

# GaN 기반 전력 반도체 소자의 기술 동향

최영환 석박사통합과정 (서울대 전기컴퓨터공학부) | 강이구 교수 (극동대 컴퓨터정보공학부)

## 1. 서론

전원 공급기, 전동기 제어, 컨버터 및 인버터 등에 사용되는 전력용 반도체 소자는 고전압, 대용량 전류 구동을 특징으로 하며 그림 1과 같이 적용 분야의 요구 사항에 따라 다양한 전압 및 전류 구동 수준이 요구된다 [1].

전력 기기 응용 분야의 확대 및 환경 보호를 위한

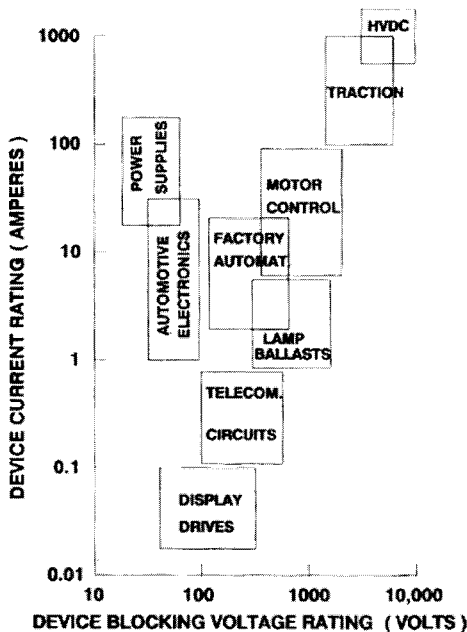


그림 1. 전력용 소자의 적용 분야.

에너지 절약 추세에 따라 인버터, 컨버터 등 전력용 전기 기기의 효율 증대와 간소화, 경량화가 중요한 기술적 과제로 떠오르고 있다. 따라서 전력용 반도체 소자 분야에 요구되는 사양도 고도화되고 있는 상황이다.

실리콘 기술이 성숙해감에 따라 실리콘 전력용 소자의 특성이 물성의 한계에 의해 제한되고 있다. 그림 2는 전력용 인버터의 기술 추이를 나타낸다 [2]. 전력 기기의 응용 분야가 다양해질수록 고출력, 고효율 특성이 요구되고 있다. 현재 사용되는 실리콘 기반 전력용 반도체 소자를 이용하여 고출력 시스템을 제작할 경우 실리콘 전력 소자의 출력 효율이 낮기 때문에 소자의 면적이 증가해야 한다. 또한 패키지 및 열문제 해결을 위한 추가적인 냉각 시스템 개발이 필요하며 이로 인한 부피 증가는 실리콘 전력 소자 기반 모터 드라이브, 컨버터, 전력 공급기의 소

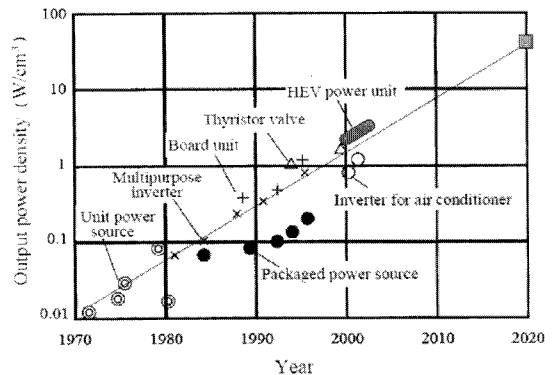


그림 2. 전력용 인버터의 기술 추이.

형화 및 경량화를 어렵게 한다.

이와 같이 전력 기기의 기술 요구 수준이 높아지고 기존의 실리콘 전력 반도체 소자의 특성이 한계를 보임에 따라 실리콘을 대체할 수 있는 물질 및 소자 기술 연구가 활발히 진행되고 있다. GaN는 대표적으로 연구되고 있는 실리콘 대체 물질로 표 1에서 볼 수 있듯이 여타 반도체 물질에 비하여 뛰어난 물질 특성을 갖는다. GaN는 Wide Band Gap 물질로 항복 현상을 일으키는 임계 전계가 3 MV/cm 이상으로 실리콘의 임계 전계보다 약 10 배 이상 높아 이를 이용한 전력 소자는 이론적으로 높은 항복 전압과 낮은 온-저항 특성을 갖게 된다. 그리고 AlGaN/GaN 이종 접합 구조를 제작할 경우 AlGaN/GaN 계면에 높은 전자 밀도를 가진 2 차원 전자가스 (2 Dimensional Electron gas, 2DEG)가 생성되는데, 2DEG의 높은 이동도 ( $>2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) 및 전자 포화 속도(약  $1.5 \times 10^7 \text{ cm/s}$ )를 이용하면 더욱 낮은 온-저항 특성을 구현할 수 있다. 즉, GaN는 실리콘에 비해 고출력의 전력 소자 제작이 가능하므로 소자 면적을 획기적으로 감소시킬 수 있다. 또한 전기/하이브리드 자동차가 발전되면서 전력 반도체의 고온 동작 특성이

중요하게 인식되고 있는데 GaN는 Wide Band Gap 특성으로 인해 진성 캐리어 생성률이 낮아 GaN 소자는 고온에서도 안정적으로 동작할 수 있다. 따라서 고온 안정성을 위한 부가적인 회로나 쿨링 시스템이 불필요하므로 시스템의 경량화와 비용 절감이 가능하다.

전력 시스템의 소형화, 경량화와 효율 증대를 위해서는 전력용 소자의 높은 항복 전압, 우수한 온-특성과 더불어 고속 스위칭 속도가 필요하다. 전력용 소자 성능 평가에는 주로 Baliga 및 Johnson의 Figure of Merit (FOM)이 주로 사용되는데 그림 3에서 보듯 GaN 전력 소자는 다른 물질 기반 전력 소자에 비하여 매우 높은 FOM을 보인다. 이러한 우수한 특성 때문에 다양한 GaN 전력용 소자들이 연구되고 있으며 전력용 스위치로는 HEMT (High Electron Mobility Transistor), MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor), MOSFET 등이, 다이오드로는 Schottky 장벽 다이오드와 P-i-N 다이오드 등이 연구 개발되고 있다.

GaN를 이용한 소자 중 현재 가장 널리 연구되는 소자는 HEMT 및 GaN Schottky 장벽 다이오드이다. 이들 소자는 구조적으로 간단하여 제작이 용이하고 전력용 소자로서 GaN의 장점을 잘 활용할 수 있어 상용화가 가장 빨리 이루어 질 것으로 예상된다.

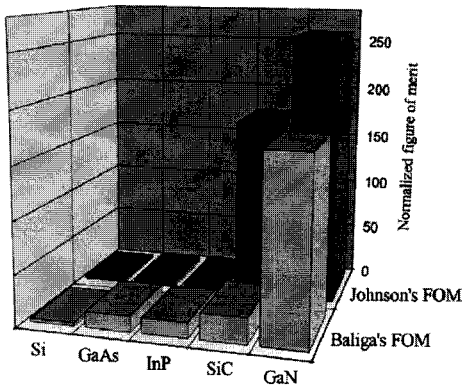


그림 3. Baliga와 Johnson의 Figure of Merit.

## 2. HEMT 기술 개발 동향

GaN는 높은 전자 이동도를 보유하고 있어 낮은 온-저항과 빠른 스위칭 속도의 소자 제작이 가능하다. 이에 더해 AlGaN과 GaN의 이종 접합면에서 만들어진 2DEG의 높은 전자 이동도와 전류 밀도를 이용하면 더욱 우수한 온-저항과 속도를 구현할 수

표 1. 다양한 반도체 물질의 특성 비교.

Material	Eg (eV)	K (W/cmK)	Ec (V/cm)	Electron mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)
Si	1.12	1.5	$3 \times 10^5$	1350
4H-SiC	3.2	3.3	$32 \times 10^5$	800
GaN	3.4	1.3	$34 \times 10^5$	900



있다. HEMT (High Electron Mobility Transistor) 는 이를 잘 활용한 소자로 Wide Band Gap와 2DEG에 의한 높은 항복 전압, 낮은 온-저항 및 고속 동작 특성을 가진다.

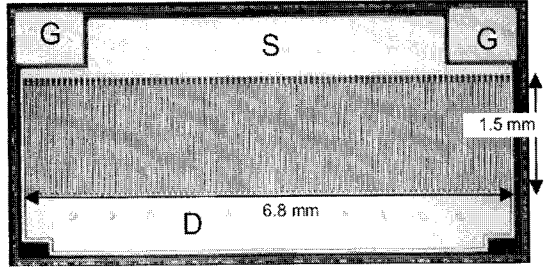
미국 University of California, Santa Barbara (UCSB)는 HEMT의 항복 전압 향상을 위해 Multiple Field Plate 및 Slant Field Plate 구조를 개발하였고 약 1900 V의 항복 전압을 구현하였다 [3-4]. 일본 도요타에서는 전기/하이브리드/연료전지 적용을 위한 HEMT 및 MISHEMT를 제작하여 보고하였다. 특히 자동차용 소자에 맞는 전류 용량을 만족하기 위하여 대면적, 대전류 소자에 초점을 맞추고 있으며 [5], 고온 동작을 요구하는 자동차 환경에 대비하여 고온 동작 특성 개선 쪽에 연구를 진행 중이다. 일본 후루카와 일렉트로닉스는 전력 반도체용 GaN 에피구조를 연구하고 이를 이용한 GaN 전력 소자를 제작하고 있다. 그림 4는 후루카와 일렉트로닉스에서 최근에 발표한 HEMT로 120 A의 높은 전류 구동 능력과  $7\text{ m}\Omega\text{cm}^2$ 의 낮은 온-저항, 1800 V의 높은 항복 전압 특성을 보유하고 있다 [6].

도시바에서는 Field Plate를 이용하여 600 V급 HEMT 제작하고 이를 이용한 DC-DC 컨버터를 발표하였으며 [7], 후루카와 일렉트로닉스는 제작한 HEMT를 인버터 회로에 적용시켰다 [8]. 실리콘 전력 소자에 비해 낮은 온-저항 및 고속 동작 특성을 가진 GaN HEMT로 만들어진 컨버터 및 인버터는 우수한 성능을 보여 GaN 전력용 소자의 실리콘 대체 가능성을 보여주었다.

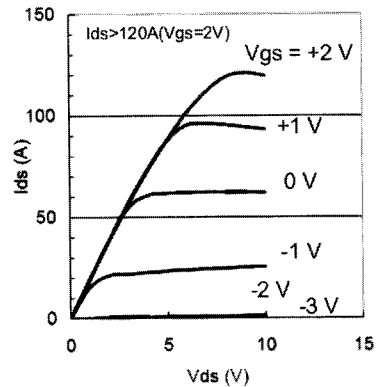
고온에서의 안정적 동작은 GaN을 비롯한 Wide Band Gap물질 기반 소자가 가진 큰 장점이나 GaN 전력 소자의 우수한 특성을 잘 발휘하기 위해서는 패키지 기술 개발이 필요하다. 후루카와 일렉트로닉스에서 그림 5와 같은 고온 동작용 GaN 패키지를 제작하였고 225 °C의 고온 상황에서의 안정적인 동작 상태를 확인하였다 [9].

2DEG는 AlGaIn과 GaN 사이의 Band Gap차이와 압전 효과 및 분극 현상에 의해 AlGaIn/GaN 계면에 전자가 모여서 만들어지는 영역이다. HEMT는 2DEG를 채널로 이용하는 소자이며 낮은 온-저항과 고속 스위칭 동작을 장점으로 한다. 하지만 2DEG를

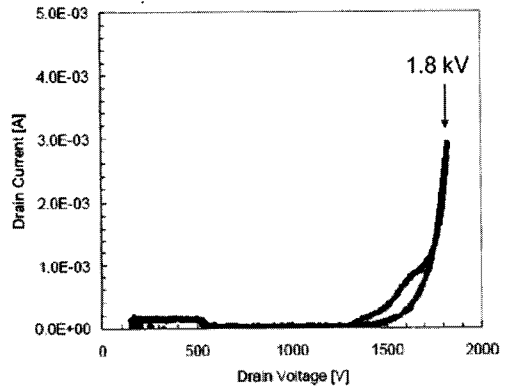
채널로 사용하기 때문에 별도의 게이트 전압을 인가하지 않으면 HEMT는 항상 On 상태를 유지하는 Normally-on 동작을 한다. HEMT를 Off 상태로 전환하기 위해서는 게이트에 음의 전압을 인가해야 하므로 HEMT를 이용한 회로를 제작할 때 음의 전압



(a) 소자 사진



(b) 순방향 전류-전압 특성



(c) 항복 전압 특성

그림 4. 후루카와 일렉트로닉스의 전력용 HEMT 사진 및 특성.

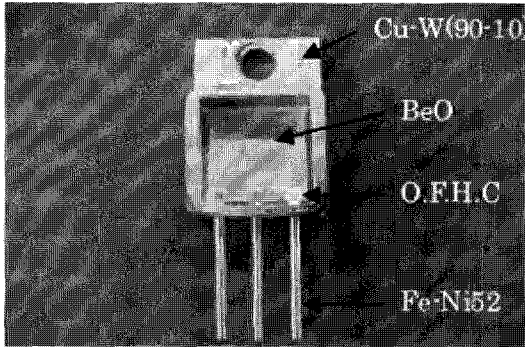
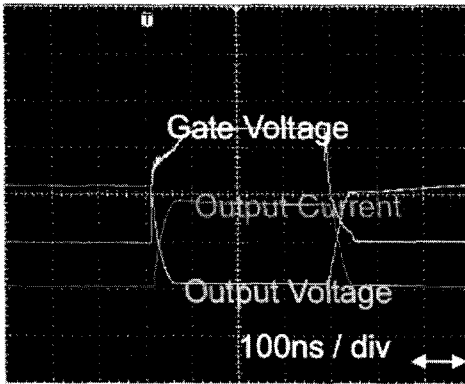
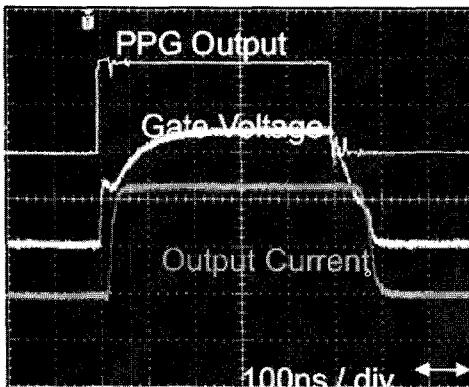


그림 5. 고온 동작을 위한 GaN 전력 반도체용 패키지.



(a) 상온에서의 스위칭 동작



(b) 225 °C에서의 스위칭 동작

그림 6. HEMT의 고온 스위칭 파형.

인가를 위한 추가 구성이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 Normally-off HEMT의 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

Normally-off HEMT 제작을 위한 일반적인 접근 방식은 게이트 역할을 하는 Schottky 메탈과 소자의 채널인 2DEG의 거리를 감소시키는 것이다. Schottky 콘택을 형성하면 메탈과 반도체의 일함수 차이에 의해 공핍층이 발생하는데 이 공핍층을 2DEG까지 접근시켜 2DEG가 공핍되면 게이트에 음의 전압을 인가하지 않아도 소자를 Off 동작으로 전환할 수 있다.

그림 7은 Recess 게이트 구조를 이용한 Normally-off HEMT로 AlGaN 층을 부분적으로 식각하는 방법을 통해 소자의 문턱 전압을 조절한다. 도시바에서 발표한 Normally-off HEMT는 30 nm 두께의 AlGaN층을 약 20 nm 식각하고 그 위에 Schottky 콘택을 형성하여 Recess 게이트 구조를 제작하였다. 제작한 소자는 문턱전압을 4 V에서 -0.14 V로 이동시켰다 [10].

Recess 게이트 구조를 이용할 경우 Recess 제작을 위한 식각 공정 시 AlGaN/GaN 웨이퍼 표면이 손상을 입을 위험이 있다. 그러므로 얇은 AlGaN층을 성장시켜 Normally-off HEMT를 제작하기도 한다. 일본 Nichia社는 4.5 nm의 AlGaN층을 성장시켜 식각 공정 없이 -0.1 V의 문턱 전압 특성을 가진 HEMT를 발표하였다 [11].

Hong Kong University of Science & Technology

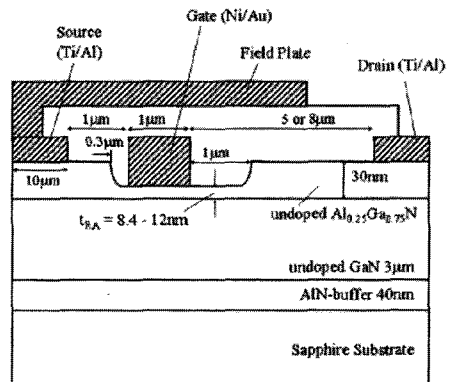


그림 7. Recess 게이트 구조를 이용한 Normally-off HEMT.

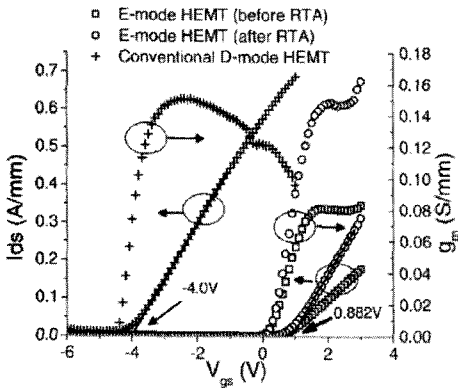


그림 8. Fluorine 기반 플라즈마 처리 유무에 따른 HEMT의 전달 특성 곡선.

에서 Fluorine 기반 플라즈마 처리를 이용하여 Normally-off HEMT를 제작하는 새로운 방법을 제안하였다 [12]. AlGaIn/GaN 웨이퍼에 CF<sub>4</sub> 등의 Fluorine 이온을 포함한 플라즈마 처리를 하면 Fluorine 이온이 AlGaIn 표면에 주입된다. Fluorine 이온은 음의 전하를 띠고 있으므로 AlGaIn에 존재하는 Fluorine 이온에 의해 음의 전압 인가 효과가 나타난다. 따라서 2DEG가 공핍되어 HEMT는 Normally-off 동작을 하게 된다. 그림 8은 Fluorine 기반 플라즈마 처리 유무에 따른 소자의 전달 특성 곡선으로 소자의 문턱 전압이 -4 V에서 약 0.9 V로 증가하였다.

### 3. 다이오드 기술 개발 동향

전력 반도체 분야에서 시스템의 높은 동작 주파수를 구현하기 위해서는 다이오드의 동작 속도가 중요한 역할을 한다. 다이오드의 속도를 결정하는 것은 온-동작에서 오프-동작으로 변환되는 역방향 회복 (Reverse Recovery) 시간이다. 실리콘 P-i-N 다이오드는 높은 항복 전압을 가지나 오프 동작 시 주입된 캐리어의 소멸 시간이 필요하며 이것으로 인해 역방향 회복 시간이 긴 단점이 있다. 실리콘 Schottky 장벽 다이오드는 역방향 회복 시간이 짧아 고속 동작이 가능하나 낮은 Schottky 장벽 높이 때문에 높은 항복 전압 특성을 구현하기 어렵다. GaN를

이용하면 높은 항복 전압과 고속 동작 특성을 동시에 만족시킬 수 있는 Schottky 장벽 다이오드를 제작할 수 있다.

GaN 전력용 다이오드 개발은 수평형 소자 및 수직형 소자로 분류된다. 사파이어나 SiC 위에 성장시킨 GaN 웨이퍼를 이용한 수평형 다이오드는 HEMT와 같이 AlGaIn/GaN 이종접합에서 발생하는 2DEG를 주로 이용하며 수직형 소자에 비해 상대적으로 우수한 소자 특성을 보여주고 있다.

수직형 GaN 다이오드의 연구 초기에는 연구 초기에는 양질의 Bulk 웨이퍼 제작이 어려웠으나 점차 기술이 성숙해짐에 따라 주목할 만한 결과가 보고되고 있다. 미국 Florida University에서 Bulk GaN 웨이퍼를 사용한 수직형 Schottky 장벽 다이오드를 제

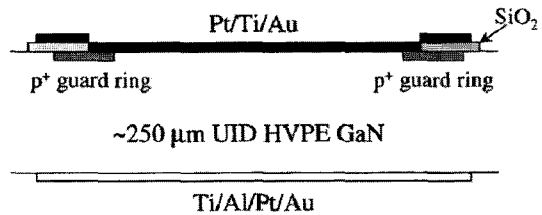


그림 9. Bulk GaN 웨이퍼에 제작된 수직형 Schottky 장벽 다이오드 단면도.

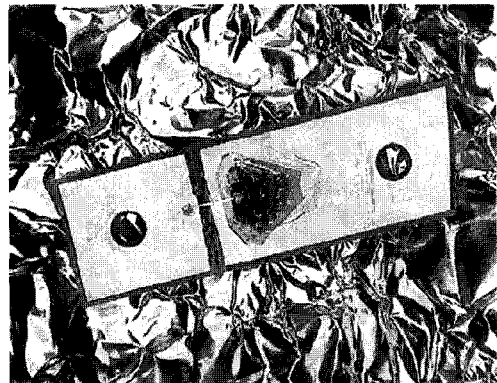


그림 10. Bulk GaN 웨이퍼에 제작된 수직형 Schottky 장벽 다이오드 사진.

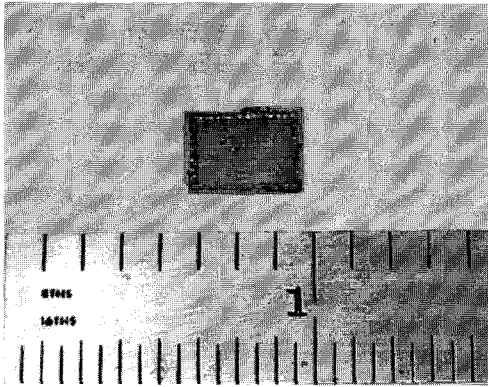


그림 11. Bulk GaN 웨이퍼에 제작된 수직형 Schottky 장벽 다이오드.

작하고 발표하였다 [13]. GaN Bulk 웨이퍼는 사파이어 기판 위에 250  $\mu\text{m}$  두께의 GaN 에피층을 성장시키고 레이저를 이용하여 사파이어를 떼어내는 방법을 이용하였다. Bulk GaN 웨이퍼의 전면에는 Schottky 컨택, 후면에는 Ohmic 컨택을 형성하여 수직형 GaN 다이오드를 제작하였고 p+ Doping을 이용한 접합 마감 구조를 사용하여 항복 전압의 크기를 증가시켰다. 그림 9와 10은 제작한 수직형 GaN Schottky 장벽 다이오드의 단면도 및 사진이다.

수평형 소자는 전류의 흐름이 소자의 표면에서 이루어지므로 대용량의 전류 능력을 위해서는 소자의 면적이 증가해야한다. 이에 비해 수직형 소자는 전류가 Bulk를 통해 흐르기 때문에 수평형 소자에 비해 큰 전류량을 구동시킬 수 있다. 그림 11은 플로리다 대학에서 개발한 수직형 GaN Schottky 장벽 다이오드로 단위 소자를 연결시켜 160 A 이상의 대용량 전류 능력을 구현하였다 [14].

수직형 GaN Schottky 장벽 다이오드는 Bulk GaN 웨이퍼의 제작 기술이 초기 단계이기 때문에 많은 연구가 필요할 것으로 보인다. 하지만 지속적인 개선을 통해 더욱 우수한 소자들이 개발될 것으로 기대된다.

#### 4. 기타 소자의 기술 개발 동향

HEMT는 낮은 온-저항과 높은 항복 전압 등의 장

점이 있지만 소자의 게이트로 Schottky 컨택을 사용하므로 MOSFET에 비하여 낮은 신뢰성을 보인다. 또한 MOSFET 소자가 구조상으로 더욱 높은 항복 전압을 낼 수 있으며 Normally-off 소자이기 때문에 시스템 및 회로 구성 시 타 부분과의 집적이 용이하다. 하지만 MOS 구조 제작을 위한 산화막 제작 및 우수한 p형 GaN영역 기판 성장 등 기술적으로 해결해야할 부분이 많아 아직 연구 초기 단계에 머물고 있다.

GaN 기반 MOSFET은 미국 Rensselaer Polytechnic Institute (RPI)에서 주로 연구하고 있는데 사파이어 기판위에 제작한 n형/p형 GaN 에피층을 이용하여 MOSFET을 제작하였다[15]. MOS 구조의 제작을 GaN 웨이퍼 위에 실리콘 산화막을 증착시키고 계면 특성을 향상시키기 위해 고온(1000  $^{\circ}\text{C}$ ) 열처리 공정을 거쳤다. 제작한 소자의 전자이동도는 167  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ 로 HEMT에 비해 매우 낮았다. 그림 12는 제작한 GaN MOSFET의 순방향 전류-전압 특성인데 HEMT에 비해 상당히 낮은 수준의 전류 능력을 보여준다.

MOSFET은 Normally-off 소자이며 동작 안전성에서 우수한 능력을 보이나 HEMT에 비해 온-저항이 크다. RPI는 최근 GaN MOS과 AlGaIn/GaN HEMT의 장점을 결합한 하이브리드 소자를 개발하였다[16]. 그림 13은 제작한 하이브리드 소자의 단면도로 AlGaIn/GaN 이종접합 웨이퍼의 게이트 영역을 식각하고 그 위에 MOS 구조를 제작하였다. 제작한 소자의 문턱전압은 약 2.5 V이며 순방향 전류-전압 특성은 그림 14와 같다. 하이브리드 소자는 GaN

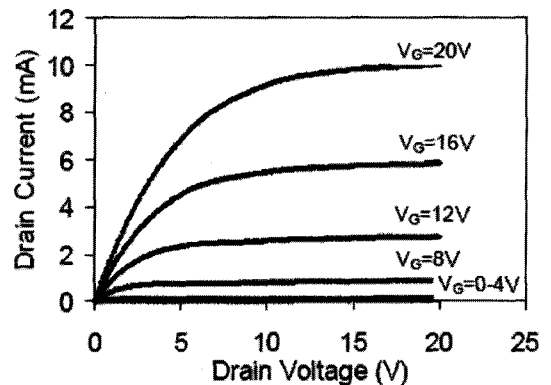


그림 12. GaN MOSFET의 순방향 전류-전압 특성 곡선.

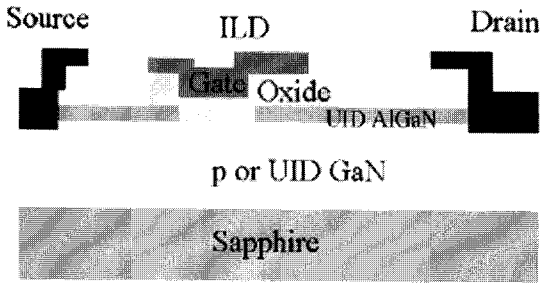


그림 13. GaN 하이브리드 소자의 단면도.

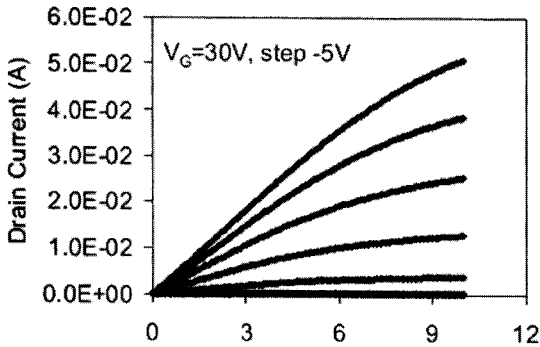


그림 14. GaN 하이브리드 소자의 순방향 전류-전압 특성 곡선.

MOSFET 소자에 비해 약 10배 향상된 전류 능력을 보여주었다.

GaN MOSFET 개발은 연구 초기 단계이기 때문에 현재 보고되고 있는 GaN MOSFET의 소자 특성은 미흡한 면이 많다. 하지만 GaN를 이용한 MOSFET의 제작이 가능하다는 것을 보여주고 있으며 MOSFET이 전력용 반도체 소자로서 신뢰성 측면에서 가장 우수하기 때문에 지속적인 연구 개발이 이루어질 것이다.

## 5. 결론

산업 및 정보 통신 분야의 급속한 발전으로 인한 전력 수요 증가 및 다양화, 환경 보전을 위한 에너지

절약 등 전력의 질적 고도화에 대한 요구가 높아지면서 GaN를 비롯한 Wide Band Gap 물질을 이용한 차세대 전력용 반도체 소자가 많은 관심을 받고 있다. 차세대 전력용 반도체 소자는 가정용, 사무용 기기의 고기능 및 효율화 추세에 적합하고 운송설비용 대형 인버터나 컨버터, 공장 자동화를 위한 생산 설비 및 발전설비 등의 사회 간접자본의 고속화, 대용량화의 요구를 충족시킬 수 있을 것이다. 그리고 하이브리드 자동차와 전기 자동차의 발전을 가속화시켜 에너지 절약과 환경 문제의 해결에 도움을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

앞서 살펴보았듯이 미국, 일본에서는 Wide Band Gap 물질을 이용한 차세대 전력 반도체 소자 개발이 활발히 진행되고 있다. 국내의 GaN 소자 연구는 현재 시장이 형성되어 있는 LED, LD 등의 광소자에 집중되어 있으며, 전력용 소자 기술은 대학 및 연구소에서 소규모 연구가 진행되고 있는 실정이다. GaN 전력 소자는 향후 고부가가치 상품으로 부상할 가능성이 높다. 따라서 지속적인 지원을 통해 국내 GaN 전력용 반도체 소자의 연구 개발이 활성화되기를 기대한다.

## 참고 문헌

- [1] J. Baliga : Power Semiconductor Devices, PWS Publishing company, 1996.
- [2] Masayasu Ishiko, "Recent R&D Activities of Power Devices for Hybrid Electric Vehicles", R&D Review of Toyota CRDI, Vol. 39, No.4, 2004.
- [3] H. Xing, et al., "High Breakdown voltage AlGaIn/GaN HEMTs achieved by multiple field plate", IEEE Electron Device Lett., Vol. 20, p. 161-163, April, 2004.
- [4] Y. Dora, et al., "UCSB High Breakdown Voltage Achieved on AlGaIn/GaN HEMTs With Integrated Slant Field Plates", IEEE Electron Device Lett., Vol. 27, p. 713-715, September, 2006.
- [5] H. Ueda, et al., "High current operation of GaN power HEMTs", Proceedings of the 17th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, p. 311-314, 2005.
- [6] N. Ikeda, et al., "High power AlGaIn/GaN HFET

with a high breakdown voltage of over 1.8 kV on 4 inch Si substrates and the suppression of current collapse", Proceedings of the 20th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, p. 287-290, 2008.

- [7] W. Saito, et al., "High Breakdown Voltage Undoped AlGaIn-GaN Power HEMT on Sapphire Substrate and Its Demonstration for DC-DC Converter Application", Transactions on Electron Devices, Vol. 51, p. 1913-1917, 2004.
- [8] Y. Yoshida, "High-power AlGaIn/GaN HFET with lower on-state resistance and higher switching time for an inverter circuit", Proceedings of Circuits, Devices and Systems, p. 207-210, 2004.
- [9] T. nomura, et al., "High Temperature Operation AlGaIn/GaN HFET with a low on-state resistance, a high breakdown voltage and a fast switching capacity", Proceedings of the 18th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, p. 313-316, 2006.
- [10] W. Saito, et al., "Recessed-gate structure approach toward normally off high-voltage AlGaInGaN HEMT for power electronics applications", Transactions on Electron Devices, Vol. 53, p. 356-362, February, 2006.
- [11] Y. Ohmaki, "Enhancement-Mode AlGaIn/AlIn/GaN High Electron Mobility Transistor with Low On-State Resistance and High Breakdown Voltage", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 44, p. L1168-L1170, 2006.
- [12] Y. Cai, et al., "High-performance enhancement-mode AlGaInGaN HEMTs using fluoride-based plasma treatment", IEEE Electron Device Lett., Vol. 26, p.435-437, July, 2005.
- [13] J. W. Johnson, "1.6 A GaN Schottky rectifiers on bulk GaN substrates", Solid-State Electronics, Vol. 46, p. 911-913, 2002.
- [14] K. H. Baik, et al., "160-A bulk GaN Schottky diode array", Applied Physics Lett., Vol. 83, p. 3192-3194, October, 2003.
- [15] W. Hwang, et al., "Enhancement-Mode n-Channel GaN MOSFETs on p and n- GaN/Sapphire Substrates", Proceedings of the 18th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, p.309-312, 2006.
- [16] W. Hwang, et al., "Enhancement-mode GaN Hybrid MOS-HEMTs with  $R_{on,sp}$  of 20 m $\Omega$ -cm<sup>2</sup>"

Proceedings of the 20th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, p. 295-298, 2008.

## 저자|약력



성명 : 최영환

◆ 학력

- 2004년  
서울대 전기공학부 공학사
- 현재  
서울대 대학원 전기컴퓨터공학부  
석박사통합과정



성명 : 강이구

◆ 학력

- 1993년  
고려대 전기공학과 공학사
- 1995년  
고려대 대학원 전기공학과 공학석사
- 2002년  
고려대 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경력

- 2003년 - 현재      극동대 컴퓨터정보표준학부 조교수

