

Cr/n-AlGa_n/Ga_n Schottky Contact에서 높은 쇼트키 장벽 형성 메커니즘에 관한 연구

남효덕¹, 이영민¹, 장자순^{1,a}

¹ 영남대학교 전자공학과 및 LED-IT융합산업화 연구센터

Formation Mechanism of a Large Schottky Barrier Height for Cr-AlGa_n/Ga_n Heterostructure

Hyo-Duk Nam¹, Yeung-Min Lee¹, and Ja-Soon Jang^{1,a}

¹ Department of Electronic Engineering and LED-IT Fusion Technology Research Center (LIFTRC), Yeungnam University, Gyeongsan, 712-749, Korea

(Received February 25, 2011; Revised March 4, 2011; Accepted March 4, 2011)

Abstract: We report on the formation mechanism of large Schottky barrier height (SBH) of nonalloyed Cr Schottky contacts on strained Al_{0.25}Ga_{0.75}N/GaN. Based on the current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) data, the SBHs are determined to be 1.98 (±0.02) and 2.07 (±0.02) eV from the thermionic field emission and two-dimensional electron gas (2DEG) calculations, respectively. Possible formation mechanism of large SBH will be described in terms of the formation of Cr-O chemical bonding at the interface between Cr and AlGa_n/Ga_n, low binding-energy shift to surface Fermi level, and the reduction of 2DEG electrons.

Keywords: Schottky contact, AlGa_n-Ga_n interface, Schottky barrier height

1. 서 론

알루미늄질화갈륨 (AlGa_n) 물질은 넓은 에너지 밴드갭 (wide energy bandgap), 높은 포화전자속도 (electron saturated velocity), 높은 파괴전계 (high breakdown field) 등과 같은 우수한 성질로 인하여 고주파/고전력 소자와 광소자 연구에 널리 사용되고 있다 [1]. HEMT (high electron mobility transistor), HFET (heterostructure field effect transistor)와 같은 AlGa_n계열의 우수한 소자성능을 갖는 전자소자를 개발하기 위해서는, 높은 쇼트키장벽 (High SBH)을 갖는 고품위 쇼트키 게이트 접촉 (Schottky gate contact) 형성에 대한 연구가 매우 필요하다.

Strained AlGa_n-Ga_n 이종접합구조에서 유발되는 강한 Polarization 효과는 높은 쇼트키장벽 형성에 기여를 하기 때문에, 낮은 누설전류와 높은 파괴전압을 갖는 고성능 전자소자 개발에 적합하여 이에 대한 연구가 활발히 진행되어져 왔다. 지금까지, n형 쇼트키장벽을 높이기 위해서 AlGa_n/Ga_n 이종접합이 갖는 일함수 (Work function) 보다 높은 일함수를 갖는 금속을 Schottky gate 물질로 연구되어져 왔다 [2-8]. 원칙적으로, 높은 일함수를 갖는 금속을 이용하여 n형 AlGa_n/Ga_n Schottky contact을 형성하는 것이 일반적이지만, Lin 연구그룹의 연구결과에 의하면 [4], 금속의 일함수가 증가할수록 쇼트키 금속과 AlGa_n/Ga_n 표면 도너 (surface donor) 전자들의 wave-function coupling이 감소하는 현상으로 인하여 쇼트키장벽은 오히려 감소한다는 연구결과를 보고하였다. 이는 높

a. Corresponding author: jsjang@ynu.ac.kr

은 일함수를 갖는 금속을 쇼트키 접촉물질로 사용하는 것이 AlGaN/GaN 이중접합 쇼트키소자에서는 효과적이지 못할 수도 있다는 것을 의미한다. 또한, AlGaN/GaN 이중접합 쇼트키 접촉에서 쇼트키장벽의 높이는 2DEG (two dimensional electron gas) 전자농도에 영향을 받는데, 이것은 스트레인을 받는 AlGaN/GaN 표면에 존재하는 도너성향의 표면준위 (donor-like surface state)와 Polarization에 기인한 전하 (polarization-induced charge)가 2DEG 전자형성에 관여하기 때문이다 [2,5]. 이외에도, AlGaN/GaN Schottky 장벽형성에는 3족 공공 (Group III vacancies) 형성에 의한 표면 Fermi level이 VBM (valance band maximum) 방향으로의 이동에 의한 것이 보고되었다 [8]. 하지만, AlGaN/GaN 이중접합 구조에는 10^{18} cm^{-3} 이상의 도너 역할을 하는 산소가 포함되어 있기 때문에 [9], 사실 쇼트키장벽 형성 원인에 대해서는 아직 규명되어야 될 요소들이 많은 것이 사실이다.

본 연구에서는 상대적으로 낮은 일함수를 갖는 Cr을 쇼트키 금속으로 이용하여 높은 일함수를 갖는 고품위 Schottky contact을 보고하고자 한다. 또한, 쇼트키장벽 형성원인에 대하여 전류-전압, 커패시턴스-전압 특성과 XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) 데이터를 이용하여 논의하고자 한다.

2. 실험 방법

유기화상증착장비 (metalorganic chemical vapor deposition)를 이용하여 Sapphire 기판위에 40 nm 두께의 GaN buffer 층을 성장한 후, 2 μm 두께로 undoped GaN 층을 성장시켰다. 이 위에 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ 을 20 nm 두께로 성장시켜, AlGaN/GaN 이중접합층을 형성하였다. 25%의 Al 함유비율 (composition)은 X선 회절방법 (X-ray diffraction)에 의하여 확인하였으며, 홀효과측정기로 얻은 2DEG농도 ($N_{2\text{DEG}}$)는 $1.17 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 이었다. 쇼트키 접촉은 먼저, Schottky pattern형성 전에 아세톤, 메탄올, 증류수 (DI water)를 이용하여 각각 5분 간 표면세척을 시행하였으며, AlGaN 표면에 존재하는 자연산화층을 제거하기 위하여 HCl:DI (1:1) 용액을 이용하여 표면처리를 시행하였다. 쇼트키 및 오믹 패턴 구조는 그림 1에 나타내었다. 각각의 패턴은 Photolithography 방법에 의해서 형성하였으며, 30 nm 두께의 Cr을 쇼트키 금속층으로, Ti/Al/Pd/Au (50/80/50/100 nm)를 오믹 (Ohmic) 금속층으로 이용

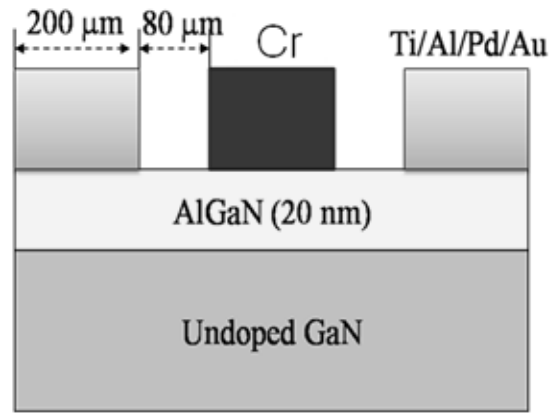


Fig. 1. Cross-sectional diagram for Cr-AlGaN/GaN Schottky contacts.

하였으며, 모두 전자빔 증착기 (electron-beam evaporation system) 챔버에서 진공도 5×10^{-7} Torr 이하에서 증착하였다. 오믹전극을 먼저 형성시킨 후, 쇼트키 전극을 형성하였으며, 오믹전극은 RTA (rapid thermal annealing) 챔버에서 질소 분위기하에 600 $^{\circ}\text{C}$, 1분간 열처리하여 얻었으며, 이후 Cr 쇼트키 전극층을 형성하였다. 전류-전압, 커패시턴스-전압 특성은 반도체 분석기 (HP4155A)와 LCR 분석기 (HP4284A)를 이용하여 얻었으며, Cr-AlGaN 계면분석은 Al K α X-ray에 기초한 XPS (MultiLab 2000 모델)장비를 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2(a)는 Cr-AlGaN/GaN 쇼트키 접촉의 전류-전압 특성을 보여주는 것으로, 전형적인 정류특성을 갖는 쇼트키 접촉이 형성되었음을 알 수 있다. Thermionic Field Emission (TFE) 방법 [10,11]에 의하여 Schottky barrier height (SBH)와 2DEG 성분을 의미하는 AlGaN 장벽 표면밀도 (N_s)를 계산하였으며, SBH는 1.98 eV, N_s 는 $8.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 이었다. 그림 2(b)는 TFE 방법에 의해서 fitting한 결과를 나타낸 것이다. 쇼트키 형성 이전 홀측정 결과상으로 AlGaN/GaN 층에서 AlGaN 장벽의 표면밀도는 $1.17 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 이었는데, TFE 방법에 의하여 얻어진 결과는 쇼트키 접촉 형성 후, 표면밀도가 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 Lin et al. [4] 결과와 일치하며, 따라서 Polarization 영향과 낮은 일함수를 갖는 금속 사이에서의 wavelength coupling

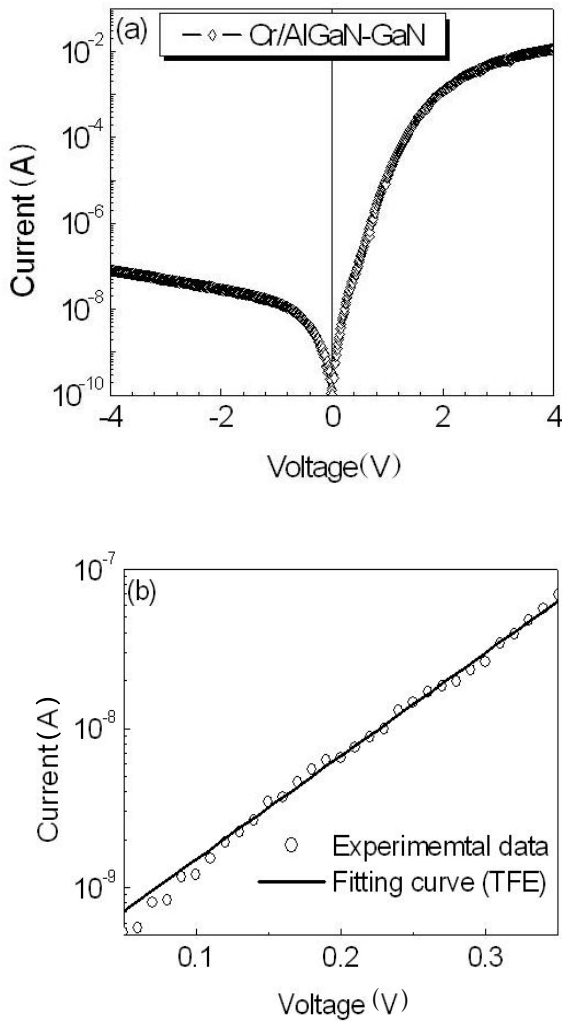


Fig. 2. (a) Current-voltage characteristics of Cr-AlGaN/GaN Schottky contacts and (b) TFE fitting results in the forward bias regions of 0 - 0.39 eV.

작용에 의하여 SBH가 증가하는 것은 Polarization field 영향이 큰 AlGaN/GaN 이중접합구조에서 Schottky 장벽 형성에 영향을 줌을 확인하였다.

본 연구에서는, 전류-전압 특성 자료에 기초한 TFE 결과와 커패시턴스-전압 특성 자료에 기초한 2DEG 계산방법에 의한 결과와 비교하기 위하여 커패시턴스-전압 특성을 측정하였으며, 결과를 그림 3에 나타내었다. 본 계산에서, 만일 AlGaN/GaN 구조에서 Undoped GaN의 전자밀도변화가 무시할 수 있을 만큼 작다면, 2DEG 전자밀도는 AlGaN/GaN 전자표면 밀도와 거의 유사하다고 가정할 수 있으므로, 결국,

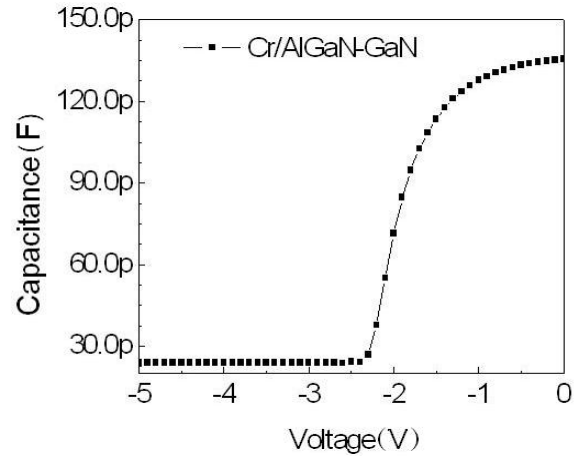


Fig. 3. Capacitance-voltage characteristics of Cr-AlGaN/GaN Schottky contacts.

커패시턴스-전압 특성 Curve를 Integration 함으로써 전자 표면밀도를 계산할 수 있다. 계산된 표면밀도는 $5.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 이었다. 이것은 앞서 TFE 계산결과와 마찬가지로 쇼트키 접촉 후, AlGaN/GaN 전자표면 밀도는 Bare AlGaN/GaN과 비교해보았을 때 상당히 낮아지는 것으로 확인되었으며, 따라서 AlGaN/GaN 이중접합 쇼트키 접촉에서 SBH의 변화는 전자표면 밀도와 직접적인 연관이 있음을 알 수 있다 [4].

커패시턴스-전압 특성 자료를 활용하여, 2DEG 계산방법에 의하여 SBH를 계산하였다. AlGaN/GaN 이중접합구조에서 2DEG 전자밀도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다 [12].

$$N_{2DEG}(x) = \frac{\alpha_{pz}(x)/q - [\epsilon_0 \epsilon(x)/dq]^2 \times}{[q\Phi_B(x) + E_F(x) - \Delta E_C(x)]} \quad (1)$$

x 는 Al 성분 (composition), α_{pz} 는 Polarization 전하 밀도, d 는 AlGaN 장벽층 두께, $q\Phi_B$ 는 SBH, E_F 는 Fermi level, q 는 전하이며, ΔE_C 는 AlGaN/GaN 계면에서의 Conduction band offset이며, 다음과 같이 정의한다 [13].

$$\Delta E_C(x) = 0.7 \times [E_g(x) - E_g(0)] \quad (2)$$

$E_g(x)$ 는 AlGaN 장벽층에서의 에너지 밴드갭이며, $E_g(x)$ 는 $E_g(x) = 6.13x + 3.42(1-x) - x(1-x)$ [eV]이다. (1)과 (2) 식에서, $E_F(x)$ 와 $E_g(0)$ 는 다음과 같이 정의한다 [14,15].

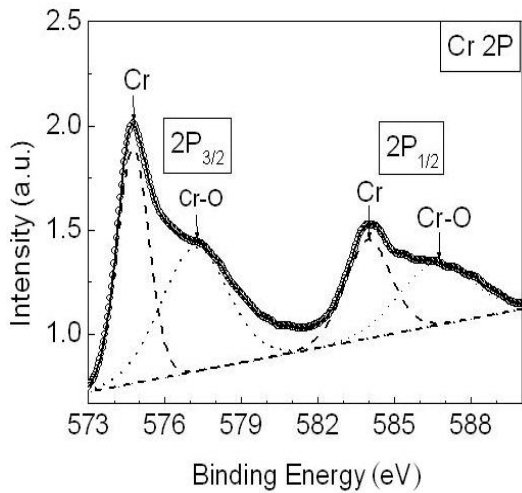


Fig. 4. Cr 2p core level peaks obtained from the Cr-AlGaIn/GaN interface, showing the formation of Cr-O chemical bonding as well as Cr peak.

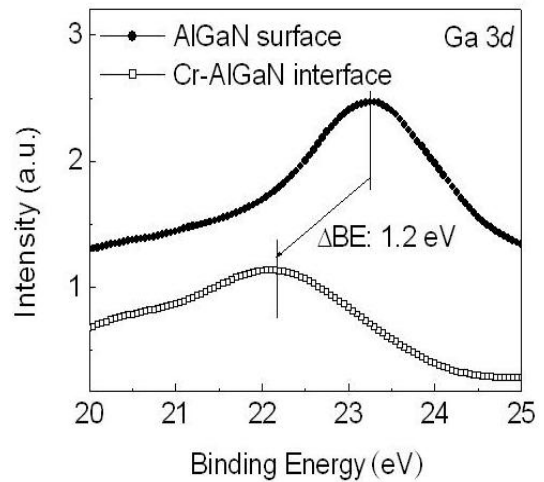


Fig. 5. Ga 3d core level peaks at the interface between Cr and AlGaIn/GaN.

$$E_F(x) = E_0(x) + [h^2/4\pi m^*(x)] \times N_{2DGE}(x) \quad (3)$$

$$E_0(x) = [9h^2 q^2 N_{2DGE}(x) / 32\pi (8m^*(x))^{0.5} \epsilon(x)]^{2/3} \quad (4)$$

여기서, h 는 플랑크 상수, m^* 전자유효질량이다. (1)-(4)식을 통하여, ΔE_C , E_F 는 x 가 0.25일 때, 각각 0.343 eV와 0.23 eV로 계산되었다. 이러한 파라미터들을 이용하여 얻어진 SBH는 2.08 eV이었으며, TFE 방법에 기초해서 얻어진 값 (= 1.98 eV)보다 약간 높은 값을 보였다.

Cr-AlGaIn/GaN 쇼트키 접촉에서 일반적으로 Al 성분이 25%일 때에 Polarization-free 구조에서의 SBH는 " $q\Phi_{Cr}(4.5 \text{ eV}) - q\chi_{AlGaIn}(3.6 \text{ eV})$ "에 의해서 0.9 eV로 계산된다. 이점을 고려해 본다면, Polarization field 영향이 강한 AlGaIn/GaN 이종접합구조에서 얻어진 SBH는 매우 큰 값을 가짐을 알 수 있으며, 이것은 Polarization 영향에 의해서 AlGaIn 전자표면밀도가 낮아지는 현상만으로는 설명하기 부족하다.

따라서, 높은 값을 갖는 SBH의 원인을 규명하기 위해서 XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) 분석을 시행하였다. 그림 4는 Cr-AlGaIn/GaN 계면에서 얻어진 Cr 2p core level peak을 관찰한 것이다. Cr peak 외에 Cr-O 화학결합 성분이 함께 존재함을 알 수 있으며, 이것은 AlGaIn/GaN 이종접합 구조 내에 존재하는 산소의 영향임을 알 수 있다. 물론, AlGaIn/GaN 구

조위에 존재하는 자연산화층의 영향일수도 있지만, 이것은 Cr층을 증착하기 전에 충분히 염산수로 표면처리 하였고, XPS 분석 시, 표면처리 된 AlGaIn 표면에 산소가 검출되지 않았기 때문에 자연산화층에 기인한 영향이기 보다는 AlGaIn층 내에 존재하는 산소와 Cr 이 상호 결합한 결과라고 해석하는 것이 보다 정확한 설명이다. Cr-O 형성은 그림 5에서와 같이, Ga 3d peak의 low binding energy 방향으로 1.2 eV Peak shift를 유발하며, 이것은 표면 Fermi level이 Cr과 AlGaIn/GaN 접촉 후 이동한 것으로 볼 수 있다. 따라서, Polarization-free AlGaIn 구조와는 달리, Polarization field에 영향을 받는 AlGaIn/GaN 이종접합구조에서는 AlGaIn층 내에 존재하는 산소의 영향으로 인한 Cr-O 화학결합 형성, 표면 Fermi level 이동, 전자표면밀도의 감소에 의해서 SBH가 결정됨을 알 수 있다. 사실, AlGaIn/GaN 내에 존재하는 산소는 donor로서의 역할을 하는데 [9], Cr-O 화학결합 형성은 AlGaIn 표면에서의 도너전자 수를 감소시켜 전자 표면밀도가 낮아지는 것으로도 설명할 수 있다.

4. 결론

Cr을 이용하여 AlGaIn/GaN 쇼트키접촉을 구현하였다. TFE 방법과 2DEG 방법에 의하여 얻어진 SBH는 각각 1.98 eV와 2.08 eV이었으며, 이는 Polarization-free AlGaIn 구조에서 얻어진 0.9 eV보다 높은 값을

나타내었다. XPS 분석을 통하여, 높은 SBH 형성원인이 AlGaIn/GaN 구조에서 AlGaIn 전자표면밀도의 감소, 계면에서 Cr-O 화학결합형성 및 표면 Fermi level의 발런스 밴드 방향으로의 이동에 의한 것임을 알 수 있다. 본 연구결과는 고성능 전자소자 구현에 있어 고품질 Schottky gate 개발에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 영남대학교 연구조교지원사업과 지식경제부 산업원천기술과제 LED-IT융합산업화연구센터(과제번호 10033630) 지원에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

- [1] M. A. Khan, Q. Chen, M. S. Shur, B. T. MsDermott, and J. A. Higgins, *IEEE Electron Device Lett.* **17**, 325 (1996).
- [2] E. J. Miller, X. Z. Dang, and E. T. Yu, *J. Appl. Phys.* **88**, 5951 (2000).
- [3] A. J. Sierakowski, W. J. Scharff, and L. F. Eastman, *J. Appl. Phys.*, **87**, 334 (2000).
- [4] Z. Lin, W. Lu, J. Lee, D. Liu, J. S. Flynn, and G. R. Brandes, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 4364 (2003).
- [5] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Scharff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzmann, W. Rieger, and J. Hilsenbeck, *J. Appl. Phys.*, **85**, 3222 (1999).
- [6] J. P. Ibbetson, P. T. Fini, K. D. Ness, S. P. DenBarr, J. S. Speck, and U. K. Mishra, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 250 (2000).
- [7] Z. Lin, J. Lee, and W. Lu, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1585 (2004).
- [8] C. M. Jeon and J. R. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 4301 (2003).
- [9] H. W. Jang, J. M. Baik, M. K. Lee, H. J. Shin, and J. L. Lee., *Electrochem. Solid-State Lett.*, **151(8)**, G536 (2004).
- [10] J.-S. Jang, T.-Y. Seong, and S.-R. Jeon, *Electrochem. Solid-State Lett.*, **10(4)**, H120 (2007).
- [11] J.-S. Jang, D. Kim, and T.-Y. Seong, *J. Appl. Phys.* **99**, 073704 (2006).
- [12] E. T. Yu, G. J. Sullivan, P. M. Asbeck, C. D. Wang, D. Qiao, and S. S. Lau, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2794 (1997).
- [13] G. Martin, A. Botchkarev, A. Rockett, and H. Morkoc, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 2541 (1996).
- [14] D. Bruener, H. Angerer, E. Bustarret, R. Hopler, R. Dimitrov, O. Ambacher, and M. Stutzmann, *J. Appl. Phys.*, **82**, 5090 (1997).
- [15] M. Shur, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **483**, 15 (1998).