

AlGaN/InGaN HEMTs의 고성능 초고주파 전류 특성

DC and RF Characteristics of AlGaN/InGaN HEMTs Grown by Plasma-Assisted MBE

이 종 욱

Jong-Wook Lee

요 약

본 논문에서는 MBE로 성장한 AlGaN/InGaN/GaN 에피층으로 제작된 GaN HEMTs의 특성을 분석하였다. 게이트 전극 길이가 0.5 μm 로 제작된 소자는 비교적 평탄한 전류 전달 특성을 나타내었으며 최대 전류 880 mA/mm, 최대 전달정수 156 mS/mm, 그리고 f_T 와 f_{MAX} 는 각각 17.3 GHz와 28.7 GHz가 측정되었다. 또한 표면 처리되지 않은 AlGaN/InGaN HEMT의 경우 기존의 AlGaN/GaN HEMT와는 달리 펄스 전류 동작 상태에서 전류 와해 현상(current collapse)이 발생하지 않음이 확인되었다. 이 연구 결과는 InGaN를 채널층으로 사용할 경우 표면에 존재하는 트랩에 의한 전류 와해 현상이 발생하지 않는 고성능, 고출력의 GaN HEMT를 제작할 수 있음을 보여준다.

Abstract

This paper reports on the DC and RF characteristics of AlGaN/InGaN/GaN high electron-mobility transistors (HEMTs) grown by molecular beam epitaxy(MBE) on sapphire substrates. The devices with a 0.5 μm gate-length exhibited relatively flat transconductance(g_m), which results from the enhanced carrier confinement of the InGaN channel. The maximum drain current was 880 mA/mm with a peak g_m of 156 mS/mm, an f_T of 17.3 GHz, and an f_{MAX} of 28.7 GHz. In addition to promising DC and RF results, pulsed I-V and DC current-switching measurements showed little dispersion in the unpassivated AlGaN/InGaN HEMTs. These results suggest that the addition of In to the GaN channel improves the electron transport characteristics as well as suppressing current collapse that is related to the surface trap states.

Key words : GaN, InGaN, Molecular Beam Epitaxy(MBE), HEMTs

I. 서 론

질화계 화합물 GaN는 청색 발광 다이오드나 레이저 다이오드 같은 광학소자의 응용뿐만 아니라 고출력, 고주파 전자소자로도 유용한 물성을 지니고 있는데, 이는 높은 임계 전압, 전자 이동도, 그리고 열전도등 고출력, 고주파 전자소자에 필수적인 요소를 모두 가지고 있기 때문이다. 질화계 GaN는 AlGaN/GaN 형태의 이종 접합이 가능하여 전자소자로 이용될 경우 고출력, 고주파수 동작이 요구되는

응용에 아주 적합하다^[1]. 또한 GaN 기반 소자의 경우 600°C 정도의 고온에서도 고속, 고출력 특성을 발휘할 수 있고 화학물질에 대한 탁월한 내부식성을 지니고 있다^[2]. GaN HEMT는 고출력 특성으로 인해 향후 2~3년 내에 이동 통신 기지국의 고출력 증폭기 시장에 선보일 것으로 예상된다. 높은 항복전압과 전류 구동능력으로 소자 단위 면적당 출력 밀도가 높아 고출력을 더 작은 회로에서 얻을 수 있기 때문에 기존 silicon 기반의 laterally diffused metal oxide semiconductor(LDMOS)에 비해 회로 구성이 간단해

경희대학교 전파통신공학과(Department of Radio Communication Engineering, Kyung Hee University)

· 논문 번호 : 20040522-03S

· 수정완료일자 : 2004년 7월 30일

진다. GaN HEMT의 기판으로 사용되는 SiC는 높은 열전도도(3.3 W/cm-K)를 가지고 있어 GaN HEMT를 사용하는 전력증폭기의 경우 우수한 자체 열 발산 기능으로 냉각 설비가 차지하는 면적과 가격을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 뛰어난 선형성에 대한 결과도 보고되었으며^[3], 현재 GaN HEMTs를 이용한 기지국용 고출력 증폭기의 신뢰도에 대한 연구도 활발하다^{[4],[5]}. 자동차 엔진 제어부에도 GaN 기반의 소자 응용이 활발히 이루어지고 있는데, GaN 기반 소자는 비교적 고온에서도 동작 특성이 우수하고 세라믹성 재질로 인한 내구성과 강인성으로 인해 기계적인 제어 시스템을 더욱 경량인 전자 시스템으로 교체할 수 있을 전망이다. 또한, 우수한 발열 기능으로 냉각부의 무게와 부피를 줄일 수 있고 더 작은 회로로 같은 출력을 얻을 수 있으므로 항공, 우주 산업 시스템의 적재 중량과 부피를 줄일 수 있는 이점도 있다. 이러한 GaN 기반 소자의 우수한 특성은 현재 이동통신 시스템, 항공/우주, 자동차, 석유 채굴, 전력 시스템 등에 광범위하게 사용될 수 있을 것으로 예상된다^[6].

현재까지 발표된 AlGaN/GaN HEMTs의 출력 전력 밀도는 4 GHz에서 32 W/mm^[7], 그리고 10 GHz에서 16.5 W/mm가 발표되었다^[8]. 두 경우 모두 소자 동작 전압을 더욱 향상시키기 위해서 field-plate technique이 사용되었다. 또한 GaN HEMTs를 이용하여 밀리미터파 주파수에서 동작하는 고출력 소자도 발표되었는데, 20 GHz에서 6.4 W/mm, 그리고 30 GHz에서 5.4 W/mm가 발표되었다^{[9],[10]}. GaN HEMTs의 이러한 우수한 고속, 고출력 특성에도 아직 해결해야 될 문제점으로 DC-RF dispersion 현상 또는 전류 와해(current collapse) 현상이 지적되고 있다. 전류 와해 현상은 소자가 DC 동작에서는 높은 전류 밀도를 보더라도 RF 동작에서는 유효한 전류 크기가 감소하는 현상으로 이로 인해 GaN HEMT 전력용 소자의 출력이 감소된다. 이는 소자가 고주파수에서 동작할 때 소자 표면에 존재하는 트랩에 붙잡힌 전자의 낮은 반응속도로 인해 채널 내 전자 밀도가 떨어짐으로써 소자의 고주파 출력 특성이 저하되는 것으로 알려져 있다^[11]. AlGaN/GaN 이종접합의 경우, GaN와 에너지 밴드 갭 차이로 인해 AlGaN는 장력(tensile strain)을 받게 되어 높은 piezoelectric polarization

효과를 나타내게 된다. 이러한 piezoelectric polarization으로 소자 채널 내 전자가 생성되고^[12], 이와 함께 다이폴을 구성하는 양의 전하상태도 소자의 AlGaN 표면에 존재하게 된다. 이렇게 생성된 트랩의 채널 내 전자에 대한 전계효과는 소자 제작과 무관하게 불규칙한 특성을 나타내므로 GaN HEMTs의 소자 균일도와 신뢰성에도 연관되는 문제로서 GaN 기반 소자의 상용화를 위해 해결되어야 하는 문제점이다. 표면에 존재하는 트랩에 의한 문제를 해결하기 위해 소자 표면을 SiN로 처리하는 방법이 제안되었으나^[13], 표면 처리법은 처리 공정상의 조건에 민감하여 재현성과 균일성을 얻기가 어렵기 때문에 이보다 근본적인 문제 해결책으로 AlGaN/GaN 층의 에피 성장 공정을 이용해 이 문제를 해결하는 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되었다^{[14],[15]}.

이러한 에피 성장 연구와 관련하여 GaN HEMTs의 채널층을 InGaN로 대체하여 더 나은 특성과 함께 전류 와해 현상도 동시에 억제하는 에피 구조가 제안되었다^[16]. 소자의 경우 연속 출력 밀도가 2 GHz에서 4.2 W/mm인 게이트 전극 길이가 1 μ m인 AlGaN/InGaN HEMT가 보고되었는데^[17], 이 소자는 기판을 SiC를 사용하였다. 사파이어 기판을 사용한 GaN/InGaN HEMT에서는 이보다 낮은 0.4 W/mm의 전력 출력 밀도를 얻었음이 보고되었다^[18]. AlGaN/InGaN 이종접합을 이용할 경우 AlGaN/GaN 이종접합보다 더 높은 채널 내 전자 밀도를 얻을 수 있고 전자 이동도도 InGaN의 경우가 GaN보다 이론적으로는 더 높으므로 전류 구동력 또한 향상된다^[19]. GaN/InGaN/InGaN 이종접합의 경우 piezoelectric polarization이 압축 성장(compressive strain)된 InGaN 층에 인가되어, 이로 인해 생성된 다이폴은 InGaN 경계 표면 내에 존재하게 된다. 이 경우, GaN의 표면에는 spontaneous polarization만 발생하게 되어 표면에 존재하는 트랩에 의한 DC-RF dispersion 현상이 높지 않다. GaN를 AlGaN로 대체할 경우 더 높은 전위 장벽으로 인해 GaN/InGaN 이종접합에 비해 더 효율적으로 전자를 가두어 둘 수 있는 이점이 있다.

II. 소자 제작과 DC 및 펄스 전류 특성

이전에 발표된 대부분의 소자는 metal-organic che-

mical vapor deposition(MOCVD)을 이용한 에피 성장 기술을 이용하였는데^{[17],[18]}, 본 연구에서는 보다 나은 균일도와 층간 분리도가 높은 molecular beam epitaxy(MBE) 기술을 이용하여 AlGaIn/InGaIn 층을 성장하였다. InGaIn HEMT의 에피 구조 성장은 [0001] 방향 사파이어 기판 위에 AlGaIn/InGaIn의 채널 층을 형성하였고, HEMT 제작을 위한 옴릭(ohmic), 쇼키(Schottky) 전극은 전자빔 묘화(electron beam lithography) 장치를 이용해 형성하였다. 에피 성장층을 살펴보면, 사파이어 기판 위에 AlN 완충층을 형성한 후 2 μm 두께의 도핑되지 않은 GaN, 10% In 비율의 5 nm 두께의 InGaIn 층, 25% Al 비율의 18 nm 두께의 AlGaIn 층, 그리고 2 nm 두께의 도핑되지 않은 GaN 표면층(capping layer)을 성장하였다. 소자 제작은 Cl₂/Ar 플라즈마를 이용해 inductively coupled plasma-reactive ion etch(ICP-RIE) 시스템을 이용해 소자에 사용되지 않는 GaN를 제거함으로써 소자들을 전기적으로 분리하였다. 그 다음 Ti/Al/Mo/Au의 다층 금속 전극을 전자빔을 이용해 증착한 다음 rapid thermal annealing(RTA) 방법으로 GaN와 금속간의 접촉저항을 줄인다. 게이트 전극의 길이(L_G)는 0.5 μm와 1 μm로 전자빔 묘화 장치를 이용해 다층 photo resist로 형성된 마스크를 이용 Ni/Au 다층 금속을 증착한 다음 lift-off 공정으로 제작한다. 소자의 크기는 100 μm이고 소오스-드레인 간격(L_{SD})은 3 μm와 4 μm로 제작하였다.

그림 1은 8 V의 드레인 전압을 사용하였을 때 여러 제작된 소자의 전류 전달 특성을 보이고 있다. 소오스-드레인 간격이 3 μm이고 게이트 전극 길이가 0.5 μm인 소자는 880 mA/mm의 높은 전류 구동 능력을 보였고 소신호 전류 전달정수(transconductance, g_m)는 게이트 전압 -1.5 V에서 156 mS/mm였다.

이들 소자는 비슷한 공정을 이용한 AlGaIn/GaN HEMTs^[20]보다도 게이트 전압 상승에 따른 g_m 감소 현상(roll-over)이 완만한 특성을 보였다. 이는 InGaIn 채널을 사용함으로써 채널 내 전자를 더 잘 가둘 수 있기 때문이다. 그림 1은 또한 게이트 전극 길이가 0.5 μm이고 3 μm의 소오스-드레인 간격을 가지는 소자의 경우에 대한 전류이득 차단주파수(f_T)도 보이고 있다. 완만한 f_T 특성으로 소자의 RF 전달정수

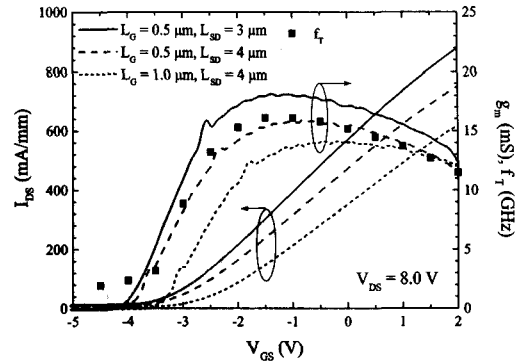


그림 1. AlGaIn/InGaIn HEMTs의 게이트 전극 길이(L_G)와 소오스-드레인 간격(L_{SD})에 대한 전류 전달 특성. 바이어스 조건은 V_{DS}=8 V, 전류이득 차단주파수(f_T)는 기호(■)

Fig. 1. DC transfer characteristics of AlGaIn/InGaIn HEMTs with different gate lengths(L_G) and source-drain spacings(L_{SD}). All devices were biased at V_{DS}=8 V. The measured unity-gain cut-off frequency(f_T) of a 0.5 μm gate-length AlGaIn/InGaIn HEMT with L_{SD}=3 μm is shown with squares.

또한 게이트 전압에 대해 아주 완만하게 비례한다는 것을 알 수 있다. 그림 2는 V_{DS} = 12 V and V_{GS} = -2.0 V 바이어스 조건 하에 1~40 GHz 범위에서 측정된 소자의 전류 이득(|h₂₁|)과 전력이득(MSG/MAG)의 주파수

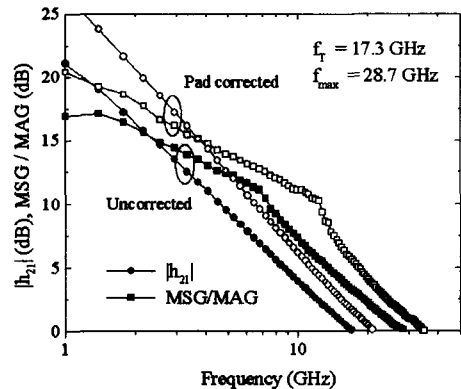


그림 2. 게이트 전극 길이가 0.5 μm인 AlGaIn/InGaIn HEMTs의 소신호 전류이득 및 전력이득의 주파수 특성. 바이어스 조건은 V_{DS}=12 V, V_{GS}= -2.0 V

Fig. 2. Measured current gain(|h₂₁|) and power gain(MSG/MAG) versus frequency for the 0.5 μm AlGaIn/InGaIn HEMTs. The device was biased at V_{DS}=12 V and V_{GS}= -2.0 V.

특성을 보여주고 있다. 게이트 전극 길이가 $0.5 \mu\text{m}$ 인 AlGaInGaN HEMT의 경우 전류이득 차단주파수는 17.3 GHz , 그리고 최대발전주파수(f_{MAX})는 28.7 GHz 가 측정되었다.

제작된 소자의 트랩 특성을 파악하기 위해서 소자의 drain-lag과 gate-lag 특성을 측정하였다. Gate-lag 특성은 소자의 표면에 존재하는 트랩 상태를 검출할 수 있고 drain-lag 특성은 소자의 버퍼층에 존재하는 트랩 상태에 민감하게 반응함으로써 두 가지 측정을 통해서 각각의 트랩 상태를 파악할 수 있다^[21]. 이 특성은 ACCENT DIVA dynamic I-V analyser system^[22]을 이용하여 얻었으며, 측정된 결과는 그림 3에 나타나었다. 소자 표면에 존재하는 트랩이 전자를 포획한 경우, 이에 의한 전계 효과와 포획된 전자들의 낮은 반응 속도로 게이트 스위칭과 동시에 전자들이 방출되지 않으므로써 초기 펄스전류는 DC 전류보다는 낮게 된다^[23]. 전자들이 트랩의 시상수에 상당하는 시간 동안 서서히 방출됨으로써 펄스 전류는 점차적으로 DC 전류 값에 접근하게 된다. 본 논문에서

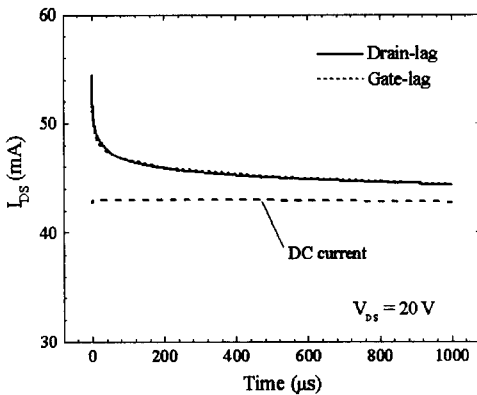


그림 3. Drain-lag 특성은 소자의 게이트단에 0 V , 그리고 드레인단은 1 V 에서 20 V 로 스위칭 되는 전압을 인가하여 측정, Gate-lag 특성의 경우 소자의 드레인단은 20 V , 그리고 게이트단은 -5 V 에서 0 V 로 인가하여 측정

Fig. 3. The drain-switching measurement was taken with the gate-source bias at 0 V (open channel) with the drain-source voltage stepped from 0 V to 20 V . The gate-switching measurement was taken with the drain-source voltage at 20 V , and the gate-source voltage stepped from -5 V (pinchoff) to 0 V .

보인 InGaN channel HEMT의 경우 그림 3에서 보인 것과 같이 초기 펄스 전류는 gate-lag과 drain-lag 두 가지 측정 모두 DC 전류보다 크게 시작해서 서서히 DC 전류에 접근하는데 이것은 소자 자체 발열 현상에 의한 것이다. 이러한 전류 특성으로 볼 때 AlGaInGaN HEMTs는 SiN로 표면 처리되지 않은 상태에서도 소자 표면에는 트랩이 존재하지 않음을 알 수 있다.

펄스 I-V 특성은 소자의 게이트와 드레인 양단에 펄스를 가하며, 소자에 DC 바이어스 전압과 함께 인가하였다. 펄스폭은 200 ns , 그리고 1 kHz 의 펄스 반복주기를 사용하였고 DC 전류가 거의 흐르지 않는 바이어스 전압 $V_{DS} = 20 \text{ V}$ and $V_{GS} = -5 \text{ V}$ 상에서 측정하였다. 이 조건에서 펄스와 DC 바이어스 전압에 의한 자체 발열 현상은 매우 적으므로 펄스 전류 특성으로 트랩에 의한 영향만 검출할 수 있다. 그림 4에 전극 길이가 $0.5 \mu\text{m}$ 이고 소오스-드레인 간격이 $4 \mu\text{m}$ 인 소자의 DC와 펄스 전류 특성을 비교하였다. 여기서 DC 전류 측정에서 자체 열 발생이 적을 경우, 펄스 전류와 DC 전류 특성이 아주 유사함을 발견할 수 있다. 이 두 전류가 유사함은 소자 표면

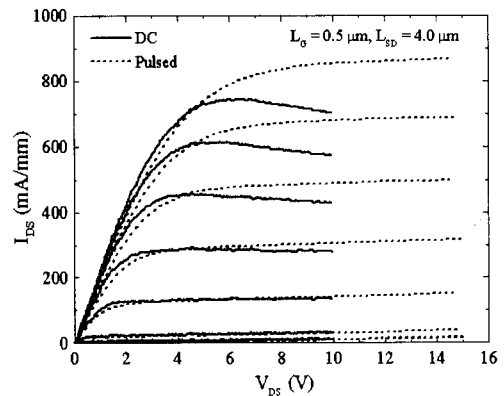


그림 4. 전극 길이가 $0.5 \mu\text{m}$ 이고 소오스-드레인 간격이 $4 \mu\text{m}$ 인 소자의 DC와 펄스 I-V 특성

Fig. 4. The measured pulsed I-V (dashed line) and DC I-V (solid line) for a device with a gate length of $0.5 \mu\text{m}$ and source-drain spacing of $4 \mu\text{m}$. Pulsed I-V measurements were taken at DC bias conditions of $V_{DS} = 20 \text{ V}$ and $V_{GS} = -5 \text{ V}$. The gate bias was swept from $+2$ to -5 V in steps of 1 V . Pulse width was 200 ns and pulse repetition was 1 kHz .

질화 처리(SiN surface passivation)를 하지 않은 일반적인 AlGaIn/GaN HEMTs와 대조적이다. 일반적인 AlGaIn/GaN HEMT의 경우 펄스 전류 동작상에는 최대 전류가 DC 전류보다 낮은 전류 와해 현상이 나타나는데 비해 본 논문에서 측정된 소자는 이러한 현상이 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

소자의 대신호 전력 특성은 focus microwaves automatic load pull system을 이용하여 측정하였다. 출력측 튜너는 소자의 드레인측에 25 V를 인가한 상태에서 최대효율이 되는 입력 전력점에서 최대출력을 얻을 수 있도록 조절하였으며, 입력측 튜너는 소신호 이득이 최대가 되도록 하였다. 그림 5는 게이트 전극 길이가 0.5 μm 이고 소오스-드레인 간격이 3 μm 인 AlGaIn/InGaIn HEMT를 2 GHz에서 전력특성을 측정된 결과를 보여주고 있다. 측정된 소자는 상온에서 출력 전력밀도가 1.8 W/mm 그리고 이 때 6.8 dB의 전력이득을 나타내었다. 소자의 DC 전류는 입력전력에 따라 서서히 증가함으로써 MBE로 성장한 AlGaIn/InGaIn/GaN 층을 이용하여 제작한 소자의 경우 표면 절연처리를 하지 않은 경우에도 대신호 동작시 전류 와해(current collapse) 현상이 발생하지 않음을 알 수 있다. 전류 와해 현상은 표면 트랩에 의하여 야기되고^[11], 또한 채널 내 전자가 충분히 갖히

지 않아 채널의 전자가 버퍼층으로 누설됨으로써 발생하는 것으로 알려져 있다^[24]. 이는 전류 와해 현상이 많은 전류가 유입되는 높은 입력 구동 상태에서 주로 발생하는 것으로부터 알 수 있다. AlGaIn/InGaIn 이중 접합의 경우 평탄한 전류 전달 특성이 보여주듯이 채널 내에서 전자를 효율적으로 가두어 둘 수 있어 대신호 전력 특성에서도 전류 와해 현상이 발생하지 않는 것으로 사료된다. 비교적 낮은 출력 전력밀도는 사파이어 기판의 낮은 열전도도에 의한 자체 발열에 의한 것으로 SiC 기판을 사용할 경우 보다 나은 전력 특성을 얻을 수 있으리라 예상된다.

III. 결 론

InGaIn를 HEMT의 채널층으로 사용하게 되면 채널의 전자 밀도와 이동도가 GaIn층을 사용하는 것보다 향상되어 소자의 출력 전력이 향상되고 또한 고전압 인계로 발생하게 되는 DC-RF dispersion 현상을 억제할 수 있었다. InGaIn는 청색, 녹색 발광 다이오드에서 상용화가 되어 이를 기반으로 InGaIn를 고주파 전력 소자에 응용할 경우 고효율 전력 특성을 얻을 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

[1] L. F. Eastman, V. Tilak, J. Smart, B. M. Green, E. M. Chumbes, R. Dimitrov, H. Kim, O. S. Ambacher, N. Weimann, T. Prunty, M. Murphy, W. J. Schaff and J. R. Shealy, "Undoped AlGaIn/GaN HEMTs for microwave power amplification", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 48, pp. 479-485, Mar. 2001.

[2] I. Daumiller, C. Kirchner, M. Kamp, K. J. Ebeling and E. Kohn, "Evaluation of the temperature stability of AlGaIn/GaN heterostructure FETs", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 20, no. 9, pp. 448-450, Sep. 1999.

[3] A. Chini, D. Buttari, R. Coffie, L. Shen, S. Heikman, A. Chakraborty, S. Keller and U. K. Mishra, "Power and linearity characteristics of field-plated recessed-gate AlGaIn-GaN HEMTs", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 25, pp. 229-231, May 2004.

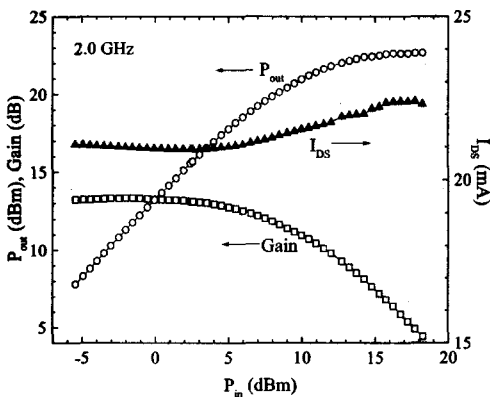


그림 5. 2 GHz에서 측정된 게이트 전극 길이가 0.5 μm 인 AlGaIn/InGaIn HEMT의 대신호 전력 특성. 소자 바이어스 조건은 $V_{DS}=25\text{ V}$, $V_{GS}=-1.7\text{ V}$

Fig. 5. Large signal characteristics of 0.5 μm gate-length AlGaIn/InGaIn HEMT at 2 GHz as a function of input power. The device was biased at $V_{DS}=25\text{ V}$ and $V_{GS}=-1.7\text{ V}$.

- [4] Y. Ando, Y. Okamoto, H. Miyamoto, N. Hayama, T. Nakayama, K. Kasahara and M. Kuzuhara, "A 110-W AlGaInGaN heterojunction FET on thinned sapphire substrate", in *IEDM Tech. Dig.*, pp. 381-384, Dec. 2001.
- [5] N. Adachi, N. Hara, K. Joshin, M. Kanamura, T. Kikkawa, M. Nishi, M. Tanaka, Y. Tateno, S. Yokokawa and M. Yokoyama, "A high power and high efficiency GaN HEMT amplifier for W-CDMA base station applications", in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Workshop Note*, 2004.
- [6] S. J. Pearton, J. C. Zolper, R. J. Shul and F. Ren, "GaN: processing, defects, and devices", *J. Appl. Phys.*, vol. 86, pp. 178, 1999.
- [7] Y. -F. Wu, A. Saxler, M. Moore, R. P. Smith, S. Sheppard, P. M. Chavarkar, T. Wisleder, U. K. Mishra and P. Parikh, "30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 25, no. 3, pp. 117-119, Mar. 2004.
- [8] R. Thompson, T. Prunty, V. Kaper and J. R. Shealy, "Performance of the AlGaIn HEMT structure with a gate extension", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 51, no. 2, pp. 292-295, Feb. 2004.
- [9] R. S. Schwindt, V. Kumar, A. Kuliev, G. Simin, J. W. Yang, M. A. Khan, M. E. Muir and I. Adesida, "Millimeter-wave high-power 0.25- μ m gate-length AlGaInGaN HEMTs on SiC substrates", *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 13, no. 3, pp. 93-95, Mar. 2003.
- [10] C. Lee, P. Saunier, J. Yang and M. A. Khan, "AlGaInGaN HEMTs on SiC with CW power performance of >4 W/mm and 23 % PAE at 35 GHz", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 24, no. 10, pp. 616-618, Oct. 2003.
- [11] R. Vetry, N. Q. Zhang, S. Keller and U. K. Mishra, "The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaInGaN HFETs", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 48, pp. 560-566, Mar. 2001.
- [12] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Wiemann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzman, W. Rieger and J. Hilsenbeck, "Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaInGaN heterostructures", *J. Appl. Phys.*, vol. 85, no. 6, pp. 3222-3232, 1999.
- [13] B. M. Green et al., "The effect of surface passivation on the microwave characteristics of undoped AlGaInGaN HEMTs", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 21, pp. 268-270, Jun. 2000.
- [14] N. G. Weimann, M. J. Manfra and T. Wachtler, "Unpassivated AlGaInGaN HEMTs with minimal RF dispersion grown by plasma-assisted MBE on semi-insulating 6H-SiC substrates", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 24, pp. 57-59, 2003.
- [15] L. Shen, R. Coffie, D. Buttari, S. Heikman, A. Chakraborty, A. Chini, S. Keller, S. P. DenBaars and U. K. Mishra, "High-power polarization engineered GaN/AlGaInGaN HEMTs without surface passivation", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 25, no. 1, pp. 7-9, Jan. 2004.
- [16] N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida and N. Kobayashi, "Enhanced electron mobility in AlGaInGaN/InGaInGaN double-heterostructures by piezoelectric effect", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 38, no. 7B, pp. L799-L801, Jul. 1999.
- [17] G. Simin, X. Hu, A. Tarakji, J. Zhang, A. Koudymov, S. Saygi, J. Yang, A. Khan, M. S. Shur and R. Gaska, "AlGaInGaN double heterostructure field effect transistor", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 11A, pp. L1142-L1144, Nov. 2001.
- [18] Y. -M. Hsin, H. -T. Hsu, C. -C. Chuo and J. -I. Chyi, "Device characteristics of the GaN/InGaIn-doped channel HFETs", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 501-503, Nov. 2001.
- [19] J. Kuzmik, "Power electronics on InAlN/(In)GaIn: Prospect for a record performance", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 510-512, Nov. 2001.
- [20] V. Kumar, J. -W. Lee, A. Kuliev, O. Aktas, R.

- Schwindt, R. Birkhahn, D. Gotthold, S. Guo, B. Albert and I. Adesida, "High performance 0.25 μm gate-length AlGaIn/GaN HEMTs on 6H-SiC with power density of 6.7 W/mm at 18 GHz", *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 22, pp. 1609-1610, 2003.
- [21] S. C. Binari, K. Ikossi, J. A. Roussos, W. Kruppa, D. Park, H. B. Dietrich, D. D. Koleske, A. E. Wickenden and R. L. Henry, "Trapping effects and microwave power performance in AlGaIn/GaN HEMTs", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 48, no. 3, pp. 465-471, Mar. 2001.
- [22] Accent Optical Technologies, Inc, *DIVA User Manual*, 2001.
- [23] G. Verzellesi, R. Pierobon, F. Rampazzo, G. Meneghesso, A. Chini, U. K. Mishra, C. Canali and E. Zanoni, "Experimental/numerical investigation on current collapse in AlGaIn/GaN HEMTs", in *IEDM Tech. Dig.*, pp. 689-692, 2002.
- [24] R. J. Trew, "AlGaIn/GaN HFET amplifier performance and limitations", in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, vol. 3, pp. 1811-1814, 2002.

이 종 욱



1993년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)

1997년 2월: 서울대학원 전기공학과 (공학석사)

2003년 1월: Purdue University at West Lafayette (공학박사)

2003년 1월~2004년 2월: Micro and Nanotechnology Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign (Postdoc research associate)

2004년 3월~현재: 경희대학교 전자통신공학과 전임강사
[주 관심분야] RF/마이크로파 소자 및 회로설계