

광소자용 n-ZnO 박막의 Ru 오믹 접촉 연구

김한기 · 김경국 · 박성주 · 성태연 · 윤영수[†]

광주과학기술원 신소재공학과
*한국과학기술연구원 박막기술연구센터
(논문접수일 : 2002년 2월 19일)

Investigation of Ru ohmic contacts to n-ZnO thin film for optoelectronic devices

Han-Ki Kim, Kyoung-Kook Kim, Seong-Ju Park, Tae-Yeon Seong, and Young Soo Yoon[†]

Department of Materials Science and Engineering,
Kwangju Institute of Science and Technology (K-JIST), Kwangju, 500-712, Korea
*Thin Film Technology Research Center, Korea Institute of Science and Technology(KIST),
P.O. box 131 Choengryang, Seoul 130-650, Korea
(Received February 19, 2001)

요 약

스퍼터로 성장시킨 n-ZnO:Al($3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 박막에 Ru 금속 박막을 이용하여 열적으로 안정하며 낮은 저항을 가지는 오믹 접촉을 제작하였다. 상온에서 $2.1 \times 10^3 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$ 의 비접촉 저항을 보이던 Ru 오믹 접촉은 열처리 온도를 증가시키에 따라 I-V 특성이 향상되었고 특히 700°C에서 1분 동안 열처리 할 경우 $3.2 \times 10^5 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$ 의 낮은 비접촉 저항을 나타내었다. 또한 Ru 오믹 접촉 시스템은 고온에서도 안정한 특성을 나타내었는데 700°C에서의 고온 열처리 후에도 1.4 nm의 아주 낮은 rms 거칠기를 갖는 평탄한 표면을 나타내었다. 이와 같이 낮은 비접촉 저항과 열적 안정성은 Ru 오믹 접촉 시스템이 ZnO를 근간으로 하는 고성능의 광소자 및 고온소자에 적합한 오믹 접촉 시스템이라는 것을 말해준다. 또한 Ru 오믹 접촉의 비접촉 저항의 열처리 온도 의존성을 설명할 수 있는 메카니즘을 제시하였다.

Abstract

We fabricate thermally stable and low resistance Ru ohmic contacts to n-ZnO:Al ($3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), grown by specially designed dual target sputtering system. It is shown that the as-deposited Ru contact produces a specific contact resistance of $2.1 \times 10^3 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$. Annealing of the Ru contacts leads to the improvement of current-voltage characteristics. For example, annealing of the contact at 700°C for 1 min produces a contact resistance of $3.2 \times 10^5 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$. Furthermore, the metallisation scheme is found to be thermally stable: the surface of the contact is fairly smooth with a rms roughness of 1.4 nm upon annealing at 700°C. These results strongly indicate that the Ru contact represents a suitable metallisation scheme for fabrication of high-performance ZnO-based optical devices and high-temperature devices. In addition, possible mechanisms are suggested to describe the annealing temperature dependence of the specific contact resistance.

1. 서 론

산화아연반도체(ZnO)는 직접 천이형 밴드구조를

갖는 화합물 반도체로서 LED, LD, UV-photodetector와 같은 광소자나 전자소자로서의 응용이 가능한 물질로 전세계적으로 많은 연구가 이루어져 오고

[†] E-mail : ysyoon@kist.re.kr

있다 [1-3]. 특히 GaN와 유사한 광특성 및 구조적 특성을 가지며, 상온에서 넓은 밴드갭(3.37 eV), 큰 결합력(1.89 eV), 높은 녹는점(2248 °C), 및 큰 exciton 결합에너지(60 meV)등의 장점으로 인해 GaN를 대체할만한 차세대 물질로 큰 각광을 받고 있다. 이러한 추세에 힘입어 최근 n-ZnO와 p-SrCu₂O₂의 이종 접합으로 이루어진 UV-LED가 보고 되어 ZnO를 근간으로 하는 광소자의 실현을 가시화 시키고 있다 [4]. 또한 Liang은 n-ZnO 에피택시 박막을 이용하여 금속-반도체-금속(MSM) 타입의 UV photodetector를 제작하여 1.5 A/W의 photoresponsivity를 보였다 [5]. 이러한 광소자들의 성능 및 신뢰성을 향상시키기 위해선 고품위의 옴릭(Ohmic) 및 쇼트키(Schottky) 접착을 구현하는 것이 소자제작에 있어 기본적인 필수 요소이다. 특히 옴릭 접착의 특성이 좋지 않으면, 금속과 반도체 사이에 접착 저항이 커지게 되고 이로 인하여 캐리어 주입 속도가 떨어져 계면에서 열적 손실이 증가하게 되어 소자의 발광 효율에 영향을 미치게 된다. Ohta는 최초로 ZnO를 이용하여 LED를 제작하였지만 아직까지 옴릭 접착에 대한 연구가 미진하여 ITO를 전극으로 사용하여 LED를 제작하였다 [4]. 같은 그룹의 Kudo [6] 역시 우수한 옴릭 접합시스템의 부재로 인해 n⁻ZnO/ITO층을 전극으로 이용하여 LED를 제작하였는데, 보다 우수한 특성의 ZnO를 이용한 광소자를 실현시키기 위해선 금속과 ZnO간의 낮은 비접촉 저항 및 우수한 열적, 구조적 안정성을 가지는 옴릭 접합을 구현하는 것이 중요한 과제로 인식되고 있다. 본 연구 그룹에서는 UV photodetector 및 LED를 제작하기 위해 n-ZnO에 최초로 Ti/Au 다층 박막을 이용한 옴릭 접착을 제시하였으나 열처리 시 350°C 이상의 온도에서 표면의 열화가 일어나 옴릭 접착의 특성에 영향을 주게 되는 문제점이 제기 되었다 [7,8]. 또한 Akane 역시 In 금속 박막을 이용하여 n-ZnO에 옴릭 접착 특성을 제시하였으나 역시 300°C에서 옴릭 특성의 열화가 발생하였다 [9]. 따라서 고품위의 ZnO 광소자를 제작하기 위해선 보다 열적으로 안정하면서 보다 낮은 비접촉 저항을 갖는 새로운 옴릭 접착 시스템에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 Al이 도핑된 n-ZnO:Al ($3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)에 50 nm 두께의 Ru 금속 박막을 이용하여 고온에

서도 안정하며 낮은 비접촉 저항을 갖는 옴릭 접착을 형성시켰다. 비접촉 저항은 c-TLM(circular transmission line model)방법을 이용하여 계산하였고, glancing angle x-선 회절(GXRD), Auger electron spectroscopy(AES) depth profile, scanning electron microscopy(SEM), 및 atomic force microscopy(AFM) 분석을 통하여 금속과 반도체간의 계면 반응 및 표면 상태를 관찰하여 Ru 옴릭 접착의 비접촉 저항의 열처리 온도 의존성을 설명할 수 있는 가능한 메커니즘을 제시하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 1 μm 두께의 n-ZnO 박막은 (0001) 사파이어 기판 위에 Al₂O₃ 이 1 wt % 첨가된 ZnO 타겟(pure tech)을 이용하여 고온 rf 스퍼터(Korea Vacuum-KVS-25060)로 750°C의 고온에서 성장시켰다. ZnO 박막 성장 후, 금속 열처리(Rapid Thermal Annealing: RTA) 시스템을 이용하여 900°C에서 Al 도판트의 활성화 및 ZnO 박막 광 특성의 향상을 유도하였다 [10]. 이때 캐리어 농도 및 전자의 이동도는 각각 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 와 $60 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이었으며 이는 Van der Pauw geometry를 이용한 Hall measurement 시스템(Bio-Rad Co., UK)으로 측정하였다. 또한 상온에서 325 nm 파장의 He-Cd 레이저를 이용하여 n-ZnO의 photoluminescence(PL) 특성을 관찰 하였으며, 구조적 특성은 XRD(Huber diffractometer 5020) θ - 2θ scanning 및 in-plane ϕ scanning 을 통해 관찰하였다.

n-ZnO의 표면은 trichloroethylene, acetone, methanol, DI water를 이용하여 각각 3분씩 초음파 세척하였고 HCl:H₂O (2:1) 용액을 이용하여 표면 오염 층을 제거하였다. 표면처리 후 전자빔 증발기(e-beam evaporator: PLS 500 model)을 이용하여 50 nm 두께의 Ru 금속박막을 n-ZnO 위에 성장시켰다. 그림 1은 비접촉 저항을 구하기 위하여 일반적인 photolithography와 lift-off 공정을 통하여 제작된 c-TLM pattern으로 내부 원의 지름은 105 μm 이고 내부 원과 외부 원의 간격은 3 μm 에서 21 μm 로 증가한다. 이러한 c-TLM 방식은 mesa 구조가 필요 없기 때문에 식각으로 인한 플라즈마 영향을 배제할 수 있고 식각 공정을 배제할 수 있는 장점이 있다. 외부 원과 내부 원의 사이의 저항(RT)는 다음의 식으로 나타낼 수 있고 [11]

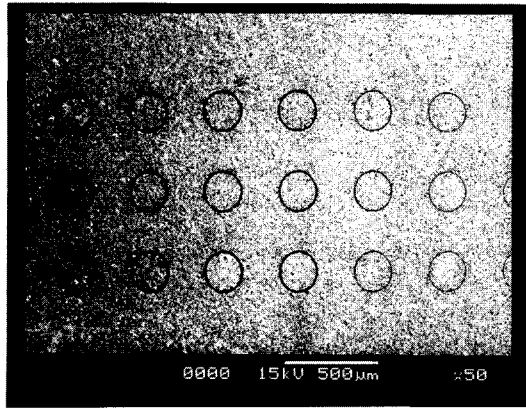


그림 1. SEM image of the circular-transmission line method(c-TLM) pattern on ZnO

$$R_T = \frac{R_s}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{R_1}{R_1-d}\right) + L_T \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1-d} \right) \right]$$

여기서 R_s 는 sheet resistance, R_1 는 외부 원의 지름, L_T 는 transfer length, d 는 내부 원과 외부원사이의 거리를 나타낸다. 이렇게 제작된 c-TLM pattern을 급속 열처리 시스템(AST™)을 이용하여 질소 분위기 하에서 700°C의 온도에서 1분 동안 열처리하였다. 전압-전류 특성은 parameter analyzer(HP4155A)를 이용하여 측정하였고, Ru 금속과 ZnO간의 열처리 온도 증가에 따른 확산 거동은 AES depth profile(PHI 670)을 이용하여 분석하였다. 또한 계면 반응에 따라 형성된 상을 분석 하기 위하여 GXR드 분석을 실시하였다. SEM과 AFM 분석을 통해 Ru 표면의 안정성과 morphology를 관찰 하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 본 실험에 사용된 n-ZnO의 상온 PL 분석 결과로서 380 nm(3.26 eV)에서 강한 near band edge (NBE) peak을 나타내고 있다. 자외선 영역에서 방출되는 ZnO의 밴드갭에(3.36 eV) 가까운 크기의 강한 NBE peak은 상온에서 일어나는 free exciton 결합(EX)에 의한 것으로 사료된다 [12]. 또한 점결함에 의해 형성되는 deep level(496 nm)이 나타나고 있지 않은데 이는 고온에서 성장시킨 ZnO 박막 내에 산소 공공이나 침입형 아연 원자와 같은 점결함이 작게 분포하고 있음을 말해 준다. 그림 3은 본 실험

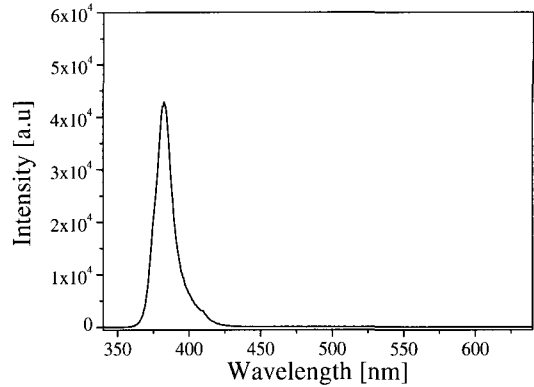


그림 2. The room temperature photoluminescence of the n-ZnO layer, which shows strong band-edge peak at 380 nm without deep level emission.

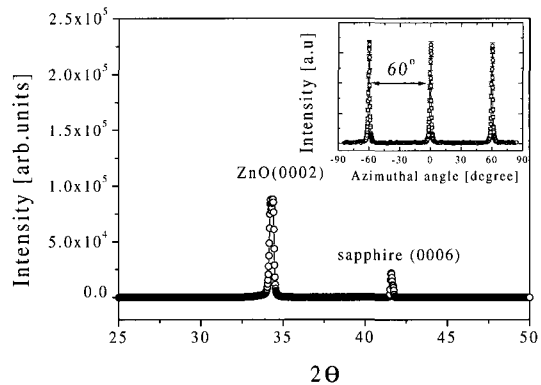


그림 3. The θ - 2θ scanning of the n-ZnO layer on sapphire (0001) substrate rapid thermal annealed at 900°C with inset of ϕ -scanning along the azimuthal circle at the (10-12) peak of the ZnO layer.

에 사용된 n-ZnO의 XRD 결과로서 θ - 2θ scan결과 (0002) ZnO peak과 (0006) 사파이어 기판 peak만이 나타나고 있는데 이는 사파이어 기판 위에 성장된 ZnO가 (0001)_{ZnO}/(0001)_{Sapphire}의 heteroepitaxial 관계를 가지고 에피택시 형태로 성장했음을 나타내고 있다. 또한 ZnO (0002)의 θ -rocking curve 역시 0.15°의 작은 반치폭(FWHM)을 가지는데 이는 사파이어 위에 성장된 ZnO 박막이 강한 c축 배향성을 가지고 성장했음을 의미한다. ZnO 박막의 in-plane 특성은 ϕ -scanning으로 관찰하였는데, 그림 3의 inset에서 알 수 있듯이 ZnO (01-12)면의 azimuthal circle에 따른

x-ray scattering profile이 60°의 동일 간격으로 떨어져 있는 것을 알 수 있는데 이는 ZnO 박막이 sixfold symmetry를 가지고 성장했음을 말해준다. 따라서 본 실험에 사용된 ZnO 박막은 사파이어 기판위해 고품위의 광 특성과 (0002)면이 c축으로 우월 배향성을 가진 n형 반도체로써 UV photodetector나 LED와 같은 광 소자로서의 응용이 가능한 박막으로 사료되고 현재 소자 제작에 관한 연구가 진행 중에 있다 [10,13].

그림 4는 n-ZnO위에 Ru 금속 박막을 이용하여 형성시킨 c-TLM으로부터 얻어진 Ru과 ZnO 사이의 I-V결과이다. 열처리를 하지 않은 시료와 700°C에서 열처리한 시료 모두가 직선의 I-V특성을 나타내는데 이는 Ru과 ZnO사이에 오믹 접촉이 이루어졌음을 나타낸다. 특히 열처리 온도를 700°C의 고온으로 상승시킬 경우 오믹 특성이 급격하게 향상됨을 알 수 있다. C-TLM pattern의 간격에 따른 저항을 열처리 온도에 따라 플롯하여 linear square method를 이용해 비접촉 저항을 계산하였다. 열처리를 하지 않은 경우 $2.1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ 의 비접촉 저항을 나타내었다. 이 결과는 열처리를 하지 않은 Ti/Au 오믹 시스템과 비교할 때 [7], 10배 이상의 낮은 비접촉 저항을 나타내는데 이는 Ru를 증착시킨 ZnO의 도핑 농도($3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)가 Ti/Au를 증착시킨 ZnO

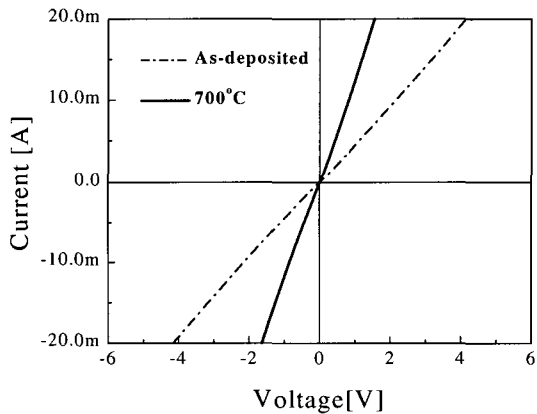


그림 4. I-V characteristics for the Ru contacts on n-ZnO. The as-deposited and annealed contacts exhibit linear I-V behaviour. It was shown that the I-V characteristic is improved with increasing annealing temperature up to 700°C.

($2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)에 비해 10배 정도 높기 때문이라 사료된다. 또한 열처리 온도를 700°C로 증가시킬 경우 비접촉 저항이 대폭 감소 되어 $3.2 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ 의 값을 얻을 수 있었다. 이와 같은 I-V특성의 열처리 온도 의존성은 Ru과 ZnO사이에 일어난 계면반응에 기인한 것임을 AES depth profile 결과로부터 알 수 있다.

그림 5는 열처리 전과 700°C에서 열처리한 Ru/ZnO의 AES depth profile 결과로써 열처리 전에는 Ru과 ZnO간의 계면 반응이 없음을 알 수 있다. 그러나 열처리 온도를 700°C로 증가시킬 경우 (그림 5(b)) 다량의 산소원자가 Ru 금속 층으로 확산하는 것을 알 수 있다. 산소원자에 비해 아연원자는 열처리 후에도 열처리 전의 상태와 큰 차이 없이 ZnO내에 존재함을 관찰할 수 있다. 이러한 산소원자의 고온에

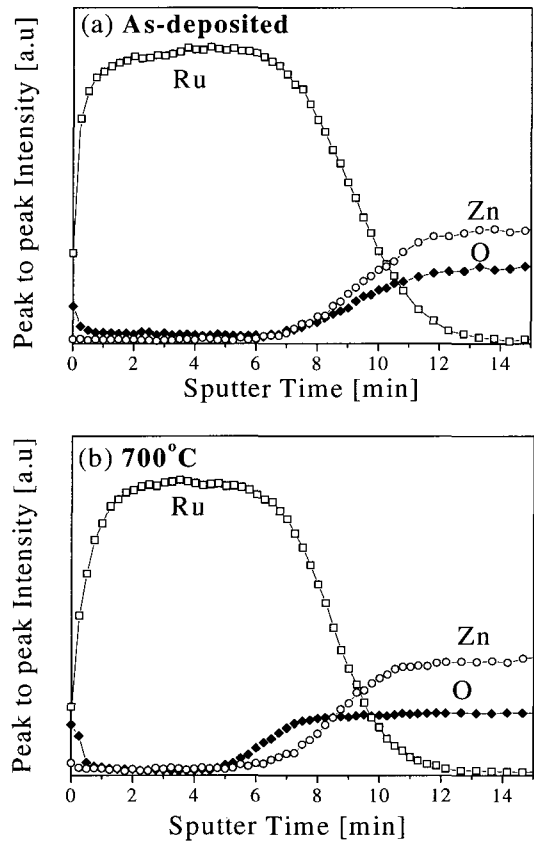


그림 5. The AES depth profiles of (a) the as-deposited and (b) 700°C annealed Ru contacts on n-ZnO layer.

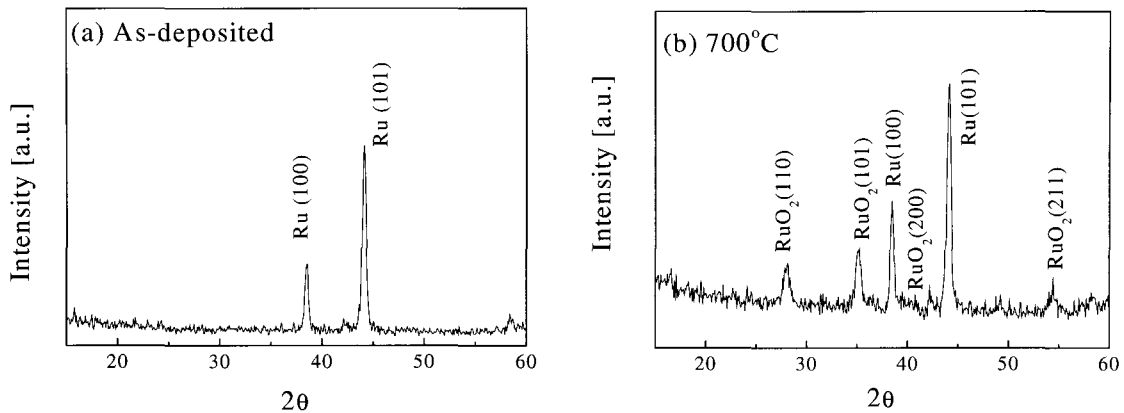


그림 6. The GXR D plot of (a) the as-deposited sample shows Ru (100) and (101) phase. That of (b) the 700°C annealed sample for 1 min, showing the formation of RuO₂ phase.

서의 확산은 Ru과의 반응을 통한 Ru-O 계면 상의 형성을 의미하고 이에 따라 ZnO 표면은 다량의 산소 공공이 형성되었음을 알 수 있다. ZnO 격자 내에 산소 공공(V_O)이나 침입형 아연 원자(Zn_i)는 도너(donor) 역할을 하는 것으로 알려져 있는데 [14,15], 700°C에서 산소 원자의 확산으로 인한 표면의 다량의 산소 공공형성은 ZnO 표면 농도를 급격히 증가시킬 수 있다.

높은 열처리 온도에서 일어나는 Ru과 ZnO간의 계면반응으로 인해 형성된 계면 상을 알아보기 위해 GXR D 분석을 하였고 그림 6에 그 결과를 나타내었다. 그림 6(a)의 열처리하지 않은 샘플의 경우 $2\theta=38.4^\circ$ 와 $2\theta=44.08^\circ$ 에서 각각 Ru (100)과 (101) peak을 나타내는데 이는 AES depth profile결과에서 알 수 있듯이 Ru과 ZnO간에 반응이 열처리 전에는 일어나지 않았음을 나타낸다. 그러나 700°C에서 열처리한 샘플의 경우 Ru과 ZnO의 계면 반응에 의해 새로운 상이 나타나게 되는데 이는 rutile 구조를 가지는 RuO₂ 상으로 $2\theta=28.1^\circ, 35.14^\circ, 40.6^\circ, 54.9^\circ$ 에서 각각 (110), (101), (200), (211) peak을 나타낸다.

Ru 오믹 접촉의 열적 안정성을 관찰 하기하기 위해 SEM과 AFM 분석을 시행하였다. 그림 7의 경우 Ru 오믹 접촉의 표면과 단면 상태를 알아보기 위한 SEM 분석 결과로 그림 7(a)에 열처리 전의 Ru 표면의 경우 평탄한 morphology를 가지고 있음을 발견할 수 있다. 이는 상온에서 Ti/Au 오믹 접촉 시스템과(root mean square(rms) roughness: 5.4 nm) 비교

할 때 [8], Ru 오믹 접촉 시스템이 매우 평탄한 표면 (rms roughness : 0.9 nm)을 가지고 있음을 알 수 있다. 열처리 온도를 700°C로 증가시킬 경우 (그림 7 (c)) 열처리 하지 않은 Ru 표면과 유사한 표면 상태를 보여주고 있는데 이는 그림 7 (b)와 (d)의 단면 사진을 비교해 보아도 평탄한 표면이 열처리 후에도 유지되고 있음을 관찰할 수 있다. 이와 같은 고온에서의 표면 안정성은 광 소자나 고온소자에서 필수적인 요소이다.

그림 8은 700°C에서 열처리 시간 증가에 따른 morphology를 관찰하기 위한 AFM 분석 결과로서 700°C에서 1분 동안 열처리한 샘플의 경우(그림 8 (a)), 1.4 nm의 rms roughness를 가지며 10분 동안 열처리한 후의 AFM 결과(그림 8(b)) 1.9 nm의 rms roughness를 나타내고 있다. 또한 10분 후의 비접촉 저항 역시 $5 \times 10^5 \Omega \text{cm}^2$ 의 낮은 값을 나타내고 있는데 이는 금속 표면의 안정성이 전기적 특성과 밀접한 연관이 있음을 말해 준다.

n-ZnO용 Ru 오믹 접촉의 비접촉 저항 및 열적 안정성의 열처리 온도 의존성은 다음의 메커니즘으로 설명할 수 있다. 첫째 AES depth profile 결과에서 알 수 있듯이 고온에서 Ru과 ZnO간에 계면반응으로 인해 일어나는 산소 확산 현상은 ZnO의 표면에 다량의 산소공공을 형성시키고 도너 역할을 하는 산소공공으로 인해 n⁺-ZnO표면이 형성되고 이로 인해 증가된 캐리어 농도는 ZnO와 Ru접합에 있어 터널링(tunneling) 효과를 증가시켜 I-V특성을 향상

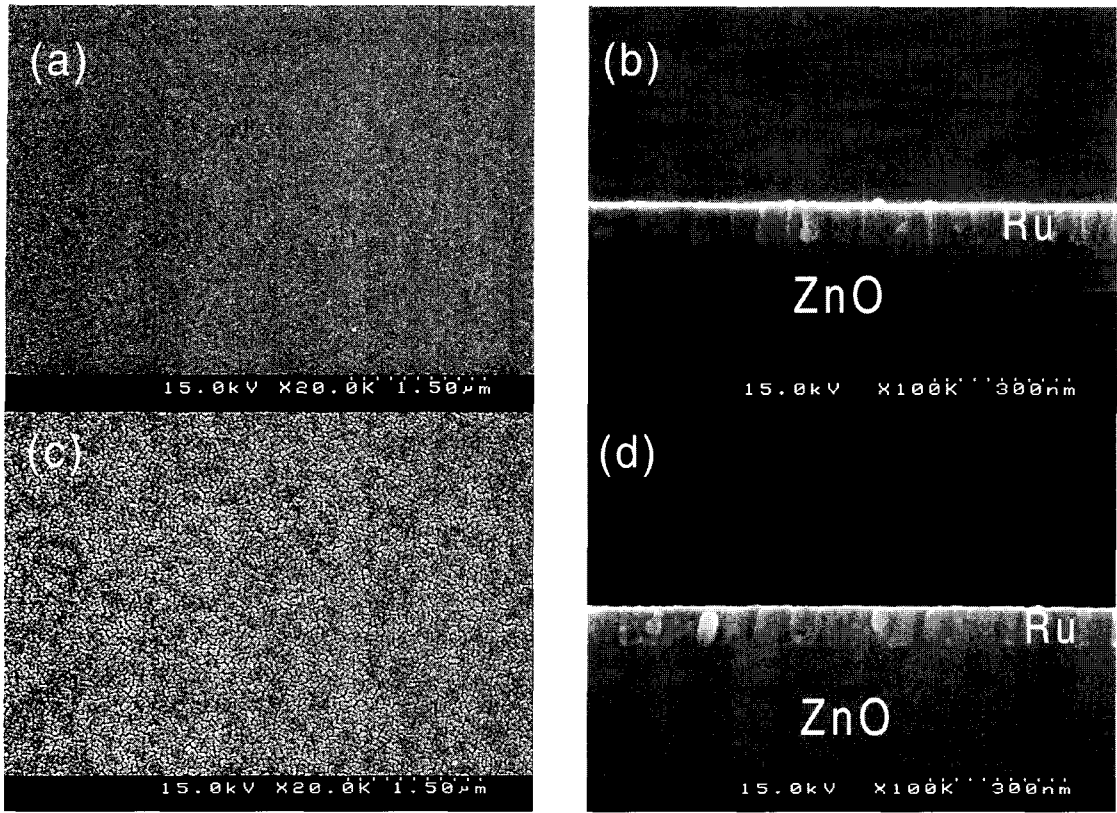


그림 7. The SEM surface and cross sectional images of as-deposited and 700°C annealed Ru on ZnO layer.

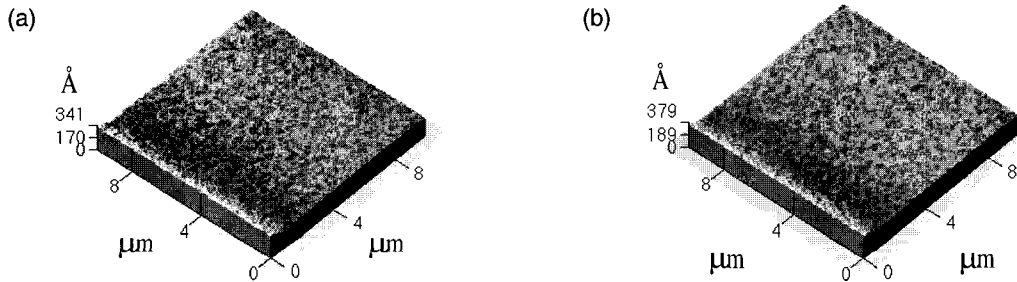


그림 8. The AFM images of the (a) 700°C 1 min annealed Ru contact and (b) 700°C 10 min annealed Ru contact. The surfaces of both samples are very smooth with rms roughness of 1.4 nm and 1.9 nm, respectively.

시키게 된다 [7,14,15]. 이를 설명할 수 있는 밴드구조를 그림 9에 나타내었다. 표면의 캐리어 농도가 높아질수록 금속과 ZnO사이의 계면에 형성된 공핍층(depletion region)의 두께는 얇아지게 되고 이로 인해 터널링 확률이 높아지게 되어 더 많은 캐리어들이 터널링으로 쇼트키 장벽(schottky)을 통과해 이동할 수 있게 된다. 둘째 GXR드결과에서 알 수 있듯이

Ru과 ZnO간의 계면반응에 의해 형성된 RuO₂ 전도층이 계면에 형성되어 전기적 특성을 향상 시킬 수 있다. 특히 RuO₂는 금속과 유사한 낮은 저항을 가지는 산화물로 알려져 있는데 [16] 이러한 계면의 전도층은 캐리어 주입을 용이하게 만들어 I-V특성을 향상 시키게 된다. 또한 고온에서 계면에 광범위하게 형성되는 RuO₂는 Ru과 ZnO간의 면저항 및 비

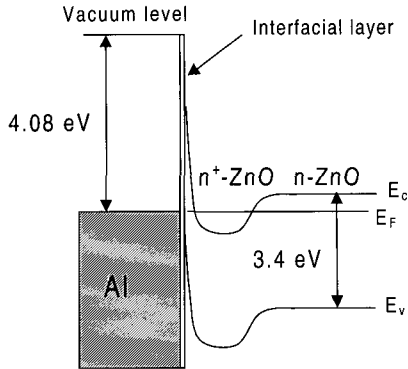


그림 9. Schematic band diagram of Ru and ZnO contact after 700°C annealing.

접촉 저항을 감소시키고 동시에 아연원자에 대한 확산 장벽(diffusion barrier) 역할을 해줌으로써 [17] 높은 온도에서도 Ru 오믹 접촉이 안정한 특성을 보이게 되는 원인으로 작용하게 된다. 마지막으로 고온 열처리 시 일어나는 Ru과 ZnO의 반응으로 인해 형성되는 거친 계면으로 인해 접촉 면적이 증가하게 되고 이로 인해 캐리어가 유입되는 면적이 늘어나게 되어 오믹 접촉 특성을 향상시킬 수 있게 된다 [18].

따라서 열처리 온도 증가에 따른 Ru 오믹 접촉 특성의 향상 및 열적 안정성은 산소 확산에 의해 형성된 n⁺-ZnO 표면에 의한 캐리어 농도의 증가, RuO₂ 전도 층에 의한 캐리어 주입의 용이함 및 확산장벽으로의 역할, 계면반응에 의해 증가된 접촉 면적 등의 현상으로 설명할 수 있다.

4. 결 론

Al이 도핑된 n-ZnO ($3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)에 Ru을 증착하여 오믹 접촉을 형성시켜 접촉의 전기적, 구조적, 표면적 특성을 연구하였다. ZnO의 높은 캐리어 농도로 인해 열처리 전에도 완벽한 오믹 접촉 특성을 나타내었으며 700°C 질소분위기에서 급속 열처리 후 향상된 오믹 접촉특성을 관찰할 수 있었다. 열처리 후의 비접촉 저항은 $3.2 \times 10^5 \Omega \text{ cm}^2$ 의 값을 나타내었고 AES depth profile과 GXRD 분석 결과 RuO₂ 상이 산소의 외부확산으로 인해 형성되어 낮은 비접촉 저항을 갖는데 중요한 역할을 한다는 것을 발견하였다. 또한 700°C의 높은 온도에서도 안정한 표

면을 갖는 오믹 접촉을 구현하여 n-ZnO을 이용한 고품질의 광 소자 및 고온소자 제작 가능성을 제시하였다. 또한 비접촉 저항의 열처리 온도 의존성을 설명할 수 있는 메커니즘을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] Robert F. Service, *Science* **276**, 895 (1997).
- [2] Z. K. Tang, G. K. L. Wong, P. Yu, M. Kawasaki, A. Ohtomo, H. Koinuma, and Y. Segawa, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 3270 (1998).
- [3] T. Aoki, Y. Hatanaka, and D. Look, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 3257 (2000).
- [4] R. D. Vispute, V. Talyansky, Z. Trajanovic, S. Choopun, M. Downes, R. P. Sharma, T. Venkatesan, M. C. Woods, R. T. Lareau, K. A. Jones, A. A. Iliadis, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 2735 (1997).
- [5] S. Liang, H. Sheng, Y. Liu, Z. Huo, Y. Lu, and H. Shen, *J. Crystal Growth* **225**, 110 (2001).
- [6] A. Kudo, H. Yanagi, K. Ueda, H. Hosono, H. Kawazoe, and Y. Yano, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 2851 (1999).
- [7] H.-K. Kim, S.-H. Han, W. K. Choi, and T.-Y. Seong, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 1647 (2000).
- [8] H.-K. Kim, S.-H. Han, W. K. Choi, and T.-Y. Seong, *J. Electrochem. Soc.* **148**, G114 (2001).
- [9] T. Akane, K. Sugioka, and K. Midorikawa, *J. Vac. Sci. Techno. B* **18**, 1406 (2000).
- [10] K.-K. Kim and S. -J. Park, *J. Appl. Phys.* (submitted)
- [11] G. S. Marlow and M. B. Das, *Solid State Electron.* **25**, 91 (1982).
- [12] K. Ogata, K. Maejima, Sz. Fujita and Sg. Fujita, *J. Electron. Mat.* **30**, 659 (2001).
- [13] H. -K. Kim, K.-K. Kim, S. -J. Park, and T. -Y. Seong, *Appl. Phys. Lett.* (will be submitted)
- [14] K. Vanheusden, C. H. Seager, W. L. Warren, D. R. Tallant, and J. A. Voigt, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 403 (1996).
- [15] G. W. Tomilis, J. L. Routbort, and T. O. Mason, *J. Appl. Phys.* **87**, 117 (2000).

- [16] Y. T. Kim, C. W. Lee, and S. K. Kwak, Appl. Phys. Lett. **67**, 807 (1995).
[17] M. L. Green, M. E. Gross, L. E. Papa, K. J. Schones, and D. Brasen, J. Electrochem. Soc. **132**, 2677 (1985).
[18] J.-S. Jang, I.-S. Chang, H.-K. Kim, T.-Y. Seong, S. Lee, and S.-J. Park, Appl. Phys. Lett. **74**, 70 (1999).