

TCAD 기반 GaN/AlGaIn D-Mode 및 Recessed-Gate E-Mode HEMT 분석

Analysis of GaN/AlGaIn D-Mode and Recessed-Gate E-Mode HEMTs Based on TCAD Simulation

Researcher 이진호, 장한나

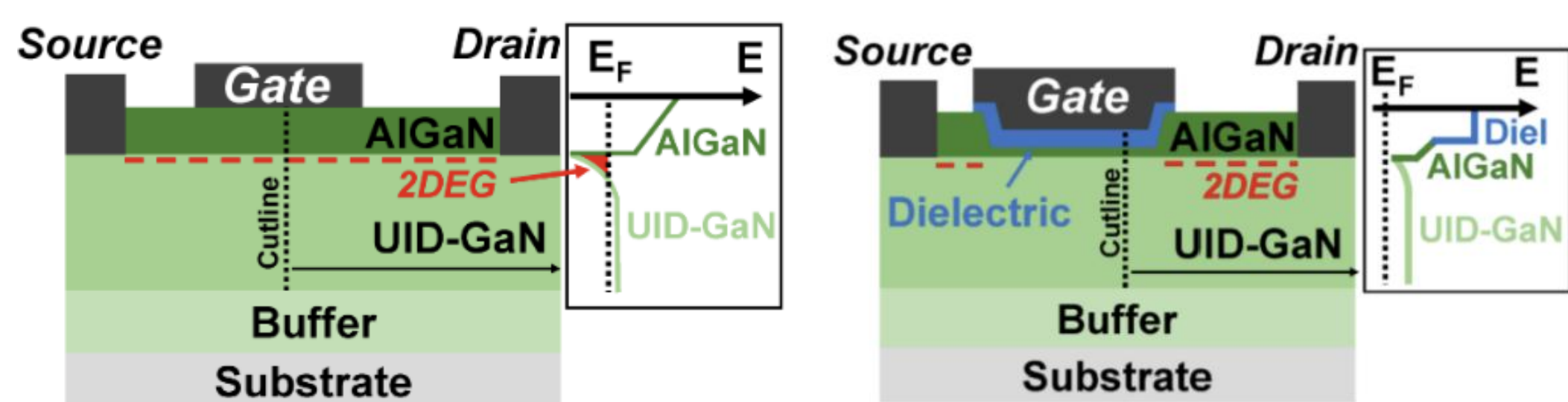
Professor 김정현



ABSTRACT

GaN/AlGaIn HEMT는 넓은 밴드갭과 높은 전계 내성을 기반으로 고전력·고주파 응용에서 핵심 소자로 활용되지만, 자연적으로 형성되는 2DEG로 인해 0V에서도 전류가 흐르는 D-mode 특성을 보이며 전력 시스템의 안전성 확보에 한계가 존재한다.

이를 극복하기 위한 Recessed-Gate 방식은 AlGaIn 장벽층을 부분적으로 식각하여 2DEG 밀도를 제어함으로써 안정적인 E-mode 동작을 구현할 수 있는 효과적인 접근법으로 평가된다. 본 연구는 TCAD 시뮬레이션을 통해 기존 D-mode GaN/AlGaIn HEMT와 Recessed-Gate 기반 E-mode HEMT의 구조적 차이가 문턱전압, 밴드 구성, 전기적 특성에 미치는 영향을 비교·분석하여, E-mode 동작 구현의 물리적 메커니즘과 소자 설계 최적화 방향을 제시한다.



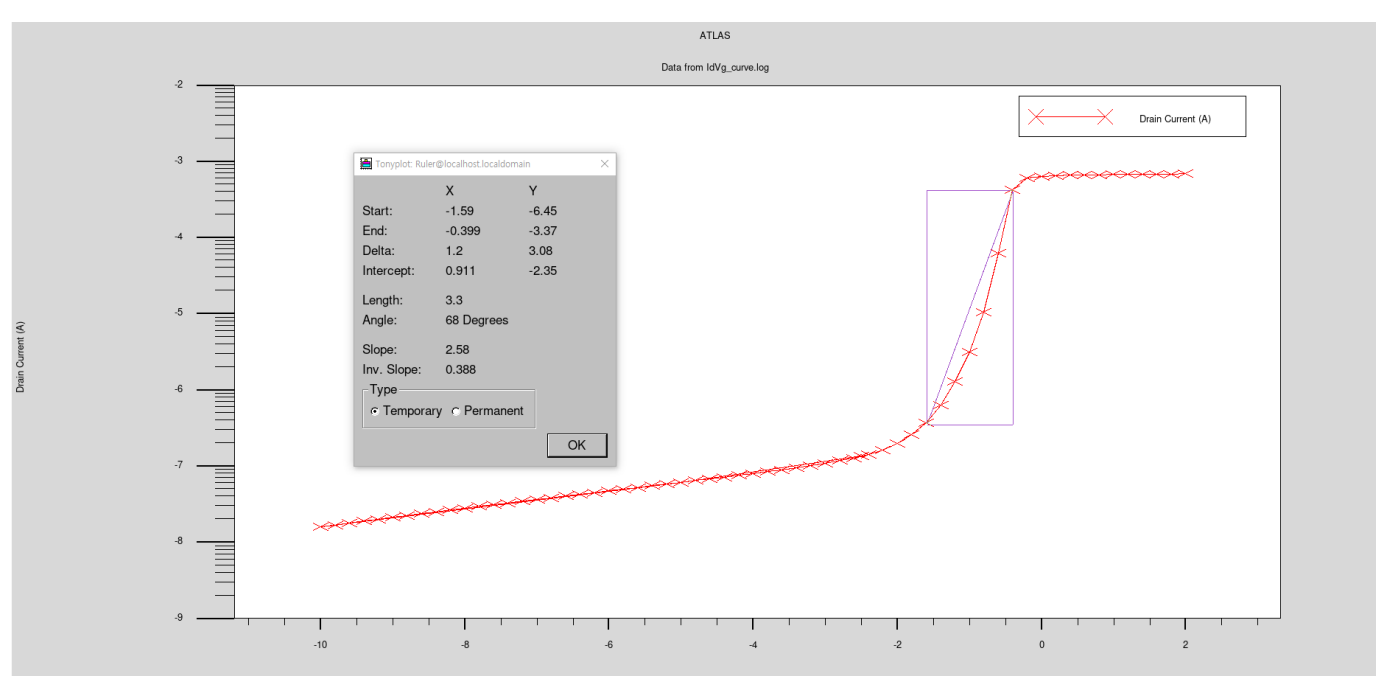
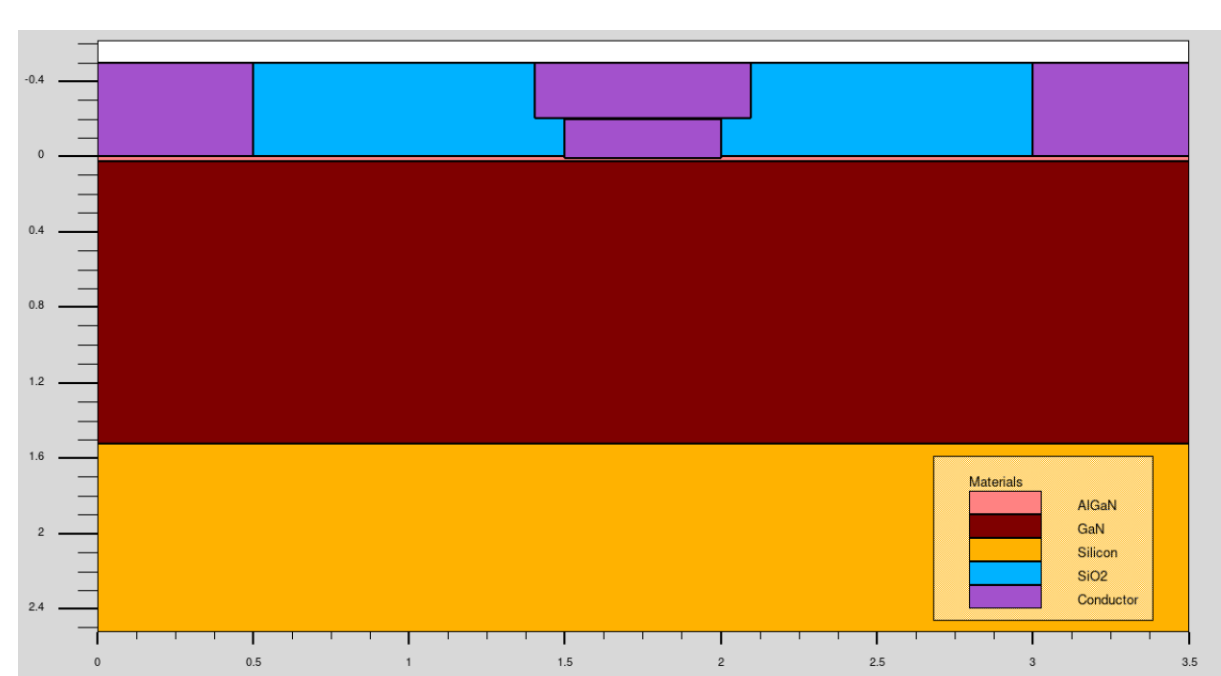
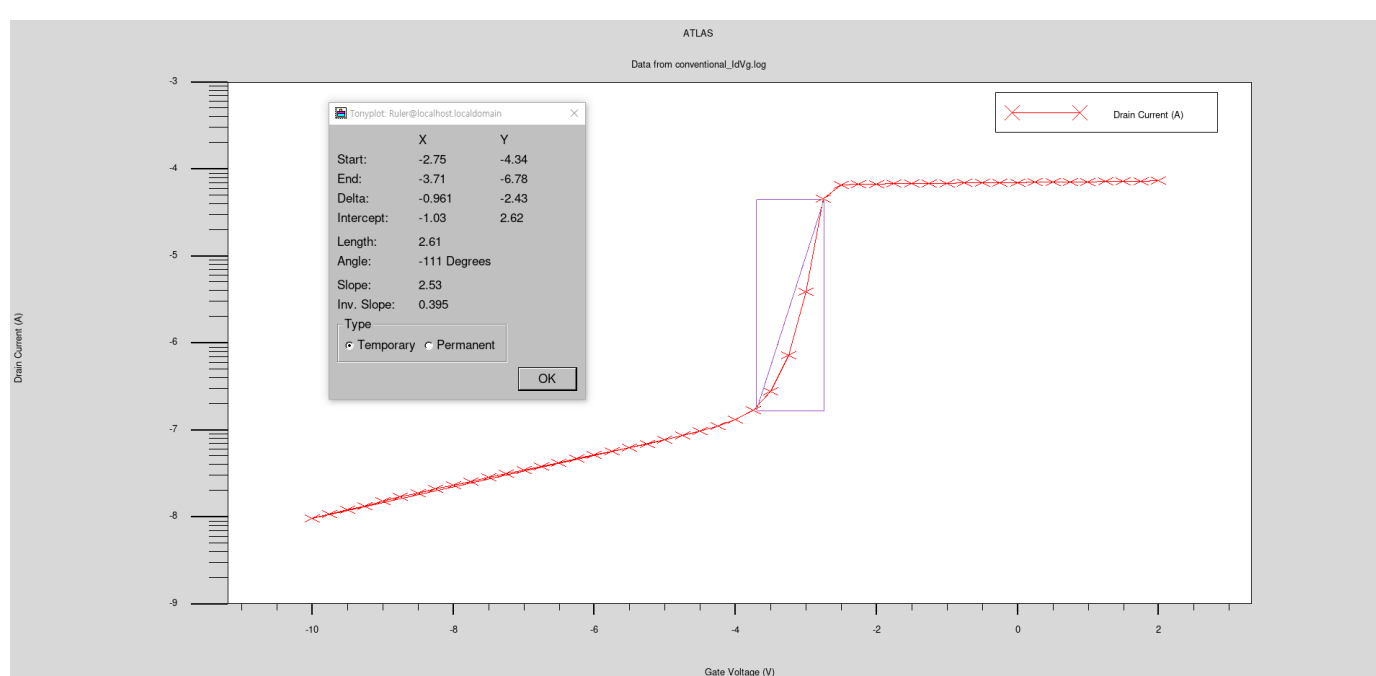
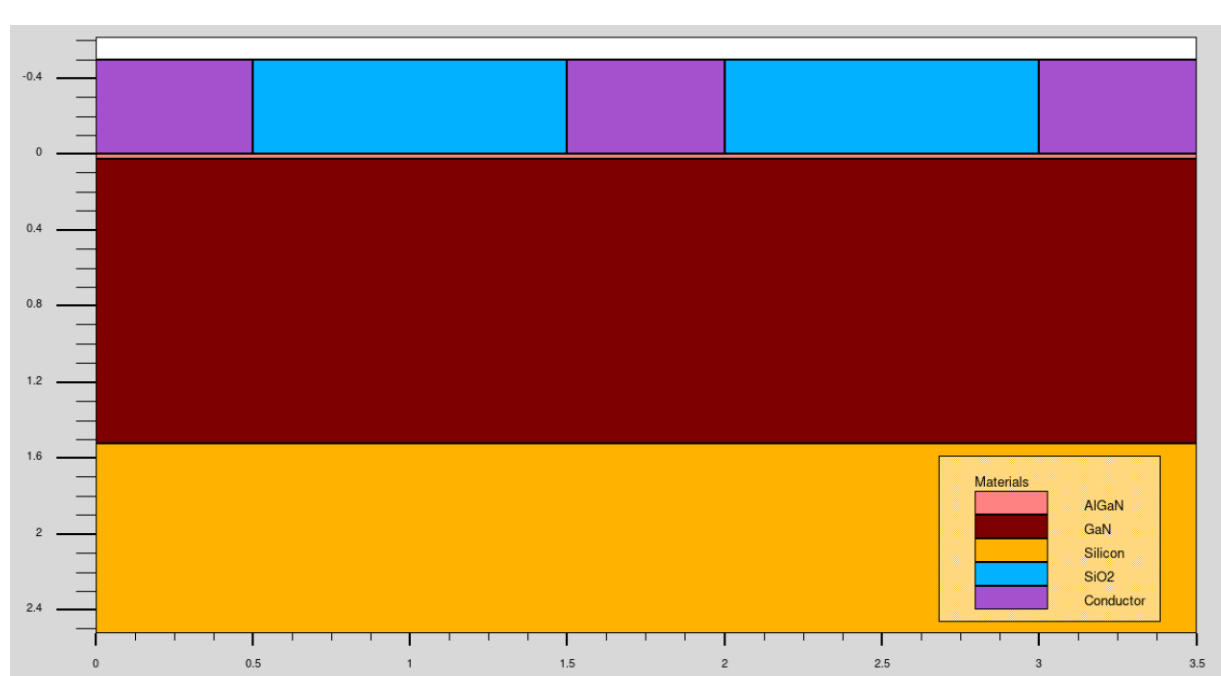
OBJECTIVES

본 연구는 TCAD 시뮬레이션을 활용하여 GaN/AlGaIn 기반 D-Mode HEMT와 Recessed-Gate E-Mode HEMT의 구조적 차이가 전기적 특성에 미치는 영향을 비교·분석하는 데 있다. 이를 위해 두 소자의 단면 구조를 동일한 조건에서 모델링하고, Recess 공정 적용했을 때 나타나는 문턱전압(V_{th}) 변화와 I-V 특성 차이를 정량적으로 평가하였다. 특히 Recessed-Gate 도입에 따른 전류 차단 능력, 문턱전압 양(+) 방향 이동, 온·오프 특성 개선 여부를 중심으로 분석하여, D-Mode 대비 E-Mode 구조의 전기적 동작 특성을 분석하고자 한다.



METHODOLOGY

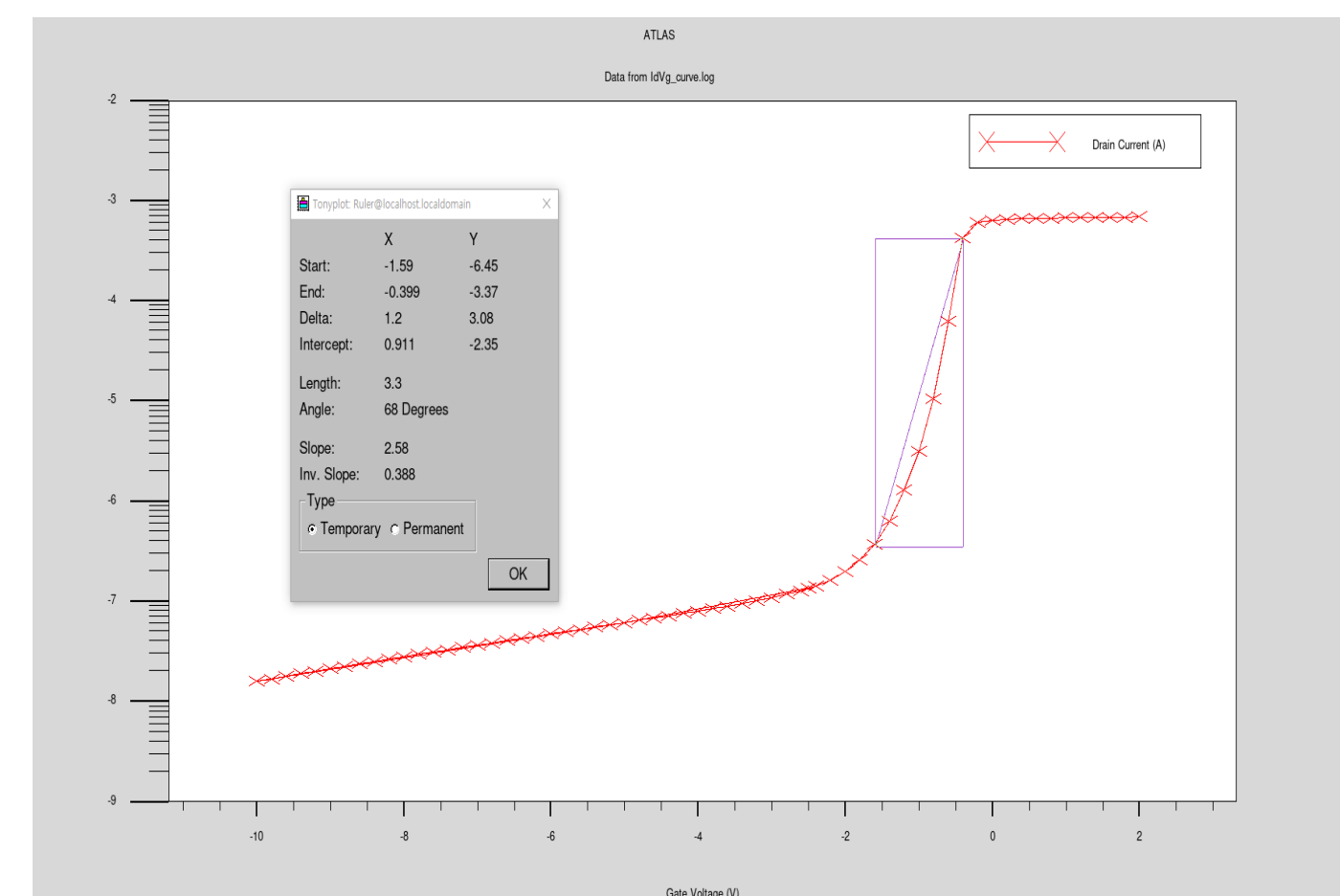
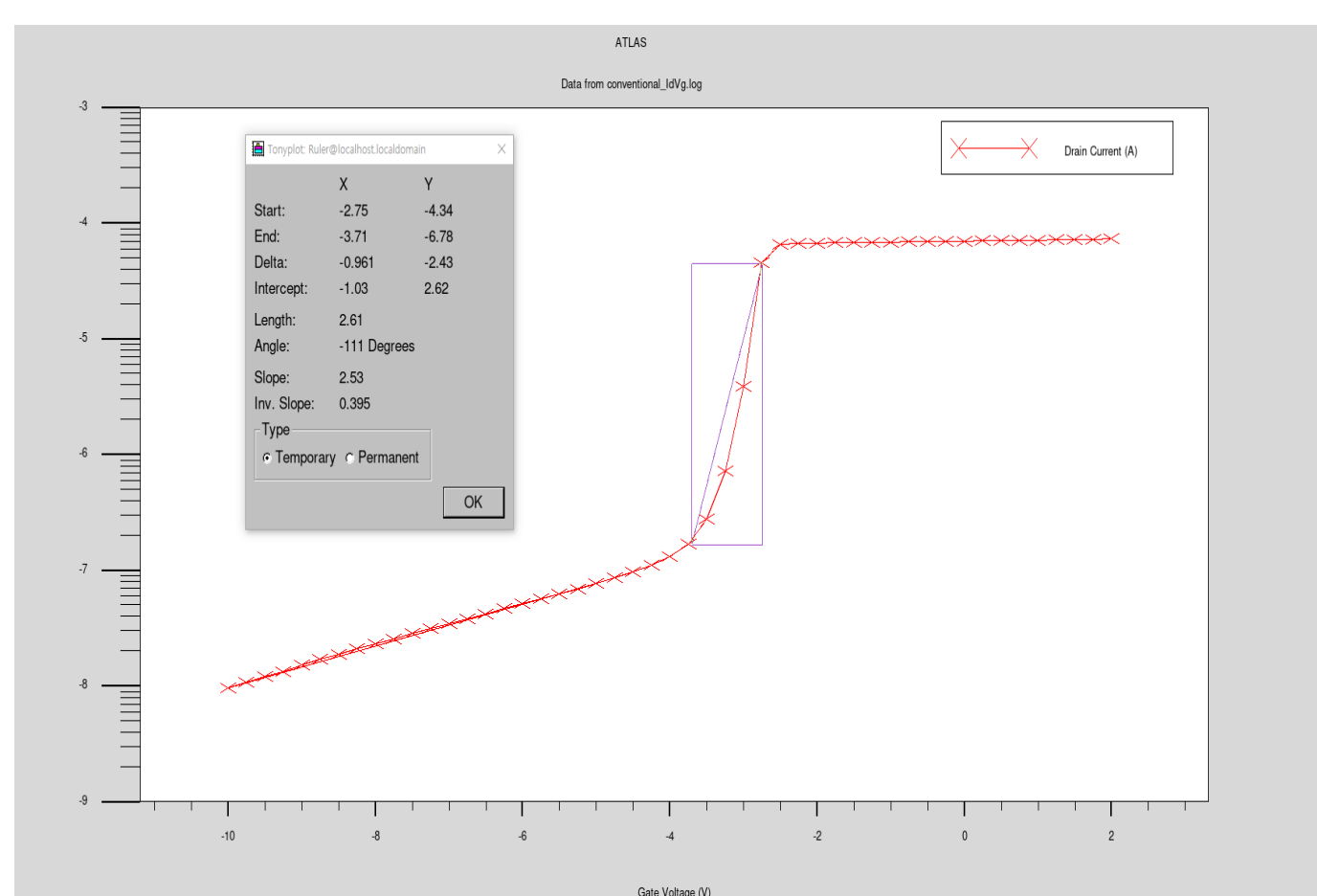
GaN/AlGaIn 이종접합 기반의 기본 D-mode HEMT 구조를 ATLAS에서 구축하고, 동일한 두께와 기판 조건을 유지한 상태에서 gate 아래 AlGaIn barrier를 선택적으로 식각한 recessed-gate E-mode 구조를 설계하였다.



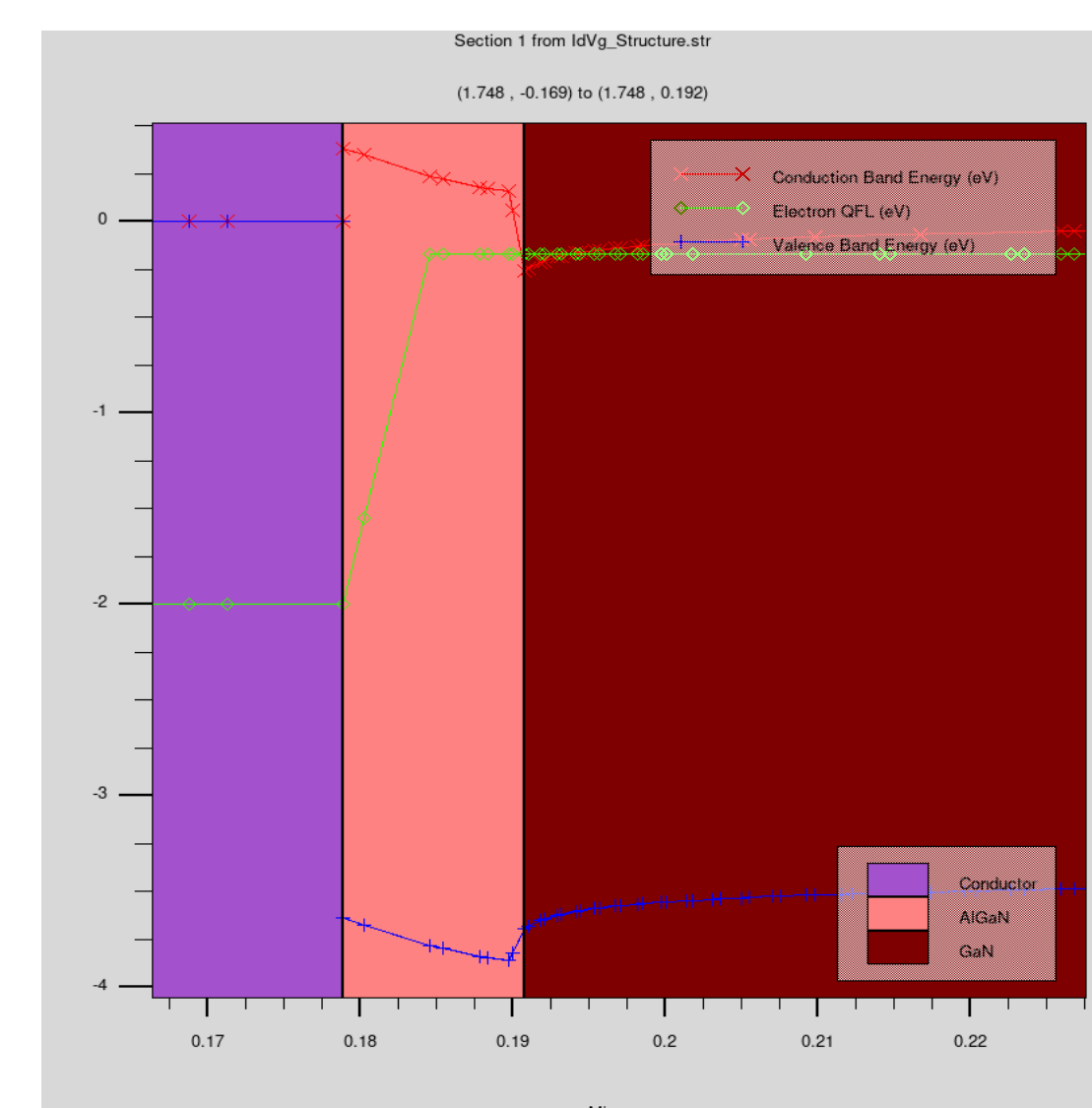
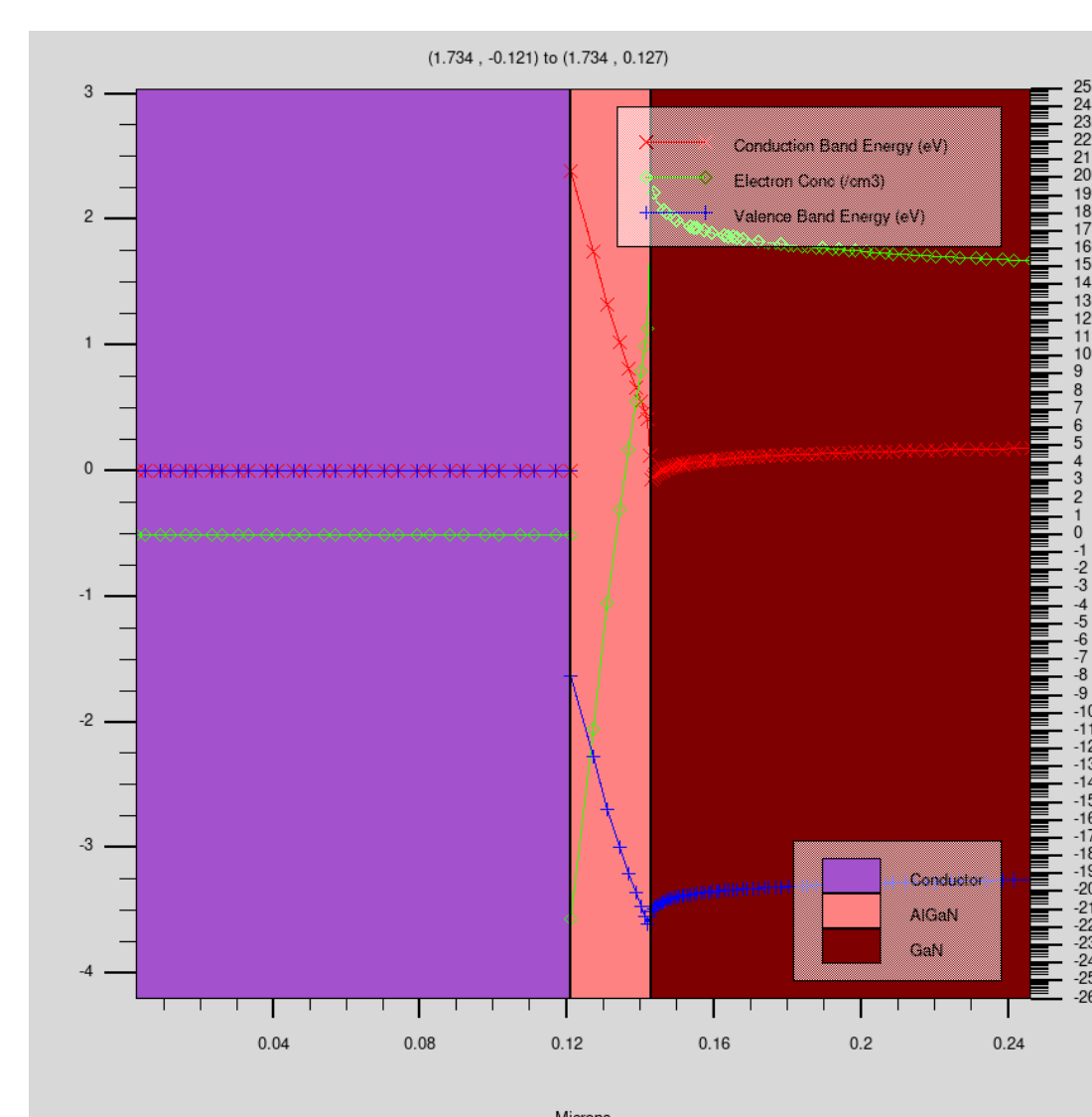
각 구조에 대해 동일한 조건에서 I_d - V_g 전이특성을 시뮬레이션하고, Tony Plot의 선형 외삽 기능을 이용하여 문턱전압(V_{th})을 추출하였다. 또한 전이곡선의 기울기 변화를 비교하여 D-mode와 recessed E-mode 구조에서의 전기적 특성을 정량적으로 평가하였다.



RESULT



Recessed-gate E-mode HEMT는 D-mode 대비 V_{th} 가 -1.0V에서 +0.3V로 약 1.3V 양(+) 방향 이동하며 완전한 normally-off 특성을 확보하였다. 또한 전이구간의 slope가 2.53 → 2.58로 증가하여 transconductance(g_m)이 향상되었고, 이는 더 빠른 전류 응답성과 우수한 스위칭 성능을 의미한다. 결과적으로 Recessed-gate E-mode 구조는 D-mode 대비 V_{th} 양의 이동, g_m 증가, SS 개선, leakage 감소한 것을 확인 할 수 있다.



Recessed-gate E-mode의 밴드 구조는 식각으로 AlGaIn 두께가 감소하면서 polarization에 의해 형성되는 2DEG 유도 전계가 약해지고, 그 결과 Conduction Band가 상승하여 2DEG well이 거의 사라지며 전자 농도가 0에 가까워져 채널이 완전히 depletion되는 것을 확인할 수 있다. 반면 D-mode에서는 AlGaIn/GaN 계면의 강한 polarization charge가 유지되어 EC가 깊게 내려가고, 이로 인해 두꺼운 2DEG well이 형성되어 0 V에서도 높은 전자 농도를 가지는 normally-on 특성이 나타난다.

이러한 밴드 이동 메커니즘에 따라 E-mode에서는 V_{th} 가 + 방향으로 이동하며 normally-off 특성이 구현되고, 게이트-채널 간 거리가 짧아져 전계 결합이 강화되면서 g_m 증가, SS 개선, off-state leakage 감소가 동시에 발생한 것을 확인하였다.



CONCLUSIONS

이번 연구를 통해 Recessed-gate E-mode와 D-mode HEMT의 전기적 특성을 정량적으로 비교하고, AlGaIn barrier 두께 변화가 2DEG 형성·밴드 구조·문턱전압 이동에 미치는 메커니즘을 명확히 규명할 수 있었다.

분석 결과 Recessed-gate E-mode 구조는 V_{th} 양의 방향 이동, g_m 향상, SS 개선, leakage 억제 등 전반적인 소자 성능 안정성 측면에서 우수한 특성을 나타냈다. 이러한 결과는 향후 고전력 스위칭, 전력 변환 모듈, 차량용 및 산업용 전력 IC 분야에서 더욱 효율적이고 신뢰성 높은 E-mode GaN HEMT 설계로 확장될 가능성을 제시한다.