기 술 특 집

LASER Crystallization System for Poly-Si

이 호 년(삼성종합기술원)

요 약

Active Matrix Flat Panel Display(AM-FPD)의 경쟁력 향상을 위해서 반드시 필요한 고성능, 고생산성 Thin Film Transistor(TFT)를 제작에 사용하는 결정화 방법 중, 산업화에 가장 근접한 레이저 결정화 방법 및 장비에 대해서 기술한다.

I. 서 론

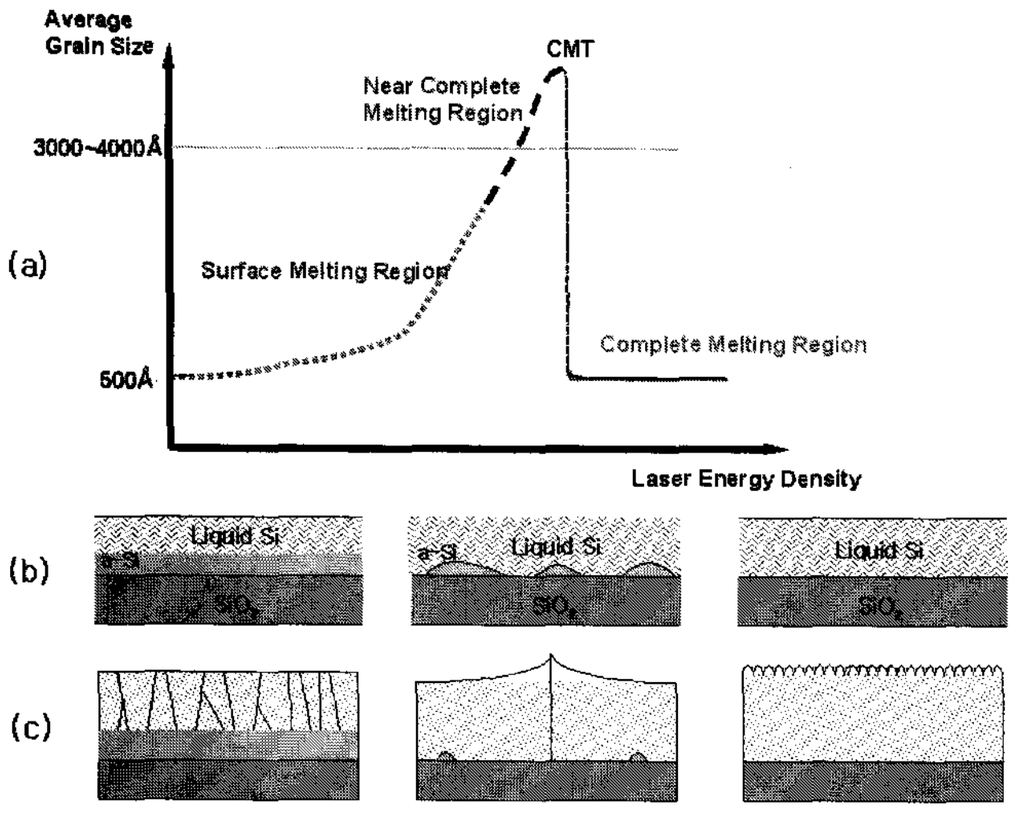
Flat Panel Display(FPD) 산업이 급격하게 커져가고 있는 가운데, FPD의 고품질화 및 다기능화에 대한 요구가 증대되고 있다. 쉬운 제작 공정과 낮은 제작단가라는 이유로 FPD 산업화 초기에 많이 적용되었던 Passive Matrix (PM) display로는 화질에 대한 요구를 충분히 만족시킬 수 없었다. 이러한 이유로 Active Matrix(AM) FPD의 점유율이 급속히 증가하고 있다. FPD 가운데 가장 널리 사용되고 있는 Liquid Crystal Display(LCD)에는 주로 수소화된 비정질 규소(a-Si : H) 박막으로 제작된 Thin Film Transistor(TFT)가 스위칭 소자로 사용되고 있다. a-Si : H TFT는 재료 특성에서 기인하는 낮은 전류공급 능력으로 인해 주변회로 등의 집적화가 힘든 단점이 있으며, LCD에 비해서 높은 전류 공급능력을 필요로 하는 Organic Light Emitting Diode(OLED) 등에서 적용하기가 어렵다. 이에 다양한 주변회로의 집적화 및 OLED와 같이 새로운 FPD에 적용할 수 있는 다결정규소(p-Si) TFT에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.

p-Si 박막을 제작하는 방법으로는, 박막 증착 단계에서 바로 다결정을 만드는 직접증착법과 비정질 박막을 제작한 후에 다결정 박막으로 상변화 시키는 방법이 있다. 직접증착법은 증착온도가 높아 유리기판을 사용하기가 어렵고 증착된 막의 균일도 및 특성이 좋지 않아 AM-FPD 제작에 실제로 사용되지는 않는다. 비정질막을 상변화 시키는 방법은 고온에서 열처리는 Solid Phase Crystallization(SPC), 레이저를 조사하여 순간적으로 액화시킨 후 결정화 시키는 방법, 금속촉매에 의한 결정화 방법 등이 있다. 이러한 결정화 방법중에 산업화에 이용할 수 있는 수준에 이르러 있는 것이 레이저 조사에 의한 방법이다. 레이저 조사에 의한 방법에도 많은 종류가 있으나, Excimer Laser Annealing (ELA)[1], Sequential Lateral Crystallization(SLS)[2], Thin-Beam Directional Crystallization(TDX7)[3] 등이 산업계에서 특히 주목 받고 있다. ELA는 가장 먼저 개발이 시작된 것으로 실제로 산업계에 많이 적용이 되고 있는 방법이지만, 이 방법에 의해서 제작된 p-Si TFT는 SLS, TDX 등에 의해서 제작된 TFT에 비해서 비교적 낮은 소자 특성을 보인다. SLS는 일부 선도업체에 의해서 제품 적용을 시작하고 있는 단계로 TFT의 전하 이동도를 획기적으로 높여 주변회로 직접화에 유리하며 생산성도 높다. TDX는 SLS에 비하여 소자 특성 및 생산성을 더욱 높여주는 기술로 제안되어 개발되고 있다.

본고에서는 SLS를 중심으로 레이저 결정화에 이용되는 장비에 대해서 기술하고자 한다.

II. 레이저 에너지 조사에 의한 결정화 현상

[그림 1](a)는 레이저 에너지 밀도에 대한 규소막의 용융 현상에 대한 그래프이다. 레이저 에너지가 낮은 경우 (Surface Melting Region)에는 규소막의 표면만 녹게 된다. [그림 1](b)의 좌측 그림이 이러한 모양을 설명하는 것이다. 이 경우 레이저 조사가 멈추면 액상의 규소 하부에 위치하는 고체상태의 규소가 결정화의 핵이 되어서 [그림 1](c)의 좌측 그림과 같이 위쪽으로 결정이 형성된다. 레이저의 에너지 밀도를 높여가면, 레이저 조사된 영역이 거의 전부 녹는 영역(Near Complete Melting Region)에 이르게 된다. 이 때 막내의 상태를 보면 [그림 1](b)의 중간 그림과 같이 막 하부의 일부 영역에는 아직 녹지 않은 부분이 남아 있으나 대부분의 영역은 액체 상태가 된다. 이때 레이저 조사가 멈추면 하부에 남아있는 고체 상태의 규소가 핵이



[그림 1] 레이저 에너지 영역에 따른 결정화 현상

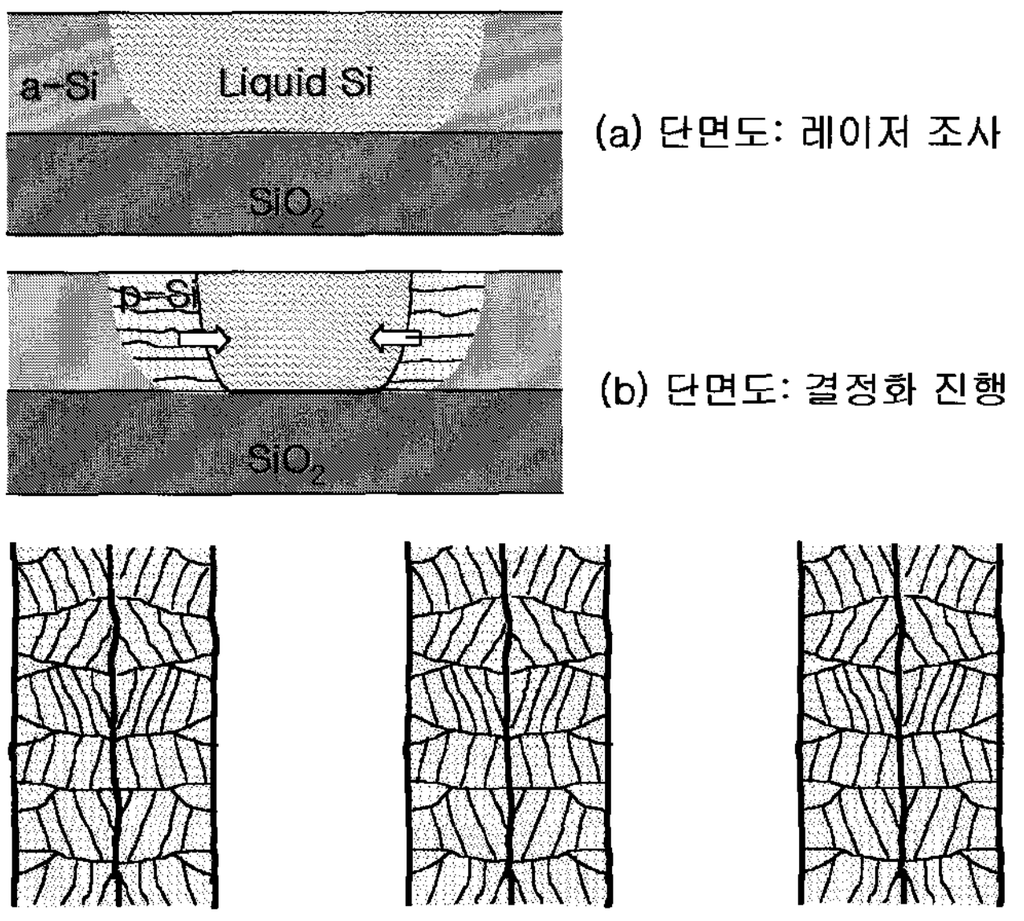
되어 핵으로부터 좌우 및 상부 방향으로 결정이 형성된다. 수평방향으로도 결정이 자라나게 되므로 결정성장면이 만나는 곳에서는 [그림 1](c)의 중간 그림과 같이 돌출부분이 생기게 된다. 레이저 에너지를 더욱 높이면 조사된 박막이 완전히 녹는 점인 Complete Melting Threshold(CMT)에 이르게 되고 이점을 넘어서 에너지를 증가시키면 [그림 1](b)의 우측 영역과 같이 완전한 액체 상태가 된다. 이때 레이저 조사를 멈추면 액체 상태의 규소 온도가 낮아지면서 자발적 핵 생성의 과정을 거쳐 여기에서 결정이 자라나게 된다([그림 1](c) 우측). 이렇게 형성되는 다결정막은 결정의 크기가 매우 작은 특징이 있다.

SLS 및 TDX는 CMT를 넘어선 영역([그림 1](a)의 CMT 우측 영역)을 이용하고, ELA는 CMT 이전의 영역([그림 1](a)의 CMT 좌측 영역)을 이용한다.

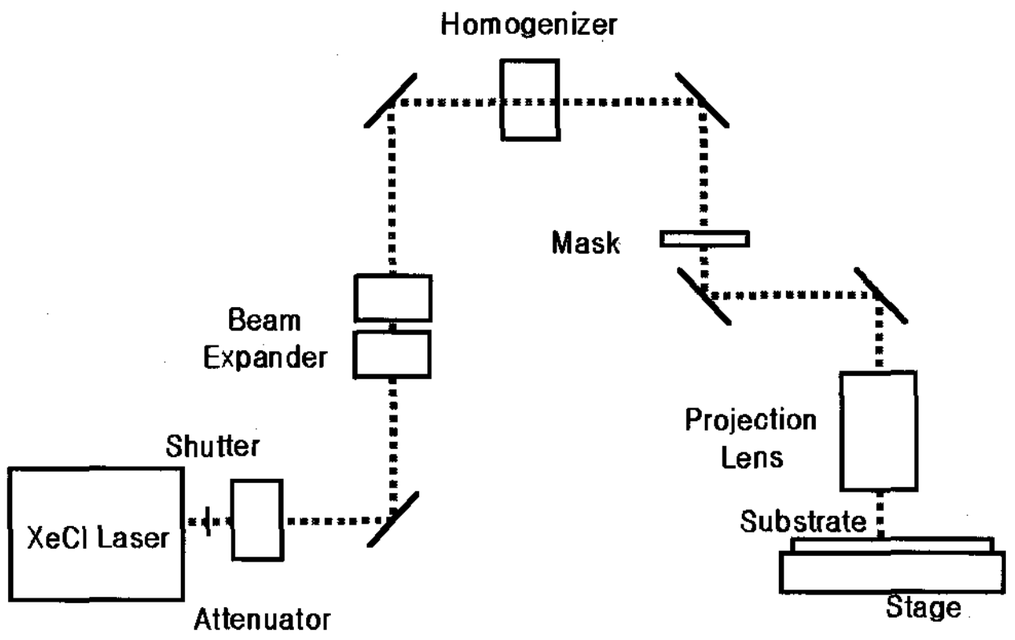
III. SLS 결정화

[그림 2]는 SLS 방법에 의한 결정화 현상을 설명하고 있다. 폭이 작고 ($\leq 10\mu m$) 에너지 밀도는 CMT 이상인 laser beam array를 형성하여 비정질 규소 박막에 조사하면 [그림 1](a)와 같이 레이저를 맞은 부분은 액체상태로 되고 이의 측면 부분은 고체 상태로 남아있게 된다. 레이저 조사가 끝나면 [그림 1](b)와 같이 측면에 존재하는 고체 상태의 규소를 핵으로 하여 결정이 성장하게 된다. 양쪽에서 성장하는 결정은 중심부분에서 만나게 되어 [그림 2](c)와 같이 중간에 경계면을 가지는 형상이 된다. 이후에 레이저 빔의 위치를 이동시켜 결정화가 진행되지 않은 중간 부분을 조사하여 주면 이미 결정화가 진행된 부분이 핵이 되어 결정이 다시 한번 성장하는 과정을 거쳐서 [그림 2](d)와 같이 전면이 결정화 하게 된다. 이렇게 성장된 결정은 그 크기가 수 μm에 이른다.

[그림 3]은 SLS 결정화 장비의 모식도를 보이고 있다. 결정화를 위한 레이저는 주로 XeCl 엑시머 레이저가 사용

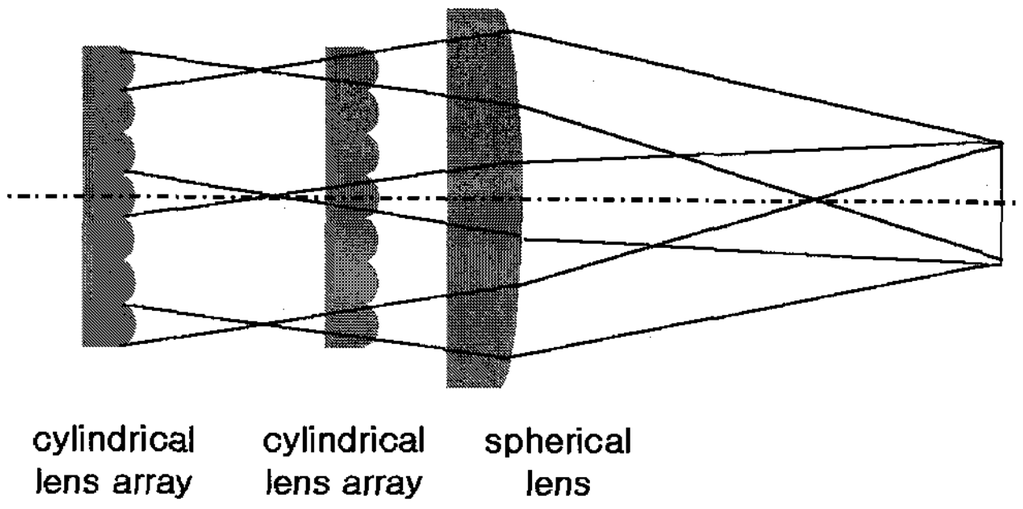


[그림 2] SLS 결정화 모식도



[그림 3] SLS 결정화 장비 모식도

된다. XeCl 엑시머 레이저는 308nm 자외선 파장을 가지고 있어서 규소박막에 흡수가 잘되며, 출력이 높아 한번에 넓은 범위의 박막을 녹일 수 있다. 펄스의 지속 시간은 30ns, 발진 주기는 300Hz 정도이다. 레이저의 세기는 일정하게 유지하여 발진시키고, 시스템에 입사하는 레이저 광의 세기는 attenuator를 이용해서 조절한다. Attenuator를 지난 광은 beam expander를 통과하게 되는데, 이 부분은 빔의 크기를 증가시키는 역할을 하며 몇 개의 렌즈로 구성되어 있다. 레이저 빔은 beam expander를 통과하면서 증가된 크기의

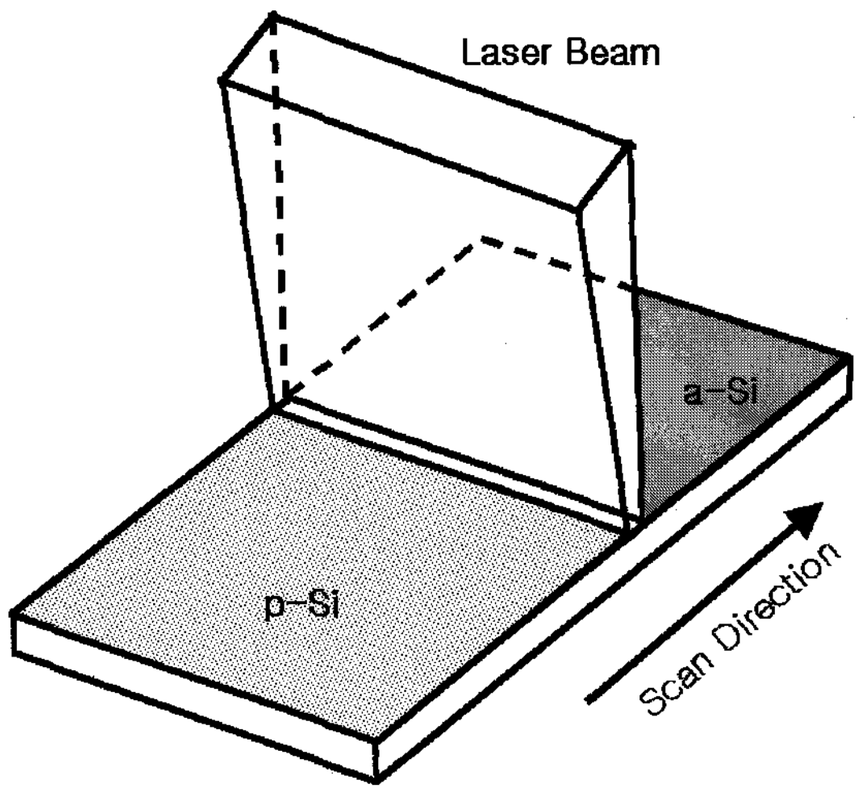


[그림 4] Homogenizer

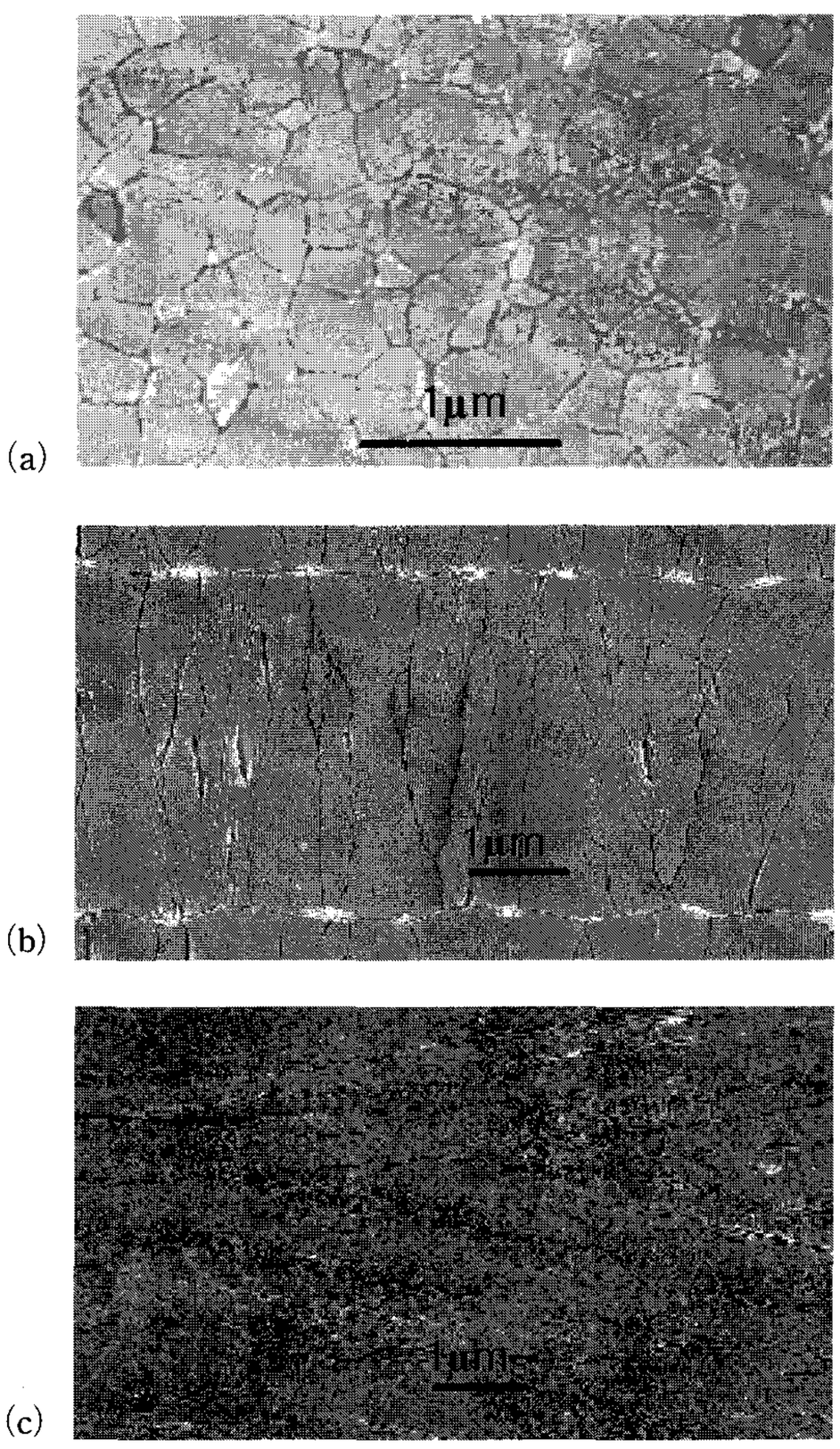
직사각형 모양으로 형성되게 된다. Attenuator와 beam expander 사이에 pulse duration extender를 두는 경우도 있는데, 이는 약 30ns인 펄스 지속 시간을 늘려주는 역할을 한다. Beam splitter를 이용하여 빔을 몇 개로 나누고 각 빔의 경로길이를 조절하여 나누어진 빔들이 이어져 나오게 하는 원리로 작동된다. 일반적으로 빔의 지속시간이 증가하면 한번에 성장시킬 수 있는 결정의 크기가 증가하는 효과가 있다. 즉 좀더 높은 전하 이동도를 얻게 된다. 이렇게 해서 크기 및 지속시간이 증가된 빔은 homogenizer를 통과하게 된다. 이 부분은 [그림 4]에 보이는 바와 같이 다수의 cylindrical 소형 렌즈로 구성된 렌즈어레이를 이용해서 빔의 공간적인 경로를 섞어주어 레이저 빔 내의 분포를 균일하게 하여 준다. 이렇게 균일화 된 빔은 마스크를 통과하면서 다수의 slit 형태의 모양으로 성형된다. 최종적으로 얻어야 하는 beam의 모양은 단축 방향으로 수 μm의 크기를 가지는 직사각형 모양의 beam array인데, mask를 통해서 얻을 수 있는 모양은 크기가 커서 projection lens를 통과하면서 크기를 원하는 값으로 줄이게 된다. Projection lens는 통상 5 : 1 정도의 배율을 가진다. 이렇게 마스크를 통과한 후에 빔 크기를 줄이는 것은 레이저 빔에 의한 마스크의 손상을 방지하기 위함이다. 마스크 패턴은 금속막으로 형성되는데, 마스크에 입사하는 광의 세기가 너무 크면 마스크의 손상을 유발할 수 있기 때문에, 낮은 밀도의 빔으로 형상을 만들고 이후에 그 크기를 줄이게 된다. 이렇게 형성된 빔이 기판에 조사되는 위치는 stage를 움직여서 제어한다. Stage는 linear 모터를 사용하여서 X, Y, Z의 3축으로 움직이게 제작된다. X, Y는 결정화하는 위치를 선택하기 위해서 사용되고, Z 방향은 기판면에 정확한 초점이 맺힐 수 있도록 기판의 높이를 제어하는데 사용된다.

Ⅳ. ELA/TDX 결정화

[그림 5]는 ELA 결정화의 개념을 보여준다. ELA 결정화는 [그림 1](a)의 CMT 이하의 에너지 밀도에서 이루어진다. ELA 결정화에 사용되는 빔은 단축방향으로 0.5mm 정도의 길이를 가지는 slit 형태를 가지게 된다. 장비의 구성은 [그림 3]의 SLS 장비구성과 유사하나, mask 대신에 slit이 들어간다는 차이가 있다. ELA 결정화에서는 박막의



[그림 5] ELA 결정화



[그림 6] 결정립 모양 ; (a) ELA, (b) SLS, (c) TDX

한 부분이 10~100회 정도의 레이저 조사를 받게 된다. 레이저 빔이 스캔 방향으로 이동하는 길이는 매 스캔당 빔 폭의 1/10~1/100의 크기를 가진다. 이렇게 한 부분을 중복하여 조사함으로써, 레이저 빔 내부 및 펄스 사이에 존재하는

불균일성에 기인하는 결정립의 불균일을 최소화 시켜주게 된다.

TDX 결정화는 CMT 이상의 에너지 밀도에서 이루어진다. 이 때 사용되는 빔의 형태는 ELA빔의 형태와 유사하나, 그 폭이 20μm 이하로 매우 얇다. 장비 구성도 ELA와 유사하나 생산성을 높이기 위하여 3kHz 이상의 발진주기를 가지고 출력이 높은 XeF 레이저를 사용한다. 이 레이저의 파장은 351nm이다. 높은 에너지 밀도의 폭이 얇은 빔을 사용하여, SLS와 같이 측면부의 고체상태의 규소를 핵으로 하여 결정화를 진행한다. 매 스캔당, 한번의 결정화에 의해서 자라는 결정의 길이 이하로 빔의 위치를 이동시켜 이미 결정화된 부분을 핵으로 하여 다시 결정화를 진행시킨다. 이러한 과정을 거쳐서 한 방향으로 계속 자라는 결정의 모양을 얻게 된다.

[그림 6]은 (a) ELA, (b) SLS, (c) TDX 방식으로 만들어진 다결정 규소막의 SEM 사진이다. 결정의 크기는 ELA<SLS<TDX 순서로 커진다. 이에 대응하여, 전하 이동도도 커지게 되어서 ELA로 만들어진 TFT로 구성하기 어려운 복잡한 주변회로를 구성하는데 이용할 수 있게 된다.

V. 결 론

다결정 규소 TFT를 채용한 AM-FPD의 필요성이 증대되고 있어, 좋은 성능의 p-Si TFT를 양산할 수 있는 생산성 높은 기술을 찾는 노력이 계속되고 있다. 기존에 가장 널리 알려져 있는 ELA 방법에 비해서 TFT 성능과 생산성이 우수한 SLS 방식에 대한 연구 및 투자가 활발히 이루어지고 있으며, 일부 제품화에 성공하고 있다. 또한, SLS 의 성능과 생산성을 더욱 개선하기 위한 노력으로 TDX 등의 연구가 진행되고 있다. p-Si TFT의 범용화를 위해서는 TFT 특성의 불균일성 해소 및 생산 단가의 저감이 시급하다. 이에 대한 산업계 및 학계의 노력이 지속되고 있어 가까운 장래에 비정질 규소 TFT에 버금가는 생산성과 결정질 규소 TFT에 못지않은 성능을 가지는 TFT를 제작할 수 있는 장비기술이 완성될 수 있을 것으로 기대된다.

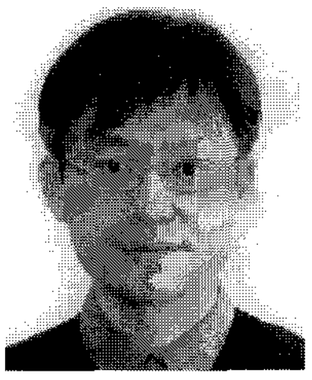
참 고 문 헌

[1] M. Hatalis, T. Voutsas, "Polysilicon TFT active layer fabrication technologies", Proceedings of the 1996 International Active Matrix Workshop, 21-4, 1996, Birmingham, UK.

[2] J. Im, et al., "Controlled super-lateral growth of Si films for microstructural manipulation and optimization", Physica Status Solidi A Vol.166, 603-17, 1998.

[3] David Knowles, "The Wait is Over : Practical LTPS Process Technology is Here", OLEDs 2005, November 14-16, San Diego, USA.

저 자 소 개



이 호 년

1991년 : 서울대학교 원자핵공학 학사, 1993년 : KAIST 물리학 석사, 1997년 : KAIST 물리학 박사, 1997~1999년 : 현대전자 디스플레이 선행연구소 선임연구원, 1999~2004년 : BOE-HYDIS LCD 연구소 책임연구원, 2004~현재 : 삼성종합기술원 전문연구원