

논문 2009-46SD-4-2

사다리꼴 게이트 구조를 갖는 고내압 AlGaIn/GaN HEMT

(High Breakdown-Voltage AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor having a Trapezoidal Gate Structure)

김 재 무*, 김 수 진*, 김 동 호*, 정 강 민*, 최 흥 구**, 한 철 구**, 김 태 근***

(Jae-Moo Kim, Su-Jin Kim, Dong-Ho Kim, Kang-Min Jung, Hong Goo Choi, Cheol-Koo Hahn, and Tae-Geun Kim)

요 약

본 논문에서는 항복 전압 특성을 향상시키기 위한 사다리꼴 게이트 구조의 AlGaIn/GaN HEMT 구조를 제안하였으며 그 실현 가능성을 2차원 소자 시뮬레이터를 통해 조사하였다. 사다리꼴 게이트 구조의 사용으로 드레인 방향의 게이트 모서리 부근에서 나타나는 전기장의 집중을 효과적으로 분산되는 것이 시뮬레이션 결과에서 확인 되었다. 제안된 사다리꼴 게이트 AlGaIn/GaN HEMT 소자 구조에서 2DEG 채널을 따라 형성되는 전기장의 피크값은 4.8 MV/cm 에서 3.5 MV/cm 로 기존 구조의 AlGaIn/GaN HEMT에 비해 30 % 가량 감소하였으며, 그 결과로 인해 항복 전압은 49 V 에서 69 V 로 40 % 가량 증가하였다.

Abstract

We propose a trapezoidal gate AlGaIn/GaN high electron mobility transistor (HEMT) to improve the breakdown voltage characteristics and its feasibility is investigated by two-dimensional device simulations. The use of a trapezoidal gate structure appears to be quite effective in dispersing the electric fields concentrated near the gate edge on the drain side from the simulation result. We find that a peak value of the electric field along the 2-DEG channel is reduced by 30 %, from 4.8 to 3.5 MV/cm, and thereby, the breakdown voltage (V_{br}) of the proposed AlGaIn/GaN HEMT is increased by about 40 %, from 49 to 69 V, compared to those of the standard AlGaIn/GaN HEMT.

Keywords : AlGaIn, GaN, HEMT, trapezoidal gate, breakdown voltage

I. 서 론

갈륨 나이트라이드 (GaN) 는 큰 밴드갭 에너지와 높

은 전자 포화 속도 및 높은 열전도도 등으로 인해 고출력, 고주파 응용 분야에서 기존 갈륨비소(GaAs)를 이용한 소자보다 더 향상된 특성을 가지고 있다.

AlGaIn/GaN 이중접합구조(Heterostructure)를 이용한 고 전자 이동도 트랜지스터 (High Electron Mobility Transistor, HEMT)는 밴드갭이 다른 두 물질의 계면에서 전도대의 불연속성으로 인해 이차원 전자 가스(two dimensional electron gas, 2-DEG)가 생성되며, 3 MV/cm 이상의 높은 임계 전계를 가진다^[1].

이러한 특성을 이용하여 고출력을 실현하기 위해 항복 전압을 향상시키는 다양한 기술이 연구되어 왔다^[2-4]. Field-plate(FP)를 이용한 방법은 게이트 부근의 전

* 학생회원, *** 정회원, 고려대학교 전자전기공학과 (School of Electrical Engineering., Korea University)

** 정회원, 한국전자부품연구원 전자소재패키징연구센터 (Electronic Materials & Devices Packing Research Center., Korea Electronics Technology Institute)

* This work was supported by the IT R&D program of MKE/IITA. [2007-F-044-02, Development of GaN power amplifier for 4G base station]

접수일자: 2008년7월28일, 수정완료일: 2009년3월30일

계를 분산시켜 항복전압을 향상시키는 방법으로, 게이트-드레인 사이의 거리를 증가시키지 않고도 효과적으로 항복전압을 향상 시켜주는 장점이 있다. 그러나 FP 구조를 이용한 방법은 추가적인 게이트 캐패시턴스를 유발하며 공정이 복잡해지는 단점이 있다. 또한 FP 구조에서도 게이트 모서리 부분에서의 급격한 변화로 인해 전계의 집중이 나타나므로, 전계의 집중을 더욱 완화하고 캐패시턴스를 최소화 할 필요가 있다.

본 논문에서는 이러한 FP 구조의 단점을 보완하면서 전계가 고르게 분포되도록 하기 위하여 사다리꼴 형태의 게이트를 갖는 AlGaIn/GaN HEMT 구조를 제안하였다. 사다리꼴 게이트는 FP 구조와 같은 전계 분산효과를 가지면서도 게이트 모서리 부분의 완만한 변화로 인해 전계의 집중을 보다 완화 시킬 수 있으며, 추가적인 캐패시턴스를 최소화 하고, 기존 공정을 그대로 이용하면서 그 과정이 복잡하지 않은 장점을 가지고 있다. 이를 확인하기 위하여 Silvaco社의 ATLAS를 이용한 2차원 소자 전산모사를 통하여 소자에서의 전계 및 채널에서의 전계 분포를 분석하고 전류-전압 특성에서 항복 전압의 향상을 확인하였다^[5].

II. 제안된 소자의 구조

본 연구를 수행하기 위하여 기본 구조와 사다리꼴 게이트 구조의 AlGaIn/GaN HEMT 구조를 시뮬레이션하여 비교하였으며, 그 단면도를 그림 1에 나타내었다. 연구에서 사용된 AlGaIn/GaN HEMT 구조는 비의도적으로 도핑된(Unintentionally doped, UID) 1 um의 GaN-buffer 와 도핑되지 않은 25 nm의 Al_{0.3}Ga_{0.7}N층

위에 전극들이 위치되어 있으며, Si₃N₄로 passivation을 하였다. 또한 드레인과 소스의 오믹(Ohmic) 컨택을 위하여 드레인과 소스가 채널과 맞닿아 있는 구조를 사용하였다. 게이트의 길이(LG)는 1 um이며, 소스와 게이트 간의 거리(LSG)는 1 um, 게이트와 드레인 사이의 거리(LGD)는 4 um이고, 사다리꼴 구조에서 연장된 부분의 길이(LFP)는 1.4 um이다. Substrate 부분은 보통 SiC나 sapphire를 이용하지만 그 존재여부가 DC 시뮬레이션에 영향을 주지 않기 때문에 시뮬레이션의 속도 향상을 위해 생략하였다^[6].

III. 시뮬레이션 모델 및 가정

표 1은 시뮬레이션에 사용된 AlGaIn과 GaN의 전자 친화도, 밴드갭 에너지, 유전율, 전하이동도, 전자 포화 속도 등을 보여준다.

항복 전압 전산모사를 위해 Impact ionization model 을 사용하였으며, 그 일반적인 수식은 다음과 같다.

표 1. 물질 파라미터

Table 1. Material parameters.

Parameter	AlGaIn	GaN
affinity(eV)	3.82	3.4
eg300(eV)	3.96	3.47
align	0.8	0.8
permittivity	9.5	9.5
mun(cm ² /V-s)	600	1500
mup(cm ² /V-s)	10	20
vsat(10 ⁷ cm/s)	1.2x10 ⁷	2x10 ⁷
nc300(10 ¹⁸ /cm)	2.07	2.65
nv300(10 ¹⁹ /cm)	1.16	2.5

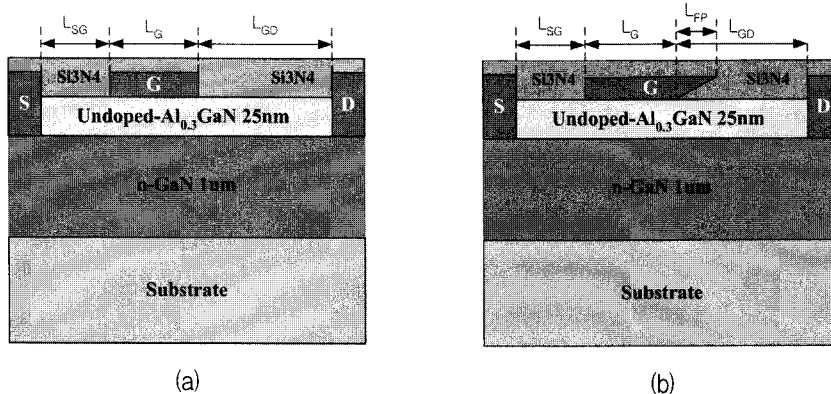


그림 1. (a) 기존의 AlGaIn/GaN HEMT 및 (b) 사다리꼴 게이트 AlGaIn/GaN HEMT 단면도

Fig. 1. Cross-sectional views of (a) the conventional AlGaIn/GaN HEMT and (b) the trapezoidal gate AlGaIn/GaN HEMT.

$$G = \alpha_n |\vec{J}_n| + \alpha_p |\vec{J}_p| \quad (1)$$

여기서 G 는 전자-정공쌍의 generation rate, α_n 과 α_p 은 ionization 상수값이다. 여기서, α_n 과 α_p 은 Selberherr의 Impact ionization model을 사용하였고^[7], 그 수식은 다음과 같다.

$$\alpha_n = AN \exp \left[- \left(\frac{BN}{E} \right)^{BETAN} \right] \quad (2)$$

$$\alpha_p = AP \exp \left[- \left(\frac{BP}{E} \right)^{BETAP} \right] \quad (3)$$

AN , AP , BN , BP 등은 상수값이며, 이것은 Silvaco社에서 제공되는 값을 이용하였다.

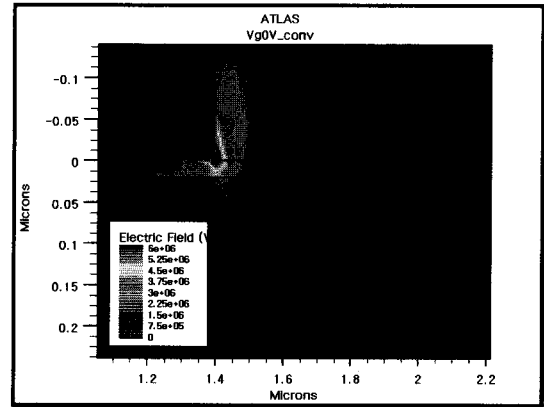
본 논문에서 소스와 드레인 전극은 완벽한 오믹으로 가정하였고, 게이트 전극의 쏘트키 장벽(Φ_B)은 1.6 V로 계산되었다^[8].

$$\Phi_B = 0.95 + 2.15 x_{Al} \quad (4)$$

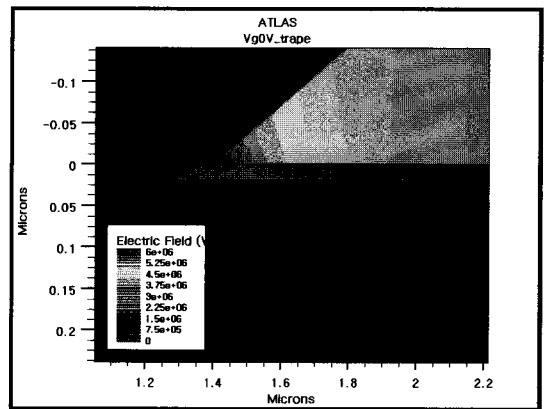
또한, AlGaIn/GaN 이종접합 구조에서 압전효과(Piezoelectric effect) 및 자발 분극(Spontaneous polarization)으로 인해 AlGaIn/GaN 계면에 형성되는 양의 면전하 농도(positive sheet charge density, $+\sigma_{pol}$)의 크기는 약 $1.0 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 으로 가정하였으며, 같은 농도의 음의 면전하(negative charge density, $-\sigma_{pol}$)가 AlGaIn 표면에 정의 하였다. 모델의 수치 계산에는 newton numerical method가 사용되었으며, 시뮬레이션에서의 온도 기본값은 300K이다^[9-12].

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 2(a), (b)는 기존 HEMT 구조와 사다리꼴 게이트 구조에서 게이트 가장자리 부근의 전기 분포를 보여준다. HEMT가 역방향 게이트-드레인 바이어스 상태일 때, 게이트에 전계가 집중되어 항복현상이 일어난다. 그림에서는 항복현상이 일어나기 전, 동일한 드레인 전압에서의 전기 분포의 차이를 보여준다. 기존 구조의 게이트에서는 모서리 부근의 급격한 변화로 인해 전계가 집중되어 있는 것을 볼 수 있으며 약 6 MV/cm 부근까지의 값을 가지고 있다. 반면, 사다리꼴 게이트 구조에서는 게이트의 완만한 변화로 인해 전계가 고르게 분산되어 기존 구조에 비해 전계의 집중이 완화되어 있는



(a)



(b)

그림 2. Gate Edge 부근의 전기 분포 (a) 기존의 AlGaIn/GaN HEMT (b) 사다리꼴 게이트 AlGaIn/GaN HEMT

Fig. 2. The electric field distribution near the gate edge of (a) the conventional AlGaIn/GaN HEMT and (b) the trapezoidal gate AlGaIn/GaN HEMT.

것을 볼 수 있으며 약 4 MV/cm 이하의 값을 가지고 있다.

그림 3(a), (b)는 기존 구조와 사다리꼴 구조에서 채널을 따라 형성되는 electric field의 크기를 보여준다.

두 구조 모두 게이트의 모서리 부분에서 전계의 피크 값이 형성되는 것을 확인할 수 있으며 사다리꼴 게이트 구조에서는 게이트에서 드레인 방향으로 전계가 넓게 분산되는 것을 볼 수 있다. 기존 구조와 사다리꼴 게이트 구조에서 전계의 피크값은 각각 4.8 MV/cm에서 3.5 MV/cm로 사다리꼴 게이트 구조에서 약 30 %정도 감소하였다.

그림 4는 기존구조와 사다리꼴 구조 AlGaIn/GaN HEMT의 breakdown 특성 곡선을 보여준다. 기존 구조의 HEMT는 약 49 V 부근에서 Breakdown이 발생하지만, 사다리꼴 구조의 HEMT에서는 약 69 V 부근에서

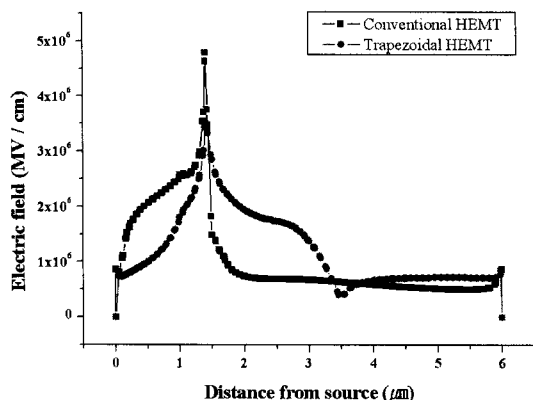


그림 3. 기존의 AlGaIn/GaN HEMT와 사다리꼴 게이트 AlGaIn/GaN HEMT에서 2DEG 채널을 따라 형성되는 전계의 분포

Fig. 3. The Electric field distribution along the 2DEG of the conventional AlGaIn/GaN HEMT and the trapezoidal gate AlGaIn/GaN HEMT.

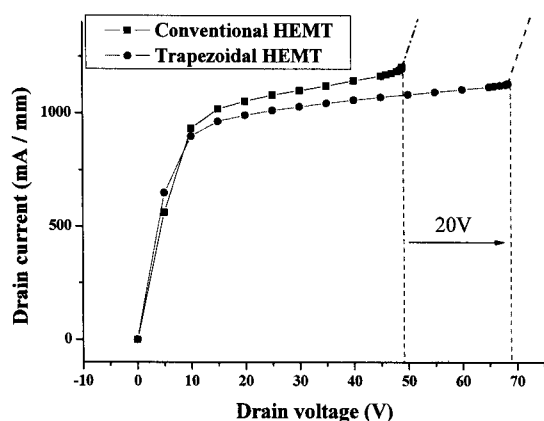


그림 4. 기존의 AlGaIn/GaN HEMT(사각형)와 사다리꼴 게이트 AlGaIn/GaN HEMT(원형)의 Breakdown 특성

Fig. 4. Breakdown characteristics of the conventional AlGaIn/GaN HEMT(square) and (b) the trapezoidal gate AlGaIn/GaN HEMT(circle).

Breakdown이 발생함으로써, 약 40%가량 향상된 특성을 보여준다.

V. 결 론

본 논문에서는 높은 항복 전압 특성을 가지는 사다리꼴 게이트 AlGaIn/GaN HEMT가 제안되었으며 2차원 시뮬레이션으로 전계 분포와 항복 전압 특성을 확인하여 검증하였다. 사다리꼴 게이트 AlGaIn/GaN HEMT는 드레인 방향의 게이트 모서리에 집중되는 전계를 효과

적으로 분산시켰으며, 기존 소자에서 게이트 모서리 전계의 피크값이 4.8 MV/cm 였던 것에 비하여, 제안된 소자의 게이트 모서리 전계의 피크값은 3.5 MV/cm로 30% 감소되었다.

이로 인하여 제안된 소자의 항복전압이 증가하였으며 항복 전압은 49 V에서 69 V로 40% 증가하였다. 사다리꼴 게이트 AlGaIn/GaN HEMT는 기존의 Field-plate 구조와 비슷한 역할을 하면서도 게이트 모서리에서의 급격한 변화와 추가적인 캐패시턴스의 발생을 최소화할 수 있으며 구조가 간단하기 때문에 기존의 감마(Gamma, Γ)형 게이트 등을 대신하여 고전압 스위치 소자 분야에 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. Russo, A. D. Carlo, "Influence of the Source-Gate Distance on the AlGaIn/GaN HEMT Performance.", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 54, No. 5, pp.1071-1075, May., 2007.
- [2] H. Xing, Y. Dora, A. Chini, S. Heikman, S. Keller, U.K. Mishra, "High breakdown voltage AlGaIn-GaN HEMTs achieved by multiple field-plates", IEEE Electron Device Lett., vol. 25, p. 161-163, 2004.
- [3] W. Saito, M. Kuraguchi, Y. Takada, K. Tsuda, I. Omura, T. Ogura, "Design optimization of high breakdown voltage AlGaIn-GaN power HEMT on an insulating substrate for RONA-VB tradeoff characteristics", IEEE Trans. on Electron Device, vol. 52, p. 106-111, 2005.
- [4] S. Kim and K. Yang, "Enhanced Breakdown Characteristic of AlGaIn/GaN HEMTs Using a Gate/Drain Double Field-Plate Structure", Extended Abstracts of the 2005 Int. Conf. on SSDM, p. 208-209, 2005.
- [5] Device simulation software Atlas, Atlas User's Manual, Silvaco international (2007).
- [6] A. F. M. Anwar and Elias W. Faraclas, "AlGaIn/GaN HEMTs: Experiment and simulation of DC characteristics," Solid-State Electronics, Vol. 50, 1998, pp. 1051-1056
- [7] S. Selberherr, "Analysis and Simulation of Semiconductor Devices", Springer-Verlag, Wien-New York. 1984.
- [8] A.F.M. Anwar, Elias W. Faraclas, "Schottky barrier height in GaN/AlGaIn heterostructures," Solid-State Electronics, Vol. 50, 2006, pp. 1041 -

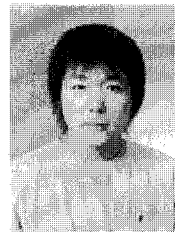
1045.
 [9] E. T. Yu and M.O. Manasreh, III-V Nitride Semiconductors: Applications & Devices (Taylor & Francis, New York, 2003).
 [10] Vassil Palankovski and Rudiger Quay, Analysis and Simulation of Heterostructure Devices (Springer, Wein New York, 2004).
 [11] R. Gaska, Q. Chen, J. Yang, A. Osinsky, M. Asif

Khan, and M. S. Shur, "High-Temperature Performance of AlGaIn/GaN HEMT's on SiC Substrates," IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, Vol. 18, 1997.
 [12] A.F.M. Anwar, Elias W. Faraclas, "Schottky barrier height in GaN/AlGaIn heterostructures," Solid-State Electronics, Vol. 50, 2006, pp. 1041 - 1045.

저 자 소 개



김 재 무(학생회원)
 2007년 고려대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 2007년~현재 고려대학교 대학원
 전자전기공학과 석사과정
 <주관심분야 : 반도체>



김 수 진(학생회원)
 2007년 건국대학교 전자공학과
 학사 졸업
 2007년~현재 고려대학교 대학원
 전자전기공학과 석사과정
 <주관심분야 : 반도체>



김 동 호(학생회원)
 2004년 광운대학교 전자재료
 공학과 학사 졸업
 2006년 광운대학교 대학원
 전자재료공학과 석사 졸업
 2006년~현재 고려대학교 대학원
 전자전기공학과 박사과정
 <주관심분야 : 반도체>



정 강 민(학생회원)
 2002년 고려대학교 전기전자전파
 공학부 학사 입학
 2008년 고려대학교 전기전자전파
 공학부 학사 졸업
 2008년~현재 고려대학교 대학원
 전자전기공학과 석사과정
 <주관심분야 : 반도체>

최 흥 구(정회원)
 2009년 현재 한국전자부품연구원 전자소재패키징
 연구센터 선임연구원

한 철 구(정회원)
 2009년 현재 한국전자부품연구원 전자소재패키징
 연구센터 책임연구원



김 태 근(정회원)-교신저자
 1997년 고려대학교 전자공학과
 박사졸업
 1997년 3월~1998년 5월 ECE
 Dept., University of
 California, San Diego, USA,
 Research Fellow

1998년 6월~2001년 2월 Electrotechnical
 Laboratory(ETL), Japan, NEDO Fellow
 2001년 3월~2002년 2월 삼성종합기술원
 포토닉스 랩 전문연구원
 2002년 3월~2004년 5월 광운대학교반도체 및
 신소재공학과, 조교수
 2004년 6월~현재 고려대학교 전기전자전파
 공학부 교수
 <주관심분야 : 반도체>