Korean Chem. Eng. Res., 60(2), 313-319 (2022)
https://doi.org/10.9713/kcer.2022.60.2.313
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

게이트 하부 식각 구조 및 HfO_2 절연층이 도입된 AlGaN/GaN 기반 전계 효과 트랜지스터

김유경 · 손주연 · 이승섭 · 전주호 · 김만경 · 장수환†

단국대학교 화학공학과
16890 경기도 용인시 수지구 죽전로 152
(2021년 12월 20일 접수, 2021년 12월 25일 수정본 접수, 2021년 12월 29일 채택)

AlGaN/GaN Field Effect Transistor with Gate Recess Structure and HfO_2 Gate Oxide

Yukyung Kim, Juyeon Son, Seungseop Lee, Juho Jeon, Man-Kyung Kim and Soohwan Jang†

Department of Chemical Engineering, Dankook University, Yongin, 16890, Korea
(Received 20 December 2021; Received in revised from 25 December 2021; Accepted 29 December 2021)

요 약

HfO_2을 게이트 산화막으로 갖는 AlGaN/GaN 기반 고이동도 전계효과 트랜지스터(high electron mobility transistor, HEMT)의 노멀리 오프(normally-off) 작동 구현을 위하여 게이트 리세스(gate-recess) 깊이에 따른 소자 특성이 시뮬레이션을 통하여 분석되었다. 전통적인 HEMT 구조, 3 nm의 두께를 갖는 게이트 리세스된 HEMT 구조, 게이트 영역에 AlGaN 층을 갖지 않는 HEMT 구조가 모사되었다. 전통적인 HEMT 구조는 노멀리 온(normally-on) 특성을 나타내었으며, 0 V의 게이트 전압 및 15 V의 드레인 전압 환경에서 0.35 A의 드레인 전류 특성을 나타내었다. 3 nm의 두께를 갖는 게이트 리세스된 HEMT 구조는 2DEG(2-dimensional electron gas) 채널의 전자 농도 감소로 인해, 같은 전압 인가 조건에서 0.15 A의 드레인 전류 값을 보였다. 게이트 영역에 AlGaN 층을 갖지 않는 HEMT 구조는 뚜렷한 노멀리 오프 동작을 나타내었으며, 0 V의 동작전압 값을 확인할 수 있었다.

Abstract – AlGaN/GaN based HfO_2 MOSHEMT (metal oxide semiconductor high electron transistor) with different gate recess depth was simulate to demonstrate a successful normally-off operation of the transistor. Three types of the HEMT structures including a conventional HEMT, a gate-recessed HEMT with 3 nm thick AlGaN layer, and MIS-HEMT without AlGaN layer in the gate region. The conventional HEMT showed a normally-on characteristics with a drain current of 0.35 A at $V_G = 0$ V and $V_{DS} = 15$ V. The recessed HEMT with 3 nm AlGaN layer exhibited a decreased drain current of 0.15 A under the same bias condition due to the decrease of electron concentration in 2DEG (2-dimensional electron gas) channel. For the last HEMT structure, distinctive normally- off behavior of the transistor was observed, and the turn-on voltage was shifted to 0 V.

Key words: GaN, Transistor, Normally-off

1. 서 론

전계 효과 트랜지스터(FET, field effect transistor)는 전류의 흐름을 임의적으로 잇고 끊는 전기적 소자로써 현재 사용범위가 날로 확대되고 있다. 전계 효과 트랜지스터는 구조를 기준으로 박막 트랜지스터(TFT, thin film transistor), 금속-절연체-반도체 전계 효과 트랜지스터(MISFET, metal-insulator-semiconductor field-effect transistor), 금속-산화물-반도체 전계 효과 트랜지스터(MOSFET, metal-oxide-semiconductor field-effect transistor), 고전자 이동도 트랜지스터(HEMT, high electron mobility transistor) 등으로 구분되며 서로 다른 특성을 가진다[1-2].

TFT는 주로 도핑을 적용하지 않은 반도체 박막층에 금속으로 된 소스(source)와 드레인(drain) 전극을 부착시킨 구조를 가지며, 다양한 쓰임새를 갖지만 기판과의 결정성 차이로 성능이 감소되는 단점이 있다. 상대적으로 구조가 간단하고 공정이 단순하므로 발광 다이오드(LED, light emitting diode)와 유기 발광 다이오드(OLED, organic light emitting diode) 패널 등에 자주 쓰이며, 높은 해상도를 얻기 위해 Cl_2/BCl_3 플라즈마(plasma) 식각 공정을 거친다. 또한, 최근 재료 특성에 따른 유기 박막 트랜지스터(organic thin film transistor)의

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jangmountain@dankook.ac.kr
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.

성능에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[3-4]. MISFET 및 MOSFET은 도핑된 반도체에 소스와 드레인 전극을 부착하고, 게이트(gate) 전극 아래 누설 전류를 방지하기 위해 절연층 또는 산화막을 도입한 구조를 가지며, 각종 메모리 및 중앙처리장치, 그래픽 처리장치에 사용된다.

AlGaN/GaN HEMT는 고출력 고속 전기소자로 무선 주파수(RF, radio frequency) 증폭기 및 전력 변환기 분야에서 많은 관심을 받고 있다[5]. GaN는 Ⅲ족-Ⅴ족 반도체 물질로 넓은 밴드갭(bandgap) 특성으로 인해 GaN 기반 전력소자는 높은 항복전압(breakdown voltage)의 특성를 갖는다. AlGaN/GaN 이종접합구조(heterostructure)는 AlGaN과 GaN의 격자상수(lattice constant) 차이로 압전효과(piezoelectric effect)와 자발적 분극(spontaneous polarization)을 발생시켜 내부 전기장을 형성한다[6]. 형성된 내부전기장과 AlGaN과 GaN의 큰 전도대 차이(conduction band offset)로 두 물질의 계면에 2차원 전자 가스(2DEG, 2dimensional electron gas)가 형성되어 AlGaN/GaN HEMT는 뛰어난 전자 이동도와 빠른 스위칭 속도를 나타낸다[7-8].

일반적으로 기존의 AlGaN/GaN HEMT는 2DEG 채널에 의해 노멀리 온(normally on, D-mode)으로 동작하므로 오프(off) 상태로 동작하기 위해서는 별도의 회로구성을 요하며, 이 과정에서 전력 손실 및 속도 저하의 결과를 낳는다. 전기자동차 및 전력 변환기 등에 사용되기 위해서는 노멀리 오프(normally off, E-mode) 소자가 요구된다[9]. 노멀리 오프형 AlGaN/GaN HEMT는 게이트 하부의 AlGaN 장벽층을 식각시는 구조, 게이트 영역 채널 부근에 플루오린(F) 이온을 주입하는 구조, p-GaN 게이트 박막을 사용하는 구조 등이 있다[10-12]. 이 중 AlGaN 장벽층 식각(etching) 구조는 압전효과를 유발하는 AlGaN층을 부재하므로, 게이트 하부에 2DEG층의 형성을 막아 노멀리 오프 소자로 동작이 가능하며, 다른 구조에 비해 소자 구동이 안정적이며 공정 비용을 절약할 수 있는 장점이 있다[13-14].

본 연구에서는 노멀리 오프 구동을 위해 게이트 하부 AlGaN 장벽층을 식각하고 그 위에 HfO_2 절연체층을 삽입하여 게이트 누설 전류를 방지한 게이트 리세스(gate recessed) 구조를 갖는 AlGaN/GaN MIS-HEMT 구조가 소자 시뮬레이션을 통하여 연구되었다. 게이트 리세스 깊이에 따른 AlGaN/GaN MIS-HEMT 소자의 드레인 전류(I_D)-전압(V_{DS}), 문턱 전압(threshold voltage), 에너지 밴드(energy band), 전자 농도 등의 소자 특성이 분석 되었으며, 게이트 리세스 깊이가 소자 작동에 미치는 영향이 파악되었다.

2. 실 험

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 소자의 구조를 나타낸다. 기존의 AlGaN/GaN HEMT 구조(Fig. 1(a), HEMT A)는 1000 nm 두께의 10^{14} cm^{-3} 농도를 갖는 n형 GaN 채널(channel), 25 nm 두께의 10^{14} cm^{-3} 농도를 갖는 n형 $Al_{0.25}GaN$층, 60 nm 두께의 Si_3N_4로 보호막으로 이루어진다. 소스와 드레인 전극이 소자 상부 양쪽에 위치하며, 60 nm 두께의 게이트가 존재한다.

기존의 AlGaN/GaN HEMT 구조에 게이트 리세스 구조가 적용된 소자구조가 Fig. 1(b), (c)에 제시 되었다. 게이트 아래 하부에 AlGaN층이 식각되어 Fig. 1(b) (HEMT B)는 3 nm의 AlGaN 층을 보유하며, Fig. 1(c) (HEMT C)는 AlGaN층이 완전히 제시되었다.

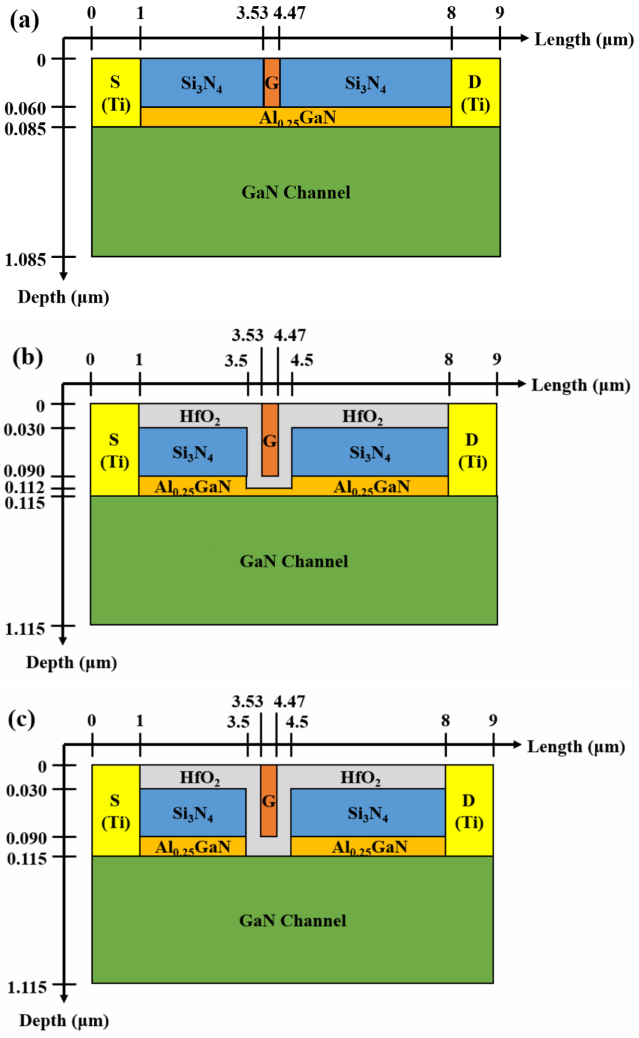

Fig. 1. Schematic diagram of the simulated AlGaN/GaN HEMT structures: (a) HEMT without gate recessing; (b) recessed HEMT with 3 nm AlGaN layer; (c) recessed HEMT without AlGaN layer around gate region.

게이트 리세스 소자자에는 30 nm 두께의 HfO_2 가 각각 삽입되었다. 세 구조 모두 $Al_{0.25}GaN$ 층의 두께와 HfO_2 층 유무를 제외한 모든 부분에 동일 두께, 도핑 농도, 물질을 갖으며, 소자 모사를 위하여 Silvaco사의 Atlas™ 프로그램이 사용되었다. 소자 모사를 위한 물질 변수는 Atlas™ 프로그램 및 문헌값을 적용하였다[14,15].

3. 결과 및 고찰

Fig. 2(a)는 기존 HEMT 구조인 HEMT A의 I_D-V_{DS} 그래프이다. I_D-V_{DS} 그래프에서 게이트 전압이 0 V인 경우 약 0.35 A의 전류가 흘러 노멀리 온 구동을 보였다. 게이트 전압이 -7 V인 경우 2DEG의 전자 채널 결핍(channel depletion)으로 전류가 흐르지 않는 오프(off) 상태가 됐다. Fig. 2(b)는 약 3 nm의 AlGaN 장벽층을 갖는 HEMT B의 I_D-V_{DS} 그래프이다. I_D-V_{DS} 그래프에서 게이트 전압이 0 V일 때, 구조 A보단 작은 0.15 A의 전류가 흘러 노멀리 온으로 구동했다. 게이트 전압이 -3 V일 때 전류가 흐르지 않는 오프 상태가 됐다. 반대로 게이트에 양전압이 가해지면 전자 채널 향상(channel enhancement)으

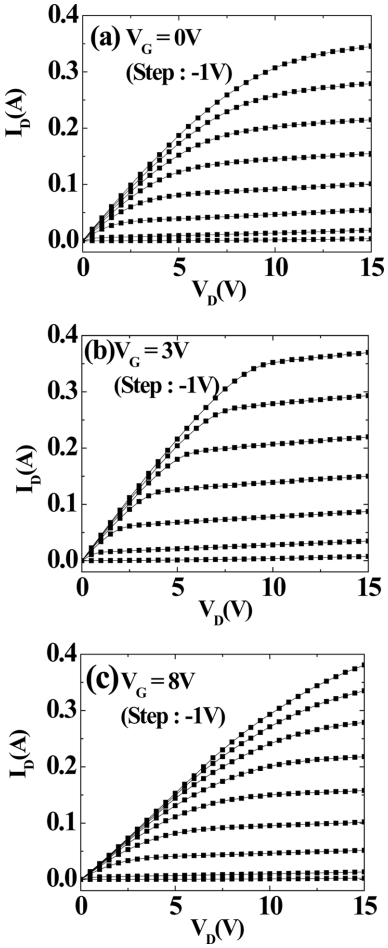

Fig. 2. I_D-V_{DS} characteristics of (a) HEMT A, (b) HEMT B, and (c) HEMT C.

로 전류가 더욱 증가했다. Fig. 2(c)는 AlGaN 장벽층이 완전히 제거된 HEMT C의 I_D-V_{DS} 그래프이다. I_D-V_{DS} 그래프에서 게이트 전압이 0 V일 때, 전류가 흐르지 않는 노멀리 오프 구동을 보였다. 게이트에 양전압을 가하면 채널 향상으로 전류가 증가해 온(on) 상태가 되었다. Fig. 2의 그래프로부터 게이트 리세스 두께에 따라 AlGaN/GaN 기반 HEMT의 소자 동작이 노멀리 온에서 오프로 변환이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 3은 10 V의 V_{DS} 인가 조건 하에서 게이트 전압에 따른 드레인 전류 변화를 나타낸 그래프이다. 게이트 전극에 전압이 가해지지 않았을 때, 전류가 흐르는 HEMT A와 B는 각각 -7V, -3V의 문

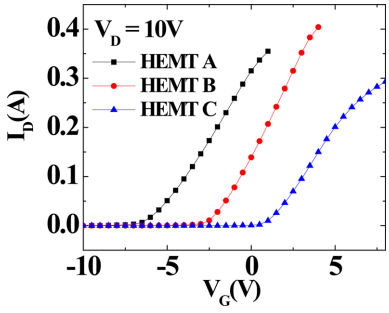

Fig. 3. I_D-V_G characteristics of HEMT A, HEMT B, and HEMT C at V_{DS} = 10 V.

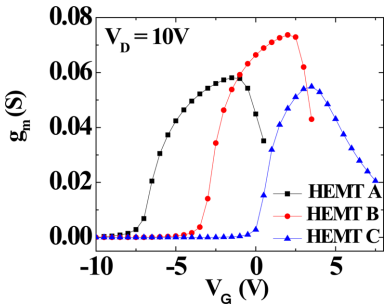

Fig. 4. g_m-V_G characteristics of HEMT A, HEMT B, and HEMT C at V_{DS} = 10 V.

턱전압을 가져 노멀리 온 구동을 보인다. 동일한 드레인 전압 조건하에서, HEMT C는 0V의 문턱전압을 가져 노멀리 오프 구동을 보인다. 이를 통해 AlGaN 층의 두께가 감소할수록 문턱 전압이 점차 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 4는 10 V의 드레인 전압 환경에서 HEMT A, B, C의 게이트 전압에 따른 전달 컨덕턴스(g_m, transconductance)값을 나타낸다. 전달 컨덕턴스는 일정한 V_{DS}가 가해질 때, 인가된 게이트 전압 변화에 따라 전류의 변화하는 정도를 나타내는 값으로 높은 값을 갖을수로 소자 드레인 전류를 게이트 전압으로 쉽게 조절할 수 있음을 의미한다. HEMT구조 B는 HEMT A 대비 얇은 층의 AlGaN 장벽

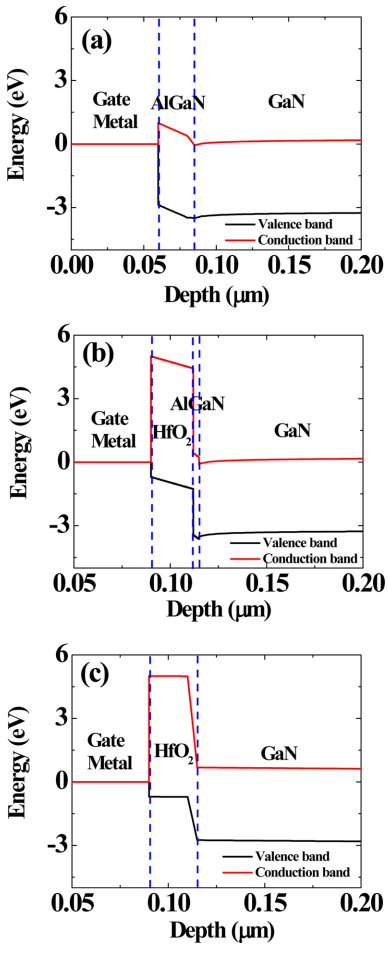

Fig. 5. Simulated energy-band diagram of (a) HEMT A, (b) HEMT B, and (c) HEMT C at V_{DS} = 0 V and V_G = 0 V.

층을 가지므로 HAMT B는 HEMT A 보다 높은 0.0737 S의 $g_{m,max}$ 값을 가진다. HEMT C는 게이트 영역에 AlGaN 장벽층이 없으므로 2DEG 채널이 존재하지 않고, 게이트 전압에 의해 GaN 내부로부터 HfO_2 계면에 전자들이 모여 채널이 형성된다. 따라서 구조 C는 구조 A와 B의 2DEG 채널 대비 전자의 이동성이 저하된 채널을 가져 낮은 전달 컨덕턴스 값을 가진다.

Fig. 5는 평형 조건에서 게이트 전극 영역의 HEMT A, B, C에 대한 에너지 밴드 모식도를 나타낸다. 게이트 전극 아래 AlGaN 장벽층이 존재하는 구조 A, B의 경우, 공통적으로 AlGaN/GaN 계면에서 내부 전지갖에 의한 GaN의 전도대(conduction band)의 휨(bending) 현상이 발생하여 전자들의 축적(accumulation)으로 2DEG 채널이 형성된다. AlGaN/GaN 계면에서 GaN 전도대의 휨 현상은 AlGaN와 GaN의 격자상수(lattice mismatch) 차이에 의한 압전현상(piezoelectric effect)과 자발적 분극(spontaneous polarization)에 기인한다. 이러한 현상에 의해 AlGaN/GaN의 계면에 내부 전기장이 형성되고, GaN의 가전대가 페르미 레벨(Fermi level) 밑에 존재하게 되어, 결과적으로, AlGaN/GaN 계면에 전자들이 축적된 2DEG 채널층이 형성된다. 그러나 HMET B의 AlGaN의 두께는 3 nm로 HEMAT A 대비 얇은 AlGaN 장벽층을 갖으므로 AlGaN/GaN 계면에 형성된 전기장의 크기가 감소해 비교적 낮은 2DEG 채널 농도를 갖는다. 이로 인해, 게이트 전압이 가해지지 않고 동일한 소스-드레인 전압이 인가되었을 때, HEMT B가 HEMT A 대비 더 낮은 I_D 값을 보여준다. 또한 2DEG 채널의 감소로 게이트 전압에 의한 드레인 전류의 조절(modulation)이 용이해 더 높은 전달 컨덕턴스 값을 갖는다. 구조 C의 경우, 게이트 영역 아래 GaN 층만 존재하여 에너지 밴드 구조 상 휨 현상이 발생하지 않아 2DEG 채널이 형성되지 않는다.

Fig. 6은 HEMT A의 V_{DS}=10 V 조건에서 V_G 변화에 따른 에너지 밴드 및 전자 농도 변화를 나타낸다. Fig. 6(a), (b), (c)는 HEMT A에 V_G가 가해지지 않았을 때, 게이트 영역의 에너지 밴드, 전자농도 분포, 깊이에 따른 전자농도를 나타낸다. V_G = 0 V의 조건에서 AlGaN/GaN 계면에 2.5×10^{17} cm^{-3} 의 높은 농도로 전자가 축적되어 형성된 2DEG 채널을 보여준다(Fig. 6(b), (c)). 이를 통하여 게이트 전압 0 V 환경에서 2DEG 채널을 통해 드레인 전류가 흐르는 노멀리 온 구동을 확인할 수 있다. Fig. 6(d), (e), (f)는 HEMT A에 -7 V의 게이트 전압이 인가되었을 때 게이트 영역의 에너지 밴드, 전자농도 분포, 깊이에 따른 전자농도를 보여준다. 전기장에 의해 2DEG 채널이 결핍되어(Fig. 6(e)) AlGaN/GaN 계면 전자 농도가 2.9×10^{2} cm^{-3}으로 감소되었음을 알 수 있다(Fig. 6(f)). 즉, 게이트에 -7 V의 전압 인가 시, 게이트 영역에 2DEG 채널이 형성되지 않아

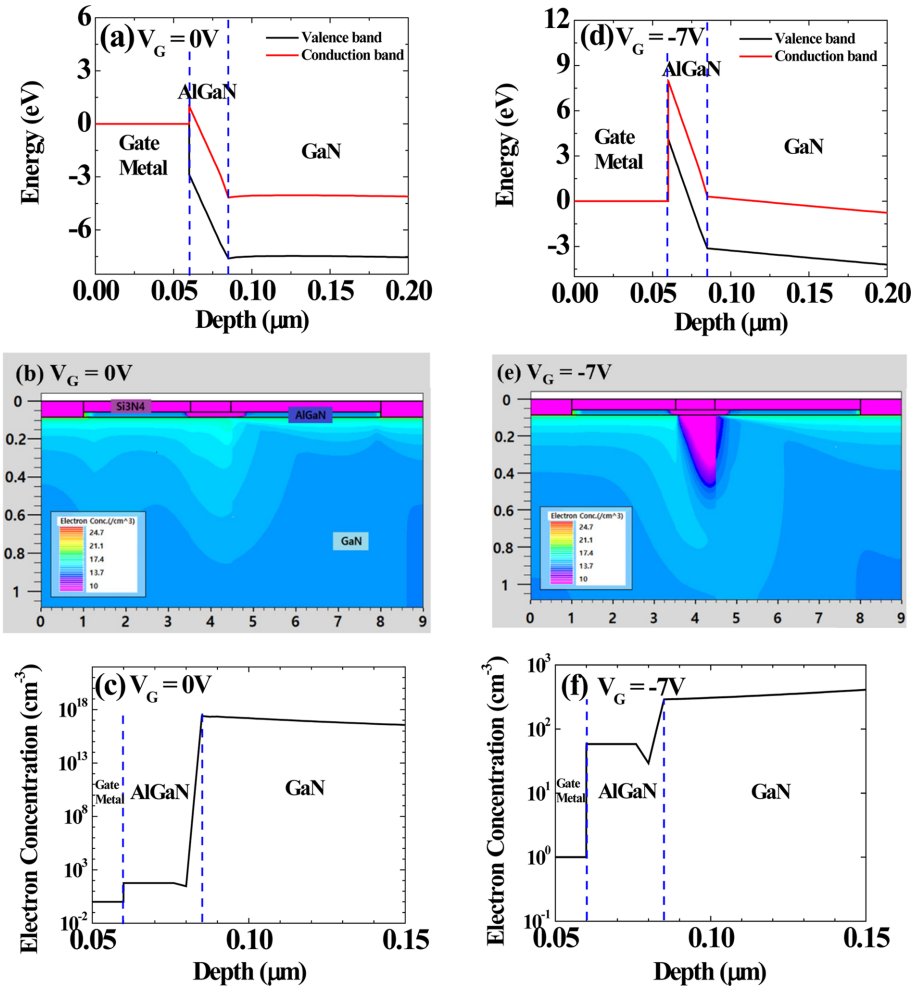

Fig. 6. Simulated characteristic diagrams of HEMT A at V_{DS} = 10 V condition: energy-band diagram at (a) V_G = 0 V and (b) V_G = -7 V; Cross-sectional views of electron concentration at (c) V_G = 0 V and (d) V_G = -7 V; electron concentration profiles at (e) V_G = 0 V and (f) V_G = -7 V.

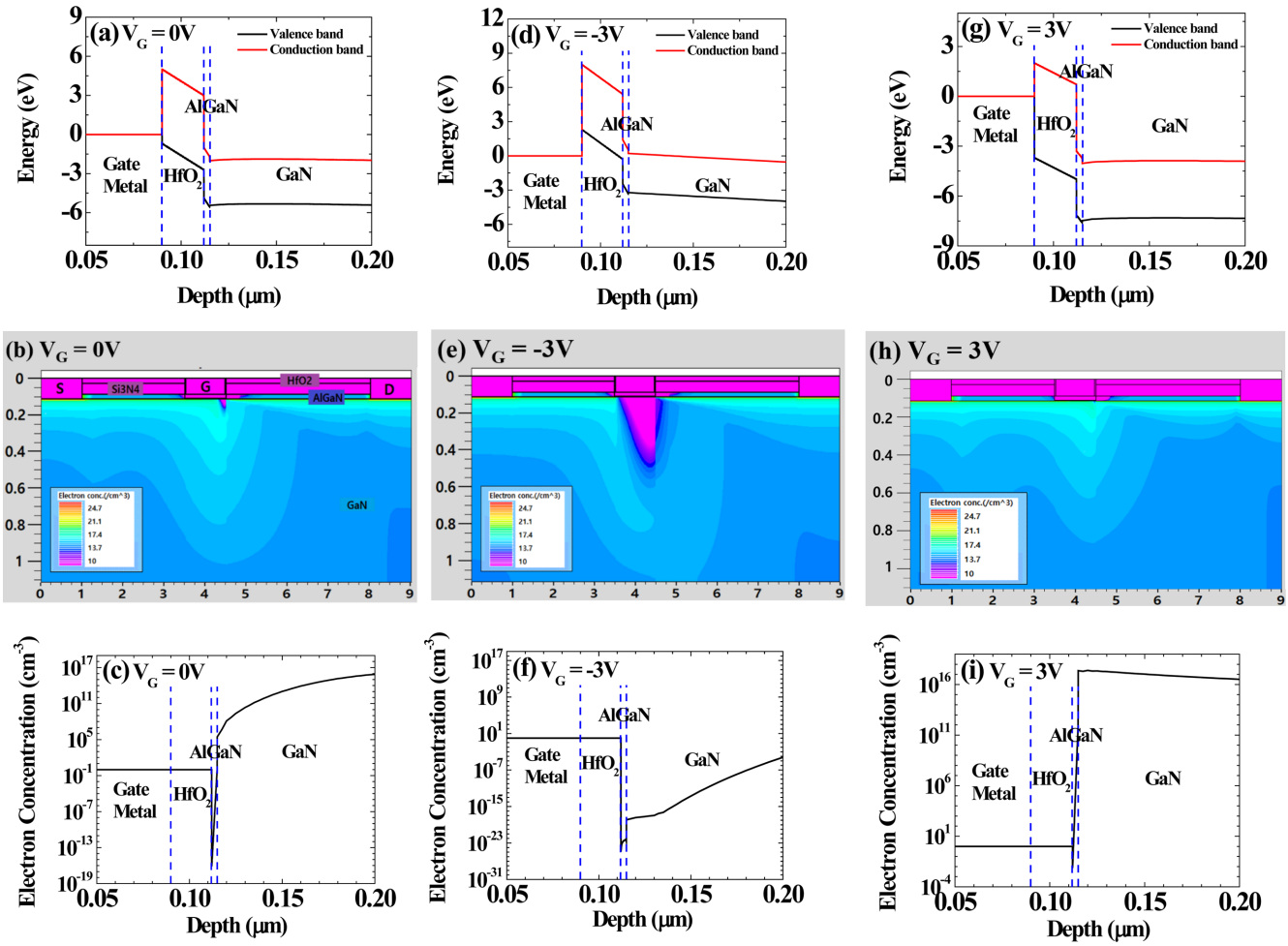

Fig. 7. Simulated characteristic diagrams of HEMT B at V_{DS} = 10 V condition : energy-band diagram at (a) V_G = 0 V, (b) V_G = -3 V and (c) V_G = +3 V; Cross-sectional views of electron concentration at (d) V_G = 0 V, (e) V_G = -3 V and (f) V_G = +3 V; electron concentration profiles at (g) V_G = 0 V, (h) V_G = -3 V and (i) V_G = +3 V.

드레인 전류가 거의 흐르지 않은 것을 확인할 수 있다(Fig. 2(a), Fig. 3).

Fig. 7은 HEMT B의 게이트 전압 0 V (Fig. 7(a)-(c)), 게이트 전압 -3 V (Fig. 7(d)-(f)), 게이트 전압 3 V (Fig. 7(d)-(f)) 조건에서 게이트 영역의 에너지 밴드, 전자농도 분포, 깊이에 따른 전자농도를 각각 나타낸다. 이 때의 드레인 전압은 10 V이다. Fig. 7(a), (b), (c)는 V_G가 가해지지 않을 때, AlGaN 장벽층이 3 nm 존재해 AlGaN/GaN 계면에 GaN 가전대 에너지 밴드의 휨 현상으로 2.8×10^5 cm^{-3}의 농도로 전자가 축적되어 형성된 2DEG 채널을 보여준다. HEMT B의 2DEG 채널의 전자 농도가 HEMT A 대비 낮은 이유는, 앞서 에너지 밴드 구조로 설명했듯이 AlGaN 장벽층의 감소로 내부에 형성된 전기장이 감소하여 축적되는 전자의 농도가 감소했기 때문이다. Fig. 7(d)-(f)는 HEMT B에 -3 V의 V_G가 가해졌을 때, 전기장에 의해 2DEG 채널이 결핍되어 AlGaN/GaN 계면 전자 농도가 1.2×10^{-18} cm^{-3}으로 감소됨을 보여준다. 이를 통해 HEMT B는 -3 V의 V_G에서 2DEG 채널이 단락되었음을(pinch-off) 알 수 있다. Fig. 7(g), (h), (i)는 HEMT B에 +3 V의 V_G가 가해졌을 때, 전기장에 의해 2DEG 채널이 향상되어(enhanced) AlGaN/GaN 계면 전자 농도가 2.3×10^{17} cm^{-3}으로 증가됨을 알 수 있다. 이에 따라 드레인 전류가 0.352 A로 증가함을 확인할 수 있다(Fig. 2(b)).

Fig. 8은 V_{DS}= 10 V 하에서 HEMT C의 게이트 전압 0 V (Fig. 8(a)-(c)), 게이트 전압 4 V (Fig. 8(d)-(f)) 조건에서 게이트 영역의 에너지 밴드, 전자농도 분포, 깊이에 따른 전자농도를 각각 보여준다. Fig. 8(a)-(c)는 HEMT C에 V_G가 가해지지 않을 때, HfO_2/GaN 계면에서 GaN 가전대 에너지 밴드의 휨 현상이 나타나지 않고, 약 3.1×10^{-18} cm^{-3}의 전자 농도를 가져 드레인 전류가 흐르지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 8(d)-(f)는 HEMT C에 +4 V의 V_G가 가해졌을 때, 전기장에 의해 HfO_2/GaN 계면에 전자가 축적되어 전자 채널이 형성되었음을 나타낸다. 이 때의 전자농도는 1.7×10^{19} cm^{-3}이다. 그러므로, Fig. 2(c) 및 Fig. 3에서와 같이 게이트 리세스 및 HfO_2 게이트 산화막을 갖는 HEMT C는 노멀리 오프 모드로 소자가 작동됨을 확인할 수 있다.

4. 결 론

HfO_2 게이트 산화막을 갖는 AlGaN/GaN HEMT의 게이트 리세스 두께에 따른 소자 특성이 모사되었다. 기존의 AlGaN층을 보유한 HEMT A, 3 nm 두께의 AlGaN층을 보유한 HEMT B, AlGaN층이 완전히 제거된 HEMT C 소자에 대하여, 전유-전압 특성, 전달 컨덕턴스 특성, 에너지 밴드갭, 2DEG 채널의 전자 분포, 게이트 영

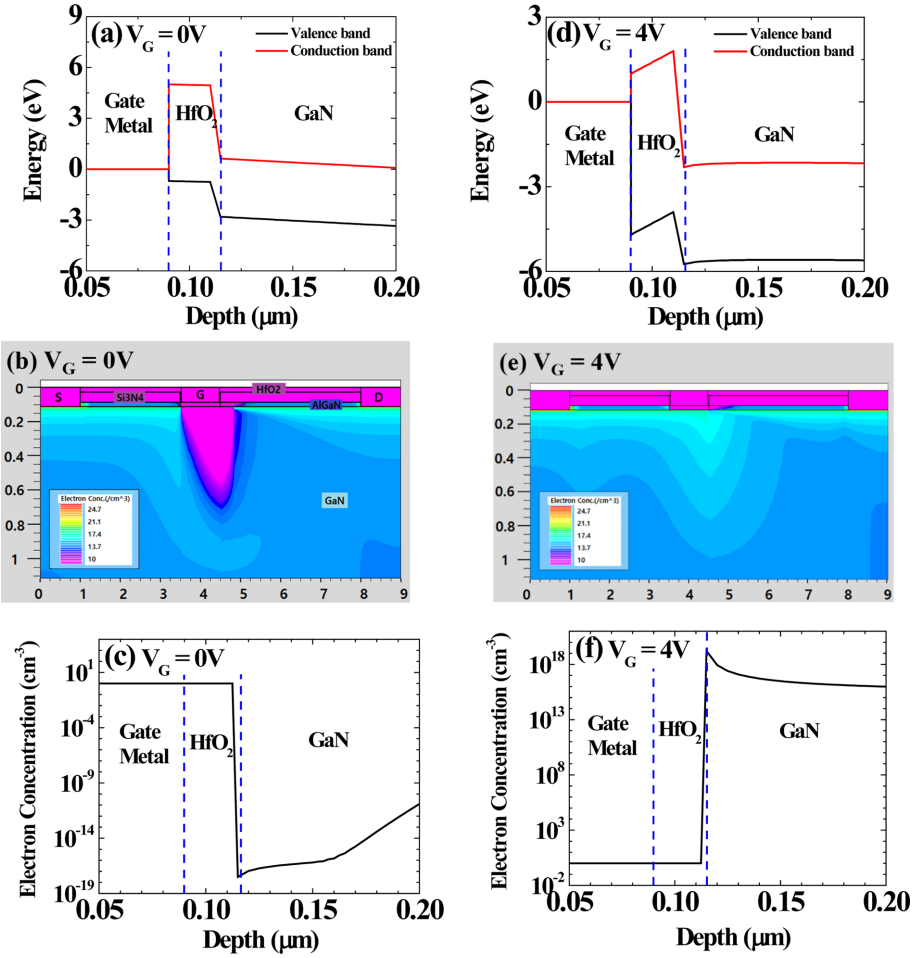

Fig. 8. Simulated characteristic diagrams of HEMT C at V_{DS} = 10 V condition : energy-band diagram at (a) V_G = 0 V and (b) V_G = +4 V; Cross-sectional views of electron concentration at (c) V_G = 0 V and (d) V_G = +4 V; electron concentration profiles at (e) V_G = 0 V and (f) V_G = +4 V.

역의 전자 농도 등이 분석 되었다. HEMT A는 AlGaN/GaN 계면에 형성된 2DEG 채널에 의해 전통적인 노멀리 온 구동을 보였다. AlGaN 장벽층이 3 nm 남아있는 HEMT B는 전자 채널 내 HEMT A 대비 낮은 전자 농도를 가져 높은 전달 컨덕턴스 값을 가지며, 노멀리 온 구동을 보였다. 또한 채널 두께의 감소로 동일 인가 전압 조건 환경에서 HEMT A 대비 낮은 전류값을 보였다. 게이트 전극 하부 AlGaN 장벽층이 모두 제거된 HEMT C는 채널의 소멸으 게이트 전압이 인가되지 않는 환경에서 전류가 흐르지 않는 노멀리 오프 구동을 보였고, 게이트 전극 아래 HfO_2 층의 도입으로 누설전류를 방지하였다. 본 연구에서 제시된 HfO_2 게이트 산화막을 HEMT C 구조는 2DEG 채널의 제거로 노멀리 오프 구동이 가능하며, 양의 게이트 전압 인가 시 상당 수준의 드레인 전류값을 나타내므로, 전력소자 용 노멀이 오프 트랜지스터로의 성공적 활용을 예상할 수 있다.

감 사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1F1A1056647).

참고문헌

1. Weimer, P. K., "The TFT A New Thin Film Transistor," *Proc. IRE.*, **50**(6), 1462-1469(1962).
2. Fei, X., Wang, Y., Luo, X., Cao, F. and Yu, C., "Potential Study of the Enhanced Breakdown Voltage GaN MISFET Based on Partial AlN Buried Layer," *Superlattices Microstruct.*, **114**, 314-320(2018).
3. Choi, J., Kim, S. and Kim, H., "Damage to Amorphous Indium-gallium-zinc-oxide Thin Film Transistors Under Cl_2 and BCl_3 Plasma," *Korean J. Chem. Eng.*, **35**(6), 1348-1353(2018).
4. Shekar, B., Lee, J. and Rhee, S., "Organic Thin Film Transistors: Materials, Processes and Devices," *Korean J. Chem. Eng.*, **21**(1), 267-285(2004).
5. Mishra, U. K., Parikh, P. and Wu, Y. F., "AlGaN/GaN HEMTs-an Overview of Device Operation and Applications," *Proc. IEEE*, **90**(6), 1022-1031(2002).
6. Wu, Y. F., Kapolnek, D., Ibbetson, J. P., Parikh, P., Keller, B. P. and Mishra, U. K., "Very-high Power Density AlGaN/GaN HEMTs," *IEEE Trans. Electron Devices*, **48**(3), 586-590(2001).
7. Kobayashi, T., Abe, H., Niimura, Y., Yamada, T., Kurosaki, A., Hosen, T. and Fujihira, T., "High Voltage Power MOSFETs Reached

Almost to the Silicon Limit," *Proc. ISPSD*, 435-438(2001).
8. Saito, W., Takada, Y., Kuraguchi, M., Tsuda, K., Omura, I., Ogura, T. and Ohashi, H., "High Breakdown Voltage AlGaN GaN Power HEMT Design and High Current Density Switching Behavior," *IEEE Trans. Electron Devices*, **50**(12), 2528-2531(2003).
9. Kaminski, N. and Hilt, O., "SiC and GaN Devices – Wide Bandgap is Not All the Same," *IET Circuits Devices Syst.*, **8**(3), 227-236(2014).
10. Liu, S., Yang, S., Tang, Z., Jiang, Q., Liu, C., Wang, M. and Chen, K. J., "Performance Enhancment of Normally-Off Al_2O_3/AlN/GaN MOS-Channel HEMTs with and ALD-Grown AlN Interfacial Layer," *Proc. of the 26th Int. Symp. Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD)*, 362-365(2014).
11. Chen, K. J., Yuan, L., Wang, M. J., Chen, H., Huang, S., Zhou, Q., Zhou, C., Li, B. K. and Wang, J. N., "Physics of Fluorine Plasma ion Implantation for GaN Normally-off HEMT Technology," *Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet.*, 19.4.1-19.4.4(2011).
12. Uemeto, Y., Hikita, M., Ueno, H., Matsuo, H., Ishida, H., Yanagihara, M., Ueda, T., Tanaka, T. and Ueda, D., "Gate Injection Transistor (GIT) - A Normally-off AlGaN/GaN Power Transistor Using Conductivity Modulation," *IEEE Trans. Electron Devices*, **54**(12), 3393-3399(2007).
13. Wang, H., Wang, J., Li, M., Cao, Q., Yu, M., He, Y. and Wu, W., "823-mA/mm Drain Current Density and 945-MW/cm^2 Baliga's Figure-of-Merit Enhancement-mode GaN MISFETs with a Novel PEALD-AlN-LPCVD-Si_3N_4 Dual-gate Dielectric," *IEEE Electron Device Lett.*, **39**(12), 1888-1891(2018).
14. Zhao, Y., Wang, C., Zheng, X., Ma, X., He, Y., Liu, K., Li, A., Peng, Y., Zhang, C. and Hao, Y., "Effects of Recess Depths on Performance of AlGaN/GaN Power MISHEMTs on the Si Substrates and Threshold Voltage Model of Different Recess Depths for the Using HfO_2 Gate Insulator," *Solid-State Electronics*, **163**, 107649(2020).
15. Zhao, Y., Xu, S., Tao, H., Zhang, Y., Zhang, C., Feng, L., Peng, R., Fan, X., Du, J., Zhang, J. and Hao, Y., "Enhanced P-Type GaN Conductivity by Mg Delta Doped AlGaN/GaN Superlattice Structure," *Materials*, **14**(1), 144-150(2021).

Authors

Yukyung Kim: Student, Department of Chemical Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea, 32180883@dankook.ac.kr

Juyeon Son: Student, Department of Chemical Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea, sjy0570@naver.com

Seungseop Lee: Student, Department of Chemical Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea, qswazxer123@naver.com

Juho Jeon: Student, Department of Chemical Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea, juho914@naver.com

Man-Kyung Kim: Student, Department of Chemical Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea, 32140508@dankook.ac.kr

Soohwan Jang: Student, Department of Chemical Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea, jangmountain@dankook.ac.kr