

상시불통형 p-AlGa_N-게이트 질화갈륨 이중접합 트랜지스터의 게이트 전압 열화 시험

Reliability Assessment of Normally-off p-AlGa_N-gate GaN HEMTs with Gate-bias Stress

금 동 민*, 김 형 탁*

Dongmin Keum*, Hyungtak Kim*

Abstract

In this work, we performed reverse- and forward-gate bias stress tests on normally-off AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors(HEMTs) with p-AlGa_N-gate for reliability assessment. Inverse piezoelectric effect, commonly observed in Schottky-gate AlGa_N/Ga_N HEMTs during reverse bias stress, was not observed in p-AlGa_N-gate AlGa_N/Ga_N HEMTs. Forward gate bias stress tests revealed distinct degradation of p-AlGa_N-gate devices exhibiting sudden increase of gate leakage current. We suggest that forward gate bias stress tests should be performed to define the failure criteria and assess the reliability of normally off p-AlGa_N-gate GaN HEMTs.

요 약

본 연구에서는 상시불통형 p-AlGa_N-게이트 질화갈륨(GaN) 이중접합 트랜지스터의 신뢰성 평가를 위한 가속열화 시험 조건을 수립하기 위해 게이트 전압 열화 시험을 진행하였다. 상시불통형 트랜지스터의 동작 조건을 고려하여 기존 상시도통형 쇼트키-게이트 소자평가에 사용되는 게이트 역전압 시험과 더불어 순전압 시험을 수행하여 열화 특성을 분석하였다. 기존 상시도통형 소자와 달리 상시불통형 소자에서는 게이트 역전압 시험에 의한 열화는 관찰되지 않은 반면, 게이트 순전압 시험에서 심한 열화가 관찰되었다. 상시불통형 질화갈륨 전력 반도체 소자의 신뢰성 평가에 게이트 순전압 열화 시험이 포함되어야 함을 제안한다.

Key words : Gallium nitride(GaN), Normally-off, p-AlGa_N-gate, Reliability, Stress tests, HEMTs

1. 서론

질화갈륨(GaN) 이중접합 트랜지스터는 넓은 밴드갭과 높은 전자 포화 속도 등의 우수한 물질적 특성을 바탕으로 차세대 전력 반도체로서 상용화

를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[1][2]. 특히 이중접합계면에서 인위적인 불순물 주입 없이도 강한 분극 효과에 의해 높은 농도의 2차원 전자채널이 형성된다는 큰 장점이 있다[3]. 그러나 이러한 효과로 인해 게이트 전압이 인가되지 않아도

* Dept. of Electronics and Electrical Engineering, Hongik University

★ Corresponding author

E-mail : hkim@hongik.ac.kr, Tel : +82-2-320-3013

※ Acknowledgment

This work as supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) (NRF-2017M2B2A4049495).

Manuscript received Mar. 5, 2018; revised Mar. 27, 2018 ; accepted Mar. 28, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

채널이 형성되어 상시도통형 동작을 하게 된다. 전력전자 시스템에서는 안정성 및 신뢰성을 위해 개폐용 트랜지스터의 상시불통형 동작이 요구된다. 따라서 질화갈륨 기반 전력 트랜지스터의 상시불통형 동작을 위한 다양한 공정 방법들이 제시되고 있다[4][5]. 그 중 AlGaIn/GaN 이중접합 위에 p-AlGaIn 층을 이용해 p-n 접합을 형성시켜 상시불통형 동작을 구현 p-AlGaIn-게이트 AlGaIn/GaN 이중접합 트랜지스터가 가장 활발하게 상용화 연구가 진행되고 있다[6][7].

반도체 소자가 부품으로 상용화되기 위해서는 신뢰성 확보가 필수적이다. 상시도통형 GaN 이중접합 트랜지스터 역시 상용화를 위한 신뢰성 연구가 활발히 진행되어 주요 열화기구의 하나로 게이트 역전압 시험 중 역압전 효과에 의한 누설전류의 증가가 확인되었다[8][9]. 그러나 상시불통형 GaN 이중접합 트랜지스터의 경우 상시도통형 소자와 달리 트랜지스터의 온-동작 시 게이트에 순전압이 인가되어야 한다.

본 논문에서는 상시불통형 p-AlGaIn-게이트 GaN 이중접합 트랜지스터의 신뢰성 평가에 필요한 가속열화 시험조건으로 게이트 역전압 및 순전압 시험을 수행하여 유효성을 검증하였다.

II. 본론

실험에 사용된 상시불통형 p-AlGaIn-게이트 GaN 이중접합 트랜지스터의 개략적 단면도를 그림 1에 나타내었다. 이중접합박막 구조는 (111) 실리콘 기판 위에 유기 금속 화학 증착법에 의해 증착된 3 μm GaN 버퍼층, 30 nm AlGaIn 배리어층, 그리고 Mg가 도핑된 p-AlGaIn 층으로 구성되어 있다. p-AlGaIn 층의 식각은 time-stop 방식으로 진행되어 게이트 영역을 형성하고 활성 영역의 표면에 얇게 남겨졌다. 드레인과 소스 전극으로 Ti/Al 기반의 금속막이 증착되어, rapid thermal annealing(RTA)를 이용하여 합금을 형성하였다. 제작된 트랜지스터의 게이트-드레인 간격, 게이트 길이, 게이트-소스 간격은 각각 15, 3, 2 μm 이고, 트랜지스터의 폭은 200 μm 이다. p-AlGaIn 층은 열적평형상태에서 AlGaIn/GaN 이중접합면의 전도대를 페르미준위보다 높이 올려주게 되어 계면에 형성되어 있던 전자채널을

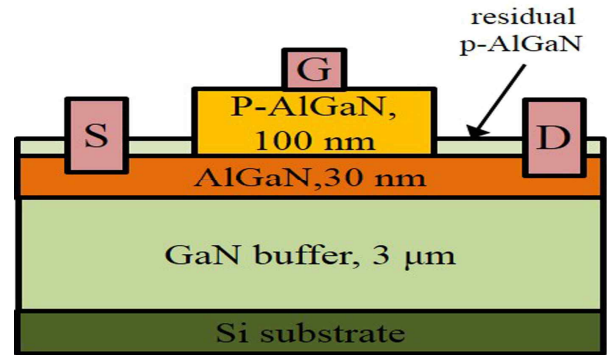


Fig. 1. Cross-sectional view of normally-off p-AlGaIn-gate AlGaIn/GaN HEMTs on Si.

그림 1. 상시불통형 p-AlGaIn-게이트 GaN 이중접합 트랜지스터의 단면도.

공핍시키는 역할을 한다. 따라서 게이트에 순전압이 인가되지 않았을 때 트랜지스터가 꺼져있는 상시불통형 동작을 가능하게 한다.

상시도통형 쇼트키-게이트 AlGaIn/GaN HEMTs에서 발생하는 역압전 효과에 의한 열화를 확인하기 위하여 상시불통형 p-AlGaIn-게이트 소자에 게이트 역전압 열화 시험을 진행하였다. 전압은 드레인과 소스에는 0 V, 게이트에는 -1 V부터 -100 V까지 -1 V 스텝으로 인가해주었으며, 각 스텝마다 전압을 1분간 유지해주었다. 모든 측정은 상온에서 Agilent 4155A 파라미터분석기로 진행되었다.

그림 2는 열화 시험 동안의 게이트 전류(그림 2(a))와 스트레스 전후의 게이트 다이오드 특성(그림 2(b))을 나타낸 그래프이다. 열화 시험 동안 게이트 전류는 쇼트키-게이트 구조처럼 역압전 효과에 의해 갑작스럽게 증가하는 모습을 나타내지 않고, 점진적으로 증가하였다. 다이오드 특성 또한 열화 시험 전후로 변화되지 않는 모습을 확인할 수 있었다. 스트레스 전후의 트랜지스터 특성 역시 열화 시험 직후 일시적인 전류의 감소가 나타났을 뿐 곧 회복하였다(그림 3). 따라서 게이트 역전압 열화 시험은 상시불통형 소자의 가속열화 시험조건으로 부적합함을 알 수 있다.

게이트 순전압에 의해 도통이 되는 p-AlGaIn-게이트 GaN 이중접합 트랜지스터의 상시불통형 동작을 고려하여 게이트 순전압 열화 시험을 진행하였다. 전압은 드레인과 소스는 접지, 게이트에는 1 V부터 1 V 씩 계단식으로 증가하였으며, 각 전압마다 1분간 유지되었다. 게이트 순전압 열화

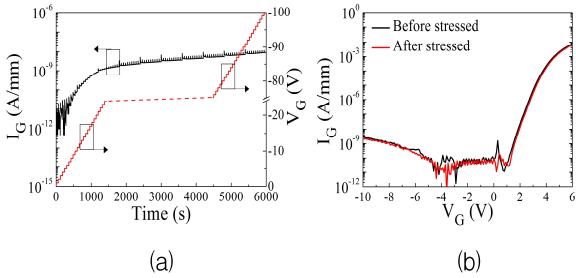


Fig. 2. (a) Gate current and voltage and (b) gate diode characteristics in reverse gate bias stress tests

그림 2. 게이트 역전압 열화 시험에서의 (a) 게이트 전류, 게이트 전압과 (b) 게이트 다이오드 특성

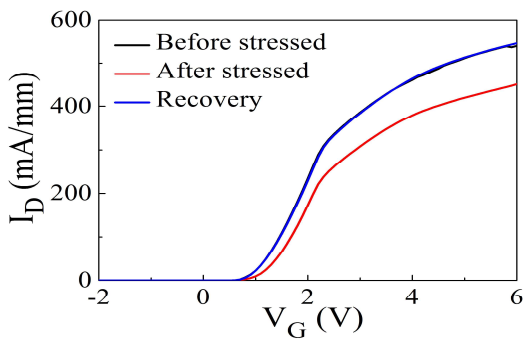


Fig. 3. Transfer characteristics before and after reverse gate bias stress tests and its recovery characteristics. $V_D=10$ V

그림 3. 게이트 역전압 열화 시험 전후의 전달 특성과 회복 특성. $V_D=10$ V

시험 동안의 게이트 전류(그림 4(a))와 게이트 다이오드 특성(그림 4(b)) 그래프를 그림 4에 나타내었다. 게이트 순전압이 증가함에 따라 게이트 다이오드의 순방향 전류가 증가함이 관찰되었다. 전압이 유지되는 1분간 전류변화는 거의 관찰되지 않았으나 $V_G=9$ V 구간에서 급격한 전류의 증가가 감지되었다(삽도 참조). 상시도통형 소자에서 역압전 효과에 의해 게이트 전류가 급격히 증가하는 임계전압(critical voltage, V_{crit})이 존재한 것과 유사한 현상이다. 급격한 전류 변화가 나타나지 않은 $V_G < 9$ V 구간에서 다이오드 전류-전압 특성에는 큰 변화가 없었으나 급격한 전류변화를 보인 경우 특성 열화가 매우 심한 것을 알 수 있다. 즉 본 게이트 순전압 열화 시험의 V_{crit} 은 $V_G=9$ V이다. 상시불통형 p-AlGaN-게이트 GaN 이종접합 트랜지스터의 게이트 순전압 열화 시험에 따른 열화 현상을 확인하기 위해서 정전압 게이트 열화 시험을 진행하였다. 그림 5는 열화가 일어난 V_{crit} 보다 낮은 $V_G=7$ V 에서 진행된 열화

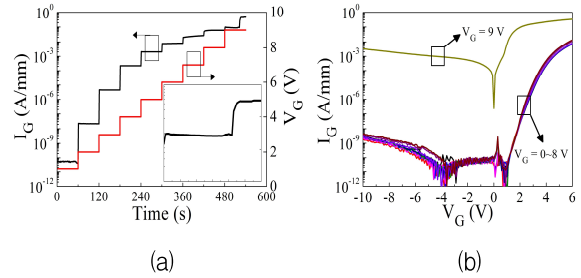


Fig. 4. (a) Gate current and gate voltage and (b) gate diode characteristics in forward gate bias stress tests(inset) Sudden increase of gate current at $V_G=9$ V

그림 4. 게이트 순전압 열화 시험에서의 (a) 게이트 전류, 게이트 전압과 (b) 게이트 다이오드 특성(삽도) 9 V 게이트 전압에서 게이트 전류의 급작스런 증가

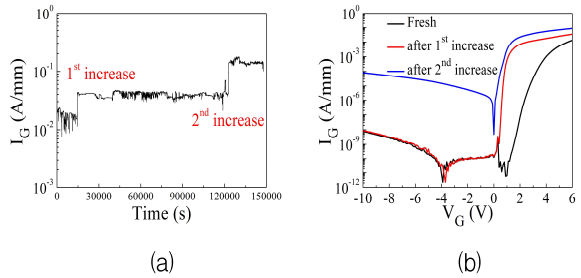


Fig. 5. (a) Gate current and (b) gate diode characteristics as gate current increased in constant forward gate bias stress tests

그림 5. 게이트 순전압 열화 시험에서의 (a) 시간에 따른 게이트 전류와 (b) 1, 2 차 게이트 전류 증가에 따른 게이트 다이오드 특성

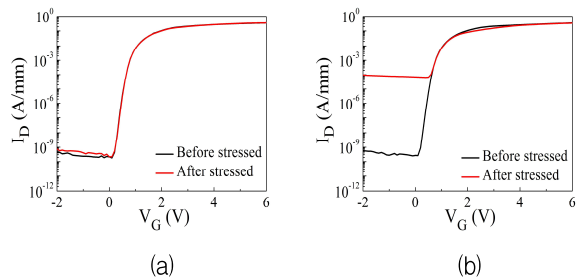


Fig. 6. Transfer characteristics before and after (a) 1st and (b) 2nd increase of gate current was observed. $V_D=10$ V

그림 6. (a) 1차, (b) 2차 게이트 전류 증가 이후의 전달 특성 그래프. $V_D=10$ V

시험의 결과이다. 열화 시험 중 게이트전류가 2회에 걸쳐 급격히 증가할 때마다 게이트 다이오드 특성의 변화가 나타났다. 특히 2차 증가 감지 후 다이오드 특성이 크게 열화되어 앞서 진행한 계단식 순전압 열화 시험과 유사한 특성을 보였다. 앞서 수행한 계단식 시험에서는 정전압 구간에서 시험 시간이 비교적 짧은 1분으로 진행되어 1차

전류 증가현상이 감지되지 않았다. 그림 6은 정전압 시험 중 전류 증가가 감지된 이후의 트랜지스터의 전달 특성을 보여준다. 게이트 전류의 첫 번째 증가 이후 전달 특성(그림 6(a))은 거의 변하지 않았고, 2차 증가 이후(그림 6(b)) 누설 전류가 크게 증가하였다. 정전압 열화 시험 중 나타나는 열화 양상이 게이트 다이오드와 동일함을 알 수 있다.

게이트 순전압 열화 시험을 스텝형으로 수행할 경우 게이트 다이오드의 급격한 열화가 발생하는 V_{crit} 을 탐지할 수 있었다. 특히 V_{crit} 보다 낮은 게이트 순전압 조건에서도 장시간 스트레스가 축적될 경우 V_{crit} 에 의한 열화와 동일한 현상이 발생하였다. 따라서 상시불통형 질화갈륨 반도체 트랜지스터의 신뢰성 평가를 위해서는 게이트 순전압 시험에 의한 V_{crit} 과 부근 전압에서의 열화-시간 의존도에 근거한 열화 시험조건 수립이 선행되어야 함을 알 수 있다.

III 결론

상시불통형 p-AlGaIn-게이트 AlGaIn/GaN 이중접합 트랜지스터에 게이트 전압 열화 시험을 수행하였다. 기존 상시도통형 트랜지스터와 달리 역전압 열화 시험에 의한 열화가 나타나지 않았다. 계단식 순전압 열화 시험에서 열화의 V_{crit} 이 관찰되었고, 게이트 전류의 급격한 증가가 관찰되었다. V_{crit} 미만 조건에서의 정전압 열화 시험을 통해 시간 의존도를 보이는 열화가 감지되었으며, 게이트 다이오드와 트랜지스터의 누설 전류가 모두 증가하였다. 본 결과로부터 상시불통형 p-AlGaIn-게이트 GaN 이중접합 트랜지스터의 신뢰성 평가를 위해서 게이트 순전압 열화 시험조건 수립이 선행되어야 함을 알 수 있다.

References

[1] U. K. Mishra, P. Parikh, and Y. Wu, "AlGaIn/GaN HEMTs—an overview of device operation and applications," *Proc. IEEE*, vol. 90, no. 6, pp. 1022-1031, 2002. DOI: 10.1109/JPROC.2002.1021567

[2] L. F. Eastman and U. K. Mishra, "The Toughest yet [GaN Transistors]," *IEEE spectr.*, vol. 39, no. 5,

pp. 28-33, 2002. DOI: 10.1109/6.999791

[3] O. Ambacher, B. Foutz, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, A. J. Sierakowski, W. J. Schaff, and L. F. Eastman, "Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaIn/GaN heterostructures," *J. Appl. Phys.*, vol. 78, no. 1, pp. 334-344, 2000. DOI:10.1063/1.371866

[4] B. R. Park, J. G. Lee, W. Choi, H. Kim, K. S. Seo, and H. Y. Cha, "High-quality ICPCVD SiO₂ for normally-off AlGaIn/GaN-on-Si recessed MOSHFETs," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 34, no. 3, pp. 354-356, 2013. DOI: 10.1109/LED.2012.2236678

[5] Y. Uemoto, M. Hikita, H. Ueno, H. Matsuo, H. Ishida, M. Yanagihara, T. Ueda, T. Tanaka, and D. Ueda, "Gate Injection Transistors (GIT)-A Normally-Off AlGaIn/GaN Power Transistor Using Conductivity Modulation," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 54, no. 12, pp. 3393-3399, 2007. DOI: 10.1109/TED.2007.908601

[6] I. Hwang, H. Choi, J. . Lee, H. S. Choi, J. Kim, J. Ha, C. Y. Um, S. K. Hwang, J. Oh, J. Y. Kim, J. K. Shin, Y. Park, U. Chung, I. K. Yoo, and K. Kim, "1.6 kV, 2.9 mΩ·cm² Normally-off p-GaN HEMT Device," in *Proc. Int. Symp. Power. Semicond. Device(ISPSD)*, 2012, pp. 41-44. DOI: 10.1109/ISPSD.2012.6229018

[7] O. Hilt, A. Knauer, F. Brunner, WE. Bahat-Treidel, and J. Wurfl, "Normally-off AlGaIn/GaN HFET with p-type GaN Gate and AlGaIn buffer," in *Proc. Int. Symp. Power. Semicond. Device(ISPSD)*, 2010, pp. 347-350.

[8] J.A. del Alamo and J. Joh, "GaN HEMT Reliability," *Microelectron. reliab.*, vol. 49, no. 9-11, pp.1200-1206, 2009. DOI:10.1016/j.microrel.2009.07.003

[9] M. Meneghini, A. Stocco, M. Bertin, D. Marcon, A. Chini, G. Meneghesso, and E. Zanoni, "Time-dependent degradation of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors under reverse bias," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 3, p. 033505, 2012. DOI:10.1063/1.3678041