm	165nm
Bottom fixed HT	133nm	152nm

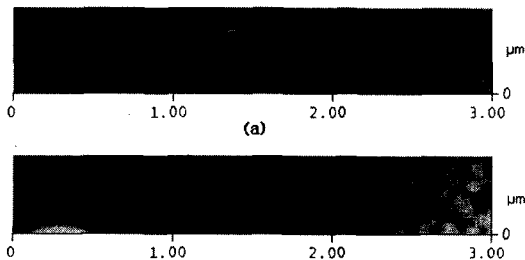


Fig. 9 (a) AFM image^(b) of Indentation on Al-Cu specimen and (b) AFM image of indentation on Al-Cu specimen subjected to the thermal load under one fixed supporting type

타내었다. Si/Al/Cu 시험편인 경우에 열하중을 가하지 않은 시험편에서 수행한 압입 길이가 141nm이고, 일단지지 조건에서는 165nm, 밀단지지 조건에서는 152nm가 발생하였다. Si/Au/Cu 시험편인 경우에는 각각 129nm, 146nm, 133nm가 발생하였다. Si/Au/Cu보다 Si/Al/Cu 시험편에서 초기의 압입 길이는 12nm정도 길다. 하지만, 열하중을 부가한 이후에 Si/Au/Cu 시험편에서 압입 길이의 증가폭은 일단지지 조건에서는 17nm, 밀단지지 조건에서는

4nm이나, Si/Al/Cu 시험편에서는 24nm, 11nm로 거의 2배 정도 크게 발생하여 Si/Al/Cu 시험편에서 큰 인장잔류응력이 발생하고 있음을 알 수 있다.

이러한 이유는 초기 열이 증가될 때는 상대적으로 낮은 실리콘의 열팽창계수로 인하여 박막(알루미늄, 구리, 금)에 압축응력이 발생하고, 또한 압축 응력으로 기인된 압축 소성 변형율이 발생된다. 이후 열이 제거되고 온도가 감소하여 상온으로 유지되면, 온도의 상승에 의해서 생성된 압축소성잔류 변형율이 온도가 낮아지면서 박막에 더 큰 인장응력을 발생시키므로 박막에서는 인장잔류응력이 남게 된다.

압입시험에서 열하중을 가한 시험편은 열하중을 가하지 않은 시험편보다 압입면적이 증가되고 있으며, 특히 밀단지지 조건에서 보다 일단지지 조건에서 큰 압입 길이가 발생되어 유한 요소 해석 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그리고, 시험편 표면에 생성된 클러스터는 추가적인 인장 잔류 응력을 형성할 것으로 사료된다. 하지만, 유한요소 해석에서 Si/Au/Cu 시험편에서 발생된 잔류응력값은 2.25MPa로 매우 낮고, 또한 압입 길이의 증가 폭도 4nm로 낮게 측정되므로, 금속 박막 표면에서 생성된 클러스터에 의한 잔류응력값의 영향은 낮은 것으로 사료된다.

Fig. 9(a)는 열하중을 부가하지 않은 Si/Al/Au 시험편에서 수행한 압입 면적을 나타내고 있으며, Fig. 9(b)는 일단지지 조건에서 열하중이 부가된 시험편에서 압입시험을 수행한 압입면적을 나타내고 있으나, 열에 의해서 시험편 표면에 클러스터가 생성되어 압입 흔적이 명확하지 않았으나, 압입 길이 측정은 수차례의 측정에 얻어진 평균값을 구하여 정확도를 높였다.

5. 결론

MEMS 구조물에서 알루미늄 박막을 증착에 의해서 제작할 때 실리콘 기판과 알루미늄 사이에 열팽창계수의 차에 의해서 발생하는 잔류응력을 최소화하기 위한 연구를 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 일단 고정지지에서는 두께비에 따라 발생하는 상당잔류응력은 선형적으로 감소하고, Si/Au/Cu로 제작된 시험편에서 가장 낮은 잔류응력값을 나타내고 있다.

(2) 밀단 고정지지에서는 박막 두께의 변화에 따른 잔류 응력값은 거의 일정하게 유지되었다. 하지만, 일단고정지지보다 동일 두께비에서 12%정도 낮게 나타나고 있다.

(3) 다양한 지지 조건에서 첫 번째 층을 열팽창 계수가 높은 알루미늄으로 제작하게 되면, 두 번째 층으로 제작한 경우보다 상당 잔류응력은 최대 50%정도까지 감소함을 알 수 있다.

(4) 열하중으로 발생한 인장잔류응력으로 인하여 각지지 조건에서 압입 길이는 증가하였고, 또한 밀단지지 조건보다 일단지지조건에서 압입 길이의 증가폭은 거의 2 배 정도 된다. 또한, Si/Au/Cu 시험편의 경우에는 해석과 동일하게 가장 낮은 압입 길이의 증가폭을 보이고 있으며, 압입 길이의 증가된 값은 열하중에 의한 잔류응력보다 열에 의해 시험편에서 발생된 클러스터에 의한 인장잔류응력으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술부(MOST) 지정 국가지정연구실사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Marc, J. Madou, 2000, *Fundamentals of Microfabrication*, CRC press, New York, pp. 217-274.
- (2) Milton Ohring, 1992, *The Material Science of Thin*

Films, San Diego, Academic Press, pp. 403-449.

- (3) Ming, Q., Poon, M. C. and Yuen, C. Y., 2000, "A Study of Nickel Silicide Film as a Mechanical Material," *Sensors and Actuators*, Vol. 87, pp. 90-95.
- (4) Frans Spaepen and Alison L. Shull, 1996, "Mechanical Properties of Thin Films and Multilayers," *Solid State & Materials Science*, Vol. 1, pp. 679-683.
- (5) Shen, Y. L., 1998, "Stresses, Deformation, and Void Nucleation in Locally Debonded Metal Interconnects," *Journal of Applied Physics*, Vol. 84, No. 10, pp. 5525-5530.
- (6) Spengen, W. M., 2003, "MEMS Reliability from a Failure Mechanisms Perspective," *Microelectronics Reliability*, Vol. 43, pp. 1049-1060.
- (7) Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E., 1998, "A New Method for Estimating Residual Stresses by Instrumented Sharp Indentation," *Acta Mater.*, Vol. 46, No. 16, pp. 5755-5767.
- (8) Young, T. F., Chang, F. and Ueng, H. Y., 1998, "Study on Annealing Effects of Au Thin Films on Si," *Thin Solid Films*, Vol. 322, pp. 319-322.
- (9) Hahn, J. H., Lee, K. R., Kim, K. S., and Lee, S. Y., 2002, "Principal and Application of Nanoindentation Test," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 19-26.
- (10) Lee, Y. H., Jang, J. I. and Kwon, D. I., 2002, "Evaluation of Thin Film Residual Stress through the Theoretical Analysis of Nanoindentation Curve," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 26, No. 3, pp. 1720-1729.