

초고주파 고효율 Gallium Nitride 전자소자의 기술동향 및 발전방향



오재웅

한양대학교 전자 및 컴퓨터공학부

E-mail : joh@emc.hanyang.ac.kr

요약문

본 논문에서는 최근 초고주파영역에서 우수한 고효율 특성을 갖는 것으로 알려진 AlGaIn-GaN high-electron mobility transistor(HEMT's)의 최근 기술동향과 함께 응용가능성 및 한계에 대하여 검토하였다. GaN는 약 3.4 eV 정도의 큰 밴드갭을 갖는 까닭에 200 V 이상의 높은 항복전압을 갖는다. 또한 AlGaIn와 이종접합을 형성하는 경우 piezoelectric field에 의하여 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 이상의 높은 밀도의 2DEG(two-dimensional electron gas)의 형성이 가능하고, 상온 전자이동도가 $1,200 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ 이상으로서 초고주파 고효율 전자소자의 구현에 필요한 물성을 갖추고 있다. 현재 cutoff frequency f_T 가 60 GHz 이상, maximum frequency f_{max} 가 150 GHz 이상의 소자가 개발되었으며, 3 W/cm 이상의 cw (continuous wave) 전력밀도가 보고된 바 있다. 또한 열전도도가 큰 새로운 기판이 개발되고, heat dissipation 을 개선하기 위한 새로운 소자구조가 개발됨에 따라 보다 높은 전력밀도를 갖는 단위소자 또는 MMIC(monolithic microwave

integrated circuits)의 구현가능성이 높아지고 있다.

I. 서론

고성능 고체 증폭기(solid-state power amplifier : SSPA)에 대한 필요성은 무선통신의 영역과 개념이 보다 넓어짐에 따라 더욱 커지고 있다. 응용영역에 따라서 요구되는 사양이 다르지만 우수한 고효율, 고효율, 선형성등의 특성이 요구된다. 현재까지는 앞의 모든 사양을 동시에 만족시키는 해결책이 없는 까닭에 실리콘, III-V 족 반도체 그리고 진공관등을 필요에 따라 조합하여 사용되고 있다. 따라서 하나의 물질계에서 위의 모든 사양을 동시에 만족시킬 수 있는 물질에 대한 요구가 점차 증가되고 있으며, SiC 나 GaN와 같이 밴드갭이 큰 물질이 유망하다고 판단된다. 그 중에서도 특히 GaN는 3.4 eV의 밴드갭, $3 \times 10^6 \text{ V/cm}$ 정도의 높은 항복전압과 함께 AlGaIn와 이종접합을 형성하는 경우 높은 전자이동도($> 1,500 \text{ cm}^2/\text{V-s}$), peak velocity($\sim 3 \times 10^7 \text{ cm/sec}$)와 saturation velocity 등의 특성을 갖는 까닭에 SSPA의 응용으로 특히 유망한 물질이다. 또

한 최근에 각광받고 있는 청색발광다이오드와 같은 새로운 소자개발에 의하여 파생되는 관련 기술이 발전됨에 따라 이 물질을 이용한 고성능 SSPA의 개발에 또 다른 힘이 되고 있다. 본 논문에서는 GaN에 기반을 두고 개발되고 있는 microwave 혹은 millimeter wave 전력소자의 기술 동향을 파악하고 발전 방향에 대한 개념을 제시하고자 하였다. 제 2 절에서는 AlGaIn/GaN 이종접합의 전송특성을 중심으로 요약하였으며, 제 3 절에서는 FET 형태를 기준으로 현재 제시되고 있는 초고주파 전자소자의 구조 및 소자 제작기술을 재검토하였다. 제 4 절에서는 현재까지 발표된 III-족 질화물 반도체 초고주파 소자의 DC 및 초고주파 특성을 요약하였으며, 특히 thermal management 문제를 검토함으로써 전력소자로 응용에 대한 가능성을 자세히 알아보았으며, 앞으로 발전전략에 대한 의견을 제시하였다.

II. AlGaIn/GaN 이종접합의 전기적 특성

전자소자의 속도를 결정하는 여러가지 요인중 물성에 관련되는 주요특성은 전자이동도 및 saturation velocity 이다.

전자이동도는 온도, 전계, 도우핑 농도, 그리고 결정성에 크게 의존한다. 그 중에서도 특히 기판에 의한 영향이 매우 큰 경향을 보여주고 있다. Sapphire 기판위에 성장되는 경우 격자상수 및 열팽창계수의 차이에 의하여 10~30 cm²/V-s 정도의 낮은 전자이동도를 갖는다. Amano [1] 등에 의하여 개발된 저온성장 AlGaIn 나 GaN [2, 3] 버퍼층을 사용함에 따라 350~400 cm²/V-s 정도로 전자이동도

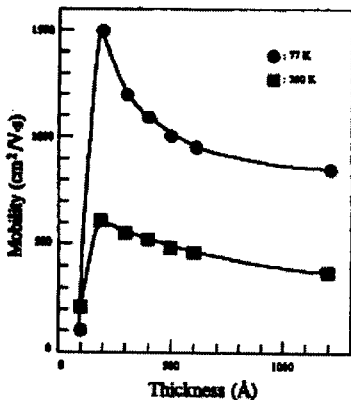


그림 1. Mobility vs. Buffer Layer Thickness

가 개선되는 현상이 관찰되었다. 최적의 전자이동도는 버퍼층의 두께가 약 20 nm 정도에서 관찰되며 버퍼층의 두께가 증가함에 따라 전자이동도가 감소하는 현상이 그림 1과 같이 보고되었다. 도우핑 농도에 따른 전자이동도 변화를 그림 2에서 관찰할 수 있는데, 통계적으로 전자의 농도가 증가함에 따라 전자이동도가 exponentially 감소하는 경향이 관찰된다[4~10].

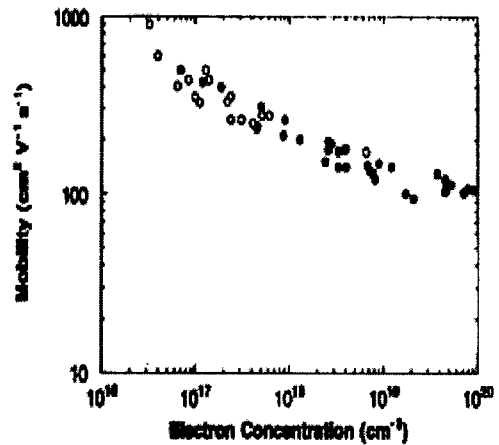


그림 2. Mobility vs. Doping Concentration

최근에 wurtzite 및 cubic 형태의 bulk GaN 에 대한 full Brillouin zone [111] 내의 first-order conduction band 를 ensemble Monte Carlo 방법으로 계산이 수행된 바 있다. 두 형태 모두 Γ valley가 최소 에너지를 갖는 direct 밴드갭 물질이라는 공통점을 갖는 동시에 매우 다른 conduction band 구조를 갖고 있으며, 따라서 다른 전송특성을 갖을 것으로 보인다(표 1. 참조).

가령 cubic GaN의 경우에는 Γ -X separation 이 1.5 eV 정도인데 반하여, wurtzite GaN의 경우에는 M과 L valley 사이에 minimum point가 있으며 그 값은 2.0 eV 정도이다. 그림 3에서 보여주듯이 cubic GaN의 경우 112 kV/cm에서 2.57×10^7 cm/s의 peak velocity를 가지며, wurtzite GaN의 경우 170 kV/cm에서 2.45×10^7 cm/s 정도로 예측된다. 높은 값의 peak field와 saturation velocity는 intervalley separation energy가 크고 또한 큰 값의 polar optical phonon에 기인한다. 또한 GaN의 ballistic transport 나 velocity overshoot 역시 GaAs에 비하여 우수하다. 이러한 특성으로 인하여 GaN가 GaAs

보다도 초고속 소자의 응용에 적절한 전송특성을 갖고 있음을 알 수 있다[11~13].

표 1. GaN band structure data

		Cubic GaN	Wurtzite GaN
Γ valley	Energy gap [eV]	3.2	3.39
	Effective mass	0.15	0.2
	Non parabolicity [eV ⁻¹]	0.213	0.189
2 nd valley	Energy gap [eV]	4.7	5.29
	Effective mass	1.00	1.00
	Degeneracy	3(X)	1(Γ^r)
	Non parabolicity [eV ⁻¹]	0.00	0.00
3 rd valley	Energy gap [eV]	6.0	5.49
	Effective mass	1.00	1.00
	Degeneracy	4(L)	6(L-M)
	Non parabolicity [eV ⁻¹]	0.00	0.00

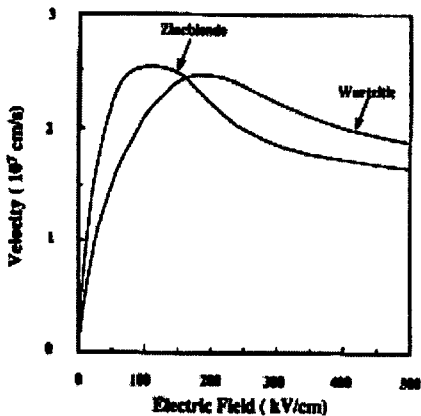


그림 3. Carrier Velocity vs. Electric Field

유사한 밴드갭을 갖고 있으며 지난 수십년간 전력 소자로의 개발이 끊임없이 추진된 SiC에 비하여 GaN 소자가 갖는 최고의 장점은 이종접합을 구성할 수 있다는 점이다. Shur[14]는 Monte Carlo 계산(실선)과 Hall 측정결과(Open Circle)를 통하여 bulk GaN와 AlGaN/GaN 이종접합에 의하여 형성된 2DEG의 전송특성의 차이를 그림 4와 같이 보여준 바 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 2DEG가 bulk에 비하여 매우 높은 전자이동도를 보여주고 있으며, 또한 계산치와의 차이가 bulk의 경우와 비교하여 작음을 알 수 있다. 이러한 현상은 bulk의 경우 균일하지 않은 도우핑 농도, 특히 기판과의 계면근처에 의하여 일어나는 현상으로 bulk GaN에 비하여 월등히 높은 전자농도에 의한 효율적인 screening에 의하여 전자이동도가 개선되며, 현재 이종접합에서 전자이동도는 상온의 경우 1,700 cm²/V-s 정도, 80 K에서 5,000 cm²/V-s 이상이 보고된 바 있다[14].

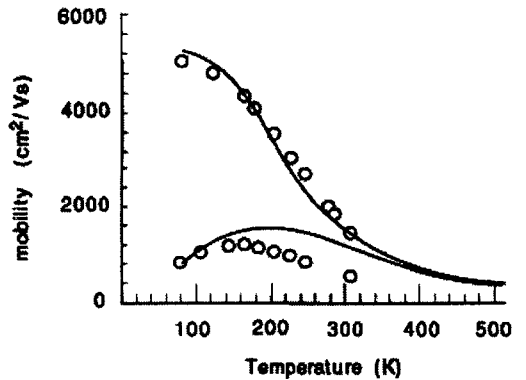


그림 4. Electron Hall mobility in GaN vs. temperature for 2-dimensional electron gas and bulk GaN for cubic(dashed lines) and hexagonal(solid lines) GaN

AlGaN/GaN 이종접합의 특성중 특히 기존의 AlGaAs/GaAs HEMT과의 차이는 AlGaN의 높은 piezoelectric 효과가 고려되어야 한다. Sapphire 기판위에 성장된 AlGaN/GaN 이종접합의 계면은 질소원자면이나 갈륨원자면으로 형성되게 된다. In-plane tensile strain은 strain에 의하여 여기된 field가 cation (Ga) 면에서 anion (N) 면의 방향을 갖게된다. 따라서 갈륨원자면의 계면이 형성될 경우에는 그림 5 (a)와 같이 2DEG의 농도를

감소시키는 방향으로 작용하는 반면에, 질소원자면의 계면은 2DEG의 농도를 증가시키는 쪽으로 작용한다. 현재는 이러한 특성을 2DEG 농도를 증대시키는데 유용하게 사용되고 있으며, 현재 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 정도의 높은 2DEG 농도를 형성된다고 보고되어 있다[15].

III. GaN FET 소자구조 및 제작기술

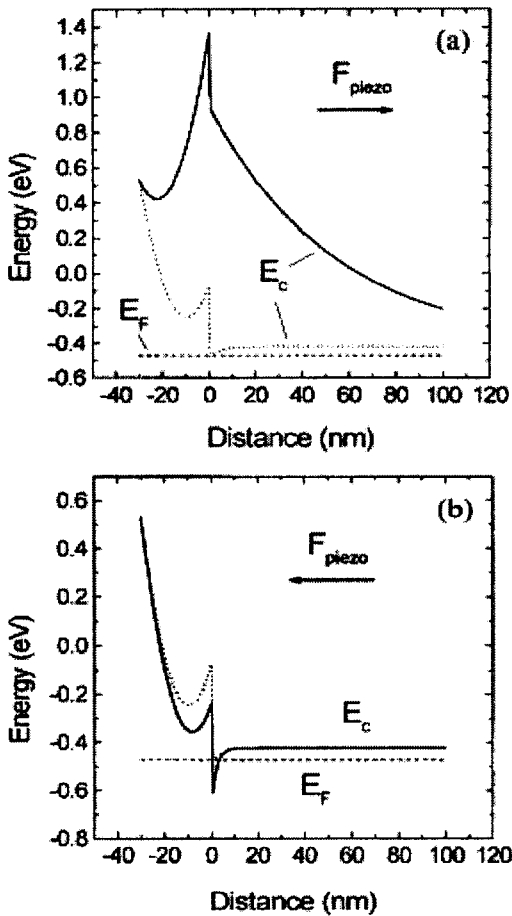


그림 5. Calculated band diagrams of $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures (a) gallium-terminated and (b) nitrogen-terminated. Dotted lines correspond to relaxed structures, solid lines correspond to unrelaxed structures

현재까지 GaN 를 이용한 전자소자는 HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) [16], cold cathode type field emitter [17], 그리고 vertical current flow static induction transistor (SIT) [18] 등이 제안되었으나, 대부분의 연구는 FET 를 중심으로 진행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 FET 형태의 GaN 소자 구조 및 제작기술 또한 관련 결정성장기술을 주로 다루었다.

1. GaN-based FET 소자구조

그림 6은 현재 주로 연구되고 있는 GaN-based HFET의 구조이다. 일반적으로 GaN-based MESFET 나 MISFET는 낮은 g_m 특성을 갖는 것으로 보고되어 있다. Kahn[19, 20]은 undoped channel 구조의 short channel (0.25 μm) AlGaIn/GaN HFET로부터 상온과 110 $^{\circ}\text{C}$ 에서 20 GHz의 f_T 와 77 GHz의 f_{max} 를 얻은 바 있다. Doped channel을 갖는 AlGaIn/GaN는 $1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 이상의 높은 2DEG 농도와 함께 우수한 mobility 를 갖는 것으로 평가되고 있으며, 현재까지는 최상의 초고주파 특성을 보여주고 있다[21].

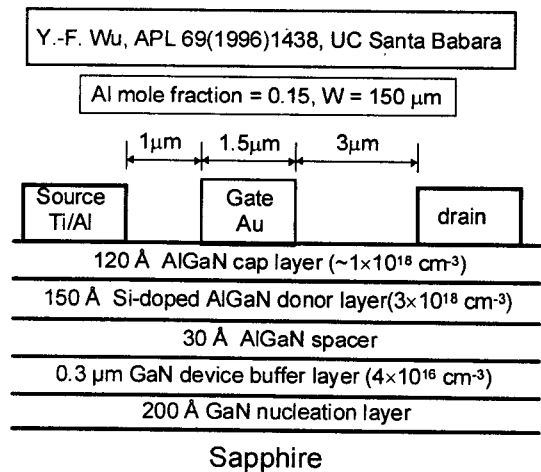


그림 6. GaN based HFET structure

2. 소자제작기술

A. Ohmic Contacts

Ohmic contact은 특히 밴드갭이 큰 물질인 GaN를 사용한 초고속 소자를 구현하기 위하여 소자제작 측면에서 가장 문제시되고 있고 있는 점이다. FET 구조에서 source와 drain 저항이 크게 되면 extrinsic g_m 이 감소하게 되며, 결과적으로 초고주파 gain 특성이 감소한다. 일반적으로 사용되고 있는 n-type ohmic contact은 Ti/Au[22] 나 Ti/Al[23]를 증착한 후 약 900°C에서 alloying 하는 방법으로, 각각 $7.8 \times 10^{-5} \Omega\text{-cm}^2$, $8 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}^2$ 정도가 발표된 바 있다.

Alloyed ohmic contact의 ball-up 현상에 의하여 표면이 매우 거칠게 형성된다. 거친 표면과 pattern은 특히 초고주파 소자의 경우 특성을 저해하는 요인중 하나로서 문제시 되고 있다. 따라서 alloying process를 배제하기 위한 연구가 수행되었는데, 최근에는 Schottky barrier height가 상대적으로 낮은 InN 혹은 InN/GaN superlattice 를 삽입하는 공정이 개발되었다[24]. 그러나 아직 만족할만한 접촉저항값은 발표되지 않고 있다. 현재의 state-of-the art 결과는 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ GaN에서 $6 \times 10^{-5} \Omega\text{-cm}^2$ 의 contact 이 보고된 바 있다.

위의 문제점들을 동시에 해결하기 위한 방안으로 separation-layer ohmic contact [25] 이나 multilayer ohmic contact [26] 등이 시도되고 있다. 최근에 Ti/Al/Ni/Au(15 nm/220 nm/40 nm/50 nm)를 900°C에서 alloying 하여 $8.9 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}^2$ 의 우수한 ohmic contact 결과가 발표된 바 있다.

B. 식각기술

고품질의 GaN는 대부분의 산이나 염에 화학적으로 저항성이 강하다. GaN는 상온에서 가열된 alkalis에 의하여 매우 느리게 반응하며, NaOH 용액에 의하여 electrolytical 반응을 하는 것으로 알려져 있다. 따라서 레이저의 경우에는 reflection mirror와 waveguide 형성을 위해서 dry etching 이나 RIE process 등이 개발되고 있다. 전자소자제작에서 필요한 식각 공정으로 메사식각과 gate recess 식각을 들 수 있는데, 메사의 경우에는 RIE 등이 일반적으로 사용되고 있다. 가장 중요한 이슈는 damage가 없고 동시에 매우 정교한 식각 control 이 필요로 하는 gate-recess 공정이다. 특히 전력소자의 경우에는 recess에 따라서 항복전압이 결정되는 까닭에 고효율의 전력소자를 얻기 위해서는 필히 해결되어야 한다.

이러한 문제점으로 인하여 GaN 전자소자 개발 초

기에는 gate recess를 하지 않는 구조를 사용하였으나, 낮은 항복전압등의 문제점이 대두되었다. 현재는 주로 CHF₃/Ar ECR 식각법이 주로 사용되고 있으나[27], 계속적인 연구가 필요한 분야이다.

C. Schottky contacts

표 2에는 최근에 발표된 n-type GaN에 대한 여러가지 contact의 barrier height를 간추려 놓았다. Contact의 종류나 측정법에 의하여 barrier height가 크게 변화하는 것을 알 수 있는데 이는 contact 계면에 높은 밀도의 interface state가 존재함으로 기인되는 문제로 해석되고 있다[28]. 따라서 contact 형성전의 표면처리법이나 형성과정에서 계면반응등 많은 연구가 필요한 영역이다.

표 2. Contact characteristics of all 17 metals to n-Type GaN along with their corresponding metal work function

Metal	Work Function [eV]	I-V Behavior
Sc	3.50	Ohmic
Hf	3.90	Ohmic
Zr	4.05	Ohmic
Al	4.28	Ohmic
V	4.30	Ohmic
Nb	4.30	Slightly rectifying
Ti	4.33	Slightly rectifying
Cr	4.50	Slightly rectifying
W	4.55	Slightly rectifying
Mo	4.60	Slightly rectifying
Ag	4.26	Schottky
Cu	4.65	Schottky
Co	5.00	Schottky
Au	5.10	Schottky
Pd	5.12	Schottky
Ni	5.15	Schottky
Pt	5.65	Schottky

IV. GaN FET의 초고주파 특성

그림 7은 지난 5년간 발표된 GaN-based FET

의 gate length에 대한 f_T 와 f_{max} 변화를 요약한 그림이다. 그림에서 보듯이 기존의 GaAs-based HEMT와 같이 초고주파 특성은 gate length가 감소함에 따라 개선되는 것을 볼 수 있다. 현재 GaN FET의 초고주파 특성은 GaAs 나 InP-based HEMT에 비하여 f_T 와 f_{max} 는 1/3 정도의 수준이다. 현재의 제작기술 수준으로 미루어 보아 GaN FET를 millimeter wave 영역으로 동작시키기 위해서 우선적으로 gate length를 0.2 μm 이하를 안정적으로 유지하여야 한다는 것을 알 수 있다.

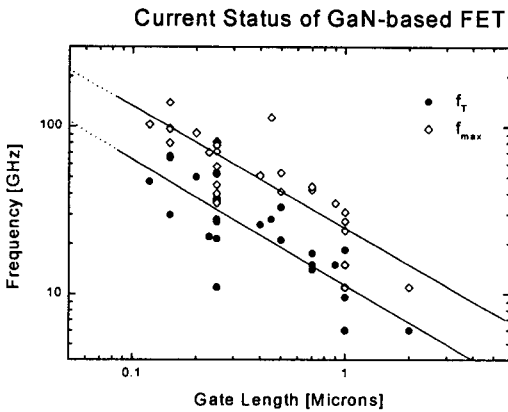


그림 7. Current status of GaN-based HFET.

GaN 소자는 초고주파 영역에서 가장 강조되는 것은 전력밀도라고 할 수 있다. 최근의 지속적인 연구에 의하여 현재 많은 발전이 있어왔다. 2 GHz에서 1.1 W/mm² [29]에서 4 GHz에서 1.5~1.57 W/mm² [30] 그리고 10 GHz에서 1.7 W/mm² [31] 등으로 지속적으로 개선되어 왔다. 최근에 발표된 GaN FET의 초고주파 주파수 특성을 보면 그림 8과 같이 소자의 g_m 특성과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. GaAs-based FET의 경우에는 g_m 은 gate length와 밀접한 관계가 있는데 반하여, GaN-based FET는 그러한 연계가 밀접하지 않다. 즉, 소자의 intrinsic 특성보다는 extrinsic 특성, 가령 contact 저항, 등에 아직도 좌우되고 있다는 것을 의미한다. 한가지 예로서 AlGaIn/GaN HFET의 2DEG 전자이동도는 conduction band discontinuity ΔE_c 에 비례하여 증가하지만 Al composition이 0.15 정도에서 최적의 조건이 형성된다. 그러나 전력특성은 Al의 composition이 증가함에 따

라 계속적으로 개선되는 것을 관찰할 수 있는데 [32]. 이러한 문제점은 Al composition이 높은 경우 contact 저항등 최적공정이 아직 형성되지 않았기 때문이다.

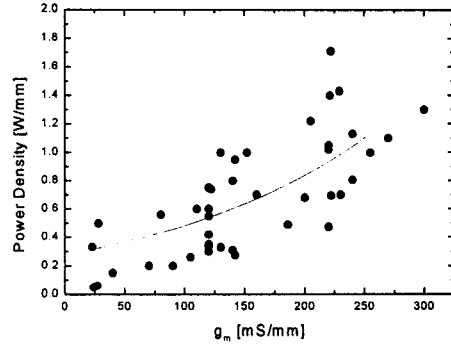


그림 8. Power density vs. g_m in GaN-based HFET.

따라서 GaN-based FET는 결정기술을 비롯하여 공정기술에 대한 많은 연구가 아직 필요로 하고 있는 분야라고 판단된다.

주로 고전력 효율을 갖는 소자나 고온동작에 유리한 특성을 갖는 GaN-based FET의 개발시 우선적으로 고려되어야 하는 점은 소자의 열특성을 들 수 있다. 특히 GaN의 경우에는 homo-epitaxy가 현재로서는 불가능하기 때문에 sapphire 나 SiC 기판이 주로 사용되고 있다. Sapphire의 경우에는 thermal conductivity가 SiC에 비하여 불량하기 때문에 열특성이 매우 불량하여 고효율 소자로의 한계를 갖고 있다. 가령 동일한 소자를 sapphire와 SiC 기판에 제작할 경우 sapphire 기판위에 제작된 소자의 thermal resistance는 약 25 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}^2/\text{W}$ 로서 SiC의 경우에 비하여 약 13 배 정도 큰 값을 갖는 것으로 발표된 바 있다 [33]. 그러나 SiC 기판의 경우에는 sapphire 기판에 비하여 전기적으로 conducting 하기 때문에 높은 parasitic에 의하여 초고주파 특성이 저해되고 있다. 그러나 최근 SI(semi-insulating) SiC가 개발됨에 따라 초고주파 고전력 소자의 경우에는 SiC 기판이 주된 흐름이 될 것으로 본다. 그러나, SiC 기판의 경우에는 높은 가격으로 인한 한계가 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 새로운 시도가 지속적으로 연구되고 있으며, 현재 HVPE 를 사용한 GaN self-supporting thick film(> 100 μm) 이나 flip-chip bonding 구조를 이

용하는 방법이 유망한 것으로 판단된다[34].

V. 결 론

표 3에서 보듯이 GaN를 기초로 한 전자소자의 응용가능성은 군사기술의 민영화, 또한 첨단기술의 집적화 및 system integration의 개념이 넓어짐에 따라 점차 넓어지고 있다. 그 중에서도 우선적으로 가시화될 영역으로서 고효율, 초고주파, 고전력소자 및 이를 이용한 집적회로기술을 들 수 있으며, 이러한 기술은 차세대 정보통신 기반기술로서 대두될 가능성은 무궁하다고 할 수 있겠다. 지난 20년간 선진국의 반도체 기술을 따라가고자 노력했던, 그래서 일부분 야에서는 선두에 나선 우리의 입장으로 볼 때, 상대적으로 아직 전세계적으로 시작단계인 GaN-based 소자 분야는 관련 시장의 동향으로 미루어 집중적이며 효율적인 연구체제가 필요한 분야라고 생각된다.

High Temperature	High-Frequency Power
<ul style="list-style-type: none"> ● Power supplies ● Rail-bound vehicles ● Reactive power compensation ● High-voltage DC transmission ● Electronic actuators ● Solid-state lamp ballasts 	<ul style="list-style-type: none"> combustion control ● UV spectroscopy, dosimetry, astronomy, light emission ● Incoming ballistic missile detection ● Air quality monitoring equipment ● Full-color displays ● Indicator applications ● High density optical storage

참 고 문 헌

표 3. Examples of potential applications that can be satisfied by GaN devices.

High Temperature	High-Frequency Power
<ul style="list-style-type: none"> ● Turbine engine monitors/controls ● Jet engine ignition systems ● Automotive engine sensors ● Industrial process measurement instrumentation ● Nuclear power Instrumentation 	<ul style="list-style-type: none"> ● Solid-state broadcast and TV systems ● Solid-state phased array radar systems ● Electronic counter-measure system ● High-frequency power supplies ● Satellite communications ● RF and microwave transmitters ● High-temperature UV photodetectors ● UHF TV broadcast systems
High Power	High UV-Blue Emission/ Detection Efficiency
<ul style="list-style-type: none"> ● Surge suppressors ● Industrial motor drives 	<ul style="list-style-type: none"> ● Color sensing ● Photodetection ● Flame detectors for

- [1] H. Amano, H. Amano, N. Sawaki, and I. Akasaki, Appl. Phys. Lett., vol. 48, pp. 353-354, 1986.
- [2] S. Nakamura, T. Mukhai, and M. Senoh, J. Appl. Phys., vol. 71, pp. 5543-5549, 1992.
- [3] S. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 30, pp. L1705-L1707, 1991.
- [4] S. Nakamura, T. Mukhai, and M. Senoh, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 31, pp. 2883-2888, 1992.
- [5] M. A. Khan, R. A. Scogman, R. G. Schulze, and M. Gershenson, Appl. Phys. Lett., vol. 43, pp. 492-494, 1983.
- [6] S. Nakamura, T. Mukhai, and M. Senoh, J. Appl. Phys., vol. 71, pp. 5543-5549, 1992.
- [7] D. K. Wickenden and W. A. Bryden, in Proc. Int. Conf. SiC and Related Materials, Washington, DC, Nov. 1993.
- [8] L. B. Rowland, K. Doverspike, D. K. Gaskill, and J. A. Freitas, Jr., Mat. Res. Soc. Symp. Proc., San Francisco, CA, Apr. 1994.
- [9] M. A. Khan et al., Appl. Phys. Lett., vol. 58, pp. 526-527, 1991.
- [10] I. Akasaki and H. Amano, Mat. Res. Soc.

- Symp. Proc., vol. 242, p. 383, 1991.
- [11] J. Kolinik et al., *J. Appl. Phys.*, vol. 78, pp. 1033-1038, 1995.
- [12] M. A. Littlejohn, J. R. Hauser, and T. H. Glisson, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 26, pp. 625-627, 1975.
- [13] B. Gelmont, K. Kim, and M. Shur, *J. Appl. Phys.*, vol. 74, pp. 1818-1821, 1993.
- [14] M. Shur, B. Gelmont, and M. A. Khan, *J. Electron. Mater.*, vol. 21, pp. 777-785, 1996.
- [15] R. Gaska, J. W. Yang, A. D. Bykhovski, M. S. Shur, V. V. Kaminski and S. M. Soloviov, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, pp. 64-66, 1998.
- [16] J. I. Pankove et al., *IEDM Tech. Dig.*, pp. 389-392, 1994.
- [17] S. N. Mohammad and H. Morkoc, *J. Appl. Phys.*, vol. 63, pp. 1614-1627, 1988.
- [18] Reports for the ONR MURI for High Power, Linear, Broadband Solid State Amplifiers.
- [19] M. A. Khan, Q. Chen, J. Yang, M. Z. Anwar, and M. Blasingame, *IEDM96*, pp. 27-30, 1996.
- [20] R. Gaska, Q. Chen, J. Yang, A. Osinsky, M. A. Khan, and M. S. Shur, *IEEE Electron Dev. Lett.*, vol. 18, pp. 492-494, 1997.
- [21] Q. Chen, J. W. Yang, R. Gaska, M. A. Khan, M. S. Shur, G. J. Sullivan, A. L. Sailor, J. A. Higgings, A. T. Ping, and I. Adesida, *IEEE Electron Dev. Lett.*, vol. 19, pp. 44-46.
- [22] M. A. Khan, J. N. Kuznia, A. R. Bhattarai, and D. T. Olson, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pp. 1786-1787, 1993.
- [23] M. E. Lin et al., *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, pp. 1003-1005, 1994.
- [24] M. E. Lin, F. Y. Huang, and H. Morkoc, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, pp. 2557-2559, 1994.
- [25] Y. Wu et al., *Topical Workshop on III-V Nitrides Proc.*, Nagoya, Japan, 1995.
- [26] Z. Fan et al., *Appl. Phys. Lett.*, vol. to be published.
- [27] R. J. Shul et al., *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, pp. 1761-1763, 1995.
- [28] A. H. Khan et al., in *Diamond, SiC, and Nitride Wide Bandgap Semiconductors*, C. H. Carter, Jr., G. Gildenblat, S. Nakamura, and R. J. Nemanich, Eds. Pittsburgh, PA : Materials Res. Soc., 1994.
- [29] Y. F. Wu, B. P. Keller, S. Keller, D. Kapolnek, S. P. Denbaars, and U. K. Mishra, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 17, pp. 455-457, 1996.
- [30] O. Akatas, Z. F. Fan, A. Botchkarev, S. N. Mohammad, M. Roth, T. Jenkins, L. Kehias, and H. Morkoc, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 18, pp. 293-295, 1997.
- [31] Y. F. Wu, S. Keller, P. Kozodoy, B. P. Keller, P. Parikh, D. Kapolnek, S. P. Denbaars, and U. K. Mishra, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 18, pp. 290-292, 1997.
- [32] Y. F. Wu, B. P. Keller, S. Keller, N. X. Nguyen, M. Le, C. Nguyen, T. J. Jenkins, L. T. Kehias, S. P. Denbaars, and U. K. Mishra, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 18, pp. 438-440, 1997.
- [33] R. Gaska, J. Yang, A. Osinsky, M. A. Khan and M. S. Shur, *IEDM97*, pp. 565-568, 1997.
- [34] B. J. Thibeault, B. P. Keller, Y. F. Wu, P. Fini, U. K. Mishra, C. Nguyen, N. X. Nguyen, and M. Le, *IEDM97*, pp. 569-572, 1997.