

ZnO-SnO₂ 투명박막트랜지스터의 동작에 미치는 게이트 절연층의 영향

천영덕¹, 박기철², 마대영^{1,a}

¹ 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원

² 경상대학교 반도체공학과 및 공학연구원

Effects of Gate Insulators on the Operation of ZnO-SnO₂ Thin Film Transistors

Young Deok Cheon¹, Ki Cheol Park², and Tae Young Ma^{1,a}

¹ Department of Electrical Engineering and ERI, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

² Department of Semiconductor Engineering and ERI, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

(Received January 21, 2013; Revised February 13, 2013; Accepted February 21, 2013)

Abstract: Transparent thin film transistors (TTFT) were fabricated on N⁺ Si wafers. SiO₂, Si₃N₄/SiO₂ and Al₂O₃/SiO₂ grown on the wafers were used as gate insulators. The rf magnetron sputtered zinc tin oxide (ZTO) films were adopted as active layers. N⁺ Si wafers were wet-oxidized to grow SiO₂. Si₃N₄ and Al₂O₃ films were deposited on the SiO₂ by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) and atomic layer deposition (ALD), respectively. The mobility, I_{on}/I_{off} and subthreshold swing (SS) were obtained from the transfer characteristics of TTFTs. The properties of gate insulators were analyzed by comparing the characteristics of TTFTs. The property variation of the ZTO TTFTs with time were observed.

Keywords: Transparent thin film transistors, Zinc tin oxide, Gate insulators, Mobility, Sunthreshold swing

1. 서 론

유기발광다이오드(OLED) 기술 [1,2]의 발달과 함께 디스플레이 업계의 해상도 경쟁은 더욱 가열되고 있다. 대부분의 OLED 디스플레이는 박막트랜지스터를 스위칭 소자로 사용하는 능동형 (active matrix) 구동 방식 [3]을 채택하고 있다. 기존의 능동형 액정디스플레이 (TFT-LCD) 등에 사용된 스위칭 소자로써는 다결

정실리콘 박막트랜지스터가 주로 사용되어 왔으나, 최근에는 발광화소의 밀도를 높일 수 있는 방법의 일환으로 투명박막트랜지스터 (transparent thin film transistor, TTFT) [4,5]에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다.

TTFT는 물성과 제조공정이 잘 알려져 있는 ZnO를 활성층 (active layer)으로 사용하며 출발하였으나, 강한 c축 성장에 의해 발생하는 ZnO 표면의 거친 입계 (grain boundary)는 TTFT의 이동도 개선에 걸림돌이 되었다. 이를 극복하기 위하여 최근에는 인듐 (In), 주석(Sn), 갈륨(Ga) 등 원자의 외곽 전자분포 형태가 (n-1)d¹⁰ns⁰ (n≥4)인 중금속 양이온을 ZnO와 혼합시킨 박막에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다

a. Corresponding author; tyma@gnu.ac.kr

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

[6,7]. ZnO에 적당량의 중금속 양이온을 배합하면 비정질 형태의 박막을 얻을 수 있다. 일반적으로 비정질 박막은 입계가 없는 까닭에 다결정 박막에 비해 표면이 평탄하나 결정성의 결여에 의해 반송자의 이동도가 낮다. 그러나 외곽 전자가 $(n-1)d^{10}ns^0$ ($n \geq 4$) 궤도에 분포하고 있는 금속 산화물은 비정질임에도 불구하고 높은 전자이동도를 나타내는 것으로 보고 [8]되어 있다. 이것은 반경이 큰 구 모양인 ns 양자궤도들의 중첩에 의해 박막의 결정구조에 영향을 받지 않는 전자의 이동경로가 산화물 박막 안에 형성되기 때문이다.

본 연구팀에서는 ZnO에 SnO₂를 혼합하여 비정질 박막 (zinc tin oxide, ZTO)을 얻은 후 ZTO 비정질 박막을 사용하여 10 cm²/V sec 이상의 높은 이동도를 갖는 TTFT를 개발한 바 있다 [9]. TTFT는 이동도, 전류비 (I_{on}/I_{off}) 등에서 괄목할만한 성과를 거두어 왔지만 아직도 각 공정요소의 개선이 진행되고 있다. TTFT의 이동도, 문턱전압 등에는 반도체인 활성층의 특성이 주된 영향을 미치지만 전계를 전달하는 게이트절연층의 역할 역시 활성층 못지않게 중요하다. 따라서 본 연구팀에서는 TTFT의 게이트절연층으로 널리 사용되고 있는 SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃가 ZTO TTFT의 이동도, 문턱전압 및 전류비 (I_{on}/I_{off})에 미치는 영향을 조사하였다. 게이트전극이 아래쪽에 있는 TTFT 구조를 채택함에 따라 ZTO막이 게이트절연층 위에 증착되게 된다. 그러므로 증착 초기부터 활성층이 게이트절연층의 영향을 받을 것으로 추측된다. 본 연구의 결과는 양질의 TTFT 제조를 위한 게이트절연층의 선택에 도움이 될 것으로 기대한다.

2. 실험 방법

그림 1에 본 연구팀에서 제조한 TTFT의 구조를 나타내었다. N⁺ 실리콘웨이퍼 위에 TTFT를 제작하였다. 이때 저항이 낮은 N⁺ 실리콘웨이퍼를 게이트전극으로 사용하였다. 본 연구에서는 3 종류의 게이트절연층을 사용하여 TTFT를 제조하고 그 특성을 비교하였다. 우선은 SiO₂막을 게이트절연층으로 사용하여 TTFT를 제조하였다 (SO-TTFT). SiO₂는 MOSFET의 게이트절연체로서 대표적인 물질이다. 실리콘의 자연산화막인 SiO₂는 3.9 부근의 크지 않은 유전율을 가지고 있지만, 실리콘과의 선택에칭이 용이하고 유전손이 적어서 집적회로 공정의 분리 (isolation), 보호 (passivation), 절연 (insulator)막으로 널리 사용되고 있다.

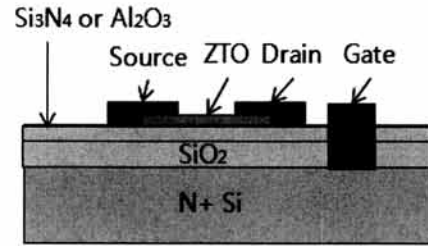


Fig. 1. Schematic diagram for the structure of ZTO TTFTs.

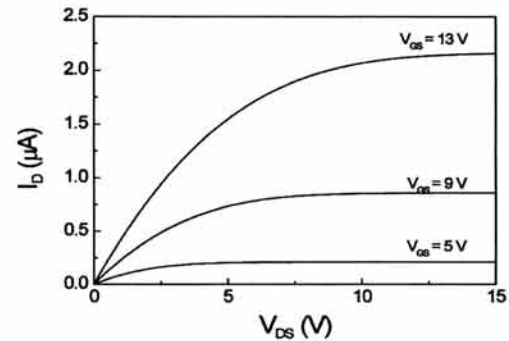


Fig. 2. Output characteristics of ZTO TTFT. ~50 nm-thick Al₂O₃ film coated on ~100 nm-thick SiO₂ was used as a gate insulator.

다음으로는 Si₃N₄막을 게이트절연층으로 사용하여 TTFT (SN-TTFT)를 제작하였다. Si₃N₄는 약 7.5의 높은 유전율을 갖으며 화학적으로 매우 안정한 것으로 알려져 있다. 그러나 실리콘과의 기계적인 특성 차이가 크기 때문에 실리콘 위에 Si₃N₄막을 증착할 때는 SiO₂막을 완충층 (buffer layer)으로 사용해야만 한다. 따라서 본 실험에서는 습식산화로 ~100 nm의 SiO₂막을 기른 후 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition)로 Si₃N₄막을 ~100 nm 증착하였다. 마지막으로 Al₂O₃를 게이트절연막으로 입혀 TTFT를 제작하였다 (AO-TTFT). 약 8의 유전율을 갖는 Al₂O₃막은 기계적 강도가 강하고 화학적으로 안정되며 열전도성이 우수하다. Al₂O₃막은 SiO₂나 Si₃N₄막에 비해 증착이 용이하지 않다는 단점이 있었으나 최근 ALD의 개발과 함께 저온에서도 우수한 절연특성을 갖는 Al₂O₃막이 보고 [10]되고 있다. 본 실험에서는 실리콘웨이퍼와의 접착력을 향상시키기 위해 완충층으로 ~100 nm의 SiO₂를 습식산화한 다음 Al₂O₃막을 ALD (atomic layer deposition)로 증착하였다.

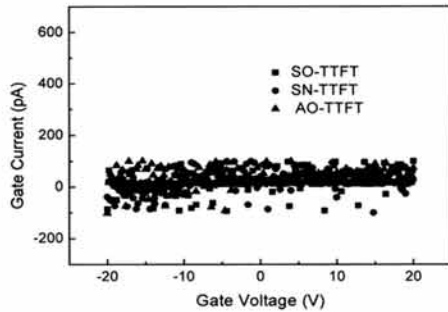


Fig. 3. Gate current (I_G) vs. gate-source voltage (V_{GS}).

그림 2는 AO-TTFT의 출력 특성을 대표로 나타낸 것이다. 본 실험에서 제작한 모든 TTFT에서 그림 2와 같이 선형영역과 포화영역이 잘 구분되는 전형적인 MOSFET의 출력 특성을 얻을 수 있었다. TTFT의 활성층을 형성하기 위하여 ZTO막을 고주파 스퍼터링 (rf magnetron sputtering)하였다. Kurt J. Lesker사에 주문·제작한 Zn와 Sn의 원자비가 2:1인 ZTO 타겟을 챔버압력 5 mtorr에서 고주파 전력 70 W로 10분 동안 스퍼터링하였다. 10분간 스퍼터링한 ZTO막의 두께는 약 60 nm였다. 스퍼터링을 위해 챔버에 주입한 아르곤의 유량은 50 sccm이었으며, ZTO막의 화학양론적 특성을 향상시키기 위하여 15 sccm의 산소를 아르곤과 함께 주입하였다. 증착한 ZTO를 400°C에서 5분 동안 급속 열처리하였다. 열처리한 ZTO막 위에 ~600 nm의 인듐을 진공 증착하여 소스 및 드레인 전극을 만들었다. 레이저 가공한 스테인레스 마스크를 사용하여 활성층 및 소스-드레인 전극을 패터닝하였으며, 제조된 TTFT의 채널 너비는 0.5 mm, 길이는 0.4 mm였다. Kethley사의 semiconductor parameter analyzer를 사용하여 출력특성 ($I_{DS}-V_{DS}$) 및 전달 특성($I_{DS}-V_{GS}$)을 측정하였으며, 그 측정 결과로부터 문턱전압(V_T), 이동도(μ), SS (subthreshold slope)를 구하였다. 전달 특성의 기술기로부터 μ 를 구하였으며, SS로부터 계면포획전하밀도(D_{it})를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 게이트절연체에 따른 ZTO TTFT의 특성 변화

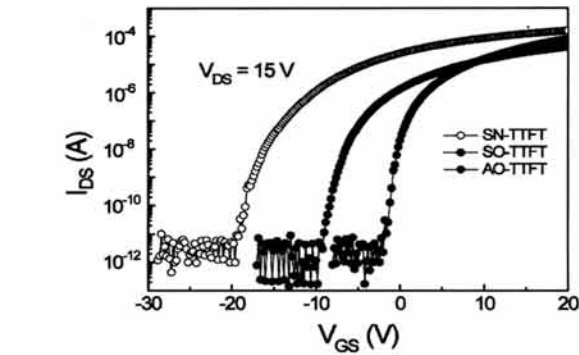


Fig. 4. Transfer characteristics of ZTO TTFTs.

본 연구팀에서는 절연막 위에 ZnO를 증착한 후 두 박막 사이의 전류-전압 특성을 측정해 왔다 [11]. ZnO를 증착한 ~110 nm 두께의 SiO_2 막에 10 V의 전압을 인가하면 1 μ A 정도의 큰 전류가 흘렀으나, ~50 nm 두께의 Si_3N_4 와 Al_2O_3 막을 다층으로 증착할 경우 누설전류가 0.1 nA 이하로 감소하였다. 그러나 TTFT의 게이트로 사용한 습식산화막 (~230 nm)의 경우에는 0.1 nA 이하의 누설전류가 측정되었으며 Si_3N_4 및 Al_2O_3 다층막과 차이를 나타내지 않았다.

그림 3에 게이트전압에 따른 게이트 누설전류를 나타내었다. 이때 인가된 소스-드레인 전압은 15 V였다.

그림 4는 TTFT들의 전달 특성을 비교한 것이다. 동작전압 (on-voltage)은 SN-TTFT (-18.0 V), SO-TTFT (-9.0 V), AO-TTFT (-3.0 V) 순으로 증가하였으며, I_{on}/I_{off} 는 세 경우 모두 10^7 을 상회하는 높은 값을 나타내었다. TTFT의 전달 특성으로부터 이동도를 구하였다. 이동도는 드레인 컨덕턴스로부터 구하는 방법 (effective mobility), 전달 컨덕턴스로부터 구하는 방법 (field-effect mobility) 그리고 포화영역에서의 전달 특성으로부터 구하는 방법 (saturation mobility)이 있다 [12].

본 실험에서는 포화영역의 전달 특성으로부터 이동도를 구하였다. TTFT의 포화영역에서 드레인전류 (I_{DS})는 게이트전압(V_{GS})과 아래의 관계를 갖는다 [12].

$$I_{DS} = \frac{Z\mu C_G}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (1)$$

여기서 Z는 채널너비, μ 는 이동도, C_G 는 게이트절연층의 단위면적당 커패시턴스, L은 채널 길이 그리고 V_T 는 문턱전압을 나타낸다. 본 연구에서는 TTFT

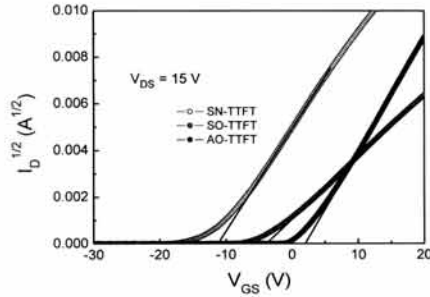


Fig. 5. $I_D^{1/2}$ vs. V_{GS} of ZTO TTFTs.

들의 게이트 커패시턴스 차이가 50% 이하가 되도록 설계하였다. SO-TTFT, SN-TTFT 및 AO-TTFT의 C_G 는 각각 1.5×10^{-8} F/cm², 1.3×10^{-8} F/cm² 및 1.9×10^{-8} F/cm²이었다. 식 (1)에 그림 4의 실험값을 대입하여 구한 SO-TTFT, SN-TTFT 및 AO-TTFT의 이동도는 각각 8.2, 18.2 및 16.0 cm²/Vsec이었다. ZTO와 SiO₂가 계면을 이룰 때 TTFT의 이동도가 가장 낮았다. 이것은 SiO₂로 파고드는 Zn에 의한 것으로 추측된다 [11]. SO-TTFT, SN-TTFT 및 AO-TTFT의 최소 SS는 각각 0.6, 0.7 및 0.4 V/dec였으며, SS로부터 구한 D_{it} 는 각각 3.4×10^{12} , 5.5×10^{12} 및 4.0×10^{12} cm⁻²eV⁻¹였다. SO-TTFT의 경우, D_{it} 가 가장 작으면서 이동도 역시 가장 낮은 것으로 측정되었다. 일반적으로 SS는 문턱전압 부근에서 가장 작지만, 이동도는 문턱전압을 지나면서 점차 증가한다. 따라서 SO-TTFT의 경우에는 게이트전압이 높아질수록 D_{it} 가 증가하는 것으로 추측할 수 있으며, 이것은 SiO₂에 침투한 Zn가 게이트전압의 증가에 따라 발생한 열전자 (hot electron) 들을 포획함으로써 나타나는 현상으로 사료된다.

그림 5는 TTFT의 문턱전압을 구하기 위해 변형시킨 전달특성곡선 ($I_{DS}^{1/2} - V_{GS}$)이다. 그림 5에서 구한 SOTTFT, SNTTFT 및 AOTTFT의 문턱전압은 각각 -3.0, -11.0 및 2.5 V로 큰 차이를 나타내었다. 문턱전압은 게이트절연층과 채널 경계면의 트랩전하밀도(Q_{it}) 그리고 게이트절연층 내의 고정전하밀도(Q_f)의 영향을 받는다. 앞에서 구한 D_{it} 로 볼 때, Q_{it} 는 TTFT의 문턱전압 차이에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 따라서 TTFT 문턱전압의 차이는 Q_f 의 차이로 해석된다. PECVD로 증착한 Si₃N₄막은 습식산화시킨 SiO₂막에 비해 약 4배의 Q_f 를 포함하고 있다. Si₃N₄막의 Q_f 는 질소빈자리에 기인하며, SiO₂막에 존재하는 Q_f 는 산소빈자리와 Zn 양이온에 의한 것으로 사료된다.

3.2 ZTO TTFT의 특성 변화

TTFT는 게이트절연막 및 계면상태의 불안정성 때문에 MOSFET에 비해 이동도가 낮을 뿐만 아니라 바이어스 및 시간에 따른 특성 변화가 문제시 되어 왔다. 더욱이 산화물반도체를 활성층으로 사용하는 TTFT는 소스-드레인 전극의 산화, 활성층의 습기 노출 등에 의해 바이어스가 인가되지 않은 상태에서도 이동도, 문턱전압 등이 변할 가능성이 높다. 본 연구에서는 바이어스를 가하지 않은 상태에서의 TTFT의 특성변화를 24시간 간격으로 두 차례 조사하였다.

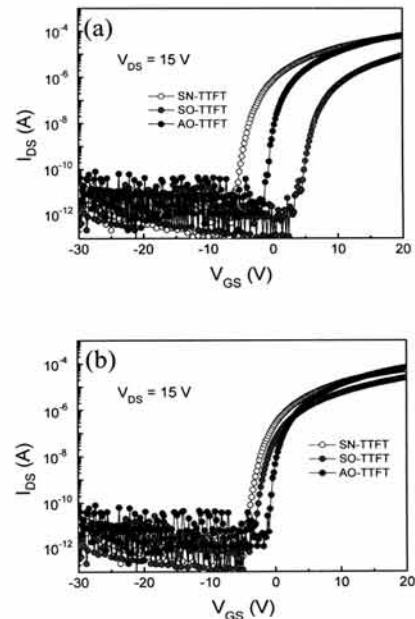


Fig. 6. Transfer characteristics of ZTO TTFTs measured: (a) 24 hr and (b) 48 hr later.

그림 6 (a) 및 (b)는 공기 중에서 24시간 및 48시간 방치한 후에 측정된 TTFT의 전달특성 곡선이다. SN-TTFT와 SO-TTFT의 경우, 급격한 동작전압의 증가가 관측되었다. I_{on}/I_{off} 는 10^7 이상으로 처음 측정 결과와 차이를 나타내지 않았다. 48시간 후의 이동도는 SN-TTFT (14.5 cm²/Vsec), SO-TTFT (7.8 cm²/Vsec)에서 다소 감소하였으나, AO-TTFT (18.3 cm²/Vsec)는 오히려 증가하였다. SS는 0.6 V(SO-TTFT), 0.8 V(SN-TTFT) 및 0.4 V(AO-TTFT)로서 처음 측정값과 차이가 없었다. SS 결과를 통해 볼 때, 시간에 따른 게

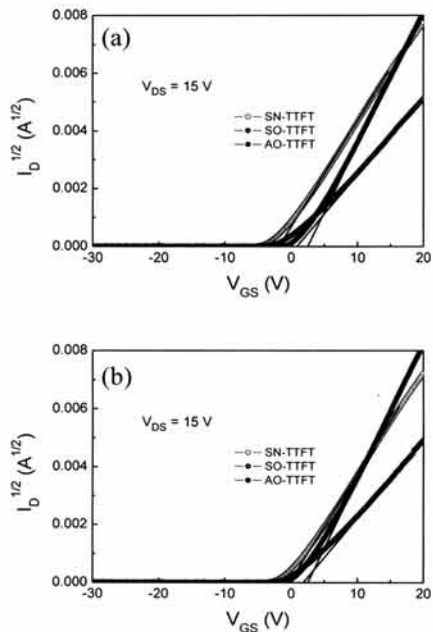


Fig. 7. $I_D^{1/2}$ vs. V_{GS} of ZTO TTFTs measured: (a) 24 hr and (b) 48 hr later.

이트절연층-활성층 계면의 특성 변화는 없는 것으로 판단된다. SN-TTFT와 SO-TTFT에 나타나는 이동도 감소는 시간에 따른 게이트절연층의 열화 때문일 것이다. AO-TTFT의 이동도 증가에 대해서는 계속 연구 중이다.

문턱전압을 구하기 위한 $I_{DS}^{1/2} - V_{GS}$ 그래프를 그림 7에 나타내었다. 시간이 경과함에 따라서 문턱전압이 양의 방향으로 이동하였다. 48시간 동안 SN-TTFT는 9.5 V, SO-TTFT는 5.0 V, AO-TTFT는 0.5 V 가량 증가하였다. TTFT 문턱전압의 양전압 방향 이동은 게이트절연층의 전하포획, 활성층의 음이온 흡착 등이 원인인 것으로 알려져 있다 [13]. 게이트절연층에 존재하는 양전하 트랩은 문턱전압을 음의 방향으로 이동시키지만, 양전하 트랩의 전자포획에 의해 TTFT의 문턱전압은 다시 양의 방향으로 이동하게 된다. 그리고 공기 중에 존재하는 습기가 TTFT의 활성층에 흡착되면 습기로부터 O 및 OH가 분리된다.

이때 O 및 OH가 활성층으로부터 전자를 포획함에 따라 TTFT의 문턱전압이 증가하게 된다. AO-TTFT의 미미한 문턱전압변화로 볼 때, 본 연구에서 관측된 문턱전압변화의 원인은 습기보다 게이트절연층의 전자트랩핑인 것으로 판단된다.

4. 결론

ZTO TTFT를 제작하였다. SiO_2 (~230 nm), Si_3N_4 (~100 nm)/ SiO_2 (~100 nm) 및 Al_2O_3 (50 nm)/ SiO_2 (~100 nm)를 각각 게이트절연층으로 사용하였다. SiO_2 를 게이트를 사용한 TTFT는 낮은 이동도를 보였으며, 이것은 SiO_2 에 침투한 Zn의 열전자 포획에 기인하는 것으로 사료된다. Si_3N_4 를 게이트로 사용한 TTFT는 매우 낮은 부의 문턱전압을 나타내었으며, 이것은 PECVD로 증착한 Si_3N_4 에 존재하는 질소 빈자리가 원인인 것으로 생각된다. Al_2O_3 를 게이트로 사용한 TTFT의 경우, 비교적 높은 이동도와 양의 문턱전압을 나타내었다. SiO_2 및 Si_3N_4 게이트절연막의 경우, 시간이 경과함에 따라 문턱전압이 양의 방향으로 대폭 이동하였다. 그러나 Al_2O_3 의 경우에는 0.5 V 이하의 미미한 문턱전압변동만 관측되었다. ZTO TTFT의 이동도 및 문턱전압 안정도 측면에서 볼 때, SiO_2 및 Si_3N_4 에 비하여 Al_2O_3 막이 게이트절연막으로 더 적합하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2010-0007697).

REFERENCES

- [1] C. F. Werner, T. Wagner, K. Miyamoto, T. Yoshinobu, and M. J. Schöning, *Sens. Actuat.* B175, 118 (2012).
- [2] J. Jin, J. J. Lee, B. Bae, S. J. Park, S. Yoo, and K. H. Jung, *Organic Electronics*, 13, 53 (2012).
- [3] C. Lin, K. Chou, F. Chang, and C. Hung, *Solid-State Elec.*, 64, 10 (2011).
- [4] H. Q. Chiang, J. F. Wager, R. L. Hoffman, J. Jeong, and D. A. Keszler, *Appl. Phys. Lett.*, 86, 013503 (2005).
- [5] S. Bang, S. Lee, J. Park, S. Park, Y. Ko, C. Choi, H. Chang, H. Park, and H. Jeon, *Thin Solid Films*, 519, 8109 (2011).
- [6] D. C. Paine, B. Yaglioglu, Z. Beiley, and S. Lee, *Thin Solid Films*, 516, 5894 (2008).
- [7] Y. Cho, J. Shin, S. M. Bobade, Y. Kim, and D. Choi,

- Thin Solid Films*, 517, 4115 (2009).
- [8] K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, *Nature*, 300, 1269 (2003).
- [9] T. Y. Ma, *J. KIEEME*, 25, 304 (2011).
- [10] X. Zhang, B. Domercq, X. Wang, S. Yoo, T. Kondo, Z. L. Wang, and B. Kippelen, *Organic Electronics*, 8, 718 (2007).
- [11] C. N. Cha, M. H. Choi, and T. Y. Ma, *Mater. Sci. in Semicon. Proc.*, 15, 240 (2012).
- [12] D. K. Schroder, *Semiconductor material and device characterization* (A Wiley-Interscience publication, New York, 1990) p. 226.
- [13] J. K. Jeong, H. W. Yang, J. H. Jeong, Y. G. Mo, and H. D. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, 93, 123508 (2008).