Journal of Sensor Science and Technology Vol. 33, No. 1 (2024) pp. 56-61 http://dx.doi.org/10.46670/JSST.2024.33.1.56 pISSN 1225-5475/eISSN 2093-7563

a-IGZO TFT 기반 OLED 디스플레이 화소에 내장되는 OLED 열화 보상용 온도 센서의 개발

문승재¹·김승균¹·최세용¹·이장후¹·이종모¹·배병성^{1,+}

Development of a Temperature Sensor for OLED Degradation Compensation Embedded in a-IGZO TFT-based OLED Display Pixel

Seung Jae Moon¹, Seong Gyun Kim¹, Se Yong Choi¹, Jang Hoo Lee¹, Jong Mo Lee¹, and Byung Seong Bae^{1,+}

Abstract

The quality of the display can be managed by effectively managing the temperature generated by the panel during use. Conventional display panels rely on an external reference resistor for temperature monitoring. However, this approach is easily affected by external factors such as temperature variations from the driving circuit and chips. These variations reduce reliability, causing complicated mounting owing to the external chip, and cannot monitor the individual pixel temperatures. However, this issue can be simply and efficiently addressed by integrating temperature sensors during the display panel manufacturing process. In this study, we fabricated and analyzed a temperature sensor integrated into an a-IGZO (amorphous indium-gallium-zinc-oxide) TFT array that was to precisely monitor temperature and prevent the deterioration of OLED display pixels. The temperature sensor was positioned on top of the oxide TFT. Simultaneously, it worked as a light shield layer, contributing to the reliability of the oxide. The characteristics of the array with integrated temperature sensors were measured and analyzed while adjusting the temperature in real-time. By integrating a temperature sensor into the TFT array, monitoring the temperature of the display became easier and more accurate. This study could contribute to managing the lifetime of the display.

Keywords: Oxide semiconductor, Thin-film transistor, Temperature sensor, Integration, Pixel circuit, Anti-deterioration

1.서 론

박막 트랜지스터(TFTs, thin film transistors)는 OLED (organic light emitting diode)와 같은 디스플레이의 스위칭 소자로 활용 되어 왔다. OLED 디스플레이의 경우, TFT는 구동의 역할과 동 시에 각 화소에 공급되는 전류의 양을 조절하여 필요한 밝기를 조절하는 중요한 역할을 한다 [1]. 이러한 TFT 특성의 변동과 불균일 발생은 디스플레이의 품질을 저하시키므로 잘 제어되어 야 한다. TFT의 특성 및 디스플레이 화질에 영향을 줄 수 있는 여러 요소가 존재하며 온도도 화질에 영향을 주는 중요한 요소이다. OLED와 같은 전류 구동형의 디스플레이의 경우 온도의 변화는 전류의 변화를 유발시켜 화질에 영향을 주게 된다. 장시간 디 스플레이가 구동되는 동안 구동 회로 또는 칩(chip)에서 발생되 는 열이나 주변 온도 등 다양한 외부 요인에 따라 패널 온도의 변화가 생기고 TFT에 인가되는 전류의 값이 변하게 되며, 디스 플레이의 휘도 변화로 이어져 밝기가 균일하지 않게 되는 품질 저하가 발생한다 [2,3].

이러한 품질 저하를 방지하기 위하여, Kang et al은 a-Si:H TFT backplane의 표면에 형성되는 온도 센서와 피드백 알고리 즘을 갖춘 온도 보상 시스템을 제안하였다 [4]. 디스플레이 백 플레인 기판 가장자리에 온도 센서를 집적하고 온도 센서를 통 해 패널의 온도를 감지하고 온도 보상 시스템의 피드백에 따라 AMOLED 디스플레이의 밝기를 실시간으로 보상하도록 하였다 . 온도에 따른 디스플레이 품질의 저하를 온도 모니터링과 피드 백 루프를 통해 방지하도록 한 것이나 디스플레이 되는 화소 바 깥 쪽에 온도 센서가 위치하고 있어 실제 화소 부분의 온도를

¹호서대학교 반도체공학과 (Department of Semiconductor Engineering, Hoseo University)

²nd Engineering Building, 20, Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do 31499, Republic of Korea

⁺Corresponding author: bsbae3@hoseo.edu

⁽Received: Jan. 8, 2024, Revised: Jan. 22, 2024, Accepted: Jan. 24, 2024)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(https://creativecommons.org/ licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Development of a Temperature Sensor for OLED Degradation Compensation Embedded in a-IGZO TFT-based OLED Display Pixel

측정하지 못하는 단점이 있다. 각 화소에 온도 센서가 집적이 되면 화소 단위로 온도의 변화를 측정할 수 있어 더욱 정밀하 게 온도에 따른 특성 변화를 보상할 수 있다.

디스플레이 패널에 집적이 가능한 온도 센서에는 다양한 종 류가 있다. Coplanar-top gate구조의 N 형 폴리 실리콘 TFT의 게이트와 드레인을 연결한 다이오드 형 [5], p형 LTPS와 n형 a-IGZO TFT의 각기 다른 off-current의 온도 의존성을 이용한 CMOS 형 [6], 열전(thermoelectric) 및 열전대(thermocouple)형 [7], 그리고 박막형 금속 온도 센서 [8] 등이 있다. 이 중, 박막 형 금속 온도 센서는 다른 온도 센서 후보들과 비교하여 공정 이 단순하며, 백플레인 공정에서 사용되는 재료를 이용하여 구 현 가능한 장점이 있다.

그리고, 온도 변화에 따른 금속의 저항 변화를 이용하여 온도 변화를 감지하기 때문에 센서의 감도는 온도 계수가 클수록 높 아지는 특징이 있다. 하지만, 이러한 온도 센서는 감지 금속 저 항의 전압변화를 측정하기 위해서 기준 저항이 필요하고 외부 저항기 (external reference resistor)가 직렬로 연결이 되어 직류 전원에 연결된다. 이 경우, 외부 저항기가 주위 온도의 영향을 받아 저항이 변할 수 있어 측정 에러가 생기는 단점이 있다. 따 라서, 외부 저항기를 사용하지 않는 금속 온도 센서의 개발을 통한 정확도 개선이 필요하다.

Jeon 등은 이러한 기존 온도 센서의 문제를 개선하고 외부 저 항기를 사용하지 않기 위한 방법으로 온도 계수가 다른 두 개 의 도체를 직렬로 연결이 되도록 집적하고, 양끝에 DC 전압을 인가하여 두 금속의 접합 (junction)지점에서 온도에 따른 전압 변화를 측정하였다 [9].

디스플레이 패널을 구성하는 TFT에는 다양한 종류가 있다. 그 중, 산화물 TFT는 그 다양한 장점 때문에 실리콘을 기반으 로 하는 TFT를 대체할 수 있는 소자로 주목받아왔다. 비정질 실리콘 대비 높은 이동도, LTPS 대비 우수한 균일도와 저렴한 공정 비용 등이 그 특징이다. 또한, 낮은 누설 전류로 우수한 회 로를 구현할 수 있는 가능성이 있다. 하지만, 산화물 TFT의 큰 단점은 광 신뢰성이 좋지 않은 것이다 [10]. 특히, 음의 바이어 스 스트레스(negative-bias stress)와 빛이 동시에 가해지면 더욱 큰 특성의 변화가 유발이 된다.

이러한 빛에 의한 특성의 변화를 억제하기 위하여 산화물 반 도체 층 위에 광 차단 층(LS layer, light shielding layer)을 추가 하는 방법이 적용되고 있다 [11,12].

본 연구는, 화소마다 온도 센서가 함께 집적되어 디스플레이 구동 중 패널의 온도변화를 각 화소 단위로 측정할 수 있도록 한 것이다. 각 화소 별 온도를 측정하고 이를 보상하도록 하여 품질 저하를 방지할 수 있는 화소 어레이를 설계 제작하고 측 정 분석하였다. 또한, 온도 센서를 산화물 TFT의 신뢰성을 확 보할 수 있는 light shielding layer로 활용할 수 있도록 설계하 여 광신뢰성을 향상시켰다.



Fig. 1. Cross-sectional structure of the fabricated BGBC a-IGZO TFT with a temperature sensor on it, which is consist of two difference metal electrodes.

2. 연구 방법

2.1 BGBC 구조의 a-IGZO TFT의 제작 방법

Fig. 1에서 보는 바와 같이, Bottom-gate bottom contact (BGBC) 구조의 a-IGZO TFT가 제작되었고, 온도 센서가 TFT 상부에 배 치 되어 active layer인 a-IGZO의 light shielding 역할을 할 수 있 도록 하였다. 200 nm 두께의 Tantalum (Ta) gate 전극을 DCmagnetron sputtering으로 증착하였다. Gate 전극은 reactive-ion etching (RIE)를 통해 패터닝되었다. 다음으로 80 nm 두께의 Aluminum Oxide (Al₂O₃) 게이트 절연막(GI, gate insulator)이 원 자층 증착기(ALD, atomic layer deposition)를 통해 증착되었다 . Gate 전극과의 contact hole형성을 위해서 80°C에 3분간 인산 (Phosphoric acid)용액을 이용하여 습식 식각 (Wet etching)하였 다. 다음으로 150 nm 두께의 ITO가 source and drain 층으로 RF magnetron sputtering으로 증착되었고, 습식 식각을 통해 패터닝 되었다. 활성층인 a-IGZO는 30 nm 두께로 RF magnetron sputtering으로 증착되었다. 증착에 사용된 a-IGZO의 타겟의 조 성비는 In:Ga:Zn = 2:1:2 at%이다. 증착 된 a-IGZO는 버퍼옥사 이드 식각액(Buffer Oxide Etchant, BOE)을 초순수에 300:1 비 율로 희석한 용액을 사용하여 습식 식각하였다. a-IGZO가 증착 후 산소(O₂)분위기의 250°C에서 1시간동안 후열처리 되었다.

2.2 온도 센서가 집적 된 TFT array 제작

Fig. 2(a)와 같이, 화소 회로는 외부 보상 화소 회로인 3TR 1C 로 설계되었으며 화소 4개가 연결된 구조로 array화 하였다. 이 화소 회로 위에 온도센서가 각 화소에 집적이 되도록 하였으며 제작이 된 현미경 사진은 Fig. 2(b)와 같다.

TFT array와 온도 센서사이의 절연을 위하여 층간 절연막 (ILD, interlayer dielectric)을 증착하였고, sputtering의 plasma에 의한 a-IGZO의 열화를 방지하기 위해서 negative photoresist (Su-8 2000.5, Microchem Corp., MA)를 1 μm 두께로 스핀 코팅을 통해 형성하였다. 온도 센서에는 TFT array에 사용되는 재료인 Ta과 ITO를 사용하였다. Ta은 '저항 1 (Resistor 1)'로써 200 nm 두께로 TFT공정과 동일한 방법으로 증착하고 패터닝 하였다. Seung Jae Moon, Seong Gyun Kim, Se Yong Choi, Jang Hoo Lee, Jong Mo Lee, and Byung Seong Bae



Fig. 2. (a) schematic of a pixel, and (b) optical microscopic view of the fabricated TFT array with the integrated temperature sensor.

다음으로 150 nm로 증착 한 ITO가 '저항 ₂ (Resistor ₂)'로써 동 일하게 습식 식각하여 집적시켰다. 제작된 온도 센서는 입력 전 압 (V_{in}), 출력 전압 (V_{out}), 접지 (GND, ground)의 세 신호를 위 한 패드를 형성하여 측정하도록 하였다.

2.3 온도 센서의 평가 방법

Fig. 3은 측정 시스템으로써 상온에서 빛이 차단된 dark box 안에 맞춤 제작된 probe card를 이용하여 온도 센서가 집적된 TFT array의 측정을 진행하였다. 제작된 sample을 hotplate에 위 치 후 thermocouple을 연결하여 실제 기판 온도를 측정하였다. 1 V의 DC 전압을 V_{in} node를 통해 온도 센서에 인가하며 온도 변화에 따른 V_{out} node의 전압을 측정하였다. 화소 회로 위 온도 센서의 특성을 측정하여 Sensitivity, Hysteresis, 그리고 Repeatability를 [9] 구하고 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 센서가 집적된 단일 a-IGZO TFT 소자의 평가

디스플레이 화소 회로 위에 집적된 온도 센서 동작을 확인하



Fig. 3. Measurement systems and methods: (a) Connecting the probe card to the temperature sensor integrated TFT array, (b) measuring temperature changes using a hot plate and determining the panel temperature using a thermocouple.

기 전에 단일 온도 센서 및 단일 TFT를 제작하여 평가하였다. 온도 센서가 상부에 위치하는 TFT의 전기적 특성을 평가한 후 TFT위에 위치한 온도 센서가 a-IGZO TFT의 상부에서 차광 효 과를 갖는지를 확인하였다.

W/L이 20/10, 50/10인 두 TFT의 특성은 Fig. 4 와 같다. 두 TFT 모두 온도 센서가 집적된 상태에서 측정이 되었다. 온도 센서가 TFT 위에 공정이 진행되어 집적이 된 후에도 TFT가 정상 동작 하는 것을 잘 보여 준다. 이는 TFT 제작 후 온도 센서 제작을 위 해서 추가된 ILD와 Ta & ITO 전극들이 TFT의 동작 특성에 큰 영향을 주지 않는 것을 의미한다. 주요 파라미터는 Table 1에 나타냈다.

a-IGZO TFT의 channel 위에 제작된 온도 센서의 차광 효과 는 저자들의 이전 연구결과에서 온도 센서의 유·무에 따른 PBIS (positive-bias illumination stress) 측정 결과에 의해 확인이 되었 다. 300 초 간격으로 0~1200 초 범위의 스트레스 시간을 사용 하여 10 V의 V_{ds}에서 측정되었으며 TFT위에 온도 센서가 있는 경우가 없는 경우 보다 특성의 변화가 작고 빛에 의한 영향을 받지 않아 온도 센서의 차광 효과가 확인되었다.

3.2 TFT pixel array에 집적된 온도 센서의 평가

온도 센서에 사용된 온도 계수가 다른 두 종류의 금속 Ta과

Development of a Temperature Sensor for OLED Degradation Compensation Embedded in a-IGZO TFT-based OLED Display Pixel



Fig. 4. Electrical characteristics of two different temperature sensor integrated a-IGZO TFTs on TFT array. (a) and (c) are transfer and output characteristics of W/L = $20 \mu m / 10 \mu m$, (b) and (d) are transfer and output characteristics of W/L = $50 \mu m / 10 \mu m$.

Table 1. The extracted electrical parameters of a temperature sensor integrated a-IGZO TFTs at V_{ds} equal to 10 V in two different channel dimensions.

W/L (μm/ μm)	μ_{FE} (cm ² /V·s)	V _{TH} (V)	I _{ON} /I _{OFF} ratio	S.S. (V/dec)
20/10	14.47	4.53	3.13 e ⁶	0.18
50/10	9.75	4.15	$4.27 e^{6}$	0.17

ITO의 비저항은 각각 ρ_{0Ta} = 198.2 μΩ·cm 그리고 ρ_{0TO} = 525.0 μΩ·cm 정도이고 온도 계수는 약 2 배 차이가 나서 직렬 연결된 금속 저항의 온도 변화 값을 이용하여 외부 기준 저항 기 없이 온도 측정이 가능하다.

온도 센서를 평가하기 위해서온도 센서의 V_{in}으로 전압을 공 급하고 V_{out}에서 온도에 따른 전압의 변화를 electrometer를 이 용하여 측정하였다. 외부광의 유입이 평가에 주는 영향을 배제 하기 위해서 측정 시스템을 dark box에 위치시키고 측정이 진 행되었다. 온도 센서를 평가하는 여러 지표 중, 감도 (sensitivity), 히스테리시스 (hysteresis), 그리고 반복성 (repeatability) 등에 대 해 분석을 하였다. 디스플레이 구동 중 발생되는 온도의 변화를 재현하기 위하여 제작된 TFT array에 집적된 온도 센서를 hot plate에 올려 두고 온도 25°C에서 120°C로 5°C 간격으로 올리 며 서서히 올리며 측정을 진행했다.

위 Fig. 5는 화소 회로에 집적된 온도 센서를 hot plate로 가 열하며 그 출력 전압을 측정한 결과와 이론적으로 계산된 값의 비교이다. 측정된 결과는 이론적인 값과 약간의 차이를 보였으 나 그 차이가 크지 않았으며 수식 (1)의 정의에 따라 온도 센서 의 sensitivity를 계산하였고TFT array에 집적된 온도 센서의 sensitivity는 0.84 mV/°C 였다.



Fig. 5. Output voltage of the proposed temperature sensor in measured and theoretical results (applied voltage = 1 V).



Fig. 6. Measured result of hysteresis of the proposed temp-erature sensor (applied voltage = 1 V).

Sensitivity
$$(v/^{\circ}C) = \frac{\Delta V_{Out}}{\Delta T}$$
 (1)

좀 더 정확한 온도 센서의 평가를 위해서, Fig. 6과 같이, 온 도를 증가시키며 측정한 값과 반대로 다시 온도를 내리면서 측 정한 값을 비교하였다.

이상적으로 온도를 올리면서 측정한 값과 온도를 내리면서 측 정한 값이 같아야 하지만 이 두 값이 약간 상이하여 히스테리 시스가 발생하며 수식 (2)를 이용하여 히스테리시스를 계산하였다.

Hysteresis (%) =
$$\frac{y_2 - y_1}{ESO} \times 100\% FSO$$
 (2)

식에서 FSO는 full-scale output이고, y₁은 ideal curve에서 위 로 가장 많이 벗어난 값, y₂는 ideal curve에서 아래로 가장 많 이 벗어난 값이다. 측정값으로부터 계산된 온도 센서의 hysteresis 는 3.93%FSO였다. 센서의 매우 낮은 hysteresis 값과 열화 없는 출력 값은 온도센서가 안정적임을 의미한다.

다음으로, Fig. 7과 같이, 동일한 환경과 조건에서 여러 번 측 정하여 온도 센서의 repeatability를 평가하였다. 동일한 조건에



Fig. 7. Repeatability results based on three consecutive measurements of the proposed temperature sensor. (applied voltage = 1 V).

 Table 2. Comparison between the independent temperature sensor and the proposed temperature sensor, along with a comparison with two reference characteristics.

Parameters	Independent temperature sensor	TFT array Integrated temperature sensor	Ref. [7].	Ref. [13]
Temperature range	25-120		25-200	30-100
Sensitivity	0.85 mV/°C	0.84 mV/°C	0.2 mV/°C	1.8 mV/°C
Hysteresis	3.56%FSO	3.93%FSO	-	4.49%FSO
Repeatability	0.04%FSO	0.05%FSO	1.35%FSO	0.06%FSO

서 동일한 온도 센서를 3번 반복 측정하여 얻어진 출력 값으로 부터 계산된 오차는 0.05%FSO였다.

TFT array에 집적된 온도 센서의 sensitivity, hysteresis, 그리 고 repeatability를 단일 온도 센서를 제작하여 동일한 평가를 진 행하였다. 또한 추출된 값들을 Table 2에 요약한 바와 같이 2개 의 다른 연구에서 얻어진 값과 비교하였다. 온도 센서가 단독으 로 있을 때보다 TFT array에 집적되었을 때 전체적으로sensitivity 의 감소, hysteresis값과 repeatability 오차의 증가 등이 있었지 만 그 차이가 매우 작다. 때문에, 제안한 바와 같이 TFT array 위에 집적되어 있는 온도 센서의 특성은 단일 온도 센서와 큰 차이 없이 잘 동작한다고 판단할 수 있다. 다음으로, 참고 문헌 의 값들과 제안된 온도 센서의 각 파라미터를 비교했을 때, sensitivity가 다소 부족하지만 hysteresis와 repeatability는 우수 한 것으로 확인되었다.

4.결 론

본 연구에서는, 디스플레이 패널의 각 화소에서의 온도 변화

를 모니터링 할 수 있도록 온도 센서를 집적한 TFT 화소 array 를 제작하고 분석하였다. 금속 박막 온도 센서를 채택함으로써 공정이 복잡해지지 않고 TFT 공정의 재료를 사용할 수 있도록 하였다. 적용된 온도 센서는 온도 계수가 다른 두 금속을 직렬 로 연결사용 하여 외부 저항기를 사용하지 않도록 하였다. 따라 서, 제안된 온도 센서는 별도의 외부 저항이 필요하지 않으므로 외부 온도에 의한 센싱 오차를 줄일 수 있다. 또한, 온도 센서 가 a-IGZO TFT의 산화물 층 위에 위치하도록 설계하여 온도 감지의 역할과 동시에 산화물 반도체의 신뢰성 확보를 위한 차 광층의 역할을 동시에 할 수 있도록 하였다. 화소 회로 위 온도 센서의Sensitivity, Hysteresis, 그리고 Repeatability를 정량적으 로 평가하였고, 각각 0.84 mV/°C, 3.93%, 그리고 0.05%로 안정 적인 동작 특성이 확인되었다. 본 연구에서 제안된 화소에 집적 되는 온도 센서는 디스플레이 패널에 적용되어 각각의 화소 별 온도를 감지하고 전달하여 피드백을 통하여 온도 상승에 따른 디스플레이 화질 저하를 보상하는데 기여할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원 을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입 니다. (2021RIS-004)

REFERENCES

- D. Ji, J. Jang, J. H. Park, D. Kim, Y. S. Rim, D. K. Hwang, and Y. Y. Noh, "Recent progress in the development of backplane thin film transistors for information displays", *J. Info. Disp.*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-11, 2021.
- [2] K. Kwak, K. Cho, and S. Kim, "Analysis of thermal degradation of organic light-emitting diodes with infrared imaging and impedance spectroscopy", *Opt. Express*, Vol. 21, No. 24, pp. 29558-29566, 2013.
- [3] R. Fan, X. Fan, and Z. Tu, "Influence of ambient temperature on OLED lifetime and uniformity based on modified equivalent lifetime detection", *J. Soc. Inf. Disp.*, Vol. 27, No. 10, pp. 597-607, 2019.
- [4] C. H. Kang, J. H. Kim, H. H. Lee, W. K. Ha, H. S. Kim, and Y. H. Tak, "3.3: Real Time Brightness Compensation for a-Si: H TFT Backplane AMOLED", *SID Symposium Digest* of *Technical Papers*, Vol. 40, No. 1, pp. 9-11, 2009.
- [5] T. C. Lu, H. W. Zan, and M. D. Ker, "Temperature coefficient of poly-silicon TFT and its application on voltage reference circuit with temperature compensation in LTPS process", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 55, No. 10, pp. 2583-2589, 2008.
- [6] A. Bakker, and J. H. Huijsing, "Micropower CMOS temperature sensor with digital output", *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 31, No. 7, pp. 933-937, 1996.

Development of a Temperature Sensor for OLED Degradation Compensation Embedded in a-IGZO TFT-based OLED Display Pixel

- [7] L. Yang, Z. G. Chen, M. S. Dargusch, and Jin Zou, "High Performance Thermoelectric Materials: Progress and Their Applications", *Adv. Energy Mater.*, Vol. 8, No. 6, p. 1701797, 2018.
- [8] A. S. Fiorillo, C. D. Critello, and S. A. Pullano, "Theory, technology and applications of piezoresistive sensors: A review", *Sens. Actuator A Phys.*, Vol. 281, pp. 156-175, 2018.
- [9] H. S. Jeon, and B. S. Bae, "Temperature sensor without reference resistor by indium tin oxide and molybdenum", J. Sens. Sci. Technol., Vol. 19, No. 6, pp. 483-489, 2010.
- [10] T. Kim, C. H. Choi, J. S. Hur, D. Ha, B. J. Kuh, Y. Kim, M. H. Cho, S. Kim, and J. K. Jeong, "Progress, challenges, and opportunities in oxide semiconductor devices: a key building block for applications ranging from display backplanes

to 3D integrated semiconductor chips", *Adv. Mater.*, Vol. 35, No. 43, p. 2204663, 2023.

- [11] P. T. Liu, Y. T. Chou, L. F. Teng, F. H. Li, C. S. Fuh, and H. P. D. Shieh, "Ambient stability enhancement of thin-film transistor with InGaZnO capped with InGaZnO: N bilayer stack channel layers", *IEEE Electron Device lett.*, Vol. 32, No. 10, pp. 1397-1399, 2011.
- [12] H. J. Shin and T. W. Kim, "Ultra-high-image-density largesize organic light-emitting devices based on In-Ga-Zn-O thin-film transistors with a coplanar structure", *Opt. Express*, Vol. 26, No. 13, pp. 16805-16812, 2018.
- [13] H. S. Jeon, S. H. Cho, Y. W. Heo, and B. S. Bae, "Novel Temperature Sensor Fabricated with Oxide and Metal", *Materials Science Forum*, Vol. 674, pp. 201-206, 2011.