

논문 96-5-1-11

마이크로머시닝을 위한 새로운 희생층인 다결정-산화막의 특성

홍 순관(洪 淳寬)*, 김 철주(金 鐵柱)**

Characteristics of Poly-Oxide of New Sacrificial Layer
for Micromachining

Soon-Kwan Hong*, Chul-Ju Kim**

요 약

마이크로머시닝의 구조재료인 다결정 Si이 희생산화막의 영향을 받음을 고려하여 다결정 Si을 열산화시킨 다결정-산화막을 새로운 희생산화막의 재료로서 제안하고 평가하였다. 다결정-산화막상에 성장시킨 다결정 Si은 통상의 희생산화막상에 성장시키는 경우보다 grain size가 증가하였고, XRD결과를 통해 (111) texture의 증가와, 부가적인 (220) texture가 형성됨을 관찰하였다. 또한, 다결정-산화막상에 성장시킨 다결정 Si의 경우, 그 응력이 작고 균일한 분포를 나타내었다.

Abstract

Considering that polycrystalline silicon, a structural material of the micromachining, is affected by a sacrificial oxide layer, the poly-oxide obtained by the thermal oxidation of polycrystalline silicon is newly proposed and estimated as the sacrificial oxide layer. The grain size of the polycrystalline silicon grown on the poly-oxide is larger than that of polycrystalline silicon grown on the conventional sacrificial oxide layer. As a result of XRD, increase of (111) textures and formation of additional (220) textures are observed on the polycrystalline silicon deposited on the poly-oxide. Also, the polycrystalline silicon grown on the poly-oxide represents small and uniform stress.

1. 서 론

실리콘 재료를 이용한 마이크로머시닝(micromachining)은 센서나 actuator와 같은 미세구조의 제작을 위한 주도적인 기술로 자리잡고 있다. 특히, 표면(surface) 마이크로머시닝은 기존의 집적회로 기술을 원용하여

정밀한 미세구조를 실현할 수 있다는 장점을 갖고 있으며, 이에 따라 다결정 Si(polycrystalline silicon)과 희생층(sacrificial layer)에 의한 release법으로 각종 미세구조를 제작하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2].

A 단위의 박막을 사용하는 집적회로 기술과는 달리, 마이크로머시닝에서는 예컨대 2 μ m 정도의 두꺼운 다결정 Si을 구조재료(structural material)로 사용한다.

그런데 박막의 두께에 비례하여 구조의 변형이나 약화를 초래하는 응력(stress)이 발생되므로 미세구조의 성공적인 제작을 위해서는 응력의 영향을 간과할 수 없다[3,4]. 다결정 Si의 응력특성은 증착온도와 압력, 증착률, 불순물의 도핑등에 따라 변화되며[5,6], 이들 공정조건들이 다결정 Si의 결정형성에 영향을 미

* 해전전문대 전자과

(Dept. of Electronics, Hyejeon Junior College)

** 서울시립대 전자공학과

(Dept. of Electronics, Seoul City Univ.)

<접수일자 : 1995년 7월 27일 >

※ 본 연구는 해전전문대학 연구조성비 및 1994년도 교육부 학술연구조성비(반도체분야)의 지원에 의한 것임.

치고 있음을 의미한다[7]. 마이크로머시닝에서 구조재료인 다결정 Si은 항상 CVD-산화막이나 PSG와 같은 희생산화막(sacrificial oxide layer)을 기판으로 하여 성장된다[8]. 다결정 Si은 증착원소의 표면확산(surface diffusion)과 후속적인 cluster의 형성/결합을 통해 그 결정구조가 형성되며, 이 때문에 기판의 표면거칠기(surface roughness)와 결정상태는 상술한 증착온도나 증착률등의 공정조건 이상으로 다결정 Si의 결정형성에 영향을 미치게 된다. 그런데, 현재에는 위와 같은 기판으로서의 희생산화막의 역할은 고려하지 않고, 단지 성장 및 식각특성이 좋은 CVD-산화막이나 PSG등을 희생산화막으로 사용하고 있다. 따라서, 다결정 Si의 응력특성 및 결정형성에 미치는 기판으로서의 역할을 고려한 희생산화막의 선택 및 적용이 필요할 것으로 판단된다.

이에, 본 연구에서는 표면거칠기와 결정상태(원자 밀도등)가 우수한 새로운 희생산화막의 재료를 찾고자 하였다. 박막의 성장률은 표면거칠기와 결정상태에 직접적인 영향을 미치므로 성장률이 매우 낮은 열산화막을 희생산화막으로 고려하였으나 열산화막은 Si과의 계면에 성장되므로 희생산화막으로는 사용할 수 없다.

다음으로 본 연구에서는 다결정 Si을 열산화시킨 다결정-산화막(poly-oxide)이 (100)의 n-doped Si 기판과 유사한 산화속도(1.08배)를 나타내는 점[9]에 주목하였으며, 특히, 다결정 Si을 기존의 희생산화막상에 성장시킨 후 이를 열산화시키는 방법으로 다결정-산화막을 형성시키면 마이크로머시닝을 위한 희생산화막으로 사용이 가능하였다. 이에 본 연구에서는 다결정-산화막 및 CVD-산화막이나 PSG와 같은 기존의 희생산화막을 기판으로 하여 성장시킨 다결정 Si의 물리적인 특성(결정성 및 응력특성)의 비교를 통해 마이크로머시닝을 위한 새로운 희생층재료로서의 다결정-산화막의 활용 가능성을 검토하였다.

2. 실험

그림 1에 다결정-산화막 및 기존의 CVD-산화막이나 PSG를 희생산화막으로 하여 성장시킨 다결정 Si의 물리적인 특성(결정성 및 응력특성)을 비교하기 위한 시료의 단면구조를 보였다. CVD-산화막, PSG, 다결정-산화막, 열산화막을 희생산화막으로 사용한 경우를 각각 "structure I", "structure II", "structure III",

"structure IV"로 표시하였다. 이때, 열산화막은 앞에서 밝힌 바와 같이 희생산화막으로는 사용할 수는 없지만 표면거칠기등의 특성이 우수하므로, 본 연구에서 제안한 다결정-산화막과 효과를 비교하기 위하여 "structure IV"의 시료로서 제작하였다.

일반적으로 희생산화막은 2 μm 이상의 두께를 필요로 하며 다결정-산화막을 이 두께로 성장시키려면 장시간의 열산화가 요구된다. 그런데, 희생산화막이 다결정 Si에 영향을 미치는 기판으로서의 역할은 표면근처, 즉 계면에서 담당하므로 본 연구에서는 그림 1의 "structure III"에 보인 바와 같이 CVD-산화막으로 희생산화막의 대부분을 형성하는 한편, 다결정 Si을 성장시킬 표면근처만을 다결정-산화막으로 형성하는 방법을 사용하였다.

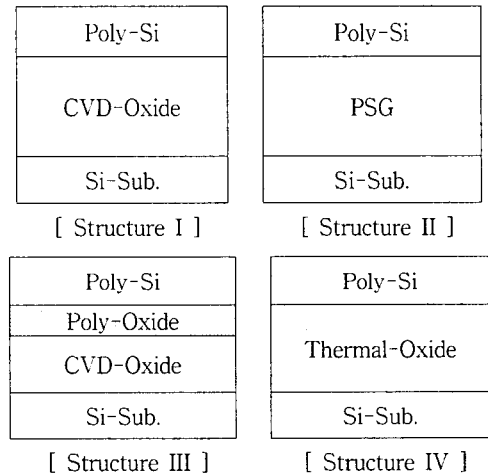


그림 1. 희생산화막의 효과를 비교하기 위한 시료의 구조

Fig. 1. Sample structures to compare the effect of sacrificial oxide layer

한편, CVD-산화막은 $\text{SiH}_4(45\text{cc}) + \text{O}_2(110\text{cc})$ 의 혼합가스를, PSG는 $\text{SiH}_4(45\text{cc}) + \text{O}_2(110\text{cc}) + \text{PH}_3(5\text{cc})$ 의 혼합가스를 이용하여 590 $^{\circ}\text{C}$ 의 질소분위기에서 4000 Å 두께로 각각 증착하였다. 또한, 1200 Å의 다결정 Si을 증착한 후 이를 1100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 열산화시켜 3000 Å의 다결정-산화막을 형성하였으며, 최종적으로 각 희생산화막상에 도핑하지 않은 8000 Å의 다결정 Si을 성장시켰다.

3. 희생산화막이 다결정 Si에 미치는 영향

그림 2는 그림 1에 보인 각 시료에 대해 관찰한 다결정 Si의 SEM사진이다. structure III의 다결정 Si에서 structure I, II의 경우에 비하여 잘 정의되고, 큰 grain이 관찰된다. 또한, structure IV의 다결정 Si에서도 structure III와 유사한 grain이 관찰된다. structure IV의 결과는 앞에서 밝힌 바와 같이 희생산화막으로 사용할 수 없는 열산화막상에 다결정 Si를 성장시켜 촬영한 결과로서, 이는 structure III의 결과와 함께 희생산화막의 표면거칠기나 원자밀도가 그 위에 성장되는 다결정 Si의 결정형성에 큰 영향을 미치고 있음을 의미한다.

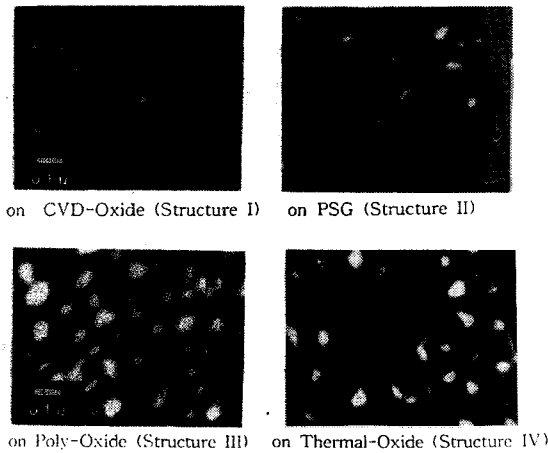


그림 2. 다결정 Si의 SEM사진(Undoped, 8000Å, 어닐링 없음)

Fig. 2. SEM Images of poly Si(Undoped, 8000Å, no annealing)

그림 3에 그림 2에 보인 SEM사진에서 추출한 grain size의 평균값을 보였다. 본 연구에서 제안한 다결정-산화막을 희생산화막으로 사용한 경우인 structure III의 다결정 Si은 약 74nm의 grain size를 나타내는 반면에 structure I, II의 다결정 Si은 약 50nm 정도의 값을 나타내고 있다. 아울러, structure IV의 다결정 Si의 grain size는 약 81nm였다. 다결정 Si의 응력은 grain 및 grain boundary와 밀접한 관계가 있다. 즉, grain size가 커짐에 따라 grain boundary가 감소되며 이는 응력감소의 효과로 나타나게 된다. 또한, grain boundary는 결정의 미끄러짐(slip)등이 발생하는 결정의 weak position이므로 grain size의 증가는 다결정 Si의 기계적 강도가 향상됨을 의미한다.

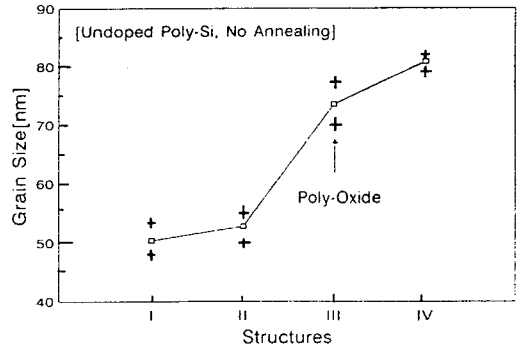


그림 3. 희생산화막이 다결정 Si의 grain에 미치는 영향

Fig. 3. Effect of sacrificial oxide layer on grain size of poly Si

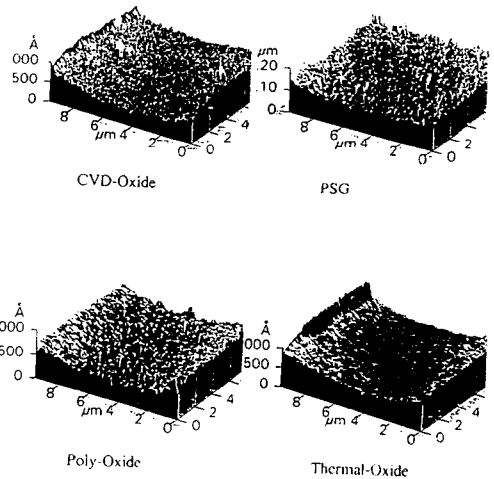


그림 4. 몇가지 희생산화막의 표면에 대한 AFM 결과
Fig. 4. AFM Surface images of various sacrificial oxide layer

그림 4는 각 희생산화막의 표면을 AFM(Atomic Force Microscopy)으로 관찰하여 3차원 형상으로 나타낸 것으로, 표면형상의 크기는 10μm×10μm이다. 그림 4에서 다결정-산화막의 표면거칠기가 PSG에 비해서 월등히 우수함을 알 수 있다. 한편, CVD-산화막 및 열산화막과 비교해 보면, 외견상으로는 다결정-산화막 쪽의 표면거칠기가 떨어지는 것으로 보이나 이는 AFM 측정시 다결정-산화막을 좀더 확대해서 측정하였기 때문으로 그림 4를 참조하면, 1000Å에 대한 scale의 실제길이가 다름을 알 수 있다. 표면거칠기를

좀 더 명확히 비교하기 위하여 위의 그림 4의 결과로부터 추출한 각 희생산화막에 대한 표면거칠기의 RMS 값과 평균값을 그림 5에 보였다. 그림에서 다결정-산화막에 대한 표면거칠기의 평균 및 RMS값이 공히 CVD-산화막이나 PSG에 비해서 작음을 알 수 있다. 따라서, 다결정 Si의 형성시에 이러한 희생산화막의 표면거칠기가 영향을 미침으로써 위의 그림 2 및 그림 3에 나타난 바와 같은 grain size의 증진효과가 나타난 것으로 판단된다. 그런데, 그림 5에서 살펴보면 다결정-산화막 및 열산화막에 대한 표면거칠기가 CVD-산화막의 그것과 비교해 볼때 월등히 우수하다고 할 수는 없다. 그림에도 불구하고 그림 2 및 그림 3과 같은 grain size의 증진효과가 나타난 것은 표면거칠기 이외에 다결정-산화막 및 열산화막의 원자밀도가 CVD-산화막이나 PSG에 비해 월등히 높다는 점이 작용한 것으로 판단된다.

다음으로, 다결정 Si의 결정상태를 관찰하기 위하여 Raman spectroscopy를 사용하였다. 그림 6은 각 구조의 시료에 대한 Raman scattering결과를 나타낸 것으로, structure III의 다결정 Si에서 structure I,II에 비하여 훨씬 더 sharp한 격자진동선이 관찰됨은 물론 그 강도도 높음을 알 수 있다. 앞의 결과와 유사하게 structure IV의 다결정 Si에서도 structure III와 유사한 격자진동선이 관찰된다.

격자진동선의 sharp함과 강도의 세기는 해당 다결정 Si의 결정화가 다른 경우보다 잘 진행되어 있음을 의미하며, 이는 앞의 그림 2에 보인 SEM 사진의 결과와 잘 일치하고 있다.

다음으로, 다결정 Si의 응력특성을 관찰하기 위하여 Cu-K α 의 X선으로 회절실험을 행하였다. 그림 7은 각 시료에 대한 XRD결과를 보인 것으로, 그림 7의 (a)와 (b)는 각각 structure I과 structure II의 다결정 Si에서 측정된 것이고, 그림 7의 (c)는 structure III의 다결정 Si, (d)는 structure IV의 다결정 Si에서 각각 측정된 것이다.

그림 7에서, $\lambda = 2d\sin\theta$ 의 Bragg 회절조건에 의하면, $2\theta=28^\circ$ 부근에서 관찰되는 회절 peak는 (111) texture에 의한 것이며, 이는 본 연구의 CVD 성장조건에 따른 다결정 Si의 우선방위가 (111)임을 의미한다. 또한, 각 구조의 시료에 대한 (111) texture의 회절강도를 비교해 보면, structure III의 다결정 Si에서 가장 큰 회절강도가 관찰되며 이는 (111) texture가 다른 시료에 비하여 가장 잘 형성되었음을 의미한다. 또한, annealing

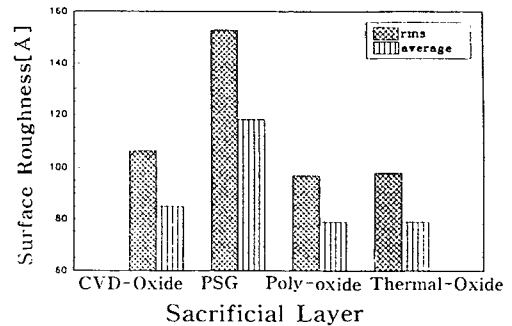


그림 5. 희생산화막의 표면거칠기 비교

Fig. 5. Surface roughness of various sacrificial oxide layer

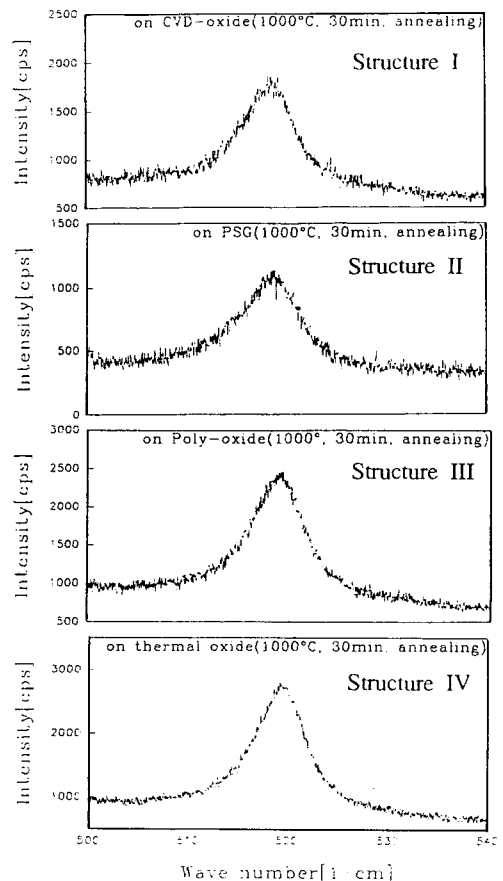


그림 6. 라만산란의 결과

Fig. 6. Raman scattering results

을 행하지 않은 상태이기 때문에 회절 peak 전체에서 불균일 응력에 기인하는 peak의 갈라짐이 관찰되는데,

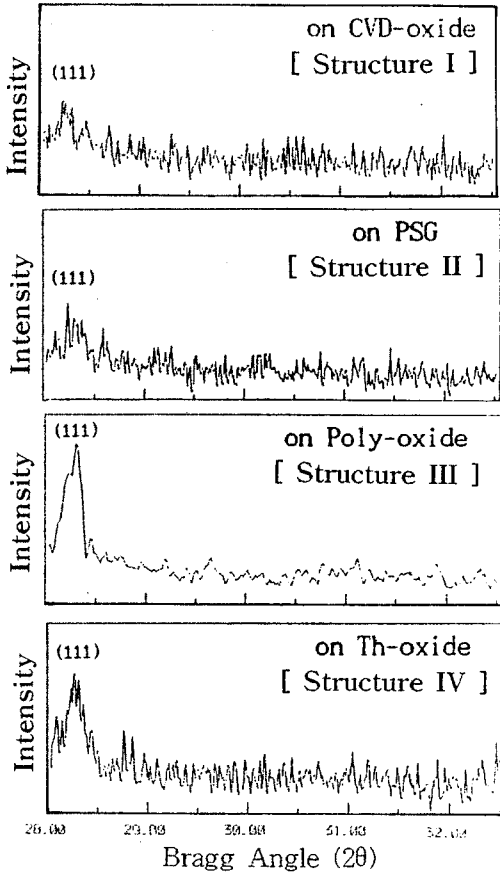


그림 7. 다결정 Si의 XRD 결과(Undoped, 8000 Å, 어닐링 없음)
 Fig. 7. XRD results of poly Si(Undoped, 8000 Å, no annealing)

이것 역시 structure III의 다결정 Si에서 가장 적다. 이러한 결과는 본 연구에 따른 다결정-산화막을 회생산화막으로 사용함에 따라 그 위에 성장되는 다결정 Si의 응력분포가 부가적인 처리를 행하지 않았음에도 불구하고 다른 경우에 비하여 보다 더 균일함을 의미한다.

다음으로, 그림 8에 회절각을 보다 넓게 잡은 경우의 XRD 결과를 보였다. 그림 8은 각각 structure I 및 structure III의 다결정 Si에서 관찰된 XRD 결과로서 structure I에 비하여 structure III에서는 $2\theta = 47^\circ$ 부근에서 부가적인 회절 peak가 관찰된다. 이 회절 peak는 (220) texture에 의한 것으로, 이 회절 peak는 다결정-산화막상에 성장된 다결정 Si에 (220) texture가 추가로 형성되었음을 의미한다. 한편, 그림 8에서 공통

적으로 관찰되는 (200)의 회절 peak는 다이아몬드 결정구조인 다결정 Si에서는 허용될 수 없는 것으로, 이는 X선의 다중회절에 기인한 것이다.

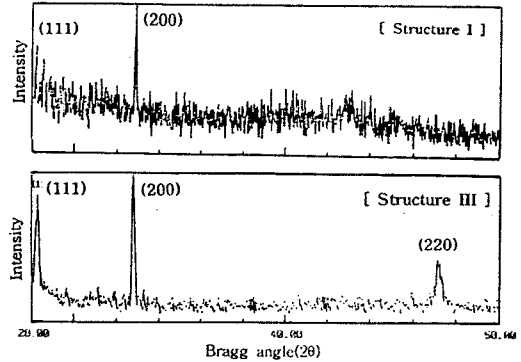


그림 8. 다결정 Si의 XRD 결과(Undoped, 8000 Å, 어닐링 없음)
 Fig. 8. XRD results of poly Si(Undoped, 8000 Å, no annealing)

다결정 Si의 기계적 강도는 grain과 texture의 구조 및 형성과 직결되며 위에 보인 그림 7과 그림 8의 결과는 본 연구에서 제안한 다결정-산화막에 의해 구조재료인 다결정 Si의 기계적 강도 및 응력특성을 한층 더 증진시킬 수 있음을 보여주고 있다.

결정의 깊이방향에 대한 결정면간의 길이를 d , 다결정 Si의 격자상수를 a , 밀러지수를 (h,k,l) 로 표시할 때, 이들간에는 다음의 관계식이 성립된다[10,11].

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (1)$$

상기 식을 (111) peak에 대해 적용하면,

$$\frac{1}{d^2} = \frac{3}{a^2} \quad \text{즉,} \quad a^2 = 3d^2 \quad (2)$$

로 된다.

다음으로, $\lambda = 2d\sin\theta$ 의 Bragg 회절조건식에 위의 그림 7에 보인 (111) peak의 회절각 2θ 를 대입하여 d 를 구한다(이때, Cu-K α X선의 파장 λ 는 1.542 Å이다). 한편, 변형이 발생되지 않은 경우의 면간거리를 d_0 라 하면, 변형률 ϵ 은

$$\frac{d - d_0}{d_0} \quad (3)$$

로 주어진다. 이때 계산에 사용된 변간거리 d_o 는 3.135Å이다.

한편, 위의 그림 7을 살펴보면 structure III를 제외한 다른 경우의 (111) peak들은 불균일 변형(non-uniform strain)으로 인하여 여러 갈래로 갈라져 있어 변형률을 측정하기 어렵다. 이에 따라 본 연구에서는 회절강도가 가장 큰 peak를 중심으로 몇개의 peak에 대하여 위의 (3)식을 적용하여 변형률을 산출하고, 그 평균값을 취하는 방법으로 시료의 구조에 따른 변형률을 비교하였다.

다음의 그림 9에 본 연구에서 측정된 각 시료구조에 따른 변형률(%)의 변화를 보였다. 이는 회절식으로 부터 산출한 변형률이므로 시료의 표면에 대해서 수직인 방향의 변형률이다.

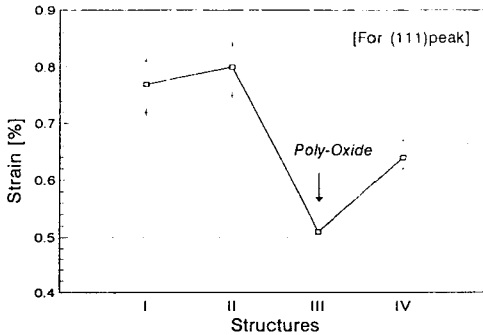


그림 9. 시료구조에 따른 변형률의 변화

Fig. 9. Variation of strain according to the sample structures

다음으로 위에서 구한 변형률을 토대로 다결정 Si의 응력값을 산출하였다. 수직방향의 변형률 ϵ 과 표면방향의 응력 σ 간에는 다음의 (4)의 관계식이 성립하며[10,11], 본 연구에서는 (111)회절 peak에 대하여 다결정 Si의 응력을 계산하였다.

$$\sigma = -\frac{\epsilon}{2\nu} E \quad (4)$$

여기서 ν 는 Poisson의 비이고, E는 Young률인 바. 이때 계산에 사용된 Young률은 160Gpa (1.6E12 dynes/cm²)이다[2].

다음으로 그림 10에 상기 (4)식을 사용하여 산출한 응력값을 보였다.

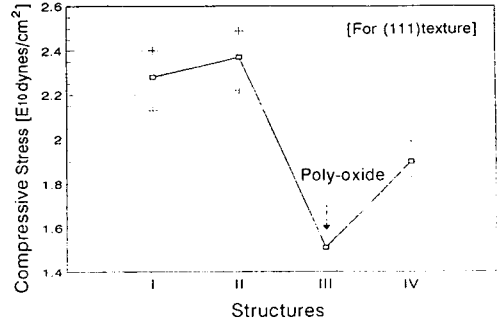


그림 10. 시료구조에 따른 응력의 변화

Fig. 10. Variation of stress according to the sample structures

다른 연구결과[12,13]들을 참조해 보면, 다결정 Si은 -0.8~0.8GPa의 응력값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 값은 본 연구에서 측정된 1.5~2.4GPa에 비해서 비교적 작은 값이며, 이는 측정방법과 다결정 Si의 증착 조건의 차이에서 기인한 것으로 판단된다.

한편, 산출된 응력값은 공히 음수이며, 이는 다결정 Si이 압축응력을 나타냄을 의미한다. 그림 10을 살펴보면, 다결정-산화막상에 성장된 다결정 Si(structure III)의 응력값이 가장 작으며, CVD-산화막이나 PSG의 경우(structure I, structure II)와 비교할 때 약 30% 정도의 응력감소의 효과가 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 다결정-산화막을 희생산화막으로 사용함으로써 응력분포가 균일하고 응력값도 작은 다결정-Si을 얻을 수 있으며, 마이크로머시닝에서 응력에 기인한 구조변형이나 약화를 재료의 형성과정에서 억제할 수 있을 것이 기대된다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 희생산화막인 CVD-산화막이나 PSG상에 성장시킨 다결정 Si과 새롭게 제안한 희생산화막인 다결정-산화막상에 성장시킨 다결정 Si을 SEM, XRD, Raman spectroscopy등을 이용하여 비교함으로써 다결정-산화막을 새로운 희생산화막으로 사용하기 위한 가능성을 타진하였다. 다결정-산화막을 희생산화막으로 사용함에 따라 다결정 Si의 응력 및 기계적 강도와 밀접하게 관련된 grain size에 있어 뚜렷한 증진효과가 나타나는 한편, 종래의 희생산화막을 사용하는 경우에 비하여 (220)등의 새로운 결정방위가

형성되고, 응력이 균일해짐을 확인하였다. 아울러, 새로운 회생산화막에 의하면 동일한 성장조건하에서 다결정 Si의 응력이 약 30%정도 감소하였다.

참 고 문 헌

[1] Alexander H. Slocum, "Precision Machine Design : Macromachine Design Philosophy and Its Applicability to the Design of Micromachines", Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 37-42, 1992.

[2] "動くシリコンへ, Siマイクロマシーニング技術", Nikkei Electronics, No. 480, pp. 125-153, 1989.

[3] S. T. Cho, K. Najafi and K. D. Wise, "Internal Stress Compensation and Scaling in Ultra Sensitive Silicon Pressure Sensors", IEEE Trans. on Electron Dev., Vol. 39, No. 4, pp. 836-842, 1992.

[4] P. Krulevitch, R. T. Howe, G. C. Johnson and J. Huang, "Stress in Undoped LPCVD Polycrystalline Silicon", Proc. of the 6th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 949-952, 1991.

[5] A. T. Voutsas, M. K. Hatalis, "Surface Treatment Effect on the Grain Size and Surface Roughness of as-Deposited LPCVD Polycrystalline Films", J. Electrochem. Soc., Vol. 140, No. 1, pp. 282-288, 1993.

[6] S. P. Muraka and T. F. Retajczyk, Jr., "Effect

of Phosphorous Doping on Stress in Silicon and Polycrystalline Silicon", J. Appl. Phys., Vol. 54, No. 4, pp.2067 -2072, 1983.

[7] A. Benitez, et al., " Stress in Low Pressure Chemical Vapour Deposition Polycrystalline Silicon Thin films Deposited below 0.1 Torr", Sensors and Actuators A 37-38, pp. 723-726, 1993.

[8] L. S. Tavrow , S. F. Bart, J. H. Lang and M. F. Schlecht, "A LOCOS Process for an Electrostatic Microfabricated Motor", Proc. of the 5th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 893-898, 1989.

[9] T. I. Kamins, "Oxidation of Phosphorous-Doped Low Pressure and Atmospheric Pressure CVD Polycrystalline-Silicon Films", J. Electrochem. Soc., Vol. 126, No. 5, pp. 838-844, 1979.

[10] B. D. Cullity, 韓鳳熙 譯, "X線 回折", 半島出版社, 제9장.

[11] 加藤誠軌 著, 金文執, 徐日煥 譯, "X-線 回折分析", 半島出版社, 제4장.

[12] P. Krulevitch, et al., " Stress and Microstructures in LPCVD Polycrystalline Silicon Films ", MRS Symposium Proceedings, Vol. 239, pp.13-18, 1991.

[13] J. Huang, et al., " Investigation of Texture and Stress in Undoped Polysilicon Films", MRS Symposium Proceedings, Vol. 182, pp.201-206, 1990.

著 者 紹 介



홍순관

1963년 7월 1일생, 1987년 서울시립대학교 전자공학과 졸업(학사). 1989년 서울시립대학교 대학원 석사학위 취득. 1994년 9월 동대학원 박사학위 취득. 1994년-현재 해전전문대학 전자과 전임강사. 주관심

분야 : 마이크로머시닝 공정 및 재료.



김철주

1947년 2월 3일생. 1973년 한양대학교 졸업(학사). 1981년 3월 일본 Tokai대학 대학원 석사학위 취득. 1984년 3월 동대학원 박사학위 취득. 1984년 3월-현재 서울시립대학교 전자공학과 교수. 1989년-1990

년 일본 Sophia대학 이공학부 객원교수. 주관심분야 : 반도체 재료 및 소자, MEMS, LSPE-SOI, TFT, FED.