

AMOLED 디스플레이의 박막트랜지스터 제작을 위한 결정화 기술 동향 및 대형화 연구

김경보¹, 이종필², 김무진^{2*}, 민영실³

¹인하공업전문대학 금속재료과 교수, ²중원대학교 전기전자공학전공 교수, ³중원대학교 제약공학과 교수

Trend of Crystallization Technology and Large Scale Research for Fabricating Thin Film Transistors of AMOLED Displays

Kyoung-Bo Kim¹, Jongpil Lee², Moojin Kim^{2*}, Youngsil Min³

¹Professor, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Inha Technical College

²Professor, Department of Electrical and Electronic Engineering, Jungwon University

³Professor, Department of Pharmaceutical Science, Jungwon University

요 약 본 논문에서는 AMOLED 디스플레이 구동회로로 사용되는 박막트랜지스터의 구성요소 중에서 반도체 물질 제조의 최근 동향에 대해 논한다. 트랜지스터에 적용을 위해 특성이 좋은 반도체 막을 얻는 방법으로 비정질 실리콘을 다결정 실리콘으로 변화시켜야 하는데 레이저와 열처리 방법이 있으며, 레이저를 이용한 기술에는 SLS(Sequential Lateral Solidification), ELA(Excimer Laser Annealing), TDX(Thin-beam Directional Crystallization), 열처리 기술에는 SPC(Solid Phase Crystallization), SGS(Super Grain Silicon), MIC(Metal Induced Crystallization), FALC(Field Aided Lateral Crystallization)가 대표적이며, 이들에 대해 상세히 설명한다. 본 연구실에서 연구중인 레이저 결정화 기술의 대형 AMOLED 디스플레이 제작을 위한 연구 내용도 다룬다.

주제어 : 비정질 실리콘, 결정화, 다결정 실리콘, 박막트랜지스터, AMOLED 디스플레이

Abstract This paper discusses recent trends in the fabrication of semiconducting materials among the components of thin film transistors used in AMOLED display. In order to obtain a good semiconductor film, it is necessary to change the amorphous silicon into polycrystalline silicon. There are two ways to use laser and heat. Laser-based methods include sequential lateral solidification (SLS), excimer laser annealing (ELA), and thin-beam directional crystallization (TDX). Solid phase crystallization (SPC), super grain silicon (SGS), metal induced crystallization (MIC) and field aided lateral crystallization (FALC) were crystallized using heat. We will also study research for manufacturing large AMOLED displays.

Key Words : Amorphous silicon, Crystallization, Polycrystalline silicon, Thin Film Transistor, AMOLED

*This work was supported by the National Research Foundation (NRF) of Korea (No. 2017R1A2B4001979 and 2017R1A2B4006487).

*Corresponding Author : Moojin Kim (moojinkim7@naver.com)

Received February 28, 2019

Revised April 19, 2019

Accepted May 20, 2019

Published May 28, 2019

1. 서론

디스플레이 기술은 Fig. 1과 같이 과거 흑백 브라운관(CRT)로부터 칼라 브라운관으로 기술이 진보하였으며, 이 과정에서 평면 제작 기술, plasma display panel(PDP)와 LCD(Liquid Crystal Display) Fig. 2가 개발되어 브라운관과 경쟁을 하게 된다. 시장의 요구에 따라 화면 크기가 증가하면서 브라운관은 40인치 이상 제작시 무게와 부피의 급격한 증가로 다른 기술과의 경쟁에서 도태하게 되고, 이후 PDP와 LCD는 100인치 이상을 제작할 정도로 기술이 진일보하였으나, PDP는 화소크기의 제약으로 30인치 이하의 제작이 어려운 반면 LCD는 모든 크기의 디스플레이 제작이 가능하기 때문에 결국 LCD가 전 세계 시장을 장악한다. 하지만, 이 시기에 새로운 기술이 태동하고 있었으며, active matrix organic light emitting diode(AMOLED) 디스플레이라고 명명되었다[1-3]. 이것은 Fig. 3에서 알 수 있듯이 글라스 상에 polariser, encapsulation, organic layer, thin film transistor(TFT)로 구성된다.



Fig. 1. Images of (a) black and white, and (b) color CRT televisions.

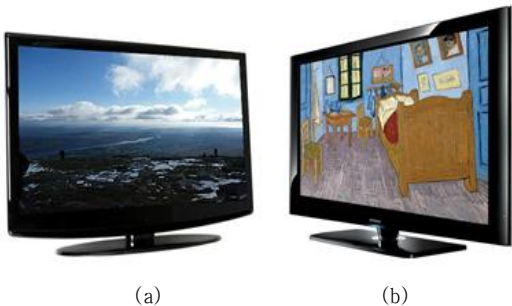


Fig. 2. (a) LCD and (b) PDP televisions.

AMOLED 기술은 일본에서 양산을 위해 집중적인 개발 및 연구가 이루어졌으나, 낮은 수율때문에 포기한 기술이다. 하지만, 우리나라에서는 LCD보다 뛰어난 기술임을 확

신하고, 과감한 투자와 연구를 진행하였으며, 결국 양산에 성공한다.

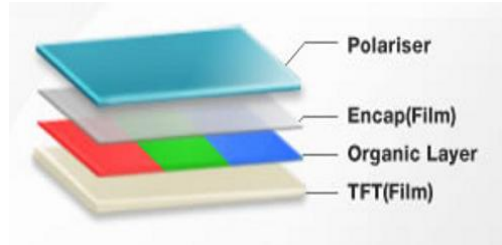


Fig. 3. Structure of AMOLED displays composed of polariser, encaps, organic layer, and TFT.

최근에는 이 기술만이 가능한 Fig. 4처럼 플렉서블 디스플레이가 적용된 스마트폰을 여러 제조사들이 양산할 계획이며, 시제품은 여러 전시회에서 선보였다. Fig. 4(a)는 세계 최초로 아웃폴딩 방식의 플렉서블 디스플레이를 스마트폰에 적용한 중국 로올의 플렉스파이이며, Fig. 4(b)는 올해 5월에 출시 예정인 인폴딩 방식의 갤럭시 폴드에 대한 이미지이다. 이와 같이 방식이 다른 이유는 접히는 부분이 플렉서블 디스플레이의 가장 중요한 부분이며, 아웃폴딩의 경우 곡률반경이 인폴딩보다 크기 때문에 기술의 완성도를 평가했을 때 인폴딩 방법이 보다 높다할 수 있다.



Fig. 4. (a) Loyol's FlexFai and (b) Samsung's Galaxy Fold.

본 논문에서는 AMOLED 디스플레이 구동회로소자인 박막트랜지스터(TFT) 제작의 핵심 기술, 즉 결정화에 대해 논하고자 한다. 결정화 공정을 하는 이유는 TFT 특성을 향상시켜 디스플레이의 빠른 동작 속도 및 고해상도를 구현하기 위함이며, Fig. 5에서와 같이 결정성이 없는 비정질 실리콘(a-Si: amorphous silicon)을 다양한 방법을 이용하여 결정립(Grain)과 결정립사이의 경계인(Grain Boundary)

이 존재하는 다결정 실리콘(poly-Si: polycrystalline silicon)으로 변화시킨다. 또한, 본 연구진에서 진행중인 레이저를 이용하여 디스플레이 대형화를 위한 중요한 연구 결과를 소개한다.

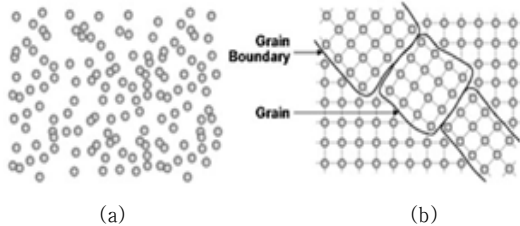


Fig. 5. Schematic diagrams of (a) amorphous and (b) polycrystalline silicon.

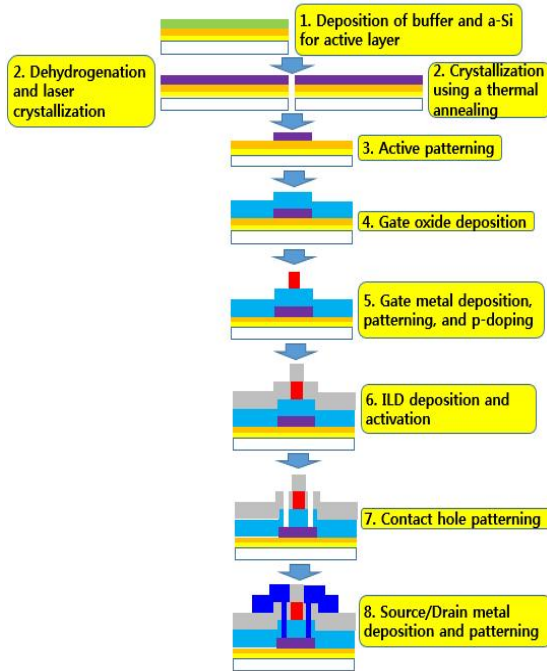


Fig. 6. Processes' diagram for fabrication of poly-Si TFTs.

2. 본론

2.1 결정화 방법 소개

다양한 트랜지스터 구조가 존재하지만, 본 논문에서는 게이트 금속 전극이 다결정 실리콘 상부에 있는 상부(top) 게이트 박막트랜지스터를 제작하는 방법에 대해 설명하고자 한다. 그 이유는 결정화를 위해서는 일반적으로 고온 공정을 진행하게 되는데, 게이트 전극이 실리콘 층 아래에 있

을 경우 열팽창 및 수축시 하부 글라스와의 열팽창계수 (CTE: Critical Temperature Expansion) 차이 때문에 글라스의 휨에 의한 변형이 발생할 수 있으며 심하면 글라스가 공정 중간에 파손될 수 있다.

Fig. 6에서와 같이 700°C 이상의 고온에서 건디는, 즉 CTE가 3ppm/°C로 매우 작은 글라스 상에 진공플라즈마를 기반으로 하는 챔버내에서 버퍼역할을 하는 실리콘 질화물(100nm)과 실리콘 산화물(200nm)의 2가지 서로 다른 물질을 형성한다. 실리콘 질화물의 경우 공급하는 가스는 SiH₄와 NH₃이며, 공정 온도는 400°C이다. 또한, 산화막의 경우 SiH₄와 N₂O가 사용되며, 공정 온도는 동일하다. 이와 같이 버퍼를 형성하는 이유는 글라스의 주 원소가 실리콘과 산소지만, 내부에 금속 이온들이 미약하게나마 존재하기 때문에 후속 공정시 이들 원소들이 반도체 물질로 표류(diffusion)하는 것을 막아 반도체 본연의 특성을 나타낼 수 있도록 하기 위함이다. 만약 이들 금속 이온들이 반도체 내부로 들어가게 되면 불순물로 작용하게 되어 트랜지스터의 특성에 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서 충분히 두껍게 증착한다. 이후 버퍼 층을 형성한 동일한 장비로 SiH₄ 분위기에서 50nm 두께의 비정질 실리콘 막을 구성한다. 이보다 얇은 막은 대면적에 균일하게 형성하기 어려우며, 두꺼워지면 형성된 막의 전체적인 defect 농도가 증가하기 때문에 최적의 두께라 볼 수 있다. 비정질 실리콘을 다결정 실리콘으로 변화시키기 위해 크게 2가지 방법으로 구분되어 연구하는데, (1) 비정질 실리콘에서 흡수가 높은 적외선 영역의 파장을 이용한 300nm 근처의 레이저를 사용하는 기술과 (2) 노(furnace) 장비를 이용하여 500°C 이상의 열을 가하는 것으로 나눌 수 있다.

먼저 레이저 결정화를 할 경우, 비정질 실리콘 층 내부에 약 10% 이상의 수소가 함유되어 있어 이를 제거하지 않고 레이저를 조사할 경우 수소가 열을 받아 폭발하면서 수소 기체로 변화되기 때문에 박막에 큰 구멍이 생긴다. 이를 막기 위해 열처리 장비를 이용하여 약 450°C 이상에서 탈수소 공정을 진행한다. 다음 레이저를 조사하여 결정화를 하는데, SLS(Sequential Lateral Solidification), ELA(Excimer Laser Annealing), TDX(Thin-beam Directional Crystallization)가 있다[4-6]. 그 표면 현미경 및 SEM(Scanning Electron Microscopy) 이미지는 Fig. 7과 같다.

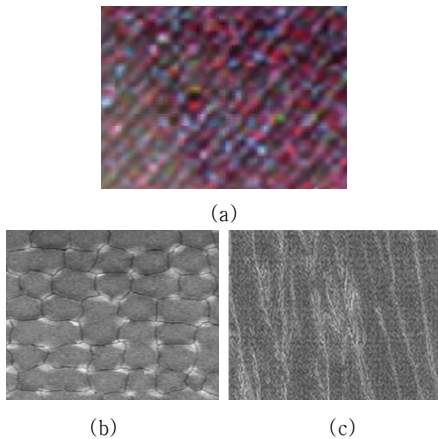


Fig. 7. Surface images of poly-Si layers after (a) SLS, (b) ELA, and (c) TDX processing.

레이저 결정화는 자외선 파장의 300~600Hz 주파수를 가진 펄스 레이저 빛이 비정질 실리콘 층에 흡수되어 짧은 순간에 액체가 되었다가 고체로 상이 변화되면서 부피 차이가 나타나고 그 결과 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)처럼 결정립과 결정립 사이에 경계가 나타난다. 이들 경계에는 트랜지스터 동작시 이동하는 전하의 움직임을 방해하고, 또는 전하를 trap하는 역할을 하기 때문에 적을수록 높은 특성의 박막 트랜지스터를 제조할 수 있다. 궁극적으로 단일 결정립을 형성하는 것이 다결정 실리콘 관련 연구자들의 궁극적인 목표다. 이를 위해서 Fig. 7(c)와 같은 결정립을 형성하는 방법이 개발되었는데, 이것은 높은 주파수, 즉 수 kHz 정도의 빔을 조사하여 경계를 최소화하는 방식이다. 이들 자외선 펄스 레이저들은 기체를 이용하여 레이저를 발진시키며, 따라서 발진 장치의 제한된 수명으로 인해 양산 적용시 유지 보수비가 상당하다. 대안으로 고체 화합물 반도체에서 레이저를 발진하는 장비를 이용하여 비정질 실리콘에 조사하는 방법이 연구되었다[7]. 하지만, 연속 발진특성으로 인해 장시간 사용시 파장이 이동하는 현상이 나타나고, 또한, 내부 열발생으로 인해 파위가 감소한다. 현재 양산에 사용되고 있는 기술은 LCD(Liquid Crystal Display)의 구동회로에는 SLS 결정화 기술이 사용되고 있으며, 양산중인 스마트폰용 AMOLED 뿐만 아니라, Fig. 4(b)의 갤럭시 폴드에는 ELA 방법이 적용되고 있다. 본 연구진은 공정 시간을 줄이기 위해서 주파수를 기존 150Hz에서 300Hz로 증가시키는 방법과 스캔 피치를 10 μ m에서 12 μ m, 15 μ m로 늘이는 내용으로 연구를 진행중에 있으며, 결정화 결과는 Fig. 7(b)와 동일하였다. 그 이유는 사용되는 레이저 파장이 308nm이

고, 또한, 레이저 조사후 나노 시간내에 액체에서 고체로 응고가 되기 때문에 평균적인 주파수와 피치는 결정립의 크기에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 확인하였다. 만약 결정립의 크기가 변화가 있다는 것은 후속 공정으로 제작된 트랜지스터의 특성이 변화한다는 것을 의미한다.

레이저 결정화의 가장 큰 강점은 제작된 박막트랜지스터의 특성이 전체적으로 우수하며, 특히 AMOLED 디스플레이의 검정색 화면을 유지하도록 하는 오프 전류(off-current) 값이 10⁻¹³A정도로 낮다[8].

열을 이용하는 방법으로는 SPC(Solid Phase Crystallization), SGS(Super Grain Silicon), MIC(Metal Induced Crystallization), FALC(Field Aided Lateral Crystallization)가 있으며 표면 형상은 Fig. 8과 같다 [9-12].

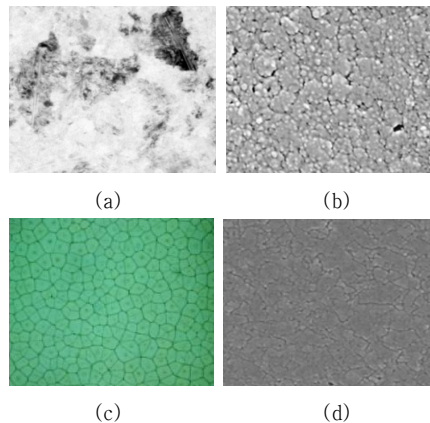


Fig. 8. Surface images of poly-Si layers after (a) SPC, (b) MIC, (c) SGS, and (d) FALC processing.

비정질 실리콘을 약 700°C 이상의 높은 온도에서 2시간 이상 가열하면 Fig. 8(a)의 결정립이 형성되는데 이 방법이 SPC로 다결정 내부 defect의 농도가 매우 높기 때문에, 제작된 박막트랜지스터 특성은 좋지 않다. 또한, 고온 공정으로 인해 글라스의 파손이 발생할 수 있다. 따라서 온도를 낮추는 방법들이 연구되었고, 결정화전 니켈(nickel), 은(silver), 구리(copper)와 같은 금속 촉매로 작용하는 금속 이온들을 비정질 실리콘 위에 형성한 후 열처리를 하면 Fig. 8(b)와 같으며 온도를 650°C 이하로 진행할 수 있고, 결정화 시간도 줄일 수 있다. 하지만, 촉매로 작용하는 금속 이온들이 불순물로 작용하게 되므로 가능한 적은 양을 코팅할 필요가 있다. 이 대안으로 제안된 것이 Fig. 9의 극저농도 nickel 금속 이온을 증착할 수 있는 스퍼터(sputter) 장

비를 이용하면 Fig. 8(c)처럼 수십 μm 크기를 가지는 결정립을 형성할 수 있다. 추가적으로 박막트랜지스터에서 전자(전자나 정공)는 소스(source)와 드레인(drain)에 형성된 채널을 통해 이동하게 되므로 결정립 형성 방향을 전하이동 방향과 평행하게 되도록 외부에서 전기장을 걸면 결정화가 이 방향으로 빠르게 일어나게 된다. Fig. 8(d)는 결정화 이미지이다. 다른 결정화와는 달리 방향성이 있음을 알 수 있다.

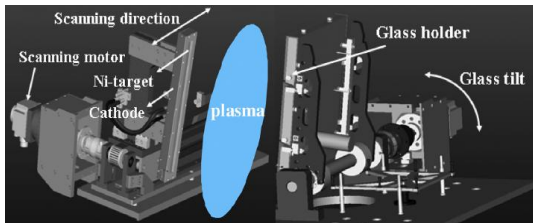


Fig. 9. A schematic diagram showing scanning system and substrate holder inside the process chamber of nickel-sputtering system. Ions are discharged from the plasma which dislodges particles from the metal sputter target. The particles condense on the surface of the glass. The weight of the deposited nickel atom depend on the scanning speed and scanning time of nickel-target on the cathode.

열을 이용한 기술은 결정화 후에도 거칠기 변화가 거의 없으나 SPC를 제외한 방법은 오프 전류 값이 10^{-12}A 이상으로 높기 때문에 디스플레이 화면의 검정(black) 이미지 구현이 어렵고, 특히 서론에서 언급한 플렉서블 디스플레이를 제작하기 위한 저온공정에는 적합하지 않아 레이저 결정화와의 경쟁에서 살아남기 어렵게 되었다[13].

2.2 레이저 결정화의 대형화 방안 (본 연구진의 핵심 연구 내용을 중심으로)

스마트폰 및 플렉서블 디스플레이 등 작은 인치의 AMOLED는 양산을 하고 있지만, 60인치 이상의 대형화를 위한 뚜렷한 해결책은 없는 상태다. 본 연구진은 두 가지 레이저 결정화 기술의 대형화를 위해 연구중이며, 먼저 SLS 기술의 대형화 방법에 대해 소개한다. 마스크를 이용하기 때문에 대형화가 가능하다는 장점으로 디지털로 동작하는 LCD 구동 회로에 적용중이다. 이 기술을 AMOLED 구동회로 소자의 반도체 물질로 사용하여 Fig. 10(b)와 같이 패널을 제작하였다. Fig. 10(a)에서의 결정립 경계(grain boundary)와 후속 공정에서 형성되는 박막 패턴들과의 상호 간섭으로 인해 디스플레이 점등시 사선 줄무늬가 나타

다. LCD와는 다르게 이와 같은 현상이 나타나는 이유는 LCD 디스플레이는 박막트랜지스터가 on/off 개념으로 구동되지만, AMOLED는 OLED 발광소자에 아날로그 방법으로 직접 전류를 공급하는 스캔회로를 구성하는 박막트랜지스터 때문이다. 이런 본질적인, 즉 광학적인 문제를 해결하기 위해 결정립 경계 간격을 $3\mu\text{m}$ 를 기준으로 10% 이내의 오차로 결정화하였고, 제작된 디스플레이에서 줄무늬가 사라지는 것을 확인하였다. SLS 결정화 기술의 난제를 극복하였지만, 10% 오차내로 장비가 동작하도록 하기 위해서 새로운 장비 개발 및 이 장비를 이용하여 제작된 패널의 문제점을 재확인하는 절차가 필요하며, 이는 많은 시간과 노력이 필요함을 의미한다. 현재 우리나라를 추격하고 있는 중국과의 기술 격차를 유지하거나 벌이기 위해서, 또한, 시대의 요구에 부응하기 위해서 대형 AMOLED TV 개발은 반드시 진행해야한다.

이를 위해 ELA 결정화 법은 빔의 길이 한계로 레이저를 2번 이상 스캔하여 대면적을 전부 결정화할 수 있으나 겹치는 영역(2번 결정화된 부분)과 그렇지 않은 영역(1번 결정화된 부분)과의 트랜지스터 특성 차이로 인해 Fig. 11(a)과 같이 다른 발광 특성을 나타낸다[14]. 해결하기 위한 대안으로 Fig. 11(b)처럼 SPC 결정화 후 ELA를 진행한 기술이 제시되었고 대형화 가능성을 확인하였다[15-20]. 이 방법은 레이저 결정화 전 열처리로 비정질 실리콘을 다결정으로 변화시킨 후 레이저 조사로 막의 결정 결함을 줄이는 방법을 통해 원하는 박막트랜지스터 특성을 얻도록 한다. 이 기술은 레이저 결정화 조건을 낮은 에너지로 진행하는 것이 핵심이다.

하지만, SPC 결정화는 700°C 이상의 고온에서 진행하므로 최근 이슈가 되고 있는 플렉서블 기술에는 적용이 불가하다. 따라서 다른 대안으로 회로 설계 변경(RPL: Redundant Pixel Line design)을 검토하였다. 즉, Fig. 12(a)와 같이 레이저 결정화로 겹치는 영역의 회로를 사용하지 않고, 외부 즉 겹치지 않는 영역의 구동회로로 겹치는 영역에 형성되는 OLED 발광소자를 구동하면 Fig. 12(b)처럼 밝기가 동일하게 되어 겹치는 부분에서 나타나는 밝기 불균일 문제는 해결이 되는 것을 확인하였다. 이는 ELA 결정화의 대형화 가능성을 제시한 것으로 향후 대형 플렉서블 디스플레이까지도 양산을 할 수 있음을 제시하는 중요한 연구 결과라 할 수 있다.

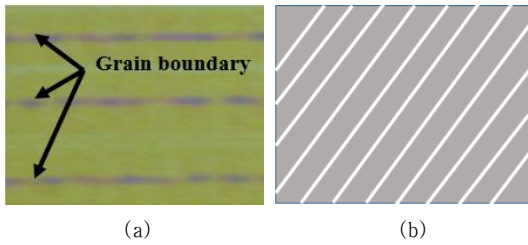


Fig. 10. (a) Microscope image of long-lateral grains and (b) Brightness non-uniformity induced by oblique lines on SLS poly-Si AMOLED panel.

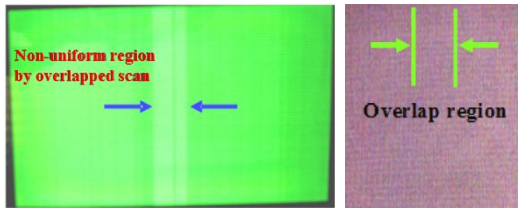


Fig. 11. (a) Full-color 5-inch AMOLED display shows a nonuniformity due to the different performance of TFT in the double scanned region. (b) Full-color 2.8-inch AMOLED display fabricated on the single and double scanned area for the excimer laser energy densities of 230 mJ/cm^2 on solid phase crystallized silicon films.

3. 결론

박막트랜지스터는 AMOLED 디스플레이 구동회로로 동작하며, 이 소자의 동작 특성에 가장 큰 영향을 미치는 다결정 실리콘 막 형성에 대해 설명하였다. 비정질 실리콘을 다결정 실리콘으로 변화시키는 기술은 크게 레이저 및 열을 이용한 2가지가 있다.

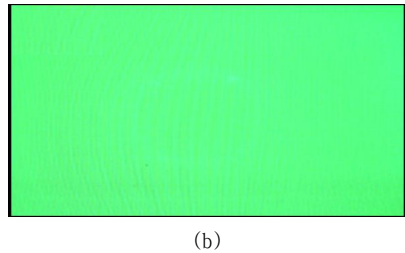
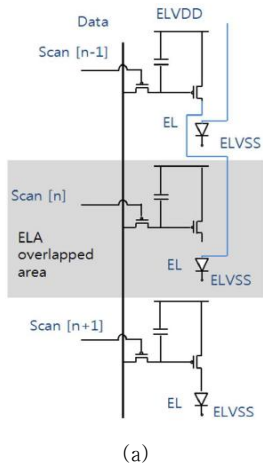


Fig. 12. (a) Basic concept of the RPL design and diagram of the pixel circuit (2 TFTs + 1 capacitor) connection of a simple one line RPL design. (b) The RPL designed panel (b) shows a uniform green image.

AMOLED가 LCD와의 경쟁에서 우위를 점할 수 있는 것은 자발광 특성뿐만 아니라, 폴리머 상에 공정을 수행하여 탈착 공정을 통해 플렉서블 디스플레이를 제작할 수 있다는 장점 때문이다. 폴리머상에서는 500°C 이하의 저온에서 공정을 진행해야 하기 때문에 열처리 공정으로 다결정 실리콘 제작은 불가능하다. 결론적으로 레이저 결정화를 수행할 수밖에 없는데, 이중에서도 ELA를 이용한 방법이 최종 선정되어 양산에 적용되고 있다. 레이저와 SPC 기술과의 접목으로 대형 AMOLED 양산 가능성을 확인하였지만, 향후 대형 플렉서블 패널 제작을 위해서는 열처리 기술은 불가능하다. 회로 변경 기술을 이용하여 레이저 결정화로 대형 디스플레이를 제작할 수 있는 방안을 제시하였다.

REFERENCES

[1] M. Diethelm, L. Penninck, S. Altazin, R. Hiestand, C. Kirsch & B. Ruhstaller. (2018). Quantitative analysis of pixel crosstalk in AMOLED displays. *Journal of Information Display*, 19(2), 61–69. DOI : 10.1080/15980316.2018.1428232

[2] A. Rjoub, B. Tarawneh & R. Alghsoon. (2019). Active matrix organic light emitting diode displays (AMOLED) new pixel design. *Microelectronic Engineering*, 212, 42–52. DOI : 10.1016/j.mee.2019.04.001

[3] V. C. Bender, N. D. Barth, F. B. Mendes, R. A. Pinto, J. M. Alonso & T. B. Marchesan. (2018). A Hardware Emulator for OLED Panels Applied to Lighting Systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(3), 1252–1258. DOI : 10.1109/JESTPE.2018.2842157

[4] T. K. Kang, T. C. Liao & Y. Y. Yang. (2012).

- TSelf-Heating and Kink Effects in SLS Single-Crystal-Like Nanowire Transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 59(10), 2787–2794. DOI : 10.1109/TED.2012.2210045
- [5] C. Y. Liao, S. H. Chen, W. H. Huang, C. H. Shen, J. M. Shieh & H. C. Cheng. (2018). High-Performance Recessed-Channel Germanium Thin-Film Transistors via Excimer Laser Crystallization. *IEEE Electron Device Letters*, 39(3), 367–370. DOI : 10.1109/LED.2018.2791506
- [6] M. S. Bowen & D. S. Knowles. (2006). Excimer-Laser-Based, Thin Beam Directional Xtallization (TDX) and Thin Beam Based LTPS Technology for Processing Large Area Poly-Silicon. *The Review of Laser Engineering*, 34(10), 689–692. DOI : 10.2184/lsej.34.689
- [7] Y. Kawamura, K. Yamasaki, T. Yamashita, Y. Sugawara & Y. Uraoka. (2010). Crystallization by Green-laser Annealing for Three-dimensional Device Application. *Journal of the Korean Physical Society*, 56(5), 1456–1460. DOI : 10.3938/jkps.56.1456
- [8] H. Jin & M. J. Kim. (2010). Characteristics of Excimer Laser-Annealed Thin-Film Transistors on the Polycrystalline Silicon Morphology Formed in the Single and Double (Overlap) Scanned Area. *Japanese Journal of Applied Physics*, 49(4R), 041301. DOI : 10.1143/JJAP.49.041301
- [9] R. Ishikawa, S. Kato, T. Yamazaki, Y. Kurokawa, S. Miyajima & M. Konagai. (2014). Solid-phase crystallization of amorphous silicon nanowire array and optical properties. *Japanese Journal of Applied Physics*, 53(2S), 02BE09. DOI : 10.7567/JJAP.53.02BE09
- [10] J. H. Choi, D. Y. Kim, S. J. Park, B. K. Choo & J. Jang. (2003). Temperature dependence of the growth of super-grain polycrystalline silicon by metal induced crystallization. *Thin Solid Films*, 427(1–2), 289–293. DOI : 10.1016/S0040-6090(02)01150-1
- [11] R. Chen, W. Zhou, M. Zhang, M. Wong & H. S. Kwok. (2015). High-Performance Polycrystalline Silicon Thin-Film Transistors Based on Metal-Induced Crystallization in an Oxidizing Atmosphere. *IEEE Electron Device Letters*, 36(5), 460–462. DOI : 10.1109/LED.2015.2409858
- [12] D. K. Choi, H. C. Kim & Y. B. Kim. (2005). Mechanism of field-aided lateral crystallization of amorphous silicon. *Applied Physics Letters*, 87(6), 063108. DOI : 10.1063/1.2009066
- [13] G. A. Bhat, H. S. Kwok & M Wong. (2000). Behavior of the drain leakage current in metal-induced laterally crystallized thin film transistors. *Solid-State Electronics*, 44(7), 1321–1324. DOI : 10.1016/S0038-1101(99)00328-7
- [14] G. H. Jin, S. M. Choi, M. J. Kim, S. C. Kim & J. H. Song. (2012). New Pixel Circuit Design Employing an Additional Pixel Line Insertion in AMOLED Displays Composed by Excimer Laser-Crystallized TFTs. *Journal of Display Technology*, 8(8), 479–482. DOI : 10.1109/JDT.2012.2191533
- [15] M. J. Kim, G. H. Jin, K. B. Kim & J. H. Song. (2015). Effects of the single and double (overlap) scanned excimer laser annealing on solid phase crystallized silicon films. *Displays*, 36, 9–12. DOI : 10.1016/j.displa.2014.11.001
- [16] K. Sharma, M. Ponomarev, M. A. Verheijen, O. Kunz, M. C. M. van de Sanden & M. Creatore. (2012). Solid-phase crystallization of ultra high growth rate amorphous silicon films. *Journal of Applied Physics*, 111, 103510. DOI : 10.1063/1.4717951
- [17] J. P. Bermundo, Y. Ishikawa, M. N. Fujii, T. Nonaka, R. Ishihara, H. Ikenoue & Y. Uraoka. (2015). Effect of excimer laser annealing on a-InGaZnO thin-film transistors passivated by solution-processed hybrid passivation layers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(3), 035102. DOI : 10.1088/0022-3727/49/3/035102
- [18] K. B. Kim, J. P. Lee, M. J. Kim & Y. S. Min. (2019). Characteristics of Excimer Laser-Annealed Polycrystalline Silicon on Polymer layers. *Journal of Convergence for Information Technology*, 9(3), 75–81. DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.3.075
- [19] H. K. Kim. (2016). A Study on fusion design development direction of the Flexible display base. *Journal of Digital Convergence*, 14(1), 399–405. DOI : 10.14400/JDC.2016.14.1.399
- [20] K. C. Kim. (2017). Development of Shading Tape for Manufacturing of Touch Panel Display with High Screen-to-Body Ratio. *Journal of Convergence for Information*, 7(4), 75–81. DOI : 10.22156/CS4SMB.2017.7.4.07

김 경 보(Kim, Kyoung-Bo) [정회원]



- 2000년 8월 : 포항공과대학교 신소재공학과 (공학박사)
- 2000년 8월 ~ 2001년 5월 포항공과대학교 신소재공학과(박사후연구원)
- 2001년 5월 ~ 2004년 8월 : 나이텍스(차장)
- 2004년 8월 ~ 2008년 12월 : 삼성디스플레이(책임연구원)

- 2009년 1월 ~ 2014년 11월 : 포스코(전문연구원)
- 2014년 11월 ~ 2016년 02월 : 한국생산기술연구원(전문위원)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 금속재료과 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Metal processing
- E-Mail : kbkim@inhac.ac.kr

민 영 실(Min, Youngsil) [정회원]



- 2004년 2월 : 중앙대학교 약학과(약학박사)
- 2004년 3월 ~ 2006년 2월 : 중앙대학교 분자조질신약개발연구소(전임연구원)
- 2007년 9월 ~ 2008년 2월 : 중앙대학교(연구전담교수)

- 2009년 3월 ~ 현재 : 중원대학교 제약공학과 교수
- 관심분야 : Health, LED light, Drug Science, Herbal Resources
- E-Mail : youngsil31@jwu.ac.kr

이 중 필(Lee, Jongpil) [정회원]



- 1999년 8월 : 광운대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1991년 2월 ~ 2015년 5월 : 한국전기학원(Director)

- 2015년 6월 ~ 현재 : 중원대학교 전기전자공학전공 교수
- 관심분야 : Solar Heat, Electric Car, Microgrid, Power System
- E-Mail : leejp@jwu.ac.kr

김 무 진(Kim, Moojin) [정회원]



- 2005년 2월 : 포항공과대학교 전기전자공학과(공학박사)
- 2005년 2월 ~ 2012년 8월 : 삼성디스플레이(책임연구원)
- 2012년 8월 ~ 2015년 3월 : 포스코(책임연구원)

- 2015년 4월 ~ 현재 : 중원대학교 전기전자공학전공 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Semiconductor, Laser
- E-Mail : moojinkim7@naver.com