

마이크로 LED 기술 소개 및 연구 동향

김무진
강남대학교 전자공학과 교수

Introduction and Research Trends on Micro LED Technology

Moojin Kim
Professor, Department of Electronic Engineering, Kangnam University

요약 현재 마이크로 LED (Light Emitting Diode)는 디스플레이와 함께 조명 분야에서 관심을 받고 있으며, 높은 휘도, 빠른 동작 속도, 에너지 효율, 오랜 시간 동작 등의 장점을 가지고 있다. 스마트폰, 텔레비전, 웨어러블 전자소자 등에서 새로운 혁신을 불러올 것으로 예측된다. 이러한 마이크로 디스플레이는 마이크로미터 크기의 LED 소자들로 이루어진 픽셀로 구현되며, 자체적으로 빛을 내는 자체발광형 디스플레이이다. 주요 제조 공정으로는 결정성장, 패터닝과 식각, 칩 분리와 전사, 본딩과 배선, 패널 조립과 봉지, 검사와 품질 관리 등으로 구분할 수 있다. 최근 몇 년 동안 이 기술은 빠른 속도로 발전했으며, 기업들이 이러한 분야에 투자를 확대하고 있다. 최신 시장 조사 결과에 의하면, 마이크로 LED 디스플레이 시장은 지속적으로 성장할 것으로 관측되고 있으며, 주요 발전 방향은 제조 공정 개선, 소재 혁신, 구동 기술 발전 등으로 요약할 수 있다. 이러한 연구를 통해 상용화가 가속화되어 높은 성능과 다양한 응용 가능성으로 디스플레이 산업의 혁신을 이끌 것이라 판단된다.

주제어 : 마이크로 LED 기술, 차세대 디스플레이, 디스플레이 시장, 디스플레이 응용, 디스플레이 제조공정

Abstract Currently, micro LEDs (Light Emitting Diode) are attracting attention in the lighting field along with next-generation displays and have advantages such as high luminance, operating speed, energy efficiency, and long-term driving. It is predicted to bring new innovations in smartphones, televisions, and wearable electronic devices. These micro displays are self-luminous displays that emit light by themselves by being implemented as pixels composed of micrometer-sized LED devices. The main manufacturing processes can be divided into crystal growth, patterning and etching, chip separation and transfer, bonding and wiring, panel assembly and encapsulation, inspection, and quality management. Recently, this technology has developed at a rapid pace, and companies are expanding their investments in these fields. According to recent market research results, the micro LED display market is expected to continue to grow, and the main development direction of development can be summarized as manufacturing process improvement, material innovation, and driving technology development. It is believed that commercialization will accelerate through these studies and lead to innovation in the display industry with high performance and various application possibilities.

Key Words : Micro LED technology, Next generation technology, Display market, Display application, Display manufacturing process

*Corresponding Author : Moojin Kim(moojinkim7@kangnam.ac.kr)

Received July 10, 2024

Accepted September 20, 2024

Revised August 5, 2024

Published September 30, 2024

1. 서론

마이크로 크기의 LED (Light Emitting Diode)로 제작된 마이크로 LED 디스플레이 기술은 현재 디스플레이와 발광 조명 영역에서 집중적으로 관심을 받고 있는데, 그 주된 이유는 뛰어난 휘도, 동작 속도, 에너지 효율 및 오랜 동작 등 LCD (Liquid Crystal Display) 디스플레이와 OLED (Organic LED) 디스플레이와 비교하면 보다 많은 장점을 가지기 때문에 텔레비전은 기본이며, 보다 확대해서 휴대용 스마트폰, 접고 펼 수 있는 웨어러블 전자소자 및 AR/VR 기기, 자동차용 디스플레이 등의 분야에 적용되어 우리의 삶에 혁신을 불러올 것으로 예상되며, 현재 점진적으로 실현되고 있다[1-5].

본 문헌에서 논의할 내용은 먼저, 이러한 마이크로 LED 디스플레이의 원리를 설명하고, 이후 현재 마이크로 LED 디스플레이의 기술 동향을 심도있게 분석한다. 이를 기반으로 미래 디스플레이 판도 및 조명 시장에의 영향을 다각적으로 평가하여 이러한 디스플레이를 연구하는 연구자들에게, 조금이나마 정보를 제공하기 위함이다. 또한, 마이크로 LED 기술이 해결해야 할 과제를 검토하고, 향후 연구 방향을 제시함으로써 기술 발전을 위한 기틀을 마련하고자 한다.

이 기술의 발전은 디스플레이 분야를 넘어서, 에너지 절감효과를 통한 환경적인 측면에서 그 중요성 및 의의를 가진다고 할 수 있다.

마이크로 LED 디스플레이란 용어에서 알 수 있듯이 독립적으로 제어되는 각각의 픽셀들이 마이크로미터 크기를 지닌 LED로 구성된 디스플레이를 뜻한다. Fig. 1에서와 같이 자체 발광형 디스플레이로 개별 픽셀이 필요한 밝기의 빛을 발광하여 색이 구현되며, LED 소자의 특징으로 뛰어난 명암비와 함께 고속 동작 속도를 실현할 수 있다[6-8]. 이와 같은 광전자 소자의 구조를 제작하기 위한 반도체 공정으로는 GaN (Gallium Nitride) 반도체 물질로 형성된 단결정 에피택시, 마이크로미터 크기의 메사를 제작하기 위한 광사진 공정과 에칭 공정이 수반되는 패터닝 형성기술, 제작된 각각의 마이크로 소자를 원하는 곳에 전사하는 전사 기술, 이와 같은 마이크로 소자를 보호(Encapsulation)하며, 외부에서 전압이나 전류를 공급할 수 있도록 하는 기술을 포함하는 패키징이 있다. 다른 디스플레이 기술이 지향하는 방향과 동일하게 마이크로 LED 디스플레이 기술도 초소형화와 초고밀도 배열로, 높은 고해상도를

구현할 수 있을까 하는 부분이다. 이론적으로는 마이크로 소자의 크기가 작을수록 높은 해상도 구현될 수 있기 때문에, 디스플레이의 선명도와 화질을 높일 수 있다.

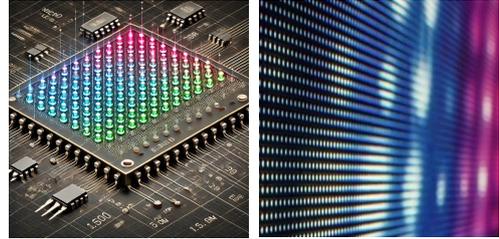


Fig. 1. Micro LED display Images

이러한 LED 디스플레이 기술은 2000년부터 집중적으로 연구가 진행되었으며, 지속적인 발전을 거듭하고 있다[7]. 처음에는 LED 소자의 소형화와 효율성에 관심이 있었으며, 이후 LED 소자의 디스플레이에 적용에 대한 need가 확대되면서 대면적에 배열하기 위한 기술 개발이 진행되었다. 2010년 정도부터는 반도체 기술의 발전에 의해 고정밀 패터닝 형성이 가능해지면서 높은 해상도를 가진 디스플레이 제작이 가능해져 상용화가 가능하게 되었다.

초고해상도와 저전력의 장점은, 다양한 응용 분야, 휴대용기기, 대형 텔레비전, 휘거나 접을 수 있는 전자기기, 자동차용 디스플레이 등의 분야에 활용될 수 있다.

디스플레이 관련 시장 조사 기관이 공개한 보고서 내용을 언급하면, 마이크로 LED 디스플레이 시장은 앞으로도 지속적인 성장할 거듭할 것으로 관측되며, 관련 주요 기업들이 이 기술을 다양한 분야에 상용화시키기 위하여 적극적으로 투자를 하고 있어 조만간 다양한 제품으로 출시될 것이다[8].

본 문헌에서는 마이크로 LED 디스플레이의 기본 동작 원리를 이해하고, 다음으로 이러한 디스플레이를 제작하기 위하여 필요한 공정 기술, 다양한 응용 분야와 더불어, 향후 시장 전망 등을 조사하여 독보적인 차세대 디스플레이 기술로의 입지를 다지기 위한 내용들을 소개할 것이다.

2. 본론

2.1 마이크로 LED 정의와 특성

마이크로 LED 디스플레이의 정의는 서론에서 언급

한 것처럼 개별적으로 구성되어 있는 픽셀들이 마이크로미터(μm) 크기로 되어 있는 LED로 구성된 디스플레이이다[9-11]. 이러한 각각의 마이크로 LED로 구성된 소자들은 독립적인 제어가 가능하도록 설계되며 공급된 전류의 세기에 의하여 빛을 방출하여, 고해상도와 함께 밝기를 조절할 수 있다. LCD와는 달리 스스로 빛을 내는 자체 발광형으로 다음과 같은 특성을 나타낸다.

먼저, 높은 휘도가 가능하며, 외부의 밝은 분위기에서 비교적 선명한 화질 구현이 가능하다.

다음으로 LED 소자는 고속 동작이 가능하므로, 응답 속도가 빠른 디스플레이를 구현할 수 있다.

또한, Red, Green, Blue를 구현하는 개별 소자들 때문에 원하는 색을 쉽게 재현할 수 있다. 이러한 특성은 자연의 색에 가까운 디스플레이 화면을 제공한다.

뿐만 아니라, 개별 구동방식이므로 접등이 필요 없는 픽셀 영역은 전류를 공급하지 않으면 완전히 꺼짐 상태를 유지할 수 있으며, 따라서 전력 소비를 줄일 수 있다.

추가적으로, 유기물질을 이용하여 소자를 제작하는 OLED 디스플레이와 비교하면, 무기물 기반으로 LED는 제작되기 때문에 수명이 길다. 이는 디스플레이를 오랜 시간 동안 사용하더라도 휘도나 동작속도, 색깔의 변화가 거의 없다는 것을 의미한다.

마이크로 LED 디스플레이 기술은 상기와 같은 장점들로 광범위한 응용 가능성 (Wide Range of Applications) 을 예상할 수 있다[7,8,10].

2.2 마이크로 LED 동작원리

마이크로 LED 소자들은 Fig. 2에서와 같이 각 픽셀에 반도체 공정으로 제작된 박막트랜지스터 (TFT: Thin Film Transistor)를 배치하도록 설계하여 각각의 LED들이 개별적으로 구동할 수 있도록 하는 방식이다.

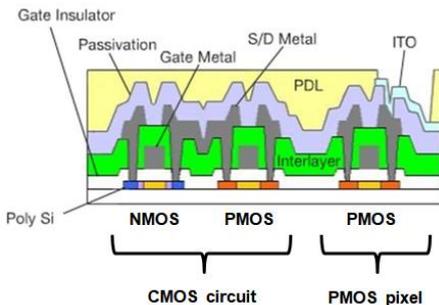


Fig. 2. Schematic diagram of a thin film transistor used as a micro LED driving circuit

이와 같은 active matrix 동작 방법은 구동 TFT에 의하여 각 LED에 전류를 공급할 수 있어 필요로 하는 밝기와 색상을 구현하게 된다[12].

2.3 마이크로 LED 제조 공정

마이크로 LED 제조 과정은 반도체의 공정과 유사하다[13,14].

먼저, 반도체물질을 형성하는 에피택시(발광 다이오드 웨이퍼) 방법을 이용할 결정 성장이 필요하다. 필요한 대표적인 방법으로는 금속 유기 화학 기상 증착 (MOCVD)나 분자 선 증착(MBE) 같은 단결정 성장 기술을 사용하는 것이다.

다음으로, 포토리소그래피 및 식각 공정을 이용하여 미세한 LED 칩을 만들어야하며, 이 단계에서는 비교적 정밀한 패터닝 공정법이 요구된다.

이후, Fig. 3처럼 웨이퍼상에 구현된 개별 LED 소자들을 기판에서 떼어내어, 이를 필요한 위치에 전사하는 과정이 있으며, 고도의 정밀성이 요구된다.

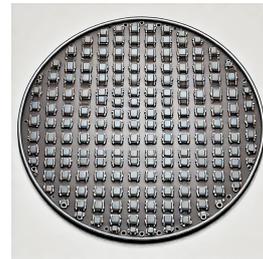


Fig. 3. LED chips manufactured on wafers

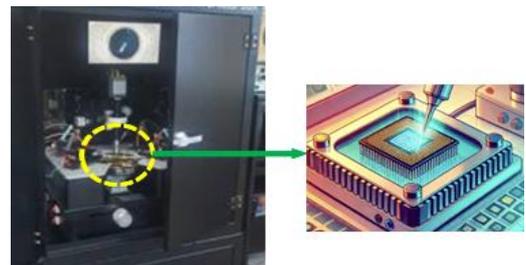


Fig. 4. Image measuring the electrical characteristics of LED elements produced with probe station equipment

이어서, 원하는 위치에 전사된 LED를 외부에서 전압이나 전류를 공급하여 구동할 수 있도록 전기적으로 연결하는 과정이다.

다음으로, 외부의 습기나 산소와의 반응을 차단하고, 층

격에 LED 소자들을 보호하기 위해 봉지(Encapsulation) 작업을 진행한다.

이와 같이 제작된 마이크로 LED 디스플레이가 장착된 패널은 다양한 전기적 및 광학적 테스트(Fig. 4 참조)와 품질 검사를 거쳐야 한다. 보다 자세하게는, 각 LED 칩의 전압에 따른 전류 특성, 밝기, 색도 등을 분석 및 검사하여 제품의 특성 및 품질을 보증할 수 있도록 한다.

기존의 LCD 및 OLED 기술을 뛰어넘는 성능을 제공하지만, 상기에서 설명한 제조 공정들의 복잡성과 생산 비용으로 인하여 현재 상용화 초기 단계이다.

2.4 마이크로 LED의 시장 동향 및 전망

삼성, 소니, 애플 등 전자장치를 제조하는 글로벌 대표 기업들은 마이크로 LED 디스플레이를 차세대 기술로 정하여 기술 개발과 특허 출원 및 등록을 활발히 진행하고 있는 상황이다[15,16].

Fig. 5에서 보여주는 삼성에서 제작한 대형 마이크로 LED 디스플레이 ‘더월(The Wall)’은 디스플레이 시장에서 주목을 받았다.



Fig. 5. Next-generation commercial display ‘The Wall’ product produced by Samsung Electronics using micro LEDs. (Provided by Samsung Electronics)

마이크로 LED 기술의 발전은 대량 생산에서 저비용과 수율 개선으로 제조 공정 혁신, 새로운 소재의 개발과 함께, 소자를 독립적으로 구동할 수 있는 구동 회로 기술의 발전을 기반으로 시장은 성장할 것으로 판단된다. 관련된 조사 기관들에 의하면, 마이크로 LED 디스플레이 글로벌 market은 2024년에서 2028년 사이에 연평균 성장률(CAGR)이 두 자릿수를 기록할 것으로

전망했다[17].

뛰어난 성능과 여러 응용 가능성을 고려한다면 기업들의 투자가 지속적으로 진행될 것으로 관측되지만, 제작 과정의 복잡성과 생산 비용 이슈는 여전히 풀어야 할 과제다.

2.5 마이크로 LED의 연구 분야 및 동향

마이크로 LED 기반의 디스플레이는 앞에서 언급한 장점을 지니고 있어 향후 디스플레이 분야에서 대세가 될 것이다. LCD 및 OLED는 휘도, 넓은 색 재현성, 고속 동작, 오랜 수명, 그리고 저전력 등의 특성을 가진 마이크로 LED로 대체될 것으로 저자들은 예상하고 있다. 하지만 이러한 미래가 이루어지기 위해서는 아래에 소개하는 과제들을 풀어나가야 할 것으로 판단된다.

첫 번째로, 제조 공정에 있어 변화 및 개발이 필요하다. 이를 위해 초고속 LED 소자 정밀 위치 배열 기술, roll-to-roll 전사 방법, AI (Artificial Intelligence) 기반의 자동화된 제조 시스템 등이 연구되고 있다.

두 번째로, 마이크로 LED를 제작하는 소재들에 대한 혁신이 필요하다. 고효율 및 저비용 LED 소재, ITO(Indium Tin Oxide)를 대체할 수 있는 투명 전도막, 플렉서블 및 스트레처블 기판 등의 새로운 소재 개발로 마이크로 LED 디스플레이의 성능과 신뢰성, 생산성을 향상시킬 수 있다.

세 번째로, 구동 회로 기술의 개발이 필요하다. 제조 공정과 연관이 있는 각 마이크로 LED 소자를 직접적으로 제어할 수 있는 저전력 회로 설계와 개발이 필수적이다. 이는 휴대용 디바이스와 같은 배터리가 요구되는 전자기기에서는 필수 불가결한 요소다.

네 번째로, 소자를 보호하는 봉지 기술의 개발이 요구된다. 이를 통해 디스플레이 전체의 내구성과 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

이를 통해 마이크로 LED 디스플레이가 적용된 다양한 제품들을 멀지 않은 미래에 볼 수 있을 것이라 기대한다.

3. 결론

마이크로 LED 디스플레이는 다음 세대의 디스플레이 분야와 조명 시장에서 대세를 이룰 것으로 판단된다. 그 근거로는 구동 회로에 의하여 원하는 밝기의 휘

도, LED 소자에 의한 빠른 속도, 저전력 동작, 장시간 수명의 특징 때문이다.

다른 디스플레이 기술처럼 마이크로 LED 디스플레이 기술도 빠른 속도로 변화와 발전을 거듭하였다. 그 근거로는 디스플레이 관련 기업들이 이러한 분야에의 투자를 확대하고 있기 때문이다.

앞으로의 마이크로 LED 기술이 디스플레이 시장을 선점하기 위해서는 마이크로 LED 기술로 특화된 제조 공정 개선, 국내 기술 기반의 소재 혁신, 구동 기술 발전 등으로 요약할 수 있다. 이러한 연구를 통해 상용화가 가속화되어 높은 성능과 다양한 응용 가능성으로 디스플레이 산업의 혁신을 이끌 것이라 판단된다.

REFERENCES

[1] Chen, H., Tan, G. & Wu, S. T. (2017). Ambient contrast ratio of LCDs and OLED displays. *Optics Express*, 25, 33643-33656. DOI : 10.1364/OE.25.033643

[2] Woodgate, G. J., & Harrold, J. (2018). Micro-optical systems for micro-LED displays. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 49, 1559-1562. DOI : 10.1002/sdtp.12132

[3] Horng, R. H., Chien, H. Y., Tarntair, F. G. & Wu, D. S. (2018). Fabrication and study on red light micro-LED displays. *IEEE Journal of Electron Devices*, 6, 1064-1069. DOI : 10.1109/JED.2018.2823191

[4] Jung, T., Choi, J. H., Jang, S. H. & Han, S. J. (2019). Review of micro-light-emitting-diode technology for micro-display applications. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 50, 442-446. DOI : 10.1002/sdtp.13544

[5] Zhou, S., Wang, H., Lin, Z., Yang, H., & Li, G. (2014). Study of defects in LED epitaxial layers grown on the optimized hemispherical patterned sapphire substrates. *Japanese Journal of Applied Physics*, 53, 025503. DOI : 10.7567/JJAP.53.025503

[6] Yu, J. *et al.* (2017). Influence of dislocation density on internal quantum efficiency of GaN-based semiconductors. *AIP Advances*, 7, 035321. DOI : 10.1063/1.4978614

[7] Virey, E. (2017). MicroLED displays: hype and reality, hopes and challenges. *Yole Report*, 108-112.

DOI : 10.1364/YOLE.10.008

[8] Olivier, F., Tirano, S., Dupré, L., Aventurier, B., LARGERON, C. & Templier, F. (2017). Influence of size-reduction on the performances of GaN-based micro-LEDs for display application. *Journal of Luminescence*, 191, 112-116. DOI : 10.1016/j.jlum.2017.06.029

[9] Olivier, F., Daami, A., Licitra, C. & Templier, F. (2017). Shockley-Read-Hall and Auger non-radiative recombination in GaN based LEDs: a size effect study. *Applied Physics Letters*, 111, 022104. DOI : 10.1063/1.4994310

[10] Chen, H., Tan, G. & Wu, S. T. (2023). Research progress of micro-LED display technology. *Crystals*, 13(7), 1001. DOI : 10.3390/cryst13071001

[11] Jin, S. X., Li, J. Z., & Jiang, H. X. (2000). GaN microdisk light emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 76, 631-633. DOI : 10.1063/1.125888

[12] Peng, D., Zhang, K. & Liu, Z. (2017). Design and fabrication of fine-pitch pixelated-addressed micro-LED arrays on printed circuit board for display and communication applications. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 5(1), 90-95. DOI : 10.1109/JEDS.2017.2652723

[13] Jeon, C. W., Choi, H. W. & Dawson, M. D. (2003). Fabrication and performance of high-density, matrix-addressable green and ultraviolet micro-LED arrays. *IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting*, 2, 878-879. DOI : 10.1109/LEOS.2003.1267256

[14] Wong, M. S., Kearns, J. A., & Lee, C. (2020). Improved performance of AlGaInP red micro-light-emitting diodes with sidewall treatments. *Optics Express*, 28, 5787-5793. DOI : 10.1364/OE.28.005787

[15] Wu, T. *et al.* (2020). Mini-LED and Micro-LED: Promising candidates for the next generation display technology. *Applied Sciences*, 10(2), 1-22. DOI : 10.3390/app10020691

[16] Lin, J. Y. & Jiang, H. X. (2018). Development of MicroLED. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(48), 483001. DOI : 10.1088/1361-6463/aae0a8

[17] Yole Développement. (2020). MicroLED Displays 2020. *Yole Market Research Report*, 1-276. DOI : 10.1016/j.display.2020.03.002

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 ~ 2020년 2월 : 중원대학교 전기전자공학 전공 교수
- 2020년 3월 ~ 현재 : 강남대학교 전자공학과 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Semiconductor, Laser
- E-Mail : moojinkim7@kangnam.ac.kr