

논문 2010-47SD-6-1

계단형 게이트 구조를 이용한 AlGaN/GaN HEMT의 전류-전압특성 분석

(Analysis of Current-Voltage characteristics of AlGaN/GaN HEMTs
with a Stair-Type Gate structure)

김 동 호*, 정 강 민**, 김 태 근***

(Dong Ho Kim, Kang Min Jung, and Tae Geun Kim)

요 약

본 논문에서는 고출력·고이득 특성을 갖는 고전자이동도 트랜지스터 (high-electron mobility transistor, HEMT)를 구현하기 위하여 계단형 구조의 게이트 전극을 갖는 AlGaN/GaN HEMT를 제안하였고, 소자의 DC 특성의 향상 가능성을 확인하기 위하여 단일 게이트 전극을 갖는 HEMT 및 field-plate 구조의 게이트 전극을 갖는 HEMT 소자와의 특성을 비교·분석하였다. 상용 시뮬레이터를 통해 시뮬레이션 결과, 본 연구에서 제안한 계단형 구조의 게이트 전극을 갖는 AlGaN/GaN HEMT는 드레인 전압의 인가 시, 소자의 내부에서 발생하는 전계가 단일 게이트 전극을 갖는 HEMT에 비해 약 70% 정도 감소하는 특성을 갖는 것을 확인하였고, 전달이득 (transconductance, g_m) 특성 역시 단일 게이트 전극구조의 HEMT나 field-plate 구조를 삽입한 HEMT에 비해 약 11.4% 정도 향상된 우수한 DC 특성을 갖는 것을 확인하였다.

Abstract

We present simulation results on DC characteristics of AlGaN/GaN HEMT having stair-type gate electrodes, in comparison with those of the conventional single gate AlGaN/GaN HEMTs and field-plate enhanced AlGaN/GaN HEMTs. In order to reduce the internal electric field near the gate electrode of conventional HEMT and thereby to increase their DC characteristics, we applied three-layered stacking electrode schemes to the standard AlGaN/GaN HEMT structure. As a result, we found that the internal electric field was decreased by 70% at the same drain bias condition and the transconductance (g_m) was improved by 11.4% for the proposed stair-type gate AlGaN/GaN HEMT, compared with those of the conventional single gate and field-plate enhanced AlGaN/GaN HEMTs.

Keywords : Gallium-Nitride (GaN), high-electron mobility transistors (HEMTs), electric-field distribution, DC characteristics

I. 서 론

최근 전자산업의 급속한 발전과 이를 기반으로 하는

무선 정보통신기술의 발전은 개인 휴대용 단말기에서부터 상업용, 군사용 밀리미터파 집적소자 (millimeter-wave integrated circuit, MMIC)에 이르기까지 전 분야에 걸쳐 그 수요가 점차 확대되고 있으며, 초고주파 (radio-frequency, RF) 대역에서 동작하는 초고속 정보통신시스템에 필요한 고속·고출력 특성을 갖는 전자소자의 개발이 절실히 요구되고 있다^[1-3]. III-nitride 기반 전자소자 (GaN-based electronics)는 상용화된 Si이나 III-V족 화합물반도체에 비해 매우 큰 항복전압과 최대 전류값, 뛰어난 고온 안정성, 높은 전자포화속도 등과

* 정회원, ** 학생회원, *** 정회원-교신저자, 고려대학교 전자전기공학과

(School of Electronics and Electrical Engineering, Korea University)

※ 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: 2009년10월21일, 수정완료일: 2010년4월26일

같은 우수한 물성을 갖고 있어 차세대 고속·고출력 전자소자 분야의 소재로서 주목받고 있다^[4~6].

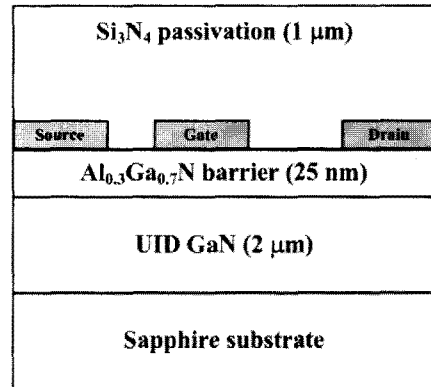
이러한 우수한 물성을 바탕으로 하여 제작된 질화물 고전자-이동도 트랜지스터 (high-electron mobility transistors)는 서로 다른 물성을 갖는 AlGaIn층과 GaN층 간 이종접합 (hetero-junction) 구조에서 발생하는 두 물질 간 큰 전도대 (conduction band)의 불연속성 (discontinuity)을 이용하여 약 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 의 고농도의 이차원 전자가스 (2-dimensional electron gas, 2-DEG) 층이 형성되어 빠른 속도의 전자전송을 가능케 하는 이점을 갖고 있어서 고속 전자소자에 널리 사용되고 있다. 하지만, 이러한 AlGaIn/GaN HEMT는 사파이어 (Al_2O_3) 기판과 GaN층 간 격자 부정합 (lattice mismatch) 및 큰 열팽창계수 (thermal expansion coefficient, TEC) 차이로 인해 발생하는 높은 결함밀도 ($10^8 \sim 10^9 \text{ cm}^{-2}$)로 인해 homo-epitaxial이 어렵다는 단점이 있다^[7~9]. 또한, 단일 게이트 전극구조를 갖는 HEMT의 경우, 소자 동작 시 게이트 전극에서 발생하는 전기장의 집중현상 (electric-field concentration)로 인한 저전압 인가 시 발생하는 게이트 전극의 항복현상 및 누설전류 급증과 캐리어-캐리어 scattering 효과에 의한 소자의 내부온도 증가로 인하여 HEMT 소자의 고출력 동작을 저해하는 문제점을 발생시키게 된다^[10].

본 연구에서는 2차원 반도체 소자 시뮬레이터인 ATLAS 프로그램을 이용하여 사파이어 기판 상에 성장된 AlGaIn/GaN HEMT의 DC 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이와 더불어, 고출력·고이득 특성을 갖는 HEMT 소자 구조의 확보를 위하여 계단형 구조의 적층 게이트 전극을 갖는 AlGaIn/GaN HEMT의 구조를 제안하였으며, DC 특성 비교를 위하여 단일 게이트 전극을 갖는 HEMT 및 field-plate 게이트 구조의 HEMT와의 DC 전류-전압 (I-V) 특성과 전달이득 (g_m) 특성을 비교·분석하였다.

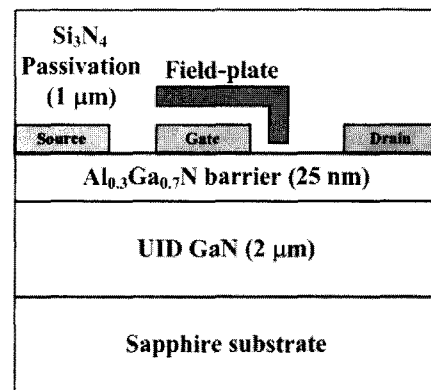
II. 실험

1. 시뮬레이션을 위한 AlGaIn/GaN HEMT 구조

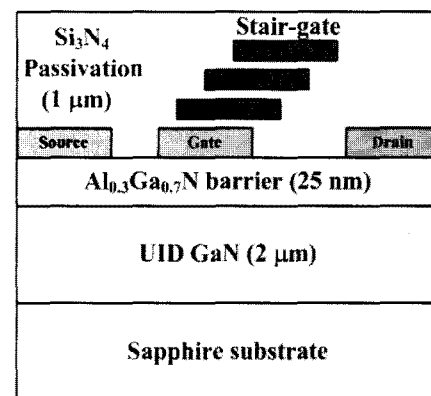
그림 1은 본 연구를 위해 제안한 3가지 형태의 AlGaIn/GaN HEMT의 단면도이다. 본 연구에서는 게이트 전극의 형태에 따른 HEMT의 DC 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 게이트 전극구조를 제외한 기타 구조들은 모두 동일한 조건 하에서 실험을 수행하



(a) 단일 게이트 전극을 갖는 AlGaIn/GaN HEMT의 구조도



(b) Field-plate가 삽입된 AlGaIn/GaN HEMT의 구조도



(c) 본 연구에서 제안하는 계단형 게이트 전극을 갖는 AlGaIn/GaN HEMT의 구조도

그림 1. 본 연구를 위해 제안한 단일 게이트 전극, field-plate 삽입구조 및 계단형 게이트 전극을 갖는 AlGaIn/GaN HEMT의 구조도

Fig. 1. Three types of AlGaIn/GaN HEMT structures, (a) single gate HEMT, (b) Field-plate enhanced HEMT and (c) stair-type gate HEMT.

였다. 시뮬레이션에 사용된 HEMT의 구조는 그림 1에 나타난 바와 같이 사파이어 기판 상에 $2 \mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 unintentionally-doped (UID) GaN층과 25 nm의 undoped $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 장벽층으로 구성되며, 소자의 누설

전류 (leakage current) 차단 및 소자의 passivation을 위한 1 μm 두께의 Si_3N_4 층으로 구성된다. 또한, 게이트 전극의 길이 (L_G)는 0.5 μm 이며, 소스 전극과 게이트 전극 간 이격거리 (L_{SG}) 및 소스 전극과 드레인 전극 간의 이격거리(L_{SD})는 각각 1 μm 와 8 μm 로 가정하였다.

2. 시뮬레이션을 위한 물리모델 (physical model)

본 연구를 위해 사용한 ATLAS 시뮬레이터 상의 질화물 물질 및 물리 모델들은 다음과 같다. 아래의 표 1은 본 연구를 위해 사용된 질화물반도체의 물성값들을 나타내며, 특히 HEMT 소자의 전기적 특성 산출을 위한 에너지밴드갭 (E_g), 전자친화도 (χ), 유전율 (ϵ), 전자 이동도 (μ), 전자 포화속도 (v_{sat}) 등을 나타내고 있다.

또한, 본 시뮬레이션을 위해 적용한 물리모델로는 HEMT 소자에 인가되는 전계에 따른 캐리어의 거동에 대한 field-dependent mobility (fldmob) 모델, drift-diffusion mobility (DDM) 모델 및 게이트 전극에서의 캐리어들 간의 impact ionization 효과를 고려하기 위하여 Selberherr 모델을 적용하였다. 이와 더불어, 시뮬레이션 시 HEMT 소자의 온도는 온도상승에 따른 전기적 특성의 변화를 제한하기 위하여 온도를 실온 (room temperature)으로 한정하였다. 본 시뮬레이션에 사용된 물리모델은 다음과 같다.

$$\mu_n(E) = \mu_{n0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{n0} E}{V_{SATN}} \right)^{BN}} \right]^{1/BN}$$

$$\mu_p(E) = \mu_{p0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{p0} E}{V_{SATP}} \right)^{BP}} \right]^{1/BP}$$
(1)

$$G = \alpha_n \vec{J}_n + \alpha_p \vec{J}_p \quad \text{where,} \quad (2)$$

$$\alpha_n = AN \exp \left[- \left(\frac{BN}{E} \right)^{\beta N} \right], \quad \alpha_p = AP \exp \left[- \left(\frac{BP}{E} \right)^{\beta P} \right]$$

표 1. 시뮬레이션을 위해 적용한 AlGaIn과 GaN의 물성 파라미터들

Table 1. Material parameters of AlGaIn and GaN for the 2-dimensional simulation.

Parameter	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$	GaN
밴드갭 에너지 (E_g)	3.87 eV	3.42 eV
전자 친화도 (χ)	4 eV	4.31 eV
유전율 (ϵ)	8.8	8.9
전자 이동도 (μ)	550 cm^2/Vs	1000 cm^2/Vs
전자포화속도 (v_{sat})	1.2x10 ⁷ cm/s	2x10 ⁷ cm/s

전계에 따른 캐리어의 거동을 나타낸 수식 (1)에서의 V_{satn} 과 V_{satp} 는 전자와 정공의 포화 속도이며, BN 과 BP 는 캐리어들의 mobility와 관련된 fitting 파라미터로 본 시뮬레이션에서는 AlGaIn과 GaN영역에서 각각 1과 2로 가정하였고, μ_{n0} 와 μ_{p0} 는 전자와 정공의 low-field mobility를 나타낸다. 또한, 게이트 전극에서 발생하는 항복현상에 대한 수식 (2)에서 G 는 전자-정공쌍의 generation rate를 나타내며, α_n 과 α_p 는 각각 Selberherr의 impact ionization model의 ionization 상수값을 의미한다.

본 연구를 위해 적용한 질화물반도체의 물리모델들은 AlGaIn/GaN 이종접합층 내에서 발생하는 이차원 전자가스층 (2-dimensional electron gas, 2 DEG) 내에서 캐리어가 전계에 의해 받는 영향에 대해 물리적인 분석을 가능케 해주며, 또한 낮은 세기의 전계에서 높은 세기의 전계의 영향을 받는 상황에 대해 유연한 수치적인 분석을 가능케 해준다. AlGaIn/GaN HEMT의 전기적 특성에 대한 원활한 분석을 위해 AlGaIn 장벽층과 소스 전극/드레인 전극 간의 접촉을 완벽한 오믹접촉으로 가정하였고, 게이트 전극의 쇼트키 장벽 (ϕ_B)은 아래의 수식 (3)을 이용하여 1.5 V로 계산하였으며, AlGaIn/GaN HEMT의 2 DEG를 발생시키는 요인인 piezo-electric polarization과 spontaneous polarization을 고려하여 면전자농도 (sheet charge density, n_s)를 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 로 가정하였다.

$$\phi_B = 0.95 + 2.15x_{Al} \quad (3)$$

III. 결과 및 토론

그림 2는 각각 다른 3가지 형태의 AlGaIn/GaN HEMT의 내부 전계분포에 대한 시뮬레이션 결과이다. 세 구조 모두 동일하게 열 모델을 사용하여 T=300 K에서 드레인 전압을 0 V로 고정하여 인가한 결과, 단일 게이트 전극구조의 HEMT의 게이트 부에서 발생하는 전계는 약 580 kV로써 매우 큰 전계의 집중현상이 발생하는 것을 확인하였다. 또한, field-plate를 삽입한 HEMT는 단일 게이트 전극구조보다는 다소 감소한 533 kV의 전계집중현상이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 단일 게이트 전극구조나 field-plate를 삽입한 구조 모두 게이트 전극의 모서리 부 (edge)에 집중되는 전계를 원활히 분산시키지 못하는 현상에서 기인된 것

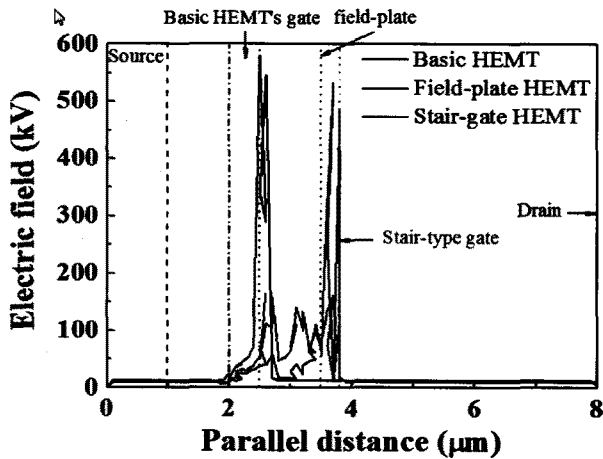


그림 2. 단일 게이트 전극구조, field-plate 구조 및 계단형 게이트 전극구조를 갖는 AlGaN/GaN HEMT의 내부 전계분포 시뮬레이션 결과

Fig. 2. Internal field distribution results of three types of the AlGaN/GaN HEMTs.

으로 생각된다. 한편, 본 연구에서 제안한 계단형 게이트 전극구조의 AlGaN/GaN HEMT의 경우, 게이트 전극부에 집중되는 전계가 약 160 kV로 앞서 시뮬레이션을 수행한 두 종류의 HEMT에 비해 약 70% 이상 감소한 전계의 분포특성을 확인할 수 있었으며, 계단형 게이트가 존재하는 전면적에 걸쳐 고르게 분포하는 특징을 갖는 것을 확인하였다. 이는 단일 게이트 전극이나 field-plate 구조가 삽입된 HEMT 구조와는 달리 계단형 게이트 전극구조의 HEMT의 경우, 소스-드레인 전극 간 바이어스 인가 시 계단형으로 적층된 게이트 전극구조로 인해 전계가 게이트 전극의 모서리 부에 집중되지 않고 점층적으로 완화되어 전계의 분산이 효과적으로 이루어진 현상에 기인된 것으로 사료된다.

그림 3은 앞서 수행한 HEMT의 내부 전계 및 이로 기인하는 impact ionization 효과에 의한 격자내부의 열 생성 간 상관관계를 규명하고자 수행한 열 특성 시뮬레이션 결과이다. 세 구조 모두 동일하게 $T=300$ K에서 드레인 전압을 0 V로 고정하여 인가한 결과, 외부로부터 인가되는 바이어스에 의해 소자 내부에서 발생하는 격자온도의 상승은 단일 게이트 전극구조의 HEMT와 field-plate 구조를 적용한 HEMT, 본 연구에서 제안한 계단형 게이트 구조의 HEMT가 각각 447 K, 424 K 및 433 K의 격자온도가 상승하는 것을 확인하였다. 이러한 세가지 구조의 HEMT 열 특성 시뮬레이션 결과는 앞서 그림 2에서 확인한 내부 전계분포 시뮬레이션 결과와 다소 불일치하는 것으로서, 소자의 내부에서 발생하

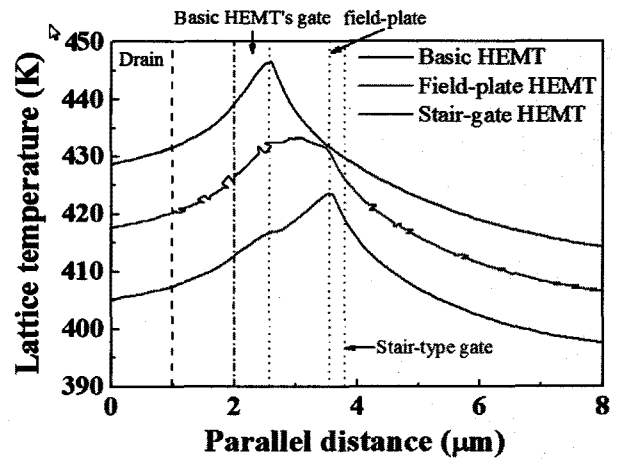


그림 3. 단일 게이트 전극구조, field-plate 구조 및 계단형 게이트 전극구조를 갖는 AlGaN/GaN HEMT의 impact ionization에 의한 격자 내 열 생성 특성 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Lattice temperature results of three types of the AlGaN/GaN HEMTs.

는 열 특성은 외부 바이어스에 의해 발생하는 전계 뿐만 아니라 게이트 전극이 형성되어 있는 면적에 의해서도 영향을 받는 것으로 사료된다.

그림 4는 각각 단일 게이트 구조, field-plate 구조 및 계단형 게이트 전극구조를 갖는 HEMT의 DC 드레인 전압-드레인 전류 (I_d-V_d) 특성으로써 세 구조 모두 기판을 사파이어 기판으로 가정하고, $T=300$ K에서 드레인 전압을 0 V에서부터 20 V까지 증가시키면서 시뮬레이션한 결과이다. 동일한 f_{ldmob} , DDM 모델 및 Selberherr impact ionization 모델을 사용할 결과, 단일 게이트 전극구조의 HEMT에서는 게이트 전압 (V_g)의 음의 값을 갖는 -2 V 및 -1 V 하에서, 드레인 전압 (V_d)이 20 V까지 인가됨에 따라 드레인 전류가 급격히 증가하는 경향을 볼 수 있다. 또한, 게이트 전압이 2 V까지 증가함에 따라 드레인 전류의 감소가 발생하는 특성을 확인할 수 있다. 이러한 특성의 원인으로서는 초기 인가되는 음의 값을 갖는 게이트 전압 하에서는 소스-드레인 전극 간 인가되는 바이어스에 의해 게이트 주변 부에서 발생하는 항복현상 (breakdown)이 발생하여 작은 게이트 전압 하에서도 급격한 드레인 전류가 발생하지만, 게이트 전압이 증가할수록 HEMT 내부에서 발생하는 격자의 열 생성으로 인한 드레인 전류의 감소로 인한 것으로 생각된다.

반면, field-plate 구조의 HEMT나 본 연구에서 제안한 계단형 게이트 전극구조를 갖는 HEMT에서는 단일

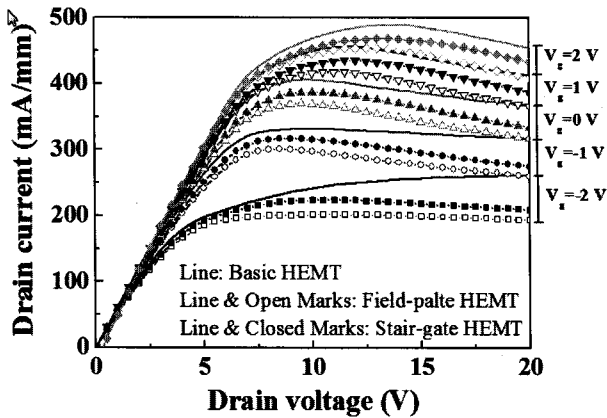


그림 4. 단일 게이트 전극구조, field-plate 삽입구조 및 계단형 게이트 전극구조 AlGaIn/GaN HEMT의 I_d-V_d 특성 시뮬레이션 결과

Fig. 4. DC I_d-V_d characteristics of three types of the AlGaIn/GaN HEMTs.

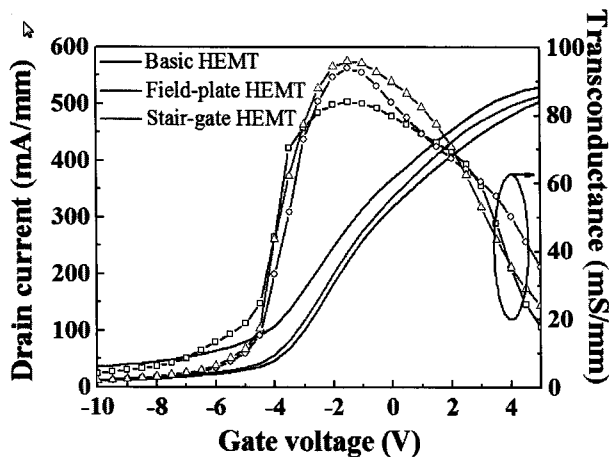


그림 5. 단일 게이트 전극구조, field-plate 구조 및 계단형 게이트 전극구조를 갖는 AlGaIn/GaN HEMT의 I_d-V_g 특성 및 g_m 특성의 시뮬레이션 결과

Fig. 5. DC I_d-V_g and g_m characteristics of three types of the AlGaIn/GaN HEMTs.

게이트 전극을 갖는 HEMT에 비해 게이트 전극 주변에서 발생하는 항복현상이 감소하기 때문에 음의 게이트 전압 인가 시에도 급격한 드레인 전류의 증가가 억제되는 현상을 확인할 수 있다. 하지만, 이러한 field-plate HEMT나 계단형 게이트 전극구조를 갖는 HEMT의 경우, 기존의 게이트 전극의 상부에 전계의 분산을 위한 추가적인 구조를 적용한 관계로 원활한 열 분산이 이루어지지 않아 소자의 내부에서 발생하는 self heating에 의한 hot electron의 주입 및 GaN층으로의 trap 현상으로 인한 전류붕괴 (current collapse) 현상이 두드러지게 발생하여 드레인 전류가 급격히 감소하는 현상을 확인할 수 있다.

그림 5는 단일 게이트 전극구조, field-plate 구조 및 계단형 게이트 전극구조를 갖는 AlGaIn/GaN HEMT의 전달이득 (transconductance, g_m) 특성과 게이트 전압-드레인 전류 (I_d-V_g) 간 전기적 특성을 시뮬레이션한 결과이다. 세가지 구조의 HEMT로부터 확보할 수 있는 최대 전달이득 ($g_{m,max}$)은 각각 84, 94, 96 mS/mm로써, 기준구조인 단일 게이트 전극구조의 HEMT에 비해, 본 연구에서 제안한 계단형 게이트 전극을 갖는 HEMT의 경우 약 11.4%의 향상된 최대 전달이득을 갖는 구조임을 확인할 수 있었으며, 기 상용화된 field-plate HEMT에 비해서도 약 2 mS/mm 정도 큰 전달이득을 얻을 수 있는 향상된 구조임을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 고출력·고이득 특성을 갖는 AlGaIn/GaN HEMT의 구현을 위하여 계단형 게이트 전극구조를 적용한 HEMT 구조를 제안하였고, 2차원 소자 시뮬레이션을 통해 DC 전류-전압 특성 및 전달이득 (g_m) 특성을 비교·분석하였다. 동일한 드레인 바이어스를 인가하였을 때, 계단형 게이트 전극구조의 AlGaIn/GaN HEMT는 단일 게이트 전극구조의 HEMT에 비해 약 70% 정도 감소한 내부 전계특성을 갖는 것을 확인할 수 있었으며, 계단형 게이트 전극구조를 갖는 HEMT의 DC I_d-V_d 특성은 단일 게이트 전극 HEMT에서 비해 낮은 게이트 전압 인가 시에도 드레인 전류의 항복현상이 발생하지 않는 구조적 특성을 갖는 것을 확인하였다. 또한, 최고 전달이득도 단일 게이트 전극구조 HEMT에 비해 약 11.4% 향상된 g_m 특성을 갖는 구조임을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] U. K. Mishra, P. Parikh, and Y.-F. Wu, "AlGaIn/GaN HEMTs - an overview of device operation and applications," in Proceedings of IEEE, Vol. 90, pp: 1022-1031, 2002.
- [2] Egawa T, Ishikawa H, Umeno M, and Jimbo T, "Recessed gate AlGaIn/GaN modulation-doped field-effect transistors on sapphire," Appl Phys Lett, Vol. 76, pp. 121-123, 2000.
- [3] Ohno Y, Kuzuhara M, "Application of GaN-based heterojunction FETs for advanced

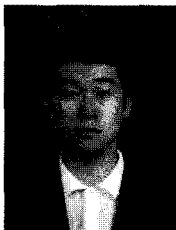
- wireless communication," IEEE Trans Electron Dev, Vol. 48, pp. 517-523, 2001.
- [4] Keller S, Yi-Feng Wu, Parish G., Naiqian Ziang, Xu J. J, Keller B. P, DenBaars, S. P, Mishra U. K., "Gallium nitride based high power heterojunction field effect transistors: process development and present status at UCSB," IEEE Trans Electron Dev, Vol. 48, pp. 552-559, 2001.
- [5] M. S. Shur, "GaN based transistors for high power applications," Solid-State Electronics, Vol. 42, pp. 2131-2138, 1998.
- [6] J. M. Redwing, M. A. Tischler, J. S. Flynn, S. Elhamri, M. Ahoujja, R. S. Newrock, and W. C. Mitchel, "Two-dimensional electron gas properties of AlGaIn/GaN heterostructures grown on 6H-SiC and sapphire substrates," Appl Phys Lett, Vol. 69, pp. 963-965, 1996.
- [7] S. Arulkumaran, T. Egawa, and H. Ishikawa, "Studies of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors on 4-in. diameter Si and sapphire substrates," Solid-State Electronics, Vol. 49, pp. 1632-1638, 2005.
- [8] P. Javorika, A. Alam, M. Wolter, A. Fox, M. Marso, M. Heuken, H. Lüth, and P. Kordo's, "AlGaIn/GaN HEMTs on (111) Silicon Substrates," IEEE Electron Device Letters, Vol. 23, pp. 4-6, 2002.
- [9] B. J. Thibeault, B. P. Keller, P. Fini, U. K. Mishra, C. Nguyen, N. X. Nguyen, and M. Le, "High performance and large area flip-chip bonded AlGaIn - GaN MODFETs," in IEDM Tech. Dig., pp.569 - 572, 1997.
- [10] V. M. Asnin, F. H. Pollak, J. Ramer, M. Schurman, and I. Ferguson, "High spatial resolution thermal conductivity of lateral epitaxial overgrown GaN - sapphire (0001) using a scanning thermal microscope," Appl. Phys. Lett., Vol. 75, pp. 1240 - 1242, 1999.

저 자 소 개



김 동 호(정회원)
2004년 광운대학교 전자재료
공학과 학사 졸업
2006년 광운대학교 대학원 전자
재료공학과 석사 졸업
2006년~현재 고려대학교 전자
전기 공학과 박사과정

<주관심분야 : 반도체>



정 강 민(학생회원)
2008년 고려대학교 전기전자전파
공학부 학사 졸업
2010년 고려대학교 전자전기
공학과 석사 졸업

<주관심분야 : 반도체>



김 태 근(정회원)-교신저자
1997년 고려대학교 전자공학과
박사 졸업
1997년~1998년 ECE Dept.,
Univ. of California, San
Diego, USA, Research
Fellow

1998년~2001년 Electrotechnical Laboratory
(ETL), Japan, NEDO Fellow

2001년~2002년 삼성종합기술원 포토닉스 랩
전문연구원

2002년~2004년 광운대학교 반도체 및 신소재
공학과 조교수

2004년~현재 고려대학교 전기전자전파공학부
교수

<주관심분야 : 반도체>