

In-situ SiN 패시베이션 층에 따른 AlGaIn/GaN HEMTs의 전기적 및 저주파 잡음 특성

최여진 · 백승문 · 이유나 · 안성진[†]

금오공과대학교 신소재공학부

(2023년 04월 04일 접수, 2023년 05월 02일 수정, 2023년 05월 04일 채택)

Electrics and Noise Performances of AlGaIn/GaN HEMTs with/without *In-situ* SiN Cap Layer

Yeo Jin Choi, Seung Mun Baek, Yu Na Lee, Sung Jin An[†]

School of Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, 39177, Korea

(Received April 04, 2023, Revised May 02, 2023; Accepted May 04, 2023)

요약: AlGaIn/GaN 이종접합 구조는 이차원 전자 가스층(2-DEG)으로 인해 높은 전하이동도를 갖고 있으며, 넓은 밴드갭을 갖기 때문에 고온에서 높은 항복전압을 갖는 특성을 가지고 있어, 고전력, 고주파 전자 소자로 주목받고 있다. 이러한 이점을 갖고 있음에도 불구하고, 전류 붕괴 등의 다양한 소자 신뢰성에 영향을 주는 인자들이 있기 때문에 이를 해결하고자, 본 논문에서는 금속-유기-화학기상증착법을 이용하여 AlGaIn/GaN 이종접합구조와 SiN 패시베이션 층을 연속 증착시켰다. 이를 통해 HEMTs소자에 SiN패시베이션이 미치는 재료 특성 및 전기적 특성을 분석했으며, 결과를 바탕으로 저주파 잡음 특성을 측정해 소자의 전도 메커니즘 모델과 채널 내의 결함의 원인에 대해서 분석하였다.

Abstract: The AlGaIn/GaN heterostructure has high electron mobility due to the two-dimensional electron gas (2-DEG) layer, and has the characteristic of high breakdown voltage at high temperature due to its wide bandgap, making it a promising candidate for high-power and high-frequency electronic devices. Despite these advantages, there are factors that affect the reliability of various device properties such as current collapse. To address this issue, this paper used metal-organic chemical vapor deposition to continuously deposit AlGaIn/GaN heterostructure and SiN passivation layer. Material and electrical properties of GaN HEMTs with/without SiN cap layer were analyzed, and based on the results, low-frequency noise characteristics of GaN HEMTs were measured to analyze the conduction mechanism model and the cause of defects within the channel.

Keywords: AlGaIn/GaN, High electron mobility transistors (HEMTs), Low-frequency noise, *In-situ* Silicon Nitride (SiN)

[†] Corresponding author: Sung Jin An (sungjinan@kumoh.ac.kr)

1. 서론

최근 전기자동차의 발달과 전자산업의 발달로 갈륨 나이트라이드(GaN)는 3.4 eV의 높은 밴드갭과 2×10^{17} cm/s의 높은 전자포화 속도, 높은 파괴전압 등으로 인해 차세대 고전력, 고주파 소자에 적합한 물질로 주목받으며, 활발히 연구가 진행되고 있다[1,2]. 이러한 우수한 특성을 지닌 GaN 기반의 고전자 이동도 트랜지스터(High Electron Mobility Transistors)는 서로 다른 밴드갭을 갖는 AlGaIn과 GaN을 접합해 두 물질의 계면에 2차원 전자 우물층(2-Dimensional Electron Gas)이 형성되며, 분극현상(Polarization)에 의해서 채널 내의 전하밀도가 증가하기 때문에 빠른 속도로 전자를 전송이 가능하게 하는 이점을 갖고 있다.

이러한 좋은 특성을 갖고 있음에도 불구하고, 분극현상으로 생성된 2-DEG층은 AlGaIn 배리어 층의 표면 상태에 따라 발생하는 전류 붕괴(Current collapse), 누설전류(Leakage current) 등과 같은 소자의 성능 및 신뢰성에 영향을 주고 있다[3]. 이러한 문제들을 해결하기 위해, *ex-situ* SiN_x, GaN, SiO₂ 등과 같이 다양한 절연재료들을 증착하는 방법으로 문제를 해결하고 있다[4-7].

하지만, *ex-situ* 패시베이션 층의 증착은 원자층 증착법(Atomic Layer Deposition), 플라즈마 화학기상증착법(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)에서 추가 성장 및 공정이 진행됨에 따라, 플라즈마 및 화학용액에 의한 손상 등으로 인해 소자 내에 결함(Defect)들로 나타날 수 있다. *In-situ* 성장방법은 AlGaIn 배리어 층이 성장된 동일한 금속-유기 화학기상증착(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) 챔버 내에서 성장되기 때문에 부정전위(threading dislocation) 밀도를 줄여주며, Ga-O 결합으로 인해 발생하는 계면 트랩 상태 밀도를 최소화하여 전류 붕괴를 억제하는 등과 같은 다양한 이점이 있다[7].

본 연구에서는 AlGaIn 배리어 층과 동일한 챔버 내에서 성장된 *in-situ* SiN 패시베이션 층이 적용된 AlGaIn/GaN 에피구조에서의 재료 특성과 이를 소자로 제작하여, HEMTs 소자의 성능 및 저주파 잡음 특성을 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

SiN 패시베이션 층이 연속 성장된 AlGaIn/GaN 이종접합 구조는 4인치 사파이어 기판에서 금속-유기 화학기상증착법(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, AIXTRON, Germany)으로 성장시켰다. 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy, Thermo Fisher, USA)으로 SiN 패시베이션 층이 연속 성장된 AlGaIn/GaN 이종접합구조를 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 성장 시간별 SiN 패시베이션 층의

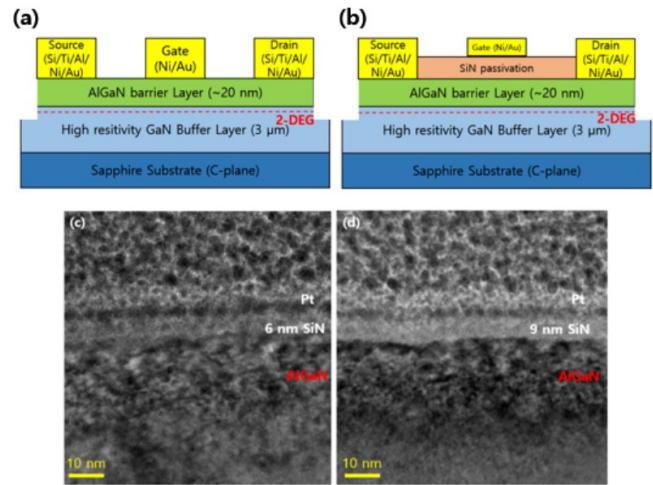


Figure 1. Schematic illustrations of the fabricated AlGaIn/GaN HEMTs (a) without and (b) with in-situ SiN passivation layer. (c), (d) Cross-sectional TEM image of SiN/AlGaIn/GaN structure with layer thickness.

두께는 30분간 성장시켰을 경우 6 nm이며, 60분 성장된 SiN 두께는 9 nm이다. 그 외 층의 두께는 AlGaIn 배리어 층은 약 20 nm, GaN 버퍼 층은 3 μm, GaN 초기 핵생성 층은 30 nm로 구분된다. 고해상도 엑스선 회절 분석기(High Resolution X-ray Diffraction), 홀 이펙트 분석기(Hall effect Measurement), 주사탐침현미경(Atomic Force Microscope) 등으로 샘플의 특성을 확인하였다. 모든 샘플은 동일한 Al 조성비와 AlGaIn 배리어 층 두께 및 GaN 버퍼 층의 결정성을 보여준다. Fig. 2는 SiN 두께에 따른 샘플들의 AFM 이미지이며, 평균거칠기 값(root mean square roughness)은 각각 1.5 nm, 1.2 nm, 1.0 nm으로 SiN 두께가 증가할수록 향상된 거칠기 값을 갖는다. 모든 샘플들의 자세한 특성은 Table 1에 나타났다.

AlGaIn/GaN 이종접합구조의 고전자이동도 트랜지스터(High Electron Mobility Transistor) 소자간 간섭을 줄이기 위해 Mesa 공정을 진행했으며, BCl₃/Cl₂ 혼합가스를 사용하는 유도결합 플라즈마 반응성 식각장비(Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching)로 500 nm 깊이만큼 식각을 진행하였다. 이후 소스/드레인 전극을 형성하기 위해

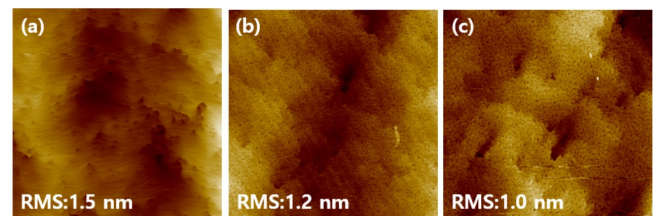


Figure 2. AFM images of AlGaIn/GaN HEMTs (a) without SiN passivation layer, (b) SiN 6 nm, (c) SiN 9 nm, 5×5 μm area.

Table 1. Structural parameters, sheet resistance, 2DEG densities, and electron mobility in AlGaIn/GaN HEMTs with/without SiN passivation layer measured by HRXRD and Hall effect.

Passivation		HRXRD		Hall effect		
SiN Thickness [nm]	Al concentration [%]	GaN FWHM (002)	AlGaIn Thickness [nm]	R_{sh} [$\Omega/sq.$]	μ [$cm^2/V \cdot s$]	n_s [$\times 10^{13} cm^{-2}$]
0	13	314	20	1923	1200	0.27
6	13	310	20	938	1700	0.39
9	13	312	20	1211	903	0.57

오믹(Ohmic) 금속 증착(Si/Ti/Al/Ni/Au = 1/25/160/40/100 nm)을 전자빔 증착기(E-beam Evaporator)로 증착하고, 질소 분위기의 로에서 850°C에서 30초간 급속열처리(Rapid Thermal Annealing)하였다. 마지막으로, 게이트/패드 금속(Ni/Au = 30/200 nm)을 증착하였다. 제작된 소자의 게이트 길이는 5 μm 이며, 게이트 폭은 50 μm , 게이트-드레인 전극의 거리는 10 μm 이다.

3. 결과 및 토론

3.1. DC 특성

Fig. 3에서 *in-situ* SiN 패시베이션 층이 있는 노멀리-온(normally-on) 특성의 AlGaIn/GaN HEMT와 없는 HEMT의 DC 특성을 조사했다. Fig. 3(a)는 선형 영역($V_d = 0.1$ V)에서의 $I_d - V_g$ 특성을 보여준다. 각 소자의 문턱전압(V_{th})은 y -function = $I_d / \sqrt{g_m}$ 으로 구하였다[8]. *In-situ* SiN 캡 레이어가 있는 AlGaIn/GaN HEMT는 -0.8 V, -1.6 V의 문턱전압(V_{th})을 나타내며, 캡 레이어가 없는 소자는 게이트 영역 아래에 캡 레이어가 없기 때문에 상대적으로 높은 V_{th} (-0.3 V)를 나타낸다. SiN 패시베이션의 경우 있는 소자의 V_{th} shift는 Hall effect 측정 결과와 잘 일치한다. 이는 이전에 논의된 것처럼 SiN 패시베이션 층이 성장하면서 양이온 전하가 덜 도입되기 때문이다. 또한, *in-situ* SiN 패시베이션 층이 있는 장치의 off-state 누설 전류가 패시베

이션 층이 없는 장치보다 낮으며, 이는 *in-situ* SiN 패시베이션 층이 AlGaIn 표면층을 효과적으로 보호하여 off-state에서 표면 누설 전류를 감소시키기 때문이다[7].

3.2. 저주파 잡음 특성

저주파 잡음 특성(Low-Frequency Noise)은 게이트 산화물 층에 존재하는 계면/표면의 트랩의 수를 효과적으로 분석하는 방법으로 알려져 있다. 제작된 소자들의 저주파 잡음 분석은 NOISTS7 (Synergie-concept, France)을 사용하여 상온에서 분석하였다[9]. 소자의 전도 메커니즘 분석은 저주파 잡음 데이터를 통해 McWhorther가 제안한 캐리어 수 변동 모델(Carrier Number Fluctuation)을 사용하여 해석하였다[10]. 정규화된 드레인 전류 잡음 스펙트럼 밀도(S_{Id}/I_d^2)는 4 Hz에서 104 Hz까지의 주파수에 따라 $V_d = 0.1$ V에서 문턱전압이하 특성(Subthreshold)에서 강한 축적영역(strong accumulation region)으로 동작되어 얻어지며, Fig. 4(a)에 나와 있다. 채널의 전도 메커니즘을 찾기 위해 드레인 전류(I_d)에 따른 S_{Id}/I_d^2 가 $(g_m/I_d)^2$ 와 잘 비례하는지, 만약 S_{Id}/I_d^2 가 $(g_m/I_d)^2$ 와 잘 비례한다면, CNF 잡음 모델이 우세하고 이는 다음 식 (1)과 같이 산화물 층과 표면 채널 사이의 전자 포획/방출을 설명할 수 있다[11].

$$\frac{S_{Id}}{I_{ds}^2} = \left(\frac{g_m}{I_{ds}}\right)^2 S_{V_{fb}} \text{ with } S_{V_{fb}} = \frac{q^2 k T \lambda N_t}{W L C_{ox}^2 f} \quad (1)$$

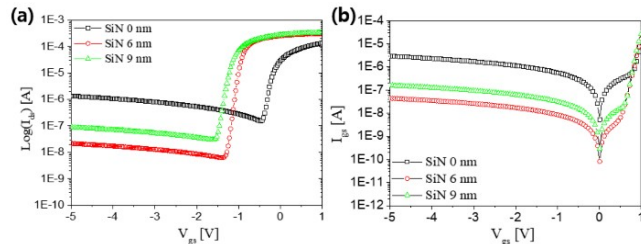


Figure 3. (a) Normalized drain currents (logarithmic scale) at $V_{ds} = 0.1$ V and (b) normalized gate leakage currents versus gate voltage of AlGaIn/GaN HEMTs with and without the SiN cap layer ($W_g = 50 \mu m$).

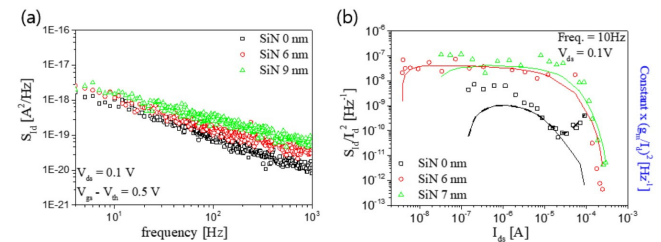


Figure 4. (a) S_{Id} versus frequency at the gate overdrive voltage ($V_{gs} - V_{th}$) = 0.4 V, (b) S_{Id}/I_{ds}^2 (left scale, scatter symbols) and ($\text{constant} \times (g_m/I_{ds})^2$) (right scale, solid lines) according to drain current in the device without (black square) and with (red circle, green triangle) SiN cap layer, respectively ($V_{ds} = 0.1$ V).

여기서 $S_{V_{fb}}$ 는 평탄한 밴드(flat band) 전압의 변동, q 는 전자의 전하, kT 는 열 에너지, λ 는 산화물 터널링 감쇠 거리($\lambda = 0.11$ nm)[12], N_t 는 부피 상의 산화물 트랩 밀도, W_L 은 채널 면적, C_{ox} 는 게이트 절연막 단위 면적당 용량을 나타내며, 식(1)에서 모든 소자의 S_{Id}/I_{ds}^2 는 $(g_m/I_{ds})^2$ 에 비례한다. 이는 AlGaIn/GaN HEMT의 잡음이 CNF 모델인 것으로 보인다. 이러한 잡음 모델의 주 원인은 앞서 설명한대로, AlGaIn 베리어 층과 GaN 채널 사이에서 다중 트래핑/다-트래핑(trapping/de-trapping)이 일어나기 때문이다. 식(1)을 통해 얻은 AlGaIn/GaN HEMTs 소자의 $S_{V_{fb}} = 4.0 \times 10^{-12}$ V²/Hz이며, SiN 층의 증착 두께가 6 nm, 9 nm 일 때, $S_{V_{fb}} = 1.2 \times 10^{-10}$ V²/Hz, 1.5×10^{-10} V²/Hz를 각각 구하였다. 이를 식(1)에 대입해 구한 트랩 밀도(N_t)는 6.3×10^{18} cm⁻³·eV⁻¹, 7.9×10^{18} cm⁻³·eV⁻¹이었다. 하지만, SiN 패시베이션 층이 없는 소자의 (S_{Id}/I_{ds}^2)는 대략 10⁴ A의 높은 드레인 전류에서 I_{ds}^2 에 비례하므로, 소스-드레인 저항 변동 모델이 포함된다는 것을 의미한다[13]. 이는 다음 식(2)를 사용하여 계산된다.

$$\frac{S_{Id}}{I_{ds}^2} = \left(\frac{g_m}{I_{ds}}\right)^2 S_{V_{fb}} + S_{R_{sd}} \left(\frac{I_{ds}}{V_{ds}}\right)^2 \quad (2)$$

이 때, $S_{R_{sd}}$ 는 소스-드레인 직렬 저항의 스펙트럼 밀도를 나타내며($S_{R_{sd}} = 10^2 \Omega^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$), 수식을 통해 얻은 소스-드레인 직렬저항은 $S_{R_{sd}} = 5 \times 10^3 \Omega^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ 이다. SiN 캡 층이 없는 소자의 직렬 저항이 높은 이유는 홀 측정에서 R_{sh} 가 높고, 게이트 누설 전류가 비교적 높기 때문에 CNF+소스-드레인 직렬 저항 변동 모델임을 보여준다. 반면에, SiN 패시베이션 층이 있는 소자는 소스-드레인 저항 변동 없이 비교적 낮은 액세스 저항을 가지고 있어, 제작된 소자의 AlGaIn 표면을 효과적으로 보호(passivates)한다는 것을 나타낸다.

4. 결론

본 논문은 금속-유기 화학기상증착법을 통하여 *in-situ*로 성장시킨 SiN 패시베이션 층이 적용된 AlGaIn/GaN 이종접합구조를 HEMTs로 제작하여 전기적 특성 및 저주파 잡음 특성에 대해서 조사하였다. 성장된 *in-situ* SiN 패시베이션이 적용된 AlGaIn/GaN 이종접합구조의 표면은 매우 매끄러웠으며, 더 나은 표면거칠기 값을 보였다. 또한, 패시베이션 층이 적용된 HEMTs 소자는 향상된 게이트 누설전류 값과 I_{on}/I_{off} 값을 보였다. 이를 통해 HEMTs 소

자의 전기적 특성 향상시키기 위한 방안으로 패시베이션은 필수적이며, 또한 저주파 잡음 특성 역시 우수하며, 이러한 결과들을 통해 *in-situ* SiN 층이 AlGaIn 표면을 효과적으로 패시베이션한다고 보여진다.

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음 (202001480001).

References

1. S. Y. Arulkumaran, T. Egawa, H. Ishikawa, and T. Jimbo, *IEEE Electron Device Lett.*, **21**, 888-1-7 (2003).
2. T. Nanjo, M. Takeuchi, M. Suita, T. Oishi, Y. Abe, Y. Tokuda, and Y. Aoyagi, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 263502-1-3 (2008).
3. S. C. Binari, K. Ikossi, J. A. Roussos, W. Kruppa, Doewon Park, H. B. Dietrich, D. D. Koleske, A. E. Wickenden, and R. L. Henry, *IEEE Trans. Electron. Devices*, **48**, 465-471 (2001).
4. B. Luo, R. Mehandru, J. Kim, F. Ren, B. P. Gila, A. H. Onstine, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, R. Fitch, and J. Gillespie, *J. Electrochem. Soc.*, **149**, G613 (2002).
5. J. Ma, X. Lu, H. Jiang, C. Liu, and K. M. Lau, *Appl. Phys. Exp.*, **7**, 091002 (2014).
6. H. Jiang, C. Liu, Y. Chen, X. Lu, C. W. Tang, and K. M. Lau, *IEEE Trans. Electron. Devices*, **64**, 832-839 (2017).
7. A. V. Vertiatchikh, and L. F. Eastman, *IEEE Electron Device Lett.*, **24**, 535-537 (2003).
8. G. Ghibaudo, *Electronics Lett.*, **24**, 543-545 (1988).
9. J. A. Chroboczek, and G. Piantino, France Patent No. 15075 (2000).
10. A. L. McWhorter, *University of Pennsylvania Press: Philadelphia*, pp. 207-228 (1957).
11. G. Ghibaudo, O. Roux, C. Nguyen-Duc, F. Balestra, and J. Brini, *Phys. Status Solidi A*, **124**, 571-581 (1991).
12. Y. J. Choi, J.-H. Lee, S. J. An, and K.-S. Im, *Crystals*, **10**, 830 (2020).
13. G. Ghibaudo, and T. Boutchacha, *Microelectron. Reliab.*, **42**, 573-582 (2002).