

엑시머 레이저를 이용하여 결정화한 PECVD 및 LPCVD 비정질 실리콘 박막의 특성 분석

장 근 호, 이 성 규, 전 명 철, 한 민 구
서울대학교 전기공학과

An Analysis of Characteristics of PECVD and LPCVD a-Si Films Crystallized by Excimer Laser

K. H. Jang, S. K. Lee, M. C. Jun, and M. K. Han
Department of Electrical Eng., Seoul National University

ABSTRACT

We have characterized XeCl excimer-laser-induced crystallization of thin amorphous silicon films deposited by PECVD (a-Si:H) and LPCVD (a-Si). The electrical and optical properties and surface roughness of crystallized thin films have been measured. The dc conductivities, crystallinity and surface roughness of the films increased as the laser energy density and shot density were increased. Also, we have investigated the effects of 2-step annealing employing SPC and ELA. The properties of 2-step annealed films were better than those of films annealed by ELA only.

1. 서 론

액정 표시기 (Liquid Crystal Display, LCD)의 화소소자 및 구동소자로서 다결정 실리콘 박막 트랜지스터를 사용하는 경우에 다결정 실리콘 소자를 유리기판 위에 제작하여야하므로 비정질 실리콘 박막을 기판 위에 증착시킨 후, 다결정 실리콘으로 결정화하는 공정은 600 °C 이하의 저온상태에서 이루어져야 한다.[1] 비정질 실리콘을 결정화하는 방법으로는 600 °C로 장시간의 열처리를 통한 고상결정화 (Solid Phase Crystallization, SPC) 방법과 엑시머 레이저를 이용한 결정화 (Excimer Laser Annealing, ELA) 방법 등이 제시되고 있다.[2, 3] SPC 방법으로 결정화하는 경우에는 장시간 (24 시간 이상) 동안 600 °C의 furnace 내에서 열처리를 하여야 하므로 유리기판의 변형 등의 문제가 있다. 반면에, ELA 방법으로 결정화를 하면 순간적인 고온상태 (~300 nsec, 1400 °C)에 의해 액체상태에서 고체상태로 응고되며 결정화가 이루어지므로 유리기판에 손상을 주지 않는다. 비정질 실리콘 박막은 여러가지 증착 방법을 이용할 수 있으며, 증착 방법 및 증착 조건에 의해 각 박막의 특성이 다르다.[4] 본 연구에서는 PECVD 및 LPCVD로 증착된 비정질 실리콘 박막에 XeCl 엑시머 레이저 ($\lambda = 308 \text{ nm}$)의 에너지 밀도 및 조사회수를 변화시키며 조사하여 결정화된 다결정 실리콘 박막과 SPC 방법과 ELA 방법을 혼합하여 결정화된 박막을 전기 전도도를 측정하여 전기적 성질을 분석하였다. 또한 자외선 반사도 (UV reflectance)를 측정하여 박막의 결정도를 분석하였으며, 박막 표면에서의 자외선 반사도와 AFM (Atomic Force Microscope)의 측정값을 비교함으로써

박막 표면 거칠기를 분석하였다.

2 다결정 실리콘 박막의 제작

일반적으로 LPCVD를 사용하여 실리콘 (a-Si) 박막을 증착할 경우 550 °C 부근의 온도에서 증착된 비정질 실리콘을 결정화하는 것이 이후 제작된 다결정 박막 트랜지스터의 특성이 우수하게 분석된 보고[5]에 따라 본 논문에서도 이 온도를 적용하였으며, PECVD를 사용하여 증착한 수소화된 비정질 실리콘 ((a-Si:H) 박막의 경우 laser로 열처리할 때에 순간적인 고온 상승으로 인해서 수소가 폭발적으로 박막으로부터 나오게 되어 재결정화된 박막에 수소가 빠져나온 구멍이 남아 있게 된다. 이러한 구멍으로 인한 박막 및 트랜지스터의 특성 저하를 방지하기 위해 laser 열처리 전에 약 400 °C로 1 시간 이상 열처리하여 PECVD로 증착한 비정질 실리콘 박막으로부터 천천히 수소를 빼어낸 후 laser 열처리하여야 한다.

다음은 본 연구에서 사용된 비정질 실리콘 박막의 증착 장비에 따른 증착 조건을 보인 것이다.

1) LPCVD sample

- Substrate : Silicon wafer
- a-Si 증착 조건
 - Pressure : 0.3 Torr
 - SiH₄ flow rate : 20 sccm
 - Substrate temperature : 550 °C

2) PECVD sample

- Substrate : Corning 7059 glass, Silicon wafer
- a-Si:H 증착 조건
 - r.f. power : 0.01 ~ 0.03 W/cm²
 - Pressure : 0.3 ~ 1.0 Torr
 - SiH₄ flow rate : 4 ~ 20 sccm
 - H₂ flow rate : 0 ~ 100 sccm
 - Substrate temperature : 250 ~ 350 °C
 - Dehydrogenation : 400 °C, 90 min.

3 다결정 실리콘 박막의 특성

3.1 전기적 특성

다결정 실리콘은 grain과 grain 사이의 물성 형태가 결정질-비결정질-결정질의 구성을 이루고 있으므로 인해 전기적으로는 grain 경계면에 전위 장벽이 존재하게 된다. 지금까지 연구 보고된 바에 의하면, 다결정 실리콘의 전하 이동 메카니즘은 grain 경계면에 존재하는 전위 장벽의 영향에 의해 결정질 실리콘에서와 매우 차이가 나며, 따라서 다결정 실리콘에서의 전기적 특성은 열적방출(thermionic emission)에 의한 전위 장벽을 넘어 전하가 이동하는 grain 경계면 포획 모델로 설명되어지고 있다.[6]

본 논문에서 전도도는 PECVD 및 LPCVD로 각각 800 Å, 1000 Å의 두께로 증착된 비정질 실리콘 박막에 laser 에너지 밀도 및 조사 회수를 변화시켜 조사한 이후에 전도도를 측정하기 위해 알루미늄을 스퍼터링으로 증착한 후 사진식각을 하여 전극 길이가 300과 200 μm이고, 전극과 전극 사이의 간격이 100, 80, 50 및 40 μm인 co-planar 구조의 전극을 형성하여 측정된 전류-전압 곡선으로부터 추출하였다. 그림 1에 PECVD로 유리 기판 위에 증착한 비정질 실리콘을 재결정한 박막의 laser 에너지 밀도 및 조사 회수에 따른 전도도의 변화를 보였다.

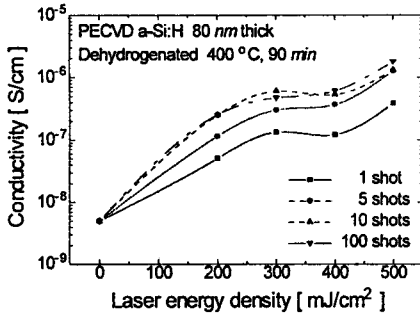


그림 1. PECVD a-Si:H 박막의 laser 에너지 밀도 및 조사회수에 따른 전도도의 변화

이 그림에서 에너지 밀도 200 mJ/cm²일 때 전도도의 급상승이 보이고 그 이후 증가 폭이 적어져서 점진적인 증가가 이루어짐을 알 수 있으며, 단일 조사의 경우 전도도의 급증 후 증가 폭이 적어져 10 번의 조사 이후 더 이상의 증가가 없음을 볼 수 있다. 그 이유는 초기 낮은 에너지 밀도에 grain이 형성되어 전도도의 급상승이 야기되며, 에너지 밀도가 클수록 내부의 결합이 적고 grain의 크기가 커짐에 따른 전도도의 점진적인 증가가 이루어지며, 조사 회수의 증가에 따라서는 결합의 열처리 효과 이외의 다른 효과가 나타나지 않아 전도도의 큰 증가는 보이지 않는 것으로 생각된다. LPCVD로 증착한 비정질 실리콘을 laser 열처리한 다결정 실리콘 박막은 단일 조사의 경우, 전도도의 급증 후 에너지 밀도가 250 mJ/cm²에서 발생하고, laser 조사 회수가 증가할수록 전도도의 급증은 낮은 에너지 밀도에서 이루어짐을 그림 2로부터 알 수 있다. Laser 조사 회수에 따른 전도도의 변화는 PECVD로 증착한 비정질 실리콘의 재결정화에 의한 경우와 유사하게 조사 회수가 증가함에 따라 전도도가 증

가하다가 일정 회수 이상에서는 더 이상 증가하지 않음을 보이고 있다.

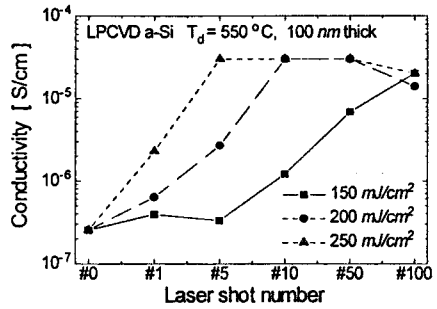


그림 2. LPCVD a-Si 박막의 laser 에너지 밀도 및 조사회수에 따른 전도도의 변화

위의 결과를 비교하면, LPCVD 박막이 PECVD 박막에 비해 전도도가 10 배 이상 우수함을 알 수 있는데, 그 이유는 LPCVD 박막이 PECVD 박막에 비해 밀도가 크고, 또한 PECVD 박막의 경우 400 ℃로, 90 분 정도 열처리하여 수소를 증발시키긴 하였지만, 잔존하는 미량의 수소가 laser 열처리 시 폭발적인 증발을 하여 박막에 손상을 가함으로 써 전기적 전도성을 감소시키는 영향을 주었을 것으로 생각되며, 이 현상은 AFM (atomic force microscopy) 측정을 통하여 분화구 형상의 구멍이 있음을 확인하였다.

또한 2 단계 연속 열처리에 의한 전기적 성질을 분석하기 위해 첫번째 열처리는 SPC로 하고, 두번째 열처리는 laser로한 경우에 대한 전기적 전도도의 변화를 측정하였으며, 이 결과를 그림 3에 보였다.

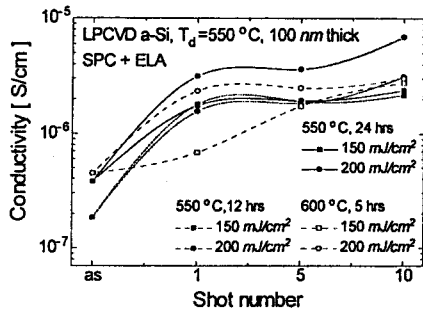


그림 3. 2 단계 열처리 방법에 따른 전도도의 변화

그림 3으로 부터 550 ℃로 24 시간 SPC 후 laser 열처리를 200 mJ/cm²로 한 경우가 전도도가 가장 우수함을 알 수 있다. 초기 결정화를 600 ℃, 5 시간 한 경우에는 두번째 laser 열처리를 150 mJ/cm²로 하면 단일 조사 시 전도도가 laser 열처리 이전에 비해 증가가 거의 없음을 보이고 있는데, 이 현상은 비정질 실리콘 박막이 초기 SPC에 의해 어느 정도 결정화가 속성되어짐으로 인해 낮은 laser 에너지로는 재결정화가 이루어지지 않는 것으로 생각되어진다. 전반적으로는 첫번째 열처리에 의해 형성된 다결정 실리콘 박막의 grain 내부의 결합을 두번째 열처리를 통해 어느 정도 제거함으로써 인한 전도도의 증가를 확인할 수 있다.

3.2 광학적 특성

자외선 영역에서의 다결정질 실리콘 박막의 광학적 특성은 결정질 실리콘 박막과 차이를 보인다. 짧은 파장 대역에서의 다결정질 실리콘 박막의 결정화에 따른 광학적 특성의 차이는 박막의 에너지 밴드 구조에 따라 심각한 영향을 받게 된다.

이러한 특성의 차이는 단결정 실리콘에서는 원자들의 배열 상태가 완전히 주기적이지만, 비정질 쪽으로 갈수록 원자들의 장범위 규칙성이 점진적으로 사라져 밴드 구조가 불명확해지는데 기인한다.[7] 결정성을 평가하기 위해서는 자외선 파장에 따른 반사도 곡선에서 파장이 275 nm 근처의 peak를 직분하여 그 적분 값을 단결정에서의 값과 비교함으로써 그 비를 백분율로 환산하는 방법을 이용하고 있다.[8] 비정질 실리콘을 결정화시켰을 때 laser 열처리 에너지가 커짐에 따라 이 값은 점차 증가하다가 100% 보다는 작게 어느 일정 값으로 포화되는 경향을 보인다.

또한 광학적으로 매우 평탄한 (RMS roughness, $\sigma \approx 0$) 표면을 가지고 있는 단결정 실리콘 웨이퍼는 그림 4에서 보인 바와 같이 짧은 파장 ($\lambda = 200$ nm) 측, 표면 부근에서의 반사도가 크게 된다. 표면이 거친 경우에는 광학적으로 완전히 평탄한 표면을 갖는 시편보다는 낮은 반사도를 나타낸다. 따라서 표면 거칠기가 증가함에 따라 단파장 쪽에서의 반사도가 현저히 감소하게 된다.[9]

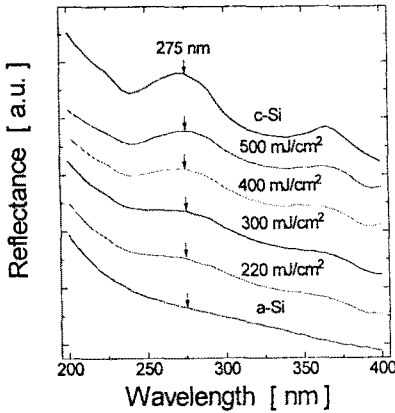


그림 4. Laser 에너지 밀도에 따른 자외선 반사도의 변화

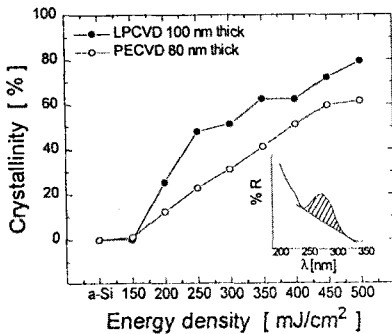


그림 5. Laser 에너지 밀도에 따른 결정도 비교

그림 4에 PECVD로 증착 되고 재결정화된 다결정 실리콘 박막의 자외선 반사도를 보였다. 예상된 바와 같이 laser 에너지 밀도가 클수록 결정성이 커지며, LPCVD로 증착된 박막의 경우도 같은 경향을 보였다. 이 증가의 크기를 계산하여 에너지 밀도에 결정 정도를 그림 5에 보였다. 단결정 실리콘의 반사도에 비교하여 보정된 다결정 실리콘 박막의 반사도를 그림 6에 표현한 바 짧은 파장에 대한 반사도가 laser 에너지 밀도가 클수록 커지므로 표면 거칠기가 커짐을 알 수 있다. 그림 7에는 열처리 방법에 따른 자외선 반사도를 보였는데, 300 mJ/cm²로 조사된 박막의 결정화가 500 mJ/cm²로 조사된 박막에 비해 비슷하지만, 표면 거칠기가 우수함을 보이고 있다.

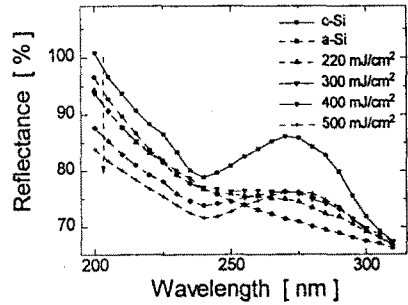


그림 6. Laser 에너지 밀도에 따른 표면 UV 반사도 비교

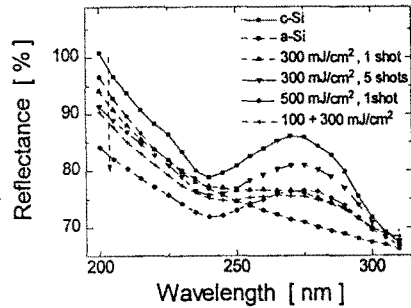


그림 7. 결정화 방법에 따른 표면 UV 반사도 비교

이 결과로부터 높은 에너지 밀도로 결정화시키는 것보다는 비교적 낮은 에너지 밀도로 여러 차례 조사하여 결정화시키는 것이 우수한 박막 특성을 갖게 할 수 있음을 알 수 있다.

Laser 에너지 밀도 크기에 따른 다결정 실리콘 박막의 표면 거칠기의 증가를 검증하기 위해 AFM으로 각 조건에서의 표면 거칠기를 분석하고, 그 값을 표 1에 나타내었다.

표 1. laser 에너지 밀도 크기에 따른 표면 거칠기

	300 mJ/cm ²	400 mJ/cm ²	500 mJ/cm ²
PECVD	21 Å	28 Å	35 Å
LPCVD	115 Å	—	120 Å

4. 결론

PECVD 및 LPCVD로 증착된 비정질 실리콘 박막에 laser 에너지 밀도 및 조사 회수를 변화시켜 조사한 이후에 전도도를 전류-전압 곡선으로부터 추출하였는 바 어느 일정 에너지 (PECVD : 200 mJ/cm^2 , LPCVD : 250 mJ/cm^2)에서 전도도의 급상승이 관찰되었으며, 조사 회수에 의해서는 초기 급상승 이후 포화됨이 실험을 통해 관찰되었다. 초기 낮은 에너지 밀도에 grain이 형성되어 전도도의 급상승이 야기되며, 에너지 밀도가 클수록 내부의 결합이 적고 grain의 크기가 커짐에 따라 전도도가 점진적으로 증가한다. 조사 회수의 증가에 따라서는 결합의 열처리 효과 이외의 다른 효과가 나타나지 않아 전도도의 큰 증가는 보이지 않는 것으로 생각된다. PECVD 박막에 비해 LPCVD 박막이 10 배정도 전도도가 우수하였는데, 그 이유는 LPCVD 박막이 PECVD 박막에 비해 밀도가 크고, 또한 PECVD 박막의 경우 잔존하는 미량의 수소가 laser 열처리 시 폭발적인 증발을 하여 박막에 손상을 가함으로써 전기적 전도성을 감소시키는 영향을 주었을 것으로 생각된다.

2 단계 연속 열처리에 의한 전기적 성질을 분석하기 위해 SPC 이후 laser로 열처리를 한 경우에 대한 전기적 전도도의 변화를 분석하였는 바, 2 단계 연속 laser 열처리의 경우가 단일 조사에 의한 열처리 경우에 비해 전도도가 우수함을 보이고 있고, 550 $^{\circ}C$ 로 24 시간 SPC 처리 후 laser 열처리를 200 mJ/cm^2 로 한 경우가 전도도가 가장 우수함을 알 수 있었다. 따라서 첫번째 열처리에 의해 형성된 다결정 실리콘 박막의 grain 내부의 결합을 두번째 열처리를 통해 어느 정도 제거함으로써 인한 전도도의 증가가 이루어짐을 알 수 있었다.

다결정 실리콘 박막의 광학적 특성을 분석하기 위해 PECVD 및 LPCVD로 증착 되고 재결정화된 다결정 실리콘 박막의 자외선 반사도를 관찰하였는 바 laser 에너지 밀도가 클수록 결정성이 커짐을 보이고 있으며, 저칠기도 laser 에너지 밀도가 클수록 커짐을 알 수 있었다. 열처리 방법에 따른 자외선 반사도에 대한 관찰로부터 높은 에너지 밀도로 결정화시키는 것보다는 비교적 낮은 에너지 밀도로 여러 차례 조사하여 결정화시키는 것이 우수한 박막 특성을 갖게 할 수 있음을 알 수 있었다. Laser 에너지 밀도 크기에 따른 다결정 실리콘 박막의 표면 거칠기의 증가를 AFM으로 각 조건에서의 표면 거칠기를 분석한 결과에 따르면 laser 에너지가 증가할수록 표면 거칠기가 증가함을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] W.G. Hawkins, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-33, No. 4, p.477, 1986.
- [2] T.Aoyama, N. Konishi, T. Suzuki, and K. Miyata, MRS Sym. Pro., Vol. 106, p.347, 1987.
- [3] T. Serikawa, S. Shirai, A. Okamoto, and S. Suyama, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-36, No. 9, p.1929, 1989.
- [4] R.Z. Bachrach, K. Winer, J.B. Boyce, S.E. Ready, R.I. Johnson, and G.B. Anderson, J. Elec. Mat., Vol. 19, No. 3, p.241, 1990
- [5] M.K. Hatalis and D.W. Greve, Trans. Electron Device Letters, Vol. EDL-8, No. 8, p.361, 1987.
- [6] J.Y. W. Seto, J. Appl. Phys., 46, p.5247, 1975.
- [7] T. Noguchi, H. Hayashi, and T. Ohshima, J. Electrochem. Soc., Vol. 134, No. 7, p.1771, 1987.
- [8] T. Noguchi, SEMICON/KOREA 92 Technical Proceedings II, p.19, 1992.
- [9] H.E. Bennett and J.O. Porteus, J. Opt. Soc. Am., Vol. 51, No. 2, p.123, 1961.