技術論文

이온 주입에 의한 다결정 실리콘의 응력 구배 완화 및 물성 개선

석지원*, 강태준*, 이상준*, 이재형**, 이재상**, 한준희***, 이호영****, 김용협****

Stress gradient relaxation and property modification of polysilicon films by ion implantation

Ji Won Suk*, Tae June Kang*, Sang Jun Lee*, Jae H. Lee**, Jae S. Lee**,
Jun-Hee Hahn***, Ho-Young Lee**** and Yong-Hyup Kim****

ABSTRACT

MEMS technology in the field of aerospace engineering is more important with light weight and high resolution. Therefore the investigation of thin films properties is issued and the residual stress of thin films is one of the important problems to solve. Ion implantation without thermal annealing is applied for the stress gradient relaxation of LPCVD polysilicon films used as the structural part in MEMS. He⁺ and Ar⁺ ion implantations reduce the stress gradient of polysilicon films. The property modification of polysilicon films by ion implantation is also investigated. The elastic modulus and hardness of polysilicon films with ion implantation is studied by CSM method which is an advanced nano-indentation method. Ion implantation decreases the elastic modulus and hardness of polysilicon films. However, they are improved with increasing ion dose.

초 록

항공우주 분야의 MEMS 기술의 중요성은 경량화 및 높은 분해능 등의 목적아래 점차 증가하고 있는 추세이다. 따라서 MEMS 기기의 제작에 있어 박막 물성의 조사 및 개선 방안은 중요한 논점이 되고 있으며, 박막의 잔류응력은 MEMS 기기 제작 및 구동에 있어 해결해야 할 중요한 문제점으로 남아있다. 따라서 본 논문에서는 MEMS 기기의 구조제로 많이 쓰이는 LPCVD 다결정 실리콘에 He⁺, Ar⁺ 이온을 주입함으로써 응력 구배를 완화하였다. 또한 Nano-indenter를 이용한 CSM 방법을 사용하여, 다결정 실리콘의 탄성계수와 경도를 압입 깊이에 따라 측정하였다. 그 결과, 이온 주입에 의한 결정성의 변화가 탄성계수와 경도를 감소시키지만, 이온 농도가 증가함에 따라 탄성계수와 경도가 증가하는 현상을 관찰하였다.

Key Words : MEMS(미소전기계시스템), Ion implantation(이온 주입), Residual stress(잔류 응력), Polysilicon(다결정 실리콘), Elastic modulus(탄성계수), Hardness(경도)

1. 서 론

† 2003년 6월 28일 접수 ~ 2003년 11월 7일 심사완료

* 서울대학교 기계항공공학부

** 한국원자력연구소

*** 한국표준과학연구원

**** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail : yongkim@snu.ac.kr

서울시 관악구 신림동 56-1

최근 MEMS 공정을 통해, 많은 마이크로 센서와 액추에이터들이 제작되고 있음에도 불구하고, 아직 해결해야 할 많은 문제들이 남아 있다. 특히, 박막의 잔류 응력과 응력 구배는 초기 연구부터 지금까지 계속적으로 화두가 되고 있는 실정이다.

대부분의 박막은 열팽창 계수의 차이, 비균일 소성 변형, 격자의 부적절한 배열, 성장 조건 등에 기인하여 잔류 응력을 가지게 된다[1]. 일반적으로 박막으로 이루어진 미소구조물은 잔류 응력과 응력 구배에 영향을 받게 된다. 미소구조물에 존재하는 잔류 응력은 구조물의 강성(stiffness)을 변화시켜, 공진주파수가 바뀌게 된다. 또한, MEMS 외팔보가 양의 잔류 응력 구배를 갖게 되면, 상대적으로 외팔보의 윗면에는 인장 응력이 생기고, 아랫면에는 압축 응력이 생겨서, 외팔보는 기판으로부터 멀어지는 방향으로 굽게 된다. 더구나, 인장 응력이 과도하면, 박막에 균열(cracking)이 생기거나, 층간 분리(delamination)가 발생하고, 압축 응력이 크면, 좌굴(buckling)이 발생한다.

이러한 MEMS 박막의 잔류 응력 및 응력 구배를 해소하기 위하여 가장 널리 쓰이는 방법은 노열처리(furnace annealing)이다. 노열처리는 박막을 고온에서 장시간 노출시킴으로써, 결정의 재배열과정을 통해, 박막의 잔류 응력을 해소하는 방법이다. LPCVD(low pressure chemical vapor deposition) 다결정 실리콘의 압축 응력은 열처리 온도를 높임에 따라 감소하게 된다[2]. 그러나, 노열처리는 박막이 장시간 고온에서 노출되어 있어야 하기 때문에, 고열비용을 갖는 단점이 있다. 따라서 노열처리는 집적회로와 함께 구성된 MEMS 소자에는 적용하기 어렵다. 이러한 노열처리에 대한 대안으로 RTA(rapid thermal annealing)가 제안되었다. RTA는 노열처리와는 달리 고온에서 수십초간 박막을 노출시켜 잔류 응력을 해소하는 방법이다. 다결정 실리콘의 압축 응력은 RTA 열처리 시간을 늘리거나 열처리 온도를 높임에 따라 감소하게 된다[3]. 하지만, RTA도 고온 공정이기 때문에, 공정 시간이 짧더라도, MEMS 소자와 함께 제작된 집적회로에 치명적인 영향을 줄 수 있다.

몇몇 연구자들은 이온 주입이 박막의 잔류 응력에 어떤 영향을 미치는지 연구하였다. 다결정 실리콘에 보론(B) 이온 주입을 하였을 때 잔류 응력에 대한 영향이 연구 되었으며[4], 탄소(C) 이온 주입을 통해 다결정 SiC 구조물의 응력 구배가 해소된 연구가 보고되었다[5]. 그러나 이러한 연구는 주입된 이온을 활성화 시키거나, 이온 주입에 의한 손상을 회복 시키기 위하여, 열처리가 수반되었다.

본 연구에서는 이온 주입을 통해 LPCVD 다결정 실리콘의 응력 구배를 완화하였다. 일반적인 MEMS 표면 미세 가공 기술을 이용하여 응력 구

배를 측정하기 위한 외팔보를 제작하였다. 제작된 외팔보를 부유시키기 전에, 이온 주입을 통해 다결정 실리콘으로 이루어진 외팔보의 응력 구배를 완화시키고, 외팔보를 부유시킴으로써, 이온 주입이 다결정 실리콘의 응력 구배에 미치는 영향을 관찰하였다. 또한, nano-indenter를 활용한 CSM(continuous stiffness measurement) 방법[6]을 이용하여, 이온 주입된 다결정 실리콘의 탄성계수와 경도를 살펴보았다.

II. 본 론

2. 1 실험 과정

Fig. 1은 본 연구를 위한 실험 절차를 보여주고 있다. 다결정 실리콘의 응력 구배를 측정하기 위하여, 일반적인 MEMS 표면 미세 가공을 이용하여 외팔보를 제작하였다. 희생층을 제거하여 외팔보를 부유시키기 전에 다결정 실리콘에 이온 주입을 하여 외팔보의 응력 구배를 완화하였다. 응력 구배의 변화 정도를 확인하기 위하여, 희생층을 제거하여 외팔보 구조물을 부유시키고, laser profiler(VF-7500)로 외팔보의 변형량을 측정하였다. 또한, 이온 주입이 다결정 실리콘의 물성에 미치는 영향을 알아보기 위하여, TEM(transmission electron microscopy, Hitach H9000-NAR)을 이용하여 다결정 실리콘 단면의 미소구조를 살펴보았고, nano-indenter(MTS, Nanoindenter II)를 이용하여 다결정 실리콘의 탄성계수와 경도를 측정하였다.

2.2 시편 제작

MEMS 표면 미세 가공 기술을 이용하여 다결

Fig. 1. 실험 절차

Fig. 2. 다결정 실리콘 시편 제작 과정

정 실리콘 외팔보를 제작하였다. 주요 제작 공정은 Fig. 2와 같다. 단결정 실리콘 기판위에 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition)를 이용하여 희생층으로 쓰일 TEOS를 약 $2\mu\text{m}$ 증착한다. RIE(reactive ion etching)를 이용하여 경계형상(anchor pattern)을 건식 식각한다. LPCVD를 이용하여 구조물로 쓰일 다결정 실리콘을 약 $2\mu\text{m}$ 증착한 후, DRIE(deep reactive ion etching)으로 외팔보 형상을 식각한다. 희생층을 제거하여 외팔보를 부유시키기 전에, 다결정 실리콘에 이온 주입을 하여 응력 구배를 완화시킨다. 희생층으로 쓰인 TEOS를 HF 용액으로 제거하여 외팔보를 부유시키면 다결정 실리콘의 응력 구배를 측정하기 위한 시편이 완성된다.

Fig. 3은 Fig. 2에 설명한 공정을 따라 제작된 다결정 실리콘 시편의 SEM(scanning electron microscopy) 사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 시편은 10개 켄의 외팔보(cantilever beam)와 양단 고정부(bridge)로 구성되어 있으며 길이는 $50\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}$ 까지 $50\mu\text{m}$ 간격으로 제작되었다.

Fig. 3. 제작된 시편의 SEM 사진

2.3 이온 주입에 의한 응력 구배 완화

다결정 실리콘에 He^+ , Ar^+ , N_2^+ 이온을 주입하여 응력 구배 변화를 관찰하였다. He^+ , Ar^+ 은 상온 상압에서 매우 안정한 비활성 기체로서 이온의 크기와 질량 차이에 의한 효과를 보기 위해 선택되었고 일반적으로 경도를 증가시키는 N_2^+ 을 이용하여 이온주입 실험을 수행하였다. 각 이온에 대하여 $10^{16}/\text{cm}^2$, $10^{17}/\text{cm}^2$ 의 농도로 이온 주입을 수행하였으며, He^+ , Ar^+ , N_2^+ 이온의 주입 에너지는 각 이온의 질량을 고려하여 각각 40keV, 100keV, 50keV로 정하였다. 측정된 외팔보는 두께가 $2.1\mu\text{m}$, 길이가 $100\mu\text{m}$, 폭이 $20\mu\text{m}$ 이고, laser profiler를 이용하여 외팔보의 끝단 변위를 측정하였다. Fig. 4는 이온 농도에 따른 외팔보 끝단 변위의 그래프이다.

이온을 주입 하지 않은 시편은 양의 응력 구배에 의해 외팔보가 위쪽으로 휘어져서 상당한 크기의 끝단 변위를 가지게 되는데, 그래프에서

Fig. 4. 이온 농도에 따른 외팔보 끝단 변위

보는 바와 같이, He^+ 이온과 Ar^+ 이온의 경우 외팔보의 끝단 변위가 이온을 주입하지 않은 것에 비해 감소함을 볼 수 있다. 이는 다결정 실리콘에 존재하던 응력 구배가 He^+ , Ar^+ 이온 주입에 의하여 완화되었음을 말해 준다. 즉, 양의 응력 구배를 갖는 외팔보의 뒷면에는 인장 응력이 존재하는데, 이온 주입을 통해 뒷면에 압축 응력이 형성되어 기존의 인장 응력을 상쇄시킴으로써 응력 구배가 완화되는 것이다.

그러나 N_2^+ 이온의 경우는 이온 주입을 하더라도, 외팔보의 끝단 변위가 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 이는 N_2^+ 이온 주입을 통해 다결정 실리콘 뒷면에 실리콘 질화막 혹은 그와 성질이 유사한 막이 형성되기 때문으로 보인다. 일반적으로 실리콘 질화막은 인장 응력을 갖게 된다[7]. 따라서 N_2^+ 이온 주입에 의해 형성된 실리콘 질화막은 인장 응력을 만들어, 이온 주입에 의해 생긴 압축 응력을 상쇄시키게 된다.

이온 주입이 응력 구배 완화에 기여하는 원인을 알아보기 위하여, TEM을 이용하여 다결정 실리콘의 단면을 관찰하였다. Fig. 5와 같이 이온 주입을 하지 않은 다결정 실리콘은 결정성을 확인할 수 있지만, 이온을 주입하게 되면 Fig. 6과 Fig. 7처럼 이온이 주입된 영역은 비결정질로 바뀌게 된다. 다른 이온에 대해서도 Fig. 6 및 Fig. 7과 마찬가지로, 이온이 주입된 영역이 비결정질로 바뀌게 된다. 문헌에 의하면, 비결정질 실리콘은 결정질 실리콘에 비하여 밀도가 낮다[8]. 증착 조건과 측정 방법에 따라 비결정질 실리콘의 밀도는 결정질 실리콘의 73%~99%가 된다고 보고되었다. 이렇게 밀도가 낮아지면 이온이 주입된 영역이 부피 팽창을 하게 되고, 이는 압축 잔류 응력을 발생시킨다. 이온 주입된 영역의 압축 응력은 양의 응력 구배가 있는 외팔보 뒷면의 인장 응력을 상쇄 시킴으로써, 다결정 실리콘 외팔보의 응력 구배를 완화하게 된다.

Fig. 5. 이온 주입을 하지 않은 다결정 실리콘의 단면 TEM 사진 (10만배 확대)

Fig. 6. He^+ 이온을 $10^{16}/\text{cm}^2$ 의 농도와 40keV의 주입에너지로 주입한 다결정 실리콘의 단면 TEM 사진 (10만배 확대)

Fig. 7. He^+ 이온을 $10^{17}/\text{cm}^2$ 의 농도와 40keV의 주입에너지로 주입한 다결정 실리콘의 단면TEM 사진 (10만배 확대)

Fig. 6과 Fig. 7을 비교하면 이온 농도가 증가함에 따라 비결정질 영역이 확대됨을 볼 수 있다. 이러한 현상은 다른 이온에 대해서도 마찬가지이다. 이는 Fig. 4에서 이온 농도가 늘어나면 응력 구배 완화량이 증가하는 것과 연관하여, 비결정질 실리콘이 응력 완화의 원인임을 말해 주는 것이다.

2.4 이온 주입에 의한 탄성계수와 경도의 변화

이온 주입이 다결정 실리콘의 탄성계수와 경도에 어떤 영향을 미치는지 nano-indenter를 이용한 CSM 방법으로 알아보았다. Fig. 8~Fig. 13은 He^+ , Ar^+ , N_2^+ 이온 주입에 따른 다결정 실리콘의 탄성계수와 경도를 깊이에 따라 측정한 결과이다. 압입 깊이는 300nm이고, 압입 속도는 2nm/sec이다. 측정 결과, 이온 주입에 의해 다결정 실리콘의 탄성계수와 경도가 감소함을 알 수 있다. 이는 일반적으로 비결정질 실리콘이 결정질 실리콘에 비해 탄성계수와 경도가 낮은 것과 마찬가지로, 이온 주입에 의해 다결정 실리콘이

비결정질 실리콘이 됨으로써 일어나는 현상이다. 그러나, 이온 농도를 늘리게 되면, 다결정 실리콘의 탄성계수와 경도가 증가함을 볼 수 있다. 특히 Ar^+ 이온을 $10^{17}/\text{cm}^2$ 로 주입하게 되면, 이온 주입을 하지 않았을 때보다, 다결정 실리콘의 경도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 이온 주입 농도를 증가시킬 경우, 오히려 다결정 실리콘의 탄성계수와 경도는 개선할 수 있는 가능성을 보여준다.

Fig. 8. He^+ 이온 주입에 의한 다결정 실리콘의 탄성계수 변화

Fig. 9. He^+ 이온 주입에 의한 다결정 실리콘의 경도 변화

Fig. 10. Ar^+ 이온 주입에 의한 다결정 실리콘의 탄성계수 변화

Fig. 11. Ar^+ 이온 주입에 의한 다결정 실리콘의 경도 변화

Fig. 12. N_2^+ 이온 주입에 의한 다결정 실리콘의 탄성계수 변화

Fig. 13. N_2^+ 이온 주입에 의한 다결정 실리콘의 경도 변화

III. 결 론

이온 주입을 이용하여 다결정 실리콘의 응력 구배를 완화하였다. 두께가 $2.1\mu\text{m}$ 인 다결정 실리콘에 He^+ , Ar^+ 이온을 주입하여 응력 구배를 완화하였으며, He^+ 이온의 경우 $10^{17}/\text{cm}^2$ 의 이온 농도와 40keV의 주입 에너지로 이온을 주입하면,

양의 응력 구배를 갖던 다결정 실리콘이 음의 응력 구배로 바뀌는 것을 확인하였다. 이러한 이온 주입에 의한 응력 구배 완화는 이온 주입이 다결정 실리콘을 비결정질 실리콘으로 바꾸므로써, 밀도가 낮아지기 때문이다. 밀도가 낮아지게 되면 부피팽창을 유도하고, 이는 이온 주입된 영역에 압축 잔류 응력을 발생시켜, 양의 응력 구배를 갖는 박막의 윗면에 있는 인장 응력을 상쇄시키게 되는 것이다.

또한, 이온 주입된 다결정 실리콘의 탄성계수와 경도를 nano-indenter를 이용한 CSM 방법으로 측정하여, 깊이에 따른 물성의 변화를 관찰하였다. 이온 주입에 의해 다결정 실리콘이 비결정질 실리콘으로 바뀌면서, 탄성계수와 경도는 감소하지만, 이온 농도를 늘리게 되면 탄성계수와 경도가 증가하게 된다.

참고문헌

- 1) Marc J. Madou, "Fundamentals of microfabrication", 2nd Ed., CRC Press, Florida, 2002, pp. 262~265.
- 2) D Maier-Schneider, J Maibach, E Obermeier, and D Schneider, "Variations in Young's modulus and intrinsic stress of LPCVD- polysilicon due to high-temperature annealing", Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 5, 1995, pp. 121~124.
- 3) Xin Zhang, Tong-Yi Zhang, Man Wong, and Yitshak Zohar, "Residual-stress relaxation in polysilicon thin films by high-temperature rapid thermal annealing", Sensors and Actuators A, vol. 64, 1998, pp. 109~115.
- 4) O Ruiz, S Marco, J Samitier, J R Morante, and J Bausells, "Effect of boron implantation on the structure and residual stress of LPCVD polysilicon films", Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 2, 1992, pp. 170~172.
- 5) Christophe Serre, Alejandro Perez-Rodriguez, Joan Ramon Morante, Jaume Esteve, Maria-Cruz Acero, Reinhard Kogler, and Wolfgang Skorupa, "Ion beam synthesis by polycrystalline SiC on SiO₂ structures for MEMS applications", Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 10, 2000, pp. 152~156.
- 6) 한준희, 이광렬, 김광석, 이상윤, "나노 인텐테이션 시험의 원리 및 응용", 한국정밀공학회지, vol. 19, no. 3, 2002, pp. 19~26.
- 7) Gregory T.A. Kovacs, "Micromachined Transducers Source Book", McGraw-Hill, 1998, pp.81~83.
- 8) Tim Searle, "Properties of amorphous silicon and its alloys", INSPEC, London, 1998.