

산화물 반도체의 다양한 처리를 통한 박막트랜지스터의 전기적 특성 향상

김태용, 장경수, Jayapal Raja, Nguyen Thi Cam Phu, 이소진, 강승민,
 Than Thuy Trinh, 이윤정^b, 이준신^a

성균관대학교 정보통신대학

A Review : Improvement of Electrical Performance in the Oxide Semiconductor Thin Film Transistor Using Various Treatment

Taeyong Kim, Kyungsoo Jang, Jayapal Raja, Nguyen Thi Cam Phu, Sojin Lee, Seungmin Kang,
 Than Thuy Trinh, Youn-Jung Lee^b, and Junsin Yi^a

College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received November 4, 2015; Revised December 18, 2015; Accepted December 24, 2015)

Abstract: The ultimate aims of display market is transparent or flexible. Researches have been carried out for various applications. It has been possible to reduced the process steps and get good electrical properties for semiconductors with large optical bandgaps. Oxide semiconductors have been established as one of the leading and promising technology for next generation display panels. In this paper, alternative treatment processes have been tried for oxide semiconductors of thin film transistors to increase the electrical properties of the thin film transistors and to investigate the mechanisms. There exist a various oxide semiconductors. Here, we focused on InGaZnO, ZnO and InSnZnO which are commercialized or researched actively.

Keywords: InGaZnO, ZnO, InSnZnO, Hydrogenation, N-doped, Oxide TFTs

1. 서 론

산화물 반도체는 아주 특별한 비정질 물질로서 기존의 실리콘 물질에 대하여 완전히 새로운 물질로서 실리콘이라는 물질이 연구되어 온 기간보다 상대적으로 아주 단기간에 반도체 물질로 새로운 영역의 문을 열

어 우수한 전기적 특성을 보여주며, 디스플레이의 핵심 소자인 박막트랜지스터에 사용이 가능한 물질로 아주 인상적이며 미래가 밝은 재료이다. 이 산화물 반도체의 산업화에 가장 큰 이점은 낮은 온도에서 박막 형성과 화합물임에도 불구하고 매우 부드러운 표면과 비정질 물질이기 때문에 전기적 특성이 박막 구성 배열에 의존하지 않기 때문에 전기적 특성이 우수한 편이다.

또한 비정질 산화물 반도체 (AOS)는 광학적으로 투명함이 매우 높고, 높은 전자 이동도 및 비정질 미세 구조로 다결정 반도체 이동성의 제한적인 부분을 사전에 방지할 수 있으며 매끄러운 표면으로 인해 표면전하의 축적의 양이 작기 때문에 우수한 박막 표면을 얻

a. Corresponding author; junsin@skku.edu

b. Corresponding author; younjlee2@daum.net

을 수 있다. 이러한 비정질 산화물 반도체를 이용하여 박막 트랜지스터를 제작할 시에 산업에서 요구하는 전자 이동도와 소자의 안정성에 대해 더 우수한 특성을 제작하기 위해서 많은 추가적인 처리 혹은 물질 개발에 연구가 활발히 진행 중이다 [1].

산화물 반도체의 연구 시작 배경을 간략히 정리하자면 1964년 Klasens와 Koelmans로부터 제안되어 처음에는 SnO₂ 물질을 유리기판에 Al₂O₃ 절연막을 이용하여 TFT가 제작되었으며 [2] 1996년 SnO₂:Sb, In₂O₃가 Prins, Seager 뒤를 이었으며 1970년에도 Aoki와 Sasakura로부터 SnO₂ TFT가 제작되었다 [3-5]. 2003년 미국의 Oregon대학교 Wager 교수 그룹의 ZnO TFT, 일본 동경대학교의 Hosono 교수 그룹의 a-InGaZnO TFT 이후부터 현재까지 산화물 반도체물질을 기반으로 발표된 박막트랜지스터 논문의 수는 1,000편이 훌쩍 넘어가는 상황이다 [6]. 이런 산화물 물질의 박막 성막은 스퍼터링 증착, 용액을 이용한 스펀코팅, 잉크젯, 열증착 등이 있으며 상대적으로 특성이 우수한 스퍼터링 공정 방식의 InGaZnO가 주를 이루고 있다. 기존의 산화물 반도체 연구는 디스플레이 시장의 발전에 따라 대면적화 혹은 고해상도 구성을 위해 프레임 동작 주파수 또한 중요한 요소이며 이를 위해서는 최소 30 cm²/V-s 이상의 전자 이동도가 필요하다 보고되고 있다 [7].

최소 전자 이동도를 위하여 각종 처리기술 또한 중요한 상황이다. 어떤 공정을 진행을 하는 것도 중요하지만 이러한 박막트랜지스터의 기본적인 목표는 소자의 높은 전자 이동도 혹은 높은 안정도가 중요 핵심 포인트이다. 그리하여 본 논문에서는 추가 처리에 의한 소자의 전자 이동도와 안정도에 대해서 최근에 어떠한 연구 결과가 발표되고 있는지 정리 및 논평을 작성하였으며 이를 고려하여 해당 분야에서 연구를 진행하는 연구원들에게 도움이 되기를 바란다.

2. 실험 방법

조사된 논문들은 절연막의 경우 많은 논문의 경우 PECVD 채널층의 경우 sputtering system을 이용하였기 때문에 자세한 내용은 참고 문헌을 확인하여야 하며, 본 논문에서는 sputtering system을 이용한 산화물반도체 박막트랜지스터를 기반으로 작성하였다.

3. 결과 및 고찰

본 리뷰 논문에서는 산화물 기반의 박막트랜지스터의 전기적 특성에서 전자 이동도 그리고 소자의 안정성에 대해서 기본 공정에서 추가적으로 특정 처리가 진행이 되면 어떤 특성 향상이 이루어지는지 또한 어떤 논리적 방법으로 향상이 되는지에 대한 최근 연구 보고들을 정리하였다.

3.1 고 이동도 구현을 위한 수소화

박막트랜지스터의 주요 인자인 전자 이동도 향상을 위하여 수소화를 진행한 연구 결과 보고에 대한 원리는 그림 1에 나타내었다. 해당 보고는 ZnO를 채널층으로 이용하였으며 수소화를 기존과 다른 방식으로 진행하였다. 옛날부터 진행되어 오던 방식인 그림 1(a)와 해당 연구보고에서 제시하는 그림 1(b) 그리고 기존 방식과 해당 연구보고에서 제시하는 수소화의 개략적인 차이점을 그림 1(c)에 나타내었다. 그림 1(b)와 같이 게이트 절연막에 수소화를 진행하여 실제 채널이 형성되는 부분에 직접적으로 수소가 영향을 미쳤을 때 패시베이션 효과 및 n-type dopant 효과 때문에 채널 특성이 향상되며 또한 수소의 유량이 많을수록 절연막의 유전상수가 증가하는 것을 볼 수 있었으며 전자 이동도의 경우 0.39에서 7.8 cm²/V-s까지 증가하는 것을 볼 수 있었다 [8].

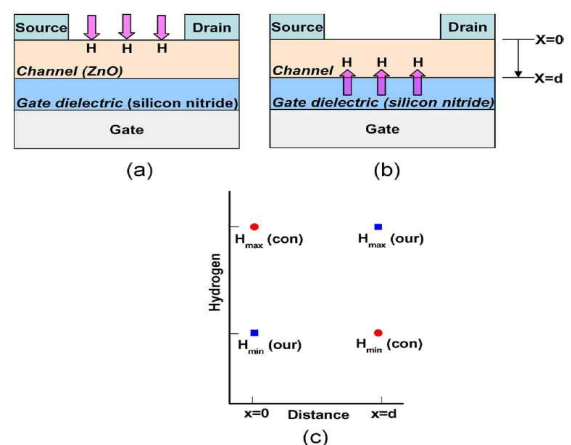


Fig. 1. Schematic cross-sectional views of hydrogenation by (a) conventional method and (b) our method, (c) schematic representation of maximum and minimum amount of hydrogen in the channel for the case of conventional and our methods [8].

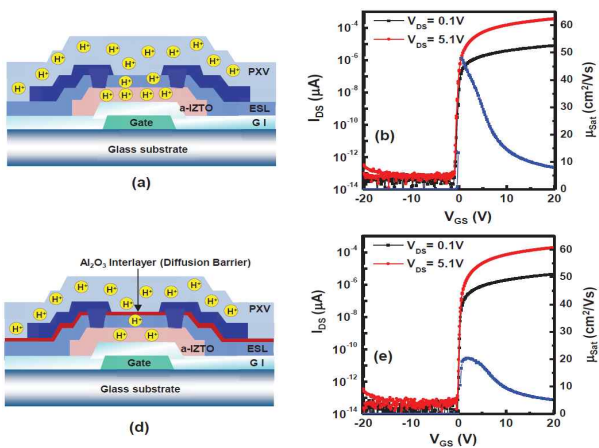


Fig. 2. Schematic cross-section of the (a) control and (d) Al₂O₃-inserted a-InSnZnO TFTs. Representative transfer characteristics for the (b) control and (e) Al₂O₃-inserted a-IZTO TFTs: the corresponding output characteristics for the (c) control and (f) Al₂O₃-inserted a-InSnZnO TFTs [9].

다음 논문은 그림 1과 다르게 채널층에 직접적으로 수소화를 진행한 논문을 그림 2에 나타내었다 [9].

본 논문은 수소화를 진행한 후 확산층으로 Al₂O₃를 삽입 여부에 따라 비교 분석하였으며 결과적으로 수소화 진행 시 수소가 n-type shallow donors 역할도 하며 Sn의 본딩 결합 증가 때문에 수소화 rich의 경우 saturation mobility(μ_{SAT})가 48 cm²/Vs⁻¹ S.S는 0.15 V decade⁻¹, threshold voltage (V_{th})는 0.4 V로 나타났으나 Al₂O₃를 삽입하여 수소화가 poor하게 된 경우 μ_{SAT} 및 S.S가 감소하는 것을 볼 수 있었으며 각각 20.5 cm²/Vs⁻¹, 1.4 V decade⁻¹로 나타났다.

신뢰성 측면에서 수소화가 많이 진행된 경우는 특성이 좋지 않은 것으로 나타났지만 이는 보상회로 혹은 패시베이션층으로 개선 가능할 것으로 예상된다. 다음은 a-InGaZnO 박막에 수소화를 진행하여 XPS 측정 결과를 그림 3에 나타내었다 [10]. 수소화를 진행하지 않은 경우 그림 3(a)와 수소화를 진행한 경우 그림 3(b)로 비교를 하였으며 수소화가 진행된 a-InGaZnO 박막에 대한 결과이며 결합에너지 peak 531.6 eV은 O-H 결합을 의미하며 픽의 면적비가 감소한 것을 볼 수 있으며 이는 산소결핍 지역에서 수소에 의해 비활성화 되어 이온의 감소 및 불순물의 감소로 볼 수 있다 [11]. 이는 산화물 박막의 deep-state에 수소화가 진행됨으로써 박막 내부의 passivation 효과가 있다는 것을 입증하며 수소화가 진행되게 되면 절연막과 채널층 사이의 계면 트랩

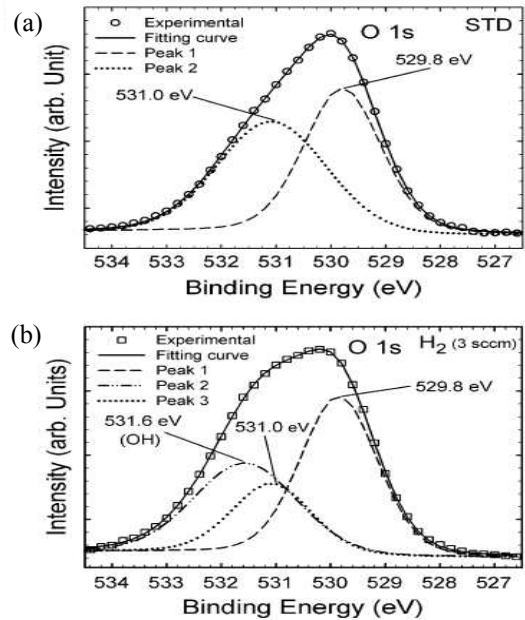


Fig. 3. XPS spectra of O 1s core level of (a) STD a-InGaZnO film and (b) a-InGaZnO + H₂ film [10].

밀도감소와 a-InGaZnO의 불순물 양을 감소시키는 효과가 있는 것으로 해석할 수 있다.

3.2 Stability 향상을 위한 N-doped

단일 박막트랜지스터의 신뢰성에 대해서는 질소를 도핑하면 안정성 향상이 가능하다. 질소 도핑의 경우 채널층인 a-InGaZnO 박막에 도핑하여 박막 내의 질소 passivation 효과를 볼 수 있으며, 질소를 도핑하는 이유는 질소의 경우 이온 반지름이 N²⁻, N³⁻ 경우 0.129, 0.132 nm이며 산소는 O²⁻ 0.126 nm이기 때문에 이온 반지름이 매우 비슷하여 두 가지 원소의 빈자리 즉 산소 공핍 지역에 질소가 들어가기 쉬우며 실제 질소가 수용체로서의 형태로 이용되며 산화물의 치명적인 단점인 산소 공핍지역을 질소가 채워 주기 때문에 박막의 결합력 또한 향상이 가능하다. 질소의 도핑 유량에 따른 gate bias stress에 대한 결과를 그림 4에 나타내었다 [12]. a-InGaZnO 채널층에 질소의 유량을 0, 0.5, 1 sccm 도핑하였을 때 10⁴초 동안 측정한 결과 신뢰성 특성이 1 sccm 조건에서 positive gate bias stress에서는 약 7 V 미만 negative gate bias stress에서는 약 -2.5 V 미만의 ΔV_{th} 의 변화가 나타남으로써 질소가 도핑된 경우 신뢰성 특성이 도핑되지 않은 조건보다 우수한 것으로 나타났다.

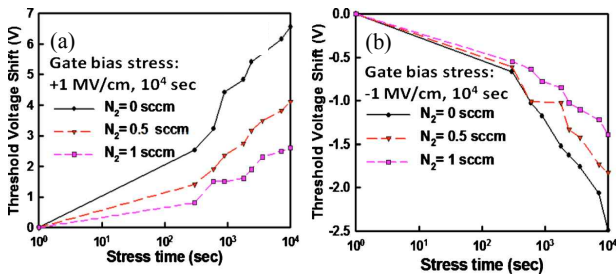


Fig. 4. The electrical reliability of a-InGaZnO:N TFTs with different nitrogen doping concentrations under (a) the positive and (b) the negative gate bias stress [12].

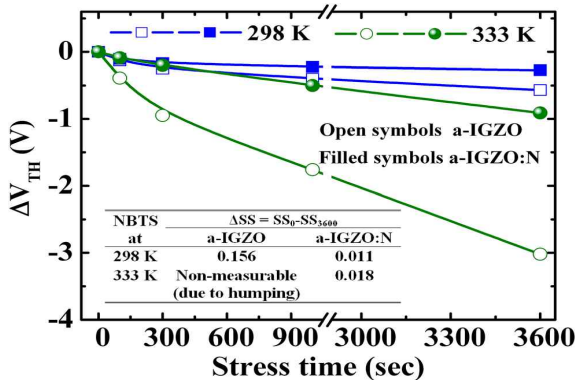


Fig. 5. NBTS-induced threshold voltage shift of undoped and a-IGZO:N TFTs under 20 V gate bias at 298 and 333 K [13].

그림 5는 채널층에 N-doping 처리한 것과 그렇지 않은 경우를 298, 333 K 온도에서 gate bias stress를 인가 하였을 때 ΔV_{TH} 에 관한 결과이다. N-doped 처리된 경우 다른 온도에서 ΔV_{TH} 의 값이 0.42, 1.13 V 그렇지 않은 경우 0.85, 3.21 V로 나타났으며 이는 N 물질이 doped 처리가 진행된 소자에서 안정성 부분이 더욱 우수한 것으로 나타났으며 이는 앞서 설명한 N물질이 산화물 박막에 질소가 도핑인자로 이용되면서 산화물의 취약점인 소자의 안정성 향상에 영향을 주는 것으로 나타났다 [13].

3.3 Plasma 처리에 따른 계면 특성 향상

앞서 박막트랜지스터에서 가장 중요한 전자 이동도와 신뢰성에 대한 부분을 언급하였으며, 두 가지의 우수한 전기적 특성을 잡기 위하여 절연막과 채널층의 계면 특성 향상을 위한 게이트 절연막에 플라즈마 처리에 따른 전기적 특성을 간략하게 나타내었다.

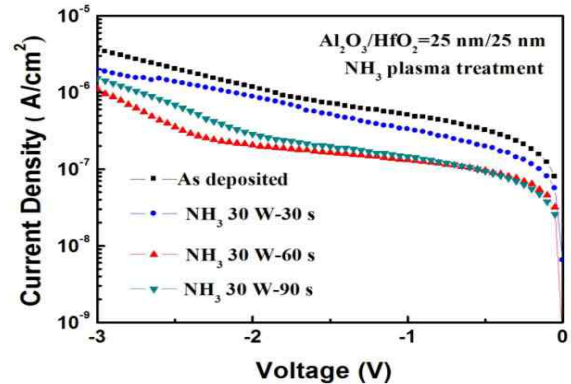


Fig. 6. J-V characteristics of the Al₂O₃/HfO₂/p-Si with varying NH₃ plasma treatment period [14].

그림 6은 Al₂O₃/HfO₂의 적층 구조의 계면에 암모니아 플라즈마 처리를 30초 60초 90초 동안 처리하여 전압에 따른 전류밀도에 대한 연구 결과보고이다 [14].

해당 연구에서는 암모니아 플라즈마 처리시간을 증가시킬수록 전류밀도가 반비례하여 감소하는 것을 알 수 있었다. 전류밀도가 감소한다는 것은 단위 면적에 흐르는 전류의 크기가 감소한다는 것이며 게이트 절연막으로 인한 전기적 특성이 우수하다는 것을 나타낸다. 이 또한 계면의 매끄럽지 못한 표면을 플라즈마 처리로 인하여 감소시켜주며 이는 최종적인 소자의 전자 이동도 향상 혹은 신뢰성 향상에 영향을 미치는 아주 중요한 처리 방식이다. 또 다른 플라즈마 처리로는 아르곤 플라즈마 처리가 있으며 이는 그림 7에 나타내었다 [15].

a-InGaZnO 박막에 아르곤 플라즈마 처리를 진행하였으며 처리시간에 따라 비저항과 정공 이동도를 측정 한 결과 아르곤 플라즈마 처리가 박막의 전기적 특성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 캐리어 밀도의 경우 아르곤 플라즈마를 처리한 후에 10¹⁴에서 10²⁰~10²¹(cm⁻³)까지 급격히 증가하는 것을 보였으며 정공 이동도의 경우 변화량이 미미한 6~7 cm²/V-s으로 아르곤 플라즈마에 영향이 거의 없는 독립적인 수치가 보고되었다. 게다가 비저항의 경우 아르곤 플라즈마 처리 시간이 증가함에 따라 10⁴에서 10⁻³까지 급격히 감소하는 것을 보였으며 이는 캐리어 농도 또한 급격히 증가하였다는 것을 알 수 있는 연구 결과이다. 이렇게 캐리어 농도의 조절 또한 최종적으로 소자를 제작하였을 때 특히 소자의 채널층에 채널 형성에 관련하여 중요한 인자로서 영향을 미치게 된다.

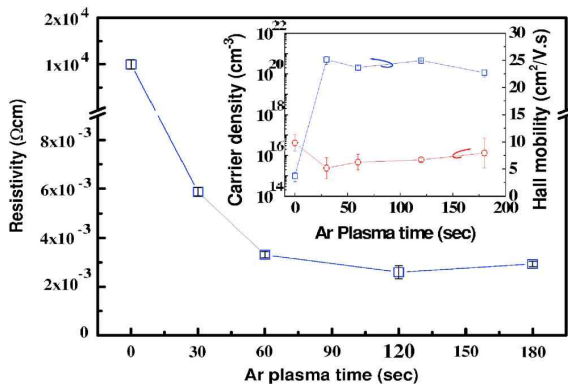


Fig. 7. Color online resistivity of a-InGaZnO thin films as a function of an Ar plasma exposure time. The net electron carrier concentration and the Hall mobility of a-InGaZnO thin films were shown in the inset [15].

4. 결론

전반적으로 소자의 전자 이동도 향상 혹은 신뢰성 향상에 대한 연구 결과보고들을 정리하였으며 전자 이동도의 향상에 대해서는 주로 수소화가 전자 이동도에 어떠한 영향을 미치는지에 정리한 결과 수소화는 산화물의 박막 내부의 deep state 산소의 공석에 대하여 수소화가 진행됨으로써 passivation 효과를 야기하며 산화물 박막의 불순물의 농도를 감소시켜 전기적 특성인 전자 이동도 향상에 기인하는 것으로 나타났다.

소자의 신뢰성의 경우는 산화물 박막 내부에 이온 반지름이 비슷한 질소를 도핑함으로써 산화물의 산소의 공석을 채워주는 역할로 질소를 이용하여 산화물의 취약점인 신뢰성 부분을 보강할 수 있다는 연구 결과보고들이 진행되어가고 있다.

게이트 절연막 혹은 채널층에 암모니아 혹은 아르곤 플라즈마 처리를 이용하여 게이트 절연막층의 전류밀도를 낮추거나 채널층의 캐리어 농도를 조절하는 등 최종 박막트랜지스터 소자에 대하여 전기적 특성을 향상시킬 수 있는 여러 가지 방안에 대해서 정리하였다.

감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and future Planning (NRF-2014R1A2A2A01006568).

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (NRF-2014R1A1A3053287).

REFERENCES

- [1] E. Fortunato, P. Barquinha, and R. Martins, *Adv. Mater.*, **24**, 2945 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.201103228>]
- [2] H. A. Klasens and H. Koelmans, *Solid-State Electron.*, **7**, 701 (1964). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0038-1101\(64\)90057-7](http://dx.doi.org/10.1016/0038-1101(64)90057-7)]
- [3] M.W.J. Prins, K. O. Grosse-Holz, G. Müller, J.F.M Cillessen, J. B. Giesbers, R. P. Weening, and R. M. Wolf, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 3650 (1996). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.115759>]
- [4] C. H. Seager, D. C. McIntyre, W. L. Warren, and B. A. Tuttle, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2660 (1996). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.116273>]
- [5] A. Aoki and H. Sasakura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **9**, 582 (1970). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.9.582>]
- [6] K. S. Jang, J. Raja, T. Y. Kim, S. M. Kang, S. J. Lee, N.T.C. Phu, T. T. Trinh, Y. J. Lee, and J. S. Yi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 351 (2015).
- [7] T. Arai, *Inf. Display*, **20**, 156 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1889/JSID20.3.156>]
- [8] K. Remashan, D. K. Hwang, S. J. Park, and J. H. Jang, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **55**, 2736 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2008.2003021>]
- [9] Y. H. Kang, *Adv. Electron. Mater.*, **1**, 1400006 (2015).
- [10] S. W. Tsao, T. C. Chang, S. Y. Huang, M. C. Chen, S. C. Shen, C. T. Tsai, Y. J. Kuo, Y. C. Chen, and W. C. Wu, *Solid-state Electron.*, **54**, 1497 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sse.2010.08.001>]
- [11] Y. F. Lu, H. Q. Ni, Z. H. Mai, and Z. M. Ren, *J. Appl. Phys.*, **88**, 498 (2000). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.373685>]
- [12] P. T. Liu, Y. T. Chou, L. F. Teng, F. H. Li, and H. P. Shieh, *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 052102 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3551537>]
- [13] J. Raja, K. S. Jang, N. Balaji, W. J. Choi, T. T. Trinh, and J. S. Yi, *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 083505 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4793535>]
- [14] H. Y. Huang, *Device Research Conference* (IEEE, Santa Barbara, USA, 2014) p. 161.
- [15] J. S. Park, J. K. Jeong, Y. G. Mo, H. D. Kim, and S. I. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 262106 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2753107>]