

Reduction of gate leakage current for AlGaIn/GaN HEMT by N₂O plasma

N₂O 플라즈마에 의한 AlGaIn/GaN HEMT의 누설전류 감소

Jeon Wook Yang**

양전욱**

Abstract

AlGaIn/GaN high electron mobility transistors (HEMTs) were fabricated and the effect of N₂O plasma on the electrical characteristics of the devices was investigated. The HEMT exposed to N₂O plasma formed by 40 W of RF power in a chamber with pressure of 20 mTorr at a temperature of 200 °C, exhibited a reduction of gate leakage current from 246 nA to 1.2 pA by 10 seconds treatment. The current between the two isolated active regions reduced from 3 uA to 7 nA and the sheet resistance of the active layer was lowered also. The variations of electrical characteristics for HEMT were occurred within a short time expose of 10 seconds and the successive expose did not influence on the improvements of gate leakage characteristics and conductivity of the active region. The reduced leakage current level was not varied by successive SiO₂ deposition and its removal. The transconductance and drain current of AlGaIn/GaN HEMTs were increased also by the expose to the N₂O plasma.

요약

본 연구에서는 AlGaIn/GaN HEMT (High electron mobility transistor)를 제작하고 20 mTorr의 챔버 압력과 15 sccm의 N₂O 유량, 40 W의 RF 전력의 조건으로 원거리에서 형성된 플라즈마로 소스와 드레인 영역을 10초~120초 동안 처리하여 HEMT의 전기적 특성을 관찰하였다. 상온에서 N₂O 플라즈마에 처리한 경우 HEMT의 특성이 변화하지 않았으나 200 °C의 온도에서 10초 동안 처리한 경우 게이트 길이가 1um, 소스와 드레인 사이의 거리가 4um인 HEMT의 게이트 누설전류가 246 nA로부터 1.2 pA로 크게 감소하였다. 또한 25 um 떨어진 200um 폭의 두 활성층 사이 누설전류가 3 uA로부터 7 nA로 감소하였으며 720 Ω/□의 활성층의 면저항을 608 Ω/□로 감소시켜 도전율의 증가를 나타내기도 하였다. N₂O 플라즈마의 처리에 의한 전기적 특성 개선은 10초 이내의 짧은 시간 동안 이루어지며 더 이상의 처리는 누설전류 특성 개선에 도움이 되지 않았다. 또한 N₂O 플라즈마 처리로 개선된 특성은 SiO₂의 증착과 식각 후에도 개선된 특성이 유지되었다. N₂O 플라즈마의 처리는 트랜지스터의 트랜스 컨덕턴스와 드레인 전류의 증가, 드레인 전류의 차단특성의 개선에도 기여하여 고품위의 AlGaIn/GaN HEMT 제작에 효과적으로 이용될 수 있음이 확인되었다.

Key words : AlGaIn/GaN, HEMT, N₂O plasma, gate leakage current

* 全北大學校 半導體科學技術學科/半導體物性研究所
(Department of Semiconductor Science and Technology/
SPRC, Chonbuk National University)

★ 교신저자 (Corresponding author)

※ 감사의 글 (Acknowledgment) 본 연구는 학술진흥재단의 연구비 (KRF-2005-005-J07502)에 의해서 수행되었습니다.

接受日:2007年 12月 18日, 修正完了日: 2007年 12月 28日

1. 서론

직접천이형의 에너지대구조를 갖는 GaN는 3.4 eV의 넓은 밴드 갭을 가질 뿐 아니라 물리적, 화학적으로 매우 안정하여 이종접합구조의 형성을 통해 광소자와 전자소자에 널리 응용되고 있다. 특히 AlGaIn/GaN의 이종접합은 매우 높은 전자밀도와 이

동도 특성을 갖는 이차원전자 층을 형성할 수 있어 고전력, 고주파에서 동작하는 high electron mobility transistor (HEMT)에 많이 이용된다.[1][2] 그러나, AlGaIn/GaN 구조는 표면 상태에 의한 누설전류와 기생효과로 안정한 특성을 나타내기 어려워 이를 극복하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 트랜지스터의 게이트, 소스와 드레인은 활성층에 접촉되어 있고 인접 소자와는 식각된 GaN로 분리되어 있기 때문에 노출된 소스와 드레인 영역은 트랜지스터의 게이트와 소스, 게이트와 드레인 사이 누설전류 발생의 주요한 원인이 된다. 노출된 영역의 Si₃N₄, SiO₂ 보호막 증착은 누설전류 뿐 아니라 표면 trap으로 인한 효과를 개선시키는 것으로 보고되어 널리 이용되고 있으며 Sc₂O₃, MgO 등의 박막에 대한 연구도 특성의 개선을 위해 적용된 바 있다.[3]-[5] 또 다른 보호막의 형성 방법으로 AlGaIn, 또는 GaN의 직접 산화막 성장은 이러한 박막의 증착보다 더욱 효과적일 수 있어 이에 대한 연구도 수행되고 있다.[6] 이러한 박막의 증착과 함께 HCl, KOH, 또는 황수와 같은 시약에 의한 기판 표면의 처리나 플라즈마에 의한 표면의 처리도 표면 상태의 변화를 가져와 효과적으로 특성을 개선시킬 수 있다.[7][8] C. Bae 등은 GaN 위에 SiO₂를 증착하기 전 N 이온에 의한 표면 cleaning의 효과를 실험하였고 SiO₂의 증착전 표면에 얇은 GaO 층이 형성되도록 하여 계면 상태의 감소를 피하였으며, L. Shen 등은 F 플라즈마 처리를 통해 특성의 개선을 도하는 등 다수의 실험결과가 발표된 바 있다.[9][10] 그러나 이들은 대부분 박막의 물질적 특성, 또는 게이트 절연막으로써의 특성이나, 표면보호막의 증착에 따른 소자의 특성을 고찰한 것이며 N₂O 플라즈마 처리가 HEMT의 게이트 누설전류에 미치는 영향을 직접 비교한 바는 없다.

본 연구는 AlGaIn/GaN 구조를 이용하여 HEMT를 제작하고 원격으로 형성된 N₂O 플라즈마로 노출된 소스와 드레인 영역의 표면을 처리하여 트랜지스터의 전기적 특성에 대한 플라즈마 처리에 따른 효과를 비교하고 누설전류 특성의 개선을 확인하였다.

II. 실험

본 연구에서는 AlGaIn/GaN HEMT의 표면처리에 의한 효과를 관찰하기 위하여 사파이어 위에 metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) 방법으로 성장된 AlGaIn/GaN 구조를 갖는 기판을 이용하여 실험하였다. 25%의 Al 조성을 갖도록 성장된 3 nm의 두께의 AlGaIn과 GaN의 이중접합은 Hall 측정 결과 $7.4 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 의 이차원 전자층 농도와 720

cm²/Vs의 이동도를 갖는 것으로 나타났다. HEMT의 제작을 위하여 먼저 리소그라피와 Cl₂ 가스의 유도 결합플라즈마를 이용한 건식식각 방법으로 트랜지스터의 활성영역을 정의하고 소스와 드레인 영역에 Ti/Al/Ni/Au (20/120/40/100 nm)의 다층구조 금속을 형성한 뒤 900 °C의 온도에서 30초 동안 열처리 하여 소스와 드레인의 저항성 접촉을 형성하였다. 저항성 접촉은 TLM (Transfer Length Method)을 이용하여 서로 다른 이격 거리를 갖는 패드들 간의 저항을 측정하고 계산한 결과 0.55 Ω-mm의 값을 나타냈다. 이어서 전자선 증착방법으로 100 μm의 폭과 1 μm의 길이가 되도록 Ni/Au (40/160 nm)의 게이트를 형성하여 트랜지스터와 고립된 활성층을 그림 1과 같이 제작하였다.

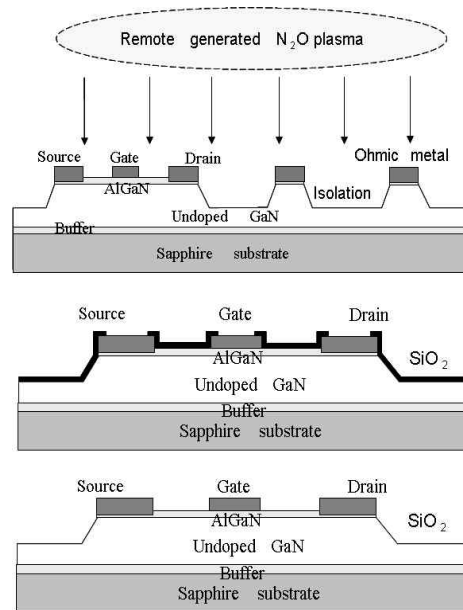


Fig. 1. Schematic diagram for N₂O plasma treatment of AlGaIn/GaN HEMT, SiO₂ deposition and SiO₂ removal

그림 1. 제작된 HEMT의 N₂O 플라즈마 처리와 처리된 HEMT의 SiO₂ 증착 및 식각

트랜지스터 제작 후 dc 파라미터 분석기를 이용하여 전류-전압 특성을 측정하였으며 측정 후 N₂O 플라즈마에 의한 효과를 관찰하기 위하여 50%의 HCl 수용액과 탈이온수로 세척한 뒤 챔버 안에서 노출된 소스와 드레인 영역을 N₂O 플라즈마로 처리하였다. 이 때 플라즈마의 충격에 의한 표면 손상이 최소화되

도록 20 mTorr의 챔버 압력과 15 sccm의 N₂O 유량, 10 W ~ 40 W의 낮은 RF 전력으로 원거리에서 형성된 플라즈마 (remote plasma)를 이용하였으며 플라즈마와 기판 표면과의 반응이 활발히 이루어지도록 200 °C의 온도에서 처리하였다. N₂O 플라즈마로 표면이 처리된 트랜지스터는 플라즈마 처리 전과 동일한 조건에서 전압-전류 특성을 측정하여 플라즈마에 의한 효과를 관찰하였다. 이어서 플라즈마 처리된 HEMT의 소스와 드레인 영역에 20 nm 두께의 SiO₂ 박막을 증착하여 특성을 측정하고, 이를 다시 제거한 뒤 게이트 특성을 측정하여 이들에 의한 특성의 변화를 고찰하였다.

III. 결과 및 고찰

1. N₂O 플라즈마 처리에 의한 GaN 영역의 누설전류 특성

AlGaN과 GaN 표면은 불완전한 결정상태를 이루기 때문에 많은 상태들이 존재한다. 이 상태들은 공정이 수행되는 과정에서 다양한 상태로 변형되어 소자가 제작되었을 때 누설전류의 원인이 된다. AlGaN과 GaN에 금속, 또는 절연체 박막을 증착할 때 증착되는 물질들과 이들 표면이 접촉되면서 특성의 변화를 나타내기 때문에 박막의 증착 전 표면 상태와 초기의 반응이 매우 중요하다. N₂O는 분리에너지가 40 kcal/mol로 낮아 산소와 질소로 쉽게 분리되어 플라즈마로 될 수 있으며 플라즈마의 활성화된 산소와 AlGaN과 GaN 표면과의 반응이 활발히 이루어질 수 있다. 그림 2는 플라즈마 처리되기 전 25 μm 떨어진 200 μm 폭을 갖는 두 활성층 사이의 누설전류와 40 W의 RF 전력으로 형성된 N₂O 플라즈마에서 200 °C의 온도에서 10초~120초 동안 처리한 뒤 측정된 두 활성층 사이의 누설전류를 나타낸 것이다. 트랜지스터 제작 후 -10 V 전압에서 두 활성층 사이에 흐르던 3 μA의 누설전류는 N₂O 플라즈마 처리 후 7 nA 정도로 크게 감소하였다. 그러나 상온에서 같은 RF 전력과 유량, 압력 등 동일한 조건으로 플라즈마 처리를 할 경우 누설전류가 감소하지 않았으며, 500 °C의 온도에서 플라즈마 없이 5분 이상 열처리할 경우에도 특성이 변화되지 않았다. 이것은 플라즈마로 활성화된 산소와 질소이온들이 상온에서는 AlGaN과 GaN의 상태들과 반응하지 않음을 뜻한다.

그림 3은 200 °C의 온도에서 40 W의 RF 전력으로 10초 동안 N₂O 플라즈마를 이용하여 처리한 뒤 측정된 게이트 누설전류 특성이다.

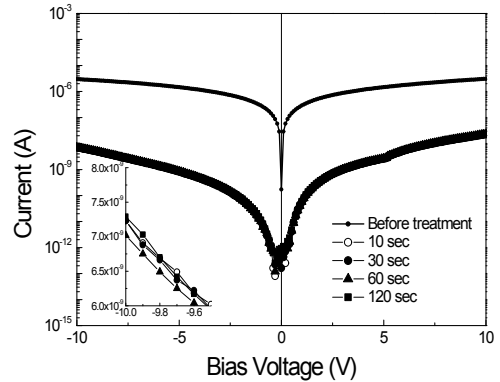


Fig. 2. Currents between the two active regions spaced out 50 μm

그림 2. 고립된 활성층 사이의 누설전류

순방향에서 측정된 전류로부터 게이트의 전위장벽은 0.98 eV로 계산되어 다소 낮은 값을 나타냈으며 플라즈마 처리과정에서 1.13~1.16 eV로 증가하였다. 그러나 -10 V에서 236 nA로 매우 큰 값을 나타냈던 게이트 누설전류는 10초의 플라즈마 처리로 1.2 pA로 크게 감소하였으며 이후 2분 까지 처리되는 동안 3~10 pA로 다소 변화하였지만 앞에서와 같은 큰 변화를 보이지는 않았다.

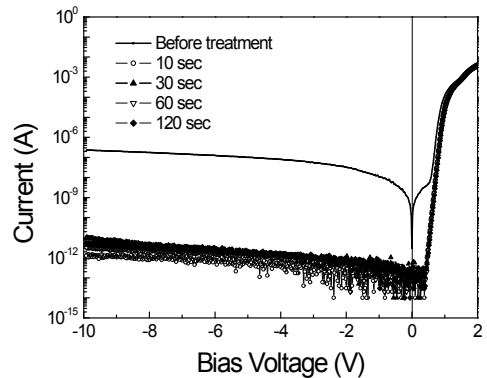


Fig. 3. Gate leakage currents for the AlGaN/GaN HEMT corresponding to the exposed time to the N₂O plasma

그림 3. N₂O 플라즈마에 노출된 시간에 EKfms 밀무/GaN HEMT의 게이트 누설전류 특성

이것은 AlGaN과 GaN 표면의 누설전류 흐름의 원인이 되는 상태들이 산소와 질소이온들에 의해 비활

성화 되었기 때문이며 표면이 개질된 뒤에는 더 이상 이들 상태에 변화가 없어 일정한 특성을 나타내는 것으로 생각할 수 있다.

그림 4는 N₂O 플라즈마로 처리된 HEMT에 SiO₂ 박막을 증착한 뒤 측정된 누설전류와 SiO₂의 제거 후 다시 측정된 누설전류 특성이다. 플라즈마 처리된 HEMT에 SiO₂ 막이 증착되면 증착되기 전과 달리 크기는 매우 작지만 재결합에 의한 순방향 누설전류를 나타낸다. SiO₂의 증착으로 나타난 이 전류 성분은 (6:1)의 비율로 희석된 BOE (buffered oxide etchant) 용액에 담가 SiO₂ 박막을 제거했을 때 박막의 제거와 함께 사라졌다. 이것은 N₂O 플라즈마에 의해 개선된 표면상태가 후처리 공정에서도 지속적으로 유지되고 있음을 나타낸다.

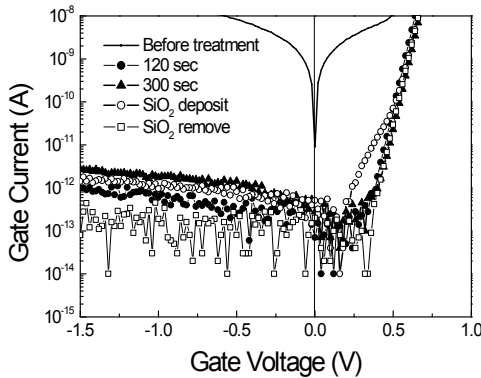


Fig. 4. Gate leakage currents for the AlGaIn/GaN HEMT after deposition of SiO₂ and removal

그림 4. SiO₂ 박막의 증착 및 제거 후 AlGaIn/GaN HEMT의 게이트 누설전류 특성

N₂O 플라즈마 처리는 AlGaIn/GaN 활성층의 도전 특성에도 영향을 미친다. 그림 5는 서로 다른 간격으로 떨어진 AlGaIn/GaN 활성층 위의 저항성접촉이 형성된 100 μm² 크기의 금속 패드들 사이의 저항특성을 나타낸 것이다. 그래프로부터 계산된 활성층의 면저항은 플라즈마 처리 전 720 Ω/□ 이었으며 10초 동안 플라즈마로 처리한 뒤에는 608 Ω/□ 로 15% 이상 감소하였다. 더 오랫동안 처리할 경우 567 ~ 628 Ω/□로 다소의 차이를 나타냈지만 처리하기 전보다 낮은 면저항을 유지하였다. 이것은 누설전류의 감소가 초기에 이루어지는 것과 같이 N₂O 처리에 의해 표면의 상태들에 의해 포획되어 있던 캐리어들이 활성화되기 때문인 것으로 생각된다.

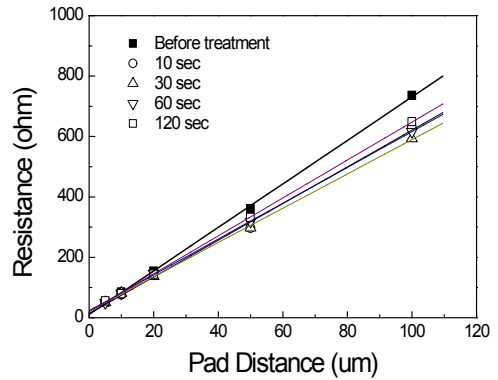
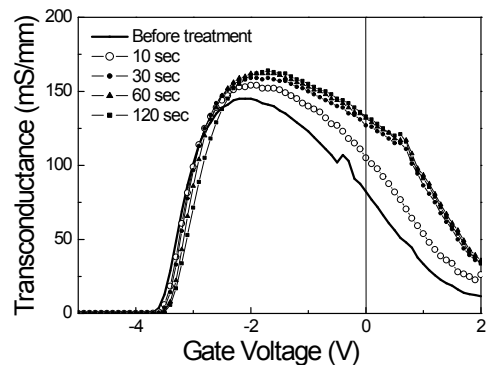


Fig. 5. Resistance between the two ohmic metal pads formed on AlGaIn/GaN active layer with width of 100 μm

그림 5. 100 μm 폭의 활성층 위에 형성된 저항성 금속들 사이의 저항

2. AlGaIn/GaN 트랜지스터 특성의 변화

플라즈마에 의한 표면의 개질로 누설전류와 함께 활성층의 면저항이 다소 감소하였다. 이 변화는 트랜지스터의 소스와 게이트 사이의 저항을 줄여 트랜지스터 드레인 전류와 트랜스컨덕턴스의 증가를 나타낼 수 있다. 그림 6은 5 V의 드레인 전압에서 측정된 게이트 길이 1 μm, 소스와 드레인 사이의 거리가 4 μm 인 트랜지스터의 게이트 전압에 따른 트랜스컨덕턴스와 드레인 전류 특성이다. 그림에서 보는 바와 같이 플라즈마 처리 전 145 mS/mm 이었던 트랜스컨덕턴스 최대값은 플라즈마 처리에 따라 164 mS/mm로 증가하였으며 0 V의 게이트 전압에서 드레인 전류는 417 mA/mm에서 442 mA/mm로 각각 증가하였다.



(a)

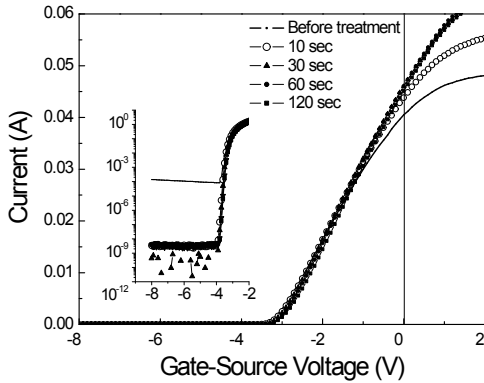


Fig. 6 Transconductance and voltage-current characteristics of AlGaIn/GaN HEMT measured before and after N₂O plasma treatment
 그림 6. 5 V의 드레인-소스 전압에서 측정된 N₂O 플라즈마 처리 전, 후의 HEMT 트랜스컨덕턴스 특성(a)과 전류-전압 특성(b)

이와 함께 N₂O 플라즈마 처리로 트랜지스터의 드레인 전류의 차단특성도 크게 개선되었다. 그림 5의 (b)에 종속되어 있는 그림에서 - 8 V의 게이트 전압에서 1.4 μA이던 차단전류가 33 pA로 작아진 것을 볼 수 있는데 이것은 주로 게이트 누설전류의 감소에 따른 것이다. 플라즈마 처리 전 -3.65 V를 나타냈던 트랜지스터의 문턱전압이 120초의 플라즈마 처리에 의해 -3.55 V로 변화하였는데 이것도 게이트 누설전류의 감소와 관련된 것으로 생각할 수 있다.

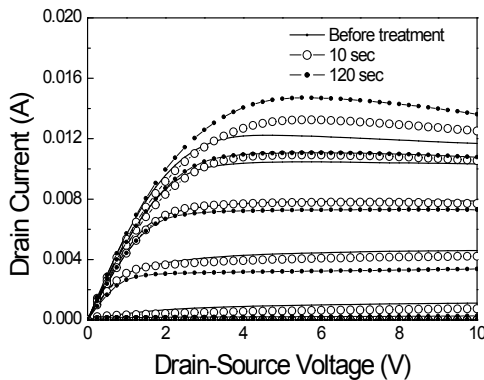


Fig. 7. Drain voltage-current characteristics for the AlGaIn/GaN HEMT before and after expose to the N₂O plasma

그림 7. N₂O 플라즈마 처리 전, 후 HEMT의 드레인 전류-전압 특성

그림 7은 트랜지스터의 게이트 전압에 따른 드레인 전압-전류 특성이다. 게이트 전압으로 0 V 이상의 순방향 전압이 인가된 조건에서 전류의 증가가 매우 두드러지게 나타나고 있으며 특히 10초 동안 처리된 경우에 비하여 30초 이상 처리한 경우 전류의 증가가 더욱 크다. 그러나 10초 동안 처리된 시편과 달리 30초 이상 처리된 경우 증가된 전류가 측정상태에 따라 다소 변화를 나타내 개질된 표면에 다수의 불안정한 상태들이 있을 것으로 추측된다.

IV. 결론

본 연구에서는 AlGaIn/GaN HEMT를 제작하고 노출된 소스와 드레인 영역을 20 mTorr의 챔버 압력과 15 sccm의 N₂O 유량, 40 W의 RF 전력으로 원거리에서 형성된 플라즈마로 10~120초 동안 처리하여 HEMT의 전기적 특성을 관찰하였다. 상온에서 처리한 경우 HEMT의 특성이 변화하지 않았으나 200 ℃의 온도에서 10초 동안 처리한 경우 Ni/Au 게이트의 누설전류가 수 246 nA로부터 1.2 pA로 크게 감소하였으며 25 μm 떨어진 200μm 폭의 두 활성층 사이 누설전류도 3 uA로부터 7 nA로 감소하였다. 플라즈마 처리는 720 Ω/□의 활성층의 면저항을 608 Ω/□로 감소시켜 도전율의 증가를 나타내기도 하였다. 누설전류 특성의 개선은 10초 이내의 N₂O 플라즈마 처리는 처리과정에서 이루어지며 SiO₂의 증착과 제거 후에도 개선된 특성이 유지되었다. N₂O 플라즈마는 트랜지스터의 트랜스컨덕턴스와 드레인 전류의 증가, 드레인 전류의 차단특성의 개선에도 기여하여 고품위의 AlGaIn/GaN HEMT 제작에 효과적으로 이용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] T. Palacios, A. Chakraborty, S. Rajan, C. Poblenz, S. Keller, S. P. Denbaars, J. S. Speck, and U. K. Mishra, "High-power AlGaIn/GaN HEMTs for Ka-band applications," *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 26, no. 11, p. 781 (2005)
 [2] W. Saito, T. Domon, I. Omura, M. Kuraguchi, Y. Takada, K. Tsuda, M. Yamaguchi, "Demonstration of 13.56-MHz Class-E Amplifier Using a High-Voltage GaN Power-HEMT", *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 27, no. 5, p. 326 (2006)

- [3] Y. Z. Chiou, S. J. Chang, Y. K. Su, et. al., "Photo-CVD SiO₂ Layers on AlGaIn and AlGaIn-GaN MOSHFET," *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. 50, p.1748 (2003)
- [4] R. Mehandru, B. Luo, J. Kim et. al., "AlGaIn/GaN metal-oxide semiconductor high electron mobility transistors using Sc₂O₃ as the gate oxide and surface passivation," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 82, No. 15, p. 1530 (2003)
- [5] B. P. Gila, M. Hlad, A. H. Onstine., et. al., "Improved oxide passivation of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, p.163503 (2005)
- [6] J. W. Seo, C. S. Oh, H. S. Jeong, J. W. Yang, K. Y. Lim, C. J. Youn, and H. J. Lee," Bias-Assisted Photoelectrochemical Oxidation of n-GaN in H₂O", *Applied Phys. Letters*, V.81, 6, p.1029 (2002)
- [7] D. Mistele, O. Katz¹, A. Horn, G. Bahir¹, and J. Salzman¹, "Impact of native oxides beneath the gate contact of AlGaIn/GaN HFET devices", *Phys. Stat. Sol. (c)*, 2, No.7, p.2627 (2005)
- [8] Takanori Inagaki, Tamotsu Hashizume, and Hideki Hasegawa, "Effects of surface processing on 2DEG current transport AlGaIn/GaN interface studied by gateless HFET structure", *Applied Surface Science*, V.216, p.519 (2003)
- [9] C. Bae, G. Lucovsky, "Reductions in interface defects, Dit, by post oxidation plasma-assisted nitridation of GaN-SiO₂ interfaces in MOS devices", *Microelectron. Eng.*, V.72, p.236 (2004)
- [10] L. Shen, T. Palacios, C. Poblenz, A. Corrion, A. Chakraborty, N. Fichtenbaum, S. Keller, S. P. Denbaars, J. S. Speck, and U. K. Mishra, "Unpassivated High Power Deeply Recessed GaN HEMTs With Fluorine-Plasma Surface Treatment", *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 27, no. 4, p. 214 (2006)

 저 자 소 개

양 전 욱 (정회원)



1981년 : 광운대학교 전자공학과 졸업 (공학사)

1983년 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)

1994년 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)

1998년 3월~현재 : 전북대학교

반도체과학기술학과 부교수

<주관심분야> GaAs-, GaN-based electronic devices, MMIC