

초고주파 회로 응용을 위한 GaN HEMT 기술

황 지 현 · 장 재 형

광주과학기술원

I. 개 요

최근 무선 통신 시장의 확대와 함께 우리 사회 전반에 걸쳐 무선 이동 통신에 대한 수요가 급증하고 있다. 이에 따라서 기지국에서의 송수신에 활용될 수 있는 고주파, 고출력 전자소자에 대한 수요가 급증하면서 관련된 연구도 확대되고 있다. 기존의 Silicon 또는 SiC에 기반한 고주파용 전력 소자들에서 최근에는 GaN 성장기술의 발전에 힘입어 GaN 기반 고전자이동도 트랜지스터(HEMT: High Electron Mobility Transistor) 기술에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 아래 <표 1>에서 볼 수 있듯이, GaN는 Silicon 및 GaAs에 비해 넓은 bandgap 특성을 가지며, 높은 breakdown field 특성을 가지고 있기 때문에 우수한 항복전압 특성을 보인다. 또한 GaN는 4H-SiC보다 높은 전자 이동도 및 포화 전자 속도를 가지고 있기 때문에 동시에 높은 주파수 특성 역시 보일 수 있다.^{[1],[2]}

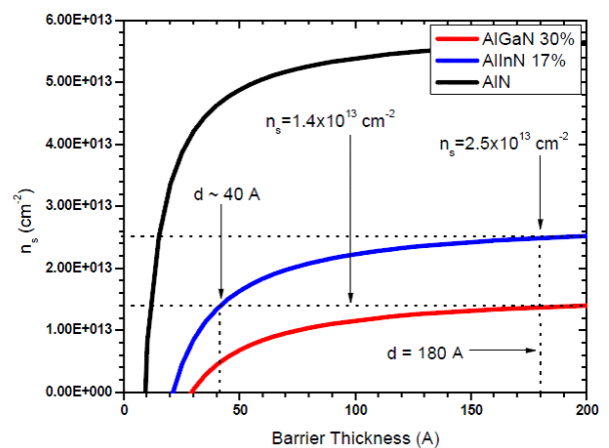
이러한 GaN 기반 HEMT 구조에서는 쇼트키 장벽층(Schottky barrier layer)로 AlGaN, InAlN 그리고 InAlGaN 등을 연구하고 있다. 가장 오랫동안 연구되어온 AlGaN/GaN HEMT 구조에서는 AlGaN 쇼트키 장벽층과 GaN 버퍼층 사이의 격자 부정합에 의해 나타나는 압전분극(piezoelectric polarization)

<표 1> 전력반도체에 활용되는 대표적인 물질들의 물리적 특성 비교

물질	Silicon	4H-SiC	GaAs	GaN
E_g (eV)	1.12	3.2	1.42	3.4
ϵ_r	11.8	10	13.1	9.0
μ_n (cm ² /V · s)	1,350	700	8,500	1,300
E_c (10 ⁶ V/cm)	0.3	3.0	0.4	3.3
v_{sat} (10 ⁷ cm/s)	1.0	2.0	2.0	2.5
K (W/K · cm)	1.5	4.5	0.5	2.5

과 자발분극(spontaneous polarization)에 의해 이차원 전자 구름이 계면에 존재하는 양자 우물에 유도되어 높은 전하밀도를 형성한다. 하지만 아래의 [그림 1]에서 볼 수 있듯이, AlGaN 쇼트키 장벽층을 가지고 보다 더 높은 전하밀도를 유도하기 위해서는 쇼트키 장벽층의 두께를 늘리고, 알루미늄의 함량을 증가시켜야 하는데, AlGaN과 GaN 층의 격자 부정합으로 인해서 고품질의 두꺼운 AlGaN 쇼트키 장벽층을 성장시키기 어렵다. 이에 따라 보통 20 nm 정도의 두께로 성장시키는 것이 일반적이다.

하지만 20 nm의 쇼트키 장벽층 두께를 가지는 AlGaN/GaN 기반의 HEMT 소자에서는 주파수 특성의 향상을 위해서 게이트 길이(gate length)가 100 nm 이하로 짧아지면 단채널 효과(short channel effect)가 나타나는 문제점이 발생한다^[4]. 일반적으로 트랜지스터에서 게이트 길이(gate length)와 게이트와 채널 사이의 수직 거리(gate-to-channel distance)의 비율로 정의되는 게이트 종횡비(gate aspect ratio)가 대략 10 이하로 작아지면 단채널 효과가 심각한 정도에 이르러서 게이트 길이를 줄이더라도 전자소자의 초고주파 특성이 더 이상 개



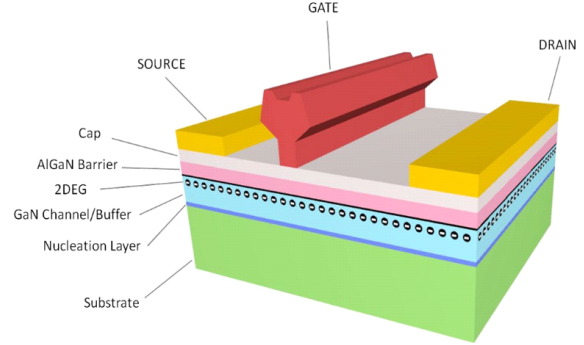
[그림 1] GaN 기반 HEMT 구조에서 쇼트키 장벽층의 종류와 두께 변화에 따른 전하밀도 그래프^[3].

선되지 않게 된다. 이에 따라서 최근에는 수 나노미터의 얇은 쇼트키 장벽층으로도 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 이상의 높은 이차원 전자밀도를 유도할 수 있는 격자 정합된 $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{GaN}$ 기반의 HEMT 구조에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다^{[5],[6]}. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{GaN}$ 이종구조에서는 격자 부정합에 의해 나타나는 압전 분극에 의한 전하가 생성되지 아니함에도 불구하고, 자발 분극의 차이만으로도 높은 전자밀도를 형성할 수 있어, 위의 두 기체에 의해 전자밀도가 형성되는 AlGaN/GaN 이종 접합구조보다도 높은 전자밀도를 InAlN/GaN 계면에 형성할 수 있다는 장점이 있다. 이 뿐만 아니라, 쇼트키 장벽층의 밴드갭 에너지와 격자 상수를 보다 자유롭게 조절할 수 있는 사원계(ternary) 물질을 활용한 $\text{InAlGaN}/\text{GaN}$ 기반의 HEMT 구조에 대해서도 연구가 시작되고 있다. 특히, InAlGaN 과 같은 사원계 물질 구성은 AlN , InN 그리고 GaN 사이의 불혼화성(immiscibility)에 의한 결함(defects)을 최소화하여서 5 nm 이하의 매우 얇은 쇼트키 장벽층을 균질하게 성장시킬 수 있어서 기대를 모으고 있다^[7].

II. GaN HEMT 에피 구조 및 특징

GaAs 또는 InP 에 기반한 HEMT 구조에서는 쇼트키 장벽층에 델타도핑을 수행하며, 이곳에서 생성된 전자들이 이종접합을 사용하여 형성한 양자 우물로 이동하여 2차원 전자구름층을 만드는데 반하여, GaN 기반의 HEMT 구조에서는 쇼트키 장벽층의 도핑 없이 이종접합을 형성하는 물질의 분극의 차이 때문에 생성되는 전자들로도 양자 우물에 높은 농도의 2차원 전자구름을 형성할 수 있다. 따라서 GaN 기반의 소자에서는 자연적으로 에피층 사이 계면에서의 전하들의 축적을 인위적으로 조절할 수 있는 에피층 성장 기술이 필수적이다. [그림 2]에서는 가장 일반적으로 사용되는 AlGaN/GaN 기반의 HEMT 에피 구조와 그 위에 만들어진 트랜지스터의 구조를 나타낸 모식도이다.

GaN HEMT 에피 구조의 위에서부터 먼저, Cap layer는 공기 중에 노출될 수 있는 쇼트키 장벽층의 표면을 보호하면서 추후에 소자 공정 시에 오믹 접촉 형성을 용이하게 해주는 역할을 하게 된다^{[9],[10]}. 그 다음의 쇼트키 장벽층(AlGaN barrier)은 게이트와 2-DEG 채널층을 분리시키는 역할을 하



[그림 2] 일반적인 형태의 AlGaN/GaN HEMT 에피 구조와 트랜지스터 구조^[8].

면서 GaN 버퍼층과 함께 분극 현상으로 2차원 전자구름 형성에 핵심적인 역할을 한다. GaN 버퍼층은 이 뿐만 아니라, 기판에서부터 타고 올라오는 dislocation을 차단하는 역할도 하게 된다. Nucleation layer의 경우에는 버퍼층과 기판(Substrate) 계면 사이에서의 2차원 전자 유체층의 형성을 최소화하여 실제 2-DEG 채널층과의 커플링 현상을 방지한다. 그리고 버퍼층과 기판 사이의 격자 부정합에 의한 Stress를 완화 주어서 고품질의 버퍼층을 얻을 수 있도록 도와준다.

III. GaN HEMT 공정 관련 이슈

3-1 오믹 접촉 기술

GaN 기반 HEMT 구조는 넓은 밴드갭 에너지와 높은 쇼트키 barrier height 때문에 다른 반도체 물질들에 비해서 오믹 접촉 형성이 어렵다고 알려져 있다.^[11] 상대적으로 높은 오믹 접촉 저항값은 소스 access 저항을 증가시켜 HEMT 소자의 고주파 전달 특성을 제한하게 된다. 따라서 이전부터 GaN 기반 소자에서의 오믹 접촉 형성의 개선을 위한 연구가 끊임없이 이루어지고 있다. 가장 기본적인 오믹 메탈 시스템으로는 Ti/Au 에서 출발하여 여러 목적에 의하여 현재는 $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Ni}/\text{Au}$ 시스템이 가장 일반적으로 쓰이고 있다. GaN 기반 HEMT 구조에서 오믹 접촉이 형성의 가장 핵심적인 역할은 GaN 과 메탈 시스템의 계면 사이에 형성되는 TiN layer라 할 수 있다^{[12],[13]}. 하지만 $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Ni}/\text{Au}$ 시스템을 활용한 오믹 접촉 공정은 대부분 800도 이상의 높은 온도에서 이루어

저 온도에 의한 HEMT 에피층의 열화와 메탈 소스들의 확산 현상이 발생할 수 있다. 이에 따라서 최근에는 고온에서의 급속 열처리 과정에서의 HEMT 에피층의 열화와 같은 문제점들을 극복하기 위하여 저온에서의 오믹 접촉 형성, 금을 사용하지 않는 오믹 접촉, 높은 농도로 도핑된 GaN 층을 재성장한 후에 오믹 접촉을 형성하는 방법에 대한 연구들이 다방면으로 진행되고 있다.

3-2 패시베이션 (Passivation)

GaN는 분극 현상에 의해서 전하가 계면 사이에 유도되는 방식에서처럼 표면 전하(surface charge)가 발생하여 소자의 신뢰성에 많은 악 영향을 미치게 된다. 이를 방지하기 위해서 공기 중에 노출되어 있는 GaN 표면을 Al₂O₃ 또는 SiN_x 등으로 증착시켜서 표면 전하에 의한 효과를 없애는 패시베이션 공정을 진행하게 된다^[14]. 이는 표면 전하에 의한 효과를 제거할 뿐만 아니라, 소자 제작을 위해서 거치게 되는 ICP-RIE, RTA, RF sputtering 등의 고 에너지 환경의 공정 단계에서 GaN HEMT 에피층의 보호막으로써의 역할도 함께 하게 된다.

3-3 T자 모양의 게이트 기술

HEMT 소자의 소신호 모델 등가회로에서부터 유도되는 전류이득 차단주파수 f_T (current gain cut-off frequency)와 최대 발진주파수 f_{max} (maximum frequency of oscillations) 값은 아래와 같은 수식으로 유도된다.

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd}) \cdot (1 + (R_s + R_d) \cdot g_d) + C_{dg} \cdot g_m \cdot (R_s + R_d)}$$

$$f_{max} = \frac{f_T}{2\sqrt{(R_i + R_s + R_g) \cdot g_d + 2\pi f_T R_g C_{gd}}} \approx \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_g C_{gd}}}$$

Short channel 소자의 경우에는 Transconductance, g_m , 값이 게이트 길이에 반비례하며, Long channel 소자의 경우에는 g_m 값이 게이트 길이의 제곱에 반비례한다. 한 마디로, 위의

수식으로부터 전류이득 차단주파수 f_T 값의 향상을 위해서는 게이트 길이를 줄여서 g_m 값을 최대한 높여야 한다. 또한 최대 발진주파수 f_{max} 값의 향상을 위해서는 게이트의 단면적을 증가시켜서 게이트 저항, R_g , 값을 줄여야 한다. 이러한 고주파의 RF 특성 필요에 따라 HEMT 소자에서는 T자 모양의 게이트를 만들어서 실제 GaN 표면과 접촉하는 게이트 길이는 줄여서 f_T 값의 향상을 도모하면서 게이트의 단면적은 증가시켜서 f_{max} 값 역시 향상시킬 수 있다.

3-4 게이트 리세스(Gate Recess) 기술

GaN 소자는 분극현상에 의한 2차원 전자구름층을 가지게 되면서 외부 전압 인가 없이도 채널 층이 항상 On되어 있는 normally-on 형태의 동작을 하게 된다. 하지만 회로에서의 응용을 위해서는 normally-off 동작을 하는 HEMT 소자의 개발이 필요하다^[15]. 이를 위해서는 게이트와 채널 사이의 수직 거리를 가깝게 하는 게이트 리세스 식각 기술이 요구되는데, 쇼트키 장벽층의 두께가 AlGaIn/GaN의 경우에는 대략 20 nm, InAlIn/GaN 또는 InAlGaIn/GaN의 경우에는 대략 5~8 nm 정도로 얇다는 것을 감안하면, 재현 가능한 수준으로 수 나노미터 정도를 식각하기 위해서는 낮은 식각속도 및 단원자 수준의 매우 분해능 높은 식각기술과 더불어, 식각 후 노출되는 쇼트키 장벽층의 표면에 물리적 화학적 결합이 생기지 않도록 하는 non-detrimental 식각 기술이 필요하다. 일반적으로는 chlorine-based 건식 식각이 게이트 리세스 에칭 기술로 많이 사용되고 있다^[16].

IV. GaN HEMT 특성 비교 및 분석

<표 2>에서는 현재까지 보고되고 있는 GaN HEMT 소자 중에서 주파수 특성이 가장 우수한 것으로 알려져 있는 소자들을 쇼트키 장벽층의 물질 종류에 따라서 정리하여 다른 주요 지표들과 함께 나타내었다. AlGaIn의 경우에는 최대 드레인 전류값($I_{d,max}$)이 낮고 주파수 특성 역시 다른 쇼트키 장벽층을 사용하는 소자보다 좋지 않다. 이는 AlGaIn와 GaN 채널층 사이의 밴드갭 에너지 차이가 작음으로써 계면에서의 작은 전도대 오프셋(conduction band offset)과 그로 인한 polarization 도핑 효과가 떨어진다. 이는 곧 2차원 전자 구름

〈표 2〉 쇼트키 장벽층 물질 종류에 따른 GaN HEMT 소자 중
에서 주파수 특성이 가장 우수한 소자들의 비교

	AlGa ^N [17]	InAl ^N [18]	InAlGa ^N [19]
게이트 길이 (nm)	75	30	40
쇼트키 장벽층 두께 (nm)	17.5	8	11
f_T (GHz)	152	205	230
f_{max} (GHz)	149	220	300
$\sqrt{f_T \cdot f_{max}}$ (GHz)	150	212	263
$g_{m,max}$ (mS/mm)	540	462	770
$I_{d,max}$ (A/mm)	1.05	2.18	1.8

농도의 감소로 인한 DC 특성의 열화로 나타난다. 이 뿐만 아니라 AlGa^N에서는 상대적으로 두꺼운 쇼트키 장벽층 높이에 의해서 게이트 길이를 최대한으로 줄이더라도 주파수 특성 향상에 한계가 있으며, 〈표 2〉에서처럼 InAl^N 또는 InAlGa^N을 쇼트키 장벽층으로 사용하였을 때보다 주파수 특성이 좋지 않다. InAl^N 또는 InAlGa^N에서는 높은 2차원 전자 밀도 및 높은 전자 이동도에 의해서 소자의 DC 특성이 좋게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 In, Al, Ga의 조성비를 조절하여 쇼트키 장벽층과 GaN 버퍼층 사이에서의 strain을 완화시킬 수 있어서 GaN 소자에서 문제가 되고 있는 surface states을 줄여서 〈표 2〉에서처럼 작은 게이트 길이를 가지는 소자에서 높은 주파수 특성을 얻을 수 있다.

V. 맺음말

무선 통신 시장의 확대와 함께 고주파, 고출력 동작 전자 소자에 대한 사회적 수요가 급증하면서 GaN에 기반한 HEMT 소자가 단위 전력반도체 소자로 각광을 받고 있다. 현재 GaN 기반의 소자는 AlGa^N/GaN HEMT 기술이 가장 성숙되어 있으며, 이미 다양한 응용분야에서 활용되고 있다. 본고에서는 GaN HEMT 에피 구조의 성장에서부터 소자를 제작하기까지 현재의 기술 수준과 앞으로 개선되어야 할 점들에 대해서 기술하였으며, 문제점 해결을 위한 접근 방식들에 대한 동향을 간단하게 소개하였다. 미래 사회에서는 에너지 절약이라는 기저에 에너지의 효과적인 관리가 요구되는 만

큼 전력관리시장이 폭발적으로 증가할 것으로 전망됨에 따라서 GaN 기반의 HEMT 소자에 대한 연구 역시 확대될 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] U. K. Mishra et al., "GaN-Based RF power devices and amplifiers", *Proceedings of the IEEE*, 96(2), pp. 287-305, Feb. 2008.
- [2] L. F. Eastman, U. K. Mishra, "The toughest transistor yet", *IEEE Spectrum*, 39, pp. 28-33, May 2002.
- [3] H. Wang et al., "InAlN/GaN HEMTs with SiC substrates: Device performance and reliability analysis", *International Symposium on Compound Semiconductor*, 2009.
- [4] D. M. Geum et al, "75 nm T-shaped gate for In_{0.17}Al_{0.83}N/GaN HEMTs with minimal short-channel effect", *Electronics Letters*, 49(24), pp. 1536-1537, Nov. 2013.
- [5] J. Kuzmick et al., "Analysis of degradation mechanisms in lattice-matched InAlN/GaN high-electron-mobility transistors", *Journal of Applied Physics*, 106, 2009.
- [6] J. Kuzmick, "Power electronics on InAlN/(In)GaN: Prospect for a record performance", *IEEE Electron Device Letters*, 22(11), Nov. 2001.
- [7] E. Dimakis et al., "Plasma-assisted MBE growth of quaternary InAlGa^N quantum well heterostructures with room temperature luminescence", *Journal of Crystal Growth*, 251, pp. 476-480, Apr. 2003.
- [8] F. Schwierz, O. Ambacher, "Recent advances in GaN HEMT development", *Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications, 2003. EDMO 2003. The 11th IEEE International Symposium*, pp. 204-209, 2003.
- [9] Z.-Y. Liu et al., "Effects of the strain relaxation of an AlGa^N barrier layer induced by various cap layers on the transport properties in AlGa^N/GaN heterostructures", *Chinese Physics B*, 20(9), 2011.
- [10] T. Gessmann et al., "Ohmic contacts to p-type GaN mediated by polarization fields in thin In_xGa_{1-x}N capping layers", *Applied Physics Letters*, 80(6), Feb. 2002.

- [11] M. E. Lin et al., "Low resistance ohmic contacts on wide band-gap GaN", *Applied Physics Letters*, 64, Feb. 1994.
- [12] Y. Nam, B. Lee, "Investigation of Ti/Au and Ti₂N/Ti/Au ohmic contacts to n-GaN films", *Semiconductor Science and Technology*, 26, May 2011.
- [13] H. Tokuda et al., "Role of Al and Ti for ohmic contact formation in AlGaIn/GaN heterostructures", *Applied Physics Letters*, 101, 2012.
- [14] R. Ventury, "The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaIn/GaN HFETs", *IEEE Transactions on Electron Devices*, 48(3), pp. 560-566, Mar. 2001.
- [15] T. Oka, T. Nozawa, "AlGaIn/GaN recessed MIS-Gate HFET with high-threshold-voltage normally-off operation for power electronics applications", *IEEE Electron Device Letters*, 29(7), pp. 668-670, Jul. 2008.
- [16] H. Lin, "DC and RF characterization of AlGaIn/GaN HEMTs with different gate recess depths", *Solid-State Electronics*, 54, pp. 582-585, May 2010.
- [17] D. Marti et al., "150-GHz cutoff frequencies and 2-W/mm output power at 40 GHz in a millimeter-wave AlGaIn/GaN HEMT technology on silicon", *IEEE Electron Device Letters*, 33(10), pp. 1372-1374, Oct. 2012.
- [18] S. Tirelli et al., "Fully passivated AlInN/GaN HEMTs with f_T/f_{max} of 205/220 GHz", *IEEE Electron Device Letters*, 32(10), pp. 1364-1366, Oct. 2011.
- [19] R. Wang et al., "Quaternary barrier InAlGaIn HEMTs with f_T/f_{max} of 230/300 GHz", *IEEE Electron Device Letters*, 34(3), pp. 378-380, Mar. 2013.

≡ 필자소개 ≡

황 지 현



2014년 2월: 광주과학기술원 물리 전공 (이학사)
 2014년 3월~현재: 광주과학기술원 정보통신공학부 (석사과정)
 [주 관심분야] 나노전자소자, 테라헤르츠 전자공학

장 재 형



2002년 10월: 미국 일리노이 대학교 전기공학과 (공학박사)
 2014년 3월~현재: 광주과학기술원 정보통신공학부 교수
 [주 관심분야] 화합물 반도체소자, 테라헤르츠 전자공학