

Zinc Tin Oxide 투명 박막트랜지스터의 특성에 미치는 소스/드레인 전극의 영향

마대영^a, 최무희

경상대학교 전기공학과 및 공학연구원

Influence of Source/Drain Electrodes on the Properties of Zinc Tin Oxide Transparent Thin Film Transistors

Tae Young Ma^a and Mu Hee Choi

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

(Received March 18, 2015; Revised May 29, 2015; Accepted June 17, 2015)

Abstract: Zinc tin oxide transparent thin film transistors (ZTO TTFTs) were fabricated by using n^+ Si wafers as gate electrodes. Indium (In), aluminum (Al), indium tin oxide (ITO), silver (Ag), and gold (Au) were employed for source and drain electrodes, and the mobility and the threshold voltage of ZTO TTFTs were observed as a function of electrode. The ZTO TTFTs adopting In as electrodes showed the highest mobility and the lowest threshold voltage. It was shown that Ag and Au are not suitable for the electrodes of ZTO TTFTs. As the results of this study, it is considered that the interface properties of electrode/ZTO are more influential in the properties of ZTO TTFTs than the conductivity of electrode.

Keywords: Zinc tin oxide, Transparent thin film transistors, Electrodes, Mobility, Threshold voltage

1. 서 론

평판디스플레이의 스위칭 소자로 사용되어 온 다결정실리콘 박막트랜지스터를 투명박막트랜지스터 (transparent thin film transistor, TTFT) [1,2]로 대체하여 디스플레이의 해상도를 높이려는 노력이 지속적으로 이루어지고 있다.

TTFT 연구의 초창기에는 가격이 저렴하고 증착이 쉬운 ZnO를 활성층 (active layer)으로 사용하였으나

[3,4], 최근에는 전자이동도, 문턱전압 등의 개선을 위하여 ZnO에 주석 (Sn), 인듐 (In), 알루미늄 (Al) 등을 첨가하는 다양한 실험이 행해지고 있다. K. Nomura 등 [5]은 원자의 최외곽 전자분포가 $(n-1)d^{10}ns^0$ ($n \geq 4$)인 금속원자를 ZnO와 혼합시키면 비정질 상태에서도 높은 전자이동도를 얻을 수 있다는 연구 결과를 발표하였다.

여기서 n 은 주양자수를 의미한다. 최외곽 전자가 $(n-1)d^{10}ns^0$ ($n \geq 4$) 궤도에 분포하는 금속산화물의 경우 ns 양자궤도들은 구 모양을 형성하고 이 궤도들의 중첩으로 형성되는 전자전도 경로는 박막의 결정성에 영향을 받지 않아서 비정질임에도 불구하고 높은 전자이동도를 나타내는 것으로 알려져 있다 [5]. 이와 같은 비정질 금속산화물의 개발과 함께 TTFT의 활성

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

층에 대한 연구는 큰 진전을 이루고 있다. 그러나 TTFT의 실용화를 위해서는 게이트절연층, 소스/드레인 전극 등에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야만 한다.

기존의 실리콘 MOSFET의 이동도 및 문턱전압은 게이트절연층의 유전 특성, 계면 특성 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구팀의 실험 결과, 게이트의 특성뿐 아니라 소스/드레인 전극 물질이 ZTO (zinc tin oxide) TTFT의 이동도 및 문턱전압에 큰 영향을 미친다는 것이 발견되었다. ZnO계 TTFT의 소스/드레인 전극으로는 Au, Al, In 등 다양한 금속이 사용되고 있으나 아직까지 대표성을 갖는 전극물질은 없다. 따라서 ZTO TTFT에 가장 적합한 전극을 찾는 것은 TTFT의 실용화를 위한 중요한 공정 중의 하나라고 사료된다.

본 연구에서는 Au, Ag, Al, In 및 ITO를 소스/드레인 전극으로 사용하여 ZTO TTFT를 제작하고 그 특성을 비교하였다. Au 및 In은 ZnO계 TTFT의 전극으로 자주 사용되어 왔으며 [6,7], Ag는 금속 중 전도도가 가장 높은 물질이다. 그리고 Al은 MOSFET의 전극으로 오래 전부터 사용되어 왔으며, ITO는 TTFT의 전극으로 사용되는 대표적인 투명도전막이다 [8]. 본 연구의 목적은 5가지의 도체 중에서 ZTO TTFT의 소스/드레인 전극으로서 최적의 물질을 찾는 것이다.

2. 실험 방법

게이트 전극의 역할을 하는 낮은 저항률의 n^+ -Si 웨이퍼 위에 절연막을 기른 후 TTFT를 제작하였다. 게이트절연막으로 사용하기 위해 SiO_2 와 Al_2O_3 를 n^+ -Si 웨이퍼 위에 이중으로 증착하였다. 원자반경이 작은 Zn의 SiO_2 로의 침투를 막기 위해 Al_2O_3 를 원자층증착법 (atomic layer deposition, ALD)으로 습식산화된 SiO_2 위에 성장시켰다. 이때 SiO_2 및 Al_2O_3 의 두께는 각각 ~ 130 nm 및 ~ 30 nm였다. ZTO막을 고주파 스퍼터링하여 TTFT의 활성층으로 사용하였다. ZTO 증착을 위한 고주파 스퍼터링 등 ZTO TTFT의 제조공정 등은 참고 문헌 [7]에 상세히 기술되어 있다.

ZTO TTFT의 소스/드레인 전극으로 In, Al, 은 (Ag), 금 (Au) 및 ITO (indium tin oxide)를 사용하였다. In, Al, Au 및 Ag는 진공증착하였으며, ITO는 고주파 스퍼터링하였다. 금속막은 기판온도를 가열하지 않은 상온에서 진공 증착하였으며, ITO는 기판온도

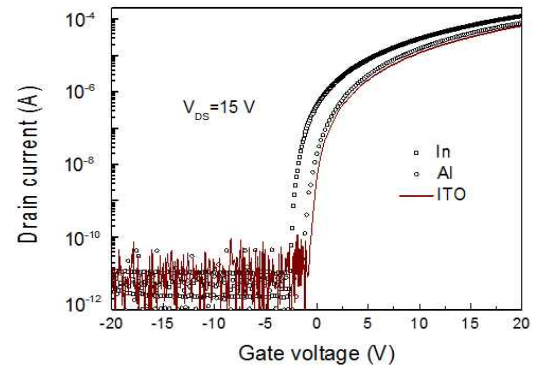


Fig. 1. Transfer characteristics of ZTO TTFTs having different electrodes.

Table 1. Summaries of mobility, threshold voltage, and I_{on}/I_{off} of ZTO TTFTs.

Electrodes	μ (cm^2/Vsec)	V_t (V)	I_{on}/I_{off}
In	20.5	2.5	1×10^7
Al	12.7	4.6	6×10^6
ITO	11.5	4.9	6×10^6

300°C 에서 스퍼터링하였다. ZTO TTFT의 전달 특성을 측정하고 이로부터 이동도 (μ) 및 문턱전압 (V_t)을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 ZTO TTFT의 소스/드레인 전극에 따른 전달 특성의 변화를 나타낸 것이다. 이때 전극으로는 In, Al 및 ITO를 사용하였다. In은 ZnO계 반도체와 양호한 오믹 특성을 갖는 것으로 알려져 있으며 [9], Al은 우수한 접착성과 낮은 저항률에 의해 실리콘 소자의 전극재료로 주로 사용되어 왔다. 그리고 ITO는 대표적인 투명도전막으로서 태양전지, 발광다이오드 등의 투명전극으로 사용되고 있다 [10,11].

TTFT의 포화영역 전달 특성으로부터 μ 를 구하였다. TTFT의 포화영역에서 드레인 전류 (I_D)는 게이트전압 (V_{GS})과 아래의 관계를 갖는다 [12].

$$I_D = \frac{W\mu C_{ox}}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (1)$$

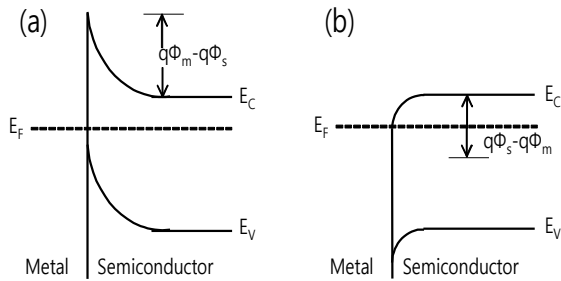


Fig. 2. Energy band diagram of metal-semiconductor(n-type) junction: (a) $q\Phi_m > q\Phi_s$ and (b) $q\Phi_s > q\Phi_m$.

여기서 W , L , C_{ox} 및 V_T 는 각각 채널의 너비, 길이, 게이트의 단위면적당 용량 및 문턱전압을 나타낸다. 식 (1)의 기울기로부터 μ 를 구할 수 있다. 그림 1로부터 구한 각 ZTO TTFT의 특성을 표 1에 요약하였다. 소스/드레인 전극으로 In을 사용하여 제작한 TTFT의 이동도가 $\sim 20.5 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 로 가장 높았으며, Al 및 ITO의 경우 각각 $\sim 12.7 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 및 $\sim 11.5 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 로 감소하였다. 트랜지스터의 이동도에 영향을 미치는 전극의 인자로는 전도도 및 전극과 소스/드레인 영역의 계면 특성이 있다. 그러나 전극으로 사용된 물질의 경우, Al의 전도도가 가장 높고 그 다음 In, ITO 순이다. 따라서 표 1에 나타난 이동도의 차이는 전극의 전도도 차이가 아니라 전극과 소스/드레인 영역의 계면특성 차이에서 기인한 것으로 예측할 수 있다. 전극의 계면 특성에 영향을 미치는 인자로는 전극의 일함수 및 interface state를 들 수 있다. 금속/반도체 접합은 두 물질의 일함수 차이에 의해 오믹 및 정류특성을 나타내는 것으로 알려져 있다 [13].

그림 2는 금속/반도체(n형) 접합에서의 에너지밴드 다이어그램을 나타낸 것이다. 여기서 E_F 는 페르미레벨, $q\Phi_m$ 은 금속의 일함수 그리고 $q\Phi_s$ 는 반도체의 일함수이다. 금속/반도체(n형) 접합이 양호한 오믹 특성을 갖기 위해서는 일함수가 낮은 금속을 사용해야 한다 [13].

TTFT의 활성층으로 사용한 ZTO막의 일함수는 공정에 따라서 차이가 있지만, 기존의 문헌 [14]을 참조하면 $\sim 5.35 \text{ eV}$ 이다. 그리고 In, Al 및 ITO의 일함수는 각각 4.09 eV, 4.26~4.74 eV 및 4.8 eV로 보고되어 있다 [15]. In, Al 및 ITO의 일함수 차이 ($q\Phi_m - q\Phi_s$)는 ZTO TTFT의 이동도 크기의 순서와 일치한다. 따라서 In, Al 및 ITO 전극에서 나타나는 TTFT의 이동도 차

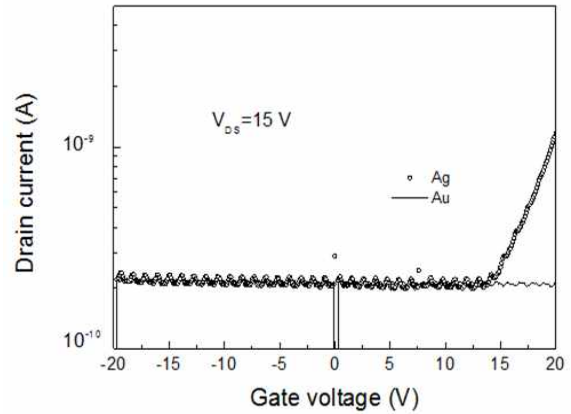


Fig. 3. Transfer characteristics of ZTO TTFTs using Ag and Au as source/drain electrodes, respectively.

이는 일함수 차이에 의해 발생하는 에너지 장벽이 원인이라고 볼 수 있다.

식 (1)의 x축 절편으로부터 V_T 구하였다. 소스/드레인 전극인 In, Al, ITO 순으로 V_T 가 증가하였다. TTFT의 V_T 는 아래의 식으로 표현된다 [16].

$$V_T = \frac{1}{q}(W_m - W_s) - \frac{1}{C_{ox}}(Q_i + Q_d) + 2\Phi_F \quad (2)$$

여기서 W_m , W_s , Q_i , Q_d 는 각각 게이트전극과 ZTO의 일함수 차이, 계면의 양전하, 공핍영역의 전하이다. 그리고 Φ_F 는 진성 레벨 (E_i)과 페르미레벨 (E_F)의 차이 ($(E_i - E_F)/q$)를 나타낸다. 식 (2)에 의하면 본 실험에서 제작된 ZTO TTFT는 소스/드레인 전극에 관계없이 V_T 가 일정해야 한다. 왜냐하면 제조된 3 종류의 TTFT는 게이트 전극으로 n^+ Si를 사용하였으며 활성층인 ZTO막의 증착공정도 동일했기 때문이다. 따라서 표 1의 결과는 소스/드레인 영역에 발생하는 전위장벽이 V_T 에도 영향을 미친다는 것을 의미한다. 이것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 식 (2)는 종래의 Si MOSFET에 적용되는 식이다. 종래의 Si MOSFET의 경우에는 소스/드레인 영역을 고농도로 도핑하여 전극과 소스/드레인 영역에서의 전위장벽이 전혀 형성되지 않는다.

따라서 게이트와 소스 사이에 인가된 전압 (V_{GS})이 오로지 게이트절연막 및 게이트절연막/채널의 계면에만 인가된다고 가정할 수 있다. 그러나 ZTO TTFT는 소스/드레인 영역의 저항률을 낮추기 위한 불순물 도핑을 하지 않는다. 따라서 인가된 V_{GS} 의 일부가 소스

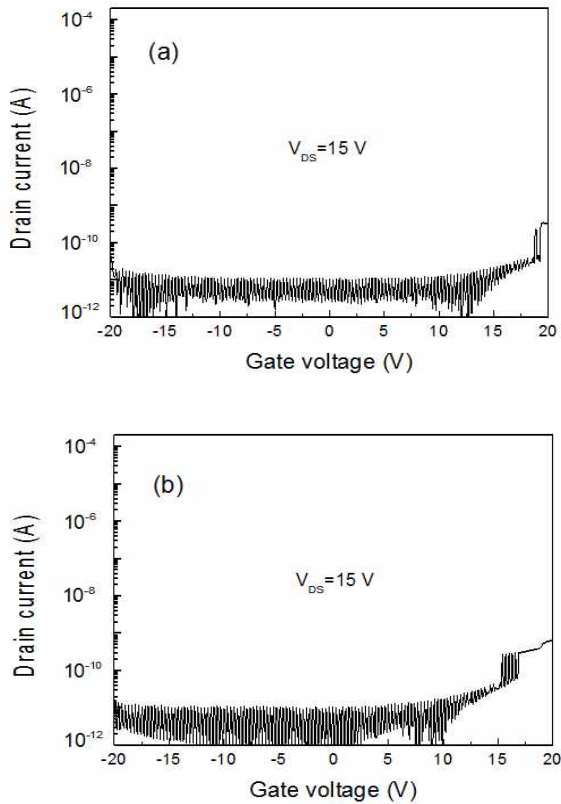


Fig. 4. Transfer characteristics of ZTO TFTs adopting different electrodes: (a) In (source) and Ag (drain), and (b) Ag (source) and In (drain).

영역 및 전극/소스 계면에 인가되어 실질적인 V_{GS} 를 낮추게 된다. 이것이 전극/소스 계면의 전위 장벽이 높을수록 V_T 가 증가하는 이유이다. I_{on}/I_{off} 는 세 경우 모두 10^6 이상의 높은 값을 나타내었다. 소스/드레인 전극의 일함수와 TFT의 특성 사이의 관계를 확인하기 위하여 일함수 차이가 큰 Ag와 Au를 비교하였다. Ag의 일함수는 4.26~4.74 eV, 그리고 Au는 5.10~5.47 eV로 보고 [15]된 바 있다.

Ag는 ITO에 비해 일함수가 낮을 뿐만 아니라 전도도도 매우 높다. 따라서 전도도와 일함수를 감안한다면 Ag가 ITO에 비해 ZTO TFT의 소스/드레인 전극으로 더 적합할 것이다.

그림 3은 Ag를 전극으로 사용하여 제조한 ZTO TFT (ZTO TFT-Ag) 및 Au를 전극으로 사용하여 제조한 ZTO TFT (ZTO TFT-Au)의 전달 특성을 나타낸 것이다. ZTO TFT-Ag의 경우 $V_{GS} = 13$ V 이상에서 드레인 전류가 흐르기 시작했으며, ZTO

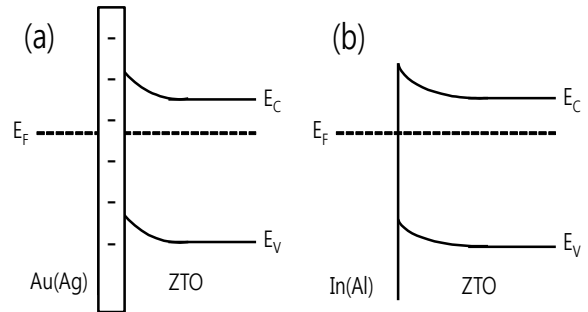


Fig. 5. Energy band diagrams for (a) Au(or Ag) and ZTO, and (b) In(or Al) and ZTO.

TTFT-Au는 $V_{GS} = -20$ V ~ 20 V에서 전계효과를 나타내지 않았다. ZTO TTFT의 문턱전압 및 이동도에 미치는 가장 큰 인자는 전극의 일함수가 아니라는 것을 그림 3의 결과를 통해 확인할 수 있다.

Ag 및 Au를 소스/드레인 전극으로 사용하면, Al, In, ITO와 구분되는 전극/소스(드레인) 계면 특성이 나타나는 것으로 추측된다.

그림 4는 소스 (In)/드레인 (Ag) 및 소스 (Ag)/드레인 (In)으로 전극을 구성하여 제조한 ZTO TTFT의 전달 특성이다. 만약 전극의 일함수가 Schottky 장벽을 형성하여 ZTO TTFT의 문턱전압을 높였다면, 소스/드레인의 전극 구성에 따라 ZTO TTFT의 전달 특성이 달라져야 한다. In은 ZTO와 좋은 오믹 특성을 갖는다 [9]. 따라서 Schottky 장벽은 Ag와 ZTO의 접합에서 나타날 것이다. 소스 (Ag) 영역은 소스-드레인 전압 (V_{DS})에 의해 역방향 바이어스가 되고, 드레인 (Ag) 영역은 V_{DS} 에 의해 순방향 바이어스가 된다. 따라서 소스 (Ag)/드레인 (In) 구조는 소스 (In)/드레인 (Ag)에 비해 문턱전압이 낮고 이동도가 높아야 한다. 그러나 그림 4에서 소스/드레인 전극 변화에 따른 TTFT의 특성 변화는 발견되지 않는다.

ZTO TTFT의 소스/드레인 전극으로 부적합하게 보이는 Ag와 Au의 공통된 특징은 산소와 반응하지 않는다는 것이다. 이것은 이온화 에너지의 크기에 따른 것으로 Ag와 Au의 이온화 에너지는 각각 757.6 KJ/mol 및 922.6 KJ/mol로서 In (558.3 KJ/mol) 및 Al (598.6 KJ/mol)에 비해 매우 크다 [17]. 본 연구팀에서는 Ag와 Au의 산소와의 불활성이 소스/드레인 접합 영역에 넓은 전위장벽을 형성하는 것으로 판단하고 있다. ZTO의 표면에는 Zn 또는 Sn과 완전하게 결합하지 못한 산소가 불완전 이온결합 상태로 존재하며, 불완전

이온결합 상태의 산소는 1가의 음전하를 띠게 된다 [18]. 이 음전하에 의해 전극과 ZTO막 사이에는 전위장벽이 형성되며, 이 장벽은 채널 전류의 흐름을 방해한다. 그러나 인듐이나 알루미늄을 전극으로 사용하게 되면 불완전 결합상태의 산소가 인듐이나 알루미늄과 결합하게 되어 전위장벽이 낮아지며 이에 따라 채널전류의 흐름이 원활해진다. 그림 5(a)에 음전하에 의해 전위장벽이 형성된 Au (또는 Ag)와 ZTO 접합에서의 에너지밴드 다이어그램을 나타내었다. 그림 5(b)는 음전하의 영향이 없는 In (또는 Al)과 ZTO 접합에서의 에너지밴드 다이어그램이다. 소스/드레인 전극과 ZTO의 계면 현상을 명확히 밝히기 위해서는 더 깊은 실험이 따라야 하나, 본 연구에서는 게이트절연층 뿐만 아니라 소스/드레인 전극의 특성이 TTFT의 이동도 및 문턱전압에 영향을 미친다는 사실과 산소와 결합이 어려운 Ag 및 Au는 산화물 반도체의 전극으로 부적합하다는 사실을 밝혔다.

4. 결론

소스/드레인 물질에 따른 ZTO TTFT의 특성 변화를 조사하였다. In, Al, Ag, Au 및 ITO를 ZTO TTFT의 소스/드레인 전극으로 사용하였다. In을 전극으로 사용하여 제작한 TTFT의 이동도가 $\sim 20.5 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 로 가장 높았으며, Al 및 ITO의 경우 각각 $\sim 12.7 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 및 $\sim 11.5 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 로 감소하였다. In, Al, ITO 전극에 따른 이동도의 차이는 전극의 전도도 차이 보다 전극/소스 영역의 계면 특성 차이가 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 전극/소스 접합영역에는 전위장벽이 형성되어 드레인 전류의 흐름을 방해하며, n형 반도체인 ZTO막의 경우에는 전위장벽을 낮추기 위해 낮은 일함수를 갖는 금속을 사용하는 것이 바람직하다. 전극/소스 계면의 전위 장벽은 V_T 증가의 원인이 된다.

Ag 및 Au를 소스/드레인 전극으로 사용하여 ZTO TTFTF 제조하고 그 특성을 비교하였다. Ag의 경우 $V_{GS} = 13 \text{ V}$ 이상에서 드레인 전류가 흐르기 시작했으며, Au의 경우에는 $V_{GS} = -20 \text{ V} \sim 20 \text{ V}$ 에서 전계효과가 나타나지 않았다. 본 연구팀에서는 Ag와 Au의 산소와의 불활성이 전극/소스 접합영역에 두터운 전위장벽을 형성하는 것으로 추측한다. 따라서 산소와의 결합이 어려운 Ag 및 Au는 산화물 반도체의 전극으로 부적합한 것으로 사료된다.

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] C. I. Lin, Y. K. Fang, W. C. Chang, M. W. Chiou, and C. W. Chen, *Microelectronics Reliability*, **54**, 905 (2014). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2014.01.015>]
- [2] D. S. Han, J. H. Park, M. S. Kang, D. K. Choi, and J. W. Park, *Curr. Appl. Phys.*, **15**, 94 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cap.2014.11.007>]
- [3] 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). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2011.05.048>]
- [4] H. Ohta and H. Hosono, *Materials Today*, **7**, 42 (2004). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021\(04\)00288-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021(04)00288-3)]
- [5] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, *Nature*, **432**, 488 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nature03090>]
- [6] A. Marsal, P. Carreras, J. Puigdollers, C. Voz, S. Galindo, R. Alcubilla, J. Bertomeu, and A. Antony, *Thin Solid Films*, **555**, 107 (2014). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2013.08.010>]
- [7] T. Y. Ma, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 304 (2011).
- [8] W. S. Cheong, Y. S. Yoon, J. H. Shin, C. S. Hwang, and H. Y. Chu, *Thin Solid Films*, **517**, 4094 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2009.01.181>]
- [9] M. H. Choi and T. Y. Ma, *Thin Solid Films*, **550**, 654 (2014). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2013.10.182>].
- [10] C. W. Cheng, I. M. Lee, and J. S. Chen, *Optics and Lasers in Engineering*, **69**, 1 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.01.011>]
- [11] H. Cho and Y. H. Yun, *Ceramics International*, **37**, 615 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.09.033>]
- [12] D. K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization* (A Wiley-Interscience Publication, 1990) p. 226.
- [13] B. G. Streetman, *Solid State Electronic Devices, 4th ed.* (Prentice-Hall international, Inc., 1995) p. 184.

- [14] C. A. Hoel, T. O. Mason, J. F. Gaillard, and K. R. Poeppelmeier, *Chemistry of Materials*, **22**, 3569 (2010).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/cm1004592>]
- [15] D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (CRC Press, 2004).
- [16] B. G. Streetman, *Solid State Electronic Devices, 4th ed.* (Prentice-Hall International, Inc., 1995) p. 312.
- [17] <http://www.lenntech.com/periodic-chart-elements/ionization-energy.htm>
- [18] C. Leach, *Acta Materialia*, **53**, 237 (2005).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2004.07.006>]