한국표면공학회지
J. Kor. Inst. Surf. Eng.
Vol. 37, No. 3, 2004.
<연구논문>

유도결합 플라즈마-마그네트론 스퍼터링 방법을 이용한 저온 폴리실리콘 제조

유근철[a*], 박보환[a], 주정훈[b], 이정중[a]

[a]서울대학교 재료공학부, [b]군산대학교 재료공학부

Fabrication of Low Temperature Poly-Silicon by Inductively Coupled Plasma Assisted Magnetron Sputtering

Keun-Cheol Yoo[a*], Bo-Hwan Park[a], Jung-Hoon Joo[b], Jung-Joong Lee[a]

[a]School of Materials Science and Engineering, College of Engineering, Seoul National University, Shinrim-dong san 56-1, Kwanak-Ku, Seoul 151-742, South Korea
[b]Department of Materials Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

(Received 31 May 2004 ; accepted 11 June 2004)

Abstract

Polycrystalline silicon thin films were deposited by inductively coupled plasma (ICP) assisted magnetron sputtering using a gas mixture of Ar and H_2 on a glass substrate at 250°C. At constant Ar mass flow rate of 10 sccm, the working pressure was changed between 10 mTorr and 70 mTorr with changing H_2 flow rate. The effects of RF power applied to ICP coil and Ar/H_2 gas mixing ratio on the properties of the deposited Si films were investigated. The crystallinity was evaluated by both X-ray diffraction and Raman spectroscopy. From the results of Raman spectroscopy, the crystallinity was improved as hydrogen mixing ratio was increased up to Ar/H_2=10/16 sccm; the maximum crystalline fraction was 74% at this condition. When RF power applied to ICP coil was increased, the crystallinity was also increased around 78%. In order to investigate the surface roughness of the deposited films, Atomic Force Microscopy was used.

Keywords : Polycrystalline silicon, ICP magnetron sputtering

1. 서 론

저온 폴리실리콘은 현재 박막 트랜지스터 액정표시장치(TFT-LCD)의 active layer로 사용되고 있는 비정질 실리콘에 비해 carrier mobility가 우수하여 높은 전류와 빠른 스위칭 특성을 보이기 때문에 더욱 정교하고 얇은 디스플레이를 구현할 수 있는 재료로써 전 세계적으로 많은 연구가 행해지고 있다[1,2]. 일반적으로 폴리실리콘 박막의 특성은 실리콘 입자의 크기, 결함 밀도 및 미세 구조의 균일성의 함수로써 기술된다. 이와같은 특성은 특별히 폴리실리콘 박막의 제조 방법에 의해 크게 영향을 받는데, 지금까지 유리 기판위에 저온 폴리실리콘을 제조하기 위한 수많은 방법들이 제안되었다. 그 방법들에는 플라즈마 화학기상증착방법(PECVD)[3,4], Excimer Laser Annealing(ELA), Hot-Wire CVD[5], Metal Induced Lateral Crystallization(MILC)[6] 등이 있다. 이 방법들 중에서 현재 산업적으로 적용되는 방법은 ELA 방법으로 먼저 플라즈마 화학기상증착방법으로 유리 기판위에 비정질 실리콘을 증착한 후, 이 위에 Excimer 레이저를 조사하여 재결정하는 방식이다. 그런데 이 방법은 단위 시간당 생산량이 낮고, 고가의 장비를 사용하기 때문에 비용이 많이 들며, 화학증착공정 중에 박막 내에 흡착된 가스 입

*Corresponding author. E-mail : consul77@psel.snu.ac.kr

자들이 레이저 공정 중에 기포를 형성, 폭발하여 막의 표면 거칠기를 나쁘게 하는 등의 문제점을 지니고 있다[7].

본 연구에서는 고밀도 플라즈마의 하나인 유도결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasma, ICP)를 이용한 마그네트론 스퍼터링 방법으로 유리 기판 위에 직접 저온 폴리실리콘을 증착하고자 하였다. 일반적으로 유도결합 플라즈마를 이용한 증착 공정은 플라즈마 이온 밀도를 높일 수 있고, 이온 에너지의 조절을 통한 이온 충돌 효과를 이용할 수 있기 때문에 낮은 공정 온도에서 높은 결정성과 표면 거칠기가 우수한 박막을 제조할 수 있다고 알려져 있다. 또한 공정 가스에 많은 양의 수소를 혼합하면 증착된 실리콘 박막의 결정성이 증가하는 현상이 널리 알려져 있다. 이러한 현상을 설명하기 위한 형성 기구 중 일반적으로 받아들여지고 있는 기구로는 다음의 세 가지가 있다. (1) 흡착된 수소 원자가 입사하는 실리콘 원자의 표면 확산을 촉진하여 폴리실리콘이 형성된다는 표면 확산 모델. (2) 수소 원자가 결정화된 부분을 제외하고 비정질 실리콘 부분만을 선택적으로 에칭하여 폴리실리콘이 형성된다는 에칭 모델. (3) 수소 원자가 비정질 실리콘의 막 내에 침투하여 폴리실리콘의 형성을 돕는다는 화학적 어닐링 모델. 본 논문에서는 이와같은 폴리실리콘의 증착 기구와 유도결합 플라즈마의 장점을 이용해서 Ar과 수소의 혼합비율의 변화와 내부 ICP 코일에 인가되는 RF power의 변화에 따른 저온 폴리실리콘 박막을 증착하여 특성을 분석하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 장비의 구성은 그림 1과 같다. 저온 폴리실리콘은 2인치 지름의 intrinsic 실리콘 타겟을 사용하여 250°C, Corning 1737 유리기판 위에 Ar과 수소의 혼합 비율을 변화시키면서 증착되었다. 증착공정 중의 압력은 10 mTorr에서 70 mTorr까지 변화시켰으며 최저도달압력은 3×10^{-6} Torr 이하로 유지하였다. 증착에 앞서 유리 기판은 유기물과 이물질의 제거를 위해 아세톤 용액과 에탄올 용액에 담궈 초음파 세척기에서 각각 15분간 세척하여 준비하였고, 기판은 실리콘 타겟으로부터 75 mm 떨어진 곳에 위치하고 접지하였다.

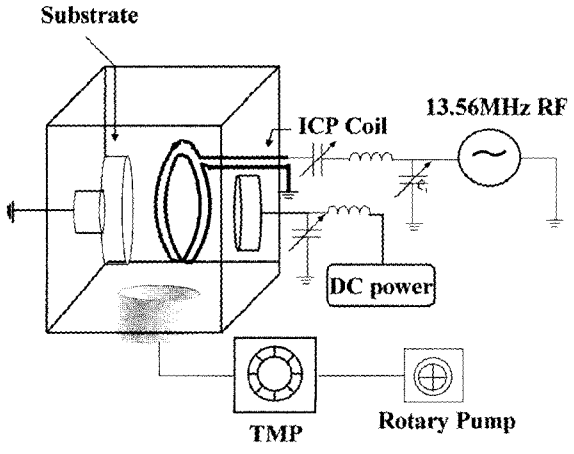

Fig. 1. Schematic diagram of experimental ICP magnetron sputtering system.

Ar의 유량은 모든 실험에서 10 sccm으로 고정되었다. 수소의 유량은 0 sccm부터 24 sccm까지 2 sccm씩 증가시켰으며, Ar과 수소는 모두 고순도 가스(99.999%)를 사용하였다. 증착 챔버 내부에는 RF power(13.56 MHz)를 인가하기 위해 구리 코일을 두 번 감아 기판과 타겟 사이에 설치하였다.

증착된 박막의 두께는 알파 스텝(KLA-TENCOR, Alpha-step 500)을 이용하여 측정하였다. 증착된 박막의 결정성을 관찰하기 위해서는 X-Ray Diffraction (MAC Science Co., M18XHF-SRA)과 Raman spectroscopy(Jobin Yvon, LabRamHR, 514 nm Ar^+ laser)를 이용하였다. Raman spectroscopy의 peak을 통해서 증착된 실리콘이 비정질인지 결정질인지 아니면 혼합상인지를 알 수 있는데, 결정분율은 측정된 Raman spectroscopy 데이터를 Lorentzian fit으로 비정질실리콘 부분의 peak과 결정화된 실리콘 부분의 peak을 분리하여 그 면적비율을 계산하여 결정한다. 일반적으로 비정질 실리콘은 480 cm^{-1}에서, 결정질 실리콘은 520 cm^{-1}에서 peak이 관찰된다. 많은 연구자들이 510 cm^{-1}부분에서도 peak이 나타나는 것으로 보고하는데, 이 peak은 결정립계와 관련된 소형 결정립에 의해 나타나는 것으로 알려져 있다[8]. 본 연구에서는 510 cm^{-1}에서 나타나는 peak과 520 cm^{-1}에서 나타나는 peak을 합친 값을 결정화 된 peak으로 보고, 이 결정화된 peak의 면적을 전체 peak의 면적으로 나눈 값을 결정분율로 계산하였다. 또한 증착된 박막의 표면 거칠기 관찰을 위해서 Atomic Force Microscopy(AFM)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수소 혼합에 따른 폴리실리콘 박막의 특성 변화

그림 2는 250°C, Ar 10 sccm, ICP power 400W, 공정압력 30 mTorr에서 증착된 실리콘 박막의 X-Ray 회절 결과와 Raman spectroscopy 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 수소가 전혀 혼합되지 않고 Ar 가스 분위기에서 증착된 박막은 X-

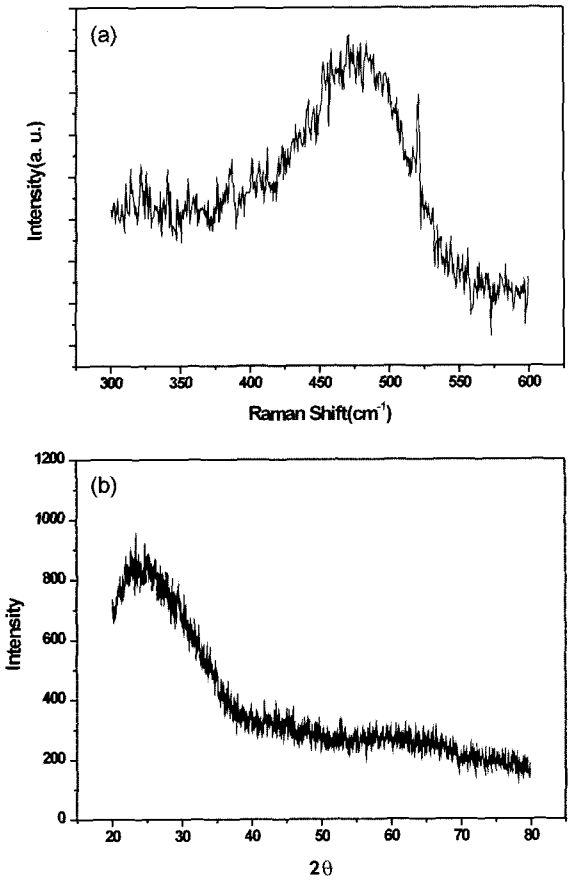

Fig. 2. Raman spectroscopy and XRD result show no crystalline fraction in Ar ambient deposited Si film (a) Raman spectroscopy (b) XRD, Deposition conditions : 30 mTorr, ICP 400 W, DC 400 W, Ar 10 sccm, 250°C, Ground.

Ray 회절 결과에서 어떠한 peak도 관찰되지 않는다. 마찬가지로 Raman spectroscopy 결과를 살펴봐도 480 cm^{-1}근처에서 비정질실리콘의 특성 peak만 관찰될 뿐 결정화와 관계된 어떠한 특성 peak도 관찰되지 않는다. 그림 2-(a)에서 520 cm^{-1}부근의 날카로운 peak처럼 보이는 부분은 Raman spectroscopy 측정시 사용하는 Ar^+ 레이저의 플라즈마에 의해 나타나는 것으로 폴리실리콘의 특성 peak과는 상관없다. 즉 Ar 가스 분위기에서 증착된 실리콘 박막은 비정질 실리콘임을 알 수 있다.

그림 3은 수소 혼합 비율이 증가함에 따라 나타나는 실리콘 박막의 결정특성을 보여주고 있다. 증착조건은 그림 2와 같으며, 수소 혼합량을 4 sccm부터 24 sccm까지 4 sccm씩 증가시키면서 실리콘 박막을 증착하였다. 그림에서 알 수 있듯이 수소의 혼합비율이 증가할수록 증착된 실리콘 박막의 결정성은 증가하고, Ar과 수소의 혼합비가 10/16 sccm에서 결정분율이 74%로 최고값을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 결과는 수소 원자에 의한 표면 확산

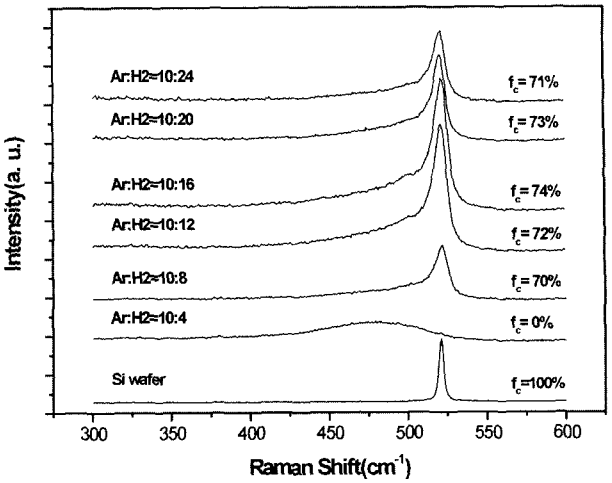

Fig. 3. Raman spectroscopic results in Ar + H_2 mixing environment. Deposition conditions : 30 mTorr, ICP power 400 W, DC 400 W, 250°C, Ground.

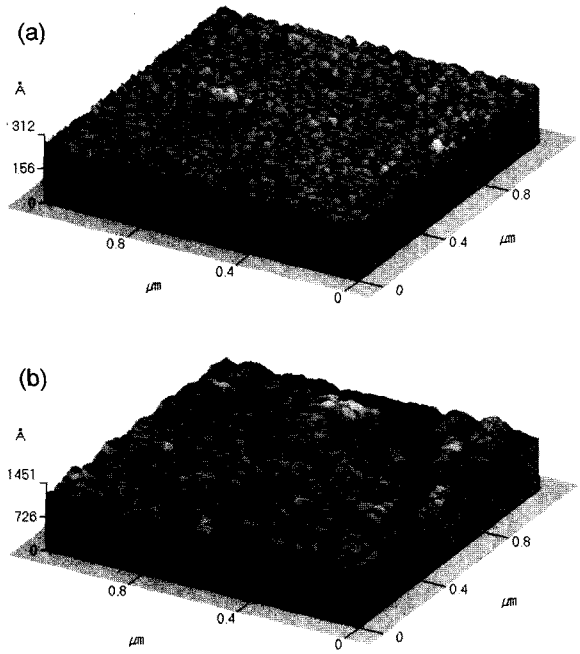

Fig. 4. AFM images of (a) H_2 : 0 sccm (b) H_2 : 16 sccm.

모델에 의하면, 성장하는 막의 표면에 단원자층으로 흡착된 수소가 입사하는 실리콘 원자의 표면 확산을 촉진시켜 실리콘의 결정화를 돕기 때문으로 설명할 수 있다. 이와같은 사실은 그림 4에 보이는 AFM 그림을 통해서도 확인할 수 있다. 그림 4의 (a)는 Ar 10 sccm에 수소가 혼합되지 않은 상태에서 증착된 실리콘 박막의 표면 그림이고, (b)는 Ar 10 sccm에 수소를 16 sccm 혼합하여 증착된 박막의 표면 그림을 보여준다. (a)에서는 표면 거칠기가 9 Å으로 매우 평탄하고 매끄러운 것을 알 수 있다. 반면에 (b)의 그림에서는 표면 거칠기가 53 Å으로 (a)

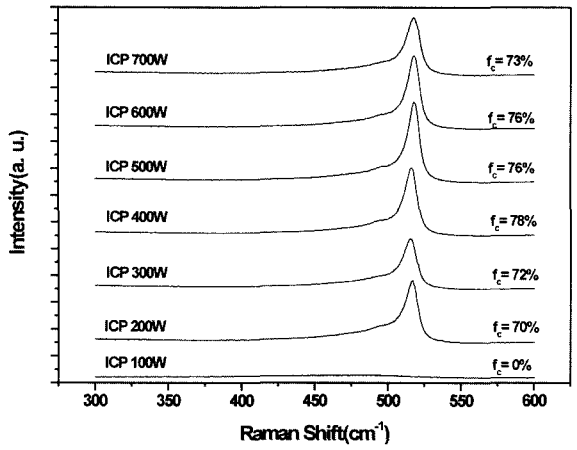

Fig. 5. Raman spectroscopic results as respect to ICP power, Deposition conditions : 40 mTorr, DC 300 W, Ar:H_2=10:16 sccm, 250°C, Ground.

에 비해 거칠고, 입자로 생각되는 올록볼록한 표면들이 관찰된다. 즉 공정 가스에 수소를 혼합하면, 수소가 성장하는 막에 입사하는 실리콘 원자들의 원거리 표면 확산을 촉진하여 폴리실리콘이 형성됨을 알 수 있다.

3.2 ICP power 변화에 따른 폴리실리콘 박막의 특성 변화

그림 5는 내부 ICP 코일에 인가되는 power 변화에 따른 Raman spectroscopy 결과를 보여주고 있다. ICP power가 전혀 인가되지 않은 조건에서 증착된 실리콘 박막은 결정화된 실리콘 peak을 전혀 볼 수 없었다. 반면에, 그림에서 볼 수 있듯이 ICP power가 200 W 이상이 인가될 때부터 결정화된 특

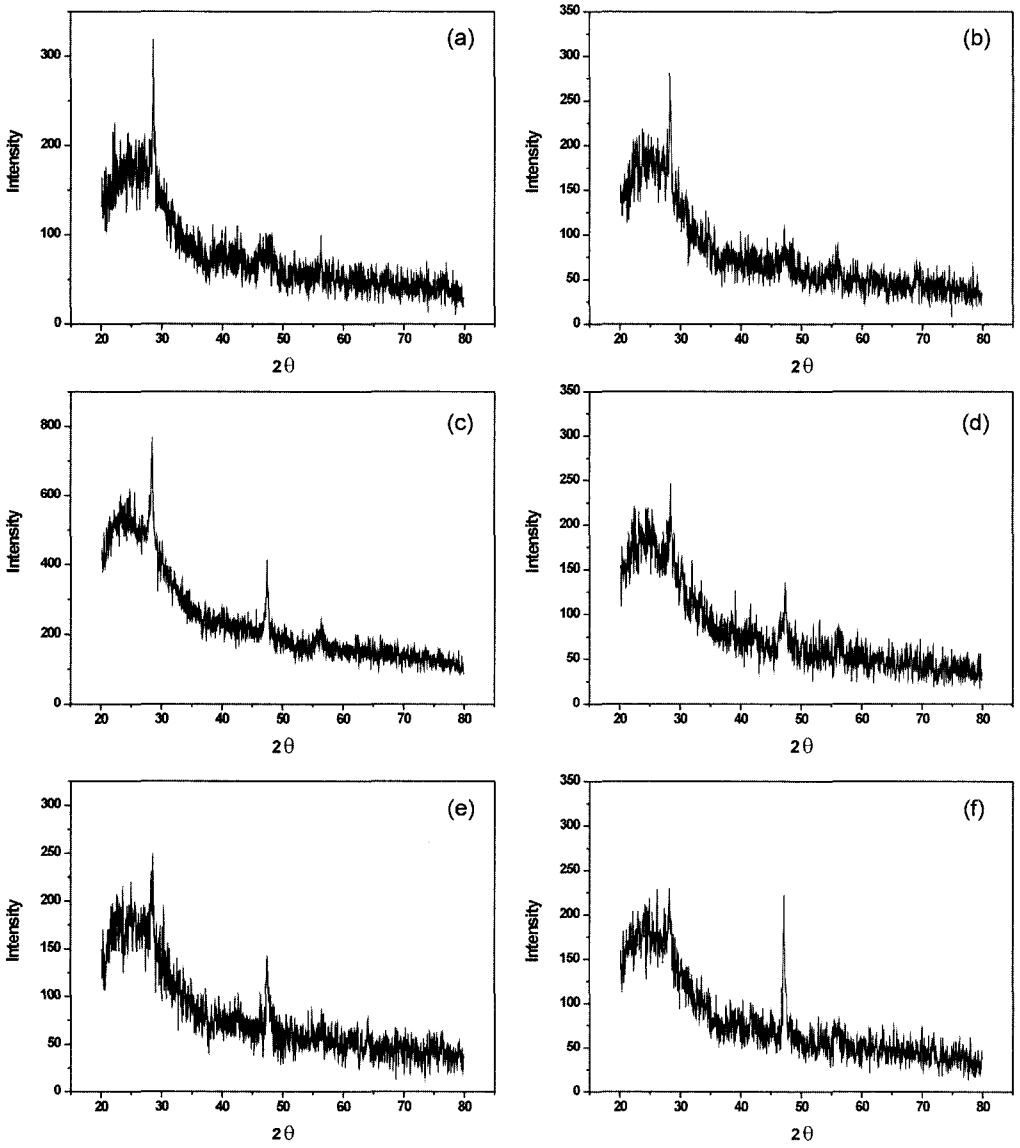

Fig. 6. X-Ray Diffraction results as respect to ICP power (a) ICP 200 W (b) ICP 300 W (c) ICP 400 W (d) ICP 500 W (e) ICP 600 W (f) ICP 700 W, Deposition conditions : 40 mTorr, ICP 700 W, DC 300 W, Ar:H_2=10:16 sccm, 250°C, Ground.

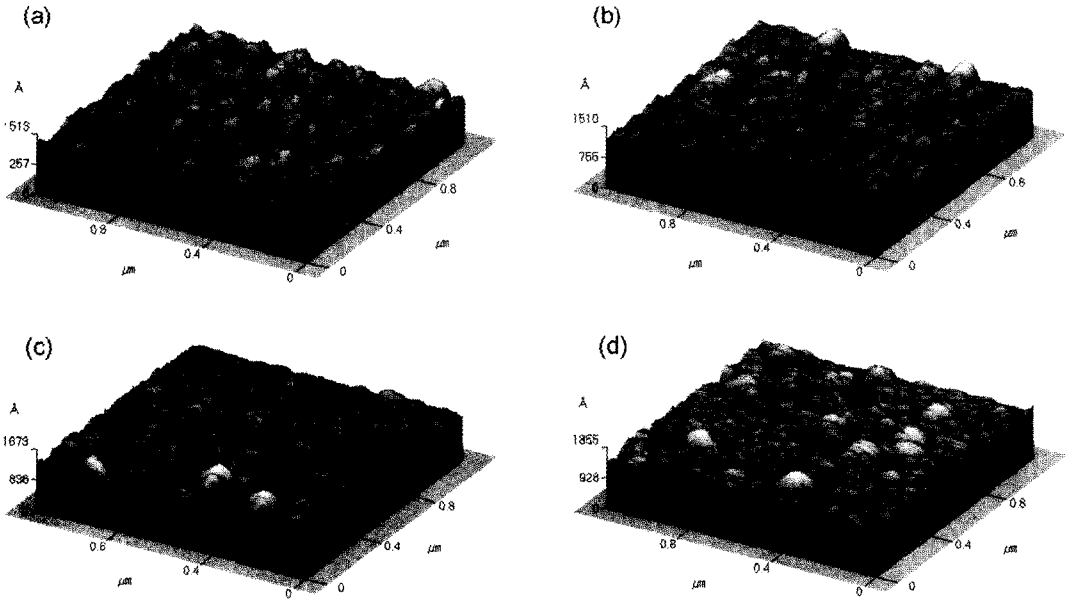

Fig. 7. AFM images of (a) ICP 100 W (b) ICP 300 W (c) ICP 500 W (d) ICP 700 W.

성을 나타내는 peak이 관찰되고, ICP power가 증가함에 따라 결정성은 증가하고 400W 일 때 최고 78%의 결정성이 나타남을 알 수 있다. ICP power를 400 W 이상으로 더욱 증가시키면 결정성은 다시 감소하는 경향도 보인다. 이와같은 결과는 X-ray 회절 결과와도 일치하는데, 그림 6을 보면 다른 결과에 비해서 ICP power가 400 W일 때 Si(111) peak과 Si(220) peak이 뚜렷이 관찰됨을 확인할 수 있다. 여기서 또 하나 눈여겨볼 점은 ICP power가 400 W 이하일 때는 잘 보이지 않던 Si(220) peak이 400 W 이후에는 Si(111) peak보다 상대적으로 크게 성장하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 ICP power가 높아짐에 따라 Si(111) 방향보다 Si(220) 방향의 성장이 우선적으로 이뤄지기 때문으로 생각된다. 그림 7은 ICP power의 변화에 따른 표면 거칠기를 보여주는 AFM 그림을 나타내고 있다. ICP power가 증가할수록 표면 거칠기는 증가하는 경향을 보이고, 300 W에서 600 W 사이에서는 RMS 표면 거칠기가 40~60 Å 값에서 변화하다가 700 W에서는 83 Å으로 급격히 증가한다. 이런 현상은 이온 온도가 300 W에서 600 W 사이에서 일정하다가 700 W 이상에서 급격히 증가하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 이 부분에 대해서는 앞으로 플라즈마 분석을 통해 연구해 볼 계획이다.

4. 결 론

유도결합 플라즈마를 이용한 마그네트론 스퍼터링 방법으로 250°C의 저온에서 폴리실리콘을 증착하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공정기체가 Ar일 경우 증착된 실리콘 박막은 Raman spectroscopy와 X-ray 회절에서 어떠한 결정화된 특성도 나타나지 않는 비정질 실리콘이었다.

2. Ar에 수소를 혼합하면 Raman spectroscopy에서 결정화와 관련된 특성 peak이 관찰되는데, 결정성은 Ar 대 수소의 혼합비가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고, 최고 Ar/H_2=10/16 sccm에서 74%의 결정화율을 보였다.

3. ICP power 변화에 따른 폴리실리콘 박막의 결정성도 ICP power가 증가함에 따라 증가하고 400 W에서 최고 78%의 결정성을 보였다.

참고문헌

1. J. Jang, S. Y. Yoon, S. J. Park, K. H. Kim, Thin Solid Films, 383 (2001) 34-38.
2. A. T. Voutsas, Applied Surface Science, 208-209 (2003) 250-262.
3. A. Matsuda, J. Non-Cryst. Solids, 59 (1983) 767.
4. J. P. Conde, V. Schotten, S. Arekat, P. Brogueira, R. Sousa, Jpn. J. Appl. Phys., Part 1, 36-38 (1997).
5. Y. Feng, M. Zhu, F. Liu, J. Liu, H. Han, Y. Han, Thin Solid Films, 595 (2001) 213-216.
6. J. Jang, J. I. Soo, S. Y. Yoon, K. H. Kim, Vacuum 51 (1998).
7. J. H. Joo, J. Vac. Sci. Technol. A, 18(4) (2000) 2006-2011.
8. J. E. Gerbi, J. R. Abelson, J. App. Phys., 89 (2001) 1465.
9. Akihisa Matsuda, Thin Solid Films, 337 (1999) 1-6.