

반도체센서 압저항 측정을 위한 4점 굽힘 프로브 스테이션

전지원 · 권성찬 · 박우태[†]

서울과학기술대학교 기계 · 자동차공학과

A Four-point Bending Probe Station for Semiconductor Sensor Piezoresistance Measurement

Ji Won Jeon, Sung-Chan Kwon and Woo-Tae Park[†]

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-Gu, Seoul 139-743, Korea

(2013년 12월 5일 접수: 2013년 12월 20일 수정: 2013년 12월 26일 게재확정)

초 록: 반도체센서의 응력에 따른 전기적 특성을 프로브 스테이션 위에서 측정하기 위해 소형 4점 굽힘 장치를 개발하였다. 4점 굽힘 장치는 $60 \times 83 \text{ mm}^2$ 의 면적을 갖는 소형 장치로 마이크로미터를 통해 정확한 변위를 인가함으로써 가해진 응력을 구할 수 있다. 유한요소해석법을 사용하여 기기의 오차를 예측하고 정밀도를 향상하였다. 실험적으로는 4점 굽힘 장치로 인가된 응력을 검증하기 위해 스트레인 게이지로 검증하였다.

Abstract: A four point bending apparatus has been developed to measure semiconductor sensor piezoresistance inside a four inch probe station. The apparatus has a footprint of $60 \times 83 \text{ mm}^2$ and can apply $10 \mu\text{m}$ displacements using a vertical micrometer stage. We used finite element analysis to predict and improve the accuracy of the instrument. Finally strain gauge attached on a silicon test piece was used to experimentally verify the setup.

Keywords: Piezoresistance, Semiconductor sensor, 4 point bending, packaging

1. 서 론

전도성 재료가 압축 또는 인장응력을 받을 때 재료의 저항이 바뀐다. 금속재료는 재료형상의 변화에 대한 저항변화만 있지만, 대표적인 반도체 재료인 실리콘은 저항도(resistivity)가 변화함에 따라 금속재료보다 2-30배 높은 저항변화, 즉 민감도를 가진다.¹⁾ 실리콘 이외에도 그 래핀과 같은 재료도 응력에 따른 저항변화로 센서재료로 검토되고 있으며²⁾, 반도체 패키징 및 유연회로의 발달과 함께 회로 및 패키징에 쓰이는 재료의 응력에 따른 저항 변화의 특성을 정확하게 파악할 필요가 있다. 재료에 인가된 응력에 따른 저항의 변화를 알기 위해서는 정확한 굽힘 값과 응력 값을 알아야 한다. 본 연구에서 4점 굽힘 실험 장치는 이러한 필요를 충족시켜준다. 4점 굽힘장치는 가운데에 두 점 사이에 균일한 단축응력을 가하게 하는 장치이다.³⁾⁴⁾ 반도체 재료의 응력에 따른 저항변화를 측정하기 위해 맞춤형 4점 굽힘장치를 개발한 예는 있었

지만⁵⁾⁶⁾, 프로브 스테이션과 같이 사용하기에는 크기가 너무 크거나⁵⁾, 추를 사용하여 힘을 가함으로써 불연속적인 데이터를 얻을 수 밖에 없었다.⁶⁾ 본 연구에서는 소형 수직방향 마이크로미터로 구동되는 스테이지를 이용하여 4점 굽힘장치를 $60 \times 83 \text{ mm}^2$ 의 작은 크기로 4인치 프로브 스테이션에서도 사용할 수 있도록 고안되었다.

2. 실험장치

소자의 응력에 따른 저항값의 변화를 측정하기 위하여 시편에 응력을 가하면서 전기적 특성을 측정하여야 한다. 하지만 작은 크기의 시편을 전기적인 패키징없이 저항을 간편하게 측정하기 위해서는 probe station을 이용하여 측정하여야 한다. 시편에 응력을 가할 기구로서 4점 굽힘(4 point bending) 기기를 사용하였다. Fig. 1에서 보이듯이 4 point bending 기기는 안쪽의 지지대 2개 바깥쪽 지지대 2개로 구성되어 있으며, 안쪽이나 바깥쪽의 2개의 지지대

[†]Corresponding author
E-mail: wtpark@seoultech.ac.kr

© 2013, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

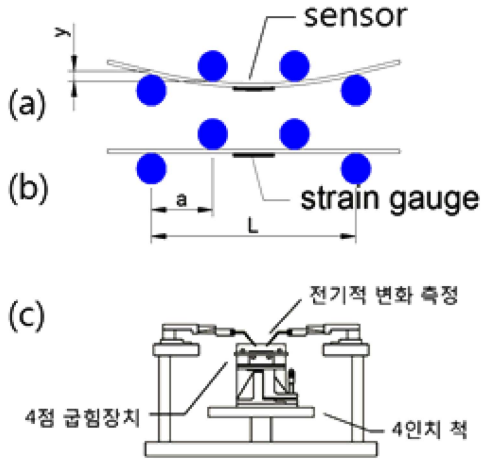


Fig. 1. (a) Specimen being stressed by the 4-point-bending set up. (b) Specimen before being stressed. (c) Illustration of 4-point-bending set up being used inside a 4 inch probe station.

를 z축 방향으로 움직여 시편에 응력을 가하는 기구이다. 우리는 4 inch-size의 probe station chuck에 올리기 위하여 가로 80 mm, 세로 84 mm이고 높이 109 mm인 4 point bending 기구를 만들었다. 4인치 프로브 스테이션의 chuck의 크기는 4인치 웨이퍼를 위한 크기로 지름이 154 mm이었다. 따라서 가로 80 mm, 세로 84 mm인 4점 굽힘 실험기가 chuck안에 잘 맞으며 더 큰 chuck에도 맞게 사용할 수 있다.

실험기기의 body는 가공성을 위해 알루미늄, 지지대는 알루미늄보다 마찰이 적고, 강성이 높은 stainless steel로 구성되어 있다. 지지대는 지름이 5 mm인 원형 봉을 사용하였으며 바깥쪽의 지지대의 사이의 거리는 35 mm이며, 안쪽 지지대의 사이의 거리는 14 mm이며 안쪽지지대는 좌우로 움직일 수 있게 하여 기기 제작에 따른 오차를 조정할 수 있도록 설계하였다. 바깥 지지대 사이의 거리가 35 mm이기 때문에 시편의 길이가 적어도 35 mm 이상이어야 사용이 가능하다. 시편의 두께는 0.675 mm로 6인치 웨이퍼를 사용하였다. z축 방향으로 움직일 수 있는 stage는 thornlabs MVS005 Vertical-Axis Positioning Stage를 사용하였으며, z축 방향으로 한 눈금 당 10 μm 움직일 수 있으며 최대 13 mm 움직일 수 있다. 가운데의 두 개 지지대는 시편 밑에 있으면 인장응력을 가할 수 있고, 위에 있으면 압축응력을 가할 수 있도록 설계되었다. 응력을 가할 수 있는 변위는 고정되어 있는 지지대를 기준으로 stage를 이용하여 인장, 압축 방향으로 각각 6.5 mm씩 시편에 변위를 가할 수 있다.

가하여진 응력 값이 신뢰성이 있는 지를 판단하기 위하여 시편에 스트레인 게이지를 붙여 이론 응력 값과 비교하였다. strain gauge(HBM사)의 저항은 $350\Omega \pm 0.35\%$ 이고 gage factor가 $1.99 \pm 1.0\%$ 인 3/350 LY41-L-1M, 제품을 사용하였다. strain gauge의 변화하는 저항을 전압의 변화로 변환하기 위해 2개의 330Ω 저항과 2개의 20Ω을 사

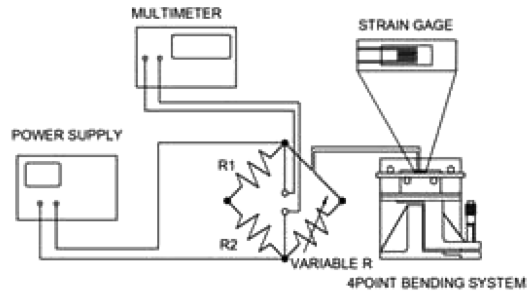


Fig. 2. Electrical measurement set up for semiconductor sensor 4 point bending system.

용하여 350Ω 저항을 만들고 462Ω 가변 저항을 이용하여 휘트스톤 브리지를 만들었다. 휘트스톤 브리지에 가하는 전압은 직류전압공급기인 proteck사의 PL-3003D 제품을 사용하였다. 전압값은 Agilent사의 34411A 디지털 멀티미터를 사용하였다. 본 실험의 전기적 측정 셋업은 Fig. 2와 같다.

재료의 굽힘 이론으로 주어진 변위를 알고 있을 때 아래의 식을 이용하여 굽힘 응력을 구할 수 있다.⁷⁾

$$\sigma = \frac{12Eyt}{4a^2 - 3L^2} \quad (1)$$

a는 두 안쪽 지지대사이의 거리, L은 두 바깥 지지대 사이의 거리, t는 실리콘웨이퍼의 두께이다. E는 Young's modulus ($E = 168 \text{ GPa}$ for Silicon [110] direction⁸⁾)이며, y는 안쪽 두 개의 지지대의 이동거리이다.

3. 유한요소 해석을 통한 오차해석

유한 요소 해석법의 tool로 Comsol multiphysics 4.3을 사용하였다. 먼저 4 point bending 기구의 지지대들과 실험에 사용될 시편을 형상화 하였다. 형상화 된 모델에 재료의 특성을 부여하고 mesh를 만들었다. 경계 조건으로는 지지대 역할을 하는 원형 봉에는 롤러 형식을 하고, 응력을 가하는 지지대에는 z축 방향으로 30 μm의 변위를 주어 응력을 가하였다. 시뮬레이션으로 구해진 응력값과 실제 stage를 사용하여 실험으로 구하여진 응력 값을 비교하여 실험값의 신뢰성이 얼마나 있는지 확인할 수 있었다.

우선 Fig. 3에서 보이듯이 Comsol 시뮬레이션과 이론식 (1) 과의 결과를 비교하기 위해 30 μm의 변위를 가하여 결과를 비교해본 결과, 내부 지지대 사이의 표면에서의 최대응력이 14.95 MPa (시뮬레이션)과 14.80 MPa (이론식) 로 1% 이내의 오차를 보였다. 이로서 시뮬레이션이 이론식과 일치함을 보였다.

다음은 시뮬레이션 Tool을 사용하여 시험기구의 제작과 시험방법에 따른 각종 오차들을 예측하고 각각 다른 오차 원인에 따른 상대적인 오차량을 비교하기 위하여 시

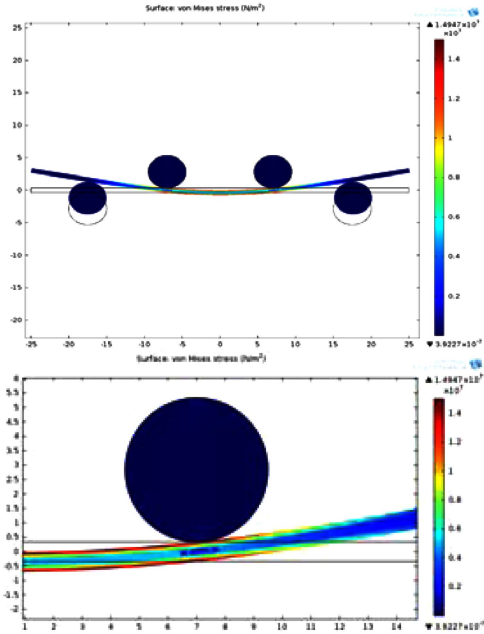


Fig. 3. Simulating the 4 point bending setup using Comsol multiphysics 4.3. The surface stress between the inner shafts is constant.

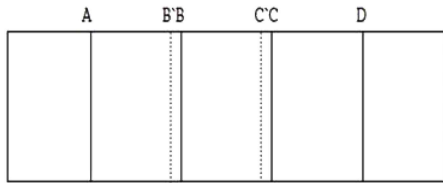


Fig. 4. The definition of ‘distance error’. The inner shafts can be shifted by distance (B-B’) due to setup error.

플레이션을 하였다. 그리하여 실험시에 가장 큰 오차의 원인부터 제거하여 오차를 최대한 줄이는 데에 목적이 있었다.

3.1. 거리 오차(Distance Error)

여기서 거리오차는 내부지지대와 외부지지대 사이의 거리(Fig. 1에서 ‘a’)의 오차를 말한다. 이는 다시 Fig. 4에서 A와 B 또는 B'과의 거리를 말한다. 시험기의 제작에 따른 A와 B사이의 거리오차를 줄이기 위하여 본 시험기는 내부지지대가 미세하게 조정하도록 제작되어 실험 바로 전에 버니어캘리퍼스로 측정을 하고 조정하여, 실험할 수 있도록 제작하였다. 실험 전에 시뮬레이션 툴로 거리오차에 따른 오차율을 모사해본 결과 Table 1과 같았다. 결과에서 보이듯이 지지대의 이동에 따라서 비례적으로 오

Table 1. Error due to ‘distance error’.

안쪽 지지대의 이동 (B-B')	Δ 응력값 (MPa)	오차 (%)
15 μ m	14.99	0.30
30 μ m	15.04	0.63

Table 2. Error due to ‘distance error’

지지대의 회전(θ)	Δ 응력값(MPa)	오차 (%)
0.1도	15.4	2.90
0.2도	16.4	9.59

차가 증가함이 보이나, 오차는 이후 소개하는 각도오차보다는 적다는 것을 보였다.

3.2. 각도 오차(Angle Error)

4-point bending에서 안쪽 지지대사이의 거리를 버니어캘리퍼스로 측정해본 결과 수평 어긋남의 오차가 나타났다. 어긋남으로 인하여 A와 B사이의 거리(x)가 양 끝단에서 30 μ m의 차이가 나타났고 지지대의 거리 y = 65.21 mm 로써 $\tan^{-1}\theta$ 값을 이용하여 θ 값을 측정해 보았을 때 $\tan^{-1}(0.03 \div 65.21) = 0.02636^\circ$ 의 어긋남 오차를 보이게 되었다.

따라서 수평 어긋남에 따른 변화를 알아보기 위해서 comsol multi physics 4.3 시뮬레이션 tool을 이용하여 한쪽의 바깥지지대의 ‘각도오차’에 따른 오차를 분석해 보았다. 분석에 사용한 각도오차의 정의는 Fig. 5와 같다.

한쪽 지지대가 0.1°의 회전을 할 때 변한 응력 값은

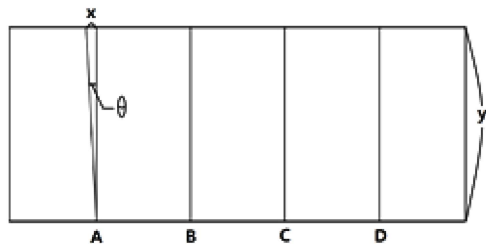
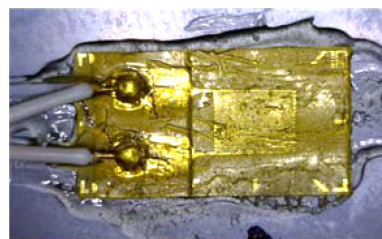
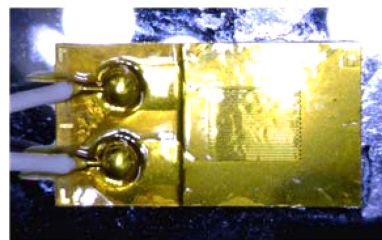


Fig. 5. The definition of ‘angle error’. One shaft at point A is tilted by a degree of θ .



(a)



(b)

Fig. 6. Error due to wrong attachment of the strain gauge to the sensing surface. (a) Attachment of strain gauge number 3, and (b) strain gauge number 5.

15.381 MPA이었고 2.9036%의 오차를 나타내었다. 지지대를 0.2° 회전하였을 때는 16.381 MPA의 응력변화 값을 나타내었고 9.5939%의 오차 값을 나타내었다. 이로서 상대적으로 ‘거리오차’ 보다는 ‘각도오차’에 따른 오차가 더 크게 나타난다는 결과를 알 수 있었다.

3.2. 시편부착에 따른 오차(Attachment Error)

Fig. 6은 실험하고 있는 시편 중 에폭시가 잘 붙여지지 않은 3번 스트레인 게이지(Fig. 6a)와 에폭시의 종류를 바꾸어서 붙인 5번 스트레인 게이지를 비교한 사진(Fig. 6b)이다. 사진에서 볼 수 있듯이 에폭시가 잘 붙여지지 않은 스트레인 게이지에는 에폭시와 스트레인 게이지 사이에 공기로 인한 빈공간이 생기게 되고, 또한 두꺼운 에폭시로 인하여 생기는 오차가 원인으로 분석된다. Fig. 6b에서 보이듯이 스트레인 게이지 5는 HBM사의 단일형 접착제(저온 경화 접착제) Z70을 사용하여 실험을 하였다. 같은 실험조건에서 3번 strain gage는 38.92502%의 오차를 5번 strain gage에는 27.46083%의 오차 값을 보였다. 부착방법의 개선으로 인해 오차를 11.464% 줄일 수 있었다.

4. 응력 측정

스트레인 게이지를 시편에 부착하여 측정된 실험결과

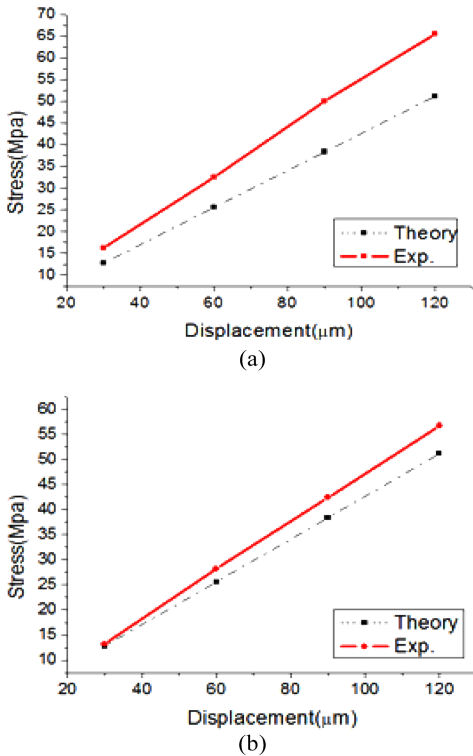


Fig. 7. Error reduction by improving the alignment of the sample to the 4 point shafts. (a) sample situated roughly at the middle of the pressing shafts. (b) sample pressed to the end of the shafts to ensure the orthogonal angle between the sample and shafts.

값을 인가된 변위에 따른 이론 응력값과 비교하여, 4점 굽힘 장치의 변위에 따른 응력 값이 정확한지 검증하는 역할을 하였다. 우선 시편부착에 따른 오차를 최대한 줄이기 위해 스트레인 게이지 전용 접착제와 올바른 부착법을 사용하여 스트레인 게이지를 시편에 부착하였고, 오차분석에서 본 바와 시편과 지지대 사이의 각도가 가장 큰 오차를 생기게 하기 때문에 시편정렬에서 오차를 줄이는 데 노력을 했다. 이를 위해 시편을 지지대 안쪽 벽에 밀착시켜서 시편 정렬에 따른 오차를 줄였다. 이 결과는 Fig. 7에서 보이듯이 3배이상 오차를 줄일 수 있었다.

초기 실험결과 ~10% 정도까지 실험값과 이론값의 오차를 보였다. 오차분석을 통하여 바깥지지대의 수평도에 대한 오차, 4개의 지지대의 평행도에 대한 오차, 부품의 정확한 체결에 따른 오차, 그리고 스트레인 게이지 부착에 따른 오차, 등의 오차들을 최소화 하였다. 그 결과 Fig. 8에서와 같이 strain gage를 이용하여 측정된 측정값과 실리콘의 물성치를 이용하여 알아낸 이론값과 2%이내의 오차율을 보였다.

5. 결 론

우리는 반도체센서 측정을 위하여 4점 굽힘 실험을 하였다. Fig. 9는 실제 4인치 프로브스테이션 위에서 본 연

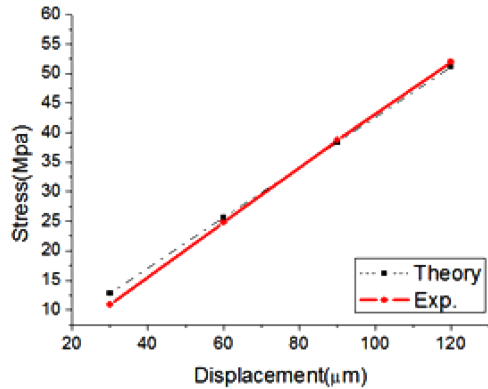


Fig. 8. Stress versus Displacement graph. Theory stress data is obtained from calculation from the input displacement. Stress data measured by the strain gage are the experiment data. The displacement increment was 30 μm.

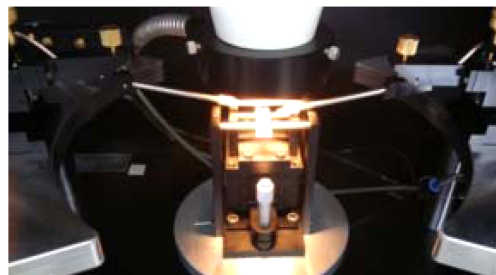


Fig. 9. Photo of measuring the piezoresistance of a semiconductor sensor sample using the four point bending probe station.

구 실험장치를 이용하여 시편을 측정하는 사진이다. 변위에 따른 응력 값을 알아내서 궁극적으로는 응력에 따른 저항의 변화 값을 측정하는 것이 목적이다. 그러기 위하여 4점 굽힘 장치를 제작하였고 strain gage를 이용하여 4점 굽힘 장치의 정밀도를 검증하였다. 결과적으로 유한 요소법과 비교하였을 때 2%이내의 오차 값을 가질 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행 되었습니다.

참고문헌

1. A.A. Barlian, W.-T. Park, J.R. Mallon, A.J. Rastegar Jr and B.L. Pruitt, "Review: semiconductor piezoresistance for microsystems", Proc. IEEE, 97 513 (2009).
2. S.H. Bae, *et al.*, "Graphene-based transparent strain sensor", Carbon, 51, 236 (2013).
3. J.-K. Kim, E.-K. Lee, M.-S. Kim, J.-H. Lim, K.-H. Lee, and Y.-B. Park, "Interfacial Adhesion Energy of Ni-P Electroless-plating Contact for Buried Contact Silicon Solar Cell using 4-point Bending Test System", J. Microelectron. Packag. Soc., 19(1), 55 (2012).
4. J.-W. Kim, K.-S. Kim, H.-J. Lee, H.-Y. Kim, Y.-B. Park, and S. Hyun, "Characterization and observation of Cu-Cu Thermo-Compression Bonding using 4-point bending test system", J. Microelectron. Packag. Soc., 18(4), 11 (2011).
5. E. Lund, T.G. Finstad, "Design and construction of a four-point bending based set-up for measurement of piezoresistance in semiconductors" Rev. Sci. Instrum. 75, 4960 (2004).
6. H. Chung, C.-P. Tang, Y.-C. Chao, K.-F. Tseng, B.-J. Lwo, "Calibrate MOSFET Micro-Stress Sensors for Electronic Packaging", Proc. Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), Singapore, 650 (2008).
7. R.E. Beaty, R.C. Jagger, J.C. Suhling, R.W. Johnson, R.D. Butler, "Evaluation of piezoresistive coefficient variation in silicon stress sensors using a four-point bending test fixture", IEEE Trans. Compd. Hybrids Manuf. Technol. 15, 904 (1992).
8. M.A. Hopcroft, W.D. Nix, and T.W. Kenny, "What is the Young's Modulus of Silicon?", J. Microelectromech S. 19(2), 229 (2010).