

X선 회절법을 이용한 p+ 실리콘 내 잔류응력의 깊이 방향 분포 추정

정 옥 찬, 양 의 령, 양 상 식
이주대학교 제어계측공학과

Determination of the Residual Stress Distribution along the Depth of p+ Silicon by XRD Method

O. C. Jung, E. H. Yang, and S. S. Yang

Department of Control and Instrumentation Engineering AJOU University

Abstract - X-Ray Diffraction method that gives direct information about the deformation of crystal lattice is used for the determination of profiles of the residual stress along the depth of heavily boron doped silicon. The residual stress distribution is obtained by XRD method as measuring the deformation of the front surface of the p+ silicon layer fabricated through different etch time. It is determined that the compressive residual stress exists in the most region except the front surface.

1. 서론

마이크로 전자기계시스템의 발달과 함께 마이크로 소자의 제작에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1~5] 마이크로 소자의 제작공정은 대개 박막의 증착, 불순물의 확산, 그리고 식각 등으로 이루어진다. 이러한 공정 도중 서로 다른 종류의 박막 또는 불순물들간의 열팽창 계수 등 기계적 성질의 차이로 인하여 잔류응력이 발생하게 된다.[6~10] 박막 내부에 존재하는 잔류응력은 마이크로 소자의 동작특성에 영향을 미치게 된다.[11]

최근에 외팔보 구조와 회전 구조를 이용한 박막의 잔류응력의 두께 방향 분포 추정에 대한 연구가 이루어졌다.[12] 이 연구에서 잔류응력 측정을 위한 구조들은 잔류응력에 의해 변형되고 이로부터 잔류응력을 구할 수 있으나, 구조체를 만드는 공정이 복잡하다는 단점이 있다. 재료의 결정 구조나 재료의 구조에서 화학적인 성분 분석에 많이 쓰이는 XRD(X-Ray Diffraction) 방법은 재료의 표면에 대한 변형과 응력을 얻기가 용이하여 잔류응력 측정을 위한 구조체 제작 공정이 필요 없다는 장점이 있다.

본 실험에서는 XRD를 이용하여 붕소가 도핑된 실리콘 웨이퍼의 잔류응력의 두께 방향 분포를 측정하였다. 2 절에서는 X선 회절에 의한 잔류응력을 위한 이론적 배경을 정리하

고, 3 절에서는 시편의 제작에 관하여 설명한다. XRD 측정 및 응력의 계산에 대해서는 4 절에서 논한다.

2. X선 회절에 의한 잔류응력의 측정

X선 회절 현상은 면간 결정의 거리, d_{hk} 의 간격으로 배열되어 있는 결정면에 θ 각도로 X선이 입사될 때 발생하는 경로차가 파장, λ 의 정수배인 경우에만 보강간섭이 일어나 회절이 일어나는 현상이다. 즉, Bragg 반사 조건

$$n\lambda = 2d_{hk}\sin\theta \tag{1}$$

를 만족시킬 때 일어난다. 그림 1은 X선 회절과 Bragg 반사 조건에 대한 그림이다.

결정방향에 따른 면간거리, d_{hk} 와 격자상수, a 의 관계는

$$\frac{1}{d_{hk}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \tag{2}$$

이다. a 는 격자상수이고 h, k, l 은 밀러지수이며 결정방향을 나타낸다. 결정방향에 따른 회절피크의 각도, θ 는 Bragg 반사 조건과 식 (1)을 이용하여 계산된다.

표면에 인장 혹은 압축응력이 존재할 경우 면간거리, d_{hk} 이 달라진다. XRD 디프랙토미터를 사용하여, 변화된 Bragg 각,

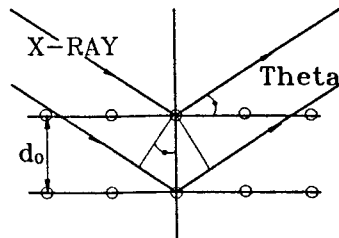


그림 1. X선 회절의 원리.

2θ를 측정하고 식 (1)을 이용하여 변형된 면간거리, d를 구한다.

그림 2와 같이 결정에 표면방향의 2축 응력이 작용할 때 주응력을 σ₁, σ₂라 하면 표면에 수직인 방향의 변형, ε₃는

$$\epsilon_3 = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{d_n - d_0}{d_0} \quad (3)$$

이다. 여기서 d_n, d₀은 각각 잔류응력에 의하여 변형된 면간거리이고 변형 전의 면간거리이다. 또, 프와송비, ν와 영률, E는 각각 0.25와 1.22 GPa이다.

본 연구에서는 σ₁과 σ₂는 변형된 상태에서의 잔류응력이고, 방향에 관계없이 같은 값, σ를 갖는다고 가정한다. 따라서, 응력, σ는

$$\sigma = -\frac{E}{2\nu} \left(\frac{d_n - d_0}{d_0} \right) \quad (4)$$

이 된다.

3. 시편의 제작

본 실험에서는 비저항이 1.5 ~ 2.1 Ωcm이고, 두께가 525 ± 15 μm인 직경 4 inch의 n형 (100) 실리콘 웨이퍼를 사용한다. 그림 3은 XRD 측정을 위한 p+ 실리콘의 제작 공정도이다. 고체 확산원 BN1100을 이용하여 1100°C에서 600분간 산화산을 행하고, HF - LTO - HF 처리를 통하여 BSG층을 제거한 후 1000°C에서 50분간의 습식 산화를 거쳐 붕소 도핑 공정이 완료된다. 산화막의 예상 두께는 0.32 μm이다. 사진 식각 공정을 통하여 시편 앞면의 산화막을 선택적으로 제거한다. 식각은 EPW(Ethylendiamine : Pyrocathocol : DI Water = 250ml : 40g : 80ml)를 이용하여 10분 단위로 8개의 시편에 대하여 행하며 뒷면은 산화막으로 보호된다. XRD 측정을 위한 모든 공정은 BOE로 산화막을 제거함으로써 완료된다. 그림 4은 α-step을 이용한 식각 깊이의 측정 결과이다.

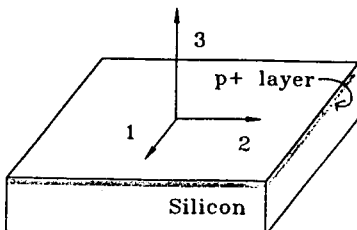


그림 2. 표면 응력 해석을 위한 응력계의 설정

4. XRD 측정 및 응력의 계산

시편의 격자 변형 측정을 위하여 파장이 1.5405 Å인 Cu-K α의 X선을 사용한다. 식(1)과 식 (2)을 이용하여 회절 피크가 생기는 표준 회절각을 예상할 수 있다. 표 1은 측정면에 대한 표준 회절각과 변형이 없는 상태에서의 면간거리를 계산한 값이다.

표 1. 잔류 응력의 영향이 없을 때의 표준회절각과 면간거리의 계산치.

결정방향	표준회절각	면간거리
111	28.44°	3.135532Å
220	47.375°	1.920113Å
311	56.11°	1.637478Å

본 실험에서는 잔류응력에 의한 변형 측정을 위한 p+ 실리콘 결정면의 회절 강도가 큰 (111), (220), (311)의 세방향에 대하여 측정을 행한다. 각각의 방향에 대하여 잔류응력이 존재한다면 회절피크가 생기는 회절각이 바뀌게 되므로, 측정된 회절각과 Bragg 반사 조건식을 이용하여 변형된 면간거리

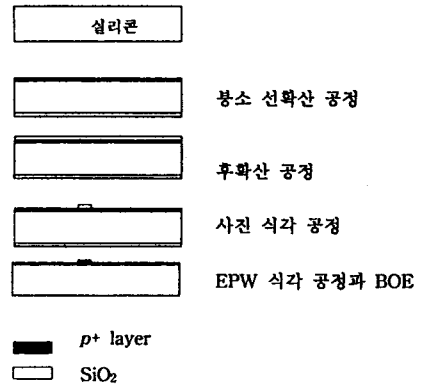


그림 3. 시편의 제작 공정도.

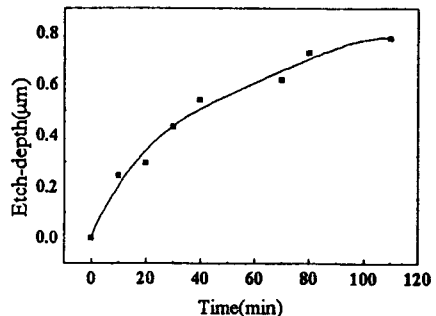


그림 4. EPW를 이용한 p+ 실리콘의 식각 결과.

d_{hkl} 를 얻을 수 있다. 그림 5는 시편의 식각 깊이에 대한, 측정된 면간거리의 변화율을 나타낸다. 측정된 격자 변형율의 경향을 보면, 시편의 표면과 가까운 영역은 격자 변형율의 부호가 마이너스로써 압축된 상태를 보이고 나머지 대부분의 영역에서는 플러스로써 인장된 상태를 보이는 것을 알 수 있다. 측정된 변형율은 서로 다른 식각 깊이를 갖는 시편의 결정 방향에 따른, 시편이 용력에 의하여 변형된 상태에서의 잔류 용력으로 식 (4)에 의하여 계산된다. 그림 6은 각각의 결정면에 대한 깊이에 따른 잔류 용력의 크기를 나타낸다. 여기서 추정된 잔류 용력은 웨이퍼가 내부의 잔류 용력에 의하여 이미 변형된 상태에서의 용력을 나타낸다. 그림 6의 (a), (b)와 (c)는 각각 (111), (220), (311)방향에서 측정된 변형율을 이용하여 추정된 용력 분포이다.

5. 토의

그림 5에서 각각의 결정면에 대하여 측정된 격자 변형율이 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 용력 추정에 있어서 큰 오차를 유발시키게 된다. 이러한 차이의 원인은 크게 공정과 측정에 의한 것으로 나누어 생각할 수 있다. 우선 공정상의 문제는 실리콘 웨이퍼의 불순물 확산에 있다. 이론적으로 모든 시편의 확산이 동일한 조건에서 행하여져야 하나, 실제로는 여러 웨이퍼와 여러 개의 확산원 옆에서 처리되므로 농도가 서로 다르게 될 수 있는 데에서 그 원

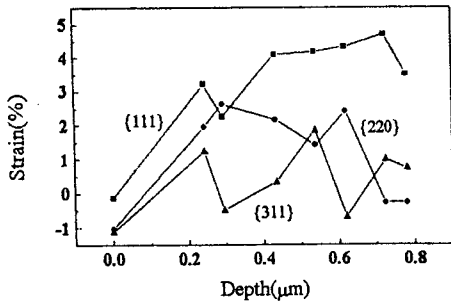


그림 5. 식각 깊이에 대한 측정된 면간거리의 변화율.

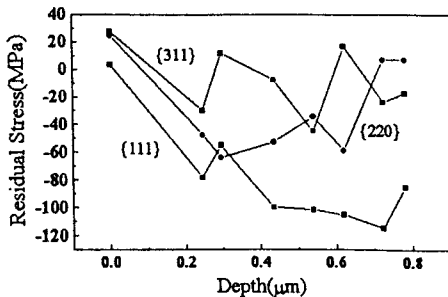


그림 6. 깊이에 따른 용력의 분포.

인을 찾을 수 있다. 측정시의 문제로서 X선의 입사각이 (111)면과 같이 작을 때에는 X선의 회절이 시편의 표면 상태에 따라 영향으로 전혀 다른 정보를 얻을 수도 있다.

본 연구에서는 잔류 용력에 의하여 발생하는 회절피크의 이동에 대한 기준치로써, 식 (1)과 식 (2)에 의하여 계산된 표준 회절각을 사용하였다. 좀 더 정확한 용력 측정을 위해서는 붕소 도핑 이전의 시편에 대한 XRD 검사를 행하여 표준 회절각으로 삼아야 붕소 도핑에 의한 용력을 영향을 알 수 있을 것이다. 이런 여러 가지의 원인으로 인하여 각각의 결정면에 따른 변형 측정에 있어서 같은 시편에서도 변형율이 다르게 측정된 것으로 사료된다.

본 연구에서는 깊이에 따른 용력의 분포를 추정하기 위해서 웨이퍼 앞 표면을 EPW 용액을 이용하여 식각함으로써 서로 다른 식각 깊이를 가진 시편을 얻고, XRD를 이용하여 각각의 시편에 대한 격자 변형을 측정하였다. 이러한 시편의 식각은 평면적으로는 압축 혹은 인장 용력을, 입체적으로는 전단력을 제거하는 효과를 가져온다. 따라서, 서로 다른 식각 깊이를 가진 $p+$ 실리콘의 표면 변형율을 측정하는 것은 이미 변형을 일으켜서 용력의 분포가 달라진 상태를 측정하는 셈이 된다. 붕소를 도핑하여 내부 용력이 발생한 후, 변형이 생기기 전의 깊이에 따른 붕소 도핑에 의한 잔류 용력 분포를 얻기 위해서는, 제거된 용력층에 대한 보상이 필요하다. 이러한 보상을 위해서는 깊이 방향에 대한 용력의 분포를 정확히 알아야 하며 두 개의 적분인자인 σ/z 와 σ/z^2 를 이용하여야 가능하게 된다.[13]

6. 결론

XRD를 이용하여 서로 다른 식각 깊이를 가진 $p+$ 실리콘의 표면 변형율을 측정함으로써 깊이 방향으로의 용력 분포를 계산하였다. 실험 결과로부터 붕소가 고농도로 도핑된 영역의 용력 분포를 얻었고, 이로부터 표면 부근은 인장 용력을 받고 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] Y. C. Tai, L. S. Fan, R. S. Muller, "IC Processed Micro-Motor : Design Technology, and Testing," Proc. IEEE Microelectromechanical Systems Workshop, Salt Lake City, Utah, 1989, pp. 1-6, Feb. pp. 20-22.
- [2] C. M. Ahn, Y. J. Kim, and M. G. Allen, "A Planar Variable Reluctance Magnetic Micromotor with Fully Integrated Stator and Wrapped Coils," Proc. IEEE Microelectromechanical Systems Workshop, pp. 1-6, 1993.

- [3] A. Olsson, P. Enoksson, G. Stemme and E. Stemme, "A Valveless Planar Pump in Silicon," Tech. Digest, IEEE Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, vol.2, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995, pp. 291-294.
- [4] P. Rangsten, L. Smith, L. Rosengren and B. Hök, "Electrostatically Exited Diaphragm Driven as an Loudspeaker," Tech. Digest, IEEE Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, vol. 1, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995, pp. 430-433.
- [5] D. S Popescu, D. C. Dascalu, M. Elwenspoek and T. Lammerink, "Silicon Active Microvalves using Buckled Membranes for Actuation," Tech. Digest, IEEE Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, vol. 2, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995, pp. 305-308.
- [6] F. Maseeh and S. D. Senturia, "Plastic Deformation of Highly Doped Silicon," Tech. Digest, IEEE Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, vol. 2, Montreux, Switzerland, June 25-30, 1989, pp. 861-865.
- [7] X. Ding, W. H. Ko and J. M. Mansour, "Residual Stress and Mechanical Properties of Boron Doped p^+ Silicon Films," Tech. Digest, IEEE Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, vol. 2, Montreux, Switzerland, June 25-30, 1989, pp. 866-871.
- [8] X. Ding and W. H. ko, "Buckling Behavior of Boron Doped p^+ Silicon Diaphragm," Tech. Digest, IEEE Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, Montreux, Switzerland, June 24-27, 1991, pp. 93-96.
- [9] W. H Chu and M. Mehregany, "A Study of Residual Stress Distribution through the Thickness of p^+ Silicon Films," IEEE Trans. Electron Devices, ED-40, pp. 1245-1250, 1993.
- [10] C. Cabuz, K. Fukatsu, T. Kurabayashi, K. Minami, and M. Esashi, "A New Thoery on Stress Evolution in p^+ Silicon," Tech. Digest, IEEE Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, vol. 3, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995, pp. 67-68.
- [11] E. H. Yang, S. S. Yang, S. W. Han, and S. Y. Kim, "Fabrication and Dynamic Testing of Electrostatic Actuators with p^+ Silicon Diaphragms," to appear in Sensors and Actuators A.
- [12] E. H. Yang, S. S. Yang, S. H. Yoo, "A Technique for Quantitative Determination of the Profile of the Residual Stress along the Depth of p^+ Silicon Films", Applied Physics Letters, Vol 67, pp. 912-914, 1995.
- [13] M. G. Moore, W. P. Evans, "Mathematical Correction for Stress in Removed Layers in X-Ray Diffraction

"Residual Stress Analysis", SAE Transaction, Vol 66, pp. 340-345, 1958.