



Impact of Acceptor Trap Diffusion Lengths on DC Performance and Current Collapse of AlGaIn/GaN HEMTs : A Simulation Study

Tae-Sung Kim, Young-Hyun Won, Jae-Hun Lee, Chae-Yun Lim, and Hyun-Seok Kim
Division of Electronics and Electrical Engineering, Dongguk University-Seoul, Seoul, South Korea

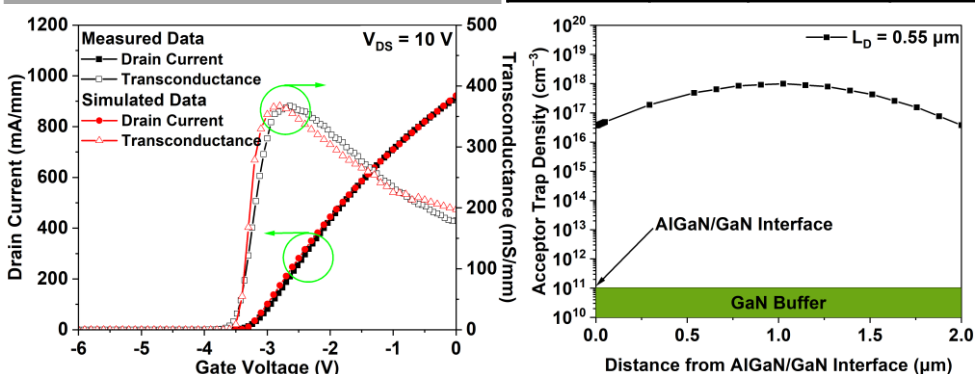
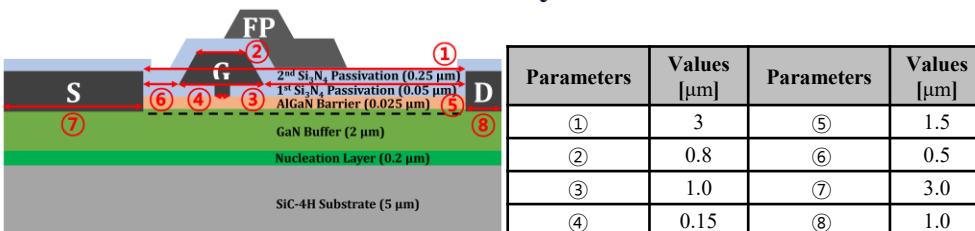


➤ Introduction

AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors(HEMTs) have gathered significant attention in power electronics due to their superior performance in high-power applications. However, unintentional n-type doping in the GaN layers during epitaxial growth can induce detrimental effects such as punch-through, buffer leakage current, and degradation of device reliability. To mitigate these issues, compensation of acceptor traps like Fe or C is commonly introduced to achieve a semi-insulating GaN buffer. In this study, the impact of the acceptor trap diffusion lengths in the GaN buffer on the DC performance and current collapse of AlGaIn/GaN HEMT was systematically investigated and compared.

➤ Results & Discussion

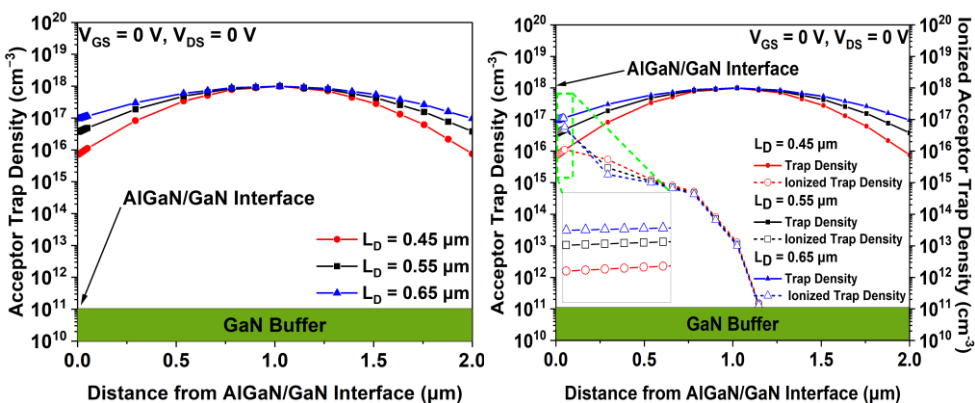
❑ Device Structure & Reliability Assurance



	Acceptor trap Density [cm ⁻³]	Trap energy level [eV]	Capture cross-section [cm ²]	Diffusion length [μm]
Values	10 ¹⁸	E _C - 0.8	10 ⁻¹⁵	0.55

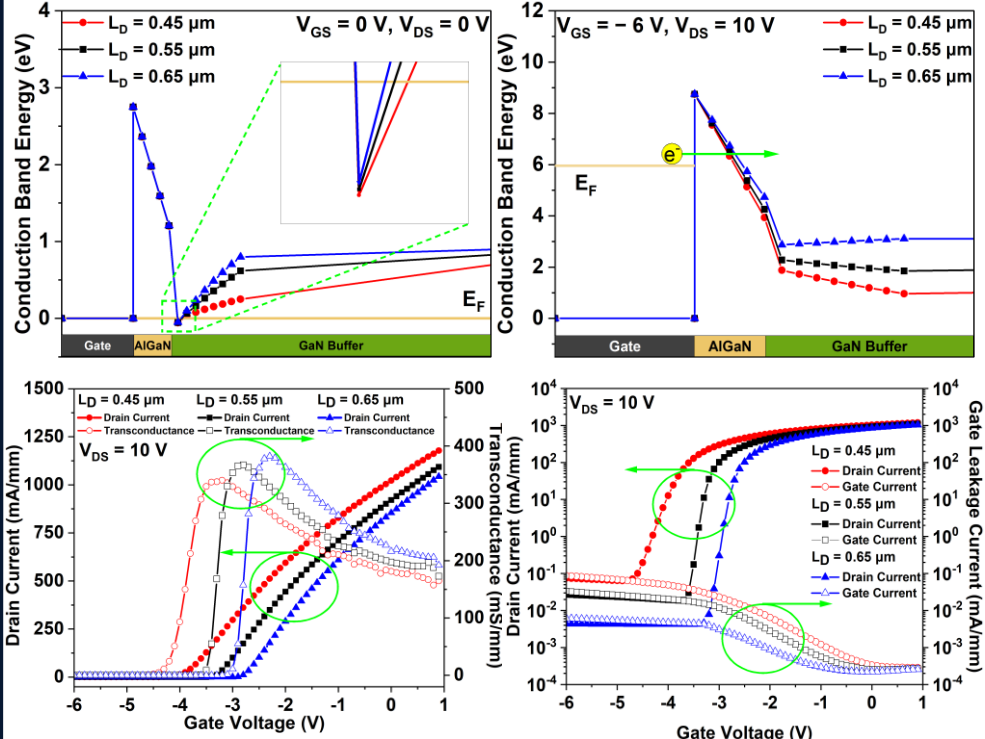
- ✓ To achieve semi-insulating properties in the GaN buffer, we applied acceptor trap doping in the GaN buffer.
- ✓ To ensure the reliability of the simulation, three DC characteristics(V_{th} , G_m , I_{DSS}) were matched with a maximum error rate of 0.79%.

❑ Simulation Results

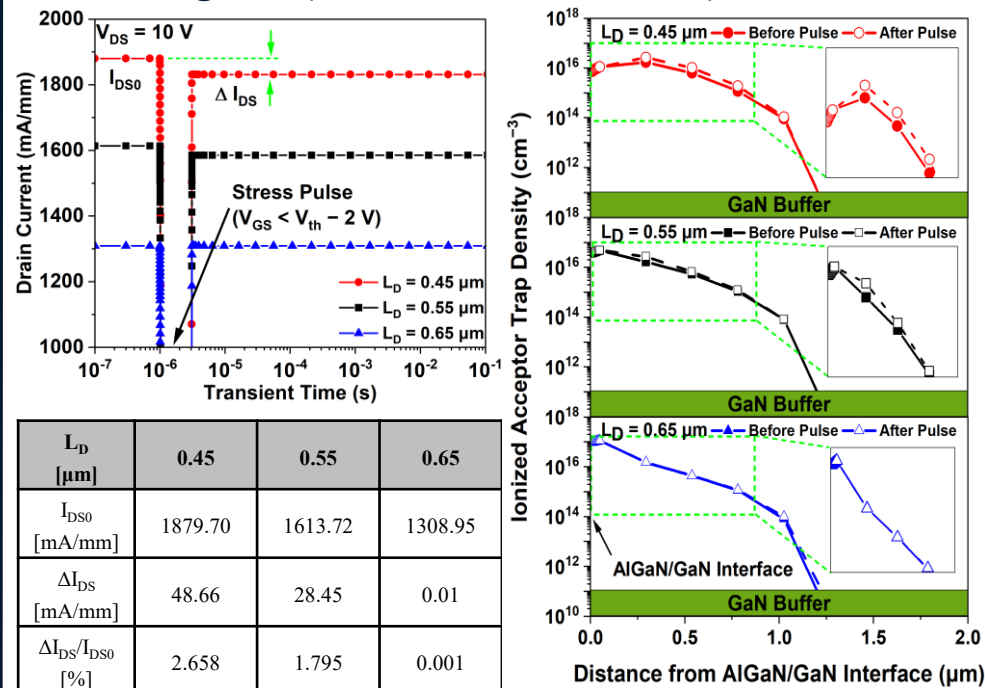


- ✓ To analyze the impact of acceptor trap diffusion lengths(L_D), simulations were performed by varying L_D from 0.45μm to 0.65μm with all other parameters fixed.

❑ DC Characteristics



❑ Gate-lag DCT(Drain Current Transient)



➤ Conclusion

This study explored the influence of acceptor trap diffusion lengths within the GaN buffer on the DC characteristics and current collapse behavior of AlGaIn/GaN HEMT using TCAD simulation. As the acceptor trap diffusion length increased, the ionized acceptor trap density near the AlGaIn/GaN interface also rose, which led to an upward shift in the conduction band in the GaN buffer and secured a confinement of the electron within the channel. Consequently, the electrical characteristics such as threshold voltage, drain current, maximum transconductance were significantly influenced by the variation in the acceptor trap diffusion lengths. Additionally, the conduction band slope of the AlGaIn barrier became more gradual, which reduced the probability of electron tunneling and gate leakage current. Also, an increase in acceptor trap diffusion length reduced the difference between ionized acceptor trap densities in the GaN buffer before and after stress pulse, thereby leading to a smaller 2-DEG variation and mitigation of current collapse. These findings indicate that the diffusion length in the GaN buffer is a key factor influencing both the DC characteristics and current collapse of the AlGaIn/GaN HEMT.

➤ Acknowledgment

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation(IITP) grant funded by the Korea government(MSIT)(No. 2021-0-00760), as well as Institute of Civil Military Technology Cooperation, funded by the Defense Acquisition Program Administration(No. 22-CM-TN-15).

AlGaIn/GaN HEMT DC

Acceptor Trap

*김태성, 원영현, 이재훈, 임채윤, 김현석[✉]

동국대학교 전자전기공학부

e-mail : kimtaesung1357@gmail.com, yhwon000528@gmail.com, leehoonjae9646@gmail.com,
cylk9799@gmail.com, hyunseokk@dongguk.edu

Impact of Acceptor Trap Diffusion Lengths on DC Performance and Current Collapse of AlGaIn/GaN HEMTs : A Simulation Study

*Tae-Sung Kim, Young-Hyun Won, Jae-Hun Lee,
Chae-Yun Lim, and Hyun-Seok Kim
Division of Electronics and Electrical Engineering
Dongguk University-Seoul

Abstract

In this study, the impact of the acceptor trap diffusion lengths in the GaN buffer on the DC performance and current collapse of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistor (HEMT) were systematically investigated and compared. As the acceptor trap diffusion length increased, the ionized acceptor trap density near the AlGaIn/GaN interface also rose, which led to an upward shift in the conduction band in the GaN buffer and secured a confinement of the electron within the channel. As a result, the electrical characteristics of AlGaIn/GaN HEMT such as threshold voltage, drain current, maximum transconductance and gate leakage current were significantly influenced by the variation in the acceptor trap diffusion lengths. Additionally, it was confirmed that current collapse was closely related to

acceptor trap diffusion length in the GaN buffer. An increase in acceptor trap diffusion length reduced the difference between ionized acceptor trap densities in the GaN buffer before and after the stress pulse, leading to a smaller variation in the 2-DEG density, which consequently resulted in the mitigation of current collapse. These findings indicate that the diffusion length in the GaN buffer is a dominant factor influencing both DC characteristics and current collapse of the AlGaIn/GaN HEMT.

I. 서론

Gallium Nitride(GaN)는 3.4eV의 넓은 밴드갭을 가지는 물질로, 높은 전자 이동도, 포화 속도, 우수한 항복 전압 특성 등 뛰어난 물성 덕분에 고온 및 고전력 조건에서 작동하는 전력 반도체 소자에 적합한 재료로 각광받고 있다.[1] 이와 관련하여, GaN과 같은 화합물 반도체를 활용한 이중접합 기반 High-Electron-Mobility Transistor(HEMT)가 주목받는다. GaN 기반 HEMT는 비대칭적인 Wurtzite 결정 구조로 인한 자발 분극과 반도체층과 그와 접합된 다른 반도체 층간 격자 상수 차

* 이 논문은 2021, 2022년도 정부 (과학기술정보통신부, 산업통상자원부)의 재원으로 정보통신기획평가원, 민군협력진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021-0-00760, 22-CM-TN-15).

이에 의한 압전 분극이 발생한다. 따라서, AlGaIn/GaN 계면에 전자들이 갇혀 반도체 소자에서 채널 역할을 하는 2-Dimensional Electron Gas(2-DEG)가 형성된다.[2] 기존 산업에서 주로 사용되는 Si 기반 트랜지스터와 달리, 추가적인 도핑이 없이 채널을 형성하는 것과 뛰어난 물성 덕분에 AlGaIn/GaN HEMT는 고전압 및 고주파 응용에 적합한 소자이다.

일반적으로 GaN이 공정 과정에서 의도치 않게 N-type으로 도핑이 된다. 따라서, 펀치스루 현상 및 누설전류를 방지하고, Carrier Confinement 증가를 위해 GaN Buffer에 Fe, C와 같은 Deep-level Acceptor Trap을 의도적으로 도핑하여 Semi-insulating 특성을 확보한다.[3,4] GaN Buffer 내 Acceptor Trap은 소자의 동작 특성 및 전류 붕괴에 지대한 영향을 미치므로, 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.[5,6] 기존 GaN Buffer 관련 연구들은 주로 Trap 밀도, 에너지 레벨, 포획 단면적과 같은 파라미터를 중점으로 이루어졌으나, Acceptor Trap 확산 길이(L_D)와 관련된 연구가 미비하다.

따라서 본 연구는 실제 공정으로 제작된 $0.15\mu\text{m}$ 게이트 길이를 갖는 AlGaIn/GaN HEMT 소자의 측정 데이터 기반으로 Technology Computer-Aided Design(TCAD) 시뮬레이션을 통해, GaN Buffer 내 Acceptor Trap 확산 길이가 소자 동작 특성 및 전류 붕괴에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

II. 본론

2.1 소자 구조 모델링

그림 1은 본 연구에서 사용한 AlGaIn/GaN HEMT 소자의 2차원 단면 모식도이다.

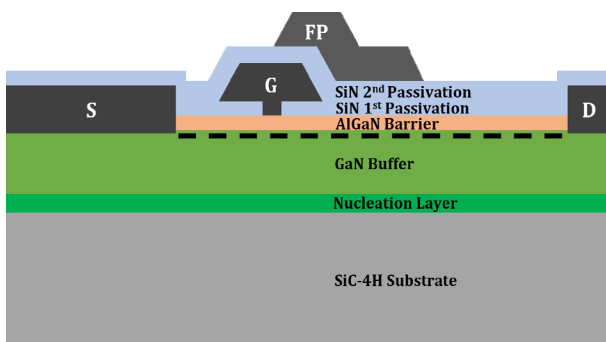


그림 1. AlGaIn/GaN HEMT 소자 단면 모식도

SiC 기판 위에 $0.2\mu\text{m}$ 두께의 Nucleation 층, $2\mu\text{m}$ 두께의 GaN Buffer, 그리고 $0.025\mu\text{m}$ 두께의 AlGaIn Barrier 순서로 소자의 에피층을 구성하였다. 게이트 폭

길이는 실측 소자와 동일한 $0.15\mu\text{m}$ 로 구현하였으며, 게이트 전극 중심과 드레인 전극, 소스 전극 간 거리는 각각 $2.0\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$ 이다. Passivation 층은 SiN을 사용했으며 $0.05\mu\text{m}$ 두께의 1st Passivation 층과 $0.25\mu\text{m}$ 두께의 2nd Passivation 층으로 구성된다. 또한, 게이트와 드레인 사이 전계 집중을 완화하기 위한 소스와 연결된 필드 플레이트가 존재한다.

2.2 시뮬레이션 신뢰도 확보

본 시뮬레이션은 Shockley-Read-Hall 모델, 자기 발열 모델, Trap-assisted 터널링을 비롯한 다양한 모델을 적용하여 진행하였으며, 각 모델에 필요한 전자와 정공 수명, 열전도도 등의 파라미터와 소자를 구성하는 물질들의 물성을 반영하였다.[7] 또한, GaN Buffer의 Semi-insulating 특성 확보를 위해 GaN Buffer에 Acceptor Trap을 가우시안 함수 형태로 도핑하였다. Peak 도핑 위치는 GaN Buffer의 중앙으로 설정하였으며 Acceptor Trap의 최대 밀도는 10^{18}cm^{-3} , 확산 길이는 $0.55\mu\text{m}$ 로 설정하였다.

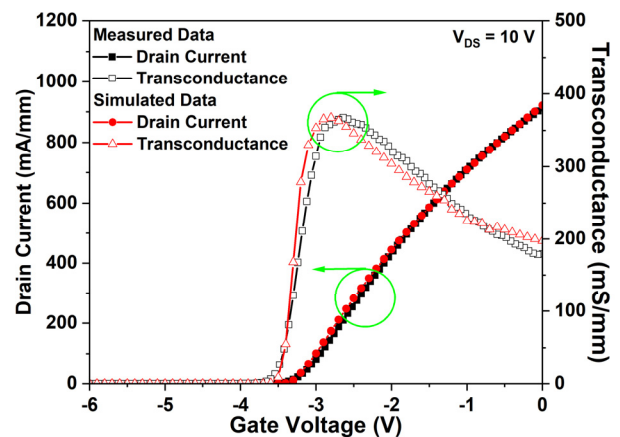


그림 2. AlGaIn/GaN HEMT 소자 $I_{DS}-V_{GS}$ 실측 및 시뮬레이션 데이터

그림 2는 소자의 실측 데이터와 시뮬레이션 데이터의 $I_{DS}-V_{GS}$ 특성을 비교하여 나타낸 그래프이다. 본 연구의 시뮬레이션 신뢰성 확보를 위해, 문턱 전압(V_{th}), 최대 전류 이득(G_m), $V_{GS} = 0\text{V}$ 에서의 드레인 전류(I_{dss}) 등 3가지 DC 특성을 실측 데이터 대비 최대 오차율 0.8% 이내로 일치시켜 모델링 파라미터를 추출하였다.

2.3 Acceptor Trap 확산 길이(L_D)에 따른 동작 특성

그림 3은 Acceptor Trap 확산 길이에 따른 GaN Buffer 내 Acceptor Trap 밀도 및 이온화된 Trap 밀도를 보여준다. 본 연구에서는 Acceptor Trap 확산 길이

에 따른 소자 동작 특성을 분석하기 위해, Peak 도핑 위치를 GaN Buffer 중앙에 고정한 채, Acceptor Trap 확산 길이를 $0.45\ \mu\text{m}$, $0.55\ \mu\text{m}$, $0.65\ \mu\text{m}$ 변화시키며 3가지의 Acceptor Trap 도핑 분포에 대하여 시뮬레이션을 진행하였다. Acceptor Trap 확산 길이 증가에 따라 2-DEG 채널 부근 이온화된 Trap 밀도가 증가하게 되는데, 이는 2-DEG 밀도 및 에너지밴드 다이어그램에 영향을 끼친다.

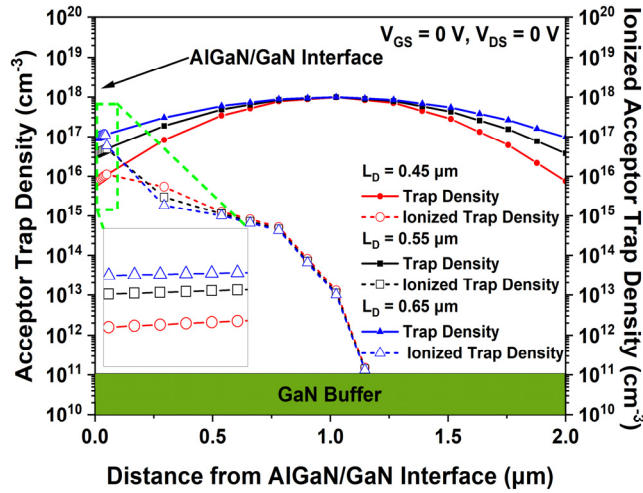


그림 3. Acceptor Trap 확산 길이(L_D)에 따른 GaN Buffer 내 Acceptor Trap 및 이온화된 Acceptor Trap 밀도 (Inset : AlGaIn/GaN 계면에서의 이온화된 Acceptor Trap 밀도)

그림 4(a)는 $V_{GS} = 0\text{V}$, $V_{DS} = 0\text{V}$ 에서의 에너지밴드 다이어그램을, 그림 4(b)는 동일 전압 조건에서 전자 분포를 나타낸 것이다. Acceptor Trap 확산 길이가 $0.45\ \mu\text{m}$ 에서 $0.65\ \mu\text{m}$ 로 증가할수록, AlGaIn/GaN 계면 부근에 있는 Acceptor Trap이 전자를 많이 포획하여 GaN Buffer 내 2-DEG 밀도가 $4.73 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 에서 $3.83 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 로 감소하고, GaN Buffer에서의 전도대가 상대적으로 위로 이동하게 된다. 이로 인해, 전위 우물이 좁게 형성되어 전자가 더 밀집하여 분포하게 되며 이는 그림 4(b)를 통해 확인할 수 있다.

그림 5는 Acceptor Trap 확산 길이에 따른 $V_{DS} = 10\text{V}$ 에서의 $I_{DS}-V_{GS}$ 특성을 선형 스케일로 나타낸 그래프이다. Acceptor Trap 확산 길이가 $0.45\ \mu\text{m}$ 에서 $0.65\ \mu\text{m}$ 로 증가함에 따라 감소한 2-DEG 밀도로 인해 V_{th} 는 양의 방향으로 1.35V 이동했으며, I_{dss} 가 1022.41mA/mm 에서 854.44mA/mm 로 감소하였다. 또한, 전위 우물 내에 전자가 상대적으로 밀집하여 G_m 이 12.29% 상승하였다. 이는 표 1을 통해 확인할 수 있다.

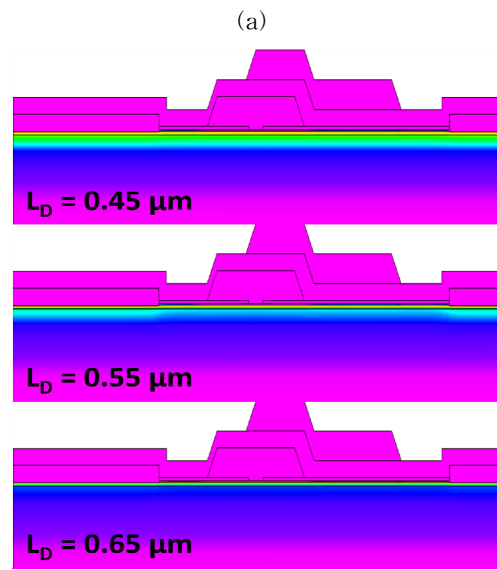
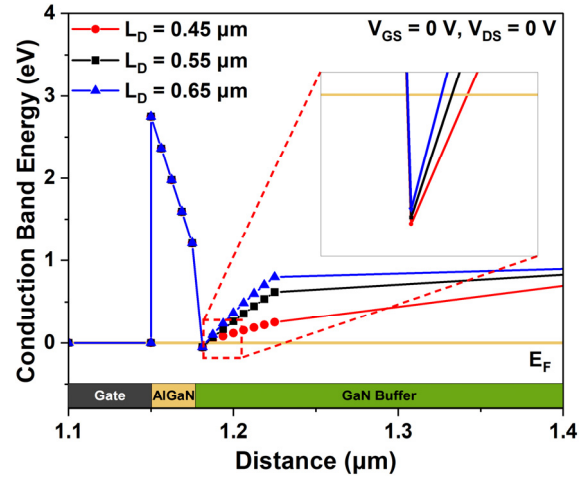


그림 4. Acceptor Trap 확산 길이(L_D)에 따른 (a) 에너지밴드 다이어그램 (Inset : AlGaIn/GaN 계면 전위 우물) (b) 전자 분포

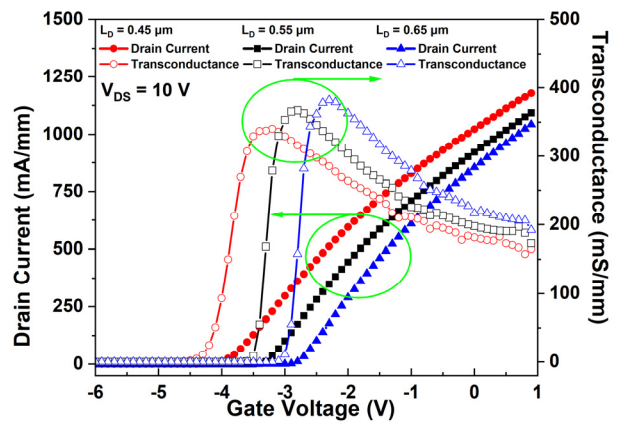


그림 5. Acceptor Trap 확산 길이(L_D)에 따른 $I_{DS}-V_{GS}$ 특성

표 1. Acceptor Trap 확산 길이(L_D)에 따른 2-DEG 밀도 및 DC 특성 (V_{th} , I_{dss} , G_m)

L_D [μm]	0.45	0.55	0.65
2-DEG ($10^{12} cm^{-2}$)	4.73	4.19	3.83
V_{th} (V)	-4.31	-3.50	-2.96
I_{dss} (mA/mm)	1022.4	921.3	854.4
G_m (mS/mm)	340.29	367.19	382.11

그림 6은 Acceptor Trap 확산 길이에 따른 $V_{DS} = 10V$ 에서의 I_{DS} 와 게이트 누설전류 ($I_{GS}-V_{GS}$) 특성을 로그 스케일로 나타낸 것이며 그림 7은 Off 상태에서의 에너지밴드 다이어그램을 나타낸 것이다.

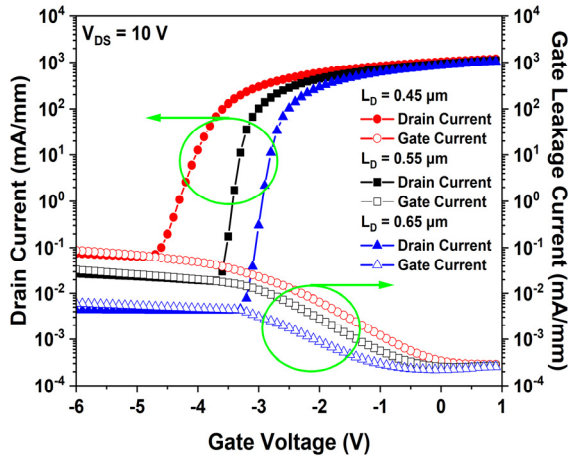


그림 6. Acceptor Trap 확산 길이(L_D)에 따른 I_{DS} 와 $I_{GS}-V_{GS}$ 특성

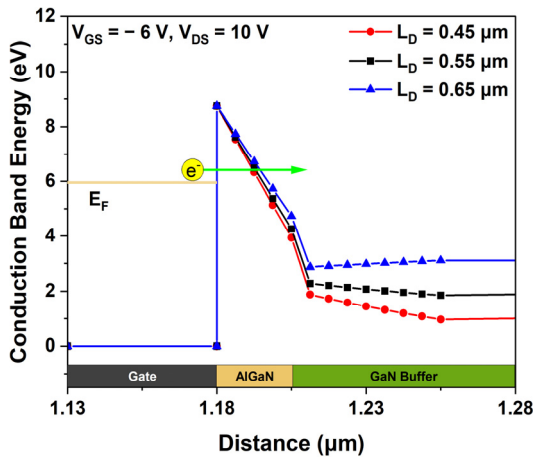


그림 7. Acceptor Trap 확산 길이(L_D)에 따른 에너지밴드 다이어그램

Acceptor Trap 확산 길이가 증가함에 따라 AlGaN Barrier와 GaN Buffer의 전도도가 상대적으로 위로 이동하여 AlGaN Barrier 내 에너지밴드 경사가 완만해진다. 따라서, Acceptor Trap 확산 길이의 증가로 게이트 전극에서 2-DEG 채널로의 터널링 발생 확률이 줄어들어 게이트 누설전류가 감소하는 경향을 보인다.

2.4 Acceptor Trap 확산 길이(L_D)에 따른 전류 붕괴

그림 8은 Acceptor Trap 확산 길이에 따른 Gate-lag Drain Current Transient(DCT)를 나타낸 것이다. Trap에 의한 전류 붕괴 현상만을 고려하기 위해 등은 조건 (300K)에서 스트레스 펄스 인가에 따른 I_{DS}/I_{DS0} (드레인 전류 감소율)을 비교·분석하였다.[8] I_{DS0} 는 스트레스 펄스 인가 전 드레인 전류를, I_{DS} 는 스트레스 펄스 인가 후 드레인 전류 감소분을 나타낸 것이다.

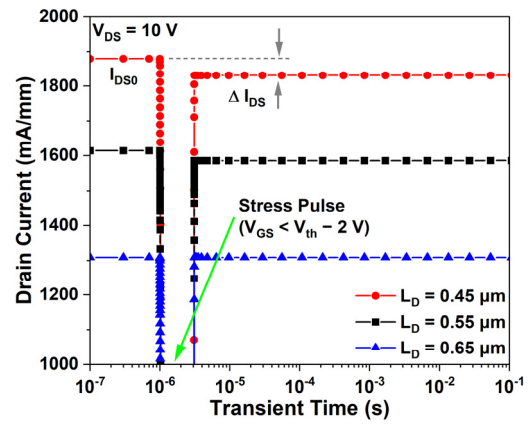


그림 8. Acceptor Trap 확산 길이(L_D)에 따른 Gate-lag DCT

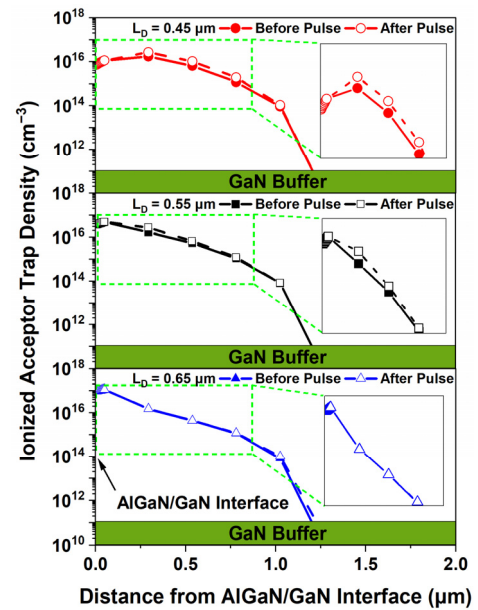


그림 9. 스트레스 펄스 인가 전후 GaN Buffer 내 이온화된 Acceptor Trap 밀도

그림 9는 스트레스 펄스 인가 전후 GaN Buffer 내 이온화된 Acceptor Trap 밀도 변화를 보여준다. 표 2는 스트레스 펄스 인가에 따른 Acceptor Trap 확산 길이별 I_{DS} 변화 및 감소율을 정리하여 나타낸 것이다. Acceptor Trap 확산 길이가 $0.45\mu\text{m}$ 에서 $0.65\mu\text{m}$ 로 증가함에 따라, 스트레스 펄스 인가 전후의 GaN Buffer 내 이온화된 Trap 밀도 변화가 줄어들었고, 이로 인해 2-DEG 밀도 변화도 감소하였다. 따라서 Acceptor Trap 확산 길이가 $0.65\mu\text{m}$ 인 경우 I_{DS}/I_{DS0} 가 0.001%로 스트레스 펄스에 따른 전류 붕괴가 완화된 것을 확인할 수 있다.

표 2. 스트레스 펄스에 따른 Acceptor Trap 확산 길이(L_D)별 I_{DS} 변화 및 감소율

L_D [μm]	0.45	0.55	0.65
I_{DS0} [mA/mm]	1879.66	1613.72	1308.95
I_{DS} [mA/mm]	48.66	28.45	0.01
I_{DS}/I_{DS0} [%]	2.658	1.795	0.001

III. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구는 GaN Buffer 내 Acceptor Trap 확산 길이 변화가 AlGaIn/GaN HEMT 소자의 DC 특성과 전류 붕괴에 미치는 영향을 TCAD 시뮬레이션을 통해 분석하였다. Acceptor Trap 확산 길이가 늘어날수록, AlGaIn/GaN 계면 부근 이온화된 Acceptor Trap 밀도가 증가하였다. 이에 따라, GaN Buffer에서의 전도대가 위로 이동하여 전자 분포가 좁아졌고, 2-DEG 밀도는 감소하였다. 그 결과, V_{th} 는 양의 방향으로 이동하고, I_{dss} 는 감소하며, G_m 은 증가하는 경향을 보였다. 또한, AlGaIn Barrier의 전도대의 경사가 완만해져 전자 터널링 확률이 낮아져 게이트 누설전류가 감소하였다.

전류 붕괴 시뮬레이션에서 GaN Buffer 내 Acceptor Trap 확산 길이가 늘어날수록 전류 붕괴가 완화된 것을 확인하였다. 이러한 결과는 GaN Buffer 내 Acceptor Trap 확산 길이 변화가 DC 특성뿐만 아니라 전류 붕괴로 인한 전류 감소율에도 지대한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

참고문헌

[1] Asif Khan, M., *et al.* "High electron mobility transistor based on a GaN $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

heterojunction." *Applied Physics Letters* 63.9 (1993): 1214-1215.

- [2] Ibbetson, James Paul, *et al.* "Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors." *Applied Physics Letters* 77.2 (2000): 250-252.
- [3] Silvestri, Marco, Michael J. Uren, and Martin Kuball. "Iron-induced deep-level acceptor center in GaN/AlGaIn high electron mobility transistors: Energy level and cross section." *Applied Physics Letters* 102.7 (2013).
- [4] Chen, Z., *et al.* "Growth of AlGaIn/GaN heterojunction field effect transistors on semi-insulating GaN using an AlGaIn interlayer." *Applied Physics Letters* 94.11 (2009).
- [5] Raja, P. Vigneshwara, Nandita DasGupta, and Amitava DasGupta. "Simulation of self-heating and bulk trapping effects on drain current static and transient characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs." *2018 4th IEEE International Conference on Emerging Electronics (ICEE)*. IEEE, 2018.
- [6] Tang, Chenjie, and Junxia Shi. "Influence of acceptor-like traps in the buffer on current collapse and leakage of E-mode AlGaIn/GaN MISHFETs." *Semiconductor science and technology* 28.11 (2013): 115011.
- [7] Silvaco, Inc. Atlas User's Manual, (2020)
- [8] Zhang, Wei, *et al.* "Influence of the interface acceptor-like traps on the transient response of AlGaIn/GaN HEMTs." *IEEE Electron Device Letters* 34.1 (2012): 45-47.