

이종재료를 사용한 다층 박막에서의 잔류응력 평가

심재준*, 한근조#, 김태형**, 안성찬*, 한동섭*, 이성욱*

Evaluation of the Residual Stress on the Multi-layer Thin Film made of Different Materials

Jae Joon Shim*, Geun Jo Han#, Tae Hyung Kim**, Seung Chang Ahn*, Dong Seop Han* and Seong Wook Lee*

ABSTRACT

MEMS structures generally have been fabricated using surface-machining method, but the interface failure between silicon substrate and evaporated thin film frequently takes place due to the residual stress inducing by the applied the various loads. And the very important physical property in the heated environment is the linear coefficient of thermal expansion. Therefore this paper studied the residual stress caused the thermal loads in the thin film and introduced the simple method to measure the trend of the residual stress by the indentation.

Specimens were made of materials such as Al, Au and Cu and thermal load was applied repeatedly. The residual stress was measured by nano-indentation using AFM and FEA. The existence of the residual stress due to thermal load was verified by the experimental results. The indentation length of the thermal loaded specimens increased minimum 11.8% comparing with the virgin thin film caused by tensile residual stress. The finite element analysis results are similar to indentation test.

Key Words : MEMS (미세기전시스템), Thin film (박막), Residual stress (잔류응력), Evaporation (증착), AFM (원자력현미경), Indentation(압입)

기호설명

L_{NTL} = Indentation length of specimen don't applied the thermal load

L_{TL} = Indentation length of specimen applied the thermal load

CTE = coefficient thermal expansion

1. 서론

20세기 집적회로 제조기술의 발전은 전자부품의 크기를 소형화하고, 또한 집적도를 상당히 향상시킬 수 있는 원동력이 되었다. 이러한 집적회로 제조기술은 미세구조물 가공기술에 응용됨으로써 미세기전시스템(MEMS)이 탄생되었다. MEMS 기술로 만들어진 시스템은 수 밀리미터의 크기이지만

· 접수일: 2002년 11월 14일; 게재승인일: 2003년 7월 11일
* 동아대학교 일반대학원 기계공학과
교신저자: 동아대학교 기계공학과
E-mail: gjhan@daunet.donga.ac.kr, Tel: (051) 200-7650
** 경남정보대학 기계자동차산업계열

그 자체로 완전한 시스템이다. 응용 분야는 센서류, 내시경, DNA조작기, 미세 유체 소자(마이크로 성분 분석기), 마이크로 미러, TV Projector 등 여러 곳에 적용되어 사용되고 있다. 이러한 MEMS 구조물을 제작하는 방법은 Surface Micro-machining과 Bulk Micro-machining으로 크게 분류되며, 특히, Surface Micro-machining은 모재의 표면에 박막을 적층하여 3차원형상을 구현하는 방식으로 집적회로 공정과 유사하나 가공소재 및 재료의 특성 차이와 가공하고자 하는 미세구조물의 기하학적인 특징 차이로 많은 문제점이 야기되고 있다.¹⁻³

본 연구에서는 미세가공된 실리콘 박막 구조물에서 열팽창계수의 차이로 인해 실리콘과 박막사이의 계면에서 발생할 수 있는 파손의 원인이 되는 잔류응력을 분석하기 위해서 MEMS 구조물에 많이 사용되는 알루미늄, 구리, 금을 실리콘에 증착하여 시험편을 제작하고, 반복적인 열을 시험편에 부가하여 외부열하중에 의한 잔류응력을 발생시킨다.⁴⁻⁶ 이후, AFM에 의한 압입시험을 수행하여 시험편에 발생한 잔류응력의 경향을 압입 길이의 변화에 의해 측정하였다.⁷⁻¹⁰ 그리고 FEM 해석에서 구해진 결과와 비교분석하여 실제 구조물의 설계를 위한 기초자료로 제공할 수 있도록 하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험편제작

현재 MEMS 구조물에 많이 사용되는 금속은 알루미늄으로 실리콘에 증착하여 적용되지만, 두 재료 사이에는 상당히 큰 열팽창계수의 차이로 인하여 MEMS 구조물에 열이 가해지는 경우에는 접합 계면에 높은 응력이 발생하게 된다. 그러므로, 알루미늄과 실리콘 기판 사이에 나타나는 급격한 열팽창계수의 차이를 완화할 수 있는 구리와 금을 이용하여 1차 증착을 수행하고, 이후 알루미늄으로 2차 증착을 수행한 시험편과, 비교를 위하여 알루미늄만을 이용하여 1차, 2차 증착을 수행한 시험편을 제작하여 Fig. 1에서처럼 모두 세 가지 종류의 시험편으로 제작하였다.

이후 열하중에 의해 시험편에 발생하는 잔류응력의 경향을 분석하기 위해서 일부분의 시험편에 재료적인 반응을 발생하지 않는 100℃의 열을 2시간동안 반복적으로 가함으로써 시험편에 충분히 잔류응력과 잔류변형율이 발생하도록 제작하였다.

이때 증착에 사용된 기계는 basket 방식을 채택한 Jeol사의 JEE-400으로, 재료마다 각각의 basket을 사용하여 오염을 최소화하였다. 증착을 수행하기 전 초기 진공도는 10-5Pa이며, 증착시에는 10-3Pa이하로 유지되었다. 그리고, 세 가지 종류의 재료를 이용하여 시험편을 제작할 때, 두께 측정용 시험편을 같이 제작하여 KLA-TENCOR사의 α -step(AS 500)를 사용하여 박막의 두께를 측정하였으며, 측정된 두께는 Table 1에 나타내었다.

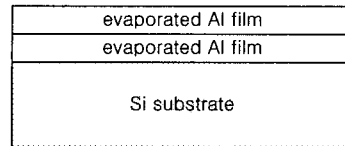


Fig. 1(a) Type A : Specimen shape fabricated using evaporated method

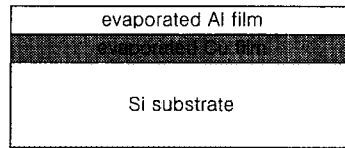


Fig. 1(b) Type B : Specimen shape fabricated using evaporated method

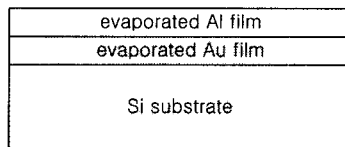


Fig. 1(c) Type C : Specimen shape fabricated using evaporated method

Table 1 The thickness of thin film evaporated by each material

	Al	Cu	Au
1st layer thickness	120nm	85nm	75nm
2nd layer thickness	64nm		
total thickness	184nm	149nm	139nm
substrate thickness	0.55×10^6 nm		

2.2 압입시험

MEMS구조물에 증착되는 다양한 금속재료는 일반적으로 실리콘기판과 비교하면 열팽창계수가 크며, 특히 높은 전기전도도를 가지면서 가격이 저렴한 알루미늄은 실리콘의 약 10배 정도가 되므로, 낮은 열에도 접합된 두 재료사이에는 열팽창계수 차이에 의한 상호구속으로 인하여 박막에는 응력이 발생하게 된다.

그러므로 열하중을 반복적으로 부가하여 잔류응력이 발생되어진 시험편과 열하중을 부가하지 않는 시험편에 압입시험을 수행하여 압입면적, 즉 압입되는 길이를 측정하면 잔류응력의 특성이나 크기에 따라 압입면적이 변하게 된다. 이러한 압입면적의 변화로 잔류응력의 정성적인 특성을 분석한다.

압입자의 간단한 크기와 형상은 Fig. 2에 나타내고 있으며, 압입시험에 사용되는 기기는 DI사의 Multimode SPM을 사용하였다. 그리고, 압입은 세가지 하중으로 동일하게 제작된 세가지 시험편에 대해서 수행하였으며, 얻어진 결과는 9번의 실험에 대한 평균적인 값으로 나타내었다.

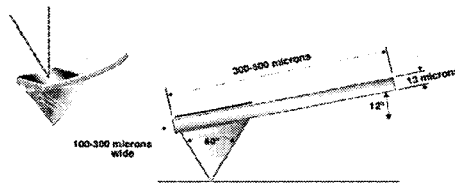


Fig. 2 Dimensions and shape of the Berkovich indenter fabricated with diamond

3 유한요소해석

3.1 유한요소모델 및 재료물성치

8절점 6면체 요소를 사용하여 메시를 수행하였으며, 요소의 형상비에 의한 영향을 최소화하기 위하여 박막의 두께에 대한 메시는 가능한 적게 하였다. 실제 시험에서 제작된 박막의 두께는 재료마다 차이가 있으나, 해석에서는 첫 번째와 두 번째 박막의 두께를 0.05mm(50 μ m)로 동일하게 하고, 실리콘의 치수는 10 \times 5 \times 0.5mm(길이 \times 폭 \times 두께)로 선정한 후, 첫 번째 박막의 재료만 변경하면서, 해석을 수행하여, 두께 차이를 인한 영향을 배제하고 재료의 특성만이 결과값에 반영되도록 하였다. 그리고, ANSYS 5.7으로 재료 비선형 해석을 수행하

였고, 간단한 형상은 Fig. 3에 나타내고 있다. 증착에 사용된 재료의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

증착한 각 계면사이에는 완전히 결합된 것으로 가정하였는데, 이것은 실제 시험에서도 시험편의 표면 처리가 매우 잘되어 증착된 박막이 기판에 잘 접착될 것으로 사료된다.

Table 2 The mechanical properties of each material

	E	poisson's ratio	CTE at 20 $^{\circ}$ C
Si	150GPa	0.17	2.7 \times 10 $^{-6}$ / $^{\circ}$ C
Al	68GPa	0.38	27.4 \times 10 $^{-6}$ / $^{\circ}$ C
Au	77.2GPa	0.42	15.2 \times 10 $^{-6}$ / $^{\circ}$ C
Cu	110GPa	0.343	20.2 \times 10 $^{-6}$ / $^{\circ}$ C

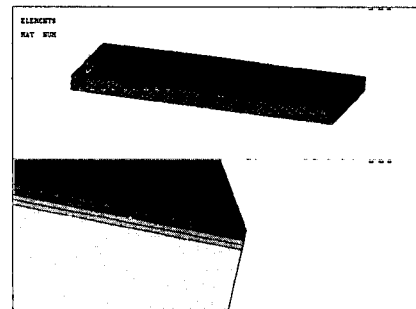


Fig. 3 Finite element model of the specimen coated using different materials

3.2 경계조건 및 하중조건

실리콘의 열전도도는 매우 낮으나 실제 실험에서는 실리콘을 100 $^{\circ}$ C에서 2시간동안 충분한 열로 가열하고, 이후 충분히 냉각하여, 실리콘 전체의 온도가 거의 동일할 것으로 사료된다. 이러한 주기를 5회 반복하였다. 또한, 실리콘 기판에 비해 박막의 두께차이는 매우 크므로, 고온에서의 실리콘 기판 온도와 증착한 재료의 온도는 동일할 것으로 사료된다. 따라서, 해석에서는 실리콘과 박막 모두가 동일하게 100 $^{\circ}$ C까지 가열되는 것으로 하중조건을 부과하여 해석을 수행하였다. 그리고, 경계조건은 기판의 밑단을 움직임이 없도록 완전 고정하여, 해석을 수행하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 압입시험

일반적으로 압입시험에서 구하는 값은 경도값인데, 이 경도값은 부가된 하중에 대한 면적값으로 표현된다. 압입자의 형상이 Berkovich이고, Fig. 4에는 압입자의 형상을 간단하게 나타내고 있다. 그리고, Fig. 5에는 AFM(원자력현미경: Atomic Force Microscope)을 이용하여 다양한 하중에 의해 압입된 흔적의 표면형상을 측정한 이미지를 나타내고 있다. Fig. 5(a)는 열처리를 수행하지 않은 Al-Au 시험편을 나타내고 있으며, Fig.5(b)에는 열처리를 수행한 Al-Cu 시험편이다. 모두 세가지의 하중 조건으로 압입된 것을 알 수 있으며, 길이측정은 DI사에서 제공되는 이미지해석 프로그램으로 측정하였다.

특히 본 연구에서는 세가지 하중조건중 압입길이 200nm 근방에서 측정되는 가장 작은 하중조건에 대해서 연속적인 시험을 수행하였다.

열하중을 가하지 않은 시험편에서는 모재의 강성도에 따라서 압입길이도 구리에서 가장 작게 나타나고 있으며, 알루미늄을 증착한 시험편에서 가장 크게 나타나고 있다. 그리고, 열하중을 가한 시험편이 열하중을 가하지 않은 시험편보다 전체적으로 26~54nm만큼 압입길이가 크게 발생하였으며, 특히 Al-Cu 박막의 가진 시험편에서 가장 큰 차이가 발생하였다. 이것은 열처리에 의해서 Al-Cu 시험편에서는 클러스터(Cluster)가 형성되어, 열하중에 의해서 발생한 값보다 큰 인장잔류응력이 형성된 것으로 사료된다. 이상과 같이 시험에 대한 변수는 시험편에 가해지는 열하중밖에 없으며, 또한 실제 압입과 관련된 두 번째 층의 두께가 동일하므로 잔류응력은 증착된 재료의 두께보다는 순수하게 재료적인 특성에 의해 발생하는 것으로 사료됩니다.

압입시험에서 열하중을 가한 시험편은 열하중을 가하지 않은 시험편보다 압입면적이 증가되는데, 이러한 이유는 초기 열이 증가될 때는 상대적으로 낮은 실리콘의 열팽창계수로 인하여 박막(알루미늄, 구리, 금)에 압축응력이 발생하고, 또한 압축응력으로 기인된 압축 소성 변형율이 발생된다. 이후 열이 제거되고 온도가 감소하여 상온으로 유지되면, 온도가 상승되면서 생성된 압축소성잔류변형율은 온도가 낮아지면서 박막에 더 큰 인장응력

을 발생시키므로 박막에서는 인장 잔류응력이 남게 되어, 압입시 더 큰 압입면적이 생성된 것으로 사료된다.

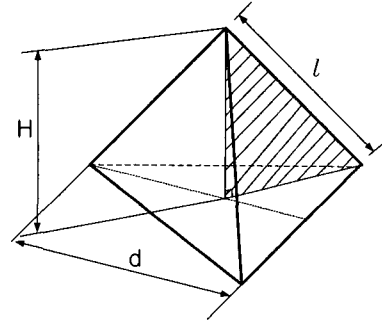


Fig. 4 A three spaces prism shape to calculate the relationship between height, length and indentation area

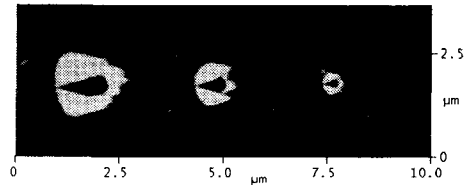


Fig. 5(a) AFM image of Al_Au specimen indented by berkovich shape nano-indenter which don't applied the thermal load

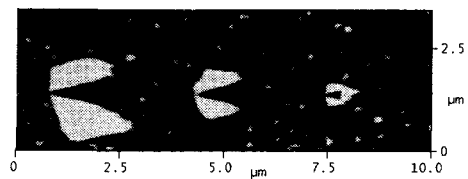


Fig. 5(b) AFM image of Al_Cu specimen indented by berkovich shape nano-indenter applied the thermal load

Table 3 The length of indentation induced on each different material

Material	Al-Au	Al-Al	Al-Cu
L_{NLT}	220nm	241nm	212nm
L_{TL}	246nm	276nm	266nm
$L_{TL}-L_{NLT}$	26nm	35nm	54nm

4.2 유한요소해석

해석에서 구해진 결과값은 열하중이 부가되었을 때 발생하는 길이방향 응력과 전단응력으로 나타내었다.

4.2.1 Type A (Al-Al-Si substrate)

알루미늄을 사용하여 박막을 증착한 Type A의 시험편은 고온(100℃)에서 -168.87MPa의 압축응력이 발생하였고, 실리콘 기판에서는 91.84MPa의 인장응력이 발생되었다. 알루미늄에서 발생한 응력은 항복강도인 35MPa보다 높게 발생하여 충분히 압축소성변형율이 발생할 것으로 사료된다. 또한 알루미늄과 실리콘 기판의 계면에서 발생하는 최대전단응력은 29.02MPa로 비교적 낮게 발생하였으므로, 계면에서 이탈은 없을 것으로 예상된다.

4.2.2 Type B (Al-Cu-Si substrate)

알루미늄과 실리콘 기판사이에 구리를 증착한 Type B 시험편에서는 알루미늄에서 -148.62MPa의 압축응력이 발생하였으며, 1차증착된 구리에서는 -297.23MPa의 큰 압축응력이 발생하였다. 실리콘 기판에서는 111.64MPa이 발생하여, 다른 두 종류보다 큰 인장응력이 작용하고 있다. 이것은 구리가 알루미늄보다 낮은 열팽창계수를 가지고 있으나 재료자체가 알루미늄보다 강성도가 높으므로 열하중에 의해서 발생하는 동일한 변형에 의해서 기인되는 응력도 증가된 것으로 사료된다.

그리고 발생하는 압축응력은 알루미늄만으로 사용한 시험편보다 더욱 큰 압축잔류 소성응력이 발생할 것으로 사료된다. 또한, 구리와 실리콘 기판의 계면에서 발생하는 전단응력은 36.24MPa이 발생하였고, 알루미늄과 구리사이에서 발생하는 전단응력은 10.71MPa로 알루미늄보다 60%정도 감소되었으나, 실리콘 기판과 구리사이에서 가장 큰 전단응력이 발생하였다. 하지만, 높은 항복응력을 가지는 구리에서 발생하는 길이 방향응력의 증가는 파손에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 사료되나, 실제 중요한 전단응력에 의한 구리박막의 박리현상에 상당한 영향을 받을 것으로 나타났다. 하지만 구리와 알루미늄 재료 사이에서 발생하는 박리에는 상당히 효과가 있다.

Fig. 6에서는 길이방향(x)에 따라 발생하는 응력값을 나타내고 있다. 두 박막사이에 응력값이 뚜렷하게 차이가 나타나고 있으며, Al-Cu인 경우에 Cu

층에서 더 큰 응력이 발생하고 있다.

4.2.3 Type C (Al-Au-Si substrate)

금을 알루미늄과 실리콘 기판 사이에 증착한 Type C 시험편에서의 결과는 2차 증착한 알루미늄에서 -168.22MPa이 발생하였으며, 또한 1차증착을 수행한 금에서는 -157.70MPa이 발생하였고, 실리콘 기판에서는 73.56MPa이 발생하였다. 순수 알루미늄만으로 증착한 시험편보다 기판에서는 18.3MPa, 알루미늄에서는 약 0.6MPa 정도 낮게 발생하였다. 이것은 구리보다 낮은 강성도를 가지는 금이 알루미늄의 열변형을 제한하지 못하고 같이 변형하는 것으로 사료된다.

금과 실리콘 기판의 계면에서 발생하는 전단응력은 27.85MPa로 가장 낮게 발생하였으며, 또한 동일하게 알루미늄과 구리사이에서 발생하는 전단응력도 10.17MPa로 다른 재료보다 낮은 값이 발생되었다. 따라서, 첫 번째 층에 알루미늄보다 열팽창계수가 낮고, 낮은 강성도를 가진 재료로 설정하면, 알루미늄에서 발생하는 응력은 증가되나, 각 층에서 발생하는 전단응력을 최소화시킴으로서 층간 박리현상을 억제시키는 효과가 있을 것으로 사료된다.

Fig. 7은 Al_Au 시험편에서 x방향에 따라 발생하는 응력값을 나타내고 있으며, 양 끝단에서 최대응력값이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 8과 9에는 각 시험편의 기판과 각각의 박막에 발생하는 길이방향의 최대응력과 최대 전단응력을 나타내고 있다.

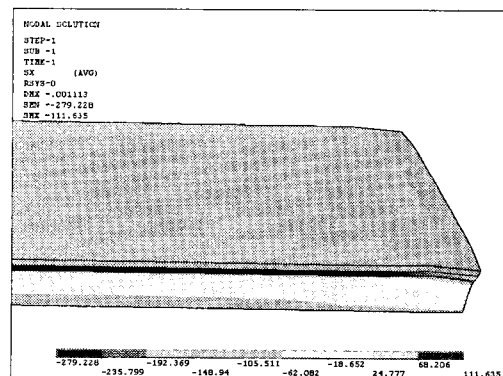


Fig. 6 Stress distribution to X-direction in the Al-Cu specimen applied the thermal load

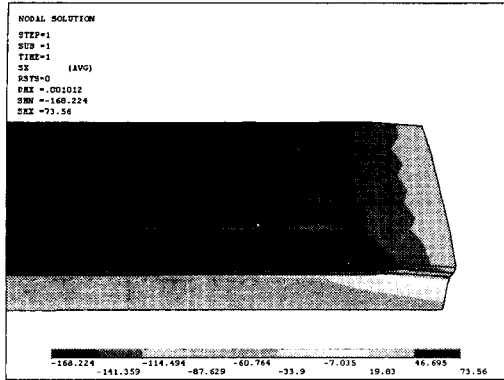


Fig. 7 Stress distribution to X-direction in the Al-Au specimen applied the thermal load

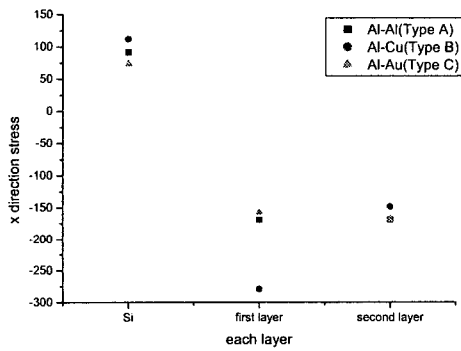


Fig. 8 X-direction stress and shear stress value in each material applied the thermal load

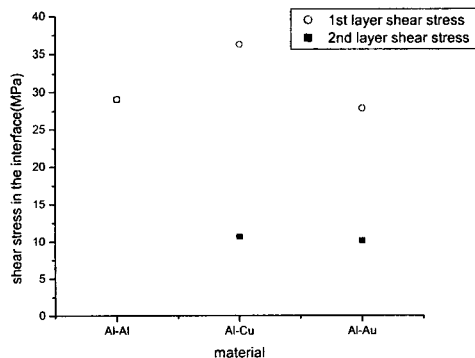


Fig. 9 Maximum shear stress in the interface between substrate and difference materials applied the thermal load

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. 압입시험을 수행한 결과 열하중으로 발생한 인장 잔류 응력으로 인해, 열하중을 받은 시험편에서의 압입 길이는 제작된 순수 시험편에 비해 최소 11.8%에서 최대 25.5%까지 넓게 발생하였다.

2. 실리콘 기판에 알루미늄을 증착할 경우보다 금을 1차 증착하고 이후에 알루미늄을 2차 증착을 수행한 시험편에서 압입길이는 약 25% 낮게 나타났다. 하지만, 유한요소해석에서는 열하중에 의해서 발생하는 길이방향응력은 거의 유사하게 발생하였으나, 알루미늄과 금의 계면에서 발생하는 전단응력은 60% 감소하였다.

3. 알루미늄보다 낮은 열팽창계수를 가진 구리를 1차증착, 이후에 알루미늄으로 2차 증착을 수행하면 구리가 알루미늄보다 강성도가 2배정도 높으므로 구리에서 길이방향의 응력은 65.4%정도 높게 발생하였으나, 알루미늄에서의 응력은 12.1%정도 낮아짐을 알 수 있다.

4. 박막을 이용한 3차원구조물을 생성하기 위해 구리와 같이 높은 강성도를 가진 재료는 강건한 3차원 MEMS 구조물을 형성할 수 있지만, 각 박막 사이에서 열팽창계수의 차이로 인해 발생하는 응력들은 증가된다. 하지만, 금과 같이 강성도와 열팽창계수가 알루미늄보다 낮은 재료를 사용하면, 열하중에 의해서 발생하는 응력들은 감소하고, 특히 박막들 사이에서 발생하는 박리현상의 원인인 전단응력의 감소가 뚜렷하여 층간 박리 현상에 완충효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 동아대학교 지능형 통합항만관리연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Milton Ohring, The Material Science of Thin Film, Academic Press, pp. 79-449, 1992.

2. Marc Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, CRC press, pp. 217-274, 1995.
3. Frans Spaepen and Alison L. Shull, "Mechanical Properties of Thin Films and Multilayers," *Solid State & Mater. Sci.*, No. 1, pp. 674-683, 1996.
4. Zhang, X., Zhang, T. Y., Wong, M. and Zohar, Y., "Residual-Stress Relaxation in Polysilicon Thin Films by High-Temperature Rapid Thermal Annealing," *Sensors and Actuators A:Physical*, pp. 109-115, 1998.
5. Kim, Y. M. and Choo, S. H., "Measurements of Residual Stress in the Thin Film Micro-Gas Sensors Containing Metallic Layers," *Thin Solids Films*, No. 934, pp. 284-291, 2001.
6. Baek, C. W. and Ahn, Y. M., "Residual Stress Measurement of Micro Gold Electroplated Structure," *J. of the KSPE*, Vol. 17, No. 12, pp. 195-200, 2000.
7. Suresh, S., and Giannakopoulos, A. E., "A New Method for Estimating Residual Stresses by Instrumented Sharp Indentation", *Acta Mater.*, Vol. 46, No. 16, pp. 5755-5767, 1998.
8. Larsson, P. L. and Giannakopoulos, A. E., "Analysis of Berkovich Indentation," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 33, No. 2, pp. 221-248, 1996.
9. Hahn, J. H., Lee, K. R., Kim, K. S. and Lee, S. Y., "Principal and Application of Nanoindentation Test," *J. of the KSPE*, Vol. 19, No. 3, pp. 19-26, 2002.
10. Gouldstone, A., Koh, H. L., Zeng, K. Y., Giannakopoulos, A. E. and Suresh, S., "Discrete and Continuous Deformation during Nanoindentation of Thin Films," *Acta Mater.*, pp. 2277-2295, 2000.