



Improvement of Cut-off Frequency and Breakdown Voltage Operation Characteristics of AlGaN/GaN HEMT Devices by Applying Various 1st Passivation Materials and Asymmetric Passivation Structure: A Simulation Study

Jae-Hun Lee, Chae-Yun Lim, Ji-Hun Kim and Hyun-Seok Kim
Division of Electronics and Electrical Engineering, Dongguk University-Seoul

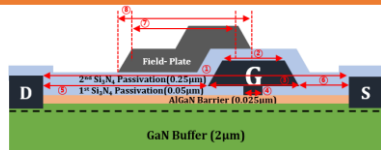


Introduction

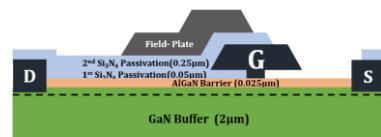
AlGaN/GaN high-electron-mobility transistors (HEMTs) are widely used in power devices due to their outstanding advantages such as high breakdown field and high electron saturation velocity. To guarantee the high-power and high-frequency operations of AlGaN/GaN HEMTs, it is essential to secure high breakdown voltage and high frequency characteristics. In this study, we simulated and analyzed the operational characteristics of 0.15 μm gate length AlGaN/GaN HEMT by adopting high-k materials as the 1st passivation layer. Also, in order to minimize the degradation of frequency characteristics, we suggested an asymmetric passivation of AlGaN/GaN HEMT, which helps to decrease the parasitic capacitances.

Results and Discussion

① Fabricated Planar-Gate AlGaN/GaN HEMT Structure and Mapping Results Based on Measured Data

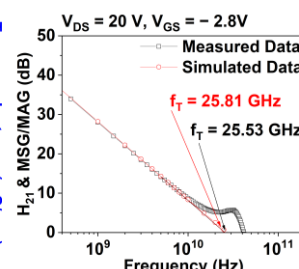
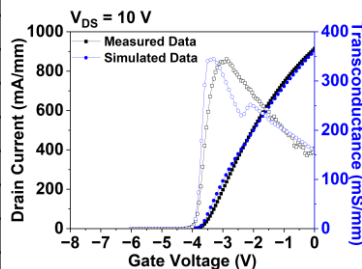


<FP: 1st Passivation Structure>



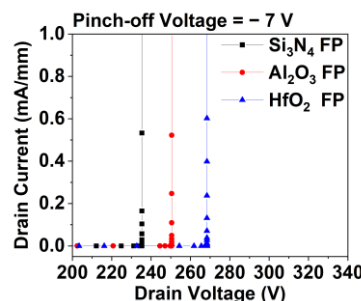
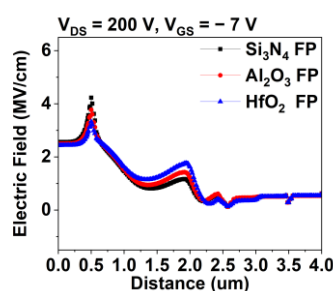
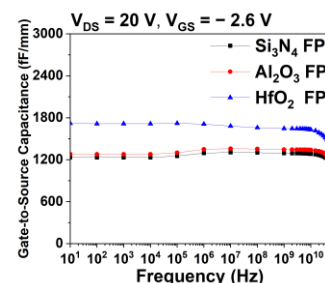
<ASP: Asymmetric Passivation Structure>

Structural Parameter	Value (μm)
① L-Source-Drain	3
② L-G.HEAD_TOP	0.8
③ L-G.HEAD_BOTTOM	1.0
④ L-G.FOOT	0.15
⑤ L-Gate-Drain	1.5
⑥ L-Gate-Source	0.5
⑦ L-FP.TOP	1.4
⑧ L-FP.BOTTOM	1.6



	Measured	Simulated	Error Rate
V_{th} (V)	-3.9	-3.9	0%
G_m (mS/mm)	339.38	344.4	0.07%
I_{dss} (mA/mm)	914.9	903.05	1.3%
f_T (GHz)	25.53	25.81	1.1%

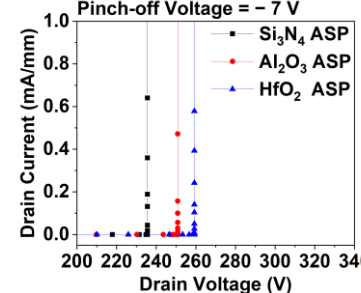
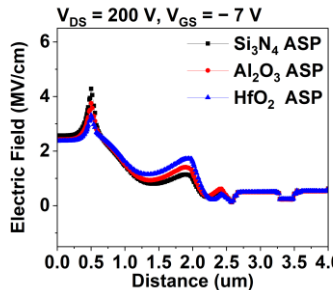
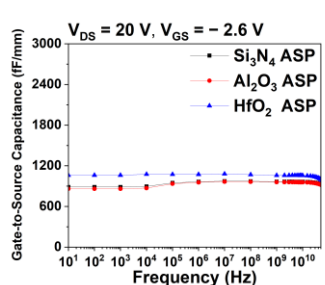
② Applying Various High-k Dielectric Materials in 1st Passivation Structure



<DC & RF Characteristics>

	I_{dss} (mA/mm)	G_m (mS/mm)	V_{th} (V)	V_{BD} (V)	f_T (GHz)
Si ₃ N ₄ FP	903.05	344.4	-3.9	235.34	25.81
Al ₂ O ₃ FP	922.52	356.15	-3.9	250.09	24.89
HfO ₂ FP	906.4	348.05	-3.9	268.36	20.92

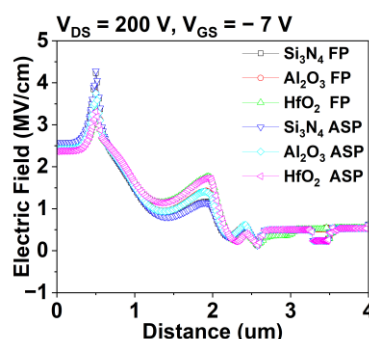
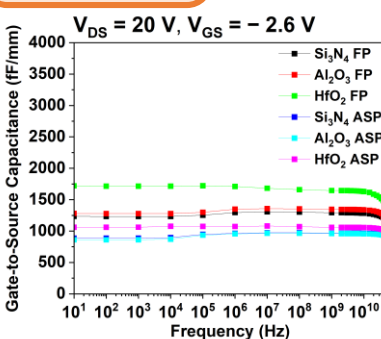
③ Applying Asymmetric Passivation Structure



<DC & RF Characteristics>

	I_{dss} (mA/mm)	G_m (mS/mm)	V_{th} (V)	V_{BD} (V)	f_T (GHz)
Si ₃ N ₄ ASP	899.85	363.41	-3.9	235.56	32.11
Al ₂ O ₃ ASP	922.53	368.37	-3.9	250.09	31.91
HfO ₂ ASP	909.13	367.01	-3.9	259.25	30.09

④ Summary



	Si ₃ N ₄ FP	Al ₂ O ₃ FP	HfO ₂ FP	Si ₃ N ₄ ASP	Al ₂ O ₃ ASP	HfO ₂ ASP
V_{BD} (V)	235.34	250.09	268.36	235.56	250.09	259.25
f_T (GHz)	25.81	24.39	20.92	32.11	31.91	30.09
J-FOM (THz-V)	6.07	6.09	5.61	7.56	7.98	7.8

❖ J-FOM: Johnson's figure-of-merit ($V_{BD} \times f_T$)

Conclusion

In this study, we analyzed the AlGaN/GaN HEMT structure to obtain superior DC and RF characteristics. Applying high-k materials to the 1st passivation layer enhanced the breakdown voltage but degradation of cut-off frequency occurred due to the high dielectric constant. In order to compensate for the degraded RF characteristics, we employed an asymmetric passivation by removing the passivation layer upon the gate-source region, which decreased C_{gs} and enhanced RF characteristics. We confirmed that the asymmetric passivation achieved high-frequency characteristics while maintaining DC characteristics, including V_{BD} . In particular, the J-FOM of the Al₂O₃ asymmetric passivation exhibited the highest value of 7.98 THz-V among all structures. Thus, simulation results confirmed asymmetric passivation AlGaN/GaN HEMT with high-k dielectric to be a promising candidate for high-power and high-frequency operations.

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 the Institute of Civil Military Technology Cooperation, funded by the Defense Acquisition Program Administration (No. 22-CM-15).

1st Passivation

Asymmetric Passivation

AlGaIn/GaN HEMT

*이재훈, 임채윤, 김지훈, 김현석[©]

동국대학교 전자전기공학부

e-mail : *leehoonjae9646@gmail.com, cylk9799@gmail.com,*
jihunk0315@gmail.com, hyunseokk@dongguk.edu[©]

Improvement of Cut-off Frequency and Breakdown Voltage Operation
Characteristics of AlGaIn/GaN HEMT Devices by Applying Various 1st
Passivation Materials and Asymmetric Passivation Structure: A Simulation
Study

*Jae-Hun Lee, Chae-Yun Lim, Ji-Hun Kim, Hyun-Seok Kim[©]

Division of Electronics and Electrical Engineering

Dongguk University-Seoul

Abstract

In this study, we investigated the AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistor (HEMT) by altering the material of the 1st passivation layer. With variations in the 1st passivation material, the breakdown voltage increased. This was attributed to the high-k dielectric material evenly dispersing the electric field. However, a decrease in cut-off frequency (f_T) was observed as an issue. To overcome the degradation of f_T in the high-k 1st passivation layer, this study proposes an approach by employing an asymmetric passivation structure. The passivation layer near the gate-to-source region was eliminated, reducing

gate-to-source capacitance, and improving f_T . We suggest an optimal structure by comparing the product of f_T and breakdown voltage, and consequently deriving the highest Johnson's figure of merit, which is a measure suitable for high frequency power applications. This study aids in designing AlGaIn/GaN HEMT that operates reliably in high voltage conditions.

I. 서론

AlGaIn/GaN 기반 고전자 이동도 트랜지스터 (HEMT)는 고온에서의 고출력 및 고주파 응용에 뛰어난 후보이다. 이는 넓은 밴드갭, 고폭화 전자 이동 속도 (2.2×10^7 cm/s), 그리고 큰 전도대역 오프셋과 높은 압전 특성을 가진 AlGaIn/GaN 이종구조의 존재로 인해 발생한다.[1,2]

AlGaIn/GaN HEMT는 GaN과 AlGaIn이라는 비대칭형 Wurtzite 결정 구조로 인해 자발 분극이 생기며

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

GaN과 AlGaN의 격자 상수 차이로 인해 압전 분극이 발생한다. 이러한 현상은 이차원 전자가스 (2-DEG) 층의 형성으로 이어지며, 전자들이 2-DEG 층에 포획되어 전도 채널을 형성한다. 이러한 2-DEG 층의 존재로 AlGaN/GaN HEMT 소자는 뛰어난 전기적 특성을 나타내는데, 높은 전하이동도와 높은 전자 포화 속도를 포함한다.[3,4]

AlGaN/GaN HEMT와 같은 전력 반도체 소자를 고전압·고주파 영역에서 안정적으로 동작하기 위해서는 항복전압, 차단주파수 (f_T) 특성의 향상이 필수적이다.

본 연구에서는 다양한 1st passivation 물질을 적용하여 동작 특성을 비교·분석하였다. 실제 공정을 통해 제작된 AlGaN/GaN HEMT 소자의 측정 데이터를 기반으로 Technology Computer-Aided Design (TCAD) 시뮬레이션 툴을 사용하여 AlGaN/GaN HEMT 소자의 I-V 특성, 항복전압, f_T 를 비교·분석함으로써 시뮬레이션의 신뢰성을 확보하였다. 또한, 고주파 영역에서 빠른 스위칭 특성을 가진 소자를 얻기 위해 Asymmetric passivation 구조를 적용하여 동작 특성을 비교·분석하였다. 본 연구를 통해 Johnson's figure of merit (J-FOM) 특성을 비교·분석하여 우수한 특성을 보이는 최적의 구조를 제시하고자 한다.[5]

II. 본론

2.1 시뮬레이션 소자 구조 모델링

AlGaN/GaN HEMT 소자의 구조 모델링을 위해 실제 공정을 통해 제작된 AlGaN/GaN HEMT 실측 소자의 구조 파라미터를 분석하였다. 그림 1은 본 연구에서 제시한 소자의 2D 단면 모식도이다.

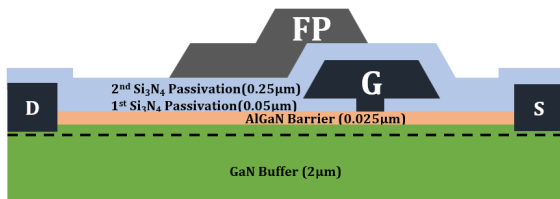


그림 1. AlGaN/GaN HEMT 소자 단면 모식도

AlGaN/GaN HEMT 소자의 제작에서는 0.15 μm 게이트 길이와 SiC 기판을 사용하였다. 이 기판 위에는 0.2 μm 두께의 GaN nucleation layer, 2 μm 두께의 GaN buffer layer, 그리고 25nm 두께의 AlGaN barrier layer를 순서대로 적용하여 에피층을 형성하였다. 또한, Si₃N₄ passivation layer는 0.05 μm 두께의 1st passivation layer와 0.25 μm 두께의 2nd passivation layer로 이루어져 있다. 필드플레이트는 0.44 μm 두께로

소스와 연결되어 있으며, 게이트 전극의 중심과 드레인 전극 사이의 거리는 2.0 μm , 게이트 전극의 중심과 소스 전극 사이의 거리는 1.0 μm , 드레인 전극과 소스 전극 사이의 거리는 3.0 μm 이다.

2.2 시뮬레이션 신뢰성 확보

시뮬레이션의 신뢰성 확보를 위해 실제 공정을 통해 제작된 HEMT 소자의 실측 데이터와 시뮬레이션 데이터의 I_{DS} - V_{GS} , f_T 특성을 비교·분석하였다.

문턱전압과 전압이득, 전자전하도, 역선택 트랩 도핑 농도, 밴드갭 에너지, 유전상수, 전자 포화속도 등의 시뮬레이션 파라미터와 고전자/저전자 이동도 모델 등을 적용하여 소자의 실측 데이터와 시뮬레이션 데이터와의 I_{DSS} (드레인 전류 $V_{GS} = 0V$), 최대 트랜스컨덕턴스 (G_m), 문턱전압 (V_{th}) 특성을 일치시켰다. I_{DSS} 의 경우 1.3%, G_m 의 경우 0.067%, V_{th} 의 경우 0%의 오차를 보였다. f_T 의 경우 1.1%의 오차율로 일치시켜 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 2, 3은 실측 데이터와 시뮬레이션 데이터와의 I_{DS} - V_{GS} , f_T 특성을 비교하여 나타낸 그래프이다.

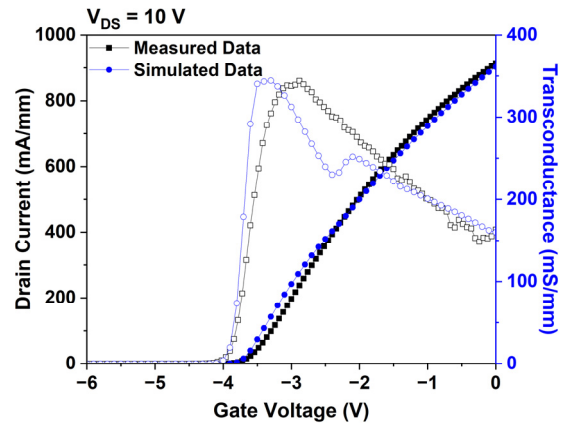


그림 2. AlGaN/GaN HEMT 소자의 실측 및 시뮬레이션 데이터 I_{DS} - V_{GS} 특성

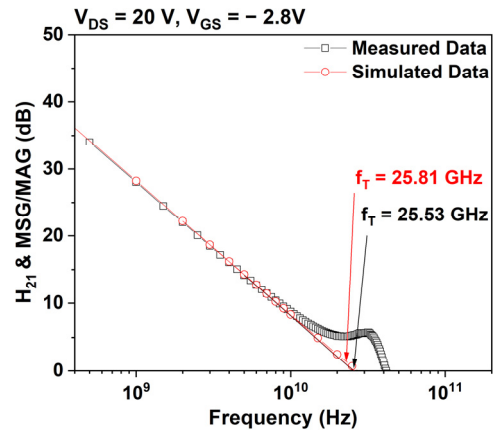


그림 3. AlGaN/GaN HEMT 소자의 실측 및 시뮬레이션 데이터 f_T 특성

2.3 1st passivation layer 물질 변화에 따른 동작 특성

본 시뮬레이션에서는 1st passivation (FP) layer 물질에 따라 Si₃N₄ FP 구조, Al₂O₃ FP 구조, HfO₂ FP 구조라고 명명하였다. FP layer의 물질 변화에 따른 AlGaIn/GaN HEMT 소자의 I_{DS}-V_{GS} Transfer 특성 (I_{dss}, G_m, V_{th})을 비교 · 분석하기 위해 V_{DS} = 10V 인 조건에서 게이트 전압에 따른 드레인 전류 특성을 비교하였다. I_{DS}-V_{GS} 특성을 그림 4에 나타내었다.

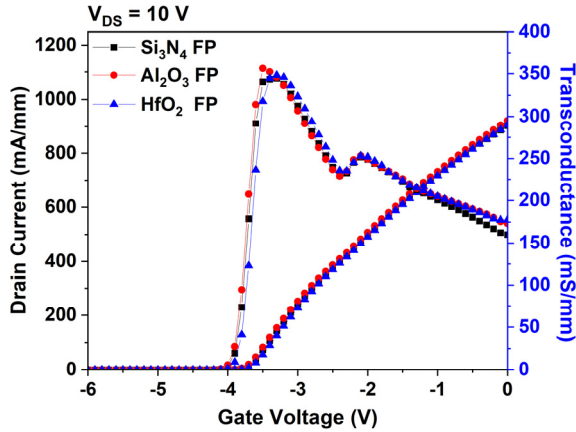


그림 4. 1st passivation (FP) layer의 물질 변화에 따른 I_{DS}-V_{GS} 특성

표 1과 같이 FP에 Al₂O₃, HfO₂를 적용함에 따라 I_{dss}와 G_m 값은 Si₃N₄ FP 구조와 비교하였을 때 거의 변화가 없었다. V_{th}의 경우 3가지 구조 모두 -3.9V로 일정함을 확인하였다.

표 1. FP 물질 변화에 따른 I_{DS}-V_{GS} 특성 (V_{DS} = 10V)

	Si ₃ N ₄ FP	Al ₂ O ₃ FP	HfO ₂ FP
I _{dss} (mA/mm)	903.05	922.52	906.4
G _m (mS/mm)	344.4	356.15	348.05
V _{th} (V)	-3.9	-3.9	-3.9

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (1)$$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} \approx \frac{g_m}{2\pi C_{gs}} \quad (2)$$

표 2는 Al₂O₃, HfO₂ FP layer 적용에 따른 V_{DS} = 20V, V_{GS} = -2.8V 일 때의 C_{gs} 및 f_T를 비교 · 분석하였다. Al₂O₃, HfO₂ FP layer를 적용함에 따라, 유전상수의 증가 Si₃N₄ (-7.5), Al₂O₃ (-9.3), HfO₂ (-25)로 인

해 C_{gs} 값이 식(1)에 따라 증가하였다. C_{gs}의 증가로 식(2)에 의해 f_T가 감소함을 확인하였다.[6]

표 2. FP 물질 변화에 따른 f_T 특성

	Si ₃ N ₄ FP	Al ₂ O ₃ FP	HfO ₂ FP
f _T (GHz)	25.81	24.39	20.92

그림 5는 Al₂O₃, HfO₂ FP layer 적용에 따른 항복전압 특성을 비교한 그래프를 나타낸다. Al₂O₃, HfO₂ FP layer 구조에서 유전상수의 증가로 인해 Electric field 분산이 잘 되어 항복전압이 높아진다. Pinch-off voltage = -7V 에서의 항복전압은 Si₃N₄ FP 구조에서 235.34V, Al₂O₃ FP 구조에서 250.09V, HfO₂ FP 구조에서 268.36V 로 증가함을 확인하였다.[7]

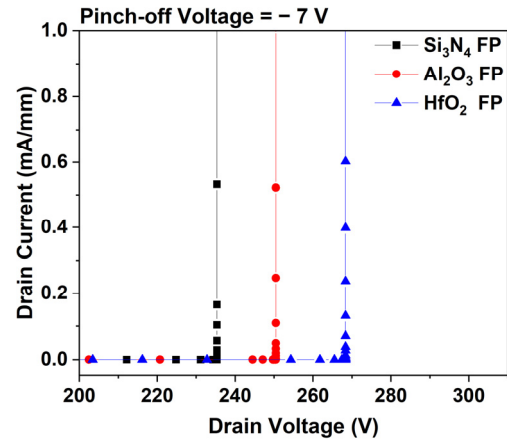


그림 5. FP layer 물질 (Si₃N₄, Al₂O₃, HfO₂) 변화에 따른 항복전압 특성

2.4 Asymmetric passivation 구조 적용에 따른 동작 특성

그림 6은 AlGaIn/GaN HEMT 소자의 소스에서 게이트 방향으로의 Passivation layer를 제거한 소자 단면 모식도이다. Asymmetric passivation (ASP) 구조 적용과 FP 물질에 따라 Si₃N₄ ASP 구조, Al₂O₃ ASP 구조, HfO₂ ASP 구조라고 명명하였다.

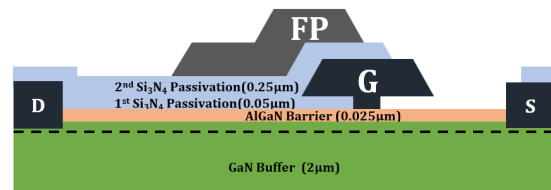


그림 6. Asymmetric passivation (ASP) 구조 적용 소자 단면 모식도

$I_{DS}-V_{GS}$ Transfer 특성 (I_{dss} , G_m , V_{th})을 비교·분석하기 위해 $V_{DS} = 10V$ 인 조건에서 게이트 전압에 따른 드레인 전류 특성을 그림 7에 비교하였다. 표 3과 같이 ASP 구조 적용에 따른 I_{dss} 와 G_m 값은 Si_3N_4 , Al_2O_3 , HfO_2 물질 모두 거의 변화가 없었다. V_{th} 의 경우 $-3.9V$ 로 일정하였다.

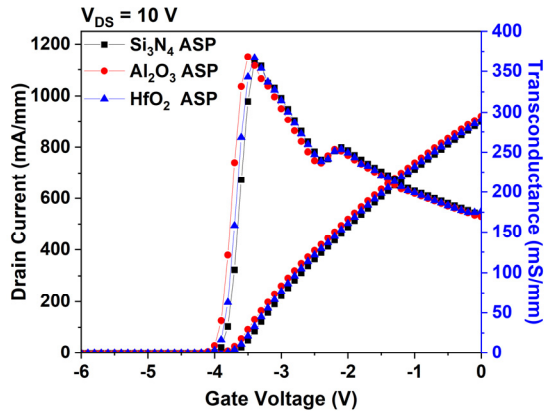


그림 7. ASP 구조 적용에 따른 $I_{DS}-V_{GS}$ 특성

표 3. ASP 구조 적용에 따른 $I_{DS}-V_{GS}$ 특성 ($V_{DS} = 10V$)

	Si_3N_4 ASP	Al_2O_3 ASP	HfO_2 ASP
I_{dss} (mA/mm)	899.85	922.53	909.13
G_m (mS/mm)	363.41	368.37	367.01
V_{th} (V)	-3.9	-3.9	-3.9

ASP 적용에 따른 항복전압 특성 비교를 그림 8에 나타내었다. Pinch-off voltage = $-7V$ 에서의 항복전압은 Si_3N_4 ASP 구조에서 235.56V, Al_2O_3 ASP 구조에서 250.09V, HfO_2 ASP 구조에서 259.25V로 증가함을 확인하였다.

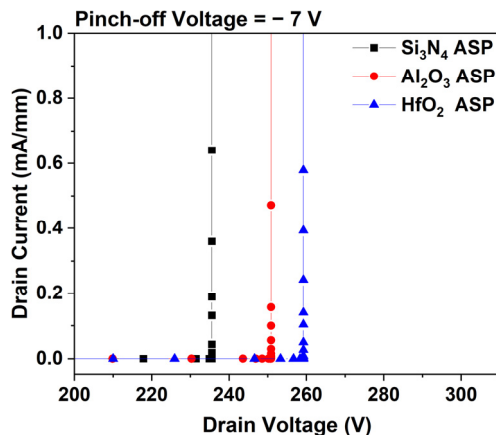


그림 8. ASP 구조 적용에 따른 항복전압 특성

표 4는 ASP 구조 적용에 따른 f_T 특성을 나타내었다. Si_3N_4 ASP 구조에서 32.11 GHz, Al_2O_3 ASP 구조에서 31.91 GHz, HfO_2 ASP 구조에서 30.09 GHz로 게이트-소스 방향의 1st passivation layer가 존재했을 때보다 유전율의 감소로 인해 C_{gs} 값이 감소하여 f_T 가 향상됨을 확인하였다.[8]

표 4. ASP 구조 적용에 따른 f_T 특성

	Si_3N_4 ASP	Al_2O_3 ASP	HfO_2 ASP
f_T (GHz)	32.11	31.91	30.09

2.5 AlGaN/GaN HEMT 소자의 J-FOM 성능 지표

FP 물질 변화 및 ASP 구조 적용에 따른 AlGaN/GaN HEMT 소자의 동작특성을 J-FOM 지표를 기반으로 비교하였다. 고전력 마이크로파 장치에는 높은 J-FOM이 요구된다. 본 연구에서 OFF 상태의 높은 항복전압 (V_{BD}) 값과 동시에 f_T 값의 저하를 방지하기 위하여 J-FOM은 소자들의 동작특성을 비교하기에 최적의 지표라고 볼 수 있다.

FP 층에 고유전율 물질을 적용함에 따라 항복전압은 개선되었으나, C_{gs} 값의 증가로 인한 주파수 손실은 컸다. 표 5를 보면 J-FOM 값이 Si_3N_4 FP, Al_2O_3 FP, HfO_2 FP 구조에서 6.07, 5.75, 5.61 THz-V로 감소함을 확인하였다. 차단주파수 손실을 막기 위해 도입한 ASP 구조의 J-FOM 값을 비교해 보면 Si_3N_4 ASP, Al_2O_3 ASP, HfO_2 ASP 구조에서 7.56, 7.98, 7.8 THz-V로 각각 향상되었음을 확인하였다. 고전압 영역에서 동작하기 위하여 Al_2O_3 ASP 구조가 가장 적합함을 확인할 수 있다.

표 5. AlGaN/GaN HEMT 소자의 J-FOM 성능 지표

	Si_3N_4 FP	Si_3N_4 ASP	Al_2O_3 FP	Al_2O_3 ASP	HfO_2 FP	HfO_2 ASP
V_{BD} (V)	235.34	235.56	250.48	250.09	268.36	259.25
f_T (GHz)	25.81	32.11	24.39	31.91	20.92	30.09
J-FOM (THz-V)	6.07	7.56	5.75	7.98	5.61	7.8

III. 구현

정확한 시뮬레이션을 위하여 다양한 파라미터 및 모

델 등을 설정하였다. 본 시뮬레이션에 사용한 Mobility 모델은 Low field에서 Farahmand Modified Caughey Thomas (FMCT) 모델, High field에서 GANSAT mobility 모델을 각각 적용하였다. 위의 두 Mobility 모델은 소자의 격자 온도와 내부 전계에 따른 전자이동도를 계산하여 열적 특성을 반영하도록 하였다. 정밀한 열적 특성 설계를 위하여 Generation·Recombination heat, Joule heat, Peltier and Thomson heat, TCON.POWER 모델을 적용하였다. 추가적으로 POLARIZATION 모델을 사용하여 AlGaIn/GaN 계면에서의 자발 분극 현상과 압전 분극 현상을 구현하였다[9].

IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 TCAD 시뮬레이션을 통해 최적의 J-FOM 값을 나타내는 AlGaIn/GaN HEMT 소자 구조를 비교·분석하였다. 고유전율의 1st passivation layer를 적용함에 따라 항복전압은 증가하였고 차단주파수는 감소하였다. Asymmetric passivation 구조를 적용하여 항복전압은 거의 유지하면서 동시에 차단주파수 값을 향상시켰다. 이는 고유전율을 갖는 유전층을 도입하여 항복전압의 이득을 보았던 구조에서 Trade-off 관계였던 RF 특성의 감소를 극복해내는 구조임을 확인하였다. Al₂O₃ 또는 HfO₂와 같은 고유전율 물질과 함께 Asymmetric passivation 구조를 적용하여 고전압·고주파 영역에서 안정적 동작 특성이 요구되는 다양한 분야에서 이용될 것이라 예상된다.

참고문헌

- [1] Zhang, N-Q, et al. (2000). "High breakdown GaN HEMT with overlapping gate structure." IEEE Electron Device Letters, 21(9), 421-423.
- [2] Jones, E. A, Wang, F. F, & Costinett, D. (2016). Review of commercial GaN power devices and GaN-based converter design challenges. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 4(3), 707-719.
- [3] Udabe, A, Baraia-Etxaburu, I, & Garrido, D. (2023). Gallium nitride power devices: A state of the art review. IEEE Access.
- [4] Mishra, Umesh K., Primit Parikh, and Yi-Feng Wu. (2002). "AlGaIn/GaN HEMTs—an overview of device operation and applications." Proceedings of the IEEE, 90(6), 1022-1031.
- [5] Arulkumaran, S. and Ng, G. I. and Vicknesh, S. (2013). Enhanced Breakdown Voltage With High Johnson's Figure-of-Merit in 0.3 μ m T-gate AlGaIn/GaN HEMTs on Silicon by (NH₄)₂S_x Treatment. IEEE Electron Device Letters, 34(11), 1364-1366
- [6] Liu, X., Qin, J, Chen, J, Chen, J, & Wang, H. (2023). Novel Stacked Passivation Structure for AlGaIn/GaN HEMTs on Silicon With High Johnson's Figures of Merit. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 11, 130-134.
- [7] Choi, J. H, Kang, W. S, Kim, D. H, Kim, J. H, Lee, J. H, Kim, K. Y & Kim, H. S. (2023). Enhanced operational characteristics attained by applying HfO₂ as passivation in AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors: A simulation study. Micromachines, 14(6), 1101.
- [8] Choi, J. H, Kim, D. H, Lee, S. J, Kim, J. H, Cho, Y. A, Min, B. G. & Kim, H. S. (2024). Improved RF Performances by Applying Asymmetric Passivation and Air-Bridged Field Plate in AlGaIn/GaN HEMTs With Reliability-Based Simulation. IEEE Transactions on Electron Devices, 71(4), 468-475
- [9] I. Silvaco, Atlas User's Manual, (2016)