

## GaN계 전자소자의 연구동향



**오상도**  
(서강대학교 전자공학과)



**범진욱**  
(서강대학교 전자공학과)



**백홍구**  
(연세대학교 금속공학과)

### 1. 서 론

무선통신기술의 발달과 함께 많은 정보를 멀리 보내야만 하는 필요성이 부각되어 왔다. 정보를 많이 보내기 위하여서는 높은 주파수에서 동작하는 소자가 필요하며, 멀리 보내기 위하여서는 높은 출력을 낼 수 있는 소자가 필요하다. 지금까지 이 필요성에 부합하는 방법을 찾기 위하여 게이트의 길이를 줄이는 것과 같은 공정방법의 개발, 이중접합구조 형성과 같은 적층구조의 개선, 또는 InP, SiC 나 GaN 같은 새로운 물질의 개발 등을 통해서 많은 연구가 이루어지고 있다. GaN 계 전자소자는 SiC와 함께 광에너지 밴드갭 (wide energy bandgap) 반도체라고 불리우는데 그 이유는 이들 소자의 에너지 밴드갭이 3 eV내외로 다른 물질의 소자들과 비교하여 볼 때 2배 이상이 되기 때문이다. 광에너지 밴드갭 반도체 물질은 화학적으로 안정되고 고온 및 고전기장에서의 내구력이 큰 장점을 가지고 있어 고온 등 극한 상황에서 작동하는 반도체 소자나 인가전압을 증가 시켜 출력을 증가시키는 전력용으로의 사용이 적합하다. 광에너지 밴드갭 반도체는 에너지밴드갭이 넓은 것 이외에도 높은 항복전기장과 낮은 유전상수를 가지게 된다. 높은 항복전기장은 전력소자의 제작에 도움이 되며 낮은 유전상수는 고속동작을 적합하게 한다. 이러한 성질을 잘 이용하면 보다 좋은 성능의 전자소자를 구현하는 것이

가능하다. 본 논문에서는 이 중 GaN계 반도체를 이용한 전자 소자에 대하여 소개하고자 한다.

### 2. GaN계 반도체의 특성

표 1. 각 물질의 특성비교.

|        | 포화 전자속도                   | 항복전압      | 유전율  |
|--------|---------------------------|-----------|------|
| Si     | $1 \times 10^{17}$ cm/s   | 0.3 MV/cm | 11.8 |
| GaAs   | $1 \times 10^{17}$ cm/s   | 0.6 MV/cm | 12.8 |
| 4H-SiC | $2 \times 10^{17}$ cm/s   | 2 MV/cm   | 10   |
| GaN    | $2.2 \times 10^{17}$ cm/s | 3.3 MV/cm | 9    |

GaN계 물질은 실리콘이나 갈륨비소와 같은 다른 상용화된 반도체물질과 비교하면 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 표 1에서보면 GaN은 전자의 포화이동속도가 다른 물질에 비하여 빠른 것을 알 수 있다. 갈륨비소와 비교해 볼 때 전자의 포화이동속도가 2배 이상 빠르다. 포화이동속도가 빠르다는 것은 GaN계 전자소자가 높은 주파수에서 동작할 수 있는 반도체로서의 응용가능성이 상당히 크다는 것을 의미한다. 고주파 동작 소자로서의 또 다른 잠재성은 물질자체의 유전율이 낮다

는 것이다. 갈륨비소와 비교해 보면 GaN의 유전률이 약 30% 정도 낮다. 이것은 소자 내부의 커패시턴스를 줄이는 것에 도움이 된다. GaN계 물질을 이용하여 전력증폭용 트랜지스터를 제작하는 경우 AlGaN/GaN의 이종접합 구조를 이용하는데 그 이유는 이종접합을 이용하여 전자의 이동도를 향상시킬 수 있으며 이종접합의 경계면에 위치한 전하의 양이 전도되는 전류의 양에 관계를 하기 때문이다.[1] AlGaN/GaN 이종접합의 경계면에 모이는 전하의 양은 AlGaAs/GaAs의 이종접합의 경계면에서의 전하량보다 월등히 크다. 이것은 이종접합을 이루는 두 물질 사이의 전도밴드 (conduction band)의 불연속량 (discontinuity)에 관계하며 AlGaN/GaN 이종접합의 경우처럼 불연속량이 클수록 포함할 수 있는 전하량이 증가하기 때문이다.

그림 1에서 전도밴드 (conduction band)의 불연속량이 작은 경우와 큰 경우를 나타내었다. 이종접합구조의 경계면에 포함할 수 있는 전하량이 증가할수록 전도밴드의 불연속량이 작은 경우 배리어 (Barrier)의 최저 에너지점이 페르미 준위 (Fermi Level)에 접근하게 된다. 배리어의 최저점이 페르미 준위에 가까이 위치하게 되면 더 이상 채널에서의 전하량은 증가하지 않는다.

채널 전하량을 증가시키기 위하여 게이트에서 (+)전압을 인가하여 페르미 준위를 증가시킴으로써 채널의 전하용량을 증가시킬 수 있게 된다. 하지만 배리어의 최저점이 페르미 준위와 가까워지는 경우 배리어에도 자유전하가 생성되어 배리어에서의 자유전하가 채널에 미치는 전기장을 모두 막는 현상 (screen)이 발생하여 채널의 전하량을 더 이상 증가하지 못하

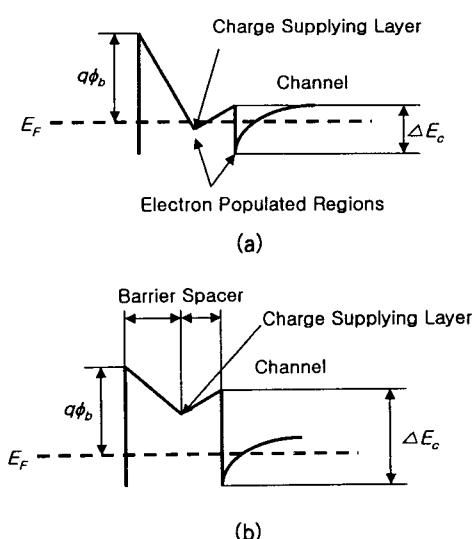


그림 1. 이종접합에서의 전도밴드 (conduction band)의 불연속량이 (a) 작은 경우와 (b) 큰 경우

게 한다. 그러므로 이때의 전하량이 이종접합에서 가질 수 있는 최대 전하량이 된다. 전도밴드의 불연속량이 큰 경우는 배리어의 최저 에너지점을 페르미준위에 근접시키지 않고서도 채널을 깊숙히 페르미 준위 밑으로 밀어 넣어 모이는 전하량을 증진시킬 수 있다. GaN계 이종 접합의 경우 전도밴드 불연속량이 다른 어떤 반도체의 경우보다 커서 전하량을 늘리고 전류를 증진시킬 수 있다. 또한 GaN 반도체 내에서는 spontaneous polarization과 piezoelectric polarization이 모두 존재하는데 이 중 spontaneous polarization의 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 이 spontaneous polarization은 이종접합에서 채널에 전하량을 더 많이 모아 주도록 양극화되므로 GaN계 전자소자에서는 큰 전도밴드 불연속량과 더불어 polarization의 효과에 의해 이종접합에 더 많은 전하량이 모이게 된다.[2] GaN계 트랜지스터에서 보통 1A/mm[3] 이상의 높은 전류를 얻을 수 있는데 이러한 전하량의 증진 때문이다. GaN계 전자소자가 다른 반도체 물질에 비하여 고출력 소자로 관심을 모으고 있는 이유가 이런 높은 전류와 높은 항복 전압에 있다.

전력 증폭용 소자의 우수성을 비교하기 위하여 사용되는 척도로서 Johnson figure of merit (JFM)과 Keyes figure of merit (KFM)이 있다. JFM의 경우 전력 증폭의 가능성을 비교하는 척도이며 KFM의 경우 높은 전력 증폭을 할 경우 생성되는 열을 얼마만큼 잘 방출시킬 수 있느냐에 관련된 척도이다. JFM과 KFM을 식으로 표현하면 다음과 같다.[4]

$$JFM = \left( \frac{E_m v_s}{2\pi} \right)^2$$

$E_m$  - 항복 전기장

$v_s$  - 전자의 포화 속도

$$KFM = K \left( \frac{cv_s}{2\pi\epsilon} \right)^{1/2}$$

$K$  - 열전도도

$c$  - 빛의 속도

$\epsilon$  - 물질의 유전율

Si을 비롯한 여러 물질의 JFM과 KFM을 비교하면 표 2과 같이 요약될 수 있다.

표 2에서 보여지는 바와 같이 GaN은 JFM에서 대단히 우수하며 KFM에서도 우수하나 다소 특성이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 GaN 자체의 열전도도가 좋지 않아 전력 증폭기로 이용될 때 발열되는 전력을 효과적으로 방출시키지 못하기 때문이다. 이런 문제들을 해결하기 위하여 사파이어기판보다는 열방출 특성이 좋고 GaN 형성이 쉬운 SiC를 기판으

표 2. 여러 가지 반도체의 KFM과 JFM.(4)

| 물질      | JFM                                      |           | KFM  |           |
|---------|--|-----------|--|-----------|
|         | JFM<br>(V <sup>2</sup> /S <sup>2</sup> ) | Si과의<br>비 | KFM<br>(W/cm <sup>1/2</sup> s <sup>1/2</sup> ) | Si과의<br>비 |
| Si      | 9.1×10 <sup>23</sup>                     | 1.0       | 13.8×10 <sup>2</sup>                           | 1.0       |
| GaAs    | 64.8×10 <sup>23</sup>                    | 7.1       | 6.25×10 <sup>2</sup>                           | 0.45      |
| GaN     | 18466×10 <sup>23</sup>                   | 2029      | 22.5×10 <sup>2</sup>                           | 1.6       |
| 6H-SiC  | 6485×10 <sup>23</sup>                    | 712       | 71.8×10 <sup>2</sup>                           | 5.2       |
| 3H-SiC  | 6485×10 <sup>23</sup>                    | 712       | 71.8×10 <sup>2</sup>                           | 5.2       |
| Diamond | 73863×10 <sup>23</sup>                   | 8117      | 443.1×10 <sup>2</sup>                          | 32.1      |

로 사용하는 연구가 진행되고 있다. 적절한 방법으로 열 분산 문제를 해결한 이후에는 GaN가 전력 증폭용으로 대단히 우수한 성질을 나타낼 것으로 기대된다.

### 3. GaN계 전자소자

1986년 사파이어 기판위에 우수한 GaN 박막형성을 일본의 Akasaki 교수가 성공시키면서[5] GaN 전자소자의 개발에 대한 연구가 활발하게 이루어졌다. 1980년대 후반부터 1990년대 초반까지 전자 소자 제작에 필요한 건식 식각과 습식 식각에 대한 연구와 저항성 접합 및 정류성 접합을 형성하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. 초기에는 주로 GaN를 채널로 하는 MESFET의 형태로 구현되었으나, MESFET에 비하여 AlGaN/GaN 이종접합을 이용한 경우 뛰어난 성능개선이 가능한 것으로 밝혀져 HFET (Heterojunction Field-Effect Transistor)의 연구가 집중적으로 이루어졌다.

#### 3.1 AlGaN/GaN HEMT와 HFET

1990년대 중반에 들어서면서 왕성한 연구 결과들이 나오기 시작했다. 대부분의 연구 결과들이 AlGaN/GaN의 이종접합을 이용한 HFET (Heterostructure Field Effect Transistor)이나 HEMT (High Electron Mobility Transistor)였다. 이들의 구조를 살펴보면 채널로 GaN층을, 배리어로 AlGaN층을 가지며 주로 사파이어 기판이나 SiC 기판 위에 성장시켜 된다.[6] AlGaN/GaN 이종접합을 이용한 구조는 그림 2에 나타내었다.

배리어의 두께는 보통 100-300 Å으로 상당히 얇으며 AlGaN층내의 Al의 mole 농도는 보통 20-40%를 사용한다. Al농도가 높을수록 AlGaN의 벤드갭을 향상시켜 소자의 성능을 개선시키지만 Al농도가 무리하게 높을 경우 결정 성장시 채널인 GaN와 결정상수의 차이가 크게 되어 결함이 발생하는 어려움이 있다. 배리어의 두께를 얇게 하는 것이 소자의

transconductance의 향상과 기생성분의 영향을 줄이는데 도움을 주지만 너무 얇은 경우 결정 성장이 어려워지고 같은 양의 드레인 전류를 얻기위한 게이트의 전압이 전체적으로 (+)로 이전되어 충분한 드레인 전류를 확보하기 전에 게이트 turn-on이 발생할 수도 있다.

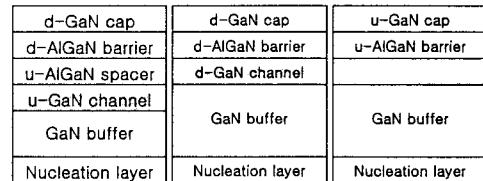


그림 2. AlGaN/GaN 이종접합 구조

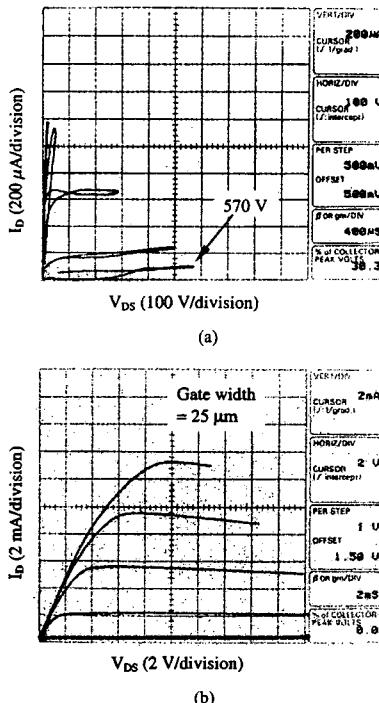
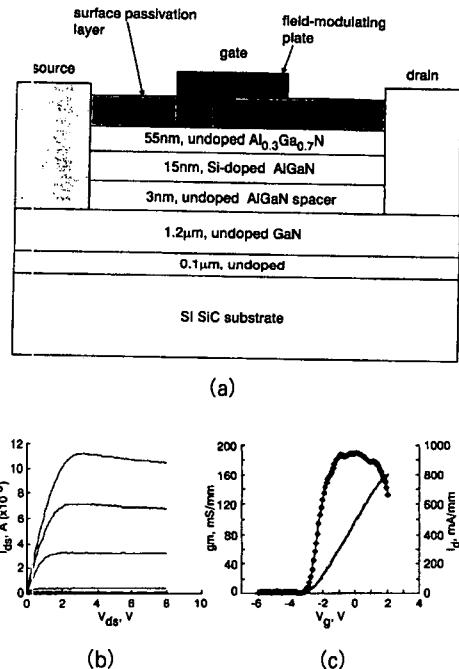
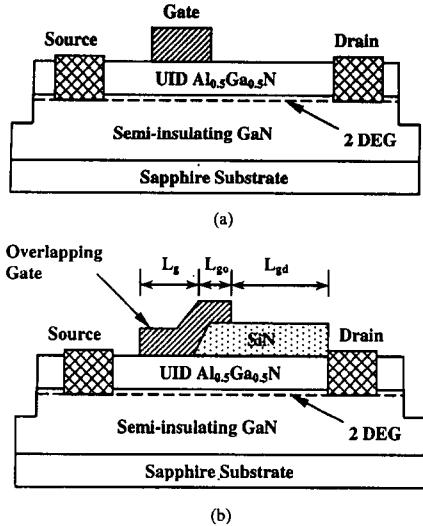
- (a) 일반적인 구조
- (b) 도핑을 한 구조
- (c) 도핑을 하지 않은 구조

\* d는 도핑을, u는 도핑을 하지 않음을 의미

AlGaN/GaN HEMT구조의 기판으로 사용되는 물질은 사파이어나 SiC가 있는데 사파이어의 경우 GaN와 격자 불일치도가 18%이지만 가격도 저렴하며 높은 저항 때문에 보편적으로 사용되고 있다. 반면, SiC의 경우 GaN와의 격자 불일치가 3.5%에 불과하여 성장하기 쉬울 뿐만 아니라 약 0.4 W/cm-K의 열전도도를 가지는 사파이어에 비하여 상당히 높은 3.4 W/cm-K의 열전도도의 특성 때문에 고출력 반도체로 사용되는 GaN계 전자소자의 기판으로는 이상적이지만 SiC는 대개 전도성이며 높은 저항을 가지는 SiC의 경우 그 값은 사파이어에 비하여 상당히 비싸다. AlGaN/GaN HFET을 형성하기 위한 기판물질로 대개 사파이어를 사용하는데 열방출의 문제를 해결하기 위해 사파이어를 얇게 갈아내는 backside grinding 공정을 사용하거나 사파이어에 비해 상대적으로 열전도도가 좋은 AlN 기판위에 플립칩 본딩(flipchip bonding)을 사용하여 얇은 접촉패드를 통하여 열을 방출하는 방법을 사용하고 있다. 항복전압을 향상시키기 위한 여러 가지 연구결과가 나오고 있는데 겹쳐진 게이트 구조와 field plate를 이용한 것이 그 대표적인 것이다. 게이트를 겹치는 구조나 field plate 구조는 드레인쪽의 게이트 모서리에 걸리는 전기장을 감소시키는 효과가 있어 항복전압이 증가한다.

Santa Barbara에 있는 캘리포니아 주립대학(UCSB)에서는 게이트와 드레인사이의 간격이 13 μm인 HEMT 구조에서 570 V의 항복전압을 얻었다. (그림 3, 그림4)[7]

UCLA의 Device Research Lab.에서는 field plate구조를 이용하여 게이트와 드레인 사이의 간격이 1.7 μm인 GaN



HFET의 항복전압을 110V까지 증가시켰다.(그림 5)(8)  
고출력 소자를 구현하기 위하여 해결해야 할 문제들 중의 하

나가 Device isolation인테 최근 Matsushita의 Semiconductor Device Research Center에서는 selective thermal oxidation process를 이용하여 산화 과정동안 소자의 전기적 특성의 변화없이 120 V의 드레인 전압에서도 누설전류가 없이 완벽한 핀치오프가 되는 AlGaN/GaN HFET을 개발하였다.(그림 6)[9]

GaN HFET의 결정성장에는 주로 MOCVD가 많이 사용되었는데 최근에는 MBE로도 좋은 결과를 얻고 있다. 최근 Hughes Research Lab에서 발표한 결과에 따르면  $0.25 \times 200\mu\text{m}^2$  의 HFET에서  $f_T = 110 \text{ GHz}$ 와  $f_{max} = 140 \text{ GHz}$ 를 얻었다. MBE로 성장된 이 GaN HFET에서 20 GHz에서 4W/mm의 전력밀도와 10 GHz에서 0.6 dB의 잡음 지수(noise figure)를 보였는데 이 같은 전력 밀도와 잡음 지수는 다른 기술에서는 찾아보기 힘든 대단히 우수한 결과이다.[6] 또한 20 GHz에서  $2 \times 50 \mu\text{m}$  dual 게이트를 가지는 HEMT에서 6.6 W/mm의 전력밀도를 얻었다. 이는 지금까지 보고된 GaN HFET의 결과중 가장 좋은 것이며 GaN HFET이 18 GHz부터 26 GHz의 주파수 범위를 가지는 K밴드에서 사용될 수 있다는 가능성을 보여주고 있다.(그림 7)[10]

이외는 별도로 GaN HFET의 출력전력에 대한 연구가 많이 되고 있는데 Cree사는 10 GHz에서 6.9 W/mm의 전력 밀도

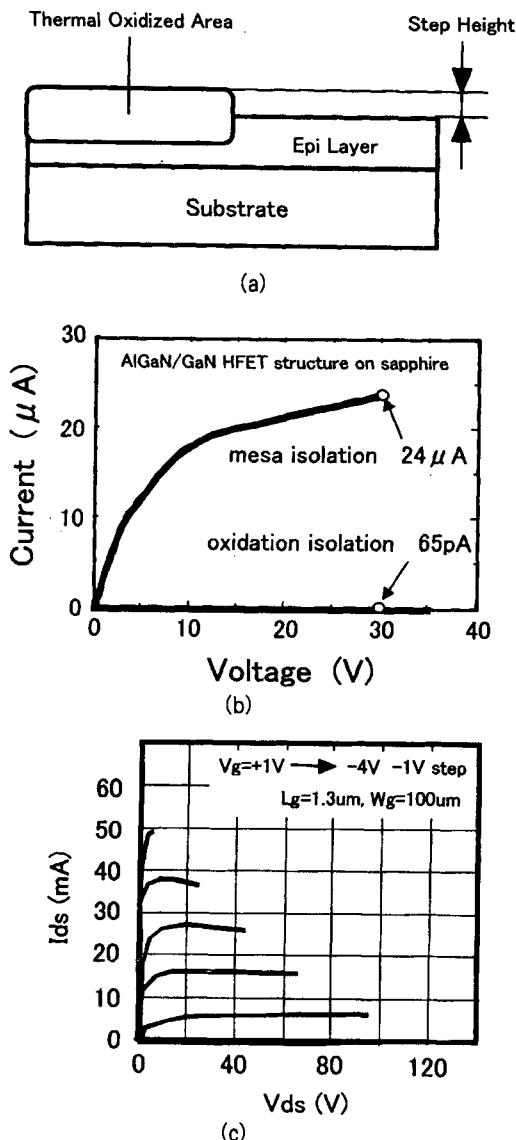


그림 6. (a) 산화공정후의 단면도  
(b) 6μm 떨어진 두 MESA 사이의 전류-전압특성  
(c) AlGaN/GaN HFET의 전류-전압 특성곡선(9)

를 보고하였다.[11] 이 같은 성과는 SiC기판을 사용하여 열 방출을 용이하게 하고 절연 기판을 사용하여 주파수 특성을 높인 결과로 가능하게 되었다. GaN HFET의 결과가 전력 밀도로만 많은 경우 보고가 되어 실제 대형 (large periphery) 소자의 경우 작은 소자에서 얻은 결과가 비례적으로 얻을 수 있을지에 대한 의문이 있을 수 있는데 이 문제에 대한 검증이 이루어져 전력특성에 관한 scalability를 입증하였다.[12]

코넬대학교의 Eastman 그룹에서는 AlGaN/GaN HEMT를 이용한 cascode connection 통해  $f_T = 24.5 \text{ GHz}$  와  $f_{max} = 56 \text{ GHz}$ 를 얻었으며 4GHz에서 4W/mm의 포화 출력전

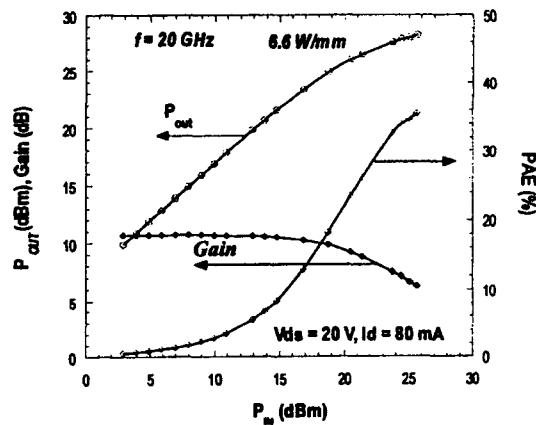


그림 7. 20 GHz에서 0.1 mm GaN HFET의 전력특성곡선  
(드레인 전압 = 20 V, 드레인 전류 = 80 mA)(10)

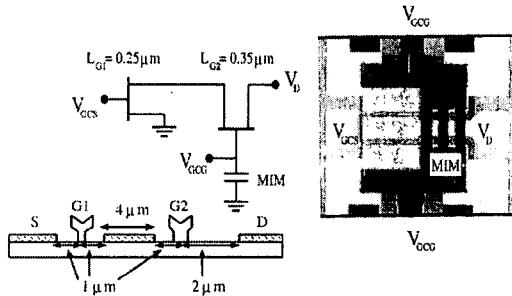


그림 8. 코넬대학교의 250 μm cascode connected HEMT.(13)

력을 측정하였다. 단일 소자와 비교를 통하여 common-source 구조보다 cascode 구조가 선형이득을 7 dB 증가시키는 것을 확인하였다(그림 8).[13]

Santa Barbara에 있는 캘리포니아 주립대학의 Mishra 그룹은 사파이어기판 위에 dual gate AlGaN/GaN MODFET을 제작하였다. 이 소자는  $f_T$ 가 60 GHz 이상이고 100 V 이상의 항복 전압을 가지며 출력전력은 8.2 GHz에서 3.5 W/mm를 나타내었다.(그림 9)[14]

### 3.2 AlGaN/GaN MISFET

코넬대학의 E.M. Chumbes 등은 Silicon Nitride를 passivation을 함과 동시에 이를 이용하여 AlGaN/GaN 구조 위에 MISFET을 제작하였다. 이 MISFET는 4 GHz에서 4.2 W/mm의 전력밀도와 최대직류전류는 750 mA/mm의 특성을 나타내었다.

독일의 T. Rotter 등은 상온에서 photoelectrochemical 산화기술을 사용하여 AlGaN 층의 일부를 산화시킴으로써

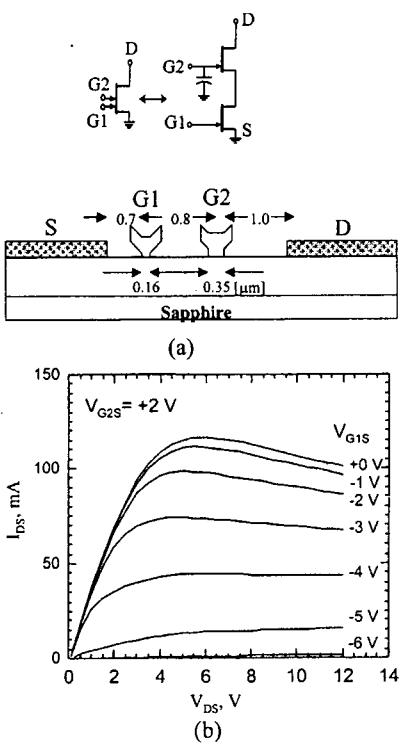


그림 9. (a) AlGaN/GaN 단면도  
(b)  $0.16/0.35 \times 150 \mu\text{m}$  dual-gate MODFET 드레인 출력 전류-전압 곡선(14)

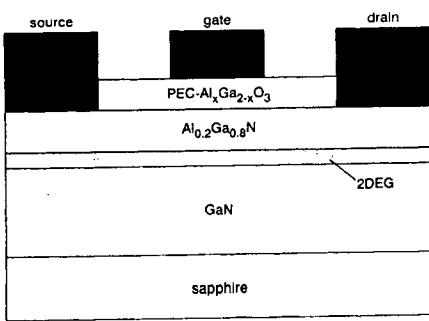


그림 10. AlGaN/GaN MOS-HFET구조의 단면도(15)

MOSFET을 제작 하였다. 이 소자는  $2 \mu\text{m}$ 의 게이트 길이를 가지고  $540 \text{ mA/mm}$ 와  $62 \text{ mS/mm}$ 의 특성을 나타내었다. (그림 10)(15)

### 3.3 GaN MESFET

GaAs의 경우 MESFET이 GaAs기판에 implantation 공정을 이용하여 복잡한 epi공정을 피하면서도 좋은 특성을 구현 할 수 있는 장점이 있어 HEMT와 더불어 MESFET이 많이

사용된다. 그러나 GaN의 경우 현재까지 GaN기판이 없기 때문에 사파이어나 SiC 기판을 이용한 epitaxy가 필수적이다. 그러므로 GaN의 경우에는 MESFET의 제작에도 epi공정을 피할 수 있는데 MESFET 구조보다는 HFET 구조를 채택할 경우 월등한 성능의 개선을 얻을 수 있어 GaN 반도체의 경우 MESFET 연구가 상대적으로 활발하지 못하다. C. Gaquiere 등은 낮은 도핑된  $n^-$ -GaN을 이용하여 MESFET을 만들었다. 보고에 의하면 2 GHz에서  $2.2 \text{ W/mm}$ 의 전력밀도와 최대 직류 전류  $318 \text{ mA/mm}$ 를 얻었다고 한다.(16)

### 3.4 AlGaN/GaN Bipolar Transistors

GaN층을 에미터로 하고 SiC를 베이스와 컬렉터층으로 사용하여 HBT를 1994년에 제작하는데 성공하였다.[17] 하지만 아직까지 AlGaN/GaN 이중접합을 이용한 바이폴라 트랜지스터에 대한 연구 수준이 초보단계에 머물러 있다. 그 이유는 p형 GaN를 형성하는 것에 아직 어려움이 있기 때문이다. 최근 UCSB는 MOCVD로 성장시킨 AlGaN/GaN HBT 구

|   |
|---|
| GaN:Si emitter contact layer                          |
| $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ : Si emitter |
| GaN: Mg base 2000 Å                                   |
| GaN UID collector: 7500 Å                             |
| GaN:Si sub-collector                                  |
| Sapphire substrate                                    |

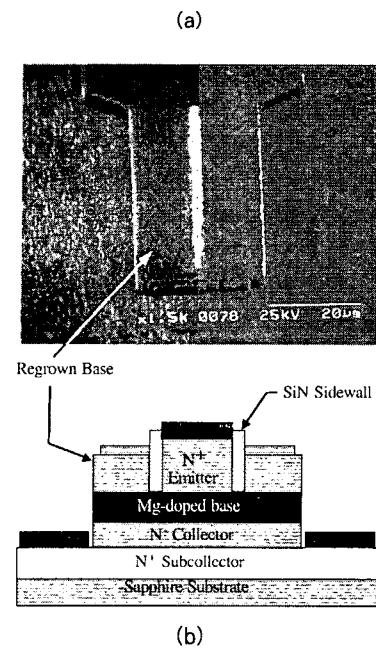


그림 11. (a) MOCVD로 성장된 AlGaN/GaN HBT의 단면도,  
(b) 완성된 HBT의 단면과 SEM 사진

조를 이용하여 전류이득이 3이고 공통 애미터 모드로 30V에서 동작하는 AlGaN/GaN HBT를 사파이어 기판위에 제작하였다.(그림11)[18]

#### 4. GaN계 전자소자를 이용한 응용회로

AlGaN/GaN HFET 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되면서 이를 이용한 전력 증폭기개발에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 왕성한 연구결과를 내고 있는 코넬 대학의 Eastman 교수 그룹은 AlGaN/GaN HEMT를 이용하여 distributed amplifier를 제작하였다. 회로는 AlN 기판위에 CPW line을 이용하여 제작되었으며 1-10 GHz의 범위에서 2.2 W의 출력전력과 9.3 dB의 특성을 나타내었다.(그림12)[19]

Santa Barbara에 위치한 켈리포니아 주립대학의 Mishra 교수 그룹에서는 MOCVD로 성장한 GaN를 이용하여 0.6 $\mu$ m의 게이트 길이를 가지는 HEMT를 제작하였고 이를 이용하여 전

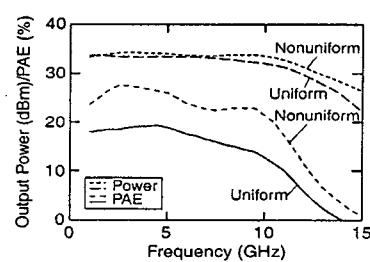
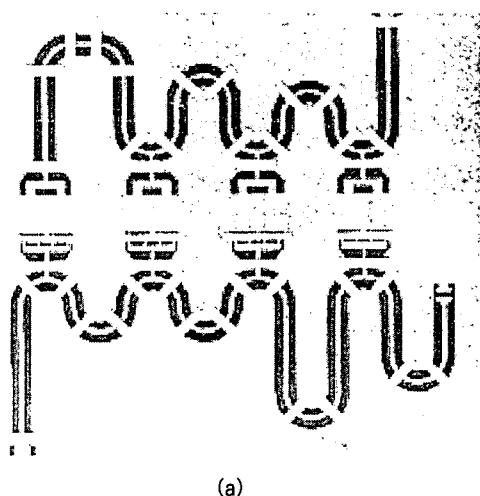


그림 12. (a) 제작된 GaN molithic nonuniform distributed amplifier의 사진  
(b) 주파수특성[19]

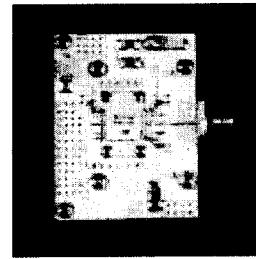


그림 13. AlGaN/GaN HEMT를 이용한 VCO 사진[21]

력증폭기를 제작하였다.[20] 열방출의 효율을 높이기 위하여 AlN 기판위에 트랜지스터를 플립칩본딩하였으며 6-10 GHz의 대역폭과 9 dB의 선형이득과 14.1 W의 출력전력을 얻었다. 또한 최근 RF Nitro Communication에서는 AlGaN/GaN HEMT를 이용한 전압 제어 발진기 ( Voltage Controlled Oscillator)를 개발하였다. 출력전력은 0.5 W이며 위상잡음은 92 dBc/Hz을 얻었다.(그림 13)[21] 여기서 AlGaN/GaN HEMT의 잡음은 6 GHz에서 갈륨비소 FET나 HBT가 가지는 위상잡음과 비교하여 절대 뒤지지 않는다는 것을 증명하였다.

#### 5. 결 론

위의 결과에서도 알 수 있듯이 GaN계 반도체는 고출력소자로써 그 가능성은 충분히 검증받고 있으며 고주파 소자로써의 잠재성도 상당히 높다는 것을 알 수 있다.

아직은 기술의 단계가 낮은 수준에 머물러 있지만 그 잠재적인 가능성에 미루어 볼 때 향후 고출력, 고주파 소자로서 자리매김을 할 것으로 기대된다. 그리고 MBE로 성장된 이 GaN HFET에서 주파수가 20 GHz일 때 4W/mm의 전력밀도와 10 GHz에서 0.6 dB의 잡음 지수 (noise figure)를 보였는데 [6] 이 같은 결과는 낮은 잡음이 필요한 응용 회로에서도 GaN HFET의 사용이 좋은 특성을 보여 줄 것이라는 가능성을 제시하고 있다. 본 논문에서는 예를 들지 않았지만 GaN의 내열특성을 이용하여 고온에서 동작되는 회로의 제작도 가능할 것이며 응용 영역도 더 확대 될 것이라고 예상된다. AlGaN/GaN HBT의 경우 아직은 심각한 기술상의 문제점에 부딪혀 있지만 제작의 문제점을 해결하면 HBT만의 독특한 물리적 특성, GaN의 높은 전자 이동 속도와 넓은 대역폭의 이점이 서로 결합하여 AlGaN/GaN HFET처럼 우수한 특성을 낼 수 있는 소자가 될 것으로 기대된다.

#### Reference

- [1] J. Burm and L. F. Eastman, Chapter 4.3,

- "AlGaN/GaN HFETs /HEMTs", EMIS Datareview Series, IEE, No. 23, 1999.
- [2] H. Morko , R. Cingolani, B. Gil, "Polarization effects in nitride semiconductors and device structures", Mat. Res. Innovat. 3, pp.97-106, Springer-Verlag, 1999.
  - [3] M.A. Khan, Q. Chen, M.S. Shur, B.T. Dermott, J.A.Higgins, J. Burm, W. Schaff and L.F. Eastman, "Short-channel GaN/AlGaN doped channel heterostructure field effect transistors with 36.1GHz cutoff frequency", Electron. Lett., vol. 32, no. 4, pp. 357-358, 1996.
  - [4] Y.S. Park, "Current Status of Group III-Nitride Semiconductors and Future Prospects", J. Korean Physical Society, vol. 34, pp. S199-S219, 1998.
  - [5] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer . Appl. Phys. Lett. 48. 3, pp.353-355, 1986.
  - [6] M. Micovic, N. Nquyen, D. Wong, P. Hashimoto, L. McCray, D. Grider, C. Nquyen, " High Performance GaN/AlGaN High Electron Mobility Transistors Grown Directly on SiC by Molecular Beam Epitaxy". T2.8 MRS spring meeting, 2000.
  - [7] N.-Q. Zhang, S. Keller, G. Parish, S. Heikman, S. P. DenBaars, and U. K. Mishra, "High Breakdown GaN HEMT with Overlapping Gate Structure", IEEE Electron Device Letters, pp421-423, Vol. 21, No. 9, 2000.
  - [8] J. Li, S.J. Cai, C.Z. Pan, Y.L. Chen, C.P. Wen and K.L. Wang, "High breakdown voltage GaN HFET with field plate", Electronics Letters, Vol. 37, No. 3, pp 196-197, Jan 1, 2001.
  - [9] Hiroyuki Masato, et. al., "Novel High Drain Breakdown Voltage AlGaN/GaN HFETs using Selective Thermal Oxidation Process", Electron Devices Meeting, 2000. IEDM Technical Digest. International, pp377 -380 , 2000
  - [10] Miro Micovic, Jeong S. Moon, Ara Kurdoghlian, Paul Hashimoto, Danny Wong, Loren McCray, Tahir Hussain, Paul Janke, "K-band GaN Power HFET's with 6.6 W/mm CW Saturated Output Power Density and 35% Power Added Efficiency at 20 GHz", pp 199-200, Device Research Conference 2001 , 2001
  - [11] S.T. Sheppard, K. Doverspike, W.L. Pribble, S.T. Allen, J.W. Palmour, L.T Kehias, T.J Jenkins, "High power microwave GaN/AlGaN HEMT's on semi-insulating silicon carbide substrates", IEEE Electron Device Lett., vol. 20, pp. 161-163, 1999.
  - [12] E. Alekseev, D. Pavlidis, N.X. Nguyen, C. Nguyen, and D. E. Grider, "Power Performance and Scalability of AlGaN/GaN Power MODFETs," IEEE Trans. on MTT., vol. 48, no. 10, p.1694, Oct. 2000.
  - [13] B.M. Green, K.K. Chu, J.A. Smart, V. Tilak, H. Kim, J.R. Shealy, and L.F. Eastman, "Cascode Connected AlGaN/GaN HEMT's on SiC Substrates", IEEE Microwave and Guided Wave Lett., vol. 10, no. 8, p. 316, 2000.
  - [14] Ching-Hui Chen, Robert Coffie, K. Krishnamurthy, Stacia Keller, Mark Rodwell, and Umesh K. Mishra, "Dual-Gate AlGaN/GaN Modulation-Doped Field-Effect Transistors with Cut-off Frequencies  $f_T > 60$  GHz", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, pp549-551, Vol.21, No. 12, DEC. 2000.
  - [15] T. Rotter, et. al., "First AlGaN/GaN metal oxide semiconductor heterostructure field effect transistor based on photoanodic oxide", Electronics Letters, Vol. 37, NO. 11, pp 715-716, May 24, 2001.
  - [16] C. Gaquiere, et. al., "High-Power GaN MESFET on Sappgire Substrate", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 10, No. 1, pp19-20, Jan. 2000.
  - [17] J. Pankove, et. al., "High-Temoerature GaN/SiC heterojunction bipolar transistor with high gain", IEDM tech. Dig., p 389-392, 1994.
  - [18] L.S. McCarthy, et. al., "AlGaN/GaN Heterojunction Bipolar Transistor", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, pp277-279, Vol.20, No. 6, Jun. 1999.
  - [19] B.M. Green, S.J. Lee, K.K. Chu, K.J. Webb, and L.F. Eastman, "High Efficiency Monolithic Gallium Nitride Distributed Amplifier", IEEE

- Microwave and Guided Wave Lett., vol. 10, no. 7, pp.270-272, 2000.
- [20] Y.-F. Wu, D. Wapolnek, J. Ibbetson, P. Parikh, B.P. Keller, U.K. Mishra, "14-W GaN-based microwave power amplifiers", Microwave Symposium Digest 2000 IEEE MTT-S International, vol.2, pp.963 -965, 2000.
- [21] Jeffrey B. Shealy, Joseph A. Smart, and James R. Shealy, "Low-Phase Noise AlGaN/GaN FET-Based Voltage Controlled Oscillator(VCO)", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 11, No. 6, JUNE 2001

## 저자 약력

### 성명 : 오상도

#### ❖ 학력

1999년 경희대학교 전자공학과 졸업(학사)

2000년-현재 서강대학교 전자공학과  
대학원 재학

E-mail : goodboy@melab.sogang.ac.kr

### 성명 : 범진욱

#### ❖ 학력

1987년 서울대학교 물리학과 졸업(학사)

1989년 University of Michigan, Ann Arbor 물리학과 대학원 졸업(석사)

1995년 미국 코넬대학교 응용물리학과 졸업 (Ph.D)

#### ❖ 경력

1996년-1998년 Lucent Technologies/Bell Laboratories  
연구원

1998년-현재 서강대학교 전자공학과 조교수

E-mail : burm@sogang.ac.kr

### 성명 : 백홍구

#### ❖ 학력

1975년 연세대학교 공과대학 금속공학과 학사

1977년 한국과학기술원 공과대학 재료공학과 석사

1987년 Univ. of Wisconsin-Madison 금속공학 박사

#### ❖ 경력

1991년-현재 연세대학교 금속공학과 교수

E-mail: thinfilm@yonsei.ac.kr