

비-휘발성 저항 변화 메모리 응용을 위한 WO_x 물질의 전기적 특성 연구

정균호¹, 김경민², 송승곤¹, 박윤선³, 박경완¹, 석중현^{1,a}

¹ 서울시립대학교 나노과학기술학과

² 서울시립대학교 나노공학과

³ 명지대학교 산업경영공학부

A Study of the Electrical Characteristics of WO_x Material for Non-Volatile Resistive Random Access Memory

Kyun Ho Jung¹, Kyong Min Kim², Seung Gon Song¹, Yun Sun Park³, Kyoung Wan Park¹,
and Jung Hyun Sok^{1,a}

¹ Department of Nano Science & Technology, University of Seoul, Seoul 02504, Korea

² Department of Nano Engineering, University of Seoul, Seoul 02504, Korea

³ Department of Industrial and management Engineering, Myongi University, Yongin 17058, Korea

(Received April 19, 2016; Revised April 23, 2016; Accepted April 24, 2016)

Abstract: In this study, we observed current-voltage characteristics of the MIM (metal-insulator-metal) structure. The WO_x material was used between metal electrodes as the oxide insulator. The structure of the Al/ WO_x /TiN shows bipolar resistive switching and the operating direction of the resistive switching is clockwise, which means set at negative voltage and reset at positive voltage. The set process from HRS (high resistance state) to LRS (low resistance state) occurred at $-2.6 V$. The reset process from LRS to HRS occurred at $2.78 V$. The on/off current ratio was about 10 and resistive switching was performed for 5 cycles in the endurance characteristics. With consecutive switching cycles, the stable V_{set} and V_{reset} were observed. The electrical transport mechanism of the device was based on the migration of oxygen ions and the current-voltage curve is following (Ohm's Law \rightarrow Trap-Controlled Space Charge Limited Current \rightarrow Ohm's Law) process in the positive voltage region.

Keywords: ReRAM, Bipolar resistive switching, Migration of oxygen ion, Trap-controlled space charge limited current

1. 서 론

최근에 비-휘발성, 초고속, 고집적도 그리고 간단한

제작 공정 등 미래가 기대되는 장점들을 가지고 있는 이성분계(binary)와 산화 복합물(complex oxide)로 이루어진 전계 유도 저항 변화 메모리(resistive random access memory, ReRAM)는 차세대 비휘발성 메모리 소자로서 사람들의 많은 이목을 끌고 있다. 일반적으로 ReRAM 소자는 간단하게 두 개의 금속 전극 사이에 금속 산화물 물질을 갖는 구조를 이루고 있다. 저항 변화 스위칭 특징을 가지는 물질로는 ZnO,

a. Corresponding author; sokjh@uos.ac.kr

HfO₂, NiO, TiO₂, CuO, BaSrTiO₃, Perovskite 등이 있다 [1-3]. 이러한 물질들은 비-휘발성 메모리로서 활용이 기대되는 물질들이다. ReRAM의 스위칭 과정을 설명하자면 높은 저항 상태(high resistance state, HRS)에서 낮은 저항 상태(low resistance state, LRS)로 변하는 스위칭을 'set 과정'이라고 부른다. 그와 반대로 LRS에서 HRS로 바뀌는 스위칭을 'reset 과정'이라고 부른다 [4]. Set 과정을 위한 전압을 V_{set} , reset 과정을 위한 전압을 V_{reset} 이라고 나타낸다. 메모리 동작에서 set 과정은 쓰기(writing) 과정, reset 과정은 지우기(erasing) 과정으로 생각할 수 있다. 일반적으로 시료의 처음 저항 상태에서 스위칭하기 전에 forming 혹은 electroforming 과정이 필요하다. 이 과정은 보통 set 과정을 위한 전압보다 더 큰 전압을 필요로 하는데 전압을 가해주지 않은 시료에서 금속 이온과 산소 공공과 같은 불순물들을 활성화 시켜 주어 저항 변화 동작을 보여주는 연속적인 스위칭 주기를 원활하게 해주기 때문이다. 금속 산화물 ReRAM은 스위칭 방식에 따라 두 가지로 분류되는데, 단극성과 양극성 저항 변화 스위칭이다. WO_x 물질이 보여주는 양극성 스위칭 방식(bipolar resistive switching)은 전압의 크기가 아닌 극성에 따라서 set 과정과 reset 과정이 의존하는 것을 의미한다. 전류-전압 특성을 측정할 시에 단극성과 양극성 저항 변화 스위칭 모두 set 과정에서 일어날 수 있는 전기적인 절연파괴(breakdown)를 방지하기 위하여 허용 전류(compliance)를 설정하여 주어야 한다. 그리고 소자로부터 정보를 얻어내기 위하여 전체적인 스위칭 동작에 영향을 주지 않을 정도 크기의 읽기 전압(reading voltage)을 걸어준다. ReRAM에서 HRS와 LRS에서의 전류-전압 전도 특성을 알아내기 위해서 많은 연구가 진행되어왔다. ReRAM의 전기적 수송을 위한 모델은 다양하다. 예를 들어 선형(linear) 또는 옴의 법칙(Ohm's Law) 관계로 설명할 뿐만 아니라 풀-프렌켈 방출(Poole-Frenkel Emission, $\log(I/V) \propto V^{1/2}$), 쇼트키 방출(Schottky Emission, $\log(I) \propto V^{1/2}$), 공간 전하 제한 전류 특성(trap-controlled space charge limited current, SCLC, 옴의 영역(Ohm's Region $I \propto V$), 차일드 제곱법칙 영역(Child's Square Law Region, $I \propto V^2$)) 등과 같은 것들이 있다 [1,5-7]. 우리는 여러 종류의 추측 가능성이 있는 전기적 수송 이론들 사이에서 ReRAM의 동작을 설명하는 주요한 원리로 금속 전극과 금속 산화물 간의 계

면 영향과 관련되어 SCLC 모델을 고려하였다. 비록 저항 변화 스위칭 현상의 원리가 아주 명확하게 밝혀지진 않았지만, 일반적으로 금속 이온과 산소 공공은 전압이 가해질 때 저항 변화 스위칭에 있어서 근본적으로 중요한 역할을 한다는 것은 여러 연구들을 통하여 이미 상당히 알려진 상태이다.

WO_x은 고체 전자 소자 응용으로 가능성을 가지고 있는 물질이기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 W은 이미 마이크로 전자 산업에서 넓게 사용되고 있다. 더욱이, WO_x이 금속/금속 산화물/금속(MIM) 구조를 갖는 ReRAM의 금속 산화물 물질로 사용되었을 경우에 집적회로에서 WO_x는 높은 적용 가능성과 쉬운 공정이라는 장점을 가지고 있다 [8,9]. WO_x 물질의 비-휘발성 메모리로서 응용 가능성을 연구하기 위하여 MIM 구조를 제작하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 TiN/n-type Si(100) 기판 위에 WO_x를 증착하기 위하여 RF magnetron sputter를 이용하였다. 타깃으로 99.99%의 순도를 갖는 WO₃ 물질을 사용하였다. 박막 증착 시 RF magnetron sputter의 챔버 내부 압력으로 기본 압력이 $2.1 \times 10^{-6} Torr$, 작동 압력은 $1.0 \times 10^{-2} Torr$ 로 설정하였다. RF magnetron sputter 챔버 내부의 가스 분위기로 Ar과 O₂의 분압비를 27 : 3 sccm, RF 파워를 100 W로 설정하고 1시간 동안 180 nm의 두께를 갖는 WO_x 박막을 균일하게 성장시켰다. 마찬가지로 상부 전극인 Al 박막을 증착하기 위하여 RF magnetron sputter를 이용하였다. 지름 300 μm 의 원형 모형을 가지는 웨도우 마스크를 이용하여 다수의 상부 원형 전극을 증착하였다. 챔버 내부의 압력 조건은 WO_x 증착 시와 동일하였다. 그러나 챔버 내부의 가스 분위기는 WO_x 증착 시와 달리 오직 Ar(30 sccm)에서 증착하였고, 타깃으로는 순도 99.99%를 가지는 Al을 사용하였다. Al 전극은 RF 파워 90 W로 3분 동안 두께 100 nm로 성장하였다. 따라서 Al 상부 전극은 원형 모양의 300 μm 의 지름과 100 nm의 두께를 갖는다. WO_x의 전기적인 특성을 확인하기 위하여 Keithley 4200 - SCS를 이용하여 전류-전압 특성을 관찰하였다. 허용 전류 값은 0.1 A로 설정하였다. 상부 전극인 Al에 전압을 가해주고 하부 전극인 TiN은 그라운드로 연결하여 저항 변화를

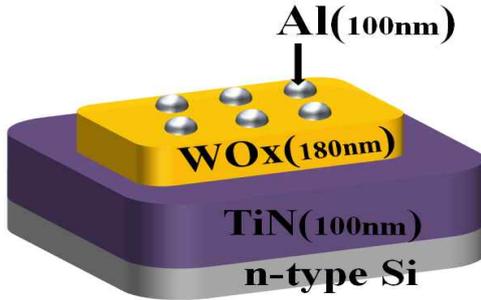


Fig. 1. Schematic of an Al/WO_x/TiN structure.

통한 전류의 흐름을 측정하였다.

그림 1은 Al/WO_x/TiN 구조의 모식도를 보여준다. WO_x 박막은 180 nm, Al과 TiN 박막은 각각 100 nm로 균일한 두께로 형성되었다. 참고 문헌 [11]의 내용으로부터 WO₃ 박막 증착 시 RF magnetron sputter 챔버 내의 Ar과 O₂의 분압비에 따라서 WO_x 박막의 조성이 비-화학양론적 조성을 가지는 것을 러더퍼드 후방 산란(Rutherford backscattering, RBS) 분광법을 통해 분석한 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 우리가 증착한 WO_x 박막의 실제 화학적 조성도 완전한 WO₃ 조성이 아닌 WO_x의 비-화학양론적(non-stoichiometric) 조성을 가질 것이라 추측하였다 [10,11].

3. 결과 및 고찰

그림 2는 5회의 연속적으로 가해진 전압 바이어스에 따른 Al/WO_x/TiN의 구조를 갖는 ReRAM의 측정된 전류-전압 곡선을 보여준다. WO_x 박막의 미리 존재(pre-existence)하는 비-화학양론적인 구조적 결함 때문에 소자의 저항 변화 스위칭 특성을 위한 forming 과정은 필요하지 않게 된다 [12,13]. Al/WO_x/TiN의 구조를 갖는 ReRAM은 검은색 화살표(1→2→3→4)를 따라서 시계 방향의 스위칭 동작 과정을 보이며 양극성 저항 변화 스위칭 특성을 보여준다. 음의 전압이 상부 전극에 가해지게 되면 HRS에서 LRS로 바뀌어 set 과정이 발생한다. 대조적으로 양의 전압이 가해지게 되면 LRS에서 HRS로 바뀌어 reset 과정이 발생한다. 소자에 전압을 가해 5회의 연속적인 스위칭 과정을 통해 ReRAM 특성을 확인할 수 있었다.

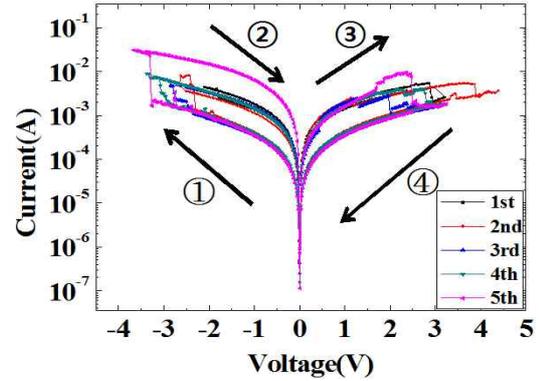


Fig. 2. The current-voltage curves of the Al/WO_x/TiN structure.

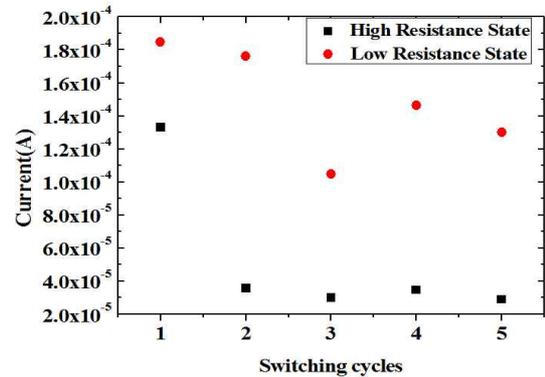


Fig. 3. The endurance characteristics by using DC voltage bias mode. The currents at HRS and LRS were measured according to the switching cycles at 0.1 V.

그림 3은 직류(DC) 전압 바이어스 모드를 사용하여 얻어진 소자의 내구성(Endurance) 특성을 보여준다. 읽기 전압 0.1 V에서 스위칭 횟수에 따른 HRS와 LRS의 전류 곡선을 나타낸다. Al/WO_x/TiN의 구조를 갖는 ReRAM의 내구성 특성으로는 스위칭 주기 5회 동안 약 10배의 on/off 전류비를 유지하였다. Al/WO_x/TiN 구조의 ReRAM에서 연속적인 스위칭 주기가 진행 될수록 반응성 계면에서 Al 상부 전극과 산소 이온의 산화-환원 화학적 반응으로 인해 미세 두께의 AlO_x가 생성될 가능성이 충분하다. 투과 전자 현미경(transmission electron microscopy)을 통해 Al과 WO_x 층의 계면에서 생성되는 AlO_x의 얇은 막의 생성을 추측할 수 있다 [10]. 이렇게 산화-환원 반응으로 생성된 임계 두께 이상의 AlO_x는 계면에 전위 장벽을 형성하여 음의 전압이 가해지더라도

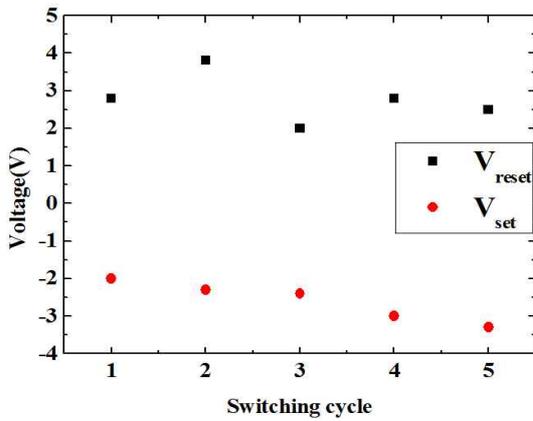


Fig. 4. The curve of V_{set} and V_{reset} according to the consecutive switching cycles.

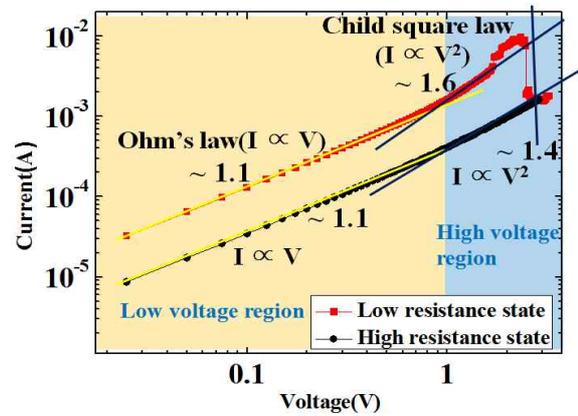


Fig. 5. The Log-Log scale curve of current and voltage at 5th switching cycles in a positive voltage region.

전자의 이동을 방해하게 되어 ReRAM의 내구성에 영향을 미칠 것으로 생각된다 [11].

그림 4는 연속적인 스위칭 횟수에 따른 소자의 V_{set} 과 V_{reset} 곡선을 보여준다. 5번의 연속적인 스위칭 주기 동안 V_{set} 은 약 $-2.6 V$, V_{reset} 은 약 $2.78 V$ 의 안정적인 전압을 유지하는 것을 관찰할 수 있다.

그림 5는 5번째 스위칭 주기에서 양의 전압 영역의 전류와 전압을 Log-Log 스케일로 나타낸 곡선이다. 그림 5를 보면 낮은 전압 영역에서 LRS와 HRS의 기울기는 약 1에 가깝다. 이것은 옴의 법칙(Ohm's Law, $I \propto V$)을 따르는 거동처럼 묘사된다 [14]. 하지만 높은 전압 영역에서 전류 값은 비선형적으로 증가하게 되고 이것은 차일드 제곱 법칙 영역(Child's Square Law Region, $I \propto V^2$)을 따른다. 높은 전압 영역에는 LRS의 기울기와 HRS의 기울기로 나뉜다. 가해진 전압의 크기가 낮은 전압 영역을 넘어감에 따라 LRS에서는 산소 이온들이 Al과 WO_x 계면 근처에 위치하던 산소 공공들을 채우러 이동하면서 순간적으로 기울기가 증가하여 약 1.6의 값을 가진다. 하지만 reset 과정 직후에 양의 전압의 크기가 줄어들면서 HRS에서는 계면 근처에 잡혀있던 산소 이온들은 점점 풀려나기 시작하고 기울기는 약 1.4의 값을 갖는다. 결국 전압에 의한 전기적 수송 메커니즘은 (Ohm's Law \rightarrow SCLC \rightarrow Ohm's Law)의 순서 과정으로 설명된다 [16]. 낮은 전압 영역의 옴의 법칙은 식 (1), 높은 전압 영역의 SCLC는 식 (2)로 묘사될 수 있다.

$$J_1 = q\mu n_0 \frac{V}{d} \quad (1)$$

$$J_2 = \frac{9}{8} \epsilon_r \epsilon_0 \mu \theta \frac{V^2}{d^3} \quad (2)$$

(J : 전류 밀도, n_0 : 열평형상태의 전자 농도, q : 전자의 전하량, μ : 전자 이동도, V : 가해진 전압, d : 산화물 두께, ϵ_r : 비유전율, ϵ_0 : 진공 유전율, θ : 자유 트랩과 얽은 트랩 전하(trapped charge) 농도의 비)

그림 6은 Al/ WO_x /TiN의 구조를 가지는 소자의 저항 변화 스위칭 모델을 도식적으로 표현한다. WO_x 박막의 산소 내용물(oxygen contents)에 따른 저항 변화 스위칭의 특성에 대한 내용을 조사하였고, 박막의 산소 내용물(oxygen contents)은 저항 변화 스위칭에 큰 영향을 끼치는 사실을 확인하였다 [11]. 이것을 토대로 우리는 저항 변화 스위칭을 일으키는 다양한 요인들 중에 상부 전극과 금속 산화물의 계면에서의 산소 이온의 움직임이 저항 변화 스위칭 메커니즘의 주요 요인으로 유추할 수 있었다 [17].

따라서 소자의 상부 전극에 음의 전압이 가해질 경우 산소 이온들은 상부 전극과 산화물의 계면으로부터 밀려나서 멀어지게 되고 산소 공공들을 형성한다. 그리고 계면의 산소 공공과 같이 결함-유도 통로(defects-induced paths)들이 WO_x 박막을 가로질러 만들어진다(그림 6(a)). 상부 전극의 전자들은 결함-유도 통로들을 통하여 전자가 하부 전극으로 더 많은 양이 이동할 수 있게 된다. 이 과정이 set 과정(HRS \rightarrow LRS)이고, 반면에 소자의 상부 전극에 양의 전압이 가

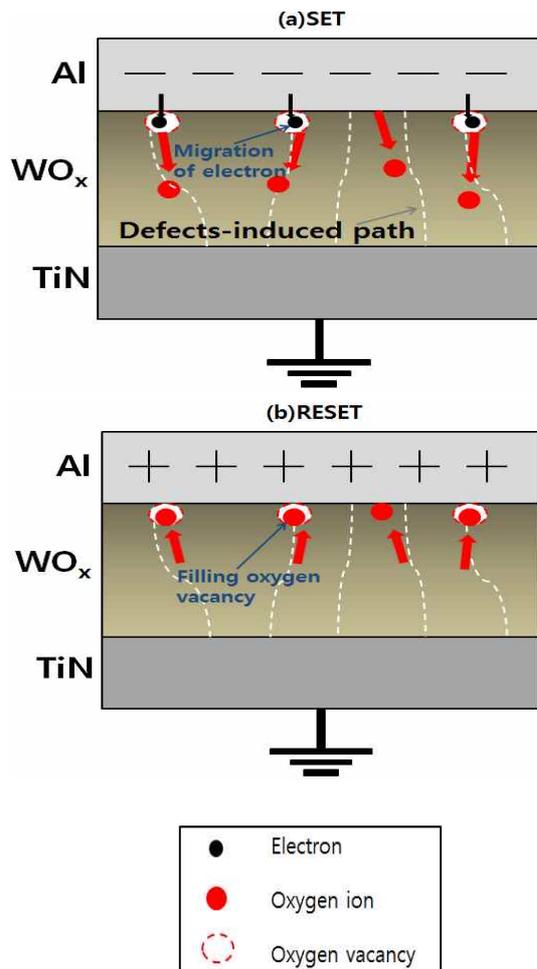


Fig. 6. The schematic diagram of the resistive switching model of the Al/WO_x/TiN structure. (a) set process, (b) reset process.

해질 경우 산소 이온들은 다시 상부 전극과 산화물의 계면에 존재하던 산소 공공의 자리로 되돌아와 결함-유도 통로들을 방해한다. 결국 계면에서 산소 공공과 연관된 결함-유도 통로들이 끊어진 것과 마찬가지로 되어 기존에 존재하던 결함-유도 통로만 남아 상부 전극에서 하부 전극으로의 전자 이동이 상대적으로 줄어들게 된다(그림 6(b)). 이 과정을 reset 과정(LRS → HRS)으로 설명된다 [18].

4. 결론

WO_x 물질을 이용하여 비-휘발성 ReRAM으로서 응용 가능성을 조사하기 위하여, 우리는 Al/WO_x/TiN 구

조를 갖는 소자를 제작하였다. 이 소자는 양극성 저항 변화 스위칭을 보여주었다. 내구성 특성에서는 5회의 연속된 스위칭에서 LRS와 HRS의 읽기 전압 0.1 V에서 전류 값의 차이가 약 10배 정도인 것이 관찰되었다. 연속적으로 진행된 5회의 스위칭에서 V_{set} 과 V_{reset} 이 안정적이라는 것을 보여 주었다. 이 연구는 상부 전극인 Al과 금속 산화물인 WO_x 계면에서 산소 이온의 움직임이 저항 변화 스위칭에 크게 영향을 미치고 전기적 수송 메커니즘을 옴의 법칙과 공간 전하 제한 전류 특성을 통해 (Ohm's law → SCLC → Ohm's law)으로 설명하였다. WO_x 물질의 비-휘발성 ReRAM으로의 적용 가능성을 살펴보았다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 서울시립대학교 연구년 학술 연구 조성비에 의해서 연구되었음.

REFERENCES

- [1] W. Y. Chang, Y. C. Lai, T. B. Wu, S. F. Wang, F. Chen, and M. J. Tsai, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 022110 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2834852>]
- [2] S. Seo, M. J. Lee, D. H. Seo, E. J. Jeoung, D.-S. Suh, Y. S. Joung, I. K. Yoo, I. R. Hwang, S. H. Kim, and I. S. Byun, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 5655 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1831560>]
- [3] C. Rohde, B. J. Choi, D. S. Jeong, S. Choi, J. S. Zhao, and C. S. Hwang, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 262907 (2005). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1968416>]
- [4] H.S.P. Wong, H. Y. Lee, S. Yu, Y. S. Chen, Y. Wu, P. S. Chen, B. I. Lee, F. T. Chen, and M. J. Tsai, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, **100**, 1951 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2012.2190369>]
- [5] Y. M. Kim and J. S. Lee, *J. Appl. Phys.*, **104**, 114115 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3041475>]
- [6] Z. Weil, Y. Kanzawa, K. Arita, Y. Katoh, K. Kawai, S. Muraoka, S. Mitani, S. Fujii, K. Katayama, M. Iijima, T. Mikawa, T. Ninomiya, R. Miyanaga, Y. Kawashima, K. Tsuji, A. Himeno, T. Okada, R. Azuma, K. Shimakawa, H. Sugaya, T. Takagi, R. Yasuhara, K. Horiba, H. Kumigashira, and M. Oshima, *IEEE International Electron Devices Meeting (Hilton San Francisco, USA, 2008)*.
- [7] H. Y. Lee, P. S. Chen, T. Y. Wu, Y. S. Chen, F. Chen, C. C. Wang, P. J. Tzeng, C. H. Lin, M. J. Tsai, and C.

- Lien, *IEEE Electron Devices Lett.*, **30**, 703 (2009).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2009.2017213>]
- [8] E. K. Lai, W. C. Chien, Y. C. Chen, T. J. Hong, Y. Y. Lin, K. P. Chang, Y. D. Yao, P. Lin, S. F. Horng, J. Gong, S. C. Tsai, C. H. Lee, S. H. Hsieh, C. F. Chen, Y. H. Shih, K. Y. Hsieh, R. Liu, and C. Y. Lu, *J. Appl. Phys.*, **49**, 04DD17 (2010).
- [9] D. S. Shang, L. Shi, J. R. Sun, B. G. Shen, F. Zhuge, R. W. Li, and Y. G. Zhao, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 072103 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3300637>]
- [10] S. J. Jung, J. M. Kong, S. H. Song, K. H. Lee, T. H. Lee, H. S. Hwang, and S. H. Jeon, *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 142110 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3621826>]
- [11] B. U. Jang, A. I. Inamdara, J. M. Kim, W. Jung, H. S. Im, H. S. Kim, and J. P. Hong, *Thin Solid Films*, **520**, 5451 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2012.03.111>]
- [12] J. H. Song, A. I. Inamdar, B. U. Jang, K. Y. Jeon, Y. S. Kim, K. H. Jung, Y. M. Kim, H. S. Im, W. Jung, H. S. Kim, and J. P. Hong, *Applied Physics Express*, **3**, 091101 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/APEX.3.091101>]
- [13] S. U. Sharath, T. Bertaud, J. Kurian, E. Hildebrandt, C. Walczyk, P. Calka, P. Zaumseil, M. Sowinska, D. Walczyk, A. Gloskovskii, T. Schroeder, and L. Alff, *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 063502 (2014).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4864653>]
- [14] S. J. Park, J. P. Lee, J. S. Jang, H. Rhu, H. Yu, B. Y. You, C. S. Kim, K. J. Kim, Y. J. Cho, S. G. Baik, and W. Lee, *IOPscience Nanotechnology*, **24**, 295202 (2013).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/24/29/295202>]
- [15] A. R. Lee, Y. C. Bae, G. H. Baek, J. B. Chung, T. S. Kang, J. S. Lee, J. G. Park, H. S. Im, and J. P. Hong, *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 183510 (2013).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4828561>]
- [16] D. S. Shang, Q. Wang, D. Chen, R. Dong, X. M. Li, and W. Q. Zhang, *Phys. Rev., B*, **73**, 245427 (2006).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.73.245427>]
- [17] T. Nagata, M. Haemori, Y. Yamashita, H. Yoshikawa, Y. Iwashita, K. Kobayashi, and T. Chikyow, *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 082902 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3483756>]
- [18] J. M. Kim, D. H. Kim, Y. C. Jo, J. S. Han, H. S. Woo, H. S. Kim, K. K. Kim, J. P. Hong, and H. S. Im, *Thin Solid Films*, **589**, 188 (2015).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2015.05.002>]
- [19] Y. C. Jo, J. M. Kim, H. S. Woo, D. H. Kim, J. W. Lee, A. I. Inamdar, H. S. Im, and H. S. Kim, *Current Appl. Phys.*, **14**, S93 (2014).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cap.2013.11.016>]
- [20] Y. B. Nian, J. Strozier, N. J. Wu, X. Chen, and A. Ignatiev, *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 146403 (2007).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.146403>]
- [21] Y. E. Syu, T. C. Chang, T. M. Tsai, Y. C. Hung, K. C. Chang, M. J. Tsai, M. J. Kao, and S. M. Sze, *IEEE Electron Devices Lett.*, **32**, 545 (2011).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2011.2104936>]