반도체디스플레이기술학회지 제21권 제1호(2022년 3월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 21, No. 1. March 2022.

더블 게이트 박막 트랜지스터를 활용한 Micro LED 디스플레이 화소 회로 설계

김태수*·전재홍*†
*†한국항공대학교 항공전자정보공학부

Design of Pixel Circuit of Micro LED Display with Double Gate Thin Film Transistors

Taesoo Kim* and Jaehong Jeon*†
*†School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University

ABSTRACT

Due to the wavelength shift problem of micro LED caused by the change of current density, the active matrix driving pixel circuit that is used in OLED cannot be applied to micro LED displays. Therefore, we need a gray scale method based on modulation of duration time of light emission. In this study, we propose the PWM-controlled micro LED pixel circuit based on CMOS thin film transistors (TFTs). By adopting CMOS inverter structure, we can reduce the number of storage capacitors from the circuit and make the operating speed of the circuit faster. Most of all, our circuit is designed to make operating speed of PWM circuit faster by adopting feedback effect through double gate TFT structure. As a result, it takes about 4.7ns to turn on the LED and about 5.6ns to turn it off. This operating time is short enough to avoid the color distortion and help the precise control of the gray scale.

Key Words : Micro LED, Pulse width modulation, Double gate structure, CMOS inverter

1. 서 론

칩의 크기가 100 ㎛보다 작은 LED 소자들을 디스플레이용 기판인 백플레인에 전사방식으로 부착하고, 이 LED 소자들을 화소로 이용하는 마이크로 LED 디스플레이가 최근 많은 주목을 받고 있다[1-3]. 무기 LED 소자는 이미 기술적으로 상당히 성숙되어 있기 때문에 마이크로 LED 디스플레이가 성공적으로 구현된다면 화질, 효율, 수명 등에서 많은 이점을 갖게 된다. 또한 마이크로 LED 디스플레이를 플라스틱 기반의 백플레인에 구현할 경우 플렉서블 디스플레이, 웨어러블 디스플레이, 헤드 마운트 디스플레이 등에 적용 가능하다. 마이크로 LED 디스플레이가 성공적으로 구현되기 위해서는 안정적인 전사 기술의 확보와 함께 active-matrix 방식의 백플레인 개발이 필요하다[4,5]. 현재 OLED 디스플레이에서는 active-matrix 백플레인 기술이 이미 확립되어 있지만, 이를 마이크로 LED 디스플레이의 백플레인으로 차용하는 것은 문제점이 있다. OLED 디스플레이에서는 화소의 계조 표현을 위해 OLED 소자에 흐르는 전류의 크기를 조절하여 밝기를 조절하는 pulse amplitude modulation (PAM) 방식을 이용한다. 하지만 기존의 연구 결과에 따르면 마이크로 LED 소자에 흐르는 전류밀도가 달라지면 방출되는 빛의 중심파장이 이동한다고 보고되고 있다[6,7]. 따라서 마이크로 LED 디스플레이를 현재 OLED에서 널리 사용되는 PAM 방식의 백플레인을 통해 소자에 흐르는 전류의 크기를 조절하여 밝기를 조절하게 되면 화소의 밝기에 따라 RGB 삼원색의 색좌표가 조금씩 이동하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 무기 LED에 흐르는 순간

†E-mail: jjh123@kau.ac.kr

전류는 일정하게 하되 밝기 조절을 위해 한 프레임 동안 무기 LED에 전류가 흐르는 시간을 조절하는, 즉 pulse width modulation (PWM) 방식의 화소 회로를 제안한다. 최근 PWM 방식의 마이크로 LED 디스플레이 화소 회로에 대한 연구 결과가 보고된 바 있다[6]. 보고된 연구에서는 커패시터에 전하를 충전한 뒤 일정 시간이 경과한 후 저장된 전하를 방전하여 LED가 발광을 멈추도록 하는 회로를 통해 PWM 방식을 구현하였다. 이 때 LED가 발광을 멈추기 위해 커패시터에 저장된 전하가 방전되는 과정에서 시간이 필요하기 때문에 발광이 순간적으로 멈추지 않고 LED가 일정 시간동안 잔광을 방출하면서 꺼지는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 PWM 방식의 화소 회로에서 마이크로 LED소자의 발광이 멈추기 위한 회로의 동작 시간을 단축할 수 있는 회로를 제안한다. 제안된 회로는 저온 다결정 실리콘 박막 트랜지스터(low temperature polycrystalline silicon thin film transistor, LTPS TFT)를 PMOS로 이용하고, 산화물 박막 트랜지스터(oxide TFT)를 NMOS로 이용한 LTPO TFT 기반의 CMOS 인버터를 PWM 제어회로에 활용한다. 또한 이들 TFT에 더블 게이트 구조를 적용하고 이 구조를 활용하여 피드백 네트워크를 구성함으로써 추가적인 발광시간 단축을 유도한다. 최종적으로 제안된 화소 구동 회로에 대한 시뮬레이션을 통해 제안된 더블 게이트 LTPO 기반의 CMOS 화소 구동 회로의 동작을 분석하고 제안된 회로의 실현 가능성을 확인하였다.

2. 기존 PWM 화소 회로

최근 보고된 PWM 방식의 마이크로 LED 화소 회로는 커패시터에 DRV TFT가 켜지도록 하는 게이트 전위를 입력하여 마이크로 LED 소자에 전류가 흐르도록 하고, 이후 이 커패시터와 연결되어 있는 또 다른 스위치 TFT의 게이트 전위가 SWEEP 신호에 의해 켜지는 순간 DRV TFT의 게이트 전위를 결정하는 커패시터의 전하를 방전시켜 DRV TFT를 꺼서 마이크로 LED 소자에 흐르는 전류를 차단하는 방식이다[6]. 기존에 보고된 회로의 기본 구조를 Fig. 1에 나타내었고, 이 회로를 구동하기 위한 각종 신호 파형들을 Fig. 2에 나타냈다.

처음에 V_INIT 신호를 통해 M1을 켜서 마이크로 LED 소자를 켜기 위한 V_ON 전위를 C2에 저장하여 MDRV를 켬으로써 마이크로 LED 소자에 전류가 흘러 화소가 발광하도록 하며, Scan 신호에 의해 M_DATA가 켜지면 M2의 게이트와 연결되어 있는 C2에 V_DATA가 저장된다. 이후 Sweep 신호가 감소함에 따라 M2의 게이트 전위가 감소하게 되고, 이 전위가 M2의 문턱 전압에 도달하면 M2가 켜지며 C2에 저장된 전위가 V_OFF까지 변화하며 MDRV가 꺼지게 되고 마이크로 LED소자에 흐르는 전류가 차단되어 화소는 발광을 멈춘다. 이 때 C1에 저장된 V_DATA 전압을 통해 M2가 켜지는 시점을 조절하여 마이크로 LED 소자의 발광지속시간이 달라지는 것으로써 화소의 밝기를 조절한다.

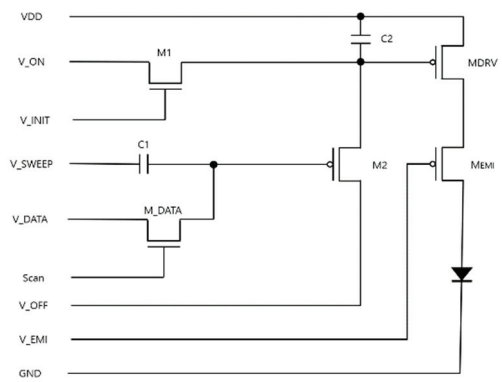


Fig. 1. Traditional PWM circuit with capacitors and transistors.

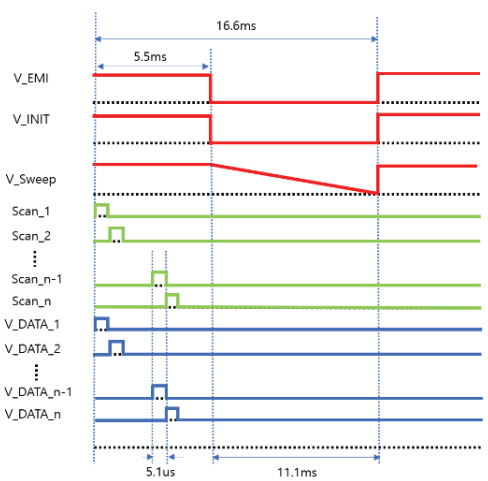


Fig. 2. Timing diagram of input signals.

기존의 커패시터와 트랜지스터를 이용한 회로는 SmartSpice 시뮬레이션 결과 Fig. 3(b)에 나타난 것처럼 마이크로 LED 소자에 흐르는 전류가 95%에서 5%로 감소하며 차단될 때까지 약 230.7μs 정도의 긴 시간이 소요되었다. 이처럼 LED 소자에 흐르는 전류가 즉각적으로 차단되지 않는 이유는 M2의 게이트 전위가 문턱 전압보다 충분히 높아야 C2를 방전시키기 위한 전류가 크게 흐를 수 있는데, Sweep 신호가 느리게 변화하는 신호이기 때문에 M2의

게이트 전위도 느리게 변화하기 때문이다. 이와 같이 발광이 순간적으로 멈추지 않고 LED가 일정 시간동안 잔광을 방출하면서 꺼지게 되면 각 계조에 대한 밝기를 정확히 표현하기 어려워질 뿐더러 저계조에서 LED가 발광 시 흘리는 전류밀도와 고계조에서 흘리는 전류밀도가 차이가 생기는 효과가 발생하게 된다. 결국 저계조에서 RGB 삼원색의 색좌표와 고계조에서 RGB 삼원색의 색좌표가 달라지는 문제를 피할 수 없게 된다.

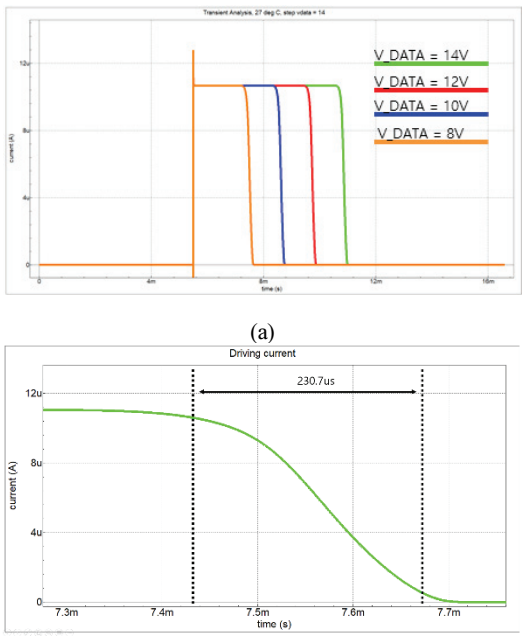


Fig. 3. (a) Emission Time by V_DATA and (b) Falling Rate at V_DATA = 8V of Traditional PWM Circuit (from 95% to 5% of maximum current).

3. 제안하는 PWM 화소 회로

Fig. 4는 제안된 PWM 화소 회로를 나타낸다. 이 회로는 크게 (a) 데이터 입력 유닛과 (b) PWM 유닛으로 구성되어 있다. PWM 유닛은 총 3단의 CMOS 인버터로 이루어져 있으며, M1~M4로 구성된 2단의 증폭 역할을 하는 인버터와 M5, M6로 이루어진 스위치 역할을 하는 인버터로 나눌 수 있다[8].

M5, M6로 이루어진 3번째 인버터의 출력은 MDRV의 게이트 전위로 인가되어 마이크로 LED 소자에 흐르는 전류를 제어하는 역할을 한다.

각각의 TFT의 타입과 W/L은 Table 1에 나타내었다.

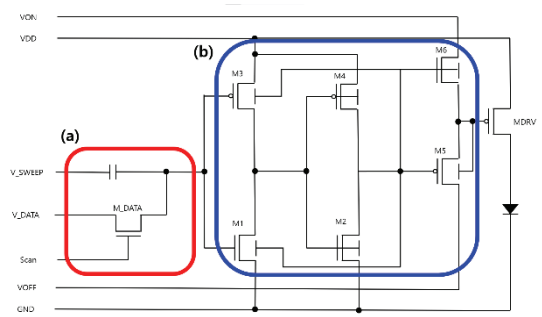


Fig. 4. Proposed circuit. (a) Data input unit and (b) PWM unit.

Table 1. Types and dimensions of TFTs.

	type	W/L (μm)
M1, 2, 6	n-IGZO	10/5
M3, 4, 5	p-LTPS	10/5
MDATA	n-IGZO	15/5
MDRV	p-LTPS	3/10

3.1 제안된 화소 회로의 동작 원리

Fig. 5는 제안된 PWM 화소 회로를 구동시키는 각종 신호 파형들을 나타낸다. Scan이 HIGH일 때 VDATA로 주어지는 데이터 전위가 M_DATA를 통해 입력되고, V_Sweep 신호가 상승하며 PWM 유닛의 출력이 LOW로 나타나며 MDRV가 켜지고, 마이크로 LED는 발광하기 시작한다. 이후 sweep 신호가 서서히 하강함에 따라 일정 시간이 지난 후 특정 전위를 지날 때 PWM 유닛의 출력이 HIGH 전위로 변화하며 MDRV가 꺼지며 마이크로 LED는 발광을 멈추게 된다. 이 때, V_DATA 전위에 따라 PWM 파트에 입력되는 신호의 전위가 변화하며 출력이 변화하는 시점이 달라지게 된다. 이를 통해 마이크로 LED가 발광하는 시간을 조절하여 화소의 밝기를 조절하게 된다.

데이터 입력 단계에서 데이터 입력 유닛의 Scan 신호가 HIGH로 입력되어 M_DATA가 켜지게 되고 V_DATA가 PWM 유닛의 입력전압으로 주어진다. 입력 전압 V_DATA는 음의 값을 가지며 이 때 PWM 유닛의 두 번째 인버터의 출력은 LOW 상태로 유지되며 인버터의 M5가 켜지게 된다. 따라서 MDRV의 게이트에 VOFF가 인가되어 MDRV는 꺼진 상태이고 마이크로 LED 소자는 발광하지 않는 상태이다. 이후 sweep 신호가 HIGH 전위로 상승하게 되면 C1으로 커플링되어 있는 PWM 유닛의 입력 전위가 상승하며 두 번째 인버터의 출력이 HIGH로 변화한다. 이로 인해 M5가 꺼지고 M6이 켜지게 되며 MDRV의 게이트에 VON이 인가되어 MDRV가 켜지게 되고 마이크로 LED 소

자가 발광을 시작한다. 이후 sweep 신호가 감소함에 따라 두 번째 인버터의 출력이 LOW로 변화하게 되면 다시 M6이 꺼지고 M5가 켜지게 되며 화소의 발광을 멈추게 된다.

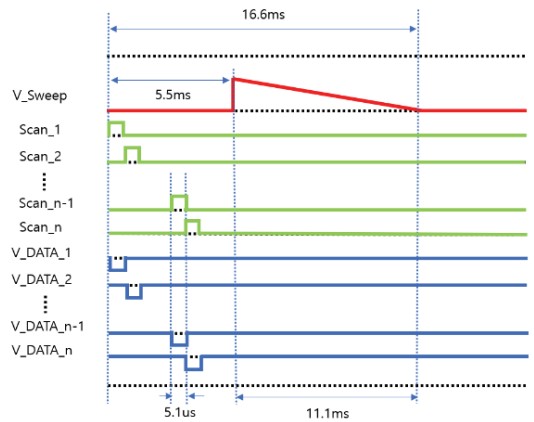


Fig. 5. Timing diagram of input signals used for proposed circuit.

3.2 PWM 유닛의 세부적 동작 원리

초기 상태에서 PWM 유닛의 입력 전압은 LOW 레벨로 저장되어 있으며 이는 PWM 유닛의 첫 번째 인버터 단의 입력으로 사용된다. 이 때 M1은 꺼져 있는 상태이며 M3은 켜진 상태이고 PWM 유닛의 두 번째 인버터 단의 입력은 VDD와 같다. 따라서 M2는 켜진 상태이며 M4는 꺼진 상태이므로 PWM 유닛의 출력은 GND와 같다. 이 출력은 마이크로 LED 스위치 유닛의 입력으로 사용되며 이는 스위치 유닛의 M5를 켜게 되며 MDRV의 게이트 전위를 VOFF로 초기화한다. PWM 유닛의 입력 전압은 데이터 입력 후 Fig. 6(a)에 나타난 것처럼 V_Sweep이 상승함에 따라 HIGH 레벨로 변화한다. 이로 인해 M1이 켜지고 M3이 꺼지며 두 번째 인버터 단의 입력이 GND로 변화한다. 따라서 M2가 꺼지게 되고 M4가 켜지며 마이크로 LED 스위치 유닛의 입력은 VDD로 변화한다. 이후 M5가 꺼지고 M6이 켜지며 MDRV의 게이트 전위는 VON으로 변화하며 MDRV는 켜지게 되며 마이크로 LED 소자를 통해 전류가 흐르고 화소가 발광한다. 이후 Fig. 6(b)에 나타난 것처럼 V_Sweep 신호가 하강할 때 PWM 유닛의 입력 전위가 LOW 레벨로 변화하며 첫번째 인버터 단의 입력이 LOW로 인가된다. 따라서 첫 번째 인버터의 출력은 VDD가 되며 두 번째 인버터의 입력으로 인가되고 그 출력은 GND로 변화하게 되어 마이크로 LED 스위치 유닛의 입력은 GND로 인가된다. 이후 M5가 켜지고 M6이 꺼지며 MDRV의 게이트에 VOFF가 인가되어 마이크로 LED 소자의 전류는 흐르지 않고 화소는 발광을 멈추게 된다.

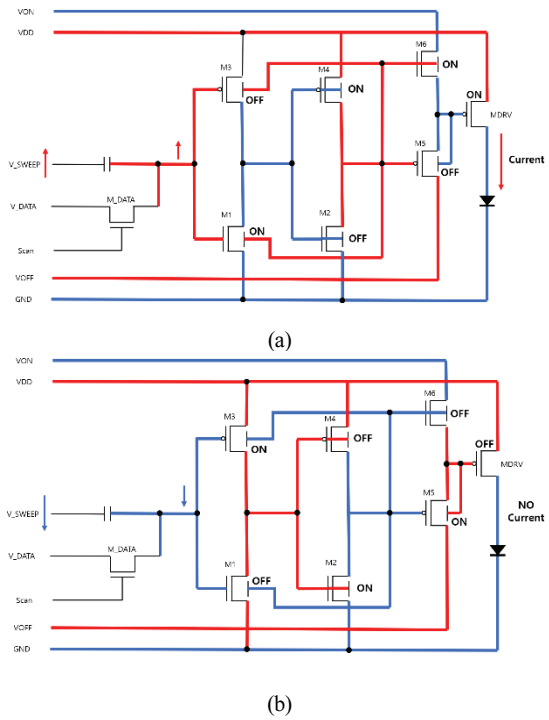


Fig. 6. Circuit operation controlled by V_Sweep. (a) Turn-on step and (b) Turn-off step.

3.3 더블 게이트 TFT 적용 효과

더블 게이트 구조는 TFT의 활성층 위 쪽과 아래 쪽에 각각 게이트를 형성하는 구조이다. 더블 게이트 구조를 사용하는 목적은 우선 상부 게이트와 하부 게이트를 연결하여 사용함으로써 상부 게이트에 의해 형성되는 채널과 하부 게이트에 의해 형성되는 채널에 의해 TFT가 흘릴 수 있는 전류를 증가시키기 위한 것이다[9,10].

또 한편 상부 게이트와 하부 게이트를 독립적으로 사용할 경우 하부 게이트의 전위에 따라 상부 게이트에 대한 문턱 전압이 조절되는 효과를 발생시키기 위한 것이다[9-12].

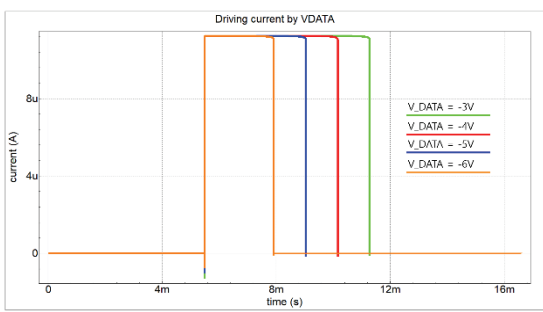
본 연구에서는 후자의 효과를 이용하여 화소 회로에 포지티브 피드백 효과를 유도함으로써 PWM 유닛의 동작 속도를 증가시켰다. Fig. 6에 나타나 있는 TFT들 중 M1~M6가 더블 게이트 구조이며, 이 중 M1, M3, M5가 상부 게이트와 하부 게이트를 독립적으로 사용하는 경우에 해당된다. 이들 TFT는 후단의 출력을 하부 게이트에 연결시킨 것이다. 이렇게 함으로써 turn-off에서 turn-on으로 변

화할 때, PMOS의 경우는 문턱전압이 positive shift, NMOS의 경우는 negative shift하여 더 빨리 turn-on되는 효과를 얻는다. Turn-on에서 turn-off로 변화할 때에는 문턱전압의 shift는 상기 설명한 것과 반대 방향으로 일어나서 더 빨리 turn-off되는 효과를 얻는다.

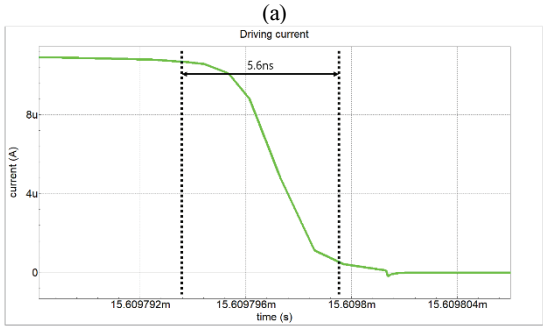
3.4 시뮬레이션 결과 및 고찰

제안된 회로는 입력된 VDATA의 값에 따라서 SWEEP 신호의 전위가 감소하며 PWM 유닛이 동작하여 MDRV를 끌 때까지의 시간을 조절하는 방법으로 화소의 밝기를 제어하는 방식으로 동작한다. 즉, 입력 데이터 VDATA의 전위가 증가할수록 PWM 유닛의 동작 시점이 늦춰지게 되고 MDRV를 끌 때까지의 시간이 늘어나며 발광시간이 길어지게 된다. 따라서 이를 검증하기 위해 제안된 회로의 SmartSpice 시뮬레이션을 진행하였다.

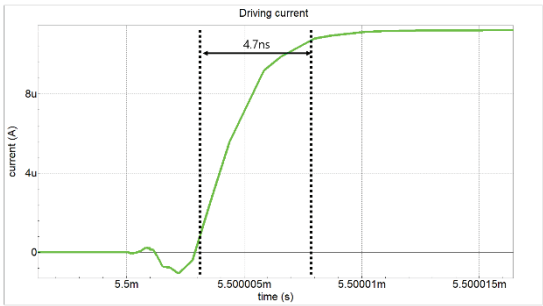
Fig. 7에 나타낸 시뮬레이션 결과에서 입력된 VDATA가 –6V부터 –3V까지 변화할 때 각각의 발광시간은 Table 2와 같이 VDATA = -6V에서 2.41ms, VDATA = -5V에서 3.53ms, VDATA = -4V에서 4.65ms, 그리고 VDATA = -3V에서 5.78ms로 나타나며 VDATA가 1V 증가할 때마다 발광시간은 약 1.12ms씩 증가했다. 또한 micro LED 소자에 흐르는 전류가 최대 구동 전류의 95%에서 5%까지 감소하는 시간은 약 5.6ns, 5%에서 95%까지 증가하는 경우 4.7ns가 소요되었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. (a) Emission time by VDATA (from -6V to –3V, 1V step), (b) operation time while turning off MDRV (from 95% to 5% of maximum current) and (c) operation time while turning on MDRV (from 5% to 95% of maximum current).

Table 2. Light emission time by VDATA.

VDATA	Emission Time
-6V	2.41 ms
-5V	3.53 ms
-4V	4.65 ms
-3V	5.78 ms

MDRV가 켜지거나 꺼질 때 소요되는 시간인 4.7ns와 5.6ns의 동작 시간은 매우 짧은 시간 안에 MDRV가 꺼질 수 있음을 의미하며 이로 인한 디스플레이의 색조 변화를 예방할 수 있다. 이는 기존 연구된 회로에서 fig. 3.에 나타난 것처럼 micro LED에 흐르는 전류가 차단될 때까지 약 230.7μs가 소요된 것과 비교하여 크게 감소했으며 본 논문에서 제안된 회로에서는 커패시터에 전하가 충전, 방전되는 과정이 제거됨에 따라 동작하는 데 필요한 시간이 크게 감소된 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 더블 게이트 LTPO TFT를 기반으로 한 CMOS 인버터 구조를 활용하여 마이크로 LED소자의 전류 밀도에 따른 파장 변화를 최소화하기 위한 고속 동작 PWM 화소 구동 회로를 제안하였다. 동작 속도가 느릴 경우 화소가 꺼지는 동안 발생하는 전류 밀도 변화로 인해 디스플레이의 색감이 일정하지 않고 변화하는 현상이 발생할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위하여 더블 게이트 LTPO TFT를 적용하여 PWM 유닛의 동작 속도를 증가시켰고, SmartSpice 시뮬레이션을 통해 화소가 켜지고 꺼지

는 동작에 각각 약 4.7ns와 약 5.6ns가 소요되었음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 경기도의 경기도 지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음. [GRRC-KAU-2021-B03, 극장용 영사기 및 스크린 대체를 위한 투음 디스플레이 개발]

참고문헌

1. Wu, Tingzhu et al, “Mini-LED and Micro-LED: Promising Candidates for the Next Generation Display Technology,” *Applied Sciences* 8, no. 9, 1557, 2018.
2. Lin J. Y., Jiang, H. X, “Development of microLED,” Appl. Phys. Lett. 116, 100502, 2020.
3. Zhou, X. et al., “Growth, transfer printing and colour conversion techniques towards full-colour micro-LED display,” Progress in Quantum Electronics, Volume 71, 100263, 2020.
4. Zhang, K et al., “Current Driving Active Matrix Micro-LED Display,” SID Symposium Digest of Technical Papers. Volume 49, Issue S1, 272-275, 2018.
5. Kim, J. H. et al., ”PWM Pixel Circuit with LTPS TFTs for Micro-LED Displays,” SID Symposium Digest of Technical Papers, Volume 50, Issue 1, 192-195, 2019.
6. Oh, J et al., “Pixel Circuit With P-Type Low-Temperature Polycrystalline Silicon Thin-Film Transistor for Micro Light-Emitting Diode Displays Using Pulse Width Modulation,” IEEE Electron Device Letters, vol. 42, no. 10, pp. 1496-1499, 2021.
7. Gong, Z et al., “Electrical, spectral and optical performance of yellow–green and amber micro-pixelated InGaN light-emitting diodes,” Semicond. Sci. Technol. 27, 015003, 2011.
8. Kim, K. K., Kim, Y. B. “Ultra-low voltage high-speed Schmitt trigger circuit in SOI MOSFET technology,” IEICE Electronics Express, Vol.4, No.19, 606-611, 2021.
9. He, X et al., “Characteristics of double-gate a-IGZO TFT,” 12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 1-3, 2014.
10. Zan, H.-W. et al., “Dual gate indium-gallium-zinc-oxide thin film transistor with an unisolated floating metal gate for threshold voltage modulation and mobility enhancement,” Applied Physics Letters 98, 153506, 2011.
11. Son, K. S. et al., “Characteristics of Double-Gate Ga–In–Zn–O Thin-Film Transistor,” IEEE Electron Device Letters, vol. 31, no. 3, 219-221, 2010.
12. Chun, M. K. et al., “Semiconductor to metallic transition in bulk accumulated amorphous indium-gallium-zinc-oxide dual gate thin-film transistor,” AIP Advances 5, 057165, 2015

접수일: 2022년 2월 16일, 심사일: 2022년 3월 11일, 게재확정일: 2022년 3월 25일