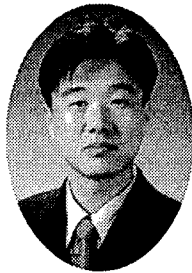


## AlGaN/GaN HFETs 의 기술개발 동향과 응용



김종욱

(LG전자기술원 소재재료연구소 RF소자그룹)



이재승

(LG전자기술원 소재재료연구소 RF소자그룹)



신진호

(LG전자기술원 소재재료연구소 RF소자그룹)

### 1. 서론

GaN계 질화물반도체는 1990년대 초 청색 발광소자의 제조를 위해 연구가 시작되었으며 현재는 발광 및 수광 소자와 더불어 다양한 전자소자에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 질화물반도체는 직접천이형 에너지갭을 가지며 InGaN 및 AlGaIn 등의 삼원소 화합물을 형성할 시에는 그 에너지갭을 1.9 eV에서 6.2 eV 까지 조절할 수 있으므로 자외선 영역을 포함하여 가시광 전 파장영역의 발광소자와 자외선 검출기(UV detector)의 제조에 이용되고 있다. 청색 및 녹색 발광다이오드(LED)와 자외선 검출기는 수 년 전 상용화에 성공하였고 청자색 발광레이저다이오드(LD)는 곧 상용화될 것으로 전망되고 있다.

광소자에 대한 연구와 더불어 질화물반도체를 이용한 전자소자에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 1993년 Khan 등 [1]이 최초로 GaN MESFET에 대한 연구를 보고한 이후 결정성장 기술의 발달과 더불어 전자소자 제조 기술도 급격히 향상되었다. 큰 에너지갭, 높은 열적·화학적 안정도, 높은 전자이동도, 높은 항복전압 및 포화전자속도, 큰 전도대역의 불연속 등의 뛰어난 물성을 바탕으로 metal-semiconductor field effect transistor (MESFET), junction field effect transistor (JFET), heterojunction bipolar transistor

(HBT), metal-oxide-semiconductor field effect transistor (MOSFET), metal-insulator-semiconductor field effect transistor (MISFET), heterostructure field effect transistor (HFET) 등의 전자소자에 대한 다양한 연구 결과들이 보고되고 있다[2-7].

여러 가지 전자소자들 중에서도 HFET가 가장 활발히 연구되고 있으며 AlGaIn/GaN 이종접합 구조를 기본으로 하고 있다. 초기에는 주로 sapphire 기판을 사용하여 소자구조를 성장하였으나 근래에는 sapphire에 비하여 더 높은 열전도도와 낮은 결정부정함을 가지고 있는 SiC 기판에 성장된 소자들이 더 나은 특성들을 보이고 있다[8]. 최근들어 SiC 기판위에 성장된 GaN/Al<sub>0.14</sub>Ga<sub>0.86</sub>N HFET에서 동작주파수가 10 GHz 일 때 6.9W/mm의 전력밀도와 3 mm의 소자로부터 7.4 GHz에서 9.1 W의 전력특성을 구현하였다[9]. 또한 30% 이상의 aluminum 조성비를 가지는 HFET에서 8.2 GHz의 동작주파수에서 각각 9.1 W/mm의 전력밀도와 47%의 효율등의 매우 우수한 특성을 구현하였다[10]. 전력밀도의 경우는 GaAs 계열의 전계효과 트랜지스터(FET)와 비교하여 대략 9배 정도의 더 높은 값을 얻고 있다. 차후에 결정성장과 패키지 기술 등의 많은 문제점들을 완벽하게 해결한다면 물질적인 장점을 최대한 이용한 매우 뛰어난 고주파와 고전력 특성을 갖는 GaN 계열 FET들을 상용화할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 AlGaIn/GaN HFET의 원리와 이를 제작하고 구현하는데 있어서 고려하고 해결해야하는 문제점들에 대하여 알아보고 이에 대한 기술동향을 파악하며 사용되어질 수 있는 응용과 상용화에 있어서의 문제점에 대한 고찰을 하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 AlGaIn/GaN HFET의 물질적인 장점과 원리

GaN의 물리적인 특성들을 표 1에 다른 반도체 물질들과 비교하여 보았다. 표 1에서 알 수 있듯이 GaN은 SiC와 함께 3 eV 이상의 큰 밴드갭과 높은 항복전계를 가지고 있으며 높은 포화전자속도를 보이고 있다. GaN계 반도체는 SiC계

표 1. 고풍력용 전자소자 제조에 사용되는 반도체들의 물성 비교 (300K)

Property	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
Bandgap $E_g$ (eV)	1.12	1.42	3.25	3.40
Breakdown field EB (MV/cm)	0.25	0.4	3.0	4.0
Electron mobility $\mu$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	1350	6000	800	1300
Maximum velocity vs ( $10^7$ cm/s)	1.0	2.0	2.0	3.0
Thermal conductivity $\kappa$ (W/cmK)	1.5	0.5	4.9	1.3
Dielectric constant $\epsilon$	11.8	12.8	9.7	9
CFOM = $\kappa \epsilon \mu E_g^2 / (\kappa \epsilon \mu E_g^2)_{\text{Si}}$	1	8	458	489

\*CFOM: combined figure of merit for high temperature/high power/high frequency applications

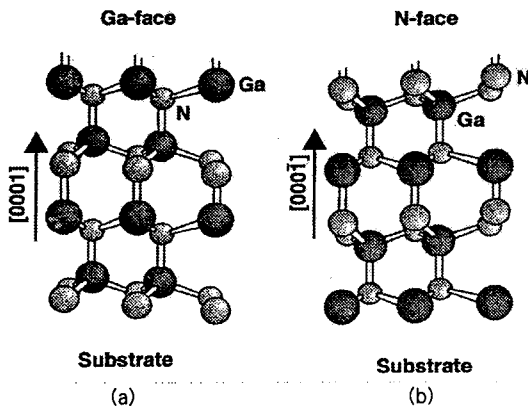


그림 1. Wurtzite GaN의 (a) Ga-face와 (b) N-face의 결정구조.

열과 다르게 GaAs 계열의 소자와 같이 이종접합구조를 성장할 수 있으며 이로 인해 더 높은 동작 주파수를 구현할 수 있다. 또한 이종접합구조에서 spontaneous polarization과 piezoelectric polarization에 의하여  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  이상의 2차원 전자개스를 형성할 수 있다. 이러한 높은 전자밀도와 항복전계로부터 다른 반도체 물질들로 구현된 소자들보다 더 높은 전력밀도를 얻을 수 있다. AlGaIn/GaN의 이종접합구조는 초기성장시 buffer 층의 성장조건에 따라 원자의 배열이 서로 다른 Ga-face와 N-face로 그림 1의 (a)와 (b) 같이 성장되어지는데 이러한 각각의 face에 따라 polarization의 방향과 이에 따른 2차원 전자개스의 형성, 그리고 surface morphology 등의 성장구조내의 여러 특성들이 변화되며 그림 2의 (a)와 (b)에서 face에 따른 특성의 변화를 나타내었다.

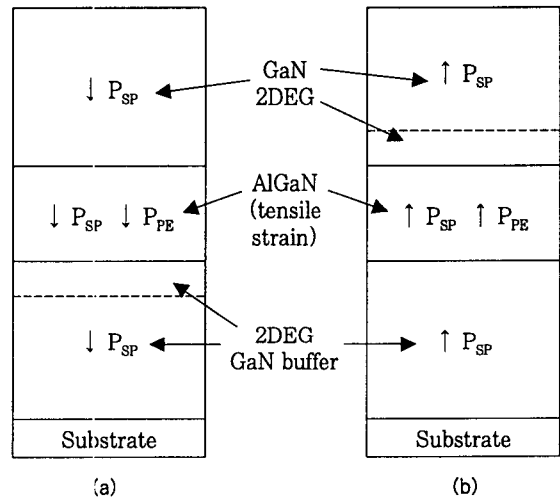


그림 2. AlGaIn/GaN 이종접합에서 (a) Ga-face와 (b) N-face에 따른 압전효과와 자발 분극에 의한 전계의 방향과 2차원 전자분포의 위치.

### 2.2 AlGaIn/GaN HFET의 결정성장

단결정 박막의 성장을 위해서는 호모 (homo) 기판을 이용하는 것이 바람직하다. 많은 연구 그룹에서 벌크 (bulk) GaN 기판의 제조에 대한 연구를 수행하고 있으나 성장에 많은 어려움이 있다. 일반적으로는 이종기판을 이용하여 GaN계 질화물반도체를 성장하고 있다. 이종기판을 이용한 성장시 기판 물질의 결정구조, 격자상수 및 열팽창계수 등이 고려되어야 한다. 표 2에서는 질화물반도체의 성장에 적용될 수 있는 여러 가지 기판 물질들의 물성을 비교하였다. 처음으로 GaN 단결정의 성장에 성공한 것은 사파이어 기판이었으며 현재까지도 가장 널리 사용되고 있다. 사파이어 기판은 가격이 비교적 저렴하면서도

2 인치 이상의 크기에서 우수한 결정성을 가지므로 이를 이용한 단결정 박막의 성장기술은 가장 발달되어 있다. 사파이어 기판을 이용한 GaN 단결정의 성장시 두 물질의 격자부정합과 열팽창계수 차이가 크기 때문에 GaN를 직접 성장시키는 것은 불가능하다. 큰 격자부정합과 열팽창계수 차이를 보상하기 위하여 성장 초기에 저온에서 약 200 ~ 300 Å 두께의 비정질적인 (amorphous like) 성질을 가진 GaN나 AlN를 사파이어 기판 위에 성장시켜 완충층(low temperature buffer layer)으로 이용한다[11,12]. 이러한 완충층 성장 기술이 도입됨으로써 GaN계 질화물 반도체 성장기술은 급속히 발전하였다.

사파이어 기판은 비교적 가격이 저렴하고 우수한 결정성의 소자구조를 성장할 수 있는 장점이 있으나 상온에서의 열전도도가 0.5 W/cm K 으로 열 방출 특성이 비교적 좋지 않다. 그러므로 고효율용 AlGaIn/GaN HFET의 제조에는 열전도도가 우수한 SiC가 보다 더 유리하다. 6H-SiC의 경우 격자상수와 열팽창계수는 GaN와 비슷하지만 결정성이 사파이어에 비하여 떨어지므로 그 위에 성장된 GaN의 결정성은 사파이어 기판을 사용한 경우보다는 좋지 않다. 그러나 상온에서 약 5 W/cm K의 우수한 열전도도를 가지므로 SiC 기판 상에 제조된 AlGaIn/GaN HFET는 사파이어 기판의 경우보다 약 2 배 이상의 RF 출력을 나타내고 있다[10].

(0001) 방향의 사파이어 기판 상에 GaN를 성장할 경우 GaN의 단위 셀은 사파이어의 단위 셀과 30°어긋나게 된다.

이로 인해서 레이저다이오드의 제조에서 중요한 공정 중의 하나인 벽개면 (cleaved facet)을 이용한 반사거울 (mirror)의 제조는 불가능하다. 이를 해결하기 위해서 (11-20) 방향의 사파이어 기판이나 MgAl2O4 등의 기판을 이용하여 GaN를 성장한 후 벽개면을 형성하는 연구가 시도되고 있으나 결정성이 좋지 않다[13,14]. (0001) 방향의 사파이어 기판 상에서의 결정결합을 줄이기 위해서 최근에는 epitaxial lateral overgrowth (ELOG) 나 pendeo-epitaxy 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[15,16]. 이들 두 결정성장법은 c-축 방향으로의 결정결합 전이를 억제함으로써 결합 농도를 크게 감소할 수 있으며 레이저다이오드의 제조에 주로 이용된다. Si를 기판으로 사용한 결정성장법에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있는데, 생산 단가의 절감과 동시에 발달된 Si 전자소자와 하나의 칩으로 구현할 수 있는 장점이 있다[17].

AlGaIn/GaN HFET의 제조를 위해서는 반절연의 특성을 가지는 undoped-GaN 위에  $Al_xGa_{1-x}N$ 을 성장시킨 구조가 일반적으로 사용되며 Al의 조성비는 약 0.2에서 0.5 정도이다. AlGaIn/GaN 이종접합구조에서 2 차원 전자분포의 특성을 최대화하기 위한 AlGaIn 층에 대한 연구는 필수적이다.  $Al_xGa_{1-x}N$ 는 에너지갭이 Al의 조성비에 따라 3.4 eV ( $x=0$ )에서 6.2 eV ( $x=1$ ) 까지 변화된다. Al의 조성비가 35% 이상으로 증가되면 큰 에너지갭으로 인하여 도핑 효율이 급격히 떨어지며 우수한 결정성의 박막을 성장하기도 어려워진다.

표 2. 질화물반도체 성장을 위한 여러 가지 기판 재료들의 비교.

Substrate material	Symmetry	Lattice parameters(Å)	Coefficient of thermal expansion ( $\times 10^{-6}/K$ )
GaN	Hexagonal	a = 3.189 c = 5.185	$\Delta a/a = 5.59$ $\Delta c/c = 3.17$
AlN	Hexagonal	a = 3.112 c = 4.982	$\Delta a/a = 4.2$ $\Delta c/c = 5.3$
$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hexagonal	a = 4.758 c = 12.991	$\Delta a/a = 7.5$ $\Delta c/c = 8.5$
6H-SiC	Hexagonal	a = 3.08 c = 15.12	$\Delta a/a = 4.20$ $\Delta c/c = 4.68$
3C-SiC	Cubic	a = 4.36	-
Si	Cubic	a = 5.4301	$\Delta a/a = 3.59$
GaAs	Cubic	a = 5.6533	$\Delta a/a = 6$
MgO	Cubic	a = 4.216	$\Delta a/a = 10.5$
ZnO	Hexagonal	a = 3.252 c = 5.213	$\Delta a/a = 2.9$ $\Delta c/c = 4.75$
MgAlO <sub>2</sub>	Cubic	a = 8.083	$\Delta a/a = 7.45$

AlGaIn 층에서 GaN 층과의 격자부정합에 의한 압전효과가 없어지는 임계두께 (critical thickness)는 Al의 조성비가 30%인 경우 약 200 ~ 250 Å 정도로 실험적으로 보고되고 있다. 그 이상의 두께에서는 결정결함 (defect)의 생성으로 인한 스트레인 이완 (relaxation)이 발생된다고 알려져 있다 [18]. 이러한 AlGaIn/GaN HFET의 구조 성장에 있어서 물질의 bulk와 표면의 trap density와 표면의 거칠기를 최소화하도록 성장되어야 하며 이것은 소자의 오믹 및 쇼트키 접합과 rf 신호의 인가시의 dispersion 특성에 중요한 영향을 미친다. 결정성장 방법과 성장 장비에 따라서 AlGaIn 층의 성질에 차이가 있으므로 각 장비에 맞는 최적의 2 차원 전자분포를 가지는 AlGaIn 층의 성장조건에 대한 연구를 수행하여야 한다. 이와 함께 소자의 가격 경쟁력을 확보하기 위해서 더 넓은 크기의 기판에 성장을 해야 하는데 이것은 넓은 크기를 가지면서 동시에 단결정의 성장이 가능한 기판과 적합한 성장장치를 확보해야 한다. 또한 기판의 크기가 커짐에 따라 휘어짐이 없이 성장할 수 있는 박막의 두께가 감소하게 되며 이러한 감소에 따라 소자에서 이동도가 감소하고 박막내의 결정결함 밀도가 상대적으로 증가할 것으로 생각되며 이에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

### 2.3 Ohmic contact 형성

GaN계 화합물반도체의 오믹접촉 형성 기술은 전자소자와 관련된 활발한 연구와 더불어 최근 5년간 많은 주목을 받아왔다. 특히 전자소자에서 우수한 오믹접합을 형성하는 것은 우수한 주파수 특성과 신뢰성 있는 고온 동작 특성을 가지게 하는 필수적 요건이다. p-GaN에 비하여 n-GaN에서의 오믹접촉은 비교적 용이하여  $\sim 10^7 \Omega \text{ cm}^2$  이하의 우수한 접촉비저항을 가지는 오믹접합 형성 방법들이 보고되고 있다.

반도체와 금속의 오믹접합 형성시에 접촉비저항을 줄이기 위해서는 반도체의 전자친화도 보다 더 작은 일함수를 가지는 금속을 고농도 도핑된 반도체에 접합시키는 것이 유리하다. 질화갈륨계 화합물반도체는 다른 III-V 족 화합물반도체에 비해 큰 에너지갭을 가지므로 일함수가 작아서 오믹접합 형성이 용이하지 않다. GaN의 경우 약 4 eV의 일함수를 가지므로 낮은 접촉저항의 저항성 접촉을 형성하기 어렵다. 현재까지 알려진 가장 적당한 금속으로는 일함수가 비교적 작은 Ti/Al의 이중구조이다 [19,20]. GaN과 접촉된 Ti는 600 ~ 700°C의 고온 열처리 시에 접합계면에서 TiN을 형성한다 [21]. 4.18 eV의 일함수를 갖는 Ti에 비해서 금속성을 띄는 TiN은 3.74 eV의 일함수를 가지므로 전위장벽이 낮아지게 된다 [22]. 그리고 TiN의 형성으로 인해 GaN의 표면에 도우너로 작용하는 질소의 공공(vacancy)이 생성되므로 표면에서 고농도의 n-형 GaN 층이 형성된다. 또한 열처리에 Al-Ti의 복합상이 형성되어 접촉저항을 줄이는 것으로 알려져 있다 [23]. Lin 등은

Ti/Al 이중금속을 900°C RTA(rapid thermal annealing)를 통해 열처리하여  $8 \times 10^{-6} \text{ ohm cm}^2$ 의 낮은 비접촉저항을 구현하였다 [24]. 최근에는 이온 주입이나 reactive ion etching (RIE)를 통한 표면처리등의 다양한 공정을 이용해서 낮은 접촉저항을 구현하고자 하는 연구가 보고되고 있다 [25,26]. AlGaIn/GaN HFET의 제조에 있어서는 Ti/Al 계 이중금속 위에 Ni/Au, Ti/Au, 혹은 Pt/Au 등의 추가적인 금속을 형성하는 4층의 구조를 이용하고 있다. 최상층의 Au는 오믹금속의 저항을 줄이기 위한 목적이며 최하층의 Ti/Al 금속과 Au의 inter diffusion을 방지하기 위하여 Ni, Ti, 혹은 Pt가 barrier 층으로 사용된다. n-GaN의 오믹접합에 있어서 Ti/Al 계 다층구조 이외에도 Ti/Pd/Ni 39), Ti/Ni 39), W 40) Ti/Ag 41), Ti/Au 37), Zr/ZrN 42) Ta/Al 43) 등의 다양한 금속들에 대한 연구가 보고되었다 [25,27-31].

### 2.4 Schottky contact 형성

AlGaIn에 대한 금속의 쇼트키 장벽높이는 소자 설계 및 특성에 있어서 매우 중요한 항목이다. 큰 장벽높이로부터 작은 누설전류와 큰 항복전압을 얻을 수 있으며 이로 인해 노이즈와 항복전압 특성을 향상시킬 수 있다. 다양한 금속들의 n-GaN 위에서의 장벽높이는 실험적인 결과들로부터 GaAs와 대조적으로 금속의 일함수가 증가함에 따라 증가한다 [32]. 그림 3에 실험결과들이 정리되어 있으며 동일한 금속에서 장벽높이들이 다른 값들을 보이는 것은 금속 증착전의 표면처리 방법의 차이에 의한 것이다. 이러한 금속들중에서 Ni/Au와 Pt/Au의 형태가 가장 많이 사용되고 있다. Schottky diode의 전기적인 특성은 금속 증착전의 표면 상태 및 박막내의 결합과 부분적인 stoichiometry 및 표면거칠기 등의 물질과 제작공정의 특성에 의해 좌우된다. GaN의 성장은 격자상수의 차가 큰 sapphire나 SiC 기판을 이용하므로 성장되므로 앞에서 언급한 특성들이 결정성장조건에 의해 민감하게 변화한다. 또한 박막내의 결정결함을 최소화하면서 동시에 소자제작시 표면처리등을 함으로써 특성을 개선하려는 연구들이 진행되고 있다.

### 2.5 AlGaIn/GaN HFET의 trap-induced RF power compression

처음으로 GaN를 이용한 트랜지스터가 선보인 후 GaN 계열 HFET의 개발은 매우 빠른 속도로 진행되어왔다. Sapphire와 SiC 기판 위에 성장된 GaN 계열 HFET의 출력전력밀도는 1.1 W/mm에서 9.8 W/mm로 향상된 것을 보아도 이러한 빠른 기술개발정도를 알 수 있을 것이다. AlGaIn/GaN HFET를 이용한 고효율 트랜지스터를 제작하는 데 기술진보의 가장 큰 문제점은 구조적으로 AlGaIn과 GaN 박막의 결정성을 향상시키는 것, unintentional impurity 농도의 제어 등이 있다. 이 중에서 물질의 박막내와 표면에서의 trap 밀도를

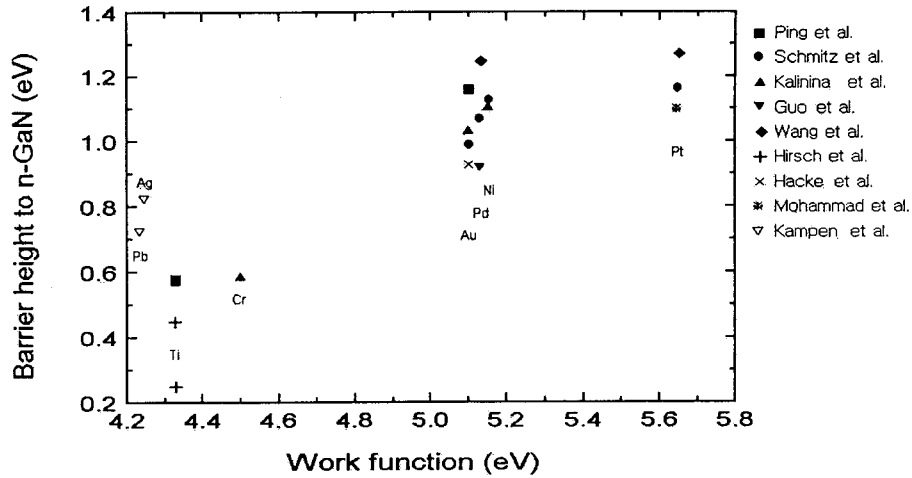


그림 3. 금속의 일함수에 따른 n-GaN에 대한 전위 장벽 높이.

최소화하는 것이 매우 중요하다. Trapping 효과로 인하여 드레인 전류 감쇠가 발생하게 되고 이로 인해 DC특성에서 예상한 전력특성보다 훨씬 적은 전력특성을 rf 동작시에 얻게 된다. 이와 함께 그림 2에서도 알 수 있듯이 강한 polarization field 때문에 GaN 계열의 물질을 이용한 FET 소자의 경우에는 surface states의 문제가 항상 존재한다. 이러한 trap으로 인해 발생하는 문제점들은 rf 동작시의 power 감쇠뿐만 아니라 소자의 신뢰성에도 많은 영향을 미칠 것이다.

논의된 rf power compression 문제를 최소화하는 방법은 결정성장시에 trap을 최소화하고 소자제작시에 surface를 passivation 함으로서 박막내와 표면의 영향을 줄이는 것이다. 결정성장에 있어서 trap을 최소화하는 방법은 널리 알려진 대로 epitaxially laterally overgrowth (ELOG)와 pendeo 등의 방법을 사용하여 물질을 성장하거나 GaN homo 기판을 사용하는 것이며 이 중에서 현재 기판의 크기, 전도성, 가격문제등으로 인하여 ELOG나 PENDEO 법이 많이 사용되어지고 있다. 향후에 GaN homo 기판의 문제점들이 해결되면 homo 기판을 사용하는 것이 이러한 trap 문제들을 가장 최소화할 것으로 생각된다.

소자의 passivation을 통해 surface states를 줄이는 연구가 여러기관에서 수행되어지고 있으며 이를 통해 소자의 전력특성이 상당히 개선되어진다는 결과들이 보고되고 있다. passivation 박막으로는 plasma enhanced chemical vapor epitaxy (PECVD) 법을 사용한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 박막이 많이 사용되고 있으며 이외에서 다른 박막들에 대한 연구들도 활발하게 진행되고 있다. 박막을 사용하여 소자를 passivation 할 때 metal insulator semiconductor (MIS) 구조도 구현되어지며 이에 대한 연구도 진행되고 있다.

## 2.6 AlGaIn/GaN HFET의 열특성

AlGaIn/GaN HFET을 성장하는 데 기판으로서 sapphire, SiC, Si, GaN 등을 사용하고 있다. HFET을 이용하여 고출력 소자를 제작하는 데 있어서 성장 기판은 매우 중요하다. 기판을 선정할 때에 고려해야 하는 사항들을 요약해 보면 trap 등이 최소화되도록 고품질의 박막을 성장할 수 있어야 하고 열전도도가 높고 기판의 thinning 공정이 용이하여 소자구동시에 발생하는 열을 잘 방출할 수 있어야 하고 기판의 크기 및 가격 경쟁력이 있어야 한다. 표 3에 GaN 계 전자소자 제조를 위한 여러 가지 기판들에 대한 특성을 정리해보았다. Si 기판 위에서의 성장기술이 성숙되고 문제점들을 해결한다면 이 중에서 Si 기판이 가장 경쟁력이 있는 것으로 판단되어지며 전자소자와 광소자 모두에 있어서 파급효과가 클 것으로 기대되어진다.

## 2.7 AlGaIn/GaN HFET의 performance

AlGaIn/GaN 이종접합구조는 높은 전도대 불연속성 ( $\Delta E_c$ )과 자발분극 (spontaneous polarization) 및 압전효과 (piezoelectric effect)에 의한 전계에 의하여  $1 \times 10^{19} / \text{cm}^2$  이상의 높은 2차원 전자분포 농도와 약 1500 cm/V s (상온에서)의 전하이동도를 가진다. 그러므로 AlGaIn/GaN HFET은 고출력 및 고주파용 전자소자 제조에 적합하다. 보고된 최대 드레인 동작전류는 약 1.6 A/mm 이며 Li 등은 0.2  $\mu\text{m}$ 의 게이트 길이를 가진 소자에서 107 GHz의 최대 발진 주파수 (maximum oscillation frequency,  $f_{\text{max}}$ )를 보고하였다[33]. 또한 AlGaIn/GaN 이종접합 구조는 3 MV/cm 이상의 우수한 임계 항복전압을 가지므로 소자제작시에 약 100 V/ $\mu\text{m}$ 의 드레인 항복전압을 가지는 것으로 보고

표 3. GaN 계 전자소자 제조를 위한 기판물질의 특성 비교.

Property	Sapphire	Si	SiC
Thermal Conductivity	low	Moderate	high
Cost	high	low	very high
Growth Technology	Good	Moderate	Good
Maturity	Good	Moderate	Good
Epi Wafer Size	small	large	small

된다. 높은 드레인 동작전압의 장점을 충분히 이용하기 위해서는 고출력 동작시에 소자의 특성이 열에 의해서 제한이 되지 않아야 한다. AlGaIn/GaN HFET에서 열전도도가 우수한 SiC 기판을 이용하여 제조할 수 있으므로 높은 rf 출력 및 효율을 얻을 수 있다. K. Asano 등은 8 GHz의 주파수대에서 9.8 W/mm의 rf 출력과 47%의 전력효율 (power added efficiency, PAE)을 가진 AlGaIn/GaN HFET를 보고하였다[34]. 위의 rf 출력은 GaAs계 HEMT의 가장 높은 결과에 비하여 약 7 배 높고 SiC MESFET에 비하여 약 2배 높은 결과이다. 결정성장 기술과 소자제조 기술의 발달과 더불어 더욱 높은 rf 출력에 대한 보고가 이루어질 것으로 전망되고 있다. 그림 4에서는 AlGaIn/GaN HFET의 X-밴드에서의 rf 출력 특성을 GaAs HEMT 및 SiC MESFET와 비교하였다.

### 2.8 AlGaIn/GaN HFET의 응용분야

현재 rf high power 소자들의 가장 큰 시장은 이동전화의 기지국이다. 3G통신시스템인 international mobile telecommunication 2000 (IMT2000)의 서비스가 시작될 때 사용자들은 2-Mbps의 전송용량을 가지고 전 세계적으로 이동터미널에 접속할 것이다. 따라서 이동전화의 수요 증가와

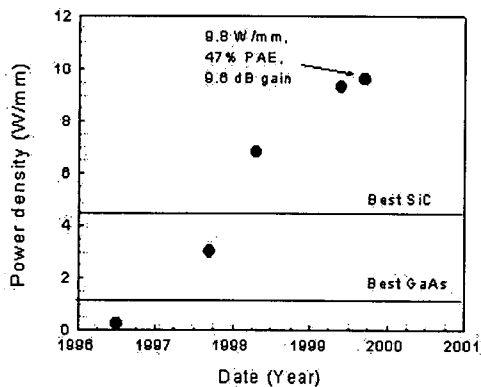


그림 4. AlGaIn/GaN HFET의 X-밴드에서의 RF 출력 특성.

더불어 수 킬로미터마다 기지국을 설치해야 할 것이다. Silicon이나 SiC 기판을 이용한 AlGaIn/GaN HFET는 높은 출력전력용량 때문에 기지국에 사용되는 소자의 기판으로서 적합할 것으로 생각된다. 그러나 사용주파수가 2 GHz 근처이기 때문에 silicon MOSFETs, silicon bipolar transistors, GaAs MESFET과 HEMTs, SiC MESFETs 등이 이미 시장에서 경쟁을 하고 있어서 GaN 계열의 전자소자가 이 시장을 공략하는 것은 쉽지 않을 것으로 생각된다. 그러나 현재 기존의 시스템과 회로에서 단지 다른 소자들을 대체한다는 개념이 아니라 GaN 전자소자의 특성과 이점을 최대한 살릴 수 있는 회로와 시스템을 구성한다면 소자 자체에서의 가격은 경쟁력이 떨어지지만 궁극적으로 시스템에서는 우수한 특성과 함께 가격경쟁력을 확보할 수 있다고 생각한다.

그 외에 GaN 계열의 전자소자가 장점을 살려서 진입할 수 있는 시장으로는 radar 등의 military에 관한 응용과 차세대 무선 통신 응용인 고정 무선 시스템이 될 수 있다. 고정 무선 시스템은 구체적으로 fixed wireless access (FWA) 시스템, wireless local loop (WLL) 시스템, local multipoint distribution 시스템 (LMDS) 등이 있다. 이러한 응용들은 고속의 디지털 신호를 telephone pole로부터 가정과 사무실에 전송하는 것이며 최종적인 분배를 구현함에 있어서 비용이 많이 드는 유선 시스템에 비하여 간편하고 저렴하다. 거리가 짧고 전송경로가 고정되어 있어서 millimeter 나 near millimeter의 주파수 사용이 가능하며 22, 26, 38 GHz의 일부 시스템들이 이미 사용되고 있다. 이러한 응용이 일반화되기 위해서 가장 중요한 것은 비용이다. 주파수가 높기 때문에 MMIC 형태의 회로들이 요구되어지기 때문에 넓은 크기의 기판을 사용하는 것이 비용문제를 해결할 수 있는 방법이며 높은 유전상수를 가지고 있는 sapphire가 near millimeter와 millimeter 주파수에서 소자의 기판으로서 적합할 것으로 생각되어진다.

### 3. 결론

GaN 계열의 전자소자는 crystal defect 문제와 소자의 instability 등의 해결해야 할 많은 문제점들이 있다. 이와 비슷한 문제들을 겪었고 또한 아직도 일부 해결되어야 할 문제점들을 가지고 있는 GaAs 계열의 전자소자들이 상용화와 일반화에 성공하였다. 이러한 GaAs계 물질 성장과 소자개발 경험을 바탕으로 하여 GaN 전자소자들이 가지고 있는 문제점들을 해결하고 구체적인 응용에 적용한다면 더 빠르게 상용화 단계의 기술들을 개발할 수 있다고 생각된다. 따라서 silicon, sapphire, SiC 등의 기판을 이용하여 고주파 특성과 고신뢰성, 적은 비용이 드는 MMIC의 구현을 한다면 미래에 다가올 많은 무선 시스템에서 GaN 전자소자들에 대한 수요가 급증할 것으로 기대한다.

## Reference

- [1] M. Asif Khan, J. N. Kuznia, A. R. Bhattarai, and D. T. Olson, "Metal Semiconductor Field Effect Transistor based on Single Crystal GaN," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 15, pp. 1786-1788, 1993.
- [2] C. Gaquiere, S. Trassaert, B. Boudart, and Y. Crosnier, "High Power GaN MESFET on Sapphire Substrate," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 19-20, 2000.
- [3] J. C. Zolper, R. J. Shul, A. G. Baca, R. G. Wilson, S. J. Pearton, R. A. Stall, "Ion-implanted GaN junction field effect transistor," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 16, pp. 2273-2275, 1996.
- [4] F. Ren, C. R. Abernathy, J. M. Van Hove, P. P. Chow, R. Hickman, J. J. Klaasen, R. F. Kopf, Hyun Cho, K. B. Jung, J. R. La Roche, R. G. Wilson, J. Han, R. J. Shul, A. G. Baca, and S. J. Pearton, "300°C GaN/AlGaIn Heterojunction Bipolar Transistor," *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.* vol. 3, no. 41, pp. 1-4, (1998).
- [5] M. Asif Khan, X. Hu, G. Sumin, A. Lunev, J. Yang, R. Gaska, and M. S. Shur, Fellow, IEEE, "AlGaIn/GaN Metal Oxide Semiconductor Heterostructure Field Effect Transistor," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 21, no. 2, pp. 63-65, 2000.
- [6] H. Kawai, M. Hara, F. Nakamura, T. Asatsuma, T. Kobayashi, and S. Imanaga, "An AlN/GaN Insulated Gate Heterostructure Field Effect Transistor with regrown n+GaIn Source and Drain Contact," *J. Cryst. Growth*, vol. 189, No. 190, pp. 738-741, 1998.
- [7] Bruce M. Green, Student Member, IEEE, Kenneth K. Chu, E. Martin Chumbes, Student Member, IEEE, Joseph A. Smart, James R. Shealy, Member, IEEE, and Lester F. Eastman, Life Fellow, IEEE, "The Effect of Surface Passivation on the Microwave Characteristics of Undoped AlGaIn/GaN HEMT's," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 21, no. 6, pp. 268-270, 2000.
- [8] Q. Chen et al., "High Transconductance AlGaIn/GaN Heterostructure Field Effect Transistors on SiC Substrates," *Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 1413-, 1997.
- [9] S. T. Sheppard et al., "High-Power Microwave GaN/AlGaIn HEMT on Semi-insulating Silicon Carbide Substrate," *IEEE Electron Devices Lett.*, vol. 20, pp. 161-, 1999.
- [10] Y. -F. Wu, K. Kapoinek, J. Ibbetson, N.-Q. Zhang, P. Parikh, B. P. Keller, and U.K. Mishra, "High Al-Content AlGaIn/GaN HEMTs On SiC Substrates With Very-high Power Performance," *IEDM Tech. Dig.*, Dec. pp. 925-927, 1999.
- [11] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, "Metal organic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layers," *J. Appl. Phys.*, Vol. 71, No. 11, pp. 5543-5549, 1992.
- [12] S. Nakamura, Y. Harada, and M. Senoh, "Novel metalorganic chemical vapor deposition system for GaN growth," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 58, No. 18, pp. 2021-2023, 1991.
- [13] Bernard Gil, "Group III Nitride Semiconductor Compounds," Clarendon, Oxford, 1998.
- [14] S. Nakamura, Y. Harada, and M. Senoh, "Novel metalorganic chemical vapor deposition system for GaN growth," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 58, No. 18, pp. 2021-2023, 1991.
- [15] P. Kung, D. Walker, M. Hamilton, J. Diaz, M. Razeghi, "Lateral epitaxial overgrowth of GaN films on sapphire and silicon substrates," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, No. 4, pp. 570-572, 1999.
- [16] T. S. Zheleva, S. A. Smith, D. B. Thomson, T. Gehrke, K. J. Linthicum, P. Rajagopal, E. Carlson, W. M. Ashmawi, R. F. Davis, "Pendeo-Epitaxy - A New Approach for Lateral Growth of GaN Structures," *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.*, Vol. 4S1, G3.38, 1999.
- [17] Y. Nakada, I. Aksenov, and H. Okumura, "GaIn heteroepitaxial growth on silicon nitride buffer layers formed on Si (111) surfaces by plasma-assisted molecular beam epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, No. 6, pp. 827-829, 1998.
- [18] O. Ambacher, B. Foutz, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, A. J. Sierakowski, W. J. Schaff, and L. F. Eastman,

"Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaIn/GaN heterostructures," J. Appl. Phys., Vol. 87, No. 1, pp. 334-344, 2000.

- [19] L. F. Lester, J. M. Brown, J. C. Ramer, L. Zhang, S. D. Hersee and J. C. Zolper, Appl. Phys. Lett., Vol. 69, No. 18, pp. 2737-2739, 1996.
- [20] Z. Kachwalla, J. W. Wiggins, S. J. Chua and W. Wang, Phys. Stat. Sol. (a), Vol. 176, No. 1, pp. 779-782, 1999.
- [21] Q. Z. Liu and S. S. Lau, Solid-State Elec., Vol. 42, No. 5, pp. 677-691, 1998.
- [22] S. Miller and P. H. Holloway, J. Electron. Mater., Vol. 25, No. 11, pp. 1709-1714, 1996.
- [23] Zhifang Fan, S. Noor Mohammad, Wook Kim, Ozgur Aktas, Andrei E. Botchkarev, and Hadis Morkoc, Appl. Phys. Lett., Vol. 68, No. 12, pp. 1672-1674, 1996.
- [24] M. E. Lin, Z. Ma, E. Y. Huang, Z. Fan, L. H. Allen and H. Morkoc, Appl. Phys. Lett., Vol. 64, No. 8, pp. 1003-1005, 1994.
- [25] Jinwook Burm, Kenneth Chu, Willian A. Davis, Willian J. Schaff, and Lester F. Eastman, Appl. Phys. Lett., Vol. 70, No. 4, pp. 464-466, 1997.
- [26] D. Qiao, Z. F. Guan, J. Carlton, S. S. Lau, and G. J. Sullivan, Appl. Phys. Lett., Vol. 74, No. 18, pp. 2652-2654, 1999.
- [27] K. V. Vassilevski, M. G. Rastegaeva, A. I. Babanin, L. F. Lester, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 468, pp. 421-426, 1997.
- [28] M. W. Cole et al., J. Appl. Phys., Vol. 80, pp. 278-281, 1996.
- [29] J. D. Guo, C. I. Lin, M. S. Feng, F. M. Pan, G. C. Chi, C. T. Lee, Appl. Phys. Lett., Vol. 68, pp. 235-237, 1996.
- [30] S. E. Mohny, B. P. Luther, S. D. Wolter, T. N. Jackson, R. F. Karlicek Jr., R. S. Kern, 4th Int. Conf. on High Temperature Electronics, Proc. pp. 134-137, 1998.
- [31] B. P. Luther, S. E. Mohny, J. M. DeLuca, R. F. Karlicek Jr., J. Electron. Mater., Vol. 70, pp. 464-466, 1997.
- [32] S. E. Mohny and S. S. Lau, in GaN and Related Materials II, edited by S. J. Pearton, (Gold-

en and Breach, New York, 1998).

- [33] R. Li, S. J. Cai, L. Wong, Y. Chen, K. L. Wang, R. P. Smith, S. C. Martin, K. S. Boutros, and J. M. Redwing, IEEE Electron Device Lett., Vol. 20, No. 7, pp. 323-325, 1999.
- [34] K. Asano, Y. Miyoshi, K. Ishihara, Y. Nasimoto, M. Kuzuhara, M. Mizuta, IEEE IEDM 1998, San Francisco, CA, p. 59, 1998.

## 저 자 약 령

**성명 : 김 종 욱**

**❖학력**

1995년 2월 한양대학교 전자공학과 공학사.  
1997년 2월 한양대학교 전자공학과 공학석사.  
2000년 8월 한양대학교 전자공학과 공학박사.

**❖경력**

2001년 현재 : LG 전자기술원 소재재료연구소  
RF소자그룹 선임연구원.

**성명 : 이 재 승**

**❖학력**

1996년 2월 경북대학교 물리학과 이학사.  
1998년 2월 경북대학교 전자공학과 공학석사.  
2001년 8월 경북대학교 전자공학과 공학박사.

**❖경력**

2001년 현재 LG 전자기술원 소재재료연구소  
RF소자그룹 선임연구원.

**성명 : 신 진 호**

**❖학력**

1985년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사.  
1987년 2월 한국과학기술원 전기, 전자공학부 공학석사.  
1997년 2월 포항공과대학교 전기, 전자공학부 공학박사.

**❖경력**

1987~2001년 현재 LG전자기술원 소재재료연구소  
RF소자그룹 책임연구원