

저온폴리실리콘 (LTPS) TFT 기술 동향

정병호, 강민진, 박태상
(고려대학교 디스플레이반도체물리학과)

1. 서론

저온폴리실리콘 (LTPS, Low Temperature Polycrystalline Silicon) 기술은 디스플레이 공정에서 비정질 실리콘 (a-Si)을 폴리실리콘 (p-Si)으로 변환하는 핵심 공정이다.^[1-6] 이 LTPS 기술은 LCD 초기에 개발되어 AMLCD 패널에 일부 적용되기도 하였으나, 최근 스마트폰을 포함해서 IT 기기에 AMOLED 디스플레이가 널리 적용되면서 그 중요도가 더욱 커지고 있다. 매우 높은 에너지를 흡수하는 영역에 순간적으로 집중 시킬 수 있는 레이저는 a-Si에 증착된 유리 기판에 열적 문제를 일으키지 않고 표면의 a-Si를 p-Si로 결정화한다.^[3-6] 레이저 결정화 기술은 개발 초기부터 단파장이며 출력이 높은 엑시머 레이저 (XeCl, $\lambda = 308$ nm)가 이용되었는데, 그 이유는 단파장 영역에서 실리콘의 흡수율이 높을 뿐만 아니라 당시 엑시머 레이저가 다른 레이저보다 고출력이 가능하였기 때문이었다. 그러나 기체 레이저의 속성 상 초기 투자 비용과 유지 관리 비용이 높은 점이 부담이 되고 있다. 한편 최근 단파장 고체 레이저의 출력이 증가하고 안정적인 레이저 발진이 가능해지면서 자외선 파장의 고체 레이저 ($\lambda = 343, 355$ nm)나 녹색 파장의 고체 레이저 ($\lambda = 532$ nm)를 이용한 레이저 결정화 연구가 XeCl 레이저의 대안 기술로 관심이 집중되고 있다.^[7-10] 그러나 현재까지 XeCl 레이

저에 버금가는 수준의 p-Si 결정화 품질이 재현되지 못하고 있어 지속적인 연구가 필요하며, 그와 함께 레이저 결정화 메커니즘 자체에 대한 이론적 연구도 필요하다. 특히 최근 IT 기기에서 UHD (Ultra High Definition)를 넘어 HMD (Head Mount Display)용 초고해상도를 구현하기 위해서는 p-Si의 정렬성을 더욱 높이거나 용도에 따라 다양한 크기의 p-Si 그레인 (grain)을 형성할 수 있는 Advanced LTPS 기술이 필요하다. 본 기고에서는 LTPS 공정기술을 소개하고 최근 연구되고 있는 UV 고체 레이저를 이용한 연구 동향과 레이저 결정화 기술에 대한 이론적 모델을 소개하고자 한다. 또한 현재 새롭게 시도되고 있는 LTPS기술을 소개함으로써 LTPS 기술을 전망하고자 한다. 현재의 LTPS 기술은 이미 10여년 전에 완성되어 더 이상의 기초 연구가 이루어지지 않았는데, 향후 LTPS 기술을 기반으로 하는 기술 혁신이 이루어져서 차세대 결정화 기술로써 새로운 도약이 이루어지기를 기대해 본다.

2. LTPS 기술의 개요

2.1. 레이저 결정화

표1은 비정질 실리콘 (a-Si), 폴리실리콘 (p-Si), 결정질 실리콘 (c-Si)의 원자 구조와 전하 이동도

표 1. 비정질 실리콘 (a-Si), 폴리실리콘 (p-Si), 결정질 실리콘 (c-Si)의 특성 비교표

	a-Si (Amorphous Si)	poly-Si (Polycrystalline Si)	c-Si (Single crystal Si)
Grain Size	Small Crystal Size	Medium Crystal Size	Single Crystal
Phase	Amorphous	Discontinuous Grain	High-Quality Si
Phase Stability	Meta-STABLE	STABLE	STABLE
Mobility	~ 0.5cm ² /Vsec	50~150cm ² /Vsec	>600cm ² /Vsec

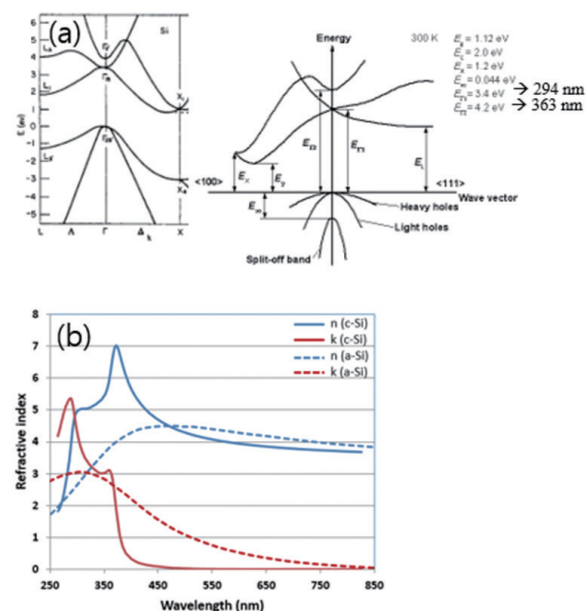


그림 1. (a) Si의 energy band와 Γ point에서의 optical transition energy 비교, (b) c-Si 과 a-Si의 굴절률 비교도

(mobility)를 나타낸다. 불규칙적인 원자 배열을 가지는 a-Si에 비해, p-Si은 일정한 크기를 가지는 결정구조 (grain)가 불규칙적인 배열을 하고 있다. 전하 이동도를 비교하면 a-Si의 경우 약 1 cm²/(V sec) 미만의 값을 가지는 반면 p-Si의 경우 대략 ~100 cm²/(V sec)정도의 값을 갖기 때문에 a-Si에 비해 훨씬 우수한 특성을 보인다. LTPS공정에 이용되는 레이저 파장은 300 ~ 350 nm 가 적절한데, 그 이유는 그림 1(a)에서와 같이 Si의 광학적 전이(optical transition)에 적합한 에너지가 3.4 ~ 4.2 eV이고 이에 대응되는 파장이 290 ~ 360 nm 이기 때문이다. 그림 1(b)에서 a-Si, c-Si의 굴절률 그래프를 보면 단파장영

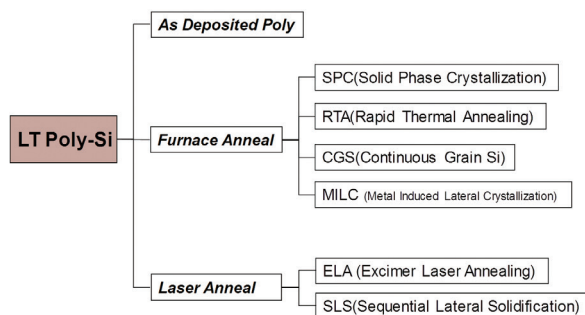


그림 2. LTPS의 공정별 분류도

역에서 흡수율이 모두 높음을 알 수 있다 (붉은색 실선과 점선). 그림2는 LTPS 공정 분류도를 나타낸다. 개발 초기에는 비레이저 방식, 즉 SPC (Solid phase crystallization), MILC (Metal induced lateral crystallization) 등 furnace annealing 방식도 개발되었으나 고온 공정에 의한 기판의 열화 문제와 누설 전류 문제 등을 극복하지 못하여 결국 레이저를 이용한 방식 ELA (Excimer laser annealing), SLS (Sequential lateral solidification) 방식이 양산 공정으로 채택되었다.^[4-6] AMLCD에 SLS 방식이 적용되었으나 현재 AMOLED 디스플레이는 TFT 성능이 더 우수한 ELA 방식이 채택되고 있다.^[4-6]

2.2. poly-Si 형성 원리

그림 3은 ELA 방식의 LTPS 공정 장치의 개략도와 레이저 결정화 후 실리콘 박막의 표면 이미지 사진을 보여준다.^[11] 엑시머 레이저 (XeCl)는 반복율 (repetition rate) 약 500 Hz 정도의 펄스 형태로 출력되며 레이저 튜브에서 기판에 도달하기 전에 광학계를 거치면서 좁고 긴 라인빔 (line beam)형태로 변환된다. 장축의 길이는 기판의 크기에 비례하고 단축 빔 폭은 수 백 μ m 로 변환된다. 또한 homogenizer 광학계를 이용하여 flat-top 형태의 빔으로 변환된다. a-Si이 증착 된 기판을 라인빔에 수직인 방향으로 일정한 속도로 이동시키면 라인빔 펄스가 반복적으로 겹쳐지면서 조사되는데, 대략 약 95 % ~ 97 %의 overlap을 유지할 경우 대략 20 ~ 30 회 정도 레이저가 조사 된다.^[5, 6] 레이저 에너지에 따라 표면 p-Si 그레인(grain)의 크기가 변하게 되는데 레이저 에너지가 작으면 그레인의 크기가 작지만 레이저 에너지가

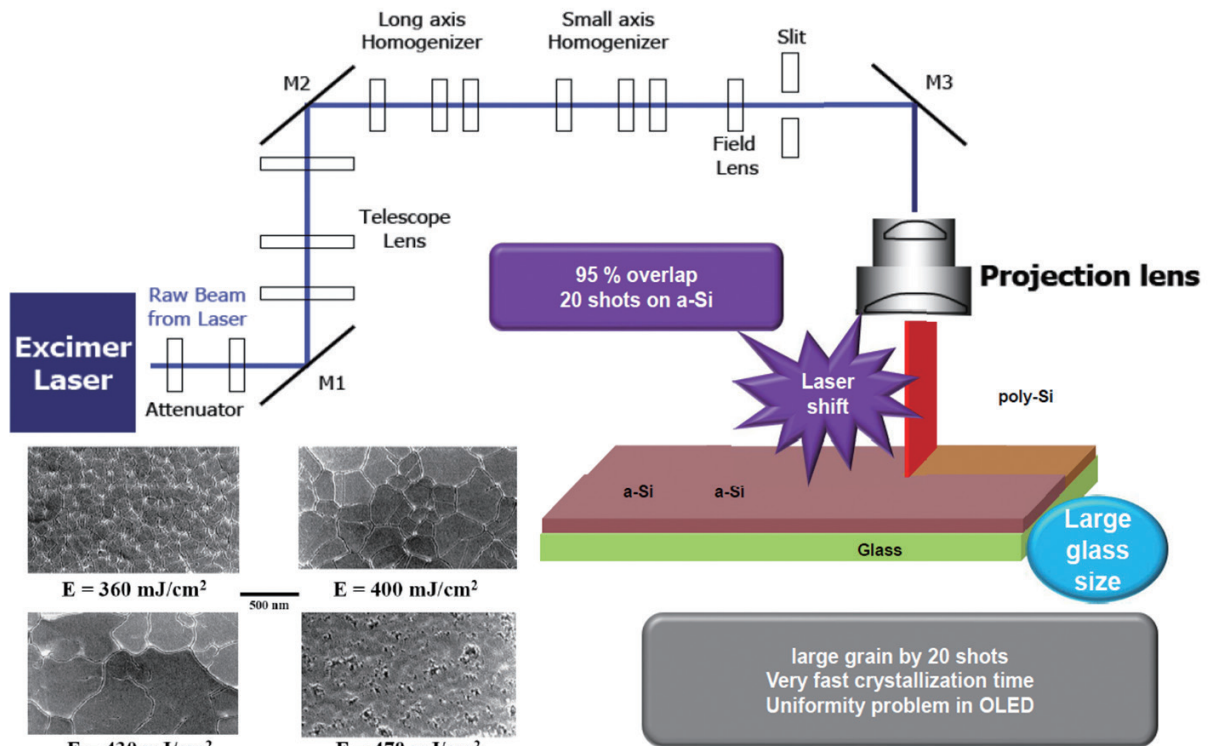


그림 3. LTPS 공정 장치 개략도와 레이저 결정화 후 실리콘 박막 표면 이미지^[11]

증가하면 그레인의 크기가 점차 증가하고 사진과 같이 대략 430 mJ/cm^2 일 때, 최대의 크기가 된 후, 그 이상의 에너지에서 그레인의 크기가 다시 감소하는 것을 볼 수 있다. 물론 그레인이 최대 크기가 되는 에너지는 a-Si 박막의 두께, 레이저 빔의 형태, 파장 등 여러 인자에 의해서 결정되기 때문에 특정 레이저 에너지에서 최대의 Si 그레인이 얻어진다고 할 수는 없다. 그림 4는 레이저 세기와 평균 p-Si 그레인의 크기를 나타내는 그래프이다. 위에서 언급한 것처럼 레

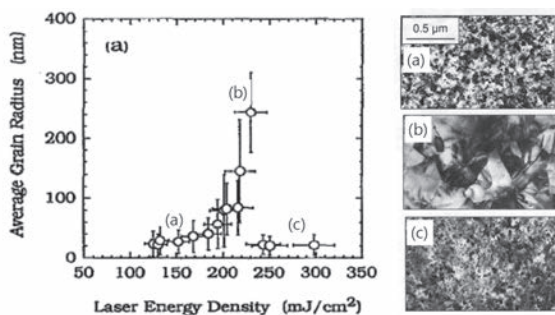


그림 4. 레이저 에너지와 p-Si 그레인 크기 변화 비교^[2]

이저 에너지에 따라 그레인의 크기가 증가하다가 최대 크기를 지나면서 다시 그레인이 감소하는 경향을 보인다.^[2] 레이저가 조사된 후 실리콘 그레인이 형성되는 것은 이른바 melting and growth 모델로 설명된다. 즉, 실리콘 박막에 레이저가 흡수되면 순간적으로 실리콘 박막의 온도가 상승하게 되고 표면 온도가 용융온도 ($T_m = \sim 1410^\circ\text{C}$) 이상이 되면 melting 되기 시작한다. 레이저가 조사되는 동안 열에너지가 계속 공급되기 때문에 melting Si와 solid Si의 계면은 점차 박막 아래 쪽으로 확대된다. 펄스 레이저가 더 이상 공급되지 않으면, melting된 실리콘의 아래 방향으로 열에너지가 확산 방출되면서 점차 온도가 내려가게 되고 그 과정에서 결정핵 (nucleation seed)이 생성되면서 결정핵을 중심으로 solidification 과정이 진행된다. 결정핵은 레이저 에너지에 따라 영향을 받게 되는데 레이저 에너지가 작으면 일부분만 melting (partial melting)이 되고, 레이저 에너지가 너무 크면 완전 melting (complete melting)이 된다. 이 경우 결정핵은 melt-solid 계면에서 혹은 melting

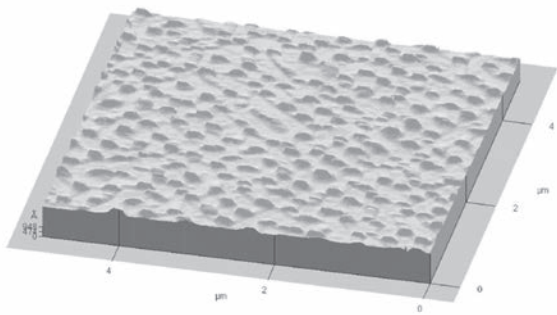


그림 5. p-Si 그레이인의 AFM 표면 이미지^[7]

Si 내부에서 무수히 많이 발생하게 되므로 매우 작은 Si grain이 형성된다. 반면 Si 박막이 거의 대부분 melting된 (near complete melting) 영역에서는 melt-solid 계면의 일부 영역에서만 결정핵이 형성되기 때문에 상대적으로 큰 크기의 Si grain이 형성된다 (그림 8 참조). 이 과정은 열역학적 결정성장이론과 실리콘의 열역학적 상태도(phase diagram)를 이용하여 설명된다.^[12] 한편 실리콘은 결정 구조상 고체 상의 부피가 melting 실리콘 보다 크기 때문에 레이저에 의해 고체상으로 변환된 경우 오히려 부피가 팽창(약 5 % 정도)하게 되어 p-Si그레이인이 만나는 영역에서 그 경계부가 돌출되어 ripple이 생성된다 (그림 5 참조).^[7] Ripple은 대략 50 ~ 70 nm 정도인데, carrier의 이동에 영향을 주기 때문에 가능한 한 ripple의 크기나 생성을 억제하는 것이 소자의 특성 향상에 유리하다.

2.3. ELA 조사 후 Si 박막의 표면

그림 6은 XeCl 레이저를 이용하여 결정화 된 p-Si 박막의 표면 사진을 서로 다른 스케일에 대해서 보여준다.^[4] 그림 6 (a)는 비스듬한 각도에서 촬영된 기판의 사진이고, (b)는 현미경 사진, 그리고 (c)는 표면 SEM 사진을 보여준다. 그림 6 (c)를 보면 submicron 크기의 수평 방향으로 균일하게 배열된 Si grain이 관측되고, (b)에서는 수 micron 크기의 세로방향으로 불규칙적인 배열을 볼 수 있다. 이러한 표면 구조는 특정 방향에서 회절 특성을 보이게 되는데, 그림 6 (a)와 같이 비스듬한 각으로 백색광이 입사 되었을 때 특정 파장 (여기서는 green, blue 파장)의 회절광이 관측됨을 알 수 있다. 이는 그림 6 (c)의

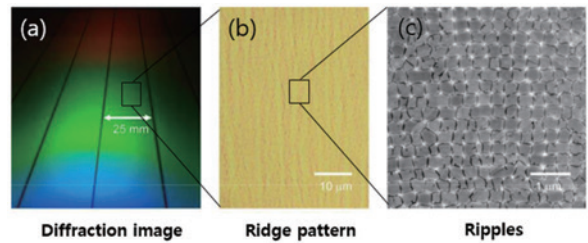


그림 6. ELA 레이저 결정화 기판의 표면 미세 구조 이미지 비교^[4] (a) 비스듬한 각도에서의 기판 사진 (b) 현미경 사진 (c) SEM 사진

규칙적인 ripples배열에 의한 회절 현상으로 레이저의 에너지가 적절하게 선택되면 실리콘 표면에 Si grain의 배열이 규칙적으로 배열되므로 선명한 회절 특성을 얻을 수 있다. 이 특성을 이용하면 육안 검사 만으로 기판에 Si grain이 잘 형성되었는지 여부를 확인할 수 있다.^[4]

3. Si grain 생성 메커니즘

3.1. LIPSS 이론

앞서 레이저 에너지에 따라 Si 그레이인의 크기가 달라질 수 있음을 이야기했으나, Si 표면에 규칙적인 ripples이 생성되는 것은 설명할 수는 없었다. 규칙적인 Si 그레이인을 설명하기 위해서는 레이저를 고

Coherent, Polarization

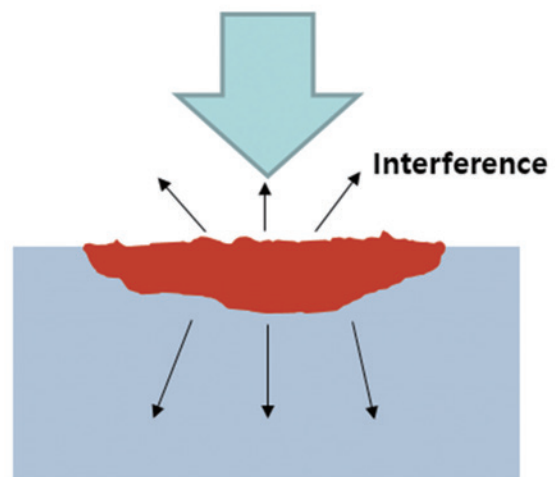


그림 7. 레이저에 의한 물질 표면에서의 상호작용을 나타내는 개념도

밀도 에너지를 갖는 열원 (heat source)일 뿐만 아니라 가간섭성 (coherence)과 편광 (polarization) 특성을 함께 고려 해야 한다. 이경우 레이저가 물질의 표면에 입사되면 표면에서 반사된 빔과 간섭 (interference)이 일어난다 (그림 7 참조). 이러한 표면 간섭은 레이저가 반복적으로 조사 될 수록 간섭 효과가 증폭되면서 주기적인 표면 구조를 유도하게 되는데 이를 LIPSS (Laser Induced Periodic Surface Structure)라 한다.^[13-17] LIPSS 모델은 Guosheing 등에 의해 제안되었으며 이후 많은 연구를 거쳐서 최근에는 금속, 반도체, 절연체, 유기물질 등 다양한 소재의 표면 가공에 적용되고 있다.^[16, 17]

3.2. LIPSS에 의한 Grain 생성 메커니즘

LIPSS 모델에 대한 growth model은 그림 8에 나타내었다. 레이저가 입사되면 물질 표면의 반사빔과 간섭에 의한 표면파 (surface wave)가 형성되어 레이저 에너지의 공간적 분포를 만들게 된다. 결과적으로 기판 방향으로 에너지 분포가 그대로 전파된다. 레이저 에너지의 공간적 분포는 전자기파의 Poynting 에너지에 의해서 결정되므로 결국 레이저의 간섭에 의한 에너지 공간 분포 형태로 Si 그레인 배열이 형성된다.^[14, 15] 예로써, 표면에 Λ 의 주기를 가지는 1차원 ripple

구조가 있다고 할 때, 표면파는 회절이론과 전자기장의 Poynting 벡터를 이용하면 아래와 같은 사인 함수 (sinusoidal function) 형태로 나타내어진다.

$$I \simeq I_o(1 + a_\Lambda \sin(k_\Lambda x + \delta))$$

여기서 I , a_Λ , k_Λ , δ 는 각각 레이저의 Poynting 에너지 밀도, 회절 된 레이저 빔의 상대 비율, 파동벡터 (wave vector), 위상차를 의미한다.^[8, 9, 14, 15]

이 관계식은 레이저의 편광, 입사각, 그리고 레이저의 조사 횟수에 의해 영향을 받는다.^[8, 9] 이러한 레이저 에너지 분포는 Si 표면에 불균일한 에너지 흡수를 초래하고 결과적으로 표면파의 에너지 밀도 분포대로 표면에서 melting and growth가 일어난다. 이러한 결과는 물질의 종류나 레이저의 파장과 무관한 일반적인 속성이며 다음 몇가지 사례를 통해서 LIPSS에 대해서 알아 보기로 한다.

3.3 레이저 편광 효과

그림 9는 532 nm 파장의 Nd:YAG 레이저에 의해 결정화 된 60 nm 두께의 a-Si 박막 표면 이미지를 보여 준다. 레이저는 그림의 화살표 방향으로 편광 되어 있으며 레이저의 입사각이 0° , 10° , 20° 로

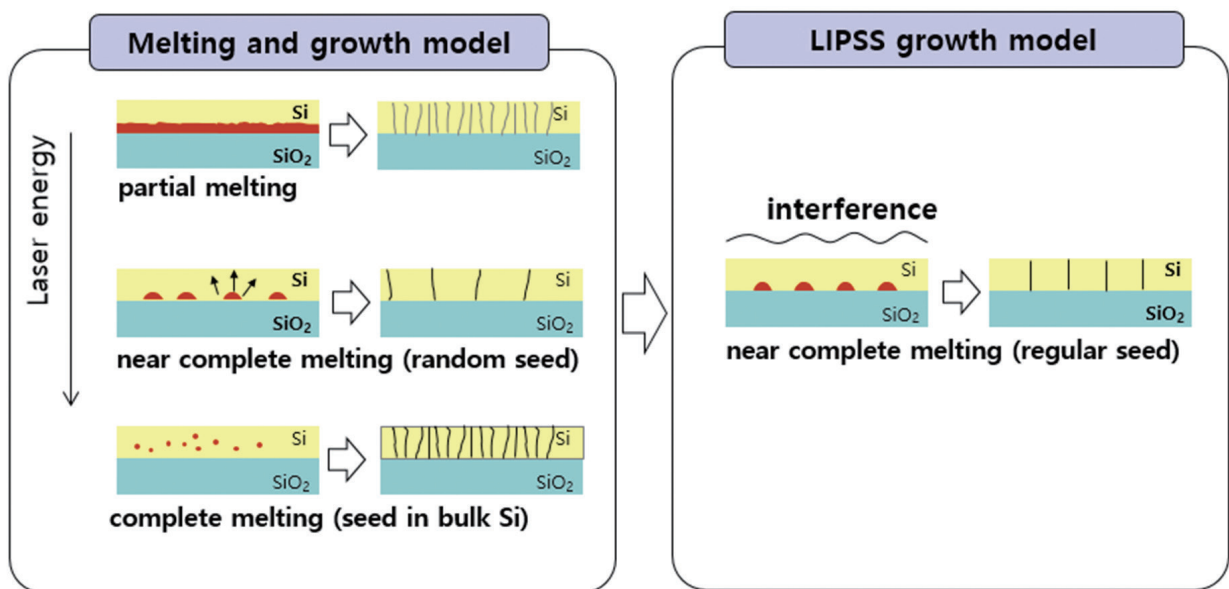


그림 8. Melting and growth 모델과 LIPSS 모델의 비교

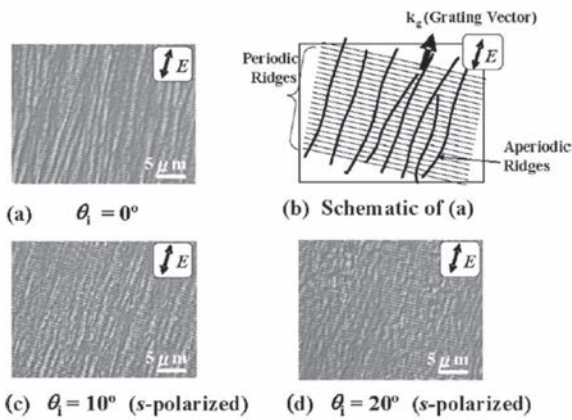


그림 9. 532 nm 레이저에 의한 결정화된 Si 박막 표면 이미지. 편광 방향에 수평 수직방향으로 미세 패턴이 관측됨^[8]

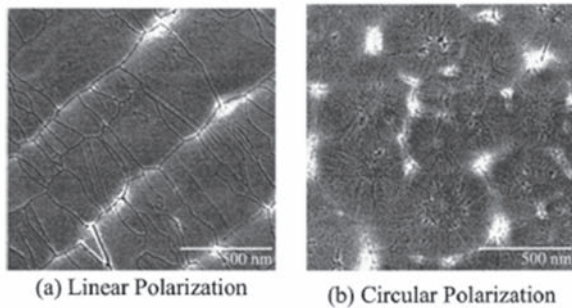


그림 10. 532 nm 레이저에 의한 결정화된 Si 박막 표면 이미지 (a) 선편광 (b) 원편광에 의한 Si 표면 이미지^[9]

입사된 경우의 표면 사진이다. 그림 9 (a)에서 편광 방향에 수직인 방향으로 submicron 크기의 균일한 ripple 구조가 보이고 편광 방향에 평행한 방향으로 수 micron 크기의 불규칙한 배열이 보인다. 이는 그림 6의 ELA 후 Si 표면 결과와 매우 유사하다. 또한 ripple 주기는 입사각에 따라 변함을 볼 수 있다.^[8]

Si grain배열은 레이저의 편광 상태에 따라 변하는데 그림 10을 보면 선편광 (linear pol.)일 때 grain이 선형으로 정렬되는 반면, 원편광 (circular pol.)일 경우에는 Si 그레인 방향성 없이 일정한 크기의 그레인이 형성되는 것을 볼 수 있다. 물론 Si 그레인은 레이저의 파워와 scanning 조건 등 여러 인자에 의한 영향을 받지만, 편광만으로 Si 그레인의 배열 상태를 바꿀 수 있음은 향후 LTPS 공정에서 그레인 제어 방법으로 중요한 단서를 제공한다.^[9]

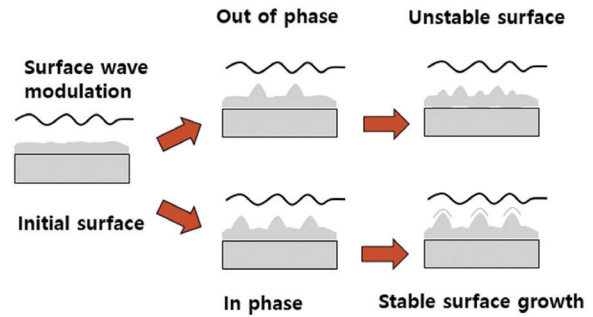


그림 11. 레이저 반복 조사에 의한 LIPSS 구조가 생성되는 개념도^[8]

3.4. 레이저 반복 (multi-shot) 조사 효과

지금까지 Si grain 형성에 입사되는 레이저의 파워, 입사각, 편광의 영향을 고려하였다. 그러나 대부분의 LIPSS 연구에서 정렬된 Si grain은 레이저 반복 조사 (multi-shot irradiation)에서 얻어진다.^[9, 10, 16, 17] 최근 Horita 등은 레이저의 multi-shot효과를 이른바 positive feedback 효과로 설명하였다.^[8] 그림 11에서 레이저가 입사되는 표면에 간섭에 의한 레이저 에너지 분포가 형성된다. 초기 상태 혹은 multi-shot수가 작은 경우는 물질의 표면에 규칙적인 LIPSS 구조가 형성되지 못하여 표면 산란에 의해 레이저 분포는 일정한 주기성을 보이지 않는다. 그러나 임의의 random 표면 구조는 레이저 파장 (λ)을 기저 (basis)로 하는 푸리에 급수 (Fourier series) 전개가 가능하고 이는 레이저 파장과 같은 위상을 가지는 우함수 (even function)와 반대 위상을 가지는 기함수 (odd function)로 분해된다. 기함수는 레이저의 에너지 분포와 표면 구조 분포가 위상이 반대가 되어 (다시 말하면 레이저 에너지가 집중된 곳과 표면의 돌출된 부분이 서로 어긋난 경우) 레이저에 의해 melt and growth 후에 표면 위상이 반대로 변하게 된다. 즉, 기함수의 분포를 가지는 표면 구조는 레이저가 조사될 때마다 표면 위상이 반대로 된다. 반대로 우함수는 레이저의 에너지 분포와 표면 구조 분포가 같은 위상이므로 레이저 높은 에너지 영역과 표면의 돌출된 부분이 항상 같게 되므로 melt and growth 후 동일 위치에서 growth가 되는 이른바 positive feedback 효과가 얻어진다. 이러한 이유로 레이저의 표면 위상과 동일한 물질 분포만 지속적으로 growth가 되어 레

이저가 반복적으로 조사될 수록 점차 in-phase 조건을 만족하는 표면 구조만 지속적으로 성장하게 된다.

4. 차세대 LTPS 기술

LTPS 기술은 이미 십여 년 전에 개발된 이후 더 이상의 연구가 진행되지 못하였다. 그 이유는 레이저가 워낙 고가의 장비라서 연구소나 대학에서 운용하기에 어려운 점도 있었으나, 대기업이 주도적으로 기술 개발을 리드하였기 때문이기도 하였다.^[5] 그러나 현재 표준 LTPS 공정이라 할 수 있는 XeCl를 이용한 레이저 결정화 공정 외 대안 기술이 부재함으로 인하여 새로운 LTPS 공정 기술의 필요성이 제기되고 있다. 특히 스마트폰, HMD 등 IT 기기에서 요구되는 초고해상도 디스플레이에 적용하기 위해서는 Si grain의 정렬성을 더욱 향상시키거나 혹은 Si grain의 크기를 자유롭게 조절할 수 있는 공정 기술이 요구된다. 이에 본 장에서는 차세대 LTPS 공정 기술로 주목받는 기술의 흐름을 제시하고자 한다.

4.1. 레이저 소스

XeCl 레이저는 LTPS 개발 초기에 고체레이저 대비 높은 출력으로 LTPS 공정용 레이저로 이용되었으

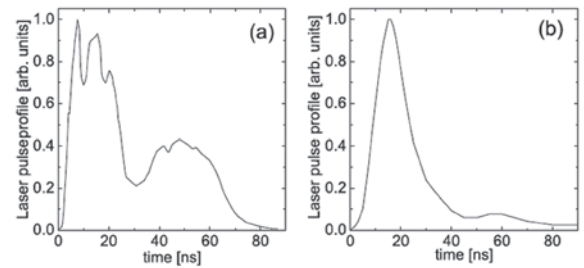


그림 12. (a) 엑시머 (XeCl, 308 nm) 레이저와 (b) 고체레이저 (Yb:YAG, 343 nm)의 펄스 형태 비교도

나, 안정성이 고체 레이저 대비 취약한 점이 있고 소수의 레이저 업체에 의해 공급이 되면서 제품의 다양성이 제한되는 문제가 제기되었다. 반대로 고체 레이저는 안정적이고 출력도 많이 증가하였으며, 다양한 제품이 개발되어 선택의 폭이 다양해지고 있다. 그러나 많은 연구에도 불구하고 고체 레이저의 결정화 수준은 아직 XeCl 레이저 수준에 이르지 못하고 있다. 본 연구팀은 고체 레이저의 펄스 형태의 차이점에 주목하였다. 그림 12에서와 같이 XeCl 레이저는 double pulse 형태로 1차 펄스의 폭이 대략 25 ns 이고 2차 펄스가 약 30 ns의 펄스 형태임을 알 수 있다. 반면 고체 레이저는 가우시안 형태의 1차 펄스로 폭이 약 15 ~ 20 ns이다. 펄스 지속시간이 고체레이저가 짧기 때문에 레이저 결정화 공정에서 melt Si 이 결정화되기에 충분한 시간을 유지하기가 어렵게 된

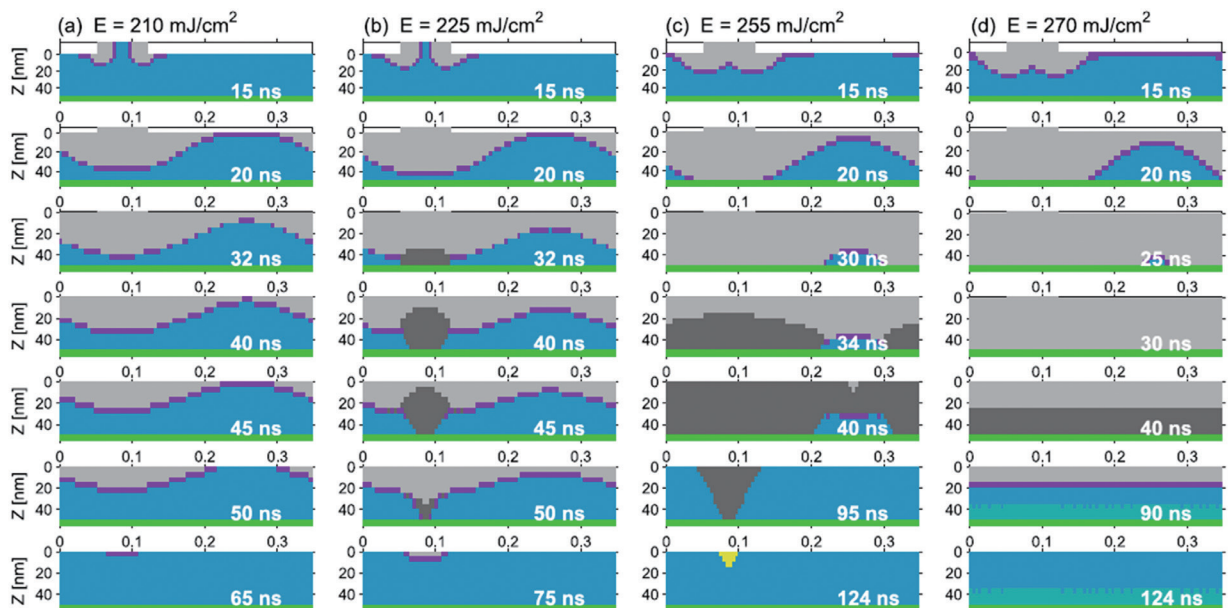


그림 13. 고체 레이저 (Yb:YAG 343 nm) 에너지에 대한 Si의 melting and growth 시뮬레이션 결과^[18]

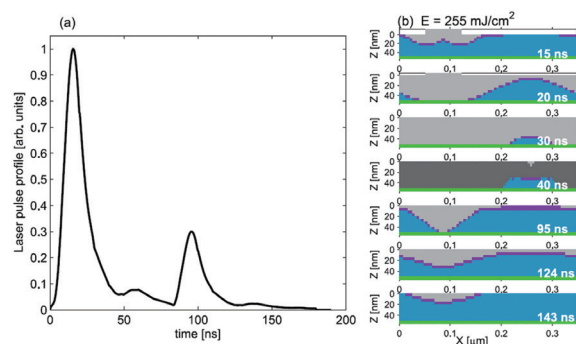


그림 14. 이중 레이저 펄스에 의한 Si의 melting and growth 시뮬레이션 결과^[18]

다. 최근 본 연구팀은 고체레이저의 펄스 지속 시간에 대한 결정화 시뮬레이션을 통해서 melting Si 후 solidification 과정에서 급속냉각 (rapid cooling) 과정을 통해서 poly-Si 이 아닌 a-Si 이 다시 생성될 수 있음을 제안한 바 있다.^[18] 그림 13 (c)의 124 ns에서의 노란색 영역이 a-Si 이 재 생성된 부분에 해당된다. 그러나 고체 레이저에 2차 펄스를 80 ns의 시차를 두고 조사할 경우 melting 지속시간이 늘어나게 되고 결과적으로 p-Si 이 형성됨을 보일 수 있었다 (그림 14 (b)에서 노란 a-Si 영역이 제거됨).

4.2. Spot beam 레이저 결정화

현재 LTPS 공정에 이용되는 레이저빔은 길이 방향 (장축)은 라인빔이고 단축 방향은 flat-top 형태를 가진다. (그림 15 (a)) 라인빔은 기판에 수직으로 배치되어 한 방향으로 스캔하면서 레이저 빔이 균일하게 조사된다. Flat-top 형태의 라인빔이기 때문에 기판에는 거의 일정한 레이저 빔이 조사된다고 볼 수 있다. 그러나 라인빔을 만들기 위해서는 장축 방향으로 빔 변환을 위한 광학계가 필요하고 이는 기판의 크기에 따라 비례하여 커져야 하며 이는 장비 제작 비용의 증가를 의미한다. 따라서 대면적 공정을 위해서는 라인빔 보다는 spot 빔을 이용한 결정화 공정 기술이 공정 비용을 절감할 수 있는 방식이 된다. 단, spot beam의 경우 라인빔과 달리 2차원 갈지자 모양으로 스캐닝을 해야 하므로 라인빔에서의 결정화 조건과는 다른 공법이 필요할 것이다. 특히 spot beam을 기판으로 projection 하기 위한 Galvano-type 스캐너

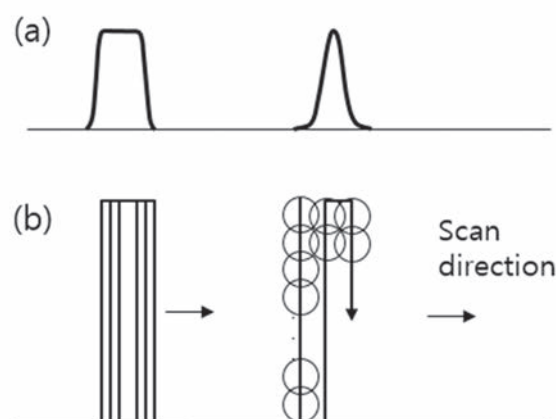


그림 15. (a) Flat-top 과 Gaussian 형태의 레이저 (b) 라인빔과 spot 빔의 scanning 방식 비교도

기술과 레이저빔을 균일한 각도로 보내기 위한 광학 기술 개발이 필요하다.

4.3. Grain size 제어 기술

LTPS 공정기술의 궁극적 목표는 대면적 기판 위에 균일한 크기의 p-Si 그레인을 형성하는 것이다. 크기의 균일성 뿐만 아니라 디스플레이의 해상도에 따라 그레인의 크기도 자유롭게 조절이 가능해야 할 것이다. Si 그레인의 크기의 균일성이 더욱 향상되어 TFT 소자 간 특성 산포를 줄일 수 있다면 소자의 신뢰성이 향상될 뿐만 아니라, 소자의 특성 편차를 줄이기 위한 보상 회로를 적용하지 않을 수 있기 때문에 회로 구성이 간단해지고 소비전력 절감 효과가 기대 된다. 뿐만 아니라 LTPS 공정 기술이 더욱 발전하여 TFT 면적 (약 200 ~ 400 μm^2)에 해당하는 단결정 Si를 균일하게 성장할 수 있게 되면 디스플레이 backplane 기술의 커다란 진전을 가져올 것으로 기대 된다.

5. 결론

지금까지 본 기고에서 LTPS 공정 기술의 과거와 현재를 살펴보고, 앞으로의 기술 개발 방향을 전망하였다. 현재의 LTPS 기술은 오래 전에 완성된 기술이나 LCD 보다는 AMOLED 디바이스에 본격적으로 채택되면서 현재의 LTPS를 뛰어넘는 새로운 기술을 필

요로 하고 있다. 기존의 엑시머 레이저의 대안으로 고체레이저를 이용한 신공정이 연구되고 있으며 레이저에 의한 표면 구조 연구를 통해서 LIPSS 이론이 주목을 받고 있다. 앞에서 레이저 결정화에 영향을 주는 인자로서 레이저 파워, 편광, multi-shot, 입사각의 중요성을 언급하였고 이러한 인자들에 의하여 LIPSS 이론에 의해 Si 그레이인의 크기를 결정될 수 있음을 논하였다. 이는 단순히 실리콘 결정화 분야에 한정되지 않고 금속, 유기물질 등 새로운 소재 연구에 확장되는 것을 의미한다. LIPSS 이론을 바탕으로 기존의 연구를 뛰어넘는 신LTPS (Advanced-LTPS) 공정기술을 통해서 디스플레이의 새로운 기술 혁신이 이루어지기를 기대해 본다.

참고문헌

- [1] H. J. Kim and James S. Im, Appl. Phys. Lett. **68**, 1513 (1996).
- [2] J. S. Im, H. J. Kim and M. O. Thompson, Appl. Phys. Lett. **63**, 1969 (1993).
- [3] T. Noguchi, Phys. Stat. Sol. (c) **5**, 3259 (2008).
- [4] P. C. van der Wilt, Dig. SID 149 (2014).
- [5] C.W. Kim, J.G. Jung, J.B. Choi, D.H. Kim, C. Yi, H.D. Kim, Y.H. Choi and J. Im, Dig. SID **862** (2011).
- [6] T. Goto, K. Saito, F. Imaizumi, M. Hatanake, M. Takimoto, M. Mizumura, J. Gotoh, H. Ikenoue and S. Sugawa, IEEE Trans. Elect. Devices **65**, 3250 (2018).
- [7] M. He, R. Ishihara, W. Metselaar, and K. Beenakker, J. Appl. Phys. **100**, 083103 (2006).
- [8] S. Horita, H. Kaki and K. Nishioka, J. Appl. Phys. **102**, 013501 (2007).
- [9] S. Horita, Y. Nakata and A. Shimoyama, Appl. Phys. Lett. **78**, 2250 (2001).
- [10] L. Hong, X. Wang, Rusli, H. Wang, H. Zheng and H. Yu, J. Appl. Phys. **111**, 043106 (2012).
- [11] 김현재 외, KIDS TFT 집중강좌 (2016).
- [12] R. F. Wood and G. A. Geist, Phys. Rev. B **34**, 2606 (1986).
- [13] S. L. Chuang and J. A. Kong, Proc. of the IEEE **69**, 1132 (1981).
- [14] Z. Guosheng, P. M. Fauchet and A. E. Siegman, Phys. Rev. B **26**, 5366 (1982).
- [15] J. E. Sipe, J. F. Young, J. S. Preston and H. M. van Driel, Phys. Rev. B **27**, 1141 (1983).

- [16] J. Bonse, S. Höhm, S. V. Kirner, A. Rosenfeld and J. Krüger, IEEE J. of Sel. Top. Quantum Electronics **23**, 9000615 (2017).
- [17] M. Huang, F. Zhao, Y. Cheng, N. Xu and Z. Xu, Optics Express **18**, A600 (2010).
- [18] O. N. Prudnikov, S. T. Shin and B. H. Cheong, AIP Advances **7**, 125102 (2017).

저자약력

정 병 호



- 1995년 2월 : KAIST 물리학 박사
- 1994년 12월 ~ 2008년 6월 : 삼성종합기술원 디스플레이랩 전문 연구원
- 2008년 6월 ~ 2015년 11월 : 삼성디스플레이 디스플레이연구소 수석연구원
- 2016년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 디스플레이반도체물리학과 교수
- 관심분야 : 레이저와 물질의 상호작용 연구, 나노포토닉스 소자 제작 및 시뮬레이션 연구

강 민 진



- 2018년 2월 : 고려대학교 디스플레이반도체물리학과 학사
- 2018년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 응용물리학과 석박통합과정
- 관심분야: Spot beam 이용한 레이저 결정화 연구, LIPSS 시뮬레이션

박 태 상



- 2019년 2월 : 고려대학교 디스플레이반도체물리학과 학사
- 2019년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 응용물리학과 석사과정
- 관심분야: 연신소재의 레이저 탈착 연구, 레이저 편광에 의한 결정화 연구