

Wide Band-gap 반도체의 물성 및 고주파용 전력소자의 응용

기술해설

Materials Properties of Wide Band-gap Semiconductors and Their Application to High Speed Electronic Power Devices

신 무 환
(Moowhan Shin)

Key Words(중요용어) : Wide Band-gap 반도체, MESFET(METal-Semiconductor Field-Effect-Transistor), Large-signal RF analysis, Power-Added Efficiency(전력부과효율), Output Power(출력), 고주파 전력소자.

1. 서 론

일반적으로 에너지 갭(Eg)이 Si(Eg=1.12 eV)이나 GaAs(Eg=1.43 eV)보다 큰 Wide Band-gap 반도체에 대한 관심이 급증하고있다. SiC(Eg=2.86 ~ 3.2 eV)나 GaN(Eg=3.4 eV), Diamond(Eg = 5.4 eV)등을 포함하는 이들 재료들은 자동차나 고성능 항공기를 비롯한 대중교통수단의 자동화 및 경량화 경향, 그리고 급증하는 정보전달수단의 고급화 경향에 부응하는 새로운 개념의 전력 및 광전 소자의 개발이 절실히 요구됨에 따라 그 중요성이 더욱 확대될 전망이다.

이들 재료에 대한 물성 연구는 일찍이 약 1920년대부터 시작되었으나, 실제적으로 반도체 소자 제작을 위한 중요한 재료로서 인식되어 활발한 연구 개발이 시작된 것은 1980년대 이후이다. 이들 재료의 물성이 연구되면서, 여러가지 다양한 응용분야에 적절한 전기적, 물리적특성이 있음이 알려지게 되었다. Wide Band-gap 반도체가 갖는 특성에는 높은 전자포화속도 및 최대 전자속도, 우수한 항복 전압특성, 특히 SiC나 Diamond의 경우 우수한 열전도도 등을 들수있는데, 이들은 Si이나 GaAs등의 비교적 에너지 갭이 낮은 반도체에 비하여 그 값이 월등히 우수한 것이다. 반도체 소자에 있어서 전자 속도와 항복전압은 전류-전압 특성에 직접적으로 비례하며, 특히 전력소자의 경우에 전류-전압 특성은 소자를 구동할때의 출력이나 출력부과효율과 직접적인 연계를 가지게된다. 또한 소자의 구동시, 일정 주파수 대역에서 출력이 증가함에 따르는 열에너지의 방출이 원활하지 못한 상태에서 소재의 열전도도가 낮은 경우, channel에서의 캐리어들의 이동도가 현저히 감소하며 전력소자의 출

력부과효율이 저하되는 원인이 된다. 따라서 기존의 Si이나 GaAs로 제작된 전력소자들이 Wide Band-gap 반도체로 대체가 된다면 고출력, 고주파 및 고온작동 기능이 월등한 차세대 전력소자를 보다 적은 wafer 면적으로 제작할 수 있게 된다.

본고에서는 여러가지 Wide Band-gap 중에서 특히 최근에 많은 관심을 끌고 있는 GaN와 4H-SiC, 6H-SiC의 전자기적 물성을 소개하고 현재 이들로부터 제작된 prototype 소자들의 성능을 비교함으로써 그 발전현황을 알아보기로 한다. 본고에서 관심을 두는 소자분야는 광전 소자(optoelectronic devices)라기보다는 고주파 고출력용 전력소자임을 밝힌다. 아울러 GaN로부터 제작된 MESFET(METal Semiconductor Field-Effect Transistor)소자의 고주파 대역에서의 Large-Signal 특성을 Device/Circuit Model을 통하여 실험치와 비교하여보고 이로부터 최적화된 channel 구조를 갖는 소자구조에서의 RF특성을 조사한다.

2. SiC

2.1 물성 및 소재개발

고체 SiC에는 많은 polytype 구조가 있을 수 있는데 현재 약 180가지의 polytype으로 분류가 된다. Zinc blende구조를 갖는 cubic type은 3C 혹은 β -SiC으로 불리워진다. 이외에 hexagonal(H) 및 rhombohedral(R) type을 총체적으로 α -SiC으로 분류한다. 대부분의 polytype은 아주 안정된 상태를 유지하지만 예외적으로 2H type은 400°C미만에서 다른 polytype으로의 변화가 가능하며 가장 안정된 polytype은 6H-SiC이다.²⁾ 전자소자의 응용면에서 가치가 있는 polytype으로는 3C, 6H, 4H등이

다. 90년도 초반만 하더라도 대부분의 electronic device 개발이 6H polytype에 그 초점이 맞추어져 있었고 많은 proto type의 device 들이 제작되었으나, 이 재료의 낮은 mobility($1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 에서 $240 \text{ cm}^2/\text{v} \cdot \text{sec}$)때문에 그 소자 성능에 한계가 있었다. 가장 최근에 각광을 받는 polytype은 4H-SiC이다. 이 polytype의 mobility는 약 $500 \text{ cm}^2/\text{v} \cdot \text{sec}$ 정도로 6H-SiC의 약 2배에 이르는 값을 갖는다.

SiC를 비롯한 wide band-gap 반도체의 소자응용에 가장 어려운점은 homoepitaxial growth을 위한 적당한 기판(substrate)문제이다. 현재 상용화되고 있는 기판은 modified Lely 방법으로써 2000°C 이상의 비교적 높은 온도에서 graphite로 밀봉된 reactor내에 적당한 온도 구배를 이용한 sublimation 성장기법이다.³¹ 1인치 6H-SiC 웨이퍼가 처음 상업화 된 것이 1987년으로 현재는 1.375인치의 6H-SiC 및 4H-SiC 웨이퍼가 미국의 Cree로부터 고가에 판매되고 있다. 1993년에 처음 상용화된 4H-SiC 웨이퍼는 6H-SiC 웨이퍼에 비하여 우수한 전자적 성능에 비하여 대면적용을 위한 재료공정상 보완될 부분이 많은 것으로 알려지고 있다. SiC 소자개발에 Cree, Motorola와 치열한 경쟁을 벌이고 있는 Westinghouse에서는 SiC 웨이퍼를 판매하고 있지 않고 자체개발을 위하여 상당한 연구개발을 집중하고 있으며, 1990년에 1 inch, 1991년에 1.5 inch, 1993년에 2.0 inch, 94년에 3 inch 웨이퍼를 제작하였다. 성장조건에 따라서 undoped된 p-type SiC(전기적 저항도가 약 100에서 $5000 \Omega \cdot \text{cm}$ 에 이르는)웨이퍼 제작이 가능하며, 반면에 Nitrogen doping을 조절하여서 저항이 $0.02 \Omega \cdot \text{cm}$ 보다 적은 저저항, 대면적의 웨이퍼를 제작할 수 있는데 이러한 대면적 웨이퍼는 UMOSFET이나 기판이 소자의 드레인 contact을 이루게 되는 수직형(Vertical) 전력소자제작에 이용될 수 있다.

SiC epi성장은 보통 고온에서(1500°C) 이루어 지는데 doping은 Site-Competition Epitaxy 기법을 이용하여 상당히 고농도($1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 이상) 및 저농도($1 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 이하)를 조절할 수 있게되었다. 이 방법에서는 SiC epi 성장시에 Si/C 비율을 조절하여 nitrogen이나 aluminum의 doping 농도를 선택적으로 취할 수 있게된다. Si나 GaAs등에서 찾기 힘든 결합이 SiC에 있게되는데 바로 "micropipes"이다. 이것의 직경은 수십 micron에 이르며 SiC의 결정성장중에 발생하여 전체 boules에 걸쳐서 확장되기도한다. 현재, 이 micropipe의 생성 mechanism에 대하여 많은 연구와 논란이 계속되고 있으며 이 micropipe는 소자제작과 성능에 결

정적인 악영향을 미치게 되므로 이의 밀도를 줄이기 위한 노력이 계속되고 있다. 일반적으로 이 micropipe의 밀도는 약 $50-1000/(\text{cm}^2)$ 에 이르며 1 mm^2 의 면적안에서 전혀 micropipe나 dislocation이 없는 SiC plate가 보고 되기도 하였다.⁴¹

2.2 SiC 소자개발(MESFETs)

현재 electronic device로써 상용화되고 있는 소자는 Cree에서의 고온용 JFET(Junction FET)뿐이다. 그외에 많은 종류의 prototype 소자들이 SiC 박막과 소자공정기술의 발전으로 그 성능이 향상되고 있으며 unipolar 소자인 MESFET의 상용화가 고주파용 통신기기에 머지않아 이루어 질 것이다. 시장성이 확고한 MOSFET의 개발이 절실히 요구되지만 unipolar device에 비하여 그 실현이 장기화될 것으로 사료된다. 그 이유는 p-type에 성장된 thermal oxide에 고정전하(fixed charge)가 계면상태 밀도를 심하게 증가시키며 이는 inversion channel의 전하이동도를 격감시키기때문에 n-channel MOSFET의 소자성능을 제한하게 되는 것이다. Si나 GaAs와 마찬가지로 SiC역시 Vertical 형태의 소자가 그 효율성이 높게 될 전망이다. SiC로 소자를 제작 할 때에 가장 염두에 두어야 할 것은 전하이동도의 이방성(anisotropy)이다. 예를 들면 4H-SiC의 전하이동도는 6H-SiC의 2배정도로 알려져 있으나 c-axis를 비교할 경우, 4H-SiC가 약 10배나 높은 전자 이동도를 갖게 된다. 또한 전력소자에서 가장 중요한 항복 전압 역시 이방성을 나타내게되며 이 사실은 Vertical device뿐만 아니라 Lateral device에서도 소자제작 이전에 고려되어야 할 중요한 factor가 된다. 6H-SiC의 경우에 c-axis의 항복전압은 a-axis의 약 3배에 이르게 된다. 이하에서는 SiC로 제작된 여러 형태의 소자 중에서 가장 최근에 발표된 MESFET들의 성능을 비교하고 이들소자들의 개발의 현위치를 소개하고자한다.

가장 최근에 westinghouse에서 제작된 6H-SiC MESFET은 높은 resistivity를 갖는 6H-SiC 기판위에 EBDW(Electron Beam Direct Write) 공정을 통하여 제작되었다.⁵¹ MESFET 구조의 개략도가 그림 I에 나타나 있다. 이소자의 epi구조는 undoped된 buffer층, $0.4 \mu\text{m}$ 두께의 channel층(도핑농도, 약 $2.5-5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$), $10^{19}/\text{cm}^3$ 이상의 도핑농도를 갖는 $0.2 \mu\text{m}$ 두께의 n' 층으로 이루어져 있으며 게이트 길이는 $0.5 \mu\text{m}$, 게이트-소오스, 게이트-드레인간격은 각각 $0.5 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$ 이다. Small-signal RF이득은 10 GHz에서 8.5 dB이며

f_{max} 는 25 GHz, f_T 는 약 10 GHz이다.(그림2), 2mm의 periphery를 갖는 이 소자로부터 40 V의 드레인 전압, 작동주파수 6 GHz에서 약 3.5 W의 출력이 측정되었고 출력부과효율(Power Added Efficiency)은 약 45.5 % 이었다. 여기서 측정된 출력은 1.75 W/mm의 출력밀도로서 GaAs MESFET으로부터 얻을 수 있는 출력밀도에 비하여 약 3배가 높은 것이다. 이 소자는 지금까지 발표된 6H-SiC 소자중 그 출력성능과 작동주파수가 가장 뛰어난 것이다.

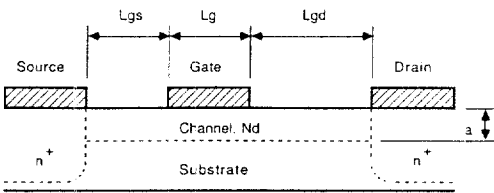


그림 1. MESFET구조의 개략도
Fig. 1 MESFET structure

전하이동도가 6H-SiC보다 우수한 4H-SiC의 MESFET역시 비슷한 구조로 Westinghouse에서 제작되었는데, 예측한대로 이 소자의 channel 전류는 6H-SiC MESFET보다 약 2배 이상의 크기로서 500 mA/mm정도였다. dc 트랜스 컨덕턴스(g_m)는 약 40 mS/mm이고 게이트-드레인간의 항복전압은 100 V 이상이었다. 이 소자의 small-signal RF 특성이 그림 2에 나타나 있으며, 어떤 poly-type의 SiC로 제작된 소자보다도 우수한 frequency 성능을 보여주고 있다($f_{max} = 42$ GHz).

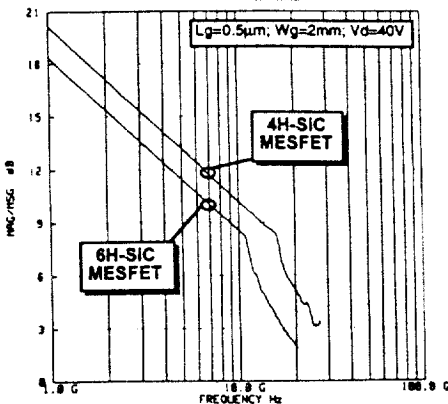


그림 2. Westinghouse의 6H 및 4H SiC MESFET의 small-signal RF 특성
Fig. 2. Small-signal RF characteristics of Westinghouse 6H and 4H-SiC MESFETs.

Westinghouse와는 달리, 기관으로서 도전성 4H-SiC를 사용한 Cree의 4H-SiC MESFET 역시 우수한 RF성능을 보여주고 있다[6]. 이 소자의 epi층 두께는 6 μ m 두께의 p-층($N_A=1.4 \times 10^{17}/cm^3$), 두께가 0.26 μ m인 n-type($N_D=1.7 \times 10^{17}/cm^3$)의 channel층 및 두께 0.15 μ m의 n+층($N_D=2 \times 10^{19}/cm^3$)이다. Class A에서의 작동시 0.85 GHz 대역에서 이 소자의 출력밀도는 3.1 W/mm($V_{ds}=50$ V, $I_{ds}=40$ mA에서)이었으며 출력부과효율(PAE)은 약 38.9 %이었다. 그림 3은 이 소자의 Large-signal RF성능을 보여주고 있다. 이 소자의 class B($I_{ds}=4$ mA)에서의 PAE는 약 65.7 %로 나타났고, 출력밀도는 2.3 W/mm로써 예측되던 class A에서 보다는 낮은 값을 보여주었다.

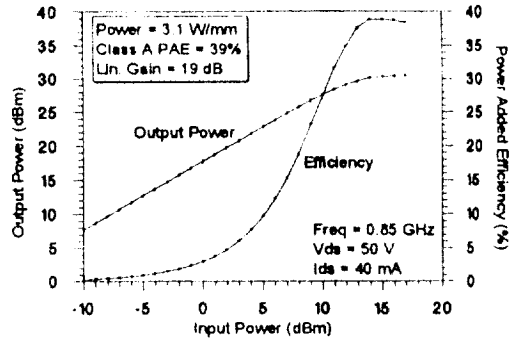


그림 3. Cree의 4H-SiC MESFET의 Large-signal RF 특성
Fig. 3. Large signal RF characteristics of Cree 4H SiC MESFET

3. GaN

3.1 물성 및 소재개발

GaN는 청색 LED 및 LD 소자의 제작에 중요한 소재이지만, GaN가 갖고 있는 독특한 전자 물성때문에 고주파용 전력소자의 제작에도 우수한 재료이다. 표 1에서 보듯이와 같이 GaN의 항복시 최고 전기장 세기는 약 3.5×10^6 V/cm로서 Si이나 GaAs에 비하여 약 10배 이상이 크다. GaN는 현재 III-V nitride중에서 가장 활발한 연구의 대상이 되고 있지만 Si이나 GaAs에 비하면 소재의 물성에 대하여 별로 알려진 것이 없는 실정이다. 아직 homoepitaxy를 위한 기관이 확보되지 않은 상태로써 주로 sapphire가 heteroepitaxy를 위한 기관으로 사용되는데, 이는 고온에서의 안정성, hexagonal symmetry특성 뿐 아니라 사용전 cleaning process가 쉬운 잇점 때문이다. 전자의

transport 특성이 Monte Carlo 방법에 의하여 이론적으로 계산될 수 있는데⁷⁾ 그림 4는 도핑농도 변화에 따른 전자의 속도-전기장 plot이며 그림 5는 도핑농도 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 에서 온도의 함수에 따른 속도-전기장 관계를 보여주는 그림이다. 그림에서 보듯이 GaN에 있어서 electron의 최고 속도는 전기장의 세기 180 kV/cm 근처에서 약 $2.4 \times 10^7 \text{cm/sec}$, 포화전자속도는 $1.5 \times 10^7 \text{cm/sec}$ 정도이다. 표 1에서 보는바와 같이 E_c 의 값이 $3.5 \times 10^6 \text{V/cm}$ 정도이므로 channel의 항복(breakdown)없이 전자의 최고속도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

표 1. Wide band-gap 반도체를 포함한 여러가지 반도체의 물성

Table 1. Semiconductor material properties

Material	E_g (eV)	ϵ_r	κ (W/ $^\circ\text{K}\cdot\text{cm}$)	E_c (V/cm)
Si	1.12	11.9	1.5	3×10^5
GaAs	1.43	12.5	0.54	4×10^5
InP	1.34	12.4	0.67	4.5×10^5
4H-SiC	3.2	10.0	4	$(1-5) \times 10^6$
6H-SiC	2.86	10.0	4	$(1-5) \times 10^6$
GaN	3.4	9.5	1.3	$\sim 3.5 \times 10^6$
Diamond	5.6	5.5	20-30	5×10^6

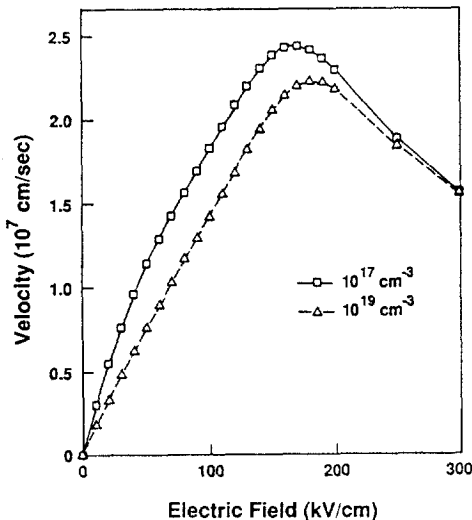


그림 4. 도핑농도 변화에 따르는 상온에서의 GaN의 전자속도 대 전기장의 관계곡선

Fig. 4. Electron velocity-field characteristics for GaN at 300 K for different doping densities

SiC와는 달리 homoepitaxial 성장이 아직 실현되지 않은 GaN 박막으로부터 이론적인 전자이동도나

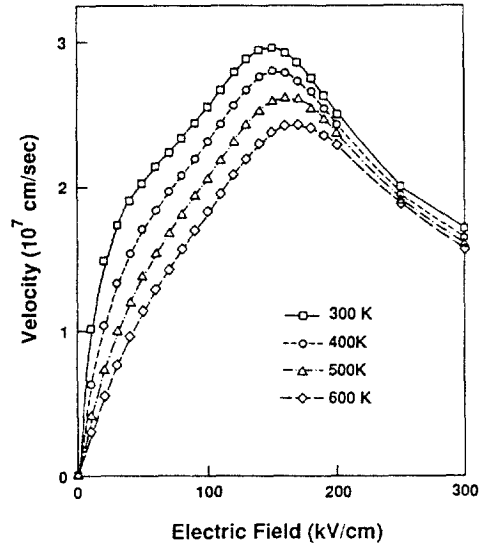


그림 5. 온도변화에 따르는 GaN의 전자속도 대 전기장의 관계곡선

Fig. 5. Electron velocity-field characteristics for GaN at different temperatures

전자속도를 기대할 수는 없다. 그러나 많은 연구 및 투자의 도움으로 sapphire와 같이 highly-mismatched된 기판에서의 heteroepitaxial 성장의 mechanism이 조금씩 밝혀지면서 양질의 GaN, AlGaIn등이 성장되고 있다.⁸⁾ N-type과 p-type 나이트라이드에 대한 도전성 조절도 용이해 졌으며 double 이형구조(heterostructure)를 이용한 캐리어의 confinement 역시 가능해졌다.⁹⁾ 전위밀도(dislocation density) 역시 박막질의 향상에 따라서 줄어들고 있으며 cross-sectional TEM (Transmission Electron Microscopy) 관찰에 의하면 Nichia에서 개발된 청색 LED에서 약 $2 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 의 전위밀도가 존재하는 것으로 보고되었다. 적은 mismatch 때문에 sapphire 뿐만아니라 SiC를 기판으로 이용한 성장법도 활발히 연구되고 있다(AIN 버퍼층에 대하여 1%미만). SiC를 기판으로 사용하여 AIN 버퍼를 성장시킨 경우 GaN박막에서의 전위밀도는 sapphire를 사용한 경우보다 100배 이상 줄어들 수 있음이 보고되었다.¹⁰⁾

HREM(High Resolution TEM)에 의하면, nitride와 SiC간의 계면이 원자단위로 abrupt할 수 있음이 관찰되었다.¹⁰⁾

3.2 GaN Electronic Devices

GaN는 에너지 밴드 갭이 크고 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 계를 이용한 HEMT(High Electron Mobility Transis-

tor)의 제작이 가능하며 전자의 속도가 빠르기 때문에 고출력 마이크로웨이브 대역 응용을 위한 차세대 소재로 관심을 모으고 있다. 상온에서의 전자 이동도는 $1300 \text{ cm}^2/\text{v} \cdot \text{sec}$ 를 나타내며 2차원적 전자 개스(electron gas)로 이루어진 GaN-AlGaIn 이형접합이 성공적으로 제작되었고, 이 접합을 사용하여 f_T 와 f_{max} 가 각각 20 GHz, 77 GHz인 HFET가 제작되어 발표되었다.¹²⁾ 하지만 이 소자의 트랜스 콘택턴스는 28 mS/mm 로서 비교적 낮은 값이었는데 이것은 sheet charge density가 낮으며, ohmic 접합이 이상적으로 제작되지 않았기 때문이다. 한편 Aktas등은¹³⁾ Khan의 소자에 비하여 트랜스 콘택턴스가 우수한 MODFET(Modulation Doped FET)을 제작하였는데 이 소자의 g_m 은 약 120 mS/mm 였으나 게이트-드레인간의 항복전압이 20 V를 상회하는데 그쳤고, 측정된 누설전류밀도는 약 $0.8 \mu\text{A}/\mu\text{m}^2$ 이었다.

제작되는 소자들의 성능은 결국 기판 근처에서의 박막의 질에 의하여 결정된다. 현재 가장 우수한 성능을 보인 소자는 미국 UCSB의 Mishra 그룹에서 제작되었다. 게이트-드레인간의 항복전압이 100 V 이상, 트랜스 콘택턴스가 140 mS/mm 정도이며 channel의 최대전류밀도는 333 mA/mm 인데 이런 우수한 소자적 특성은 양질의 박막에 기인한다고 발표하였다.¹⁴⁾ 이 소자의 epi구조는 MOCVD로 성장되었고 HFET와 MODFET의 channel 두께는 각각 $0.4 \mu\text{m}$, $0.3 \mu\text{m}$ 이었다. 두 소자의 게이트 길이는 각각 $1.5 \mu\text{m}$ 및 $1 \mu\text{m}$ 이며 HFET의 게이트 장벽은 두께 300 \AA 의 undoped $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 층이다. MODFET에 있어서 doped layer의 도핑농도는 $N_d=3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 이었다. 그림 6은 같은 구조를 지닌 두 MODFET의 I-V 특성을 보여주는데 소자의 구조가 같음에도 불구하고 I_{max} 값이 2배이상 차이가 남을 볼 수 있고, 이것은 아직도 박막성장 기구가 정확하게 확립되지 않았으며, 이 재료에 있어서 이에 관한 연구의 여지가 충분함을 입증하는 것이다. 그림 7은 콘택턴스가 140 mS/mm 에 이르는 HFET의 I-V 특성을 나타낸다.

이 소자는 낮은 ohmic 접촉 저항 때문에 MODFET에 비하여 knee voltage가 낮았지만 channel의 전류밀도나 전압특성은 MODFET와 비슷하였다. Microwave 특성분석을 통하여 f_T 는 5 GHz이며 f_{max} 는 약 11 GHz로서 우수한 I-V 특성에 비하면 상당히 열악한 값이다. 이 소자의 게이트 길이가 HFET는 $1 \mu\text{m}$, MODFET는 $1.5 \mu\text{m}$ 로서 비교적 게이트 길이가 긴 편으로 이후 영향이 고려될 수 있겠으나, 정확한 이유에 대하여는

아직도 연구가 진행중이다.

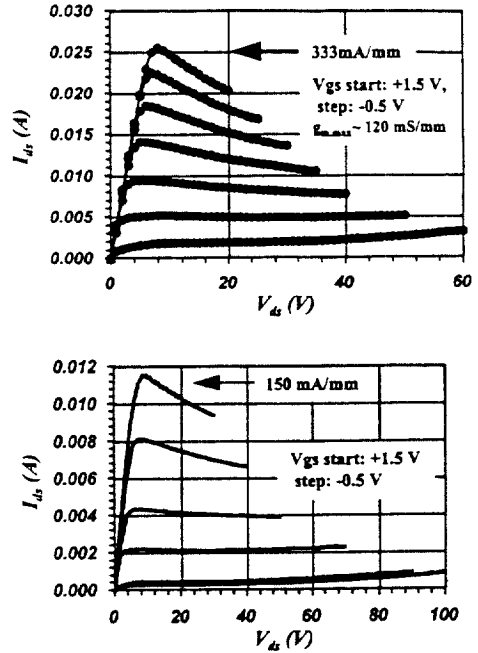


그림 6. 같은 구조를 갖는 두 GaN MODFET 소자의 전류전압 특성

Fig. 6. I-V characteristics of two GaN MODFETs with the same device structure

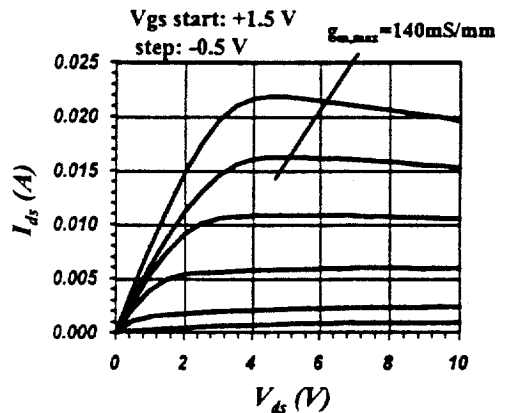


그림 7. GaN HFET의 전류전압 특성

Fig. 7. I-V characteristics of GaN/AlGaIn HFET

3.3 Contact to GaN

GaN의 ohmic contact에 관하여 현재 많은 연구가 진행중인데 이는 ohmic contact의 상태가 소자

의 성능에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 1993년에 Foresi와 Moustakas가 처음으로 이 분야의 연구를 시작하였다.¹⁵⁾ Al을 ohmic contact의 재료로 사용하였을 때 specific contact resistance가 약 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로서 비교적 높은 저항을 나타내었고, 그 이후, Morcoc 그룹에서¹⁶⁾ Ti/Al의 2중 층을 사용한 후 annealing을 900°C에서 수행하여 접촉저항을 $8 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 까지 향상시켰다. 이 경우 낮은 저항에도 불구하고 고온에서는 Al이 용해하여 ball-up을 이루게 되어 표면의 roughness가 증가하였다. 최근에 Mishra¹⁷⁾ 그룹에서는 annealing 조건 및 2중층 Ti/Al의 공정조건을 최적화하여 한층 더 낮은 저항값을 나타내며 표면의 smoothness가 향상된 ohmic contact를 개발하였다. ($3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$) 이렇게 낮은 ohmic 저항의 이유로서 Lin¹⁶⁾ 등은 Ti이 N과 반응하여 TiN을 형성한 것으로 그 기구를 규명하였다. 표면에서의 N의 결핍이 계면 상에서 heavily doped된 GaN를 야기시키고 전자의 터널링을 촉진시키게 된다. Mishra 그룹에서는 도핑농도가 서로 다르며, 따라서 전하이동도가 서로 다른 ($\mu_1=400 \text{ cm}^2/\text{v} \cdot \text{s}$, $n_1=4.5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$, $\mu_2=580 \text{ cm}^2/\text{v} \cdot \text{s}$, $n_2=1.7 \times 10^{17}/\text{cm}^3$) 두 sample에 대한 ohmic 저항을 측정하였는데, 이로부터 거의 비슷한 접촉저항($5.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$, $3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$)이 측정되었다. 이 결과는 전술한 Lin 등의 낮은 접촉저항의 기구적인 해석과 일치한다. 두 sample은 모두 annealing 온도가 증가함에 따라서 1000 °C까지 접촉저항이 감소하였다.(그림 8) 그림 9는 도핑농도 $1.7 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 의 sample에 대한 TLM 측정결과로써 이로부터의 접촉저항이 약 $3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 계산되었다.

3.4 GaN MESFET의 이론적 성능분석

전술한대로 GaN 소자의 특성은 GaN 박막의 질과 밀접한 관계가 있다. 현재 발표되는 여러 prototype 소자들의 성능은 박막의 성장기구가 명확히 규명되며 따라서 이상적인 조건에서 박막이 성장된다면 더욱 좋은 결과를 나타낼 것이다. 이론적인 GaN의 물성을 이용하여서 최적화된 구조를 가진 GaN MESFET의 이상적인 성능을 이론적으로 예측할 수 있으며 본 장에서는 이에 대한 간단한 소개를 하도록 한다. MESFET의 Large-signal RF 특성은 time domain과 frequency domain으로 되어있는 내부 FET와 외부의 parastic element를 harmonic balance techniques을 사용하여 연계시킴으로서 계산할 수 있다. 그림 10은 내부 FET의 Large-signal equivalent circuit을 도식화한 것이

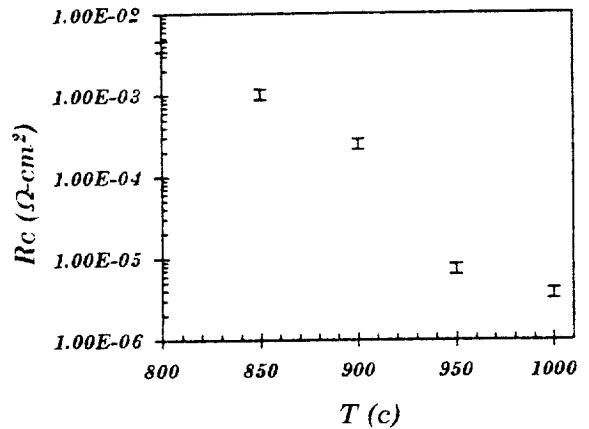


그림 8. GaN의 Contact (Ti/Al) 저항 대 Annealing 온도 관계¹⁷⁾.

Fig. 8. Contact Resistance vs Annealing temperature in GaN Contact^[17]

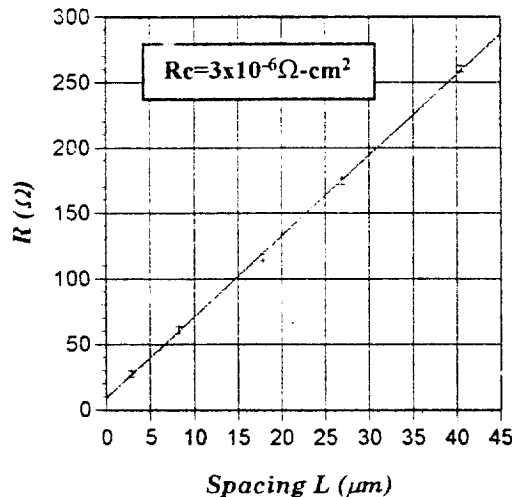


그림 9. TLM으로부터의 GaN의 Contact (Ti/Al) 저항¹⁷⁾.

Fig. 9. Ohmic Contact Resistance obtained from TLM measurement¹⁷⁾.

다. 이 때 드레인 전류는 터미널 전압의 비선형함수이다. 게이트 및 displacement 전류(I_g , I_d)는 large-signal capacitance 매트릭스[C]를 통하여 터미널 전압의 time-derivative에 연계되어 있다. 커패시턴스 매트릭스[C]는 2×2 매트릭스이며, 일반적으로 비대칭이면서, 또한 터미널 전압의 함수이다. 게이트의 전압지연시간(τ)은 게이트 공핍층의 charging time을 modeling하며, C_{in} 을 input 커패시턴스라 할 때 charging 저항인 τ/C_{in} 과 같다. 이

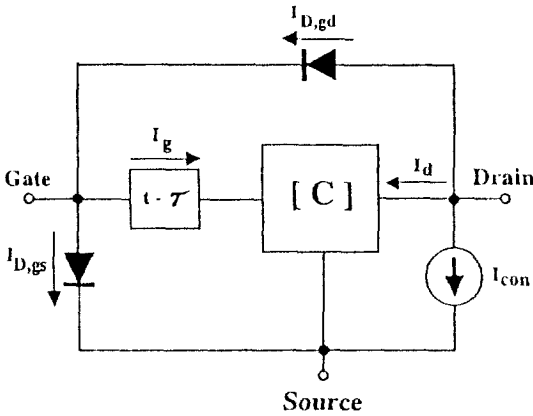


그림 10. Intrinsic FET의 Large-signal equivalent circuit

Fig. 10. Large-signal equivalent circuit for the FET

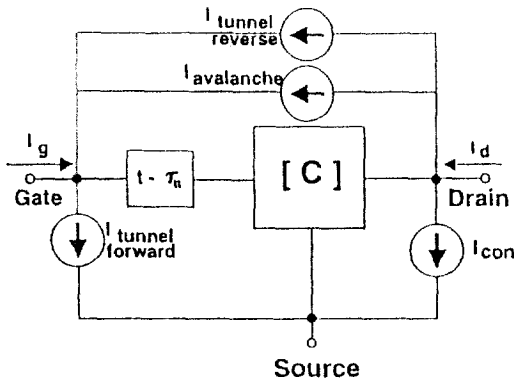


그림 11. Forward 및 Reverse tunneling 및 avalanche generation을 첨가한 FET의 Large-signal equivalent circuit

Fig. 11. Large-signal equivalent circuit for the FET including the forward and reverse tunneling source and the avalanche generation source

와같은 Large-signal MESFET circuit 에 forward 및 reverse의 tunneling과 avalanche generation 을 첨가할 경우 그림 11과 같은 equivalent circuit 을 생각할 수 있으며 GaN의 여러 물성을 근거로 최적화한 MESFET 구조 및 이상적인 impedance matching을 유추할 수 있다. GaN MESFET의 이론적 성능분석을 위해서는 Modeling 결과와 특정한 구조를 갖는 GaN 소자로 부터의 실험적인 데이터와 일치하는지를 확인해야 하며, 이 결과에 따라, GaN MESFET Modeling의 정확성을 분별하

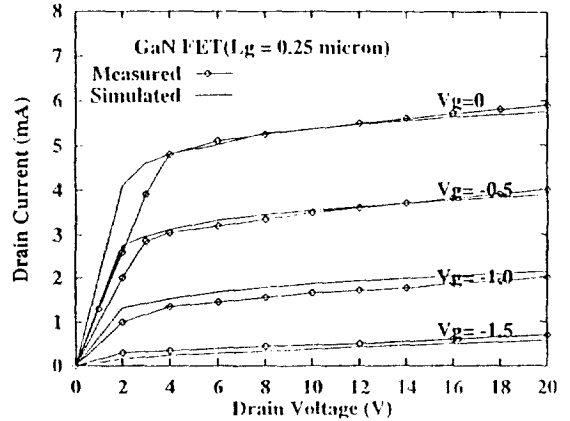


그림 12. AlGaIn/GaN HEMT의 전류전압 특성¹⁸⁾

Fig. 12. Measured and modeled dc I-V characteristics of AlGaIn/GaN HEMT¹⁸⁾.

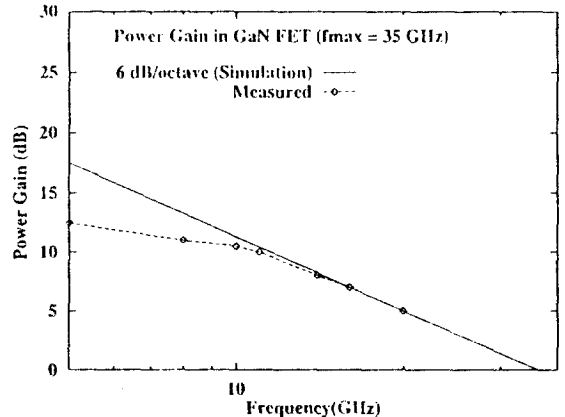


그림 13. AlGaIn/GaN HEMT의 11 GHz에서의 small-signal 출력특성¹⁸⁾

Fig. 13. Small-signal power gain of a AlGaIn/GaN HEMT at 11 GHz

고, 이상적인 소자구조 및 impedance matching을 제시하게 된다. 그림 12는 게이트 길이 0.25 μm 인 HEMT구조에 대한 실험 및 계산에 의한 전류-전압 특성을 보여준다.¹⁸⁾ 이 비교에 따라 유추된 소자구조적, 물성적 변수들이 표 2에 나타나 있다. 그림 13은 실험적으로 측정된 small-signal 이득을 이론적으로 계산한 값과 비교하였다. 이소자의 f_T 는 11 GHz, f_{max} 는 35 GHz 이다. GaN의 고주파용 전력소자로서의 potential을 예측하기 위하여 표 III과 같이 GaN MESFET의 구조를 최적화하

표 2. 모델에서 쓰인 Parameter들
Table 2. Modeling Parameters.

Parameter	Value
Doping, N_d	$1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Gate length, L_g	$0.25 \mu\text{m}$
Gate-drain spacing, L_{gd}	$0.75 \mu\text{m}$
Channel thickness, a	$0.14 \mu\text{m}$
Gate width, W	$150 \mu\text{m}$
Band gap, E_g	3.12 eV
Activation energy, E_a	0.005 eV
Permittivity, ϵ_R	9.5
Mobility, μ_n	$1000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$
Saturated velocity, v_s	$1.5 \times 10^7 \text{ cm}/\text{sec}$

여 최고 전력 부과 효율이 얻어질 수 있도록 impedance matching 을 통하여 Large-signal RF 특성을 조사할 수 있다. 그림 14는 이 소자의 상온 작동시 8 GHz 대역에서의 Large signal RF 특성이다. 이때 출력은 약 4 W/mm, 출력부과효율은 약 50 %이며 전행이득은 20 dB이다. 소자의 500 °C에서 작동특성은 그림 15에 나타나 있는데 이때의 출력은 약 1.1 W/mm, 출력부과 효율은 input power 20 dBm에서 약 33 %정도임을 알 수 있다. 이 결과는 GaN가 LED와 LD와 같은 광전소자뿐 아니라 고주파, 고온용 전력소자의 응용에도 아주 이상적인 물질임을 보여주고 있다.

4. 결 론

본고에서는 SiC와 GaN 중심으로 Wide Band-gap 반도체의 고주파용 전력소자 응용에 관하여 그 연구 현황을 개략적으로 고찰하였다. 두 재료 모두 전력소자의 모체재료로서 우수한 물성을 갖고 있으며, 특히 GaN의 경우 광전소자뿐 아니라 우수한 전력소자의 응용 가능성이 있음을 Large-signal Modeling 및 prototype 소자들의 성능으로부터 알 수 있다.

* 본 개요의 일부에 대한 연구는 (주)태동화학의 연구금으로 수행되었고 이에 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. R. J. Trew and M. W. Shin, Inter. Journal of High Speed Electronics and Syst. Vol. 6,

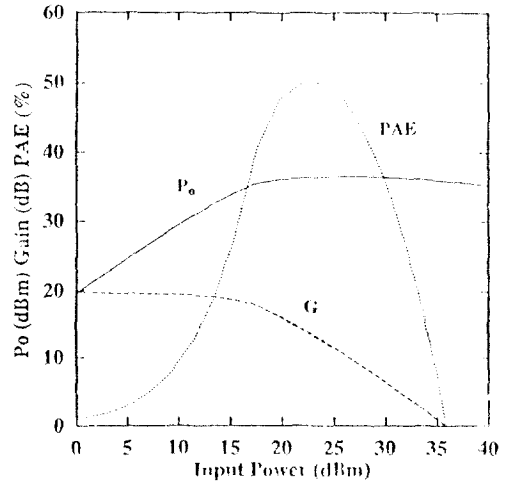


그림 14. 8 GHz에서의 GaN MESFET의 Large-signal RF 특성(상온)

Fig. 14. Large signal RF characteristics of a GaN MESFET at room temperature at an operating frequency of 8 GHz.

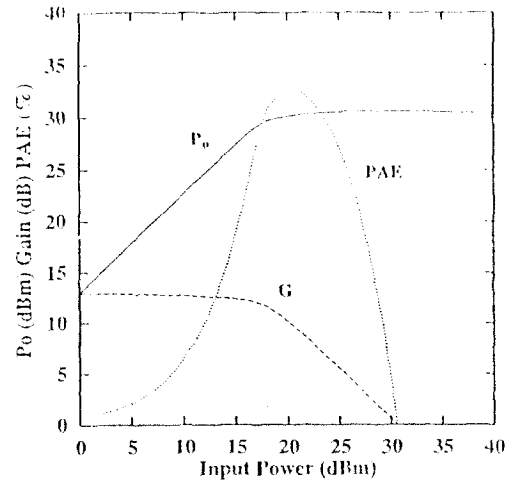


그림 15. 8 GHz에서의 GaN MESFET의 Large-signal RF 특성(773 K)

Fig. 15. Large-signal RF characteristics of a GaN MESFET at 773 K at an operating frequency of 8 GHz.

No. 1, pp. 211, 1995.
 2. J. A. Powell, Mater. Res. Symp. Proc. Vol. 97, 1987.
 3. R. G. Barret, W. Seidensticker, R. H. Gaida, D. L. Hopkins and W. J. Choyke, J. Cryst. Growth. Vol. 109, pp. 17-23, 1991.

4. C. Fazi, M. Dudley, S. Wang and M. Ghezzi. SCRM93, Inst. of Phys. Conf. Ser., 137, pp. 487, 1994.
5. C. D. Brandt et al., SCRM95, Inst. Phys. Conf. Ser., 142, pp. 659, 1996.
6. S. T. Allen et al., SCRM95, Inst. Phys. Conf. Ser., 142, pp. 761, 1996.
7. B. Gelmont, K. S. Kim and M. Shur, J. Appl. Phys., Vol. 74, pp. 1818, 1993.
8. Isamu Akasaki et al., SCRM95, Inst. Phys. Conf. Ser., 142, pp. 7, 1996
9. S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh, Appl. Phys. Lett., Vol. 64, pp. 1687, 1994.
10. F. A. Ponce, TWN95 Workshop, Nagoya, Japan, Sep. 1995.
11. S. J. Pearton, R. J. Shul and G. F. McLane, TWN95 Workshop, Nagoya, Japan, Sep. 1995.
12. M. A. Khan et al., Appl. Phys. Lett., Vol 66, pp. 27, 1995.
13. O. Aktas et al., IEDM95, Technical Digest, pp.205, 1995.
14. Y. F. Wu et al., DRC Digest, pp.60, 1996.
15. J. S. Foreis and T. D. Moutakas, Appl. Phys. Lett., 82, pp. 2859, 1993.
16. M. E. Lin et al., Appl. Phys. Lett., 64, pp. 8, 1994.
17. Yifeng Wu et al., TWN95, Workshop, Nagoya, Japan, Sep. 1995.
18. M. W. Shin and R. J. Trew, IEE Electronic Lett., Vol. 31, No. 6, pp. 498, 1995.

저자소개



신무환

1960년 3월 31일생. 1988년 미국 North Carolina주립대학 재료공학과(석사). 1991년 동 주립대학 재료공학과(Ph.D.). 1991-1993년 미국 North Carolina주립대학 전기공학과 Research Associate. 1994년-1995년 미국 Case Western Reserve Univ. 객원교수 및 마이크로웨이브 램 상임연구원. 1996년 현재 명지대학교 무기재료과 조교수. 1993년 미국 National Academy of Science, National Research Council 초청강연(Wide Bandgap 반도체). 1994년 미국 국제 고온전자소자학회(HITEC) 편집위원. 현재 미국 Electronic Journal의 Associate Editor 및 본 학회지의 영문지 편수위원.

■ 1996년도 12월호의 기술해설 제목과 저자는 다음과 같으니 많은 참고 바랍니다.

題 目	著 者 및 所 屬
마이크로파 집적회로 AlGaAs/GaAs HBT	형창희, 김남영 (광운대학교)
마이크로파 집적회로 응용을 위한 HEMT	이관호, 김종현 (광운대학교)