

## 엑시머 레이저에 의해 형성된 다결정 실리콘 박막의 Angle wrapping에 의한 깊이에 따른 특성변화

이창우·고석중\*

국민대학교 물리학과

### New Analysis Approach to the Characteristics of Excimer Laser Annealed Polycrystalline Si Thin Film by use of the Angle Wrapping

Chang Woo Lee and Seok-Jung Gho\*

Assistant Professor, Dep. of Physics, Kookmin University, 861-1, Chongnung-dong, Songbuk-gu, Seoul 136-702

(E-mail: cwlee@phys.kookmin.ac.kr)

\*Home address: Chamsil-dong, Songpa-gu, Chamsil-APT, Seoul 271-404

(1998년 6월 16일 받음, 1998년 7월 28일 최종수정본 받음)

초 특 대면적의 비정질 실리콘 박막을 가우스 분포 (Gaussian Profile)의 일차원 선형빔 (line shape beam)을 가지는 엑시머 레이저를 사용하여 결정화를 시켰다. 유리기판 (Corning 7059 glass) 위에 증착된 비정질 실리콘 박막이 재결정화된 실리콘 박막의 경우, 두께에 따라 결정화되는 모양이 다르게 나타났다. 따라서 두께에 따라 결정화되는 상태의 변화를 조사하기 위하여 angle wrapping 방법을 새롭게 도입하여 깊이에 따른 Si층이 5 $\mu$ m 이상 되도록 angle wrapping한 후에 박막의 두께에 따른 micro-raman spectra를 측정하여 결정화상태에 따른 잔류응력을 조사하였다. 기판의 온도가 상온인 경우에 엑시머 레이저의 밀도가 300 mJ/cm<sup>2</sup>에서 열처리한 경우에 재결정화된 Si 박막의 잔류응력이 박막의 표면에서 박막의 깊이에 따라 1.3 $\times 10^{10}$ 에서 1.6 $\times 10^{10}$ 을 거쳐 1.9 $\times 10^{10}$  dyne/cm<sup>2</sup>으로 phase의 변화에 따라 증가하였다. 또한 기판의 온도가 400 $^{\circ}$ C에서 최적의 열처리 에너지 밀도인 300 mJ/cm<sup>2</sup>에서는 박막의 깊이에 따른 결정화 상태의 변화에 따라 thermal stress의 값이 8.1 $\times 10^9$ 에서 9.0 $\times 10^9$ 를 거쳐 9.9 $\times 10^9$  dyne/cm<sup>2</sup>으로 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 liquid phase에서 solid phase쪽으로 phase가 변화함에 따라 stress 값이 증가하는 것을 알 수 있다.

**Abstract** Amorphous silicon films of large area have been crystallized by a line shape excimer laser beam of one dimensional scanning with a gaussian profile in the scanning direction. In order to characterize the crystalline phase transition of thickness variables in excimer laser annealing(ELA), angle wrapping method was used. And also to characterize the residual stresses of crystalline phase transition in the case of angle wrapped-crystalline silicon on corning 7059 glass, polarized raman spectroscopies were measured at various laser energy density and substrate temperature. The residual stress varies from 9.0 $\times 10^9$  to 9.9 $\times 10^9$ , and from 9.9 $\times 10^9$  to 1.2 $\times 10^{10}$  dyne/cm<sup>2</sup> of the substrate temperature at room temperature and varies from 8.1 $\times 10^9$  to 9.0 $\times 10^9$ , and from 9.0 $\times 10^9$  to 9.9 $\times 10^9$  dyne/cm<sup>2</sup> of the substrate temperature at 400 $^{\circ}$ C as a function of direction from surface to substrate. According to the direction from the surface in liquid phase to the interface and from the interface to near the substrate in solid phase of recrystallized Si thin film, respectively. Thus, the stress is increased from(Liquid phase to solid phase) with phase transition.

### 1. 서 론

최근에 반도체 기술의 진보에 따라 전자 및 통신분야에 필요한 소재산업이 발달함에 따라 수소화된 비정질 실리콘 (a-Si:H) 박막이 많이 쓰이고 있다.<sup>1,2)</sup> 수소화된 비정질 실리콘 박막은 대면적이 가능하며 가격이 저렴하여 고부가가치의 첨단 소재로 많이 응용되고 있다. 그 중에서도 액정을 이용한 평판 TV, 복사기 헤드드럼, 노트북 PC, 시계나 여러 장치의 액정화면 등 비정질 실리콘 박막에 의한 스위칭소자가 고품위, 고부가가치 첨단소재로 각광을 받고 있다.<sup>3)</sup> 그러나 이러한 비정질 실리콘 박막을 응용한 스위칭

소자에서는 낮은 전자이동도와, 밴드갭 (band-gap) 내에 존재하는 국재화된 상태밀도 (density of localized states)가 높은 등, 여러 단점들을 갖고 있어서 고속동작을 필요로 하는 회로의 스위칭 소자로는 적합하지 않은 물질이 되었다.<sup>1,2)</sup> 이러한 상황에서 전자 및 통신소자의 집적도가 향상됨에 따라 (고화질 TV 등) 고속동작의 필요성이 증대되고 있으며, 새로운 초고속동작을 필요로 하는 소자로서 커다란 전자이동도와 높은 도핑효과를 가지는 다결정 실리콘 박막 및 이러한 박막 트랜지스터 (poly-Si thin film transistor (TFT))가 집중적으로 개발되고 있는 실정이다.<sup>3,4)</sup>

일반적인 다결정 실리콘 박막의 제작방법에서는 저압 화

학 증착법 (low pressure chemical vapor deposition (LPCVD))과 같이 고온에서 증착하거나 (600-1000°C) 또는 고온에서 열처리 (600-700°C)를 통하여 고상결정화 (solid phase crystallization (SPC))시켜야 한다.<sup>3,4)</sup> 이러한 고온의 방법으로는 일반적인 유리기판이 휘어지거나 깨어지는 등 열적인 손상을 받기 때문에 사용할 수가 없고 값비싼 석영유리 (Quartz glass)를 써야만 한다. 그래서 유리기판에 열적인 손상을 줄일 수 있는 다단계 급속열처리법 (multi-step rapid thermal annealing method (MSRTA))을 개발했으며<sup>3,4)</sup> 유리기판위에 대면적을 다결정 실리콘 박막으로 만들 수 있는 엑시머 레이저 열처리법을 개발하였다.<sup>5-7)</sup> 이 방법은 국소화된 부분만 다결정화가 가능하기 때문에 하나의 기판에 트랜지스터와 구동회로를 동시에 만들 수 있는 장점이 있다. 한편, 다른 그룹의 경우 rectangular-shaped laser beam의 overlapping 때문에 박막이 균일하게 재결정화되지 못하는 단점과,<sup>8)</sup> small-pitch scanning method를 사용함으로써 다소의 재결정화된 박막의 균일성에 대한 개선은 있으나 scanning 하지 않는 부분의 균일성에는 문제가 있다.<sup>9)</sup> 따라서 본 실험에서는 line shape laser beam을 사용하여 박막의 균일성을 완전히 개선하였고, 이때의 박막의 깊이에 따른 잔류응력 (residual stress)을 조사하였다.

일반적으로 박막의 잔류응력은 X-선 회절, raman spectroscopy 또는 Newton ring method를 이용하여 측정할 수 있다. X-선 회절 방법에 의하여 strain과 격자상수가 직접적으로 구해지며 그 물질의 탄성계수를 사용하여 잔류응력을 계산할 수가 있다.<sup>10)</sup> 한편, micro-raman spectroscopy 실험에 의해 실리콘이 외부의 힘을 받을 때에 포논진동수 (phonon frequency)의 변화로부터 deformation potential constant를 결정할 수 있고 이로부터 물질의 구조를 파괴시키지 않으면서 다결정 박막의 잔류응력을 직접적으로 구할 수 있으며, 현미경에 의하여 국부적인 현상들을 분리하여 측정할 수 있다. 따라서 결정이 자라는 모양에 따라 raman spectra를 측정하여 박막의 응력을 조사할 수가 있다. 따라서 박막 내부의 잔류응력을 raman signal의 주파수 변화로부터 구할 수 있는 방정식은 다음과 같이 주어진다.<sup>6,11)</sup>

$$\begin{aligned} \Delta\omega \text{ (cm}^{-1}\text{)} &= \Omega - \omega_0 \\ &= \frac{pS_{12} + q(S_{11} + S_{12})}{\omega_0} T_a \\ &= -\sigma \times 4.01 \times 10^{-8} \text{ (dyne/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

이때  $\sigma$ 는 응력으로써 dyne/cm<sup>2</sup> 단위를 갖는다. 그리고  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $p$ ,  $q$ 의 값은 각각 다음과 같다.<sup>6)</sup>

$$\begin{aligned} p &= -1.43 \times 10^{28} \text{ s}^{-2} & q &= -1.89 \times 10^{28} \text{ s}^{-2} \\ S_{11} &= 76.8 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{dyne} \\ S_{12} &= -21.4 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{dyne}. \end{aligned}$$

또한 다결정 실리콘 박막의 경우 결정의 체적밀도 (volume fraction)를 구하는 것은 다음과 같다. 결정성의 비를  $S$ 라하고, 480-500 cm<sup>-1</sup> 위치의 비정질 부분과 520 cm<sup>-1</sup> 위치의 결정질 부분의 흡수계수를 각각  $a_a (\cong 1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1})$ ,  $a_c (\cong 2 \times 10^4 \text{ cm}^{-1})$ 이며, 또한 그때의 peak intensity를 각각  $I_a$ ,  $I_c$ 라 하면 그 값은 다음과 같다.<sup>6)</sup>

$$\begin{aligned} I_c &= \sum_c S [1 - \exp(-a_c d)] \\ I_a &= \sum_a (1 - S) [1 - \exp(-a_a d)] \end{aligned}$$

여기에서 비록  $I_a$ ,  $I_c$ 가 두께  $d$ 에 의존하지만  $\sum_c S (\cong I'_c)$ ,  $\sum_a (1 - S) (\cong I'_a)$ 는 두께가 두껍다고 가정할 때 두께  $d$ 에 무관하게 된다. 또한 박막의 경우에 backscattering cross-section의 비  $\gamma (\cong \sum_c S / \sum_a (1 - S) \cong 0.8^6)$ 를 고려하면 다결정 실리콘 박막의 체적밀도 (volume fraction)는 다음과 같이 쓸 수 있다. 즉,

$$S = I'_c / (I'_c + \gamma I'_a).$$

본 연구에서는 유리기판위에 비정질 실리콘 박막을 증착한 후에 엑시머 레이저에 의한 열처리를 하여 다결정 실리콘 박막을 형성하였다. 특히, 다결정 실리콘 박막의 두께에 따른 여러 가지 특성을 조사하기 위하여 angle wrapping 방법을 새롭게 도입하여 500 Å의 두께가 수  $\mu\text{m}$  이상 되도록 하였다. 그 후에, 레이저 에너지의 변화에 따라 결정이 형성되는 정도와 그 박막의 응력의 변화를 transmission electron microscopy (TEM)과 angle wrapped된 면에 따라 micro-raman spectra를 이용하여 조사하였으며 UV-reflectance를 이용하여 레이저 에너지의 변화에 따른 결정의 정도 (volume fraction)를 조사하였으며 atomic force microscopy (AFM), scanning electron microscopy (SEM)와 ellipsometry를 이용하여 박막의 두께와 표면 거칠기 등을 조사하였다.

## 2. 실험

본 실험에서는 잘 세척된 코닝사의 유리기판 (Corning 7059)을 사용하였으며 플라즈마 화학 증착장치로서는 자체 설계·제작된 진공증착 반응로 (GAT-300-5S, Green Advanced Tech. Inc.)를 사용하였다. 반응기 내부의 압력은 diffusion pump 및 rotary pump와 cold trap을 사용하여 초기의 진공을  $5 \times 10^{-7}$  Torr 이하로 하였다. 박막의 전체 증착 공정 단계에 0.5 torr의 압력 하에서 SiH<sub>4</sub>와 H<sub>2</sub>의 분압을 각각  $5 \times 10^{-2}$ 와  $4.5 \times 10^{-1}$  Torr (H<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub>의 유량비 = 9)로 유지하였다. 이때 rf power density는 0.4 W/cm<sup>2</sup>, 증착온도는 250°C로 유지시켰다.<sup>3)</sup> 300 nm 두께의 SiN<sub>x</sub> 박막을 증착한 뒤 50 nm 두께의 비정질 실리콘 박막을 플라즈마 방법으로 증착하였다. 그리고 모든 열처리를 하기 전에 반응로 내에서 질소 분위기 하에서 420°C의 온도로 3시간 정도 초기 열처리를 실시하여 수소가 천천히 빠져나가기도록 하였다. 또한 대면적의 비정질 실리콘 박막의

재결정화를 위하여 원통 볼록렌즈와 원통 오목렌즈를 사용하여 1mm (FWHM)×70 mm 가우스 분포 (Gaussian Profile)의 일차원 선형빔 (line shape beam)을 갖는 KrF 엑시머 레이저 (248 nm, 20 ns)를 사용하였다.<sup>6,7)</sup> 또한 두께에 따라 결정화되는 상태의 변화를 조사하기 위하여 angle wrapping 방법을 사용하여 박막내의 잔류응력을 조사하였다. 이때 Si 층의 두께가 500Å 이기 때문에 100 배의 배율인 (34/60)°로 되어 있는 holder를 사용하여 Si 층이 깊이방향으로 5μm 정도 되도록 angle wrapping을 한 후에 wrapped된 면에 대하여 박막의 깊이 방향에 따라 micro-Raman spectroscopy를 사용하여 Raman spectra를 측정하였고, 이로부터 박막의 두께에 따라 결정화된 상태들의 잔류응력을 조사하였다. 두께의 측정에는  $\alpha$ -step과 cross-sectional SEM (XSEM)을 사용하였고, 표면 거칠기는 AFM을, 결정구조와 결정성을 측정하기 위하여 투과 전자현미경사진 (TEM)을, 그리고 결정의 체적밀도는 Raman spectroscopy와 Backman사의 DU-65 spectrophotometer를 사용하여 측정하였다. 반응로내의 시료표면의 반응온도를 알기 위하여 직경 0.01 in.의 K-type 열전대를 monitoring Si 기판의 cavity (width: 1mm, depth: 400μm) 내에 세라믹 본드로 seal을 한 뒤에 사용하였으며 RF noise를 차단하기 위하여 metal tube로 포장한 뒤 metal tube를 접지하였다.<sup>3)</sup>

### 3. 결과 및 고찰

그림 1은 angle wrapping 방법을 사용하여 두께에 따라 결정화되는 상태의 변화를 조사하였다. Si 층을 angle wrapping하여 wrapped된 면에 대하여 박막의 깊이 방향에 따라 micro-Raman spectra를 측정하여 박막의 두께에 따른 결정화 상태의 잔류응력을 조사하였다. 그림 1(a)는 표면쪽으로서 엑시머 레이저의 열에너지를 전부 흡수하여 melt-growth된 부분으로 액상결정화 (liquid phase crystallization (LPC))가 일어난 부분이다. 아래의 그림 1(a)는 이 부분을 micro-Raman spectroscopy에 의하여 측정된 spectrum이다. 비정질 상태가 완전히 없어지고 520 cm<sup>-1</sup>에서 예리한 peak이 나타남을 알 수 있다. 또한 그림 1(b)는 표면으로부터 깊은 쪽으로, 즉, 기판에 가까운 부분이다. 실리콘 박막의 표면쪽에서 레이저 에너지의 대부분이 흡수되므로 melt-growth가 일어날 수 있는 에너지가 모자라게 되어 이 부분에서는 고상결정화 (solid phase crystallization (SPC))가 일어나게 되는 부분이다. 아래의 그림 1(b)를 보면 520 cm<sup>-1</sup> 외에 480-500 cm<sup>-1</sup> 근처에 넓은 peak이 생기는 것으로부터 완전한 재결정화는 되지 못하고 있음을 알 수 있다.

한편, 엑시머 레이저로 열처리된 다결정 실리콘 박막의 결정성은 레이저의 에너지밀도의 변화에 따라 변화하는데 X-선 회절과 Raman spectra에 의해 결정하였다. 결정의 부피비는 Raman spectra로부터 구할 수 있다. 플라즈마 화학증착법에 의해 증착한 초기의 상태는 비정질 상태로서 Raman peak intensity가 470-500 cm<sup>-1</sup>에 넓게 퍼져있는

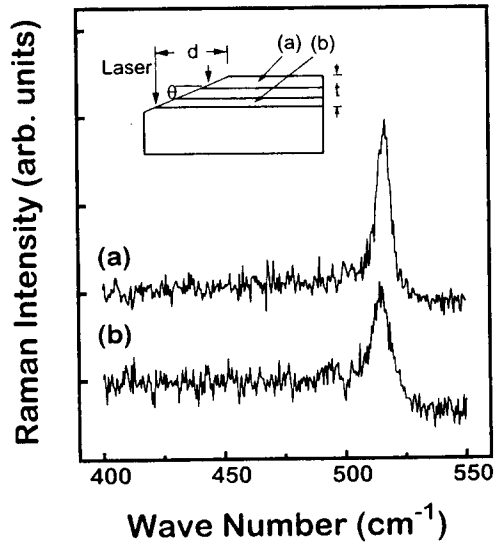


Fig. 1. Raman spectra of depth profiles of poly-Si thin films crystallized by excimer laser annealing method and schematic diagram of angle wrapped Si thin film.

모습을 하고 있고, 엑시머 레이저에 의해 하는 경우에는 재결정화가 일어나기 때문에 520 cm<sup>-1</sup>의 위치에 peak intensity가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.<sup>3,4,12)</sup> 이때, 결정성은 그림 1에서 보는 바와 같이 520 cm<sup>-1</sup>의 peak intensity의 크기를 470-500 cm<sup>-1</sup>에 있는 비정질의 크기로 나누는 값으로부터 구할 수 있다.<sup>12)</sup> 한편, Raman spectra의 방법<sup>8)</sup> 외에 volume fraction을 구하는 방법으로 UV-reflectance를 측정하는 법이 있다. 이는 200-400 cm<sup>-1</sup>에서의 peak intensity를 측정한다. 이때 단결정 Si에서는 272nm와 365nm에서 2개의 peak이 생긴다. 이러한 peak은 X point (X<sub>4,v</sub> → X<sub>1,c</sub>)와 Brillouin zone의  $\Gamma$ -L축을 따라 optical interband transition에 의해 생성된다.<sup>13)</sup> 그리고 그들이 272nm 근처의 peak을 E<sub>2</sub> peak이라 불렀으며, 이때의 peak ( $\lambda = 272$  nm)이  $\lambda = 365$  nm의 파장에서 보다 Si의 구조나 표면 거칠기에 대하여 더욱 예민하게 (sensitive) 반응을 한다. 따라서 E<sub>2</sub> peak에서의 값을 측정하여 결정성을 조사하였다.

비정질 실리콘 박막의 경우, 결정이 없기 때문에 표면 거칠기가 별로 없이 매우 smooth하며 peak은 없으므로 이때의 값을 0%로 택하고 완전한 결정질인 Si wafer의 reflectance의 값을 면적으로 계산하여 100%로 취하면 재결정화시킬 때의 박막에 대한 UV-reflectance의 값이 0-100% 사이에 있게 된다. 그림 2를 보면 재결정화된 Si 박막의 경우 단결정 Si과 비정질 Si 사이에 값이 존재하는 것을 알 수 있고 이로부터 계산한 값을 그림 3에 나타내었다. 상온에서 레이저 에너지 밀도가 300 mJ/cm<sup>2</sup>일 때 다결정화된 체적밀도가 81% 정도인데 기판의 온도를 400°C로 증가시킨 상태에서 레이저 에너지 밀도를 250에서 350 mJ/cm<sup>2</sup>까지 변화시킬 때 다결정화된 체적밀도가 86에서 96%로 증가했다가 다시 92% 정도로 감소하는 것을 알 수 있고 이로써 재결정화시킬 때 최적의 레이저 에너지 밀도가

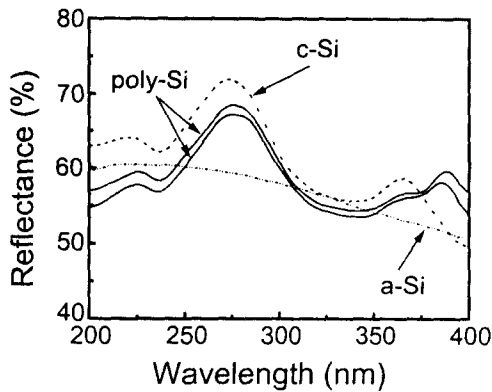


Fig. 2. UV-reflectance for amorphous and polycrystalline Si thin films as a function of wavelength.

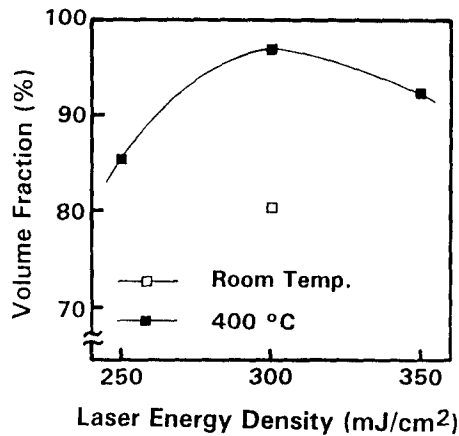


Fig. 3. Crystalline volume fraction of poly-Si thin films crystallized by ELA method as a function of various laser energy density of substrate temperature at room temperature and at 400 °C measured by UV-reflectance.

존재함을 알 수 있다.

그림 4는 비정질 실리콘 박막을 엑시머 레이저로 열처리하여 재결정화한 후의 표면거칠기를 조사한 그림이다. 그림 4(a)는 상온에서 레이저 에너지 밀도가 300 mJ/cm<sup>2</sup>일 때의 표면거칠기이다. 표면거칠기는 약 200 Å 정도인 것을 알 수 있다. 한편 레이저에너지의 밀도는 고정하고 기판의 온도를 400 °C로 증가시킨 경우 표면거칠기가 상당히 감소하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 고상결정화를 시킬 때 비정질 실리콘 박막이 620 °C에서 결정화가 일어나는 것을 본다면 레이저 열처리를 할 경우, 상온인 경우에는 기판이 급격한 온도의 변화를 받지만 기판의 온도를 400 °C로 증가시킬 경우에는 레이저 열처리를 하는 경우에도 기판이 급격한 온도의 변화를 받지 않게 되어 열처리시에 박막내에 존재하는 residual stress를 상당히 완화시켜줄 것으로 생각된다. 또한 서서히 온도가 식어지게 할 수 있기 때문에 결정의 크기도 증가할 것이고, 이러한 결과로부터 표면의 거칠기가 감소하는 것이 당연하다고 하겠다. 한편, 그림 4(c)처럼 기판의 온도를 400 °C로 고정하고 레이저 에너지 밀도를 350 mJ/cm<sup>2</sup>로 증가시킬 경우에는 그림 3의 결과와 같이 다결정화된 체적밀도가 감소하며 따라서 결정의 크기가 감소하

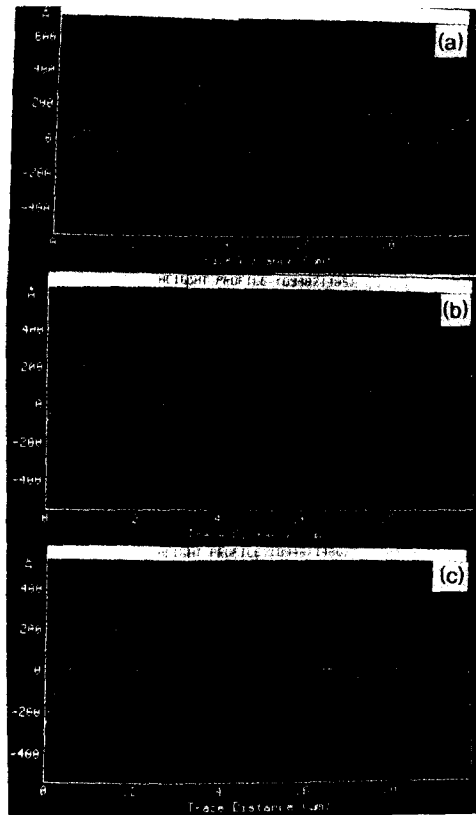


Fig. 4. AFM surface roughnesses of poly-Si thin films crystallized by ELA method as a function of various laser energy densities and substrate temperatures.

(a) 300 mJ/cm<sup>2</sup> at room temperature, (b) 300 mJ/cm<sup>2</sup> at 400 °C, (c) 350 mJ/cm<sup>2</sup> at 400 °C.

게 되는데 이는 재결정화시키는 최적의 레이저 에너지 밀도보다 큰 경우에는 박막내에 비정질화가 일어나게 된다. 이러한 결과로부터 레이저 에너지 밀도를 300 mJ/cm<sup>2</sup>보다 증가시킬 때는 결정의 크기가 감소하게 되고 표면거칠기도 또한 증가하게 된다.

그림 5는 비정질 실리콘 박막을 엑시머 레이저에 의하여 열처리한 후의 단면 TEM 사진이다. 표면 쪽에는 엑시머 레이저의 에너지 밀도가 높기 때문에 액상결정화가 일어나게 되고 박막의 깊이가 깊어질수록 표면 쪽에서 레이저의 에너지를 많이 흡수하여 Si이 melting되지 않은 부분이 생기게 되고 이 부분이 고상결정화 되는 것을 알 수 있다. XTEM 사진을 살펴보면 결정이 equiaxial 상태로 크게 자리있음을 알 수 있고, 아래쪽에 작은 결정들이 나타나 보임을 알 수 있다. 이때 위쪽의 LPC에 의한 결정의 크기는 약 1000 Å가 된다. 이렇게 결정화되는 모양이 다르기 때문에 열적인 응력 또한 다르다고 사려된다. 왜냐하면 본인의 재료학회지 논문에 의하면,<sup>6)</sup> 고온열처리나 IR lamp에 의한 급속열처리 등과같이 SPC에 의한 재결정화 때에 박막내에 존재하는 잔류응력이 LPC가 일어나는 엑시머 레이저에 의한 재결정화할 때의 값보다 작은 것을 보였다. 또한 기판의 온도가 400 °C에서 레이저의 에너지 밀도가 250에서 350 mJ/cm<sup>2</sup>로 증가함에 따라 stress의 값은 7.5 × 10<sup>9</sup>에서 9.1 × 10<sup>9</sup> dyne/cm<sup>2</sup>으로 증가함을 보였으며<sup>7)</sup> 그림 6에서 보

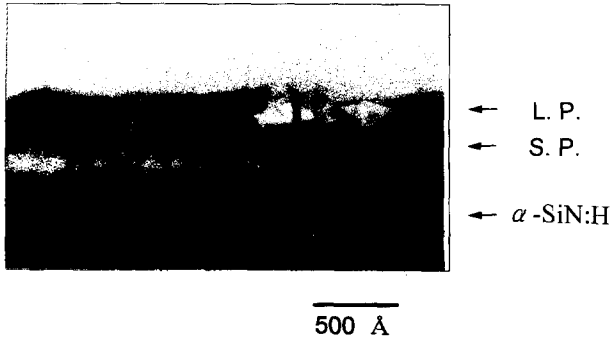


Fig. 5. XTEM micrographs of poly-Si thin films crystallized by excimer laser annealing method.

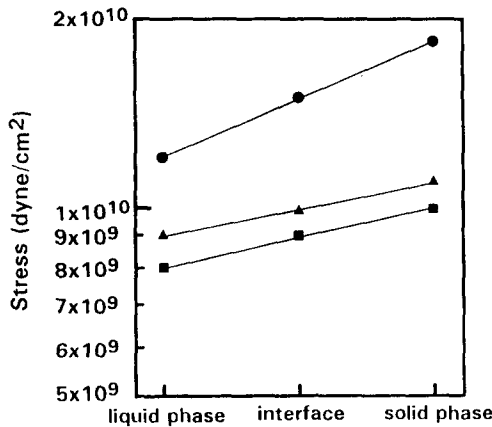


Fig. 6. Variation of stresses of angle wrapped poly-Si thin films crystallized by excimer laser annealing method as a function of crystalline phase.  
(■ : 300 mJ/cm<sup>2</sup> at 400 °C, ▲ : 350 mJ/cm<sup>2</sup> at 400 °C, ● : 300 mJ/cm<sup>2</sup> at room temperature)

면 레이저 에너지밀도가 300에서 350 mJ/cm<sup>2</sup>으로 증가할 때에 liquid phase에서의 잔류응력의 값이 8.1 × 10<sup>9</sup>에서 9.1 × 10<sup>9</sup> dyne/cm<sup>2</sup>으로 증가하는 것을 보였다. 한편, 엑시머 레이저에 의한 재결정화된 시료 자체의 열처리에 의한 박막내의 잔류응력을 살펴보기 위하여 시료를 가지고 angle wrapping을 실시하여 micro-Raman spectra를 살펴본 결과를 그림 6에 나타내었다. 이 그림에 의하면 표면 부분인 liquid phase 부분이, 박막내의 기판쪽인 solid phase 부분보다 열적인 stress가 오히려 감소함을 알 수 있다. 또한 interface라고 나타낸 부분은 liquid phase와 solid phase가 일어나는 경계부분을 나타낸 것이다. 상온에서 엑시머 레이저의 밀도가 300 mJ/cm<sup>2</sup>에서 열처리한 경우 1.3 × 10<sup>10</sup>에서 1.6 × 10<sup>10</sup>을 거쳐 1.9 × 10<sup>10</sup> dyne/cm<sup>2</sup>으로 phase의 변화에 따라 liquid phase에서 solid phase 쪽으로 stress 변화가 더욱 급격하게 증가하는 것을 알 수 있고, 최적의 열처리 에너지 밀도인 300 mJ/cm<sup>2</sup>, 400 °C에서는 열처리에 따른 박막내의 잔류응력의 값이 8.1 × 10<sup>9</sup>에서 9.0 × 10<sup>9</sup>를 거쳐 9.9 × 10<sup>9</sup> dyne/cm<sup>2</sup>으로 phase의 변화에 따라 변한다. 또한 400 °C에서 최적의 열처리 에너지 밀도보다 큰 350 mJ/cm<sup>2</sup>의 경우에는 박막내의 잔류응력의 값이 예상한 것과 같이 300 mJ/cm<sup>2</sup>에서 열처리한 값보

다 phase의 변화에 따른 응력의 변화가 커져서, 다음과 같이 9.0 × 10<sup>9</sup>에서 9.9 × 10<sup>9</sup>를 거쳐 1.2 × 10<sup>10</sup> dyne/cm<sup>2</sup>으로 phase의 변화에 따라 더욱 급격하게 일어나는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 엑시머 레이저 열처리를 할 때 깊이에 따른 잔류응력의 차이점을 발견하게 된다. 엑시머 레이저에서 열처리를 할 경우에는 liquid phase쪽이 solid phase쪽보다 빨리 온도가 올라가게 되며 기판쪽으로 열전달이 가장 많이 일어난다고 볼 때 기판 근처에 있는 solid phase 부분이 온도가 빨리 내려가리라는 것은 자명하다. 따라서 엑시머 레이저에 의한 열처리 시에는 liquid phase에서의 잔류응력의 값이 solid phase에서의 값보다 작게 나오게 된다. 한편 기판의 온도가 상온인 경우가 400 °C의 경우보다 기판으로의 열전달이 빠르게 일어나기 때문에 응력의 값이 커지게 되며, 기판의 온도가 400 °C로 고정된 경우에는 최적의 열처리 에너지 밀도인 300 mJ/cm<sup>2</sup>인 경우가 350 mJ/cm<sup>2</sup>인 경우의 열처리보다 박막의 잔류응력의 값이 작게 나오는 것을 다음과 같이 생각할 수 있다. 에너지 밀도가 클수록 Si이 melting 되는 온도가 높기 때문에 기판쪽으로 열전달이 더욱 급속하게 일어나게 되므로 에너지 밀도가 작을 때 기판으로의 열전달이 느리게 일어나기 때문에 이로부터 에너지 밀도가 300 mJ/cm<sup>2</sup>인 경우가 350 mJ/cm<sup>2</sup>인 경우보다 thermal relaxation이 많이 일어나게 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

유리 기판위에 증착된 비정질 실리콘 박막을 엑시머 레이저에 의하여 재결정화한 후 실리콘 박막의 두께에 따라 결정화되는 모양의 변화를 관찰하였다. 이러한 두께에 따른 결정화되는 상태의 변화를 조사하기 위하여 angle wrapped된 Si 면의 박막의 두께를 따라 Raman spectra를 측정하여 결정화 상태에 따른 잔류 응력을 조사하였다. 기판의 온도가 400 °C에서 최적의 열처리 에너지 밀도인 300 mJ/cm<sup>2</sup>에서는 박막의 깊이에 따른 결정화 상태의 변화에 따라 열처리에 의한 박막의 잔류응력의 값이 8.1 × 10<sup>9</sup>에서 9.0 × 10<sup>9</sup>를 거쳐 9.9 × 10<sup>9</sup> dyne/cm<sup>2</sup>으로 변화하는 것을 알 수 있다. 또한 400 °C에서 최적의 열처리 에너지 밀도보다 큰 350 mJ/cm<sup>2</sup>의 경우에는 열적인 응력 (thermal stress)의 값이 예상한 것과 같이 300 mJ/cm<sup>2</sup>에서 열처리한 값보다 phase의 변화에 따른 응력의 변화가 커져서, 다음과 같이 9.0 × 10<sup>9</sup>에서 9.9 × 10<sup>9</sup>를 거쳐 1.2 × 10<sup>10</sup> dyne/cm<sup>2</sup>으로 phase의 변화에 따라 더욱 급격하게 일어나는 것을 알 수 있다. 그리고 결정화된 체적밀도는 에너지 밀도가 300 mJ/cm<sup>2</sup>에서 96%에 이르렀다. 또한 기판의 온도가 증가할수록 박막내의 잔류응력과 표면거칠기는 감소하고 결정의 크기와 결정성은 좋아짐을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. B.-S. Bae, C. W. Lee, B.-S. Yoo, C.-H. Lee, K.-S. Choi, and C. Lee, Korean Appl. Phys. **3**(1), 86 (1990)

2. C.W. Lee, S.Y. Kim, B.-S. Bae, and C. Lee, Korean Appl. Phys. **4** (2), 217 (1991)
3. C.W. Lee, C. Lee and Y.T. Kim, Appl. Phys. **A56**, 123 (1993)
4. C.W. Lee, S.Y. Kim, and C. Lee, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **224**, 347 (1991)
5. Y.M. Jhon, D.H. Kim, H. Chu, C.W. Lee and S.S. Choi, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **354**, 647 (1995)
6. C.W. Lee, M.K. Ko, S.L. Woo, S.-J. Gho, J.Y. Lee, K.W. Choi, and Y.-S. Choi, Korean J. Mater. Res., **7** (10), 908 (1997)
7. Chang Woo Lee, J. Science Institute Kookmin University **14**, 131 (1996)
8. T. Hashizume, S. Inoue, T. Inami, T. Nakazawa and I. Yudasaka, Ext. Abstr. SSDM'91, p. 638
9. I. Asai, N. Kato, M. Fuse and T. Hamano, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, 474 (1993)
10. C.W. Lee and Y.T. Kim, Appl. Phys. Lett. **65**, 965 (1994)
11. G. Kolb, Th. Salbert and G. Abstreiter, J. Appl. Phys. **69**, 3387 (1991)
12. K.-Y. Choi, C.W. Lee, and C. Lee, Jpn. J. Appl. Phys. **34** (9A), 4673 (1995)
13. J.R. Chelikowsky and M.L. Cohen, Phys. Rev. **B10**, 5095 (1974)