

# 5G 이동통신을 위한 GaN RF 전자소자 및 집적회로 기술 동향

## Technical Trends in GaN RF Electronic Device and Integrated Circuits for 5G Mobile Telecommunication

이종민 (J.M. Lee, leejongmin@etri.re.kr)

RF/전력부품연구실 책임연구원

민병규 (B.G. Min, minbg@etri.re.kr)

RF/전력부품연구실 책임연구원

장우진 (W.J. Chang, wjchang@etri.re.kr)

RF/전력부품연구실 책임연구원

지흥구 (H.G. Ji, hkji@etri.re.kr)

RF/전력부품연구실 책임연구원/기술총괄

조규준 (K.J. Cho, kjcho12@etri.re.kr)

RF/전력부품연구실 선임연구원

강동민 (D.M. Kang, kdm1597@etri.re.kr)

RF/전력부품연구실 책임연구원/실장

### ABSTRACT

As the 5G service market is expected to grow rapidly, the development of high-power, high-efficiency power amplifiers for the 5G communication infrastructure is indispensable. Gallium nitride (GaN) is attracting great interest as a key device in power devices and integrated circuits due to its wide bandgap, high carrier concentration, high electron mobility, and high-power saturation characteristics. In this study, we investigate the technology trends of Ka-band GaN radio frequency (RF) power devices and integrated circuits for operation in the millimeter-wave band of recent 5G mobile communication services. We review the characteristics of GaN RF high electron mobility transistor (HEMT) devices to implement power amplifiers operating at frequencies around 28 GHz and compare the technology of foreign companies with the device characteristics currently developed by the Electronics and Telecommunication Research Institute (ETRI). In addition, the characteristics of Ka-band GaN monolithic microwave integrated circuit (MMIC) power amplifiers manufactured using various GaN HEMT device technologies are reviewed by comparing characteristics such as frequency band, output power, and output power density of integrated circuits. In addition, by comparing the performance of the power amplifier developed by ETRI, the current status and future direction of domestic GaN power devices and integrated circuit technology will be discussed.

**KEYWORDS** GaN RF power device, GaN MMIC power amplifier, Ka-band, HEMT

\* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2021.J.360306>

\* 본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기술진흥센터[과제번호: B0132-15-1006, Development of High Efficiency GaN-based Key Components and Modules for Base and Mobile Stations], 정보통신기획평가원[과제번호: 2019-0-00068, 미세공정 화합물 반도체 기반 밀리미터파 대역 5G 부품기술 개발] 지원을 받아 수행된 연구임.



본 저작물은 공공누리 제4유형

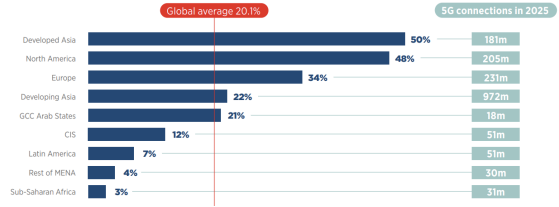
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2021 한국전자통신연구원

## 1. 서론

2019년 4월 3일 대한민국은 세계 최초로 5G 이동통신 상용화를 개시하였으며, 이후 5G 이동통신 가입자는 꾸준히 증가하여 2021년 2월 1,300만 명을 돌파하였다[1]. 앞으로 5G 세계시장은 그림 1에서 나타낸 것처럼 연평균 성장률(CAGR) 43.3%로 예측되며, 네트워크 장비 및 단말, 첨단 장치·보안, 융합 서비스 등 주요 연관 산업 분야에서 2026년 총 1,161조 원 규모의 시장이 창출될 것으로 전망된다[2]. 그림 2[3]에서 알 수 있듯이 2025년 세계 인구의 약 18억 명(평균 20.1%)이 5G 서비스를 사용할 것으로 예상되며, 아시아와 북미, 유럽이 시장 성장을 이끌 것으로 예측된다. 코로나19 영향으로 주요국의 5G망 구축과 서비스 확산이 위축되는 부정적 측면이 있지만, 재택근무와 원격·온라인 활동 증가 등으로 5G 투자가 촉진될 가능성도 큰 편으로 기대되고 있다[3].

5G 서비스는 초고속, 초저지연, 초연결이라는 핵심 성능을 제시하고, 기존 사람 간 이동통신(음성, 데이터)을 넘어 모든 사물을 연결하고 산업의 디지털 혁신을 촉발하는 게임 체인저라는 실현 목표를 가지고 시작하였지만[4], 아직 목표성능에는 미치지 못하고 있다. 5G 이동통신 가입자의 증가에 따라 데이터 통신량의 급격한 증가가 발생하고 있으며, 5G 가입자당 트래픽은 2만6,056MB



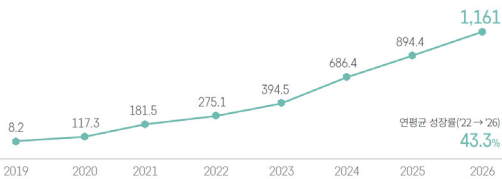
출처 GSMA, "The Mobile Economy 2020," © GSM Association 1999-2019.

그림 2 세계 5G 가입자 전망[3]

로 LTE 가입자당 트래픽의 세 배 가까이 되고 있다 [5]. 또한, 소비자들은 1년 전보다 3배가량 기지국 수가 증가했으나 여전히 수도권, 고속도로, 야외 중심으로 설치되어 건물 내외를 오고 가는 실생활에서 ‘끊김 현상’ 피해가 지속되고 있다. 5G 이동통신 서비스에 대한 만족도는 30% 안팎에 그치고 있다[6]. 현재 5G 이동통신 서비스가 만족할만한 경험을 제공하지 못하는 원인은 중계기의 부족에 의한 커버리지의 부족도 있지만, 현재 사용주파수 대역이 6GHz 이하로 제한되어 밀리미터파 대역을 사용하지 못하기 때문이다. 5G 표준은 빠른 속도와 새로운 서비스가 가능하도록, 4G보다 더 넓은 주파수 대역을 정의하고 있다. 3.5GHz 등 6GHz 이하 주파수(서브6) 대역은 물론 28GHz와 39GHz 등 밀리미터파(mmWave)로 불리는 초고주파 대까지 함께 사용하는 것을 고려하고 있다. 이동통신 속도는 사용하는 주파수의 폭이 얼마나 넓은지에 영향을 받는다. 저주파 영역은 다른 무선통신과 함께 사용해야 하므로 5G 이동통신에만 넓은 대역폭을 주기 어렵다. 밀리미터파는 사용이 거의 없어 넓은 대역폭을 이동통신에 할당할 수 있으므로 두 개의 주파수 대역을 동시에 사용할 수 있을 때 진정한 5G가 가능하다는 이유도 그래서다. 밀리미터파 대역은 통상 30~300GHz 사이의 주파수 대역을 일컫는 말로 이 대역의 파장이 1~10mm 정도 되기

연차별 세계시장 전망('19~'26)












(단위: 조원)



출처 과학기술정보통신부, "혁신성장 실현을 위한 5G+전략," 2019.

그림 1 연차별 5G 세계시장 전망[2]

때문에 붙여진 이름이다. 밀리미터파의 경우, LTE와 그 전 이동통신 시스템에서 주로 활용하던 대역인 700MHz~2.6GHz 대역의 낮은 주파수 대역에서의 신호 전파 특성과는 다른 특성이 있어서 이에 대한 기술적인 고려가 필요하다. 무선통신 시스템에서 송신기와 수신기 사이의 전파 손실에는 자유공간 경로 손실, 대기 감쇠 및 강우 감쇠, 산림에 의한 손실, 산란과 회절, 실내외 투과 손실 등 여러 전파 손실을 고려해야 한다. 밀리미터파 대역의 이러한 특성을 극복하려는 방법 중 가장 중요한 기술 중 하나가 빔 포밍(Beamforming) 기술이며, 짧은 커버리지 단점을 보완하는 기술이 5G 스몰셀(Small Cell)이다[7]. 특히 넓은 대역을 커버하는 서브6대역의 기지국과 달리 5G가 요구하는 다양한 서비스를 만족시킬 수 있는 28GHz 대역의 밀리미터파 시스템은 스몰셀 기반의 다수의 기지국으로 운영돼야 하므로 밀리미터파 대역 통신서비스를 위한 GaN RF 시장은 매우 유망하다. 5G 서비스는 2035년까지 밀리미터파 대역까지 확장되어 세계적으로 12조 달러의 경제적 가치를 창출할 것으로 예측된다. 최근 2~3년 사이 밀리미터파 주파수 대역을 사용하는 5G 무선 이동통신 장비 시장은 전 세계적으로 많은 주목을 받는 시장이라고 할 수 있으며, 향후 5년 동안 매년 50% 이상 성장할 것으로 예상된다. 최근 발표된 전문시장조사 기관인 Yole에서 발표된 보고서[8]에 따르면, GaN RF 소자 시장은 통신 인프라(Telecom Infrastructure), 군수산업(Military), 케이블 통신망(Wired Broadband), 통신위성(SATCOM), 기타(Commercial Radar and Avionics, RF Energy 등)로 분류하고 있으며, GaN RF 소자의 전 세계시장은 연평균 성장률 12%로 2025년 대략 20억 달러의 전체 시장 규모로 예측된다. GaN RF 시장은 무선통신 분야와 국방 분야의 시장이 가장 크며 통신용 전력증폭기(Power Amplifier) 수요가 클

	<1 GHz	3GHz	4GHz	5 GHz	24-28 GHz	37-40 GHz
	600 MHz	3.5GHz		5.9-7.1GHz	27.5-28.35GHz	37-37.6GHz
	600 MHz	3.5GHz		5.9-7.1GHz	27.5-28.35GHz	37.6-40GHz
	700 MHz	3.4-3.8GHz		5.9-6.4GHz	24.5-27.5GHz	37-37.6GHz
		3.4-3.8GHz			26, 28GHz	37-40GHz
		3.4-3.7GHz			26, 28GHz	
		3.46-3.8GHz			26GHz	
		3.6-3.8GHz				
		3.3-3.6GHz			24.5-27.5GHz	37.5-42.5GHz
		3.4-3.7GHz	4.8-5GHz		26.5-29.5GHz	
		3.6-4.2GHz			27.5-29.5GHz	
		3.4-3.7GHz	4.4-4.9GHz		28 GHz	39GHz

출처 N. Hussaina et al., "Metasurface-based low-profile wideband circularly polarized patch antenna for 5G millimeter-wave systems," IEEE Access, vol. 8, 2021, pp. 22127-22135, CC BY 4.0.

그림 3 세계 5G 이동통신 주파수 대역[9]

것으로 예측되는 무선통신 분야 시장 규모는 2025년 7.31억 달러로 연평균 15% 성장할 것으로 기대되고 있다.

급성장이 예상되는 밀리미터파 대역 5G 무선 이동통신 서비스를 세계 주요국에서는 그림 3과 같이 5G 이동통신을 위한 주파수 대역을 할당하였다. 3~4GHz 주파수 대역과 밀리미터파 대역인 24~28GHz 주파수 대역이 할당되었다[9]. 국내에서도 2021년 하반기부터 밀리미터파 망 구축이 예정되어 있으며, 우리나라의 경우 5G 주파수를 3.5GHz는 총 280MHz를 28GHz는 총 2,400MHz를 분배했으며, 미국의 버라이즌과 일본의 통신사업자는 최근 밀리미터파 대역을 동시에 활용하는 5G 서비스를 시작하였다[10,11]. 현재 5G 밀리미터파 기지국용 GaN 기반 공정기술 및 전력증폭기 부품은 해외 선진사들이 독점하고 있는 기술 분야로 그 수요가 폭발적으로 예상되어 국내에서 GaN 공정 및 전력증폭기 제작 기술 확보가 반드시 요구된다. 특히 전력증폭기는 기지국 전체의 효율과 출력에 관여하는 핵심부품임으로 고효율, 고�출력의 GaN 공정을 국산화 개발하는 것이 매우 중요하다. 본 고에서는 Ka-대역 GaN RF 전력증폭 소자 및

MMIC 전력증폭기에 대한 국내의 기술 동향을 알아본다. Ka-대역 GaN RF 전력증폭 소자의 게이트 길이 스케일링, 채널형성 구조 및 전력밀도 특성을 살펴보고, GaN RF HEMT소자 기술을 활용하여 개발된 MMIC 전력증폭기의 출력전력 및 전력밀도 성능을 중심으로 알아본다. 아울러, Ka-대역 전력증폭 소자 및 MMIC 전력증폭기의 국내기술 수준과 해외 기술 동향을 통한 시사점을 다룬다.

## II. 5G 이동통신을 위한 GaN RF 전력 소자 및 집적회로 기술

### 1. Ka-대역 집적회로를 위한 GaN HEMT 소자 기술

이 절에서는 Ka-대역 GaN 집적회로를 위한 GaN HEMT 소자 기술을 살펴본다. ETRI에서 자체 개발한 소자 기술에 관해 설명하고 세계 선진업체의 파운더리(Foundry)에서 제공하는 소자 특성과 비교하였다. GaN 반도체 소재는 경쟁기술인 Si, GaAs 및 SiC 소재 등과 비교하여 에너지밴드 갭이 넓고 전자이동도가 높으므로 전력 소자로 적용하기에 유리한 장점들이 있다. 특히 전력 소자의 특성을 결정하는 밴드 갭, 2DEG 밀도, 항복전압 및 전자이동도에서 우수한 특성을 보이는 GaN은 소재적 측면에서 Si보다 전력 소자 분야의 성능지수가 1,400배나 우수한 특성을 가진다. GaN 반도체 소자는 크게 광소자와 전자소자로 분류할 수 있고, 전자소자는 다시 통신용 고주파 소자와 전력 전자용 스위칭 소자로 분류되고 있으며, 본 고에서는 5G 통신의 밀리미터파 동작을 위한 통신용 전력증폭기에 사용되는 GaN 고주파 전력 소자의 특성을 살펴본다. 광대역, 고출력 특성을 가진 통신용 고주파 GaN 전력 소자는 이동통신용 기지국, 중계기, 위성통신, 선박 및 군용 레이더, 테러 방지

용 전파 교란기 등의 송수신 장비의 전력증폭기 부품으로 활용되고 있으며, GaN 소자는 광대역 주파수에 적용할 수 있고 높은 출력을 나타내는 특성이 있다.

GaN 고주파 전력 소자는 통신장비 시스템 전체의 성능과 비용을 좌우하는 핵심부품으로 전력증폭기 부품 원가의 20~50%를 차지하고 있으며, GaN 고주파 전력 소자의 성능을 결정하는 재료 및 화합물 반도체 기술은 고난도의 기술력이 있어야 한다. 현재 우리나라는 미국, 일본, 유럽의 선진국으로부터 GaN 고주파 전력 소자를 전량 수입하여 사용하고 있다. 특히 통신용 전력증폭기에는 Si, GaAs 전력 소자를 사용하였으나 최근 GaN 전력 소자로 대체되는 추세이며, 우리나라도 이동통신 기지국용 LDMOS 전력증폭기에서 점차 GaN 전력 소자를 사용하는 전력증폭기로 대체되고 있다. 또한 능동형 위상배열레이더에 사용되는 전력증폭기 소자도 기존 GaAs 전력 소자에서 GaN 전력 소자로 대체되고 있다. GaN 전력 소자는 GaAs 및 LDMOS 반도체 소자보다 주파수 특성, 입/출력 정합, 선형성 및 전력 효율 등의 특성이 우수하다. 이동통신 전파 차단 및 군 통신장비 등에 적용되고 있는 GaN 전력 소자 산업 규모는 이동통신 분야에서 새로운 서비스가 시작되거나, 기존의 서비스를 확장하는 시기, 군 통신장비의 개발 및 교체 주기, 테러나 전쟁 위협 등에 따른 전파 차단 수요 변화에 따라 결정된다. 이와 같은 수요요인에 의해 통신용 고주파 전력증폭기 시장은 지속해서 증가하고 있으며, 따라서 차세대 통신 소자인 GaN 전력 소자 산업 또한 높은 성장성을 나타내고 있다. 또한, GaN 전력 소자는 고부가가치 상품으로 다양한 분야에 적용될 가능성이 커 국내 시장뿐만 아니라 세계시장을 목표로 각국에서는 GaN 전력 소자 연구개발이 활발하게 이뤄지고 있다. GaN 전력 소자

기술은 선박용 또는 군수용 레이더, 미사일 등의 송수신기용 전력증폭기로도 활용도가 높은 전략적 품목으로 선진국으로부터 전체 기술 도입이 매우 어려우며, 높은 주파수 혹은 고출력 GaN RF 제품은 수출통제 품목이므로 국내 소자 공정기술을 자체 개발 확립하는 개발 전략을 가져야 한다.

한국전자통신연구원에서는 28GHz 대역 GaN 전력 소자 및 집적회로를 개발하기 위한 0.18 $\mu$ m D-mode GaN HEMT 소자를 개발하였다. 한국전자통신연구원의 자체 화합물 생산시설을 이용하여 제작되었으며 필요한 핵심 공정인 소스 및 드레인 영역에 오믹(Ohmic) 금속을 증착하고 열처리하는 기술, 이온 임플란트 기술, PECVD에 의한 절연막 증착 기술, 절연막 에칭 기술, 전자선 리소그라피(E-beam Lithography)에 의한 게이트 형성 기술, 배선 금속 증착 기술, 후면 비아홀(Backside Via)

형성기술 등을 자체적으로 확보하였다. 그림 4는 ETRI에서 개발한 0.18 $\mu$ m GaN RF HEMT 및 집적회로를 제작하기 위한 공정 순서를 나타낸 것이다. 소자 제작은 제일 먼저 오믹 전극 증착을 한 후에 이온 임플란트를 하여 소자를 분리한다. 이후 소자의 게이트 구조를 정의하고 게이트 전극을 증착한다. 게이트는 삼층 포토리지스트를 이용하여 T-형 게이트 구조를 형성시킨다. 소자의 절연막 증착을 한 후에 배선을 위한 금속과 에어브릿지 금속을 형성한다. GaN HEMT 소자의 경우 높은 전류 밀도와 대전력 구동을 하게 되므로 소자의 접지와 열 분산을 위해서 소스 단을 연결하는 후면 비아홀 형성 공정이 필수적이다. ETRI에서는 자체 개발한 후면 비아홀 공정을 이용하여 안정적으로 100 $\mu$ m 두께를 갖는 웨이퍼에 재현성 있는 후면 비아홀을 형성시키는 기술을 확보하였으며 수동소자인 저항, 커패시터, 인덕터 등의 제작 공정을 능동소자 공정과 동시에 진행하여 집적회로 형성을 위한 4인치 웨이퍼 일괄 공정을 개발하였다. 그림 5는 제작된 GaN RF HEMT 소자의 개략도를 나타낸 것이며, 그림 6은 GaN HEMT 소자의 0.18 $\mu$ m 게이트 구조를 나타낸 것이다. 28GHz에서 동작하는 전력증폭기를 제작하기 위해서는 최소한 집적회로의 동작 주파수보다 3배 이상의 소자 고속 특성이 요구되며 이를 위해서는 GaN HEMT 소자

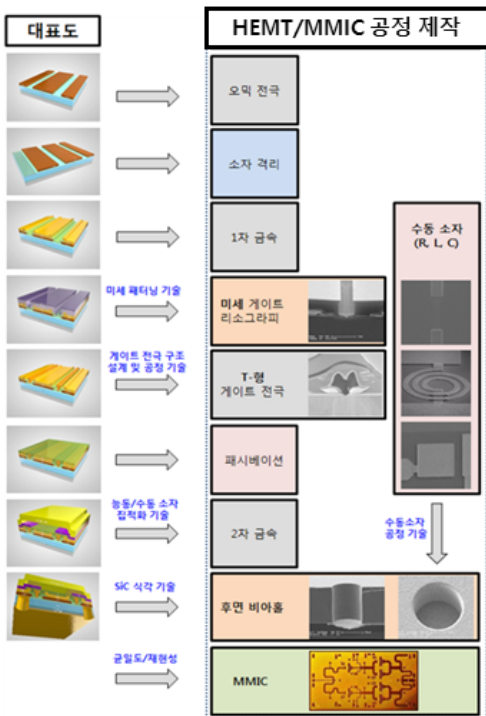


그림 4 GaN HEMT 전력 소자 및 집적회로 공정 순서

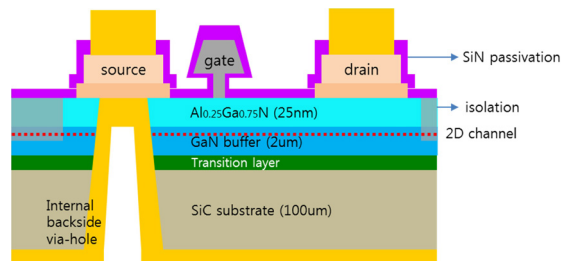


그림 5 ETRI 0.18 $\mu$ m GaN HEMT 소자 구조



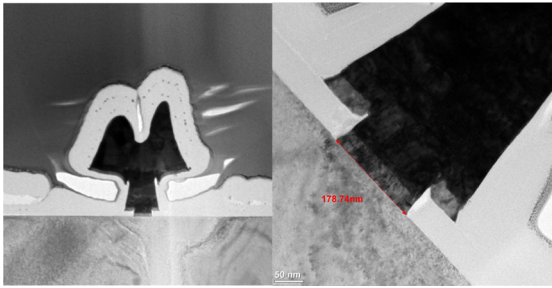


그림 6 0.18 $\mu\text{m}$  게이트 길이를 갖는 GaN HEMT 게이트 구조

의 게이트의 길이를 매우 짧게 만들어야 한다. 보통 반도체 식각 공정에서 사용하는 스테퍼의 경우 0.18 $\mu\text{m}$ 의 게이트 미세패턴을 형성할 수 없으므로 전자선을 이용한 전자선 리소그래피를 사용하여 미세 게이트 구조를 형성할 수 있다. 국내에서는 0.18 $\mu\text{m}$  GaN HEMT 소자 및 MMIC 제작 일괄 공정을 확보한 곳은 ETRI가 유일하며 제작된 4인치 웨이퍼의 단위 소자 특성은 최대 트랜스컨덕턴스 270mS/mm이며, 차단 주파수 45GHz, 최대발전주파수 110GHz를 얻었다.

세계 동향을 살펴보면 GaN RF 전력 소자 기술을 보유하고 있는 업체 및 연구소는 주로 미국과 유럽에 있다. 대표적인 업체로는 미국에는 Qorvo, Wolfspeed가 있으며, 유럽에는 UMS, OMMIC, IAF가 있으며, 일본의 Mistubishi, 대만의 Win Semiconductor 역시 기술을 가지고 있다. 본 고에서는 GaN foundry 서비스를 제공하는 업체들이 제공하는 GaN RF HEMT 소자의 특징을 살펴본다. Qorvo[12]의 5G 이동통신을 위한 GaN 기술 로드맵을 살펴보면 6GHz 이하의 더 낮은 주파수에서는 더 높은 전압 구동이 가능한 0.25 $\mu\text{m}$  기술(QGaN25HV)이 적용되며 48V 구동이 가능하고 높은 이득과 전력 효율로 서브6 주파수 대역의 5G 기지국에 적합하다. 밀리미터파 대역을 위해서는 0.15 $\mu\text{m}$  기술(QGaN15)이 적용될 수 있으며, 4W/

mm의 전력 특성을 가진다. Wolfspeed[13]의 GaN RF 소자 기술은 모두 5종이 있으며 각각 게이트 길이와 구동 전압에 따라서 분류될 수 있다. 게이트 길이 0.25 $\mu\text{m}$ 인 G28V4와 G40V4 기술은 동작 전압이 각각 28V, 40V의 차이와 전력밀도의 차이가 있다. 밀리미터파 응용을 위해서 0.15 $\mu\text{m}$  게이트 길이를 가지는 G28V5 기술을 가지고 있으며, 동작전압 28V, 전력밀도 3.75W/mm의 특성을 보인다. UMS[14]는 게이트 길이 0.25 $\mu\text{m}$ 와 0.15 $\mu\text{m}$ 의 두 가지 GaN 공정을 보유하고 있으며, 밀리미터파 응용을 위한 0.15 $\mu\text{m}$  게이트 길이를 가지는 GH15 공정은 동작전압은 20V이며, 기판 두께는 70 $\mu\text{m}$ 이며 전력밀도는 3.5W/mm의 특징을 가진다. OMMIC[15] GaN RF HEMT 소자의 특징은 다른 업체와 달리 기판을 Si를 사용한다는 점이다. SiC와 비교해 가격이 더 저렴한 웨이퍼를 사용한다는 장점이 있지만, 동작전압이 낮고 3인치 공정을 사용하고 있다. 높은 주파수 특성을 확보하기 위해서 게이트 길이 0.1 $\mu\text{m}$ 인 D01GH 공정을 사용한 소자는 동작전압은 12V이며, 전력밀도는 3.5W/mm이다. 또한 60nm의 게이트 길이를 가지는 D006GH 공정을 개발하고 있으며 소자의 차단 주파수 특성을 150GHz까지 향상해 더 높은 주파수 대역에 대응할 수 있도록 준비하고 있다. Win Semiconductor[16]의 GaN 소자 공정은 세 가지이며 0.15 $\mu\text{m}$  게이트 길이를 가지는 NP15 공정은 동작전압은 20V이며, 기판 두께는 100 $\mu\text{m}$ 이고 90V 이상의 항복전압 특성을 보여주고 있다. 대표적인 GaN RF 소자 공정을 보유한 업체의 소자 특성을 표 1에 정리하였으며 ETRI에서 개발한 0.18 $\mu\text{m}$  GaN HEMT 소자 특성과 비교하였다. ETRI 소자의 특성은 동작 전압과 전력밀도 특성이 세계 최고 수준에는 조금 부족한 특성을 보이고 있으며 성능 개선과 양산화를 위한 추가적인 연구를 진행하고 있다.

표 1 Ka-대역 GaN MMIC 전력증폭기 제작을 위한 소자 기술

Company	Qorvo [12]	Wolfspeed [13]	UMS [14]	Ommic [15]	Win Semi. [16]	ETRI
Process	QGaN15	G28V5	GH15	D01GH	NP15	GaN
Gate Length( $\mu\text{m}$ )	0.15	0.15	0.15	0.1	0.15	0.18
Bias(V)	28	28	20	12	20	15
BVdg(V)	70	70	70	40	70	60
Density(W/mm)	3.5	3.5	3.5	3	3	2.5
Max Operating Frequency(GHz)	40	40	40	50	40	30
Efficiency(%)	N/A	55	40@30GHz	45@40GHz	35@30GHz	23@30GHz
Wafer Size(inch)	4	4	4	3	4	4
Substrate	SiC	SiC	SiC	Si	SiC	SiC

## 2. Ka-대역 GaN 집적회로 기술

이 절에서는 28GHz 주파수를 포함하는 Ka-대역 GaN 집적회로 기술 동향에 대하여 살펴보면, 특히 다양한 업체의 GaN HEMT 소자를 이용한 전력증폭기의 성능과 특성을 비교해 본다. 전력증폭기는 5G 이동통신 및 레이더 시스템의 핵심 단위 부품으로써 고객이나 시장의 요구에 따라 5G 이동통신을 위한 고 선형, 고효율의 기지국용 전력증폭기의 개발이 필요하다. 5G 이동통신을 위한 전력증폭기는 고출력뿐만 아니라 높은 전송품질(고 선형성)과 낮은 전력 소모(고효율성)의 특성을 가져야 한다. 높은 효율과 우수한 선형성의 전력증폭기 기술은 친환경 기지국 구현에 있어 필수적이며 차세대 이동통신 기지국의 소형화와 소형셀에 의한 기지국 수 증가로 시내 건물 주변에도 많은 기지국이 설치될 것으로 예상되므로 GaN 전력증폭기 및 관련 집적회로 기술 시장은 앞으로 매우 유망할 것이다. GaN 트랜지스터 기반 고출력 전력증폭기는 앞 절에서 설명한 것처럼 GaN의 물질 특성의 우수성에 의해 전력증폭기로 사용되었을 때 큰 장점이 있다. Qorvo에서 발표된 자료[17]에 따르면 0.15 $\mu\text{m}$  GaN HEMT 소자를 사용한 전

력증폭기와 대응되는 출력 특성을 갖는 GaAs 기반의 전력증폭기를 비교하였을 때 GaN 기반 전력증폭기의 전력밀도는 4배 정도 크며 제작된 칩의 크기는 82% 감소할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 즉, GaN RF HEMT 전력증폭기의 우수한 특성은 시스템의 소형화와 쉬운 집적화를 가능하게 해 준다. 현재 GaN 전력 소자를 기반으로 하는 고출력 전력증폭기에 대한 국내외의 수요 업체의 관심이 집중되고 있으며, 주요 기술 및 시장분석 기관에서는 향후 2~3년 사이에 기존 GaAs, Si 기반의

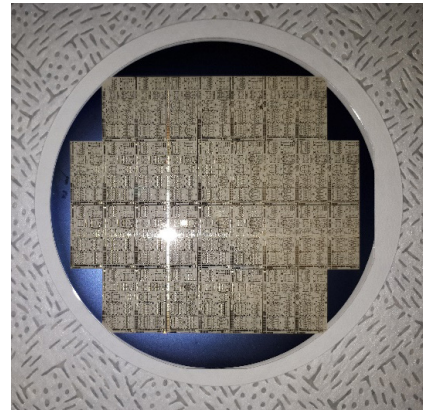


그림 7 28GHz 대역 집적회로 제작 웨이퍼

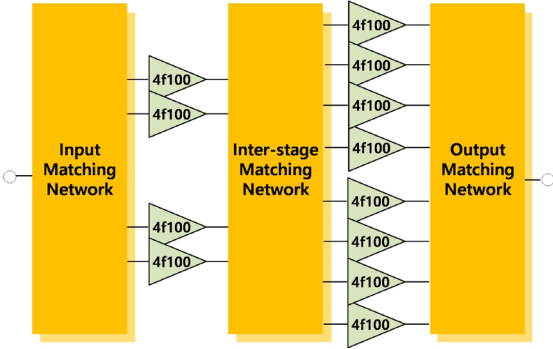


그림 8 28GHz 전력증폭기 회로 구성도

기술을 전면적으로 대체할 것으로 예상된다. 차세대 5G 이동통신 분야의 급격한 시장 확대를 고려할 때 GaN 기반 반도체 고효율 증폭기 기술 개발의 선진화를 달성하고 기반 기술을 확보하는 것이 미래 핵심기술이 될 것이다. 이를 위해, ETRI에서는 개발된 0.18 $\mu$ m GaN RF HEMT 소자 기술을 활용하여 Ka-대역인 28GHz에서 동작하는 전력증폭기 MMIC를 개발하였다. 제작은 ETRI에서 자체 개발한 GaN HEMT 소자 라이브러리를 이용하였으며 그림 7에 제작된 28GHz 대역 집적회로 제작 4인치 웨이퍼를 보여주고 있다. 능동소자인 GaN HEMT 소자의 모델은 Angelov 모델을 사용하여 파라미터를 추출하였으며, 이득과 출력 특성을 고려하여 최종 단계에 8개의 전력 소자 셀을 병렬로 연결하는 2단 구조의 전력증폭기를 설계하였다. 그림 8에 28GHz 전력증폭기의 간략화된 회로 구성도를 나타내었다. 사용한 전력 소자 셀의 총 게이트 폭은 400 $\mu$ m이며, 따라서 최종 단계의 총 게이트 폭은 3.2mm이다. 제작된 28GHz 전력증폭기 칩 사진을 그림 9에 나타내었으며 측정된 결과는 주파수 대역폭은 26~31GHz이었으며, 최대 6W의 출력전력과 20%의 효율을 얻었다. 전력증폭기의 출력을 최종 단계의 게이트 폭으로 나눈 값을 전력밀도로 정의하여 구해진 전력밀도는 1.9W/mm이다. 국내 자

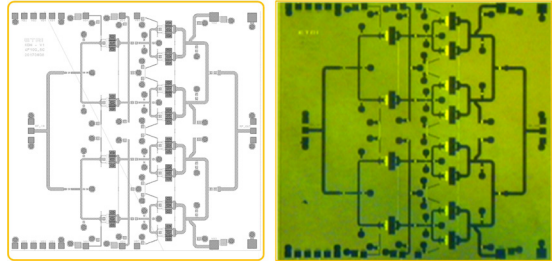


그림 9 28GHz 전력증폭기 칩 사진

체 4인치 GaN 공정을 적용하여 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술을 세계 기술과 비교하기 위해 해외의 GaN HEMT 소자를 이용한 Ka-대역 전력증폭기 개발 동향을 살펴보았다[18-25]. 미국의 Triquint는 RFMD와 합병하여 현재는 Qorvo 사이며, 2013년 발표된 Ka-대역 전력증폭기는 8x50 $\mu$ m 크기의 전력 소자 셀을 사용하였으며 최대 11W의 출력성능과 6.4W 출력성능을 갖는 두 가지 전력증폭기 성능을 발표하였다[18]. 20W 이상의 높은 출력 특성을 갖는 GaN HEMT 전력증폭기 결과는 2017년 Mitsubishi GaN HEMT 공정을 이용한 전력증폭기가 21.7W를 CW에서 구동하였다[20]. 높은 출력전력을 얻기 위해 회로 구조는 이단 구성이며 출력단은 16개의 전력 소자 셀을 병렬로 연결하였다. 각 전력 소자 셀은 10x40 $\mu$ m의 크기를 가지고 있으며, 총 게이트 길이는 6.4mm이므로 전력밀도는 3.4W/mm로 구해진다. GaN/Si 구조를 갖는 특징을 가지고 있는 OMMIC GaN 공정을 이용한 전력증폭기의 특성은 최대 10W의 출력 특성과 30%의 효율, 2.5W/mm의 전력밀도를 보여주고 있다[21]. 제작된 회로의 특징은 전력증폭기뿐만 아니라 저잡음 증폭기와 스위치를 하나의 집적회로로 구현하여 송수신 집적회로를 구현했다는 점이다. 전력증폭기는 송신 단에서 저잡음 증폭기는 수신단에서 동작하며 SPDT 스위치를 이용하여 하나의 칩으로 통합되어 안테나와 연결될 수 있다



록 하였다. 하나의 칩으로 구성하였을 때 전체 칩 면적을 줄이며, 칩 간 손실을 줄일 수 있는 장점이 있다. 프라운호퍼 연구소의 기술을 이용한 다수의 우수한 GaN 기반 전력증폭기 결과도 발표되었다 [22,25]. 프라운호퍼 GaN 기술은 3인치 웨이퍼 공정을 사용하며 OMMIC와 같이 0.1 $\mu$ m 게이트 길이를 가지는 GaN HEMT 소자 공정과 4인치 웨이퍼를 사용하는 0.15 $\mu$ m 게이트 길이를 가지는 GaN HEMT 소자 공정이 있으며 각각을 이용하는 전력증폭기에 관한 결과가 발표되었다. 웨이퍼의 두께는 모두 70 $\mu$ m이다. UMS에서 제작된 전력증폭기는 9W의 출력전력과 20W의 출력전력을 갖는 두 가지 전력증폭기의 결과가 발표되었다[24]. 전력소자 셀은 6 $\times$ 70 $\mu$ m이며, 동작전압은 22.5V이며, 전력밀도는 3.8W/mm의 우수한 특성을 나타내었다. 기존 낮은 주파수인 X-대역과 Ku-대역 전력증폭기의 특성을 살펴보면 X-대역 전력증폭기의 출력 특성은 3.5~50W의 범위를 나타내었으며, Ku-대역 GaN MMIC 전력증폭기들은 2.5~35.5W 출력

범위를 나타내었다[26]. 제작된 전력증폭기는 앞서 설명한 Ka-대역 전력증폭기와 마찬가지로 주로 Qorvo사, Wolfspeed사, UMS사, OMMIC사와 같은 유럽과 북미의 전문 GaN MMIC 파운더리에서 제작되었다. 즉 기존 GaN MMIC 파운더리 업체들은 X-대역, Ku-대역 전력증폭기뿐만 아니라 Ka-대역 전력증폭기를 위한 소자 기술과 설계 기술이 상당한 수준에 이르렀음을 알 수 있다. 표 2에 여러 업체의 Ka-대역 GaN MMIC 공정 기술(Qorvo, Mitsubishi, OMMIC, IAF, UMS, ETRI)을 이용한 결과들을 정리하였다. 표 2의 Ka-대역 GaN MMIC 전력증폭기들의 출력전력과 주파수 대역 및 효율 등은 설계 목표에 따라 다양하며, 사용하고 있는 GaN HEMT 소자의 게이트 길이는 0.1 $\mu$ m 혹은 0.15 $\mu$ m이다. 전력증폭기의 출력전력을 결정하는 것은 최종 단계에 있는 GaN HEMT 전력 소자의 총 게이트 폭이며 출력전력은 6~21.7W의 범위를 나타내었으며, 전력밀도 값은 대략 1.9~4.1W/mm 값을 나타내고 있다. Ka-대역 GaN MMIC 전력증

표 2 Ka-대역 GaN MMIC 전력증폭기 기술

	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]
Process	Triquint GaN	GaN	Mitsubishi GaN	OMMIC GaN	IAF GaN
Gate Length( $\mu$ m)	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1
Freq.(GHz)	28~31	26,5~29	26~28	30,5~32,5	25~27
Pmax(W)	6	8,4	21,7	10	5,2
PAE(%)	34	29,6	19,8	30	30
Power Density (W/mm)	3,75	2,62	3,4	2,5	2,2
	[23]	[24]	[25]	[25]	ETRI
Process	UMS GaN	Mitsubishi GaN	IAF GaN	IAF GaN	ETRI GaN
Gate Length( $\mu$ m)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,18
Freq.(GHz)	30~36	26,5~31	25~29	25~29	26~31
Pmax(W)	12,0	16,6	10,5	20,0	6
PAE(%)	25	16,1	28	25	15
Power Density (W/mm)	3,8	2,6	4,1	3,9	1,9

폭기 기술의 중요성과 세계 기술 수준의 발전 속도를 고려할 때, Ka-대역 GaN MMIC 공정기술 확보뿐만 아니라 고효율/고출력 GaN MMIC 전력증폭기 설계 기술 개발이 지속해서 필요하다. 국내의 경우 외국 상용 GaN MMIC 파운더리를 이용하여 전력증폭기를 설계해 본 기관 및 결과가 다수 존재하므로 Ka-대역 GaN MMIC 공정기술의 확보가 가능하다면 보유하고 있는 전력증폭기 설계 기술을 활용하여 우수한 전력증폭기 개발이 가능할 것으로 판단된다.

### III. 결론

본 고에서는 5G 밀리미터파 대역 동작을 위한 Ka-대역 GaN RF 전력증폭 소자 및 전력증폭기 기술에 대하여 중점적으로 살펴보았다. Ka-대역 GaN MMIC 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자는 일반적으로 AlGaIn/GaN 채널을 사용한 게이트 길이 0.1~0.15 $\mu\text{m}$  소자 공정기술이 사용되고 있으며, 전력증폭 소자의 전력밀도는 대체로 2.5~3.5W/mm를 나타낸다. Ka-대역 GaN MMIC 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자는 주파수 특성을 향상하기 위해서 게이트 길이를 전자선 리소그래피를 이용하여 미세 게이트를 형성하도록 스케일링하는 추세이며 후면 비어 홀 공정이 사용된다. Ka-대역 GaN MMIC 전력증폭기들의 출력 특성은 6~21.7W로 다양하며, 최대 4W/mm 이상의 전력밀도 특성을 나타내어 고집적 고출력 소형 전력증폭기 구현이 가능함을 알 수 있었다. 기존에는 GaAs pHEMT 전력증폭 소자 공정이 공정 성숙도와 저렴한 생산 단가로 인하여 일부 사용되었으나 외국의 상용 GaN HEMT 공정기술의 발전이 지속해서 이루어져서 X-대역과 Ku-대역 MMIC 전

력증폭기뿐만 아니라 Ka-대역 전력증폭기 제작에 GaN HEMT 소자가 주류로 자리 잡기에 이르렀다. 국내의 경우 S-대역 전력 소자의 경우 소자 개발 및 파운더리가 진행 중이지만 X-대역과 Ku-대역, Ka-대역 전력 소자 공정 개발은 계속 진행 중이며 상용 파운더리는 아직 갖추어지지 못하였다. 비록 ETRI에서는 Ka-대역까지의 전력 소자 기술을 확보하였으며 전력증폭기 역시 4인치 자체 공정을 이용하여 성공적으로 개발하였지만, 외국 수준과 비교하여 출력과 전력부가효율 및 전력밀도가 낮아 성능향상 및 상용화 적용을 위한 추가적인 개발을 진행하고 있다. 5G 이동통신 시장이 본격적으로 열리고 있는 시기에 GaN MMIC 제작을 위한 GaN HEMT 전력증폭 소자 기술 및 MMC 공정기술은 세계적 기술 수준과 중요성을 고려할 때 국내에서도 세계적 기술 수준과 동등한 수준으로 확보하고 구축해야 할 핵심기술로 생각된다. 그동안 이동통신용 RF 부품산업은 주로 선진업체 부품이 시장의 대부분을 차지하였으며 국내에서는 분석을 통한 대등한 제품의 후속 개발이 주가 되었으며, 핵심 소자는 국외에서 전량 수입하고 있었다. 그동안 국내 소재 및 부품에 대한 투자가 소홀하였으며 앞선 신제품 개발과 핵심 소자 공급의 어려움으로 인하여 기술 종속화가 더욱 심화하였다. 소재 부품의 적기 공급의 어려움은 단말기나 장비 등 시스템 산업의 경쟁력을 저해하는 요인으로 작용하고 국내 이동통신 산업 저변에 악영향을 미쳐왔다. 최근 소재 및 부품에 관한 관심과 투자가 지속해서 이루어지고 있는 점은 매우 다행이며 고부가가치 핵심부품의 개발을 통해 세계시장에서 경쟁우위를 창출하기 위해서는 이동통신 RF 핵심부품 분야의 국가적, 전략적 기술 개발이 요구되고 있다.

## 용어해설

**HEMT** 반도체 이종접합에 의해 계면에 채널을 형성시켜서 전자의 빠른 이동이 가능한 초고속 전자소자

**MMIC** 모든 능동소자와 수동소자를 하나의 기판 위에 형성시킨 RF 집적회로

## 약어 정리

2DEG	Two Dimensional Electron Gas
5G	5th Generation
CAGR	Compound Annual Growth Rate
ETRI	Electronics and Telecommunications Research Institute
GaAs	Gallium-Arsenide
GaN	Gallium-Nitride
HEMT	High Electron Mobility Transistor
LDMOS	Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
PA	Power Amplifier
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
pHEMT	pseudomorphic High Electron Mobility Transistor
RF	Radio Frequency
Si	Silicon
SiC	Silicon Carbide
SPDT	Single Pole Double Throw

## 참고문헌

- [1] 과학기술정보통신부, "ICT주요품목동향조사," 통계정보, 2021.
- [2] 과학기술정보통신부, "혁신성장 실현을 위한 5G+전략," 2019.
- [3] GSMA, "The mobile economy 2020," 2020.
- [4] 삼성, "5G 국제표준의 이해," 2018.
- [5] 과학기술정보통신부, "무선데이터 트래픽 통계," 2021.
- [6] 컨슈머인사이트, "컨슈머인사이트 리포트," 2019.
- [7] 한국지능정보사회진흥원, "28GHz 기술동향 및 이슈사항(5G 스몰셀 관점에서)," 2021.
- [8] Yole, "GaN RF Market: Applications, Players, Technology and Substrates 2020," 2020.
- [9] N. Hussaina et al., "Metasurface-based low-profile wideband circularly polarized patch antenna for 5G millimeter-wave systems," IEEE Access, vol. 8, 2021, pp. 22127-22135.
- [10] 매일경제, "LTE보다 20배 빠르다? 5G 둘러싼 진짜·가짜 논쟁... 진짜 5G '28GHz' 내년 상용화, 킬러 서비스 경쟁 '스타트,'" 2020. 12. 4.
- [11] 과학기술정보통신부 "5세대(5G) 이동통신용 주파수 경매 최종 결과," 2018.
- [12] <https://www.qorvo.com/>
- [13] <https://www.wolfspeed.com/>
- [14] <https://www.ums-rf.com/>
- [15] <https://www.ommic.com/>
- [16] <https://www.winfoundry.com/>
- [17] Qorvo, "Gallium nitride — A critical technology for 5G," 2016.
- [18] C.F. Campbell et al., "High efficiency Ka-band gallium nitride power amplifier MMICs," in Proc. 2013 IEEE Int. Conf. Microw., Commun., Antennas Electron. Syst., (COMCAS), Tel Aviv, Israel, Oct. 2013, p. 6685246.
- [19] Y. Noh et al., "Ka-band GaN power amplifier MMIC chipset for satellite and 5G cellular communications," in Proc. 2015 IEEE Asia-Pacific Conf. Antennas Propag. (APCAP), Bali, Indonesia, June 2015, 7374447, pp. 453-456.
- [20] Y. Yamaguchi et al., "A CW 20W Ka-band GaN high power MMIC amplifier with a gate pitch designed by using one-finger large signal models," in Proc. IEEE Compd. Semicond. Integr. Circuit Symp. (CSICS), Miami, FL, USA, Jan. 2017, pp. 1-4.
- [21] A. Gasmı et al., "10W power amplifier and 3W transmit/receive module with 3 dB NF in Ka band using a 100nm GaN/Si process," in Proc. IEEE Compd. Semicond. Integr. Circuit Symp. (CSICS), Miami, FL, USA, Jan. 2017, pp. 1-4.
- [22] S. Samis et al., "A 5 W AlGaIn/GaN Power Amplifier MMIC for 25-27 GHz Downlink Applications," in Proc. GeMiC-German Microw. Conf., Freiburg, Germany, Jan. 2018, pp. 9-12.
- [23] V.D. Giacomo-Brunel et al., "Industrial 0.15- $\mu$ m AlGaIn/GaN on SiC technology for applications up to Ka band," in Proc. European Microw. Integra. Circuits Conf. (EuMIC), Madrid, Spain, Sept. 2018, pp. 1-4.
- [24] K. Nakatani et al., "Ka-band CW 15.5W 15.6% fractional bandwidth GaN power amplifier MMIC using wideband BPF inter-stage matching network," in Proc. IEEE BiCMOS Compd. Semicond. Integr. Circuits Technol. Symp. (BCICTS), Nashville, TN, USA, Nov. 2019, Article no. 8972780.

- [25] S. Samis et al., "Broadband high-efficiency power amplifiers in 150 nm AlGaIn/GaN technology at Ka-band," in Proc. Asia-Pacific Microw. Conf. Proc. (APMC), Hong Kong, China, Dec. 2020, pp. 260-262, Article no. 9331569.
- [26] 이상홍 외, "차세대 GaN RF 전력증폭 소자 및 집적회로 기술 동향," 전자통신기술동향, 2019, pp. 71-80.