

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 21, No. 1, 2001

열선 CVD에 의해 증착된 다결정 실리콘 박막의 구조적 특성 분석

이정철, 강기환, 김석기, 윤경훈, 송진수, 박이준

한국에너지기술연구원

Growth and Characterization of Polycrystalline Silicon Films by Hot-Wire Chemical Vapor Deposition

J. C. Lee, K. H. Kang, S. K. Kim, K. H. Yoon, J. Song, and I. J. Park

Korea Institute of Energy Research

Abstract

Polycrystalline silicon(poly-Si) films are deposited on low temperature glass substrate by Hot-CVD(HWCVD). The structural properties of the poly-Si films are strongly dependent on the temperature(T_w). The films deposited at high T_w of 2000°C have superior crystalline proper average lateral grain sizes are larger than 1 μ m and there are no vertical grain boundaries. The surface of the high T_w samples are naturally textured like pyramid shape. These large grain size and textured surface are believed to give high current density when applied to solar cells. However, the polycrystalline films are structurally porous and contains high defect density, by which high concentration of C and O resulted within the films by air-penetration after removed from chamber.

Key Words : 열선 CVD, 다결정 실리콘, 박막, 증착, 결정특성

1. 서 론

최근 들어 태양전지나 디스플레이 산업에서 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)의 대체물질로 미세결정 실리콘(μ c-Si:H) 또는 다결정 실리콘(Poly-Si) 박막 증착에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 다결정 실리콘 박막은 비정질 실리콘에 비해 캐리어 이동도가 매우 높아 태양전지나 액정 표시기용 박막 트랜지스터 등의 소자응용에 매우 유리하다. 또한 다결정 실리콘 박막을 사용한 태양전지는 기존의 비정질 실리콘 태양전지에 비해 변환효율이 높으며, 광 열화현상(Staebler-Wronski effect)이 없어 차세대 저가 고효율 태양전지로 주목받고 있다.

태양전지나 TFT(Thin film transistor) LCD와 같은 소자응용을 위해서는 낮은 기판온도(600°C 이하)에서 고품질의 실리콘 박막증착이 요구되므로, 기존의 높은 기판온도에서의 증착방법^{1~3)}은 응용이 제한되고 있으며, 새로운 방법의 개발이 시급한 실정이다. 기판을 저온으로 유지시키며 박막을 성장시키는 방법으로는 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition)^{4,5)}, VHF CVD(very high frequency CVD)^{6,7)}, ECR CVD(electron cyclotron CVD)⁸⁾, 열선 CVD^{9~11)} 등과 같은 직접성장법과 증착된 비정질 실리콘 막을 열(heat)이나 laser을 이용해 재결정화시키는 방법(SPC; solid phase crystallization)^{12~15)} 등을 들 수 있다.

열선 CVD는 1979년 H. Wiesemann¹⁶⁾에 의해 최초로 비정질 실리콘 박막 증착용으로 시도된 후, 태양전지와 TFT 분야에서 고품질의 비정질 및 다결정 실리콘 박막 증착용으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 열선 CVD에서는 SiH₄ 및 H₂와 같은 반응가스가 반응실 안으로 주입되면 고온(1500~2000°C)으로 가열된 열선에 물리적으로 흡착되고, 열 에너지에 의해 SiH₃, Si, H 등으로 분해된다. 이렇게 열 분해

(thermal decomposition)된 가스는 열선의 높은 온도에 의해 다시 열선으로부터 증발(evaporation)되며, 증발된 가스 분자의 일부는 기판에 퇴적하여 실리콘 박막을 형성하고 나머지는 주위의 가스와 기상반응(gas phase reaction)을 일으킨다. 열선 CVD법은 기존의 글로우 방전 CVD(glow discharge CVD)법과는 달리 가스 분해를 위해 열 에너지만을 사용하므로 플라즈마에 의한 막의 손상문제가 전혀 없으며, 장치가 간단하고 확장이 용이한 것이 장점이다. 또한 열선의 확장만으로 박막의 대면적화가 가능하며, 기존의 글로우 방전법에 비해 막의 성장속도가 매우 높아 소자 제조에 응용될 경우 생산성 향상에 따른 가격 저감의 장점을 가지고 있다. 그러나 열선 CVD가 가지는 이러한 장점으로 인해 많은 연구가 진행되고 있음에도 불구하고, 대부분의 증착된 박막은 결정의 크기가 수십 nm 정도의 미세결정(microcrystalline)인 것으로 보고되고 있어^{17,18)}, 결정립이 큰 다결정 실리콘 박막 증착에 관한 연구가 시급한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 열선 CVD를 이용해 유리기판 위에 실리콘 박막을 저온 증착하고 결정 특성 변화를 분석하였다. 또한 막 내부에 존재하는 불순물의 농도 및 오염원인에 대해 분석하고 태양전지 등과 같은 소자응용 가능성에 대해 조사하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 열선 CVD 장치¹⁹⁾는 두 개의 반응실로 구성되어 있으며, 주 반응실을 고진공으로 유지시킨 채 준비실(load chamber)을 통해 시료를 삽입하거나 증착후 제거하였다. 주 반응실의 경우 열선이 기판위에 배열되어 있는 것을 제외하면 기존의 CVD 장치와 매우 흡사하다. 열선

으로는 두께가 0.5mm인 고순도 텅스텐(W)을 사용하였으며, 지지대는 고순도 동(Cu) 봉을 사용하였다. 텅스텐 열선의 온도는 optical pyrometer ($\lambda = 800 \sim 1100\text{nm}$, TR 630, Minolta)를 사용하여 주 반응실 상부의 view port를 통해 측정하였다.

기판으로는 유리(Corning 7059)와 <100> 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 먼저 loading chamber를 통해 시료를 주 반응실로 주입한 다음 1×10^{-6} Torr까지 진공배기 하였다. 그리고 텅스텐 열선의 표면에 존재하는 불순물을 제거하기 위하여 열선온도를 2000°C 이상으로 유지시킨 채 수 분간 예열(pre-heating)을 하였다. 이때 기판으로 불순물이 떨어지는 것을 방지하기 위하여 shutter를 사용하였다. 다음으로 SiH₄(순도 99.999%)와 H₂ 가스를 유량조절기(MFC)를 통해 반응실 내부로 주입시키고, 자동 압력조절장치(automatic pressure controller)를 사용해 반응실 내부의 압력을 원하는 값으로 조정하였다.

증착된 박막의 두께는 α -step profilometer (Tencor 2000)와 파장에 따른 막의 투과 간섭 무늬의 간격으로부터 측정하여 보정하였다. x-선 회절분석(Cu K α , $\lambda = 1.5404\text{\AA}$), Raman Spectroscopy, Scanning electron spectroscopy (SEM)를 이용해 증착된 막의 결정 특성을 분석하였으며, Transmission electron spectroscopy (TEM)을 이용하여 막의 결정구조 및 결함(defects)을 관찰하였다. 박막의 암

전도도(dark conductivity)와 광 전도도(photo conductivity)는 간격 1mm인 Au co-planar 전극을 막 위에 형성하여 측정하였으며, 광 전도도 측정을 위해 인공태양(solar simulator)을 사용해 AM 1.5 100mW/cm²의 빛을 조사하였다. 증착중 막 내부로 유입된 텅스텐 및 기타 불순물의 양을 알아보기 위해 이차이온질량분석(SIMS, Cameca-ims 4f)을 하였다. 또한 막 내부의 Si, H, O의 결합상태는 FTIR(Fourier Transform Infrared spectroscopy)을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열선온도에 따른 막의 결정특성

열선 CVD에서 증착되는 막의 특성에 영향을 미치는 증착변수로는 열선온도, 기판온도, 수소혼합비(H₂/SiH₄), 기판-열선 거리, 반응압력 등을 들 수 있다. 앞서 수행한 연구결과[20]에서 수소혼합비, 반응압력의 변화에 따른 막의 결정특성을 분석한 결과 대부분의 증착된 막은 결정립의 크기가 수십 nm인 미세결정을 가지는 것으로 조사되었으며, 조건 변화에 따른 이러한 미세결정의 부분적 응집(nucleation)현상을 관찰할 수 있었다. 따라서 본 절에서는 앞서 확립된 증착조건을 유지하며, 열선온도에 따른 막의 결정특성을 조사하였다. 표 1.에 본 실험에서 사용된 증착조건을 나타내었다.

그림 1은 열선온도 1800°C와 2000°C에서 유리

Table 1. 실험에 사용된 실리콘 박막 증착 조건

반응압력(mTorr)	H ₂ /SiH ₄	열선온도(°C)	기판-열선거리(cm)	열선의 수	*기판온도(°C)
200	25	1800, 2000	2	2	300-500

* 기판온도는 열선온도, 기판-열선거리에 따라 서로 다른 값을 가진다(2절 참고)

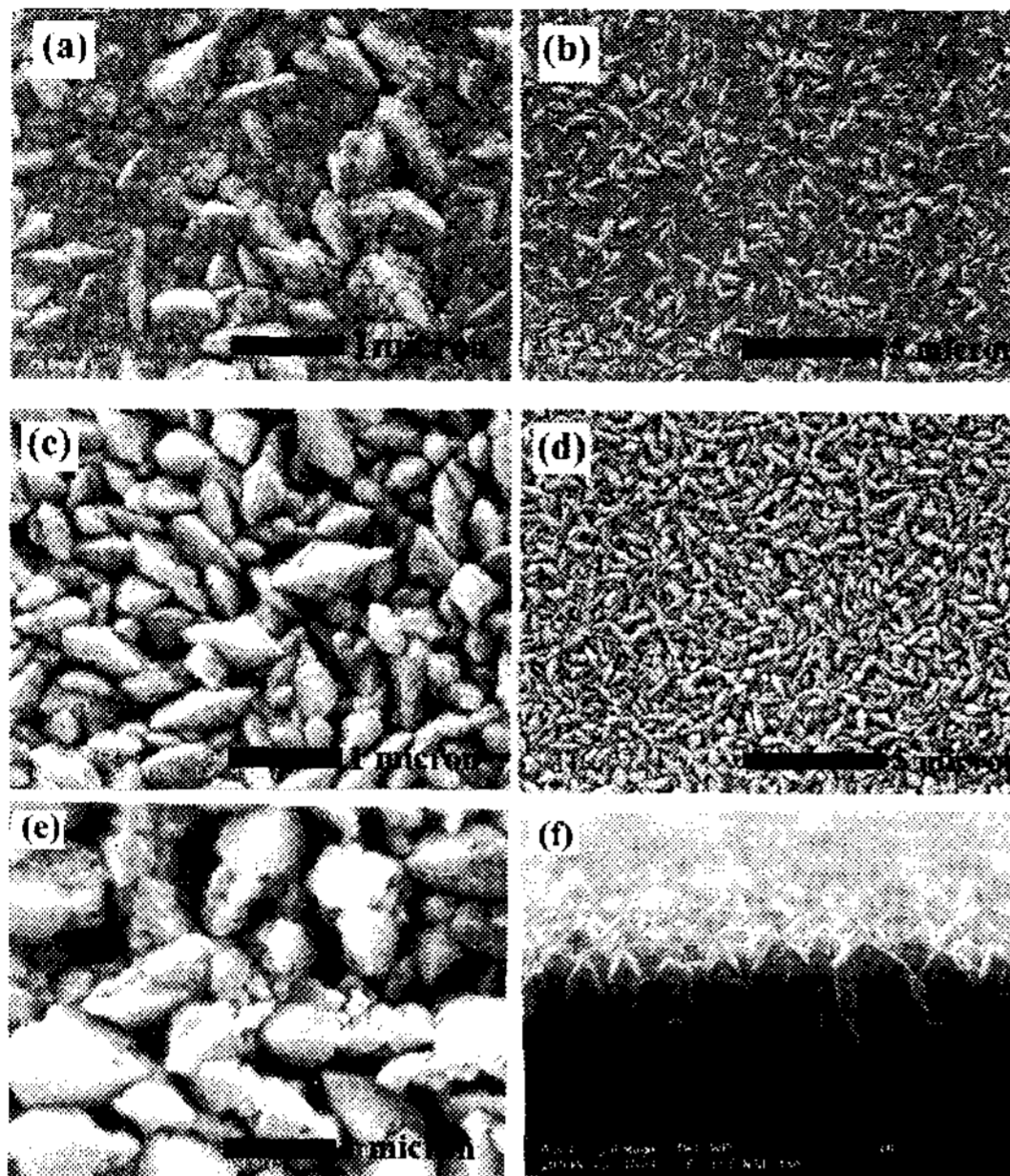


Fig. 1. SEM surface morphology of the poly-Si films deposited at two filament temperature ; (a) and (b) 1800°C, (c) and (d) 2000°C. The (b) and (d) are less magnified photographs of two samples. (e) and (f) are prepared at same conditions of (c) and (d) but deposition time doubled.

기판위에 각각 증착된 실리콘 막의 SEM 결정구조를 나타낸 것이다. 열선온도 1800°C에서 증착된 실리콘 박막의 경우 결정립의 크기가 수십 nm의 값을 가진다. 또한 이러한 나노 크기의 결정들이 부분적으로 응집되어 비교적 큰 결정립을 이루고 있으나, 이렇게 응집된 결정내부는 또 다른 나노 크기의 미세결정들로 구성되어 있다. 반면, 열선온도가 2000°C로 증가하자 저온의 열선온도에서 관찰되었던 미세결정을 발견할 수 없으며, 최대 결정립의 크기가 약 1 μ m인 깨끗한 결정 성장을 확인할 수 있었다. 그림 1.의 (e)와 (f)는 열선온도 2000°C에서 증착시간을 (c)의 2배로 하여 형성한 실리콘 막의 표면 및 경사 단면사진을 나타낸 것이다. 막의 성장시간이 증가하자 결정립 크기가 증가함을 확인할 수 있다. 또한 SEM 단면사진으로부터 막의 수직방향 성장이 유리기판

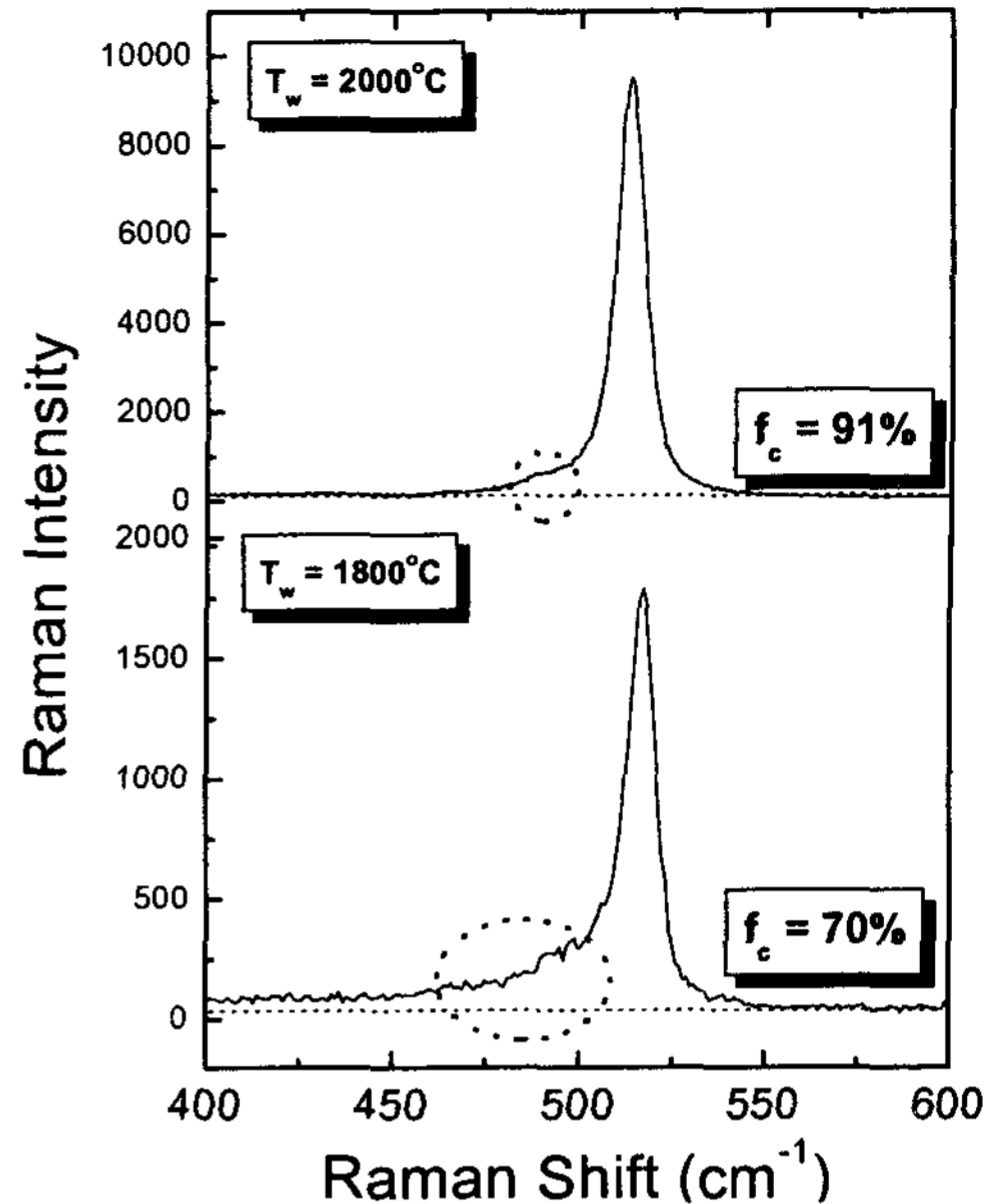


Fig. 2. Comparisons of Raman spectra of the poly-Si films deposited at two filament temperature.

으로부터 막의 표면까지 균일하게 성장되어 있으며, 단일 결정립으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그림 (c)의 단면사진으로부터 또 하나 주목할 만한 사실은 증착된 막의 표면이 자연적인 texture(피라미드 형상)구조를 가지고 있다는 것이다. 일반적으로 실리콘 박막을 태양전지에 응용할 경우 실리콘 막이 낮은 흡수계수를 가지고 있어²¹⁾ 광 수집(light trapping)을 증가시키기 위해 인위적으로 표면의 거칠기(roughness)를 증가시켜 태양전지를 제조하고 있다. 본 연구에서 증착된 막의 경우 표면이 자연적인 texture구조를 가지고 있어 태양전지에 응용될 경우 효율적인 광 수집으로 인해 높은 변환효율을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

그림 2.는 앞서 언급한 서로 다른 열선온도에서 증착된 실리콘 박막의 Raman 스펙트라를 비교해 나타낸 것이다. 열선온도 1800°C에서 증착된 막의 Raman 스펙트럼의 경우 파수 520 cm^{-1}

를 기준으로 좌우 피크의 현저한 비대칭특성을 관찰할 수 있는데, 이는 앞서 SEM 표면특성에서도 관찰하였듯이 증착된 박막의 미세결정 특성 또는 미세결정과 결정사이에 존재하는 비정질 상(phase)에 의해 기인된 것으로 분석된다²²⁾. 반면 열선온도가 2000°C로 증가하자 Raman 스펙트럼은 앞서 살펴본 1800°C 시료와는 달리 비정질 상 혹은 미세결정 상에 의한 저 파수에서의 비대칭성이 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 Raman 피크의 강도 또한 열선온도가 증가하자 현저히 증가하였으며, 이는 앞서 그림 1의 SEM 표면사진에서 살펴본 열선온도 증가에 따른 막의 결정 특성 향상과 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 증착된 막의 결정화도를 알아보기 위하여 $I_c/(I_c+I_a)$ ²³⁾로부터 막의 결정체적분율(crystalline volume fraction; f_c)을 구하였다. 여기서 I_c 와 I_a 는 Raman peak의 분해(deconvolution)에 의해 구해진 결정질(520cm^{-1} 부근)과 비정질 상에 해당하는 peak(480cm^{-1} 부근)의 적분면적을 각각 나타낸다. 낮은 열선온도에서 증착된 시료의 경우 결정체적분율은 약 70%로 비교적 낮은 결정화도를 가지나, 열선온도가 2000°C로 증가하자 91%의 높은 결정화도를 가지는 것으로 조사되었다.

그림 3은 열선온도에 따른 막의 x-선 회절특성을 나타낸 것이다. 그림에 나타내었듯이 1800°C에서 증착된 실리콘 박막의 경우 (111), (220), (311) 피크의 비가 실리콘 파우더와 유사한 강도 분포를 가지고 있어 막의 성장이 random하나, 열선온도가 증가하자 (220)방향으로 막이 우선 배향 됨을 관찰할 수 있다.

이상의 결과로부터 열선 CVD에 의해 증착된 실리콘 박막의 경우 그 결정특성이 열선온도에 매우 민감하게 반응하고, 열선온도가 증가하자 결정특성이 크게 향상됨을 관찰하였다. 열선온도 증가에 따른 막의 결정특성 향상에 대한 정확한 원인은 현재까지 밝혀지지 않고 있다. 따라서 다음

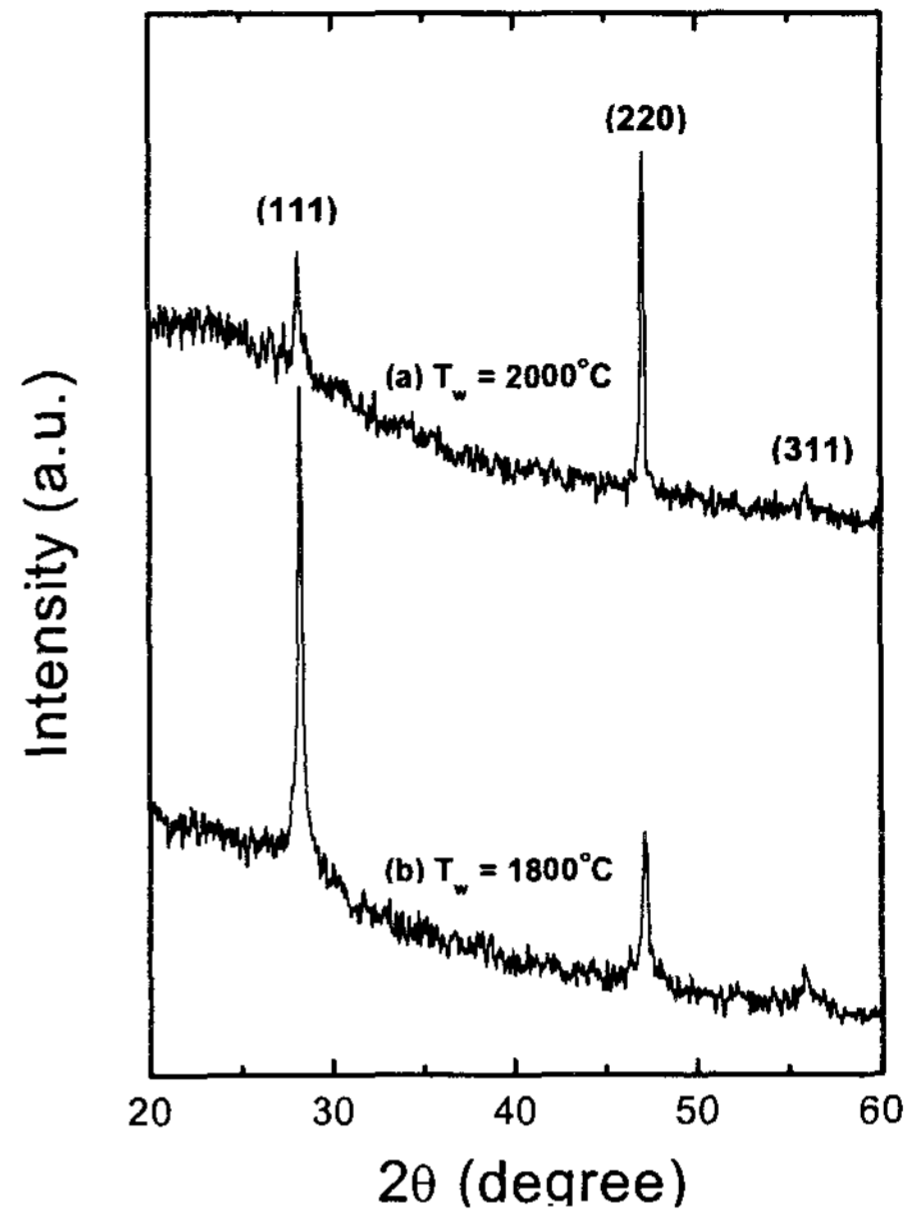


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of poly-Si films deposited at different filament temperature: (a) 1800°C and (b) 2000°C.

절에서는 이에 대한 원인분석의 선행연구로서 몇몇 증착조건을 변화시키며 막의 결정특성을 비교 관찰하였다.

3.2. 기판온도의 영향

열선온도 증가에 따른 막의 결정특성 향상에 대한 원인으로 먼저 기판온도의 영향을 들 수 있다. 열선 CVD의 경우 증착중 기판이 고온으로 가열된 열선과 매우 근접해 있으므로(본 실험의 경우 열선-기판 거리는 2cm임) 열선으로부터 발생한 복사열에 의한 기판의 자동가열 현상을 배제할 수 없다. 그림 4는 열선온도와 열선-기판 거리 변화에 따른 유리기판 온도의 변화를 나타낸 것이다. 열선-기판 거리 2cm, 열선온도 1800°C일 경우 유리기판의 온도는 약 400°C로 상승하였으며, 열선온도가 2000°C로 증가하자 기판온도는 약 500°C로 상승하였다. 따라서 앞서 살펴

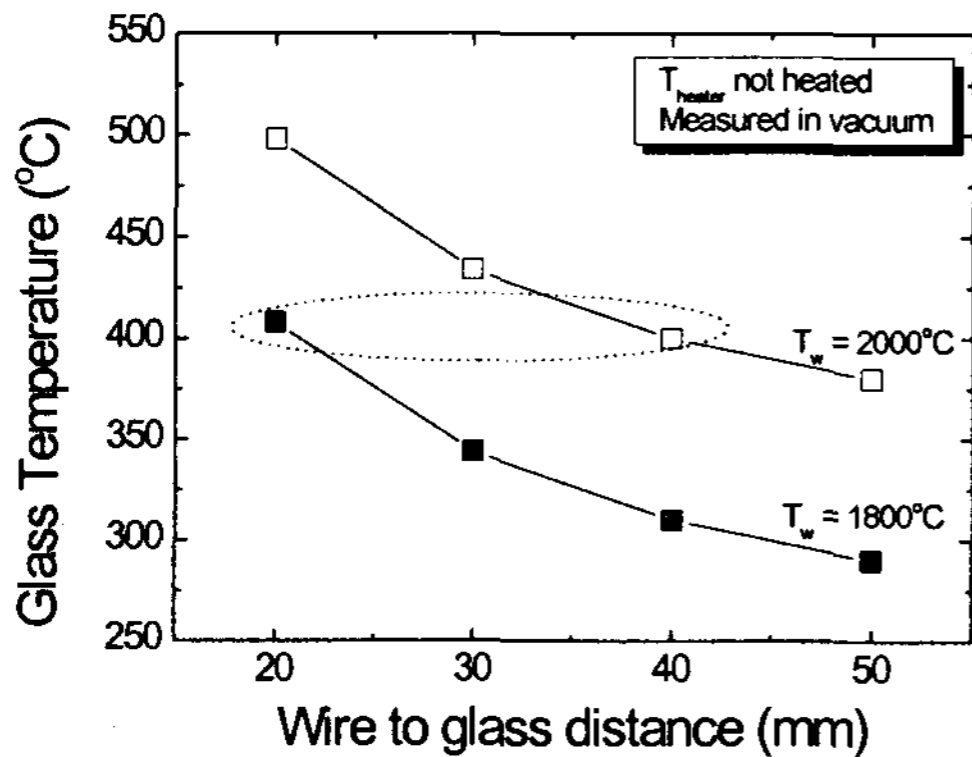


Fig. 4. The variation of glass temperature as a function of wire-to-glass distance and filament temperature.

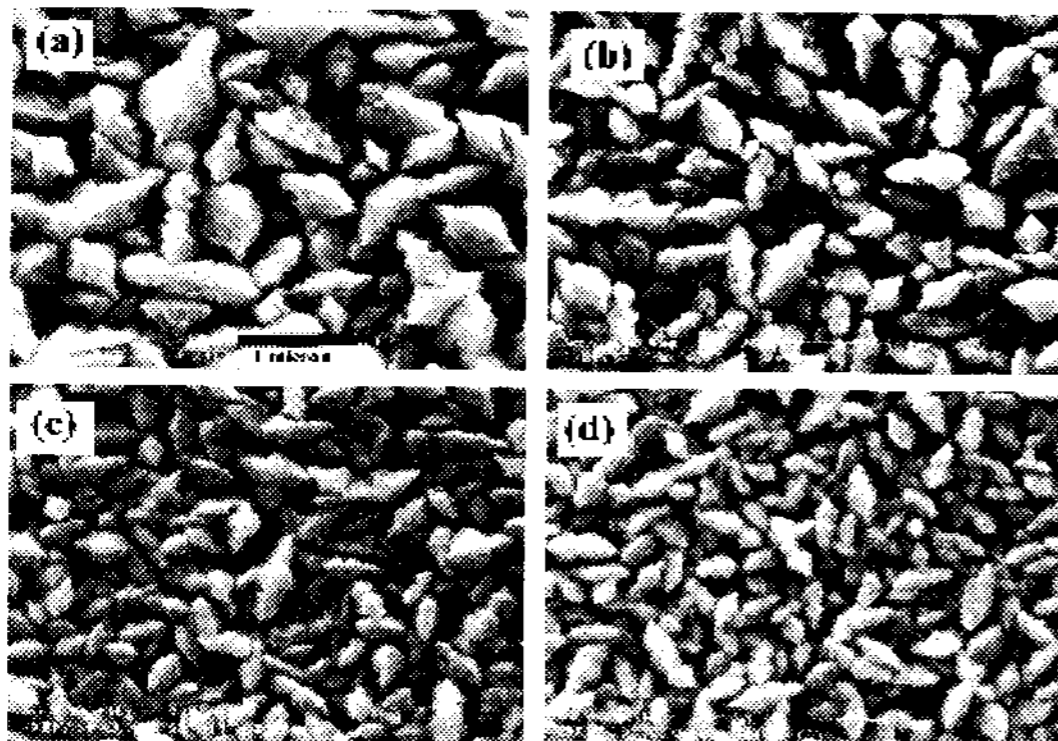


Fig. 5. SEM surface morphology of poly-Si films as a function of wire-to-glass distance; (a) 2cm, (b) 3cm, (c) 4cm and (d) 5cm. Other deposition conditions are kept same; P_g 200mTorr, T_w 2000°C, SiH_4 2sccm and H_2 50sccm.

본 열선온도 상승에 따른 막의 결정특성 향상이 기판온도의 상승에 의한 것인지 관찰하기 위하여 기판온도를 변화시키며 막의 결정특성 변화를 관찰하였다. 불행히도, 본 연구에서 사용된 장치의 경우 열선으로부터 발생한 복사열로 인해 기판온도의 외부 제어가 불가능하였다. 따라서 기판온도를 변화시키기 위해 열선온도를 2000°C로 유지시킨 채, 열선-기판 거리를 2cm에서 5cm로 변화시켰다. 그림 4.에서 나타내었듯이, 열선온도 200

0°C에서 기판-열선 거리를 약 4cm로 증가시킬 경우 열선온도 1800°C일 때의 기판온도와 동일한 값(약 400°C)을 얻을 수 있었다.

그림 5.는 열선온도 2000°C, 반응압력 200 mTorr, H_2/SiH_4 25의 조건에서 열선-기판 거리를 2cm에서 5cm로 변화시키며 증착한 실리콘 박막의 SEM 표면사진을 나타낸 것이다. 열선-기판 거리가 증가하자 결정크기가 평균적으로 감소함을 확인할 수 있다. 그림 1.의 (a)와 그림 5.의 (c)를 서로 비교해 보면, 두 시료는 동일한 기판온도(약 400°C)에서 증착 되었으나 고온의 열선온도에서 증착된 시료의 경우 그림 5(c) 저온의 열선온도 시료 그림 1(a).와는 달리 미세결정의 결정성장을 찾아볼 수 없으며, 전반적으로 균일한 결정구조를 가짐을 알 수 있다. 이러한 차이는 그림 6.의 Raman 특성 비교로부터 더욱 분명히 나타나는데, 증착된 막의 Raman 스펙트라는 열선-기판 거리와는 무관한 특성을 보였으며, 열선온도 1800°C에서 증착된 시료의 Raman 특성(그림 2)과는 확연한 차이를 가짐을 알 수 있다. 즉, 열선온도 1800°C 시료에서 발견된 미세 결정 또는 비정질 상에 의한 Raman 스펙트럼의 비대칭 특성이 열선온도 2000°C에서는 기판-열선 거리에 상관없이 현저히 감소함을 알 수 있다.

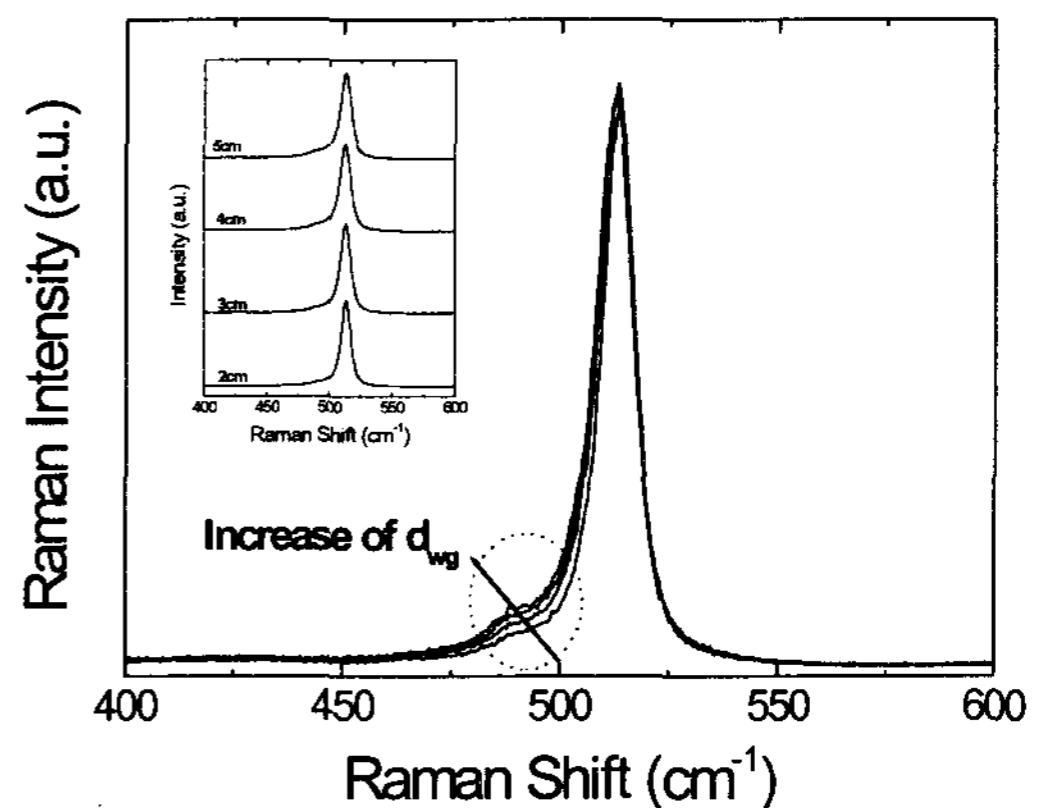


Fig. 6. Comparisons of Raman spectra with wire-to-glass distance.

이상의 결과로부터 앞서 살펴본 열선온도 증가에 따른 막의 결정특성 향상은 단순한 기판 온도 상승에 의한 것이 아님을 확인할 수 있었다. 그러나 열선-기판 거리 증가에 의한 반응 가스 들간의 이차반응 또한 증가하게 되고, 그에 따른 막의 특성변화에 대한 추가연구가 요구된다.

3.3. 박막내부의 불순물 오염

실리콘 박막을 태양전지를 비롯한 기타 소자에 응용하는데 있어 박막 내부의 불순물은 소자의 동작을 결정하는 중요한 파라미터중의 하나이다. 특히, 열선 CVD의 경우 텅스텐과 같은 열선을 1500°C 이상의 고온으로 유지시킨 채 박막을 증착하므로, 열선으로 사용된 금속 불순물의 막내 함유량을 최소화하는 것이 중요하다. 본 실험에서는 열선으로 텅스텐 선을 사용하였고, 이전의 연구결과에서 열선온도가 1800°C 일 경우 막 내부의 텅스텐 함유량은 소자가 요구하는 범위내의 값을 가지는 것으로 조사되었다. 또한 그림 7(b)에 나타내었듯이, 2000°C의 열선온도에서 증착된 실리콘 박막의 텅스텐 함유량은 $7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 으로서 1800°C에서 증착된 막의 텅스텐 함유량과 유사한 값을 가지는 것으로 조사되었고, 소자의 동작에는 큰 영향이 없을 것으로 분석된다. 반면, 박막의 표면에서 Cu의 농도가 매우 높게 나타남을 알 수 있는데, 이는 열선의 지지대로 사용된 Cu 전극으로부터의 오염에 의한 것으로 분석된다. 그림 7(b)는 열선온도 2000°C에서 증착된 실리콘 막의 깊이에 따른 O, H, C, N 분포를 나타낸 것이다. O와 C의 농도가 10^{21}cm^{-3} 이상으로 매우 높은 분포를 나타내고 있으며, 소자에 응용될 경우 치명적인 영향을 줄 것으로 분석된다. 일반적으로 CVD법으로 증착된 실리콘 박막내부에 존재하는 O와 C의 오염원^{23, 24)}은 크게 반응실 내부의 외벽이나 사용된 반응가스에 함유된 O, C에 의한 오염과 증착후 대기중에 존재하는 공기의 침투에

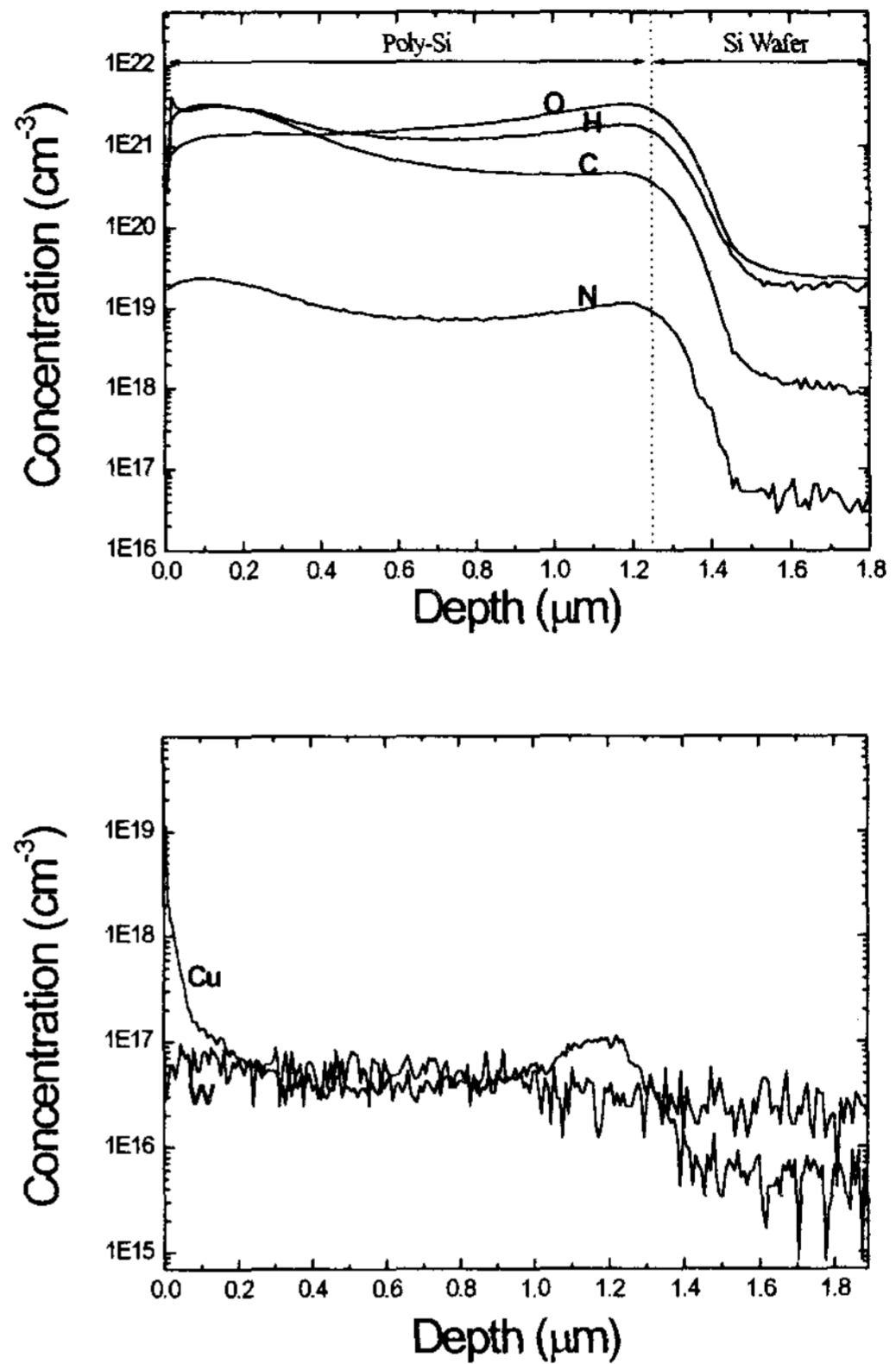


Fig. 7. SIMS profiles of the poly-Si films deposited at 2sccm of F(SiH₄); (a) W and Cu profiles, (b) C, O, N, and H profiles.

의한 오염으로 나눌 수 있다. 본 실험에서 증착된 막 내부에 존재하는 이러한 불순물의 정확한 오염원인을 규명하기 위해 몇몇 시료에 대해 FTIR 분석을 하였다. 그림 8은 열선 CVD로 증착된 미세결정 실리콘($\mu\text{c-Si:H}$, 결정립의 크기가 수십 nm)과 다결정 실리콘 [그림 1(e) 시료]에 대한 FTIR 스펙트럼을 비교해 나타낸 것이다. 그림 (a)와 (b)는 $\mu\text{c-Si:H}$ 시료에 대한 FTIR 투과특성을 외부 노출시간을 달리하여 각각 측정된 것이다. 박막 증착후 공기 노출시간을 최소화(10분 이내)하여 측정된 시료의 경우 Si-O 결합에 의한 흡수 peak이 존재하지 않은 반면, 같은 시료를 공기중에 1주일 이상 노출시킨 후 측정된 시료의 경우 다량의 O가 막 내부에 존재

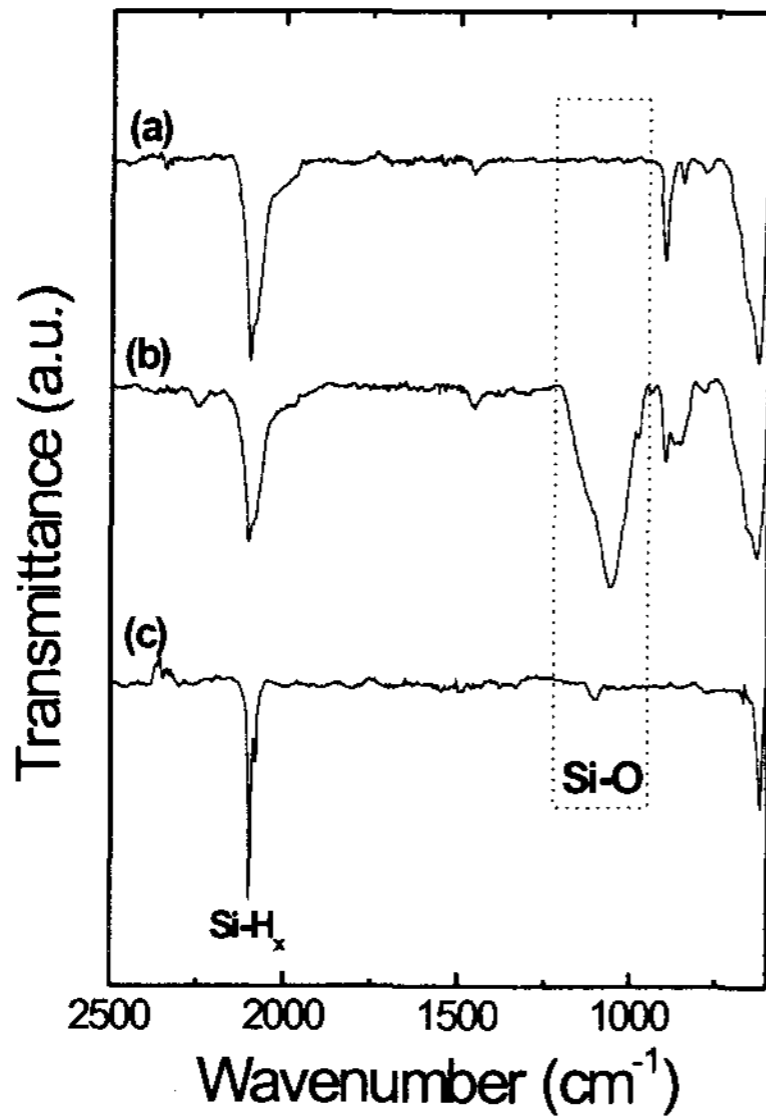


Fig. 8. FTIR transmission spectra of the silicon films with different crystalline structure and air-exposure time; (a) c-Si:H films measured immediately after removed from chamber, (b) c-Si:H films measured after long air-exposure, and (c) poly-Si films deposited at 2sccm of SiH₄ flow measured immediately after removed from chamber have similar air-exposure time with (a).

함을 할 수 있었다. 이로부터 우리는 그림 7.의 SIMS 분석에서 조사되었던 높은 O와 C의 농도는 증착중 발생한 오염이 아니라 시료보관중 공기의 침투에 의한 것임을 알 수 있었다. 그림 8. (c)는 열선온도 2000°C에서 증착된 다결정 실리콘 박막에 대한 FTIR 투과 스펙트럼으로서, 박막 증착후 공기중 노출시간은 그림 (a)와 동일하게 하여 측정하였다. 그림 (a)의 미세결정 실리콘과는 달리 1100cm⁻¹ 부근에서 Si-O의 결합에 의한 흡수 peak이 관찰됨을 알 수 있는데, 이는 다결정 실리콘 박막의 구조가 미세결정 실리콘에 비해 치밀하지 못하기 때문인 것으로 분석된다. 따라서 그림 7(c). 시료의 미세구조를 알아보기 위하여 TEM 분석을 하였다. 그림 9(a)와 (b)는 열선온도 2000°C에서 증착된 다결정 실리콘 박막

의 TEM 표면 및 단면 사진을 각각 나타낸 것이다. TEM 표면사진으로부터 증착된 막은 다양한 결정립의 크기를 가지는 결정으로 구성되어 있으며, 최대 결정립의 크기는 약 1.5μm임을 알 수 있다. 또한 그림 (b)의 단면사진에서 보여지듯이, 유리기판에서부터 막의 응집(nucleation)이 이루어져, 막의 표면으로 갈수록 결정립의 크기가 증가하고 있으며, 기판에서 표면까지 결정경계 (grain boundary)없이 단일 결정으로 성장되어 있으며, 표면이 자연적인 텍스처 구조(피라미드 모양)를 가지고 있어 태양전지에 응용될 경우 높



(a)



(b)

Fig. 9. TEM bright field images of the poly-Si films deposited at 2sccm of SiH₄ gas flow; (a) surface and (b) cross-section image.

은 광전류를 생성할 것으로 분석된다. 그러나, 그림의 표면 및 단면사진에서 나타내었듯이, 증착된 막은 구조가 전체적으로 치밀하지 못함을 알 수 있는데, 이로 인해 그림 7.에서 언급하였듯이 대기중의 공기 침투에 의한 불순물 오염의 원인이 된 것으로 사료된다. 막 내부의 결함밀도 (defect density) 또한 매우 높아 캐리어 재결합 (recombinations)의 주요 원인으로 작용하여 소자의 동작특성에 치명적인 영향을 미칠 것으로 분석되며, 소자응용에 앞서 반드시 해결되어야 할 문제이다.

4. 결 론

본 논문에서는 열선 CVD를 이용하여 500°C 이하의 저온에서 다결정 실리콘 박막을 증착하고 조건변화에 따른 막의 구조적 특성변화를 관찰하였다. 증착중 열선온도가 막의 결정특성에 매우 중요한 변수로 작용하였는데, 열선온도가 2000°C로 증가하자 증착된 막의 결정특성이 현저히 개선되어 평균 결정립의 크기가 1 μ m 이상으로 증가하였으며, 수직방향으로는 명확한 결정경계를 확인할 수 없었다. 또한, 고온의 열선온도에서 증착된 시료의 경우 표면에 자연적인 피라미드 구조가 형성되어 태양전지에 응용될 경우 효율적인 광 수집에 의한 높은 광 전류를 생성할 것으로 분석되었다. 반면, 막의 전체적인 구조가 치밀하지 못하고 막 내부의 결함밀도가 높은 것으로 조사되었는데, 태양전지 응용에 앞서 이에 대한 정확한 원인분석이 요구된다.

참 고 문 헌

1. J. Hotzel, K. Peter, G. Willeke, E. Bucher, 14th European PV Solar Energy

- Conference, Barcelona, 1997, p. 1421
2. F. R. Faller, V. Henninger, A. Hurre, N. Schillinger, 2nd World Conference on PV Solar Energy Conversion, Vienna, 1998, p. 1278
3. J. K. Arch, J. H. Werner, E. Bause, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 29 (1993), 387
4. I. Beckers, N. H. Nickel, W. Pilz and W. Fuhs, *J. Non-Cryst. Solids*, 227-230, pp. 847~851, 1998.
5. Toshiaki Kaneko, Masatoshi Wakagi, *Appl. Phys. Lett.* 64(14), pp.1865~1867, 1994.
6. J. Meier, P. Torres, R. Platz, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vo. 420, p. 3, 1996.
7. F. Finger, P. Hapke, et al, *Appl. Phys. Lett.* 65(20), pp.2588~2590, 1994.
8. H. L. Hwang, K. C. Wang, K. C. Hsu, T.-R. Yew, J. J. Loferski, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 4 (1996), 165
9. E. C. Molenbroek, A. H. Mahan, Alan Gallagher, *J. Appl. Phys.*, 82(4), 15 August 1997
10. H. Matsumura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 37, Part I, Vol. 6A, pp.3175~3187, 1998.
11. J. Cifre, J. Bertomeu, *Appl. Phys.* A59, pp. 645~651, 1994.
12. T. Ishihara, S. Arimoto, H. Kumabe, *Appl. Phys. Lett.*, 63(26), pp.3604~3606, 1993.
13. T. Matsuyama, M. Taguchi, M. Tanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 29, No. 12, pp.2690~2693, 1990.
14. Takao Matsuyama, Toshiaki Baba, et al, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 34, pp.285~289, 1994.
15. Takao Matsuyama, Mikio Taguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. [29] No. 12, pp.2690~2693, 1990.

16. H. Wiesmann, A. K. Ghosh, T. McMahon, M. Strongin, *J. Appl. Phys.* 50, 3752(1979)
17. R. Iiduka, A. Heya, H. Matsumura, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 48(1997), 279~285
18. S. C. Saha, J. Guillet, B. Equer, J. E. Bouree, *Thin Solid Films*, 337 (1999), 248~252
19. J. C. Lee, S. K. Kim, K. W. Kang, K. H. Yoon, J. Song, I. J. Park, *The 3rd Korea-Japan Joint Seminar on Photovoltaics, 2000, Proceedings*, 245~251
20. 이정철, 송진수, 박이준, *電子工學會論文誌* 第 37 卷 SD編 第 8 號(2000), 587~597
21. Wang, T.H., Cizek, T.F., Schwertfeger, C.R., Moutinho, H., and Matson, R. (1996) *Solar Energy Materials and Solar Cells* 41/42, 19
22. Z. Iqbal and S. Veprek, *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 15, pp.377~292, 1982
23. P. Torres et al, *Appl. Phys. Lett.* 69(10), 1373~1375, (1996)
24. P. Torres, J. Meier, M. Goetz, N. Beck, U. Kroll, H. Keppner, and A. Shah, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 452, 883~888, (1997)