

이중 게이트 AlGaIn/GaN 고 전자 이동도 트랜지스터의 누설 전류 메커니즘과 SiO₂ 패시베이션 효과 분석

임지용, 하민우, 최영환, 한민구
 서울대학교 공과대학 전기 컴퓨터 공학부

SiO₂ Passivation Effects on the Leakage Current in Dual-Gate AlGaIn/GaN High-Electron-Mobility Transistors

Jiyong Lim, Min-Woo Ha, Young-Hwan Choi, Min-Koo Han
 School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - AlGaIn/GaN 고전자 이동도 트랜지스터 (High Electron Mobility Transistors, HEMTs)는 와이드 밴드-갭과 높은 항복 전계 및 우수한 채널 특성으로 인해 마이크로파 응용분야와 전력용 반도체에서 각광 받고 있다. 최근, 전력 응용분야에서 요구되는 높은 항복 전압과 출력, 우수한 주파수 특성을 획득하기 위해 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMTs에 관한 연구가 발표되고 있다.

본 논문에서는 AlGaIn/GaN HEMTs에 이중 게이트를 적용하여, 두 개의 게이트와 드레인, 소스의 누설 전류를 각각 측정하여 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMTs의 누설 전류 메커니즘을 분석하였다. 또한 제안된 소자의 SiO₂ 패시베이션 전 후의 누설 전류 특성을 비교하였다. SiO₂ 패시베이션되지 않은 소자의 누설 전류는 드레인, 소스와 추가 게이트로부터 주 게이트로 흐른 반면, 패시베이션 된 소자의 누설 전류는 드레인으로부터 주 게이트 방향의 누설 전류만 존재하였다. SiO₂ 패시베이션 된 소자의 누설 전류는 (87.31 nA) 패시베이션 되지 않은 소자의 누설 전류 (8.54 μA)에 비해 크게 감소하였다.

1. 서 론

AlGaIn/GaN 고전자이동도 트랜지스터는 (high electron mobility transistors, HEMTs) 와이드 밴드-갭, 높은 항복 전계와 높은 2차원 전자 가스 (two-dimensional electron gas) 등의 특성으로 인해 마이크로파 응용분야와 고전압 스위치 응용분야에서 각광받고 있다 [1-4]. 고전압용 AlGaIn/GaN HEMTs의 누설 전류는 전력 손실을 위해 억제되어야 한다. 최근, 고전압 스위치, 광대역 전력 증폭기와 고전력 믹서 등에 응용하기 위해 높은 항복 전압 특성, 높은 컷-오프 주파수 특성, 높은 출력 전력 특성 획득을 위한 다양한 구조의 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMTs에 관한 연구가 보고되고 있다 [2-4].

AlGaIn/GaN HEMTs의 표면 상태를 제어하고 누설 전류를 감소시키기 위하여 Si₃N₄와 SiO₂와 같은 다양한 물질을 이용한 패시베이션에 관한 연구가 보고되어 왔다 [1,5]. 그러나, 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMTs의 누설 전류 메커니즘에 관한 보고는 아직 이루어지지 않았다. 또한 AlGaIn/GaN HEMTs의 누설 전류에 패시베이션이 미치는 영향에 관한 연구도 거의 보고되지 않았다.

본 연구의 목적은 이중 게이트와 SiO₂ 패시베이션을 적용한 AlGaIn/GaN HEMTs의 누설 전류 메커니즘을 분석하는 것이다. 본 연구에서 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMTs의 주 게이트, 추가 게이트, 드레인, 소스와 같은 모든 전극에서의 누설 전류를 측정하였다. 또한, 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMTs에 미치는 SiO₂ 패시베이션 효과에 관한 연구도 진행하였다.

실험 결과를 통해 AlGaIn/GaN HEMTs의 누설 전류는 SiO₂ 패시베이션 후 전에 비하여 1/100 수준으로 감소한 것을 확인할 수 있다. 패시베이션 되지 않은 소자 전극간의 큰 누설 전류는 표면 트랩에 의한 것이다. SiO₂ 패시베이션을 통해 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMTs의 누설 전류를 억제하였으며 소자의 누설 전류 메커니즘을 분석하였다.

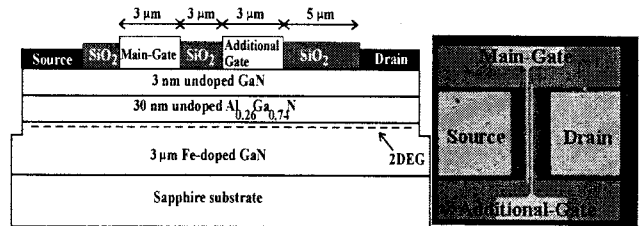
2. 본 론

2.1 소자의 구조 및 제작

AlGaIn/GaN 이중구조는 사파이어 기판의 c-plane 위에 MOCVD 방식을 이용하여 증착되었다. 실험에 사용한 웨이퍼의 구조는 그림 1에 나타난 바와 같다. 2DEG는 도핑되지 않은 30 nm 두께의 Al_{0.26}Ga_{0.74}N 층과 Fe로 도핑된 3 μm 두께의 GaN 층 사이에 형성되어 AlGaIn/GaN HEMTs의 채널로 작용한다. 소자의 분리를 위해 350 nm 두께의 메사 구조를 형성하였다. 오믹 콘택 메탈로 Ti/Al/Ni/Au 가 전자건 증착기를 사용하여 증착되었으며 그 후 870 °C 에서 30초간 어닐링되었다. 쇼트키 콘택 메탈로 Pt/Mo/Ti/Au

가 증착되었다. 오믹 콘택과 쇼트키 콘택 모두 리프트-오프 방식을 사용하여 패턴을 형성하였다. 홀 측정을 이용하여 패시베이션되지 않은 소자의 채널 농도와 전자 이동도를 상온에서 측정하였으며 그 값은 각각 6.37 x 10¹² cm⁻² 와 1810 cm²/(Vs) 였다. 마지막으로 400 nm 두께의 SiO₂ 막을 소자의 패시베이션을 위해 ICP-CVD를 이용하여 증착하였다.

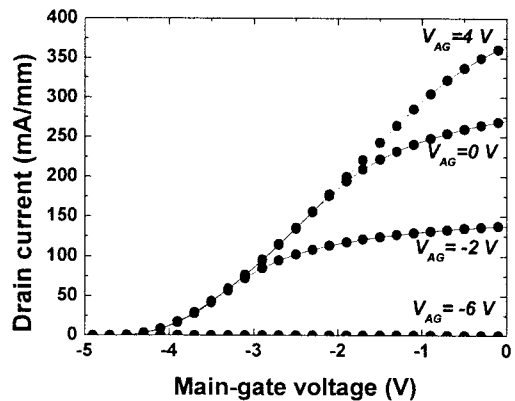
제작된 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMTs의 단면도는 그림 1에 나타나 있다. 주 게이트의 길이는 3 μm 이며 추가 게이트의 길이 역시 3 μm 이다. 주 게이트와 추가 게이트의 폭은 모두 100 μm 이다. 추가 게이트와 드레인 사이의 거리는 5 μm 이다.



〈그림 1〉 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMTs의 구조와 제작된 소자 사진

2.2 실험 결과 및 분석

그림 2는 AlGaIn/GaN HEMTs의 추가 게이트에 다양한 전압을 인가하여 측정된 전이 특성이다. 추가 게이트의 전압이 증가하면, 소자의 드레인 전류와 트랜스컨덕턴스가 모두 증가한다. 추가 게이트 전압이 감소하면, 추가 게이트 아래의 2DEG 전하가 공핍되고 순방향 드레인 전류가 감소한다. 추가 게이트 전압이 0 V와 4 V 일 때, 측정된 소자의 순방향 드레인 전류는 각각 270.6 mA/mm 와 365 mA/mm 이다. 추가 게이트의 전압이 드레인 전압보다 높으면, 추가 게이트의 쇼트키 콘택과 드레인이 순방향으로 도통되어 순방향 드레인 전류는 감소한다.

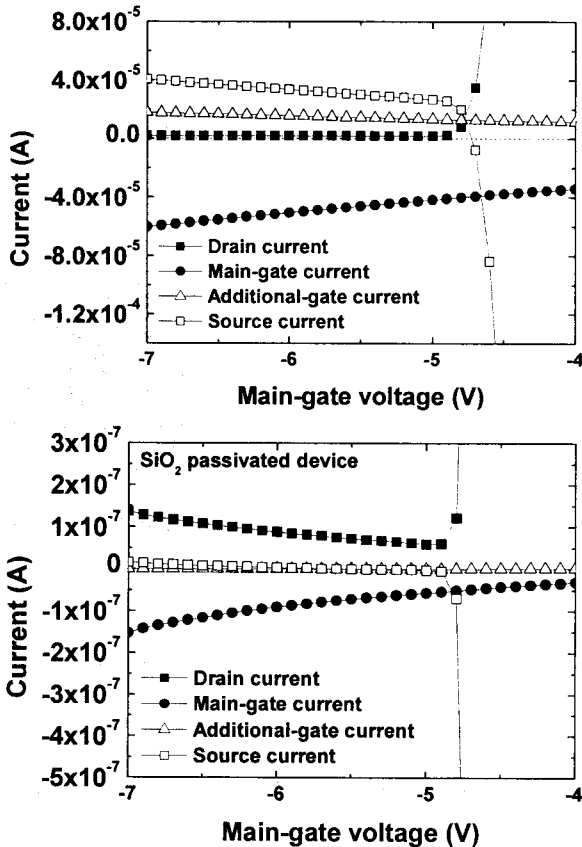


〈그림 2〉 SiO₂ 패시베이션된 AlGaIn/GaN HEMTs의 다양한 추가 게이트 전압에 따른 측정된 전달 특성

AlGaIn/GaN HEMTs의 누설 전류 메커니즘을 분석하기 위해 소자의 주 게이트와 추가 게이트, 드레인과 소스의 모든 콘택에서의 누설 전류를 측정하였다. 그림 3은 SiO₂로 패시베이션하기 전과 후 AlGaIn/GaN HEMTs의

측정된 누설 전류이다. 패시베이션되지 않은 소자의 누설 전류는 추가 게이트와 소스에서 발생하여 주 게이트로 흐른다. 패시베이션되지 않은 소자의 드레인 누설 전류는 추가 게이트의 누설 전류와 소스의 누설 전류에 비해 현저히 작은 값을 보였다. 패시베이션되지 않은 소자에서, 추가 게이트와 소스에서 발생하여 주 게이트로 흐르는 누설 전류는 무시할 수 없는 부분이다. 패시베이션되지 않은 소자의 추가 게이트로부터 주 게이트로 흐르는 누설 전류는 표면의 트랩에 의한 것이다.

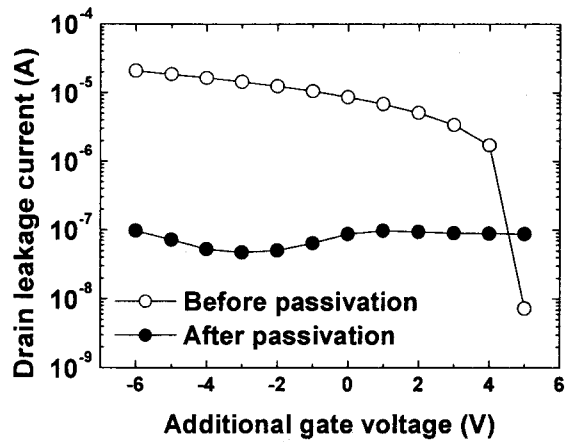
SiO₂ 패시베이션 후, 소자의 추가 게이트 누설 전류와 소스 누설 전류는 억제되었다. 패시베이션된 소자의 누설 전류는 드레인에서 주 게이트로 흘렀다. SiO₂ 패시베이션은 추가 게이트와 소스에서의 누설 전류를 제거하였다. SiO₂ 패시베이션 후 드레인의 누설 전류 역시 전에 비하여 1/100 수준으로 감소하였는데, 이는 표면 트랩을 통한 표면 누설 전류가 감소하였기 때문이다.



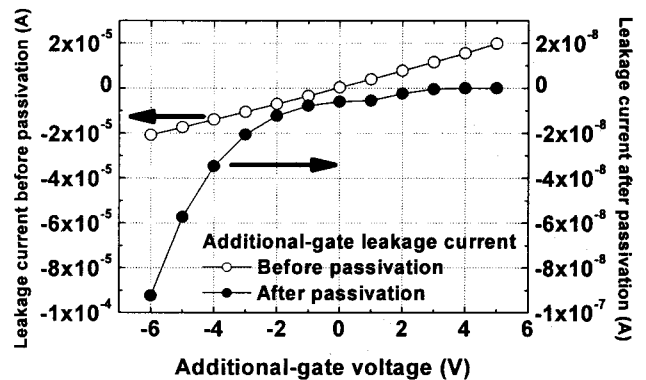
〈그림 3〉 (a) SiO₂ 패시베이션 하기 전과 (b) 후의 AlGaIn/GaN HEMTs의 측정된 누설 전류 ($V_{DS}=5\text{ V}$, $V_{M-Gate} = -6\text{ V}$)

그림 4는 다양한 전압이 추가 게이트에 인가될 때의 드레인 누설 전류이다. 패시베이션 되지 않은 소자의 추가 게이트 전압이 0 V와 4 V일 때의 드레인 누설 전류는 각각 8.54 μA 와 1.70 μA 였다. 패시베이션되지 않은 소자의 드레인 전류가 추가 게이트 전압 증가에 따라 감소한 이유는 드레인에서 추가 게이트로 흐르는 전류 때문이다. 패시베이션된 소자의 추가 게이트 전압이 -3 V 보다 작을 때에는 추가 게이트 전압의 전계 완화 효과가 주요하며 드레인 전류가 감소한다. 패시베이션된 소자의 추가 게이트 전압이 -3 V 이상으로 증가하면, 추가 게이트 아래의 채널 공핍 영역의 감소가 주요하며 드레인 누설 전류는 오히려 증가한다.

그림 5는 패시베이션되지 않은 소자의 측정된 게이트 누설 전류이다. 추가 게이트 전압이 4 V 일 때, 패시베이션되지 않은 소자와 패시베이션된 소자의 추가 게이트 누설 전류는 각각 15.58 μA 와 7.10 pA 였다. 패시베이션되지 않은 소자의 추가 게이트에서의 순방향 전류 주입은 추가 게이트의 전압이 0 V로 드레인 전압 5 V 보다 낮을 때 시작된다. 패시베이션된 소자의 경우, 추가 게이트의 전압이 5 V로 증가할 때, 추가 게이트의 누설 전류가 감소하였고 누설 전류 주입이 관측되지 않았다. SiO₂ 패시베이션은 AlGaIn/GaN HEMTs의 표면 트랩을 통해 발생하는 전극간의 누설 전류를 성공적으로 억제하였다.



〈그림 4〉 AlGaIn/GaN HEMTs의 추가 게이트 전압에 따른 측정된 드레인 누설 전류 ($V_{DS}=5\text{ V}$, $V_{M-Gate} = -6\text{ V}$)



〈그림 5〉 AlGaIn/GaN HEMTs의 추가 게이트 전압에 따른 측정된 게이트 누설 전류 ($V_{DS}=5\text{ V}$, $V_{M-Gate} = -6\text{ V}$)

3. 결 론

본 연구에서 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMTs를 제작하였고, 소자의 주 게이트, 추가 게이트, 드레인과 소스 등 모든 전극의 누설 전류를 측정하여 누설 전류 메커니즘을 분석하였다. 이중 게이트 소자의 SiO₂ 패시베이션과 후의 특성을 측정하였다. SiO₂ 패시베이션되지 않은 소자가 큰 누설 전류를 보이며 소스와 추가 게이트로부터 주 게이트로 누설 전류가 흐른 반면, SiO₂ 패시베이션 된 소자의 누설 전류는 드레인으로부터 주 게이트로의 누설 전류만이 존재하였다. SiO₂ 패시베이션은 소자의 드레인 누설 전류를 8.54 μA 에서 87.31 nA로 크게 감소시켰다. 이는 표면 트랩을 통해 흐르는 전자 전류의 흐름을 억제하였기 때문이다. SiO₂ 패시베이션은 AlGaIn/GaN HEMTs는 표면 트랩을 통해 흐르는 누설 전류를 억제하여 고전압 스위칭 응용분야에 적합할 것이다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] B. M. Green, "The effect of surface passivation on the microwave characteristics of undoped AlGaIn/GaN HEMTs" IEEE Electron Devices Lett., 21, 268, 2000
- [2] M. -W. Ha, "AlGaIn/GaN High-Electron-Mobility Transistor Employing an Additional Gate for High-Voltage Switching Applications", J. Appl. Phys., 44, 6385, 2005
- [3] C.-H. Chen, "Dual-gate AlGaIn/GaN modulation-doped field-effect transistors with cut-off frequencies $f_{sub T}/>60\text{ GHz}$ ", IEEE Electron Devices Lett., 21, 549, 2000
- [4] K. Shiojima, "High-power AlGaIn/GaN dual-gate high electron mobility transistor mixers on SiC substrates", Electron. Lett., 40, 775, 2004
- [5] M.-W. Ha, "A New ICP-CVD SiO₂ Passivations for High Voltage Switching AlGaIn/GaN HFETs", SSDM, 210, 2005