

Lamp ZMR에 의한 SOI에서 비대칭 선형가열의 효과

반효동, 이시우, 임인곤*, 주승기
서울대학교 금속공학과, 서울, 151-742
*(주) 금성사 안양 연구소, 안양, 430-080

Effect of Asymmetric Line Heating in SOI by Lamp ZMR

Hyo-Dong Pan, Si-Woo Lee, In-Gon Lim* and Seung-Ki Joo
Dept. of Metallurgical Eng., Seoul Nat'l Univ., Seoul, 151-742, KOREA
* Anyang Research Lab., Goldstar Co., Anyang, 430-080, KOREA

요 약

SOI구조 형성을 위한 대응용 재결정(ZMR) 공정에서 타원형의 반사경을 기울여 빔강도분포를 인위적으로 변화시켜 실리콘 박막을 재결정시켰다. 비대칭 선형가열 효과를 해석하기 위하여 전산모사를 행하여 응고계면 근처에서의 온도분포와 열구배 변화를 조사하였다. 상부집속열원의 경사각이 증가할수록 액상의 과냉도와 실리콘 박막내의 결함열 간격은 증가하였다. 주된 결함은 연속적인 아결정립계였고 결함밀도가 낮은 경우는 isolated threading dislocations만이 관찰되었다. 단면 TEM과 박막 XRD 분석결과 실리콘 박막은 (100) 집합조직을 갖는 단결정 박막으로 재결정되었음을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

In Zone Melting Recrystallization(ZMR) of SOI structure, thin silicon films have been recrystallized by artificial control of beam intensity profile which was obtained by tilting of upper elliptical reflector. Temperature profiles and gradients near solidification interface were calculated by numerical simulation for analysis of asymmetric line heating effect. The larger the tilting angle of the upper reflector, the larger the degree of supercooling at liquid and the interdefect spacing in thin silicon films. Major defects were continuous subgrainboundaries. Isolated threading dislocations were observed in the case of the film having low defect density. We have found that the thin silicon films were recrystallized into (100) textured single crystals by cross-sectional TEM and thin film X-ray diffraction analysis.

1. 서 론

SOI(Silicon On Insulator)란 SiO_2 , Si_3N_4 등의 절연층위에 실리콘 박막을 형성한 후 이 박막

에 전기적 소자를 형성한 구조로서 고품질의 SOI기판을 제조하기 위한 여러 공정들이 연구, 개발되었고[1-5] 일부는 실용화 단계에 있다 [6]. SOI기판을 사용하여 전기적 소자를 형성한 경우 기존의 벌크 실리콘 소자제조공정에 의해 형성된 소자보다 여러가지 장점을 가지고 있다. 예를 들면 소자간의 격리(isolation)가 간단하고, latch-up을 방지할 수 있고 각 요소들 간의 기생용량이 감소하여 소자의 동작속도가 증가하므로 고속소자에도 사용이 가능하다[5, 6]. 그러나 이러한 장점들에도 불구하고 무결함 SOI기판을 제조하기가 어렵고, 특히 SOI기판 제조방법중 대용융 재결정(ZMR, Zone Melting Recrystallization)의 원리를 이용하는 경우 사용한 열원[7-10]에 관계없이 실리콘 박막내에 그림1(d)에서와 같이 주사방향과 나란히 배열된 결함열(isolated threading dislocation)이나 아결정립계(continuous subgrainboundary)이 존재하는 단점을 가지고 있다. 이 결함열 간격은 ZMR공정을 이용하여 SOI기판을 제조하는 경우 결함밀도를 측정하는 중요한 요소로서 기존의 많은 연구가 결함열 간격제어와 결함의 형상 및 형성기구에 초점을 맞추어 진행되어 왔다[11-16].

대표적으로 J.S.Im은 비디오 카메라를 이용하여 응고계면을 직접 관찰하여 응고계면의 셀(cell)형상이 주사속도, 열구배와 깊은 관련이 있다고 보고하였다[14]. Lemons등의 연구에 의하면 응고계면에서의 열구배가 감소할수록 아결정립계간의 거리가 증가한다고 발표하였으며[15], Pfeiffer등은 고액계면에서의 열구배가 4K/mm이하에서는 아결정립계가 isolated threading dislocation들의 배열로 된다고 보고하였다[13]. 그러나 Lemons와 Pfeiffer는 실리콘이 용융될 때의 급속하게 변화는 광학적인 성질을 고려하지 않았으며 J.S.Im은 실리콘의 광학적인 성질은 고려하였으나 일정한 속도로 움직이는 응고계면에 대해서는 전산모사를 행하지 못하였다[16].

본 연구에서는 SOI구조 형성을 위한 램프 ZMR공정에서 비대칭 선형가열 효과를 조사하기 위하여 실리콘의 광학적인 성질을 고려하고 일정한 속도로 움직이는 응고계면에 대해 전산모사를 행하였다.

2. 전산모사

계산에서 사용된 상부집속열원의 경사각과 강도분포 및 실리콘 박막에서의 온도분포는 그림1과 같으며 x방향으로 V의 속도로 이동하는

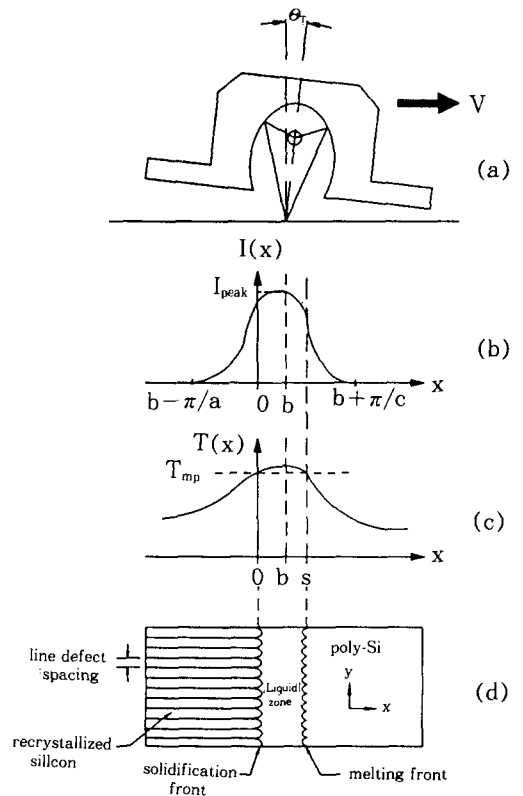


Fig. 1. Illustration of upper reflector tilting angle (a), intensity profile (b), temperature profile (c), and morphology of specimen surface during the ZMR (d), used in a computer simulation.

열원에 대해 실리콘 박막이 느끼는 온도분포를 알아보기 위한 열방정식은 다음과 같다[17].

$$\alpha_i \nabla^2 T_i + V \left(\frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{J_i^{net}}{[\rho C_p]_i h} = \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} \right) \quad (1)$$

위 식에서 좌변의 첫째 항은 열확산에 의한 열전달 성분이고, 둘째항은 열원의 이동을 고려한 항이며, 셋째항은 열원항이다. 비교적 낮은 주사속도에서는 x방향으로의 열전도가 열원의 이동속도보다 충분히 크기때문에 정상상태를 가정할 수 있고 이 때 우변을 0으로 놓을 수 있다[17]. (1)식에서 사용된 상수값과 기호들의 정의 및 열방정식을 유도하는 과정은 참고문헌 [18]에 상세하게 나타나 있다. 단, 본 전산모사에서는 상부반사로를 기울임에 따라 집속강도분포가 좌우 비대칭이 되므로 세제항의 열원항에서 비대칭 열원함수를 아래와 같이 다시 정의하였다.

$$I(x) = \begin{cases} \frac{I_{peak}}{2} [\cos a(x-b) + 1], & \text{for } b - \frac{\pi}{a} \leq x \leq b \\ \frac{I_{peak}}{2} [\cos c(x-b) + 1], & \text{for } b \leq x \leq b + \frac{\pi}{c} \\ 0 & \text{for } x < b - \frac{\pi}{a}, x > b + \frac{\pi}{c} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 집속강도분포 $I(x)$ 의 a 와 c 는 그림1(a)에서 I_{peak} 점을 중심으로, 상부반사로를 기울인 각도(θ_T)에 따라 실험적으로 정해지는 값이다. 상수 a 와 c 의 결정은 실험방법에 자세히 기술하였다.

(1)식에 (2)식의 열원함수와 상수값들을 대입하여 네 영역(응고면과 접한 고상과 액상 및 용융면과 접한 고상과 액상)에서의 온도해를 해석적으로 구하고 여기에 각 경계에서의 경계조건으로부터 Netwon-Raphson의 반복법에 의해 미지수를 결정하면 실리콘 박막 전체의 온도분포를 결정할 수 있다.

3. 실험방법

실험에 사용된 ZMR장비는 그림2와 같으며 9개의 할로겐 램프열로 이루어진 하부반사로는 시편을 약 940°C로 균일하게 가열시키고 타원형으로 설계된 상부 반사로는 1개의 할로겐 램프에 의해 집속가열이 가능하도록 하였다. 경사각(θ_T)은 상부반사로의 좌우 높낮이를 조절하여 얻었다. 시편을 약 240초 정도 예열하여 용융대를 형성한 후 상부집속열원을 일정한 속도로 이동시켜 실리콘 박막을 재결정시켰다.

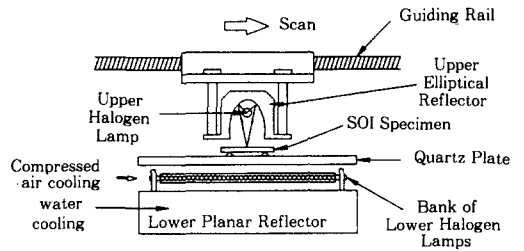


Fig. 2. Schematic diagram of the tungsten halogen lamp ZMR reflector.

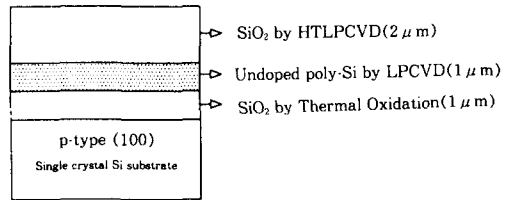


Fig. 3. Schematic diagram of the specimen structure used in this experiment.

시편은 그림3과 같이 p-형의 단결정 실리콘 기판을 산화시켜 1μm의 산화막을 형성한 후 저압화학증기증착(LPCVD)에 의해 1μm의 다결정 실리콘 박막을 형성하였다. 표면보호막의 형성을 위해 다결정 실리콘 위에 고온저압화학증기증착(HTLPCVD)에 의해 2μm두께의 산화막(SiO₂)을 증착하였다. ZMR중 용융실리콘과 산화막과의 습착성(wettability) 증대를 위하여 1100°C, NH₃분위기에서 4시간 열처리하

였으며[19] 재결정된 시편은 불산용액에서 표면보호 산화막을 제거하고 Yang에칭[20]을 한 후 광학현미경을 이용하여 관찰하였다.

집속강도분포 $I(x)$ 의 상수 a 와 c 를 결정하기 위해 상부집속열원을 약 -6° 에서 6° 까지 3° 간격으로 변화시켜 laser external powermeter (LEP)로 강도분포를 측정하였다.(위의 6° 는 본 실험장비에서 얻을 수 있는 상부집속열원의 최대 기울기이다.) 측정방법은 LEP를 고정시킨 상태에서 상부집속열원을 일정한 속도로 움직이면서 시간에 따르는 강도분포를 측정하고 속도를 곱하여 위치에 대한 강도분포로 환산하였다. 경사각(θ_T)은 그림1의 (a)에서 상부반사로를 시계방향으로 기울였을 경우를 양의 방향으로 정하였다. 그림1(b)에서 a 와 c 값은 상부집속열원을 기울이지 않았을 때는 빔강도분포가 좌우 대칭이므로 두 값이 $4.812(\text{cm}^{-1})$ 로 서로 같다[18]. 그러나 그림1(a)에서 I_{peak} 점을 중심으로 기울였을 때는 그림4에서와 같이 좌우 비대칭의 강도분포를 나타내고 a 와 c 는 각각 다른 값을 가진다. 위에서 3° 간격으로 변화시킨 강도분포로부터 상부반사로의 기울임 각도에 따르는 a 와 c 의 값을 1차 근사로 구하였다. ($a=4.812+0.08333\theta_T$, $c=4.812-0.08333\theta_T$)

4. 결과 및 고찰

상부집속열원의 비대칭 가열효과로 실리콘 박막이 느끼는 강도분포와 온도분포의 변화를 LEP와 열전쌍을 이용하여 확인하였다. 그림4와 5는 그림1(a)에서와 같은 방향으로 상부반사로를 이동시켰을 경우 좌측이 응고면이 되고 우측이 용융면이 된다. 그림4에서 상부반사로를 기울이지 않은 경우에 비하여 (+)로 기울이면 용융면보다 응고면에 많은 열량이 입사하고 위치에 따른 강도분포의 변화는 좌측보다는 우측이 급함을 알 수 있다. 이와 반대로 상부집속열원을 반시계방향으로 기울인 경우는 앞의 경우와 반대의 경향을 보인다. 이러한 강도

분포 변화에 따라 LEP와 같은 방법으로 용융점 이하의 고상 실리콘 박막에서의 온도분포를 열전쌍으로 측정하여 그 효과를 확인하였다(그림5). 상부집속열원을 시계방향으로 기울인 경우 용융면보다 응고면쪽에 보다 많은 열량이 입사되고 입사강도의 구배가 작으므로 응고면의 온도가 용융면보다 높고 열구배는 작아짐을 알 수 있다.

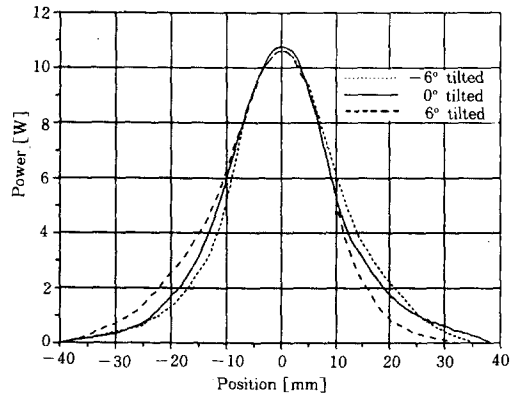


Fig. 4. Intensity profiles measured by laser external powermeter(LEP).

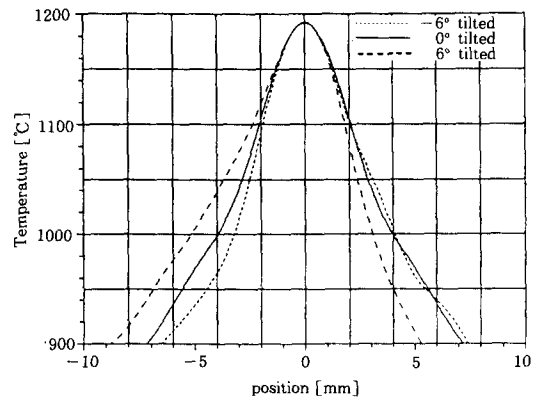
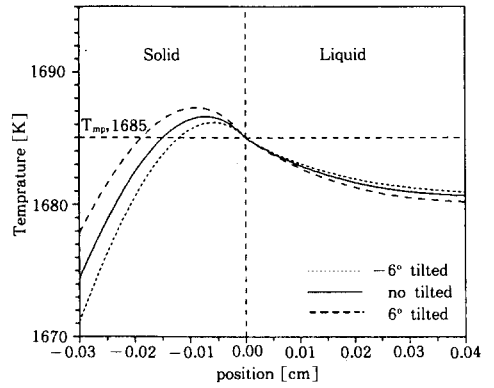


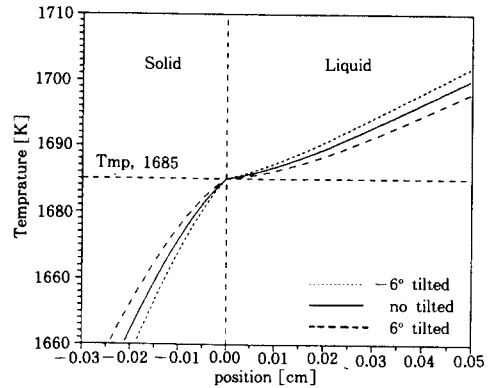
Fig. 5. Temperature profiles of the silicon films measured by thermocouple.

전산모사에 의하면 평면응고계면에서의 온도 분포는 전형적으로 그림6과 같이 나타난다. 상부집속열원의 가열강도(I_{peak})가 어느 정도에 이르기까지는 고상에서는 과열이, 액상에서는 과냉되는 현상이 나타나며 이는 실리콘의 액상과 고상의 반사도($R_S=0.4$, $R_L=0.7$)와 방사도($\epsilon_S=0.6$, $\epsilon_L=0.2$)차이 때문에 발생하는 것으로 밝혀졌다[16]. 과열된 고상은 액상으로, 과냉된 액상은 고상으로 변하려고 하기때문에 평면계면은 곧 불안정해져서 계면형상이 셀이나 셀-수지상으로 되면서 계면근처에서의 과열과 과냉을 낮추려고 한다[16]. 그러므로 실제의 과열과 과냉은 그림에서 보는 것보다 낮을 것으로 예상되고 계면근처에서의 과열과 과냉이 증가할수록 계면을 불안정하게 만드는 정도는 증가한다. 그림6(a)에서 상부집속열원을 6° 기울인 경우 응고면과 접한 고상에서의 과열과 액상에서의 과냉이 0° 나 -6°에 비하여 심화됨을 알 수 있다. 이는 용융면보다 응고면에 더욱 많은 열량이 입사되어 실리콘의 광학적 성질차에 의해 고상에서의 과열과 액상대내에서의 과냉정도가 심화되는 것으로 해석된다. 그러므로 응고계면에서의 계면 불안정도는 증가되고 보다 쉽게 셀계면을 형성할 수 있다. 상부집속열원의 강도를 증가시킬 경우 액상대내에서 과냉이 사라지며 이 경우에 대한 온도 분포를 그림6(b)에 나타내었다. 그림에서 상부집속열원을 6°기울인 경우 고상과 액상에서의 열구배가 0° 나 -6°에 비하여 감소함을 알 수 있다. 상부집속열원의 가열강도를 달리하면서 기울인 각도에 따라 응고계면에서의 열구배를 그림7에 나타내었다. 그림에서 열구배가 양인 입사강도 영역에서는 시계방향으로 기울일수록 열구배의 감소를 나타내나 열구배가 음인 입사 강도에서는 θ_T 의 증가에 따라 열구배가 음의 방향으로 증가를 가져오게 된다. 이는 θ_T 의 증가가 액상대내에서의 과냉을 심화시키는 것을 의미한다.

외부에서 주어지는 공정변수의 변화에 따라



(a)



(b)

Fig. 6. Temperature profiles at solidification interface in the silicon films for $I_{peak} = 70\text{W/cm}^2$ (a) and $I_{peak} = 74\text{W/cm}^2$ (b). ($V = 0.15\text{mm/sec}$, $I_b = 24.8\text{W/cm}^2$).

그림1(d)에서 응고의 고-액계면의 형상이 변하게 되고 이에 따라 재결정화된 실리콘의 박막에 존재하는 결함의 종류 및 밀도가 달라진다[16]. 이는 전산모사에서 검토한 바와 같이 단위면적에 입사되는 열량에 따라 응고계면에서의 열구배가 달라지며 이에 따라 평면계면이 안정 또는 불안정해지기 때문에 생기는 현상이다[18]. 응고계면의 형상은 크게 평면계면과 비평면 계면으로 나누어진다. 평면계면은 응고계면에서의 열구배가 양인 경우로서 액상대

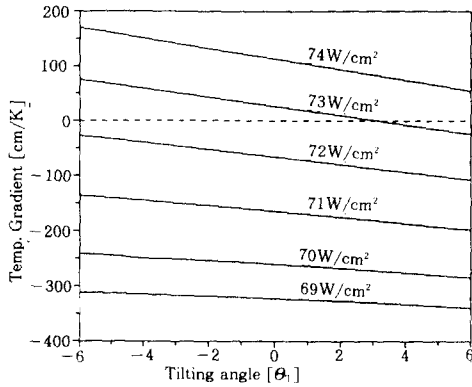
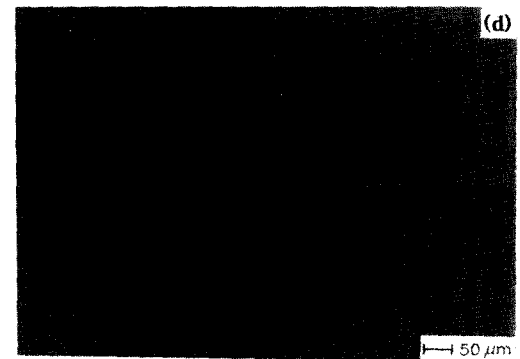
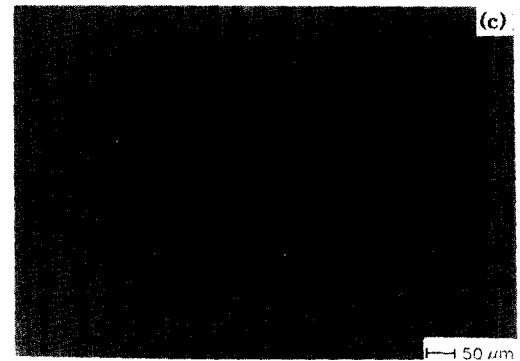
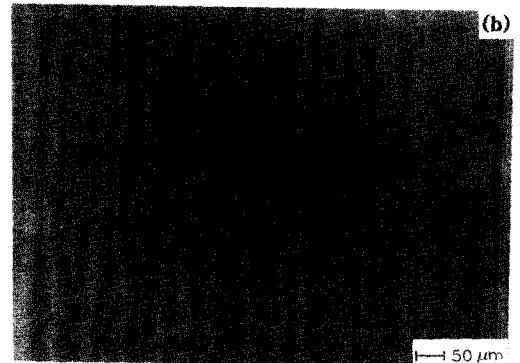
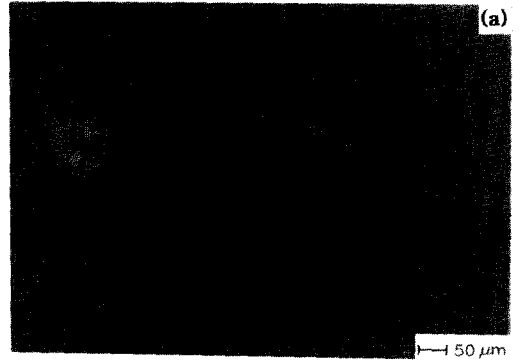


Fig. 7. Temperature gradient of liquid at solidification interface as a function of upper reflector tilting angle ($V=0.15\text{mm/sec}$, $I_b=24.8\text{W/cm}^2$).

내에서 과냉이 없으므로 계면에 생성된 교란요소가 소멸하여 실제로는 micro-facet한 계면을 가진다. 이러한 계면에 의해서는 주기적인 결합열을 얻을 수 없고 무질서한 형태의 결합을 갖는 박막이 얻어진다. 비평면 계면은 용고계면에서의 열구배가 음이고 계면형상이 주기적인 크기와 간격을 갖는 셀이나 셀-텐드라이트 계면을 형성한다[16]. 셀계면에 의해 생성된 주기적인 결합열을 그림1(d)에 보여주는데 이 결합열은 용고면의 뾰족점(cusp)에서 용고된 고상으로 둘러싸인 액상 실리콘이 용고되면서 부피팽창으로 인한 응력때문에 생기는 것으로 알려져 있다[21]. 따라서 ZMR공정에서는 셀계면에서 이 셀의 주기와 크기를 조절하는 것이 양질의 실리콘 박막을 얻는데 유리함을 알 수 있다.

셀계면을 얻을 수 있는 조건에서, 상부집속열원의 경사각의 변화가 재결정된 박막에 미치는 영향을 알아보기 위하여 -6° 에서 6° 까지 3° 간격으로 상부집속열원을 기울여 실험하였다. 그림8은 표면보호막을 제거하고 Yang 에칭 후의 표면형상으로서 셀계면에 의한 주기적인 결합열을 관찰할 수 있으며 상부집속열원의 기울



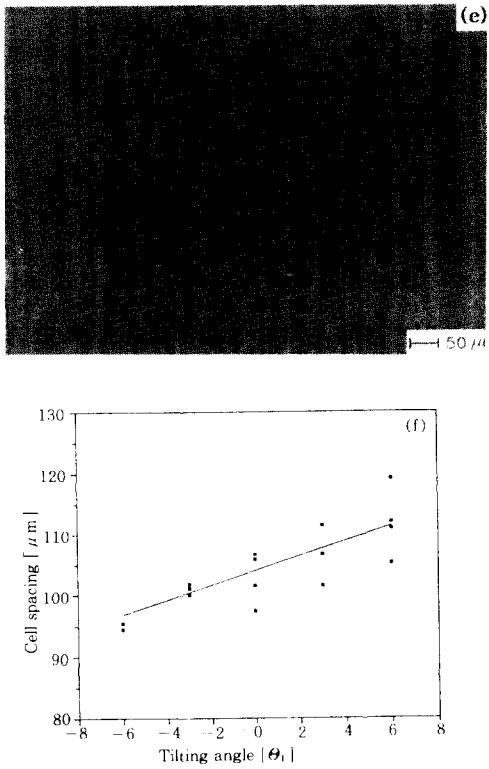


Fig. 8. Effect of the upper reflector tilting angle on the defect morphology. Upper reflector tilting angles were -6° (a), -3° (b), 0° (c), 3° (d), 6° (e), and interdefects spacing vs. θ_r (f). (Upper lamp power = 1.38kW, scan velocity = 0.15mm/sec and preheating temperature = 940°C).

인 각도가 증가할수록 결함열 간격이 증가함을 알 수 있다. 이것을 도표로 나타내면 상부집속 열원의 기울기가 증가할수록 결함열 간격은 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 비대칭 선형가열 효과로 용융면보다 응고면에 보다 많은 열량이 입사되어 고상의 과열과 액상의 과냉도의 증가로 셀계면의 발달정도가 증가하고 따라서 셀 주기가 증가하기 때문이다 [18]. 사진에서 결함의 진행방향이 주사방향이

며 실리콘 박막의 [100] 방향이다. 그림7과 8을 통하여 비대칭 선형가열로 응고면과 접한 고상에서의 과열과 액상에서의 과냉도(열구배)가 변하고 이들의 변화가 결함열 간격에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다.

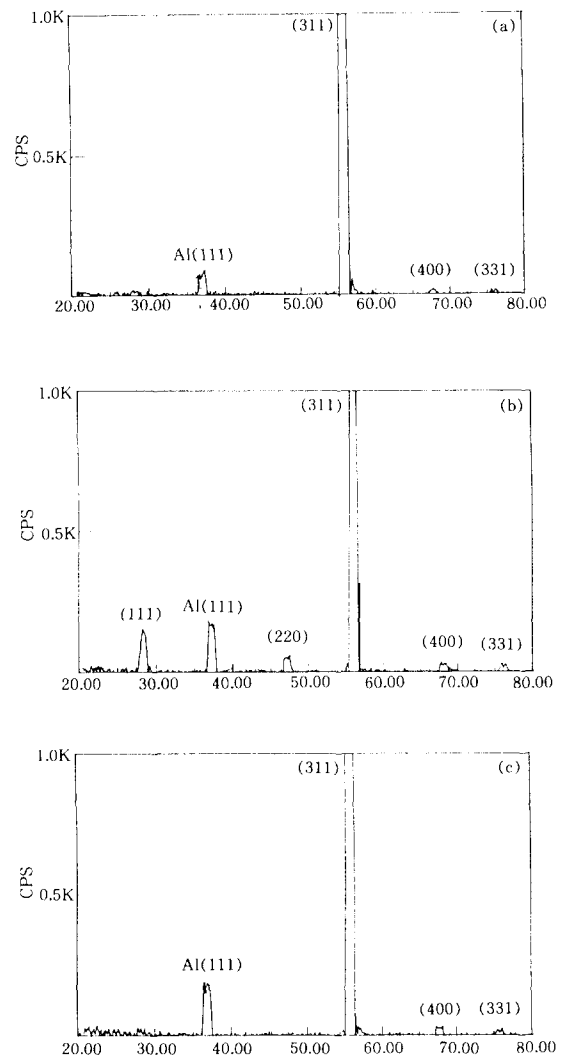


Fig. 9. Thin film X-ray diffraction patterns of (100) single-crystal Si wafer (a), deposited poly-Si (b), and recrystallized Si films (c).

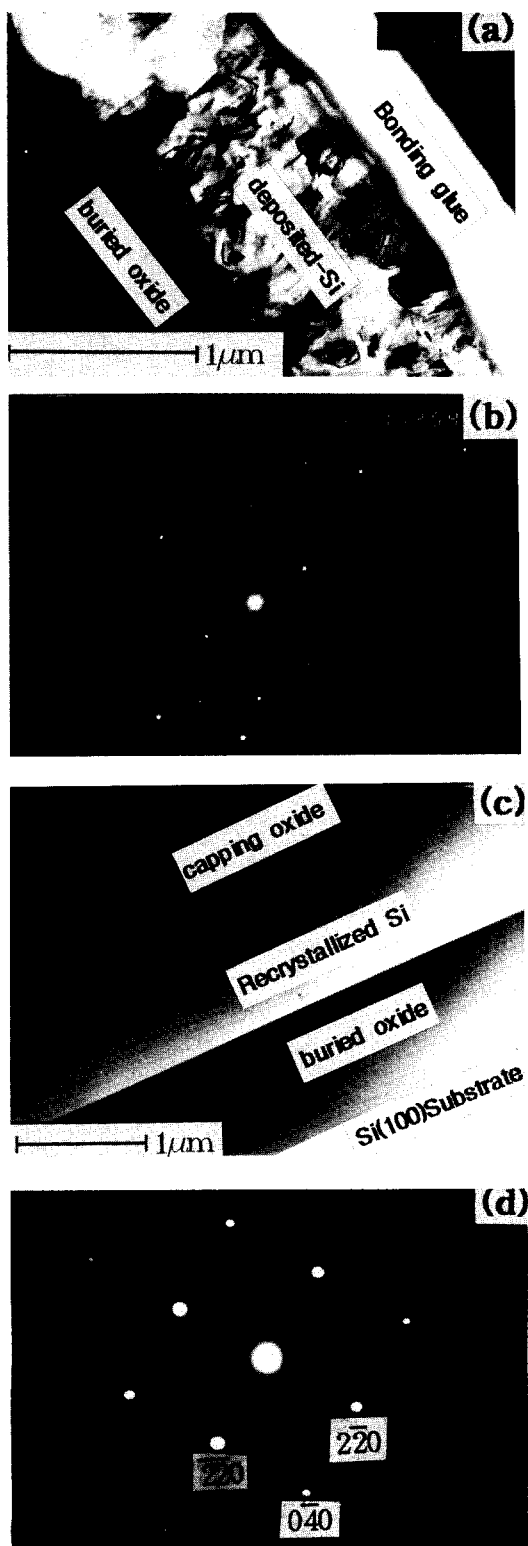


Fig.10. Photographs of cross-sectional TEM((a), (c)) and selected area diffraction patterns((b), (d)) of a silicon film take along [001] zone axis. As deposited poly-Si film (a), (b) and recrystallized silicon film(c), (d).

재결정화된 실리콘 박막은 단면 TEM과 박막 XRD로써 결정성 분석을 하였다. 박막 XRD 분석방법은 (100) 집합조직을 갖는 실리콘 박막의 경우 X선의 입사각을 2.85° 로 고정시킨 상태에서 2θ 를 변화시켰을 때 $2\theta=56.2^\circ$ 부근에서 Bragg 회절조건을 만족하는 (311) 피크만이 나타난다[18]. 이러한 원리를 이용하여 (100) 단결정 실리콘 기판을 측정 한 결과 (311) 피크가 강하게 나타났다(그림9(a)). 여기서 $2\theta=37.4^\circ$ 부근에서 나타나는 피크는 알루미늄 시편홀더에 의해 나타나는 Al(111) 피크이므로 XRD 분석에서 제외하였다. ZMR전의 다결정 실리콘의 경우 여러가지 피크들이 나오는 것으로 보아 무질서한 결정방위를 갖는 다결정 박막임을 알 수 있다(b). 그러나 이러한 시편을 ZMR한 후의 결과는 (100) 단결정 실리콘과 같은 피크만이 나왔다(c). 이것은 비정질 물질인 SiO_2 위에서 단결정 실리콘 박막이 성장하였음을 나타내며 이러한 현상에 대해서는 여러가지 논란이 있지만 많은 사람들이 SiO_2 와 Si의 (100)면 사이의 표면에너지가 상대적으로 작아서 선택적으로 (100) 집합조직이 형성된다고 예상하고 있다. 이러한 가정에 의해 실리콘의 주피크인 (111)피크가 (311)피크보다도 작게 나온 것은 실리콘이 다결정으로 증착된 후 암모니아 열처리시 어느 정도의 (100) 집합조직을 갖는 것으로 설명할 수 있다. 재결정화된 실리콘 박막의 XRD 결과는 상부반사로의 기울인 각도에 무관하게 단결정의 경우와 같이 완벽한 (100) 집합조직을 가짐을 알 수 있었다. 박막의 깊이 방향으로의 결정성을 분석하기 위해 단면 TEM 관찰을 하였고 이의 결과를 그림10에 나타내었다. 그림에서

(a)와 (b)는 재결정하기 전의 단면 사진과 회절분포로서 무질서한 결정방위를 갖는 다결정 실리콘 박막임을 보여주며 (c)와 (d)는 재결정화된 박막으로 실리콘층내에 결함이 존재하지 않으며 단결정 실리콘과 같은 회절분포를 얻었다.

5. 결 론

SOI구조를 형성하기 위한 ZMR공정에서 상부집속가열원인 할로젠 램프 반사로를 기울임으로써 응고면에서 비대칭적인 온도분포를 얻었고 전산모사 결과를 통하여 액상의 과냉 및 고상의 과열정도가 증가함을 관찰하였다. 상부집속열원의 경사각(θ_T)을 증가시킬수록 결함열 간격이 증가함을 관찰하였다. 재결정된 박막은 단결정 (100) 웨이퍼와 같은 완벽한 (100) 집합조직을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 1992년도 교육부 학술 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. L. Zorrilla Carfagnini and J. Trilhe, J. Electrochem. Soc., 128(1981), 385
- [2] H. W. Lam and R. F. Pinizzotto, J. Cryst. Growth, 63(1983), 554
- [3] K. Imai, H. Unno and H. Takaoka, J. Cryst. Growth, 63(1983), 547
- [4] R. C. Frye, H. Unno and H. Takaoka, J. Electrochem. Soc., 133(1986), 1673
- [5] H. Yamamoto, H. Ishiwara, S. Furukawa, M. Tamura and T. Tokuyama, "Silicon-on-Insulator : Its Technology and Application" S. Furukawa, Ed., (Tokyo KTK Scientific Publisher, 1985), 187
- [6] William C. O'Mara, "Silicon-On-Insulator Materials Technology and Markets", O'mara & Associates (1992)
- [7] T. Nishimura, Y. Akasaka, H. Nakata, K. Sugahara and T. Isu : ibid, 21
- [8] Y. Hayafuji, T. Yanada, H. Hayashi, K. E. Williams, S. Usui, S. Kawado, A. Shibata, N. Watanabe and M. Kikuchi, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 23(1984), 491
- [9] J. C. C. Fan, B-Y. Tsaur and M. W. Geis, J. Cryst. Growth, 63(1983), 453
- [10] J. Sakurai, J. Electrochem. Soc., 133 (1986), 1485
- [11] K. A. Jackson and D. A. Kurtze, J. Cryst. Growth, 71(1985), 385
- [12] M. W. Geis, H. I. Smith, D. J. Silversmith, R. W. Mountain and C. V. Thompson, J. Electrochem. Soc., 130(1983), 1178
- [13] L. Pfeiffer, S. Paine, G. H. Gilmer, W. Van Saarloos and K. W. West, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 74(1987), 543
- [14] J. S. Im, H. Tomita and C. V. Thompson, Appl. Phys. Lett., 51(1987), 685
- [15] R. A. Lemons, M. E. Bosch and D. Herbt, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 13(1983), 581
- [16] J. S. Im, "Experimental and theoretical investigation of interface morphologies observed in directional solidification of thin Si films", Ph.D Thesis, MIT, (1989)
- [17] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, "Conduction of heat in solids 2nd Ed.", Oxford University Press(1959)
- [18] 임 인곤, "선형집속가열을 이용한 SOI소자용 실리콘 박막의 단결정화에 관한 연구," 박사학위 논문, 서울대학교, 1992.
- [19] C. K. Chen, M. W. Geis, M. C. Finn and B-Y. Tsaur, Appl. Phys. Lett., 48(1986),

1300

- [20] K. H. Yang, J. Electrochem. Soc., 131 (1984), 1140
- [21] G. K. Celler, McD. Robinson, L. E. Trimble and D. J. Lischner, J. Electrochem. Soc., 132(1985), 211