

논문 2010-47SD-10-6

고 개구율 화소보상회로를 갖는 저전력 LTPS AMOLED 패널 설계

(Design of Low Power LTPS AMOLED Panel and Pixel Compensation
Circuit with High Aperture Ratio)

강 홍 석*, 우 두 형**

(Hong Seok Kang and Doo Hyung Woo)

요 약

본 연구를 통해서 대 면적, 저 전력 AMOLED 응용에 적합한 고 개구율 픽셀 보상회로와 이에 대한 구동회로를 제안하였다. 균일도는 다소 떨어지지만 안정성과 이동도가 뛰어난 저온 다결정 실리콘(LTPS) 박막 트랜지스터(TFT)를 기반으로 설계했다. 픽셀의 불량률을 낮추고 배면발광방식에 적합하도록 픽셀 보상회로를 보다 간단하게 개선하여 고 개구율 특성을 갖도록 했다. 제안하는 고 개구율 픽셀 보상회로는 일반적인 구동방식을 사용할 경우 명암비에서 큰 손해를 볼 수가 있으므로, 명암비를 높게 유지하기 위한 구동방식 및 구동회로를 제안하여 검증하였다. 이와 더불어 동영상 특성을 개선하기 위해 black data insertion 방식을 구현할 수 있도록 설계했다. 배면발광방식의 19.6" WXGA AMOLED 패널에 대해 설계했으며, 픽셀의 평균 개구율은 41.9%로 기존에 비해 8.9% 증가했다. TFT의 V_{TH} 편차가 $\pm 0.2V$ 일 때, 패널의 불균일도와 명암비는 각각 6% 이하와 10만:1 이상으로 예측되었다.

Abstract

We proposed the new pixel compensation circuit with high aperture ratio and the driving method for the large-area, low-power AMOLED applications in this study. We designed with the low-temperature poly-silicon(LTPS) thin film transistors(TFTs) that has poor uniformity but good mobility and stability. To lower the error rate of the pixel circuit and to improve the aperture ratio for bottom emission method, we simplified the pixel compensation circuit. Because the proposed pixel compensation circuit with high aperture ratio has very low contrast ratio for conventional driving methods, we proposed the new driving method and circuit for high contrast ratio. Black data insertion was introduced to improve the characteristics for moving images. The pixel circuit was designed for 19.6" WXGA bottom-emission AMOLED panel, and the average aperture ratio of the pixel circuit is improved from 33.0% to 41.9%. For the TFT's V_{TH} variation of $\pm 0.2V$, the non-uniformity and contrast ratio of the designed panel was estimated under 6% and over 100000:1 respectively.

Keywords : AMOLED, LTPS TFT, compensation circuits, high aperture ratio

* 학생회원, ** 정회원-교신저자, 가톨릭대학교 정보통신전자공학부
(School of Information, Communications & Electronic Engineering, The Catholic University of Korea)

※ 본 연구는 2010년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 이루어졌음.

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0004714)

접수일자: 2010년7월29일, 수정완료일: 2010년9월29일

I. 서 론

능동형 유기 발광 다이오드(AMOLED) 디스플레이는 현재 우수한 능동형 액정 디스플레이(AMLCD)를 넘어서 차세대 평판 디스플레이 산업을 이끌어나갈 것으로 기대되고 있다. AMOLED는 얇은 구조, 높은 색재현성, 광 시야각, 빠른 응답 속도, 높은 휘도, 높은 명암 비,

저 전력 소모 등의 뛰어난 특성을 나타낸다.^[1-2] OLED 소자는 스스로 발광하는 성질을 가지므로, LCD와는 달리 백라이트를 필요로 하지 않는다. 이 때, OLED에 흐르는 전류에 의해 밝기가 결정되므로, AMOLED 패널의 각 픽셀은 전류 구동 방식으로 동작한다.

AMOLED 패널에 대해 가장 간단한 픽셀 구조는 그림 1과 같고, 두 개의 트랜지스터와 한 개의 캐패시터로 구성되어 있다.^[3] 이를 간단히 2T-1C 구조라고도 하며, 데이터 전압을 픽셀에 순차적으로 전달하기 위한 박막 트랜지스터(TFT) T1, 전달된 전압을 이용하여 전류 구동을 하기 위한 TFT T0, 데이터 전압을 저장하여 일정 시간 동안 유지하기 위한 캐패시터 Cs로 구성된다. 픽셀의 밝기는 OLED 소자에 흐르는 전류와 관계있고, 이것은 구동 TFT(T0)의 게이트-소스 간 전압에 의해 결정된다. 따라서 전체 영상 이미지의 균일도는 구동 TFT의 특성 편차에 의해 좌우되며, 구동 TFT의 특성 편차를 보상하고 균일한 영상을 얻기 위해, 여러 가지 픽셀 구조와 구동 방식이 연구되었다.^[4-8]

현재 비정질 실리콘(a-Si) TFT를 이용한 AMOLED는 균일도가 높다는 장점에도 불구하고, 안정성 문제로 어려움을 겪고 있다. 이에 반해 높은 이동도를 갖는 저온 다결정 실리콘(LTPS) TFT를 이용한 AMOLED는 안정성 및 저전력 측면에서 우수한 특성을 가지며 일부 구동회로를 패널위에 집적하기가 용이하다. 비록 결점화 문제에 따른 그레이인 경계의 불규칙성으로 인해 화질의 불균일성 문제가 남아있지만, 현재 대부분의 상용 AMOLED 디스플레이에서 적절한 보상회로를 사용하여 LTPS TFT 방식을 사용하고 있다.

AMOLED 디스플레이는 발광 방향에 따라 전면발광 방식(Top Emission)과 배면발광방식(Bottom Emission)으로 나눌 수 있다. 전면발광방식은 픽셀보상회로의 복잡도에 관계없이 높은 개구율을 얻을 수 있는 장점이 있으나, 투명하고 저항이 낮은 메탈전극을 구현해야 하

므로 대형 패널 구현에 어려움이 있다. 이에 반해 배면 발광방식은 픽셀보상회로의 복잡도에 따라 개구율이 크게 달라지고, 개구율이 작을수록 OLED에 흐르는 전류가 커지게 된다. 따라서, 배면발광방식을 사용할 경우, OLED의 수명을 늘리고 전력소모를 줄이기 위해서 개구율을 향상시키는 것은 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 LTPS TFT를 이용하여 배면발광방식의 AMOLED 패널을 설계했고, 이에 적합한 높은 개구율을 갖는 픽셀 보상회로를 제안하였다.

II. 고 개구율 픽셀 보상회로

1. 기존의 V_{TH} 보상회로

V_{TH} 보상을 위한 기존의 전압 전달 방식의 픽셀 구조를 그림 2에 나타내었다. 전류 구동을 위한 TFT(T0), 데이터를 픽셀에 전달하기 위한 TFT(T1)와 데이터를 저장하기 위한 캐패시터(Cstg)가 필수적으로 필요하며, V_{TH} 보상을 위해 네 개의 TFT(T2, T3, T4, T5)가 추가되었다. 이 때, T2는 V_{TH} 보상 시에 T0를 diode connected TFT로 만들기 위해 사용되었고, T3는 V_{TH} 보상 시에 OLED로 전류가 흐르는 것을 막아준다. T4는 V_{TH} 보상 과정 초기에 T0를 turn on 하기 위해 사용되었고, T5는 V_{TH} 보상 이후에 영상 data를 T0의 gate 단자까지 전달하는 역할을 한다.

그림 2의 회로는 원래 두 개의 조정신호(Scan2, Scan3)에 의해 동작될 수 있으나, Scan1을 추가하여 동영상 특성을 개선하고자 한 것이다. AMOLED와 LCD 같은 hold type 디스플레이의 경우, 동영상 구현할 때 움직이는 물체의 경계가 흐려지는 현상이 있다. 이를 개선하기 위해 각 프레임 사이에 어두운 화면을 삽입(black data insertion)하여 CRT와 같은 효과를 내기도 한다.^[10] 그림 2의 타이밍도와 같이 Scan1에 의해 1/2 frame 동안 OLED가 꺼져있음을 알 수 있다.

OLED가 발광하는 구간이 시작되기 직전의 1 horizontal time(1H) 동안에, 그림 2의 타이밍도와 같이 V_{TH} 보상 및 데이터 전달 과정을 수행한다. 1H 구간은 다시 Scan2 와 Scan3에 의해 크게 두 구간으로 나눌 수 있다. 먼저 첫 번째 구간은 일종의 reset 구간으로서, T0가 diode connected TFT의 형태를 이루면서 turn on 상태가 된다. 이 때 ELVDD에서 V_{sus} 단자까지 일정한 전류가 흐르며, V_{sus} 는 ELVDD에 비해 충분히 낮은 전압이어야 한다. 두 번째 구간은 V_{TH} 보상 구간으

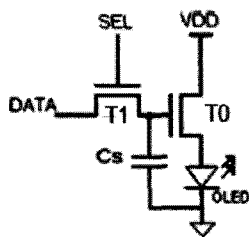


그림 1. 간단한 2T-1C 픽셀 회로^[3]
Fig. 1. A simple 2T-1C pixel circuit^[3].

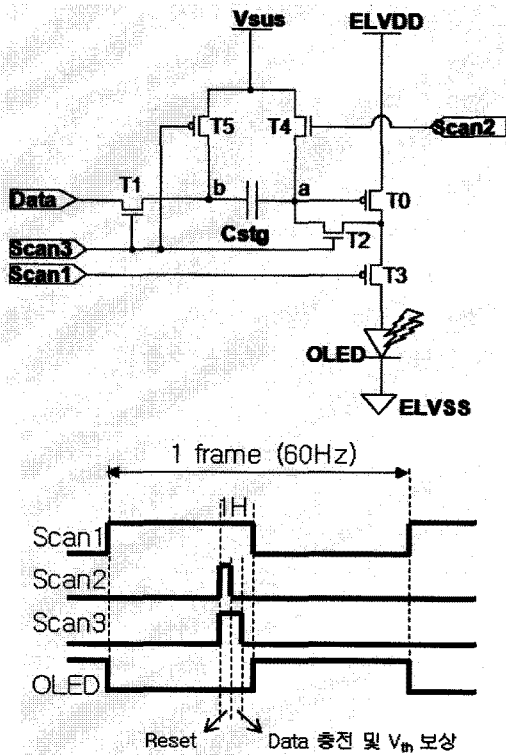


그림 2. V_{TH} 보상을 위한 기존의 전압 전달 방식의 픽셀 구조^[9]
 Fig. 2. An example of the voltage programmed pixel circuit for compensating threshold voltage variation^[9].

로서, T4가 꺼짐으로 인해 T0에 흐르는 전류가 a 단자의 전압을 상승시키며 T0의 게이트-소스 간 전압을 감소시킨다. 이는 T0에 거의 전류가 흐르지 않을 때까지 계속되며, T2가 꺼지면서 동작을 마무리한다. 이 때, a 단자에 저장된 전압 값은 $V_{DD} - V_{TH,T0}$ 라 할 수 있다. 한편, reset 및 V_{TH} 보상 구간 동안 T1에 의해 영상 데이터 V_{data} 가 b 단자로 전달된다. 이후 T1이 꺼지고 T5가 켜지면서 b 단자의 전압이 V_{sus} 로 바뀌면, b 단자의 전압 변화($V_{sus} - V_{data}$)가 a 단자에 그대로 반영된다. 이 때, a 단자의 전압은 각 픽셀의 V_{TH} 값을 기준으로 입력되는 영상 데이터를 반영하게 되므로, OLED 발광 구간부터는 각 픽셀의 V_{TH} 편차와 거의 무관한 영상을 얻을 수 있다.

2. 고 개구율 픽셀 보상회로

그림 2와 같은 방식은 픽셀 외부 회로의 설계가 간단하다는 장점이 있으나, 여섯 개의 TFT, 세 개의 조정 신호 및 추가 전원(V_{sus}) 등으로 인해 픽셀 회로가 다소 복잡하다. 서론에서 지적한 바와 같이, 전면발광방식

을 사용할 경우 이것이 큰 문제가 되지 않을 수 있으나, 배면발광방식을 사용할 경우 개구율을 크게 감소시킬 수 있다.

Diode connection 방식을 사용하는 V_{TH} 보상 회로에서 reset 스위치와 전원을 사용하는 경우에 비해 개구율을 크게 향상시킬 수 있는 픽셀 보상회로 구조를 그림 3에 제시하였다. 그림 2의 회로에서 T4, Scan2 및 V_{sus} 가 없어진 형태이며, T3는 PMOS에서 NMOS로 변경되었다. Scan1과 Scan3의 역할은 그림 2의 경우와 동일하지만, Scan2의 역할을 수행하기 위해 Scan1의 파형이 그림 3의 타이밍도와 같이 다소 변경되었다. 먼저 1H 구간의 reset 구간에서 T2와 T3가 동시에 켜지고, T0가 diode connected TFT의 형태를 이루면서 turn on 상태가 된다. 이 때, T0에 흐르는 전류는 OLED를 거쳐서 ELVSS로 흐르게 된다. Reset 구간 이외의 나머지 동작은 그림 2의 회로와 동일하다. 그림 3의 픽셀 보상회로는 그림 2의 회로에 비해 TFT, scan line 및 power line이 각각 하나씩 없으므로 개구율이 크게 향상된다. 또한, Cstg의 a 단자에 연결된 스위치가 두 개에서 하나로 줄어들면서, 누설전류가 감소하여 데이터 유지 시간이 두 배 정도 증가한다. 그러나 그림 3과 같이 OLED를 이용한 reset 방법에는 치명적인 약점

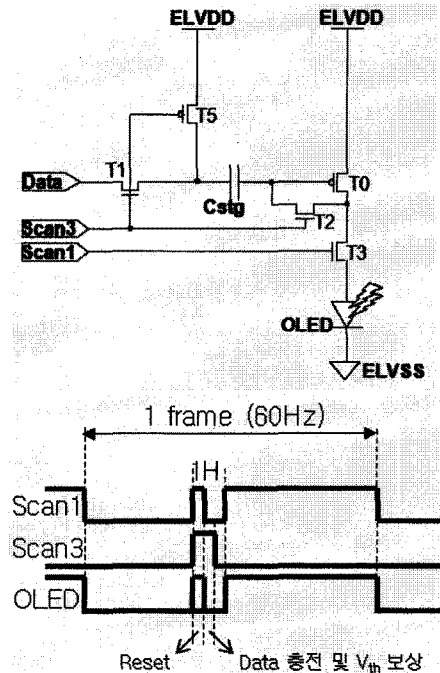


그림 3. 고 개구율 픽셀 보상회로 구조
 Fig. 3. The voltage programmed pixel circuit with high aperture ratio for compensating threshold voltage variation.

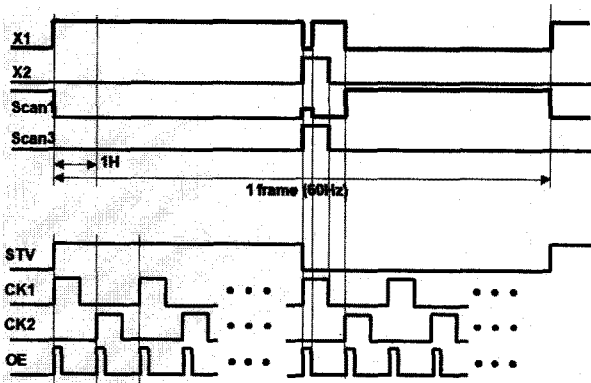


그림 7. 스캔 구동회로를 위한 타이밍도
Fig. 7. A timing diagram of the scan driver shown in fig. 6.

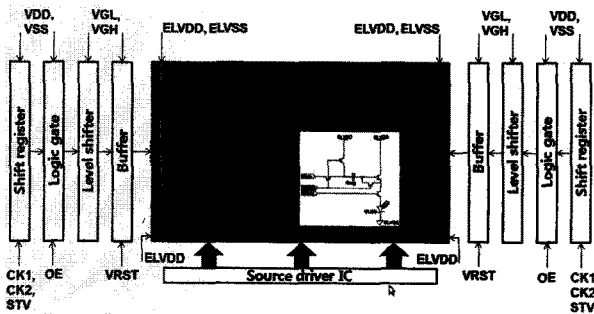


그림 8. 19.6 inch AMOLED 패널의 전체 구성
Fig. 8. A block diagram of the 19.6 inch AMOLED panel.

logic gate 블록이 필요하다. Logic gate 블록에서 생성된 제어 신호는 그 전압폭이 작기 때문에, up/down level shifter를 이용하여 LTPS TFT 구동에 적합한 전압폭이 되도록 한다. 마지막으로, buffer 블록은 그림 5에 나타난 바와 같이 level shifter를 통과한 X1, X2 신호를 이용하여 최종 제어 신호를 생성하는 데 사용한다. 스캔 구동회로를 제어하기 위한 입력 신호는 그림 7과 같이 총 네 개의 주기신호이며, OE 및 CK1(CK2) 신호의 타이밍을 조정하여 각각 reset 시간과 V_{TH} 보상 시간을 조정할 수 있다. X1, X2 신호는 아래의 Boolean 식으로 나타낼 수 있고, 이를 이용하여 그림 6의 logic gate 블록을 구성한 것이다.

$$X1\langle n \rangle = LE\langle n \rangle \& \overline{LE\langle n-1 \rangle} \& LE\langle n \rangle \& OE \quad (1)$$

$$X2\langle n \rangle = LE\langle n-1 \rangle \& LE\langle n \rangle \& CK1(\text{or } CK2) \quad (2)$$

그림 8은 앞에서 제안한 고 개구율 픽셀 보상회로와 이를 위한 스캔 구동회로를 적용하여, 배면발광방식의 19.6 inch LTPS AMOLED 패널을 구현한 것이다. 픽셀 회

로의 이차원 배열이 디스플레이 영역을 결정하며, 픽셀 제어 신호의 RC 지연을 최소화하기 위해서 디스플레이 영역 양 옆으로 스캔 구동회로를 각각 하나씩 두었다. 배면발광방식이므로 ELVSS 전원 라인의 전압 강하는 문제가 되지 않으며, ELVDD 전원 라인의 전압 강하를 최소화하기 위해 패널의 위와 아래에서 최대한 많은 패드를 이용하여 외부와 연결되도록 하였다.

IV. 결 과

19.6 inch AMOLED 패널을 설계하기 위해 top gate 방식의 1-poly 1-metal LTPS TFT 공정을 사용했다. TFT의 최소 게이트 길이는 4um이며, 표 1에 패널 설계에 필요한 주요 파라미터를 요약했다. R/G/B 3개의 sub-dot이 모여 하나의 정사각형 픽셀을 이루며, 하나의 픽셀이 낼 수 있는 최대 white 휘도는 600 nit 이다. 화면 전체가 white일 때 하나의 픽셀이 낼 수 있는 최대 white 휘도는 200 nit이며, 이 때 R/G/B 픽셀은 각각 150/381/69 nit의 휘도를 가져야 한다. 표 1에 제시한 R/G/B 휘도의 기준 값, 픽셀회로의 개구율, OLED의 발광 시간 비율, OLED의 발광 효율 등을 고려하여 각 sub-dot의 전류 값을 결정하고, 여기에 LTPS TFT의 특성을 반영하여 각 sub-dot의 구동 TFT에 대한 W/L 을 결정한다. OLED와 LTPS TFT의 특성을 고려하여 제안하는 픽셀 보상회로의 동작에 적합하도록 각 전원의 전압 레벨을 결정했다.

그림 9는 그림 2에 나타난 기존 픽셀 보상회로에 대

표 1. 19.6 inch AMOLED 패널의 주요 파라미터와 특성
Table 1. Design specifications and parameters of the 19.6 inch AMOLED panel.

패널 크기 & 해상도	19.6" (1366 × 768)
픽셀 크기	318 um × 318 um
Peak 휘도	600 nit
Full white 휘도	200 nit
Full white 시 R/G/B 휘도	R:150/G:381/B:68 (nit)
사용 전원	ELVDD/ELVSS : 1V/-13V, VDD/VSS : 5V/0V, VGH/VGL : 9V/-10V Vdata : 0 ~ 5V
Frame rate	60 Hz
Process	4um 1-poly 1-metal top-gate LTPS TFT process
Threshold voltage (typical)	N1FTT : +1.5V PTFTT : -1.5V

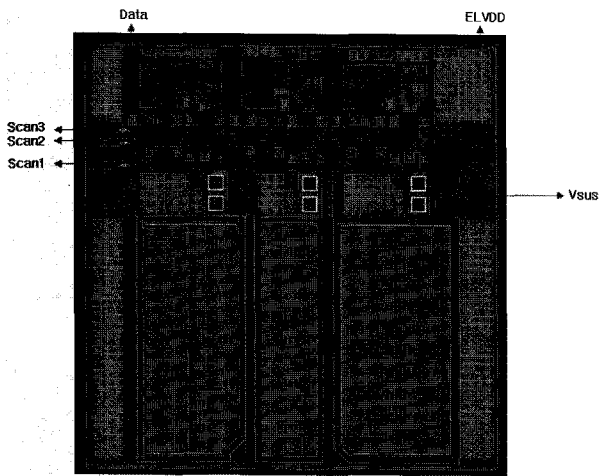


그림 9. 그림 2의 기존 픽셀 보상회로에 대한 마스크 레이아웃

Fig. 9. The mask layout for the pixel compensation circuit of fig. 2.

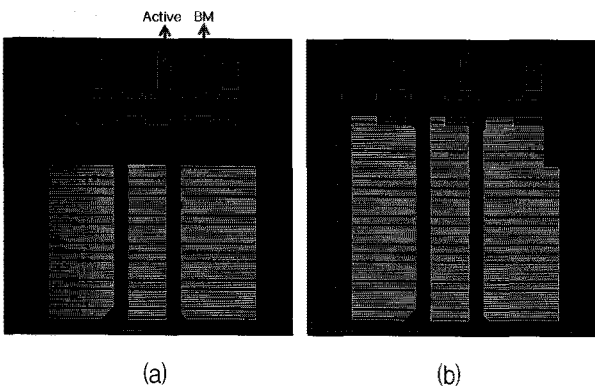


그림 10. (a)기존 픽셀 보상회로와 (b)제안하는 고 개구율 픽셀 보상회로에 대한 마스크 레이아웃

Fig. 10. The mask layout for the pixel compensation circuit of (a) fig. 2 and (b) fig. 3.

한 마스크 레이아웃을 나타낸다. OLED의 효율이 G/R/B 순으로 높음을 감안하여 각 sub-dot의 개구율을 다르게 적용한 결과이다. Cstg의 크기는 LTPS TFT의 누설전류 등을 고려하여 설정했으며, 전원 라인의 두께는 long range uniformity(LRU)가 98.5% 이상 되도록 설정한 것이다. Data 배선과 Scan 배선은 각각 소스 드라이버와 스캔 드라이버의 딜레이를 고려하여 설정했으며, 그림 9에 나타난 레이아웃의 RC 값을 기준으로 설계한 스캔 드라이버의 소비전력은 16mW 이하이다. 회로가 차지하는 면적이 크기 때문에 평균 개구율은 33.0% 밖에 되지 않는다.

그림 10은 기존 픽셀 보상회로와 제안하는 고 개구율 픽셀 보상회로에 대한 마스크 레이아웃을 비교한 것이다. 편의상 TFT의 active 영역, black matrix(BM) 영역

표 2. 그림 10의 마스크 레이아웃에 대한 개구율
Table 2. The aperture ratio for the mask layout of fig. 10.

	개구율 (%)			
	R	G	B	평균
기존 픽셀 보상회로	35.4	21.6	42.2	33.0
고 개구율 픽셀 보상회로	45.8	27.6	52.3	41.9

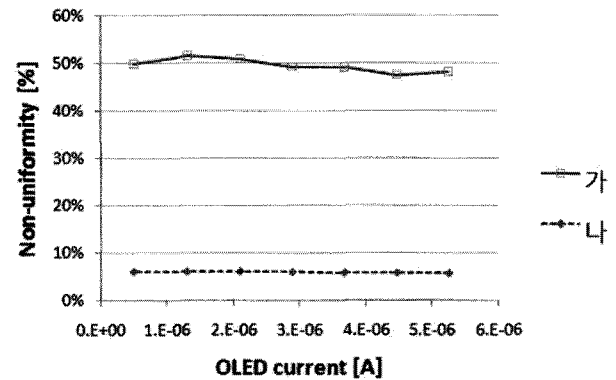


그림 11. OLED 전류에 따른 패널의 불균일도

Fig. 11. Non-uniformity of an OLED panel vs. OLED current.

과 개구부만 표시했다. 제안하는 회로의 경우, 그림과 같이 개구율이 크게 개선되는 것을 알 수 있으며, 표 2에 각각의 개구율을 요약해서 정리했다.

제안하는 고 개구율 픽셀 보상회로의 성능을 검증하기 위해 표 1에 제시한 설계 파라미터를 이용하여 HSPICE 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 11은 OLED 전류에 따른 패널의 불균일도를 나타낸 것으로, '가'는 그림 1과 같이 아무런 보상을 하지 않은 경우를 나타내고, '나'는 그림 3의 회로와 타이밍도를 적용한 결과이다. 제시한 결과는 red 픽셀에 대한 것이며, 불균일도는 OLED 전류의 최대 편차를 평균 전류로 나눈 값이라 정의했다. 그림과 같이 픽셀 보상회로에 의해 구동 TFT의 불균일도가 상당히 개선되는 것을 알 수 있다.

그림 12는 그림 3의 회로에 그림 5의 출력단을 적용한 결과로서, 제안하는 고 개구율 픽셀 보상회로가 높은 명암비를 얻을 수 있는 지 확인한 것이다. VRST 값에 따라서 T3의 on 저항이 변하고, 이는 VTH 보상 시 reset 과정에 영향을 주기 때문에, 불균일도와 명암비가 VRST에 따라서 달라진다. 사용한 OLED와 TFT 모델의 VTH 값이 각각 4.0V와 1.5V이기 때문에, 5.5V의 VRST-ELVSS 값을 전후로 T3의 on 저항이 크게 변한다. 그림과 같이 VRST가 작아지면서 T3의 on 저항

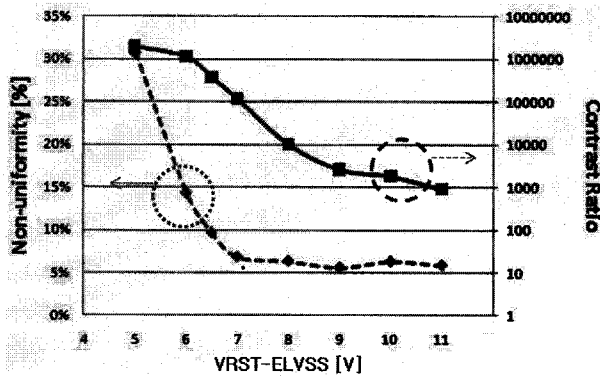


그림 12. VRST 값에 따른 패널의 불균일도와 명암비
Fig. 12. Non-uniformity and contrast ratio of an OLED panel vs. reset voltage (VRST)

이 커짐에 따라 명암비가 증가하고 균일도가 나빠지는 것을 알 수 있다. VRST-ELVSS가 7V일 때 불균일도가 6% 정도로 유지되면서 명암비가 10만:1 정도로 높은 값을 보이고 있다. TFT의 특성 편차가 향상될수록 최적의 VRST 값을 설정하는 것이 보다 용이해지므로, 명암비가 더 개선될 여지는 남아 있다.

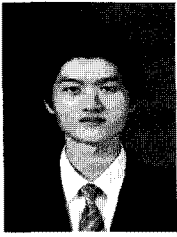
V. 결 론

대 면적, 저 전력 AMOLED 응용에 적합한 고 개구율 픽셀 보상회로와 이에 대한 구동회로를 제안하고 검증했다. 제안하는 픽셀 보상회로는 LTPS TFT를 기반으로 하는 배면발광방식에 적합하며, AMOLED 응용에서 높은 개구율을 확보하면서 명암비 특성을 높게 유지할 수 있는 장점을 가진다. 제안하는 방식은 그림 3에 나타낸 회로뿐만 아니라 reset 스위치를 별도로 사용하는 모든 픽셀 보상회로에 적용이 가능하며, TFT의 특성 편차가 개선될수록 그 장점이 극대화될 수 있다. 본 논문에서는 픽셀 보상회로를 스키메틱과 레이아웃 측면에서 함께 검증했으며, 이를 위한 구동회로와 전체 AMOLED 패널을 설계함으로써 실제 제품에 응용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] M. Stewart, R. S. Howell, L. Pires, M. K. Hatalis, W. Howard, and O. Parche, "Polysilicon VGA active matrix OLED displays-Technology and performance", *IEDM Tech Digest*, pp.871-874, 1998.
- [2] R. M. A. Dawson, et al, "The impact of the transient response of organic light emitting diodes on the design of active matrix OLED displays", *IEDM Tech Digest*, pp.875-878, 1998.
- [3] A. Nathan, G. R. Chaji, and S. J. Ashtiani, "Driving schemes for a-Si and LTPS AMOLED displays", *Journal of Display Tech.*, Vol. 1, No. 2, pp.267-277, 2005.
- [4] Y. Lin, and H. P. D. Shieh, "A novel current memory circuit for AMOLEDs", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 51, No. 6, pp.1037-1040, 2004.
- [5] J. L. Sanford, and F. R. Libsch, "TFT AMOLED pixel circuits and driving methods", *Dig. of Tech Papers, SID Int. Symp.*, pp.10-13, 2003.
- [6] J. C. Goh, J. Jang, K. S. Cho, and C. K. Kim, "A new a-Si:H thin-film transistor pixel circuit for active-matrix organic light-emitting diodes", *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 24, No. 9, pp.583-585, 2003.
- [7] S. W. Tam, et al, "Poly-Si driving circuits for organic EL displays", *Proc. SPIE*, Vol. 4295, pp.125-133, 2001.
- [8] S. H. Jung, W. J. Nam, and M. K. Han, "A new voltage-modulated AMOLED pixel design compensating for threshold voltage variation in poly-Si TFTs", *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 25, No. 10, pp.690-692, 2004.
- [9] K. C. Park, J. H. Jeon, Y. I. Kim, J. B. Choi, Y. J. Chang, Z. F. Zhan, C. W. Kim, "A poly-Si AMOLED display with high uniformity", *Solid-State Electronics*, Vol. 52, No. 11, pp. 1691-1693, Nov., 2008.
- [10] J. H. Souk, and J. Lee, "Recent picture quality enhancement technology based on human visual perception in LCD TVs", *Journal of Display Tech.*, Vol. 3, No. 4, pp.371-376, 2007.

저 자 소 개



강 홍 석(학생회원)
 2009년 가톨릭대학교 정보통신
 전자공학부 학사 졸업.
 2009년~현재 가톨릭대학교 정보
 통신전자공학부 석사과정.
 <주관심분야 : 아날로그 VLSI 설
 계, 신호취득회로>



우 두 형(정회원)-교신저자
 1999년 연세대학교
 전자공학과 학사 졸업.
 2001년 한국과학기술원
 전자전산학과 석사 졸업.
 2005년 한국과학기술원 전자전산
 학과 박사 졸업.
 2005년~2008년 삼성전자 LCD총괄 책임연구원
 2008년~현재 가톨릭대학교 정보통신전자공학부
 조교수
 <주관심분야 : 아날로그 VLSI 설계, 신호취득회
 로, AMOLED/AMLCD 구동회로>