

## RF 파워 변화에 따른 IGZO 박막의 구조적, 광학적, 전기적 특성

진창현<sup>1,a</sup>, 김홍배<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 청주대학교 전자공학과

<sup>2</sup> 청주대학교 반도체공학과

### Structural, Optical, and Electrical Properties of IGZO Thin Film Sputtered with Various RF Powers

Chang-Hyun Jin<sup>1,a</sup> and Hong-Bae Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Electronic Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea

<sup>2</sup> Department of Semiconductor Engineering, Choungju University, Cheongju 360-764, Korea

(Received September 15, 2015; Revised September 24, 2015; Accepted September 24, 2015)

**Abstract:** We have studied structural, optical and electrical properties of In-Ga-doped ZnO (IGZO) thin films. The IGZO thin films were deposited on the corning 1737 glass by RF magnetron sputtering method. The RF power in sputtering process was varied as 30, 50, 70, and 90 W respectively. All of the IGZO thin films transmittance in the visible range (400 nm ~ 800 nm) was above 83%. XRD analysis showed the IGZO thin films amorphous structure of the thin films without any peak. And also IGZO thin film have low resistivity ( $1.99 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ ), high carrier concentration ( $6.4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ ), and mobility ( $10.3 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ). By the studies we found that IGZO transparent thin film can be used as optoelectronic material and introduced application possibility for future electronic devices.

**Keywords:** In-Ga doped ZnO, IGZO, Transparent conducting oxide, RF power, RF magnetron sputtering

#### 1. 서론

최근 디스플레이 산업이 활발히 발달하면서 소비자들의 요구에 따라 고화질 영상 서비스를 위한 인프라 구축, 인간 친화적인 디스플레이 즉 e-paper, flexible 디스플레이, 투명 디스플레이 등의 개발과 상용화에 노력하고 있으며 또한 저가격, 대면적, 공정의 단순함을 해결 가능하기 위한 다양한 투명 전도성 박막 (transparent conducting oxide, TCO)의 물성에 관

한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1,2]. 이러한 투명 전도성 박막은 가시광 영역에서의 높은 투과율,  $10^{-3} \Omega \text{cm}$  이하의 낮은 비저항, 높은 일함수 등의 조건을 갖추어야 한다. 현재 가장 널리 사용되는 투명 전도막은 ITO (indium tin oxide)로서 전기적 및 광학적 특성이 우수하나, 이러한 특성을 얻기 위해서는 200 ~ 300°C의 고온에서 증착되어야 한다 [3]. 또한 원료 물질 중 인듐 (In) 수급량 부족에 의한 재료비 상승, 인듐의 독성, 저온 증착의 어려움, 수소 플라즈마 하에서의 열화와 인듐과 주석의 환원성 등의 문제점을 안고 있으며 이러한 문제점의 방안으로 산화아연 (ZnO)계의 산화물 반도체가 많은 연구가 되고 있다 [4-9]. 일반적으로 순수 진성 ZnO 박막의 경우 낮은 전기적 특성으로 인하여 투명 전극으로 적용하기에는 미흡하기 때문

a. Corresponding author; [chjin@cju.ac.kr](mailto:chjin@cju.ac.kr)

에 ZnO에 붕소 (B), 알루미늄 (Al), 갈륨 (Ga), 인듐 (In) 과 같은 3족 원소를 불순물로 도핑하여 전기 전도도를 높인다 [10,11]. 특히 In-Ga doped ZnO(IGZO) 박막은 현재 TCO 물질로서 ITO 박막의 대체재로 주목 받고 있으며, IGZO는 다성분계이기 때문에 통상적인 박막 성장 조건에서 비정질 구조로 제작할 수 있으며, 유독성이 낮고, 넓은 밴드갭(band-gap)을 가지고 있어 우수한 전기적 특성과 가시광 영역에서의 높은 투과율을 갖는 IGZO 박막을 제작할 수 있다 [12,13].

지금까지 박막의 제조 방법은 MBE (molecular beam epitaxy), CVD (chemical vapor deposition), 졸-겔 방법 (sol-gel method), PLD (pulsed laser deposition) 그리고 RF 마그네트론 스퍼터링 방법 (RF magnetron sputtering system) 등이 있으며 이러한 방식 중 특히 RF 마그네트론 스퍼터링 방법의 경우 낮은 기판 온도에서 박막 증착이 자유롭고 고 진공 상태를 유지하면서 증착하기 때문에 불순물에 의한 오염이 적은 장점과 또한 높은 증착률의 대면적화가 가능한 이유로 널리 사용되고 있다 [14-20].

본 논문에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 장비를 사용하여 IGZO 박막이 RF 파워 변화에 따른 구조적, 광학적, 전기적 특성을 분석하여 투명전자 소자의 활용 가능성에 대하여 확인하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험은 RF 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 Corning #1737 유리 기판 위에 투명 전도 산화막인 IGZO 박막을 증착하였다. 스퍼터링 타겟으로  $In_2O_3$ ,  $Ga_2O_3$ , ZnO 분말을 각각 1:1:2 mol%의 조성비로 혼합하여 소결시킨 직경 2인치의 디스크 타입 타겟을 사용하였고, 유리 기판 표면의 오염을 제거하기 위하여 탈이온수(Di water), 아세톤(aceton), 메탄올(methanol)에 각각 5분씩 초음파 세척을 실시하였다. 세척 후 시료 표면에 남아있는 유기 용매는 질소( $N_2$ ) 기체로 건조시켰으며, 건조 직후 잔존 수분을 제거하기 위하여 150°C 에서 1분간 열처리를 실시하였다. IGZO 박막을 증착하기 위해 초기 진공을  $3.0 \times 10^{-6}$  Torr 이하로 진공 배기 이후 박막 증착 시 반응 가스로 Ar 30 sccm을 사용하였으며, 챔버 내 압력은 스로틀 밸브를 조절하여 20 mTorr를 유지하도록 하였다. 타겟과 기판 사이의 거리는 35 mm이며, RF 파워는 30 ~ 90 W로 변화를 주어 증착 전 프리 스퍼터링을 10분간 실시하여 IGZO

**Table 1.** Deposition conditions of IGZO thin films.

RF Magnetron Sputtering System	
Substrate	Glass (Corning #1737)
Target	$In_2O_3:Ga_2O_3:ZnO$ (1:1:2 mol%)
Base Pressure	$3.0 \times 10^{-6}$ Torr
Working Pressure	$2.0 \times 10^{-2}$ Torr
RF power (13.56 MHz)	30, 50, 70, 90 W
Ar flow	30 sccm
Thickness	200 nm ( $\pm 10\%$ )
Temperature	Room Temperature

박막을 증착하였다. IGZO 박막은 상온에서 증착하였고, 모든 박막의 두께는 약 200 nm로 고정하였다. 박막을 증착하기 위한 공정 조건은 표 1에 자세히 나타났다.

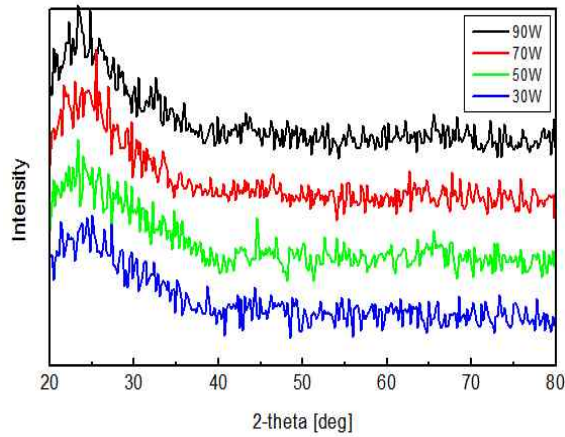
제작된 박막의 결정성 및 배향성을 분석하기 위해 XRD (SmartLab/ RIGAKU)를 통해 확인하였으며, 박막 표면의 거칠기를 측정하기 위해 AFM (Dimension/ Veeco)을 사용하여 분석하였다. 또한 가시광 영역에서의 투과도는 UV-Vis-NIR 분광광도계 (V-670/ JASCO)를 사용하여 분석하였고, 전기적인 특성을 확인하기 위하여 홀 측정(HMS-3000/ ECOPIA)을 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

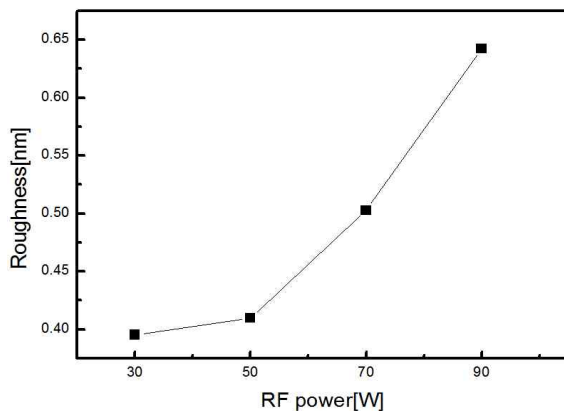
### 3.1 RF power 변화에 따른 구조적 특성

유리기판 위에 증착된 IGZO 박막의 결정성은 XRD에 의해 분석되었다.

그림 1은 RF power에 따른 IGZO 박막에 대한 XRD 회절 패턴을 보여주고 있다. 증착 조건에 관계없이 2-theta가 약 23°부터 30°에 걸쳐 넓은 피크로 관찰되었는데 이것은 결정질 박막에서 보이는 폭이 좁은 intensity와 강한 peak가 아니라 단지 IGZO 박막의 비정질 상에서 나타나는 glass peak임을 예측할 수 있다 [21,22]. RF power의 변화와 관계없이 Brass's 법칙 ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ )을 나타내는 peak가 없는 것으로 보아 비정질 구조임을 확인할 수 있었다 [23].



**Fig. 1.** Amorphous phase of the as-deposited IGZO films has been confirmed by XRD analysis.

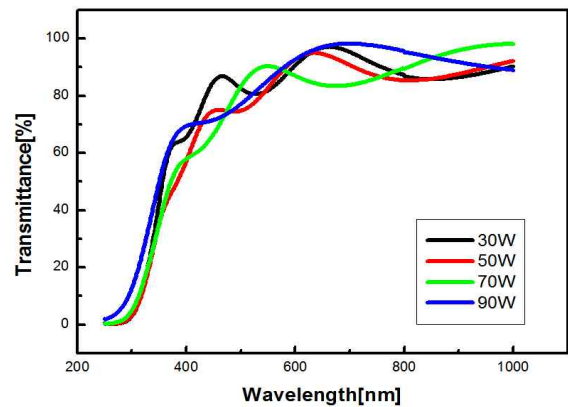


**Fig. 2.** RMS roughness of IGZO thin films as a function of RF power, and their AFM images.

그림 2는 IGZO 박막의 표면 형상 변화를 알아보기 위해 나타난 AFM 측정 결과 그래프이다. RF power의 변화에 따라 증착된 IGZO 박막의 거칠기는 최소 0.39 nm에서 최고 0.64 nm의 값으로 증가하고 있다. RF power가 증가하면 챔버 내 플라즈마 밀도가 상승하여, 기판의 흡착되는 입자들의 에너지가 증가하기 때문에 거칠기가 증가하는 경향을 보였다. 거칠기가 증가하게 되면 박막 내부로 입사하는 빛을 산란 시켜 광학적 특성을 나쁘게 하는 요인이 된다. 모든 샘플의 박막들의 평균 거칠기가 1 nm 이하로 나타났기 때문에 디스플레이 소자에 응용 가능한 수준이다.

### 3.2 RF power 변화에 따른 광학적 특성

그림 3은 RF 파워에 따른 IGZO 박막의 투과도 곡선을 나타낸 것이다. UV 분광광도계를 사용하여 200~1,000 nm 파장 영역에서 광학적 투과율을 측정하였다. 모든 박막은 가시광 영역에서 약 83% 이상의 투과도를 보이며, 청색영역이 적색영역에서 보다 더 좋은 투과율을 나타내었다. 녹색 파장을 기준으로 했을 때 90 W에서 가장 낮은 투과율을 보이고 있으며, 이는 앞서 언급한 바와 같이 90 W에서 AFM 분석 결과 가장 거친 표면을 가지고 있어 빛의 산란을 일으켜 투과도가 저하된 것으로 판단된다.



**Fig. 3.** Optical transmittance of IGZO grown at different RF powers.

직접 천이형 반도체인 IGZO는 식 (1)에 나타난 것과 같이 흡수계수  $\alpha$ 를 이용하여 에너지 밴드 갭을 구할 수 있다 [24].

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (1)$$

여기서,  $A$ 는 상수,  $h\nu$ 는 광자에너지 ( $eV$ )이며,  $E_g$ 는 에너지 밴드 갭이다. 그리고 흡수계수  $\alpha$ 는 투과율 ( $T$ )과 박막의 두께 ( $d$ )를 이용한 식 (2)와 같다.

$$\alpha = \ln(1/T)/d \quad (2)$$

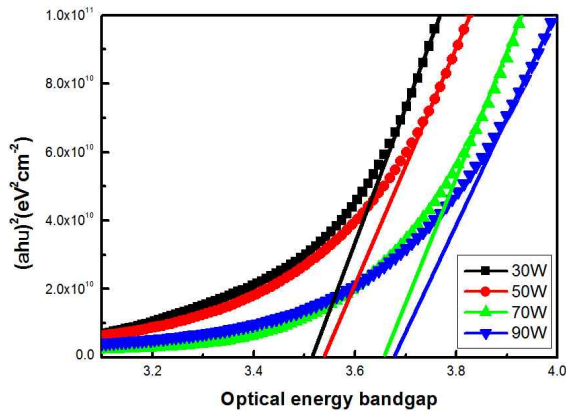


Fig. 4. Optical band-gap image of IGZO film deposited with different RF powers.

그림 4는 RF 파워에 따른 흡수계수  $(ahv)^2$  대 광자 에너지  $(hv)$ 의 그래프를 나타낸 것이다. 각각의 그래프에서 접선의 기울기를 그려,  $(ahv)^2 = 0$ 이 되는 지점의 수치가 에너지 밴드 갭 ( $E_g$ ) 값이 된다. 그림에서 보듯이 RF power가 증가함에 따라 광학적 에너지 밴드 갭은 3.5 eV에서 3.65 eV로 넓어지는 것을 확인할 수 있다. IGZO 박막이 RF power가 증가함에 따른 광학적 밴드 갭의 증가는 Burstein-Moss의 효과에 의한 것으로 설명될 수 있다 [25]. Burstein-Moss의 효과에 따르면, 전도 내에 페르미 준위의 증가는 전하농도의 증가와 함께 밴드 갭 에너지의 확장을 초래한다. 따라서 30 W에서 증착된 IGZO 박막의 전하농도가 가장 적을 것으로 판단된다.

### 3.3 RF power 변화에 따른 전기적 특성

증착된 IGZO 박막이 RF power에 따른 전기적 특성을 분석하기 위해 상온에서 Hall 측정을 실시하였으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다. RF power 30 W인 박막의 전기비저항과 전하의 농도는 각각  $6.11 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ 와  $4.13 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 으로 각각 측정되었으며, RF power 90 W인 경우 전기적 비저항이  $1.99 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ 로 낮아졌고, 전하의 농도는  $6.4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 으로 증가하였다. 전하 농도의 증가와 더불어 전하 이동도는  $2.92 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ 에서  $10.3 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ 로 증가하였다. RF power의 변화에 따라 RF power가 높을수록 전하 이동도와 전하의 농도는 증가하였으며, 전기적 비저항은 낮아지는 것을 나타내었다. RF power가

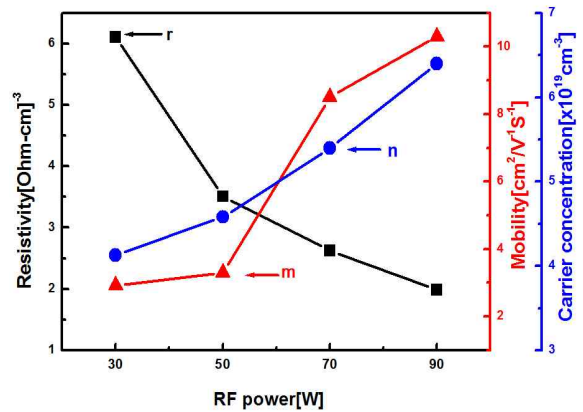


Fig. 5. Relationship of conductivity, mobility and carrier concentration as a function at different RF power in IGZO thin films.

증가함에 따라 IGZO 박막의 전하의 이동도와 전하 농도는 증가하였으며 전기적 비저항이 감소하였다. 이는 흡착원자의 에너지가 증가하여 Zn 원자가 Ga, In 원자로 활발히 치환되어 캐리어 밀도 및 이동도가 상승되어진 것으로 판단되며 산소 결핍 및 결정 결함에 의한 deep donor 준위에 포획된 전자농도 증가로 비저항이 낮아지게 된다 [25,26].

## 4. 결론

RF 마그네트론 스퍼터링법으로 증착한 IGZO 박막의 구조적, 광학적, 전기적 특성을 RF power에 변화에 따라 분석하였다. XRD 분석 결과 Bragg's 법칙을 만족하는 피크가 나타나지 않는 비정질 구조임을 확인하였고, AFM 표면 분석 결과 RF power가 증가할수록 roughness는 증가하는 경향을 보였으며, 최소 0.39 nm에서 최고 0.64 nm의 값을 확인하였다. UV 분광광도계를 사용하여 분석한 결과 IGZO 박막은 RF power 변화에 상관없이 모두 가시광 영역에서의 투과율은 83% 이상의 투과성을 보였다. 또한 Hall 측정 결과 RF power가 증가할수록 전하농도와 전하 이동도는 증가하였으며, RF power 90 W 일 때 전하의 농도  $6.4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ , 전하 이동도  $10.3 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ , 전기적 비저항이  $1.99 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ 로 나타냄을 확인할 수 있었다. IGZO 박막은 RF power가 증가할수록 좋은 특성을 갖는 투명전자 소자의 투명 전극으로서 사용 가능함을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2014-2016학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술 연구 조성비(특별연구 과제)에 의해 연구되었음.

### REFERENCES

- [1] J. Han, P. Q. Mantas, and A.M.R. Senos, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **21**, 1338, (2001).  
[DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0955-2219\(01\)00136-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0955-2219(01)00136-4)]
- [2] T. Minami, H. Nanto, and S. Takata, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23**, 280 (1984).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.23.L280>]
- [3] K. Lee, J. Yoo, J. Hong, S. Lee, Y. Kim, and H. Jeong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **20**, 25 (2007).
- [4] C. J. Tun, J. K. Sheu, B. J. Pong, M. L. Lee, C. K. Hsieh, C. C. Hu, and G. C. Chi, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18**, 274 (2006).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2005.861987>]
- [5] Z. C. Jin, I. Hamberg, and C. G. Granqvist, *J. Appl. Phys.*, **64**, 5117 (1988). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.342419>]
- [6] Z. L. Pei, X. B. Zhang, G. P. Zhang, J. Gong, C. Sun, R. F. Huang, and L. S. Wen, *Thin Solid Films*, **497**, 20 (2006). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2005.09.110>]
- [7] H. J. Ko, Y. F. Chen, S. K. Hong, H. Wensch, T. Yao, and D. C. Look, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 3761 (2000).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1331089>]
- [8] J. H. Lee, S. Y. Lee, and B. O. Park, *Mater. Sci. Eng.: B*, **127**, 267 (2006).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mseb.2005.10.008>]
- [9] Y. L. Wang, F. Ren, W. Lim, D. P. Norton, S. J. Peaton, I. I. Kravchenko, and J. M. Zavada, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 242103 (2007).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2748306>]
- [10] C. S. Hong, H. H. Park, J. Moon, and H. H. Park, *Thin Solid Films*, **515**, 957 (2006).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.055>]
- [11] S. J. Henley, M.N.R. Ashfold, and D. Cherns, *Surf. Coat. Technol.*, **177**, 271 (2004).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.09.005>]
- [12] S. U. Oh, E. W. Kim, T. Y. Lee, H. I. Kang, B. S. Kim, and J. T. Song, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **20**, 776 (2007).
- [13] J. J. Kim and H. M. Kim, *J. Kor. Vac. Soc.*, **14**, 238 (2005).
- [14] M. S. Wang, E. J. Kim, J. S. Chung, E. W. Shin, S. h. Hahn, K. E. Lee, and C. H. Park, *Phys Stat. Sol. A*, **203**, 2418 (2006). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.200521398>]
- [15] K. H. Kim, K. C. Park, and D. Y. Ma, *J. Appl. Phys.*, **81**, 7764, (1997). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.365556>]
- [16] Y. Zhang, G. Du, and B. Liu, *J. Cryst. Growth*, **262**, 456 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2003.10.079>]
- [17] D. H. Kong, W. C. Choi, Y. C. Shin, J. H. Park, and T. G. Kim, *J. Korean. Phys. Soc.*, **48**, 1214 (2006).
- [18] D. M. Bagnall, Y. F. Chen, M. Y. Shen, Z. Zhu, T. Goto, and T. Yao, *J. Cryst. Growth*, **184**, 605 (1998).  
[DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)80127-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248(98)80127-9)]
- [19] N. Kawasaki, Y. Kubozo, H. Okamoto, A. Fujiwara and M. Yamaji, *Appl. Phys. Lett.* Vol 94, 043310, (2009).  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3076124>
- [20] J. H. Lee, D. J. Lee, D. G. Lim, and K. J. Yang, *Thin Solid Films*, **515**, 6094 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2006.12.099>]
- [21] L. Yuanjie, L. Zilong, J. Kai, and H. Xiaofen, *J. Non-Cryst. Solids*, **378**, 50 (2013).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.06.014>]
- [22] A. Takagi, K. Nomura, H. Ohta, H. Yanagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, *Thin Solid Films*, **486**, 38 (2005). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2004.11.223>]
- [23] N. Kawasaki, Y. Kubozo, H. Okamoto, A. Fujiwara, and M. Yamaji, *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 043310 (2009).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3076124>]
- [24] X. Chen, W. Guan, G. Fang, and X. Z. Zhao, *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 1561 (2005).
- [25] E. Burstein, *Phys. Rev.*, **93**, 632 (1954). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.93.632>]
- [26] X. Yu, J. Ma, F. Ji, Y. Wang, X. Zhang, C. Cheng, and H. Ma, *J. Crystal. Growth*, **474**, 479 (2005).
- [27] K. Vanheusden, C. H. Seager, W. L. Warren, D. R. Tallant, and J. A. Voight, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 403 (1996). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.116699>]