

# GaN HEMT의 열화 메커니즘 고찰 및 RF 동작조건 기반 수명예측의 필요성

윤성기, 박현정  
국방기술품질원

e-mail:sgyoun@dtaq.re.kr, hyeonjeong@dtaq.re.kr

## A Review Degradation Mechanisms in GaN HEMTs and the Need for Lifetime Prediction under RF Operating Conditions

Seong-Gi Youn, Hyeon-Jeong Bak  
Defense Agency for Technology and Quality

### 요약

최근 고주파 및 고출력 응용 분야에서 GaN HEMT의 도입이 확대됨에 따라, 소자의 신뢰성 확보가 핵심 과제로 대두되고 있다. 본 연구는 AlGaN/GaN HEMT의 재료적·구조적 특성에서 기인하는 주요 열화 및 고장 메커니즘을 분석한다. 특히, 기존에 널리 사용되는 DC 스트레스 중심의 평가 방식은 실제 RF 구동 환경에서 발생하는 동적이고 복합적인 열화 거동을 충분히 반영하지 못해 정확한 수명 예측에 한계가 있다. 따라서 GaN HEMT의 실질적인 신뢰성을 보증하기 위해서는 기존 평가 방식을 탈피하여, RF 구동 스트레스를 반영한 가속시험 방법의 도입과 이에 기반한 수명예측 모델 정립이 필수적이다. 본 연구는 GaN HEMT의 신뢰성 평가를 위한 구체적인 기준 마련의 필요성을 제안한다.

## 1. 서론

질화갈륨(GaN) RF 반도체는 통신 인프라, 군수·방산, 통신 위성 등 다양한 분야에 적용되며, 시장 규모가 꾸준히 확대되고 있다. 특히, GaN HEMT 기술은 높은 항복 전압, 높은 전류 밀도, 낮은 열 저항 등의 특성으로 인해 고전압 조건에서 고전류 밀도를 처리할 수 있어, 고효율 전력 증폭기의 핵심 부품으로 주목받고 있다.

2000년대 초반에는 GaN 소자의 수명이 100시간 미만에 불과하다는 우려가 제기돼 다양한 응용 분야에 적용되지 못하였다. 이후 기술이 개선되면서 현재는 시스템에 적용 가능한 수준인 MTTF 1,000,000시간에 도달한 것으로 알려져 있다. 연구·개발 단계를 거쳐 양산 단계에 진입했지만, 여전히 신뢰성은 주요 관심사로 남아 있다.[1] 초기에는 가속 온도 스트레스만을 이용한 수명 평가가 진행됐지만, 고신뢰성 GaN HEMT의 수명을 정확히 측정하기에는 이러한 방법만으로는 한계가 있어 다양한 연구가 수행되고 있다.

## 2. 본론

### 2.1 GaN 재료 특성

GaN의 고전력 및 고주파 응용에 적합한 특성을 폭넓게 갖추고 있다. 이는 넓은 에너지 밴드갭과 높은 포화전자속도에서 비롯되며, 기존의 실리콘(Si) 및 갈륨비소(GaAs) 기반 소자와 비교하여 전력·주파수 동작 범위를 크게 확장시킨다. 이러한 특성은 고주파·고전력 응용에서의 이론적 성능을 나타내는 Johnson's Figure of Merit(JM)을 통해 확인할 수 있다.

$$JM = \frac{E_{br} \times v_{sat}}{2\pi}$$

[표 1] 주요 반도체 재료의 Johnson's Figure of Merit(JM)

구분	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
Johnson's Figure of Merit	1	2.7	20	27.5

표 1에서 제시된 바와 같이 GaN의 JM 값은 27.5로, Si(1)와 GaAs(2.7)를 크게 상회하며, SiC(20)보다도 우수한 값을 보인다.

GaN의 우수한 전기적 특성은 표 2에 제시된 주요 물성값을 통해 명확하게 확인할 수 있다. 먼저, GaN은 약 3.39eV의 넓은 에너지 밴드갭(Eg)을 가지며, 넓은 밴드갭은 고온에서도 누설전류를 효과적으로 억제하여 전기적 안정성을 확보하

며, band-to-band impact ionization이 발생하기 위해 더 강한 전계가 필요하게 만들어 높은 항복전계( $E_{br}$ )를 제공하는 근본적인 요인으로 작용한다.

[표 2] 소자별 전기적 특성

구분	Si	GaAs	InP	4H-SiC	GaN	Diamond
$E_g$ (eV)	1.1	1.42	1.35	3.26	3.39	5.45
$\epsilon_r$	11.8	13.1	12.5	10.0	9.0	5.5
$\mu_n$ ( $cm^2/Vs$ )	1350	8500	5400	700	1200 -2000	1900
$V_{sat}$ (cm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	2.5	2.7
$E_{br}$ (MV/cm)	0.3	0.4	0.5	3.0	3.3	5.6
$\theta$ (W/cmK)	1.5	0.43	0.7	3.3 -4.5	1.3	20

GaN의 상대 유전율( $\epsilon_r$ )은 약 9.0으로, Si나 GaAs에 비해 낮은 값을 갖는다. 낮은 유전율은 소자 내 기생 커패시턴스를 감소시켜 전계 제어 능력을 향상시키며, 고주파 신호가 소자 내부에서 보다 빠르게 응답할 수 있도록 한다. 이러한 특성은 특히 RF 및 고주파 전력 소자에서 중요한 요소로 작용한다.

벌크 GaN의 전자 이동도( $\mu_n$ )는 GaAs와 같은 고이동도 재료보다는 낮지만, AlGaIn/GaN 이종접합 구조에서는 다른 전도 메커니즘이 나타난다. 분극 전하에 의해 도핑 없이도 높은 농도의 2차원 전자 가스(2DEG)를 GaN 계면에서 형성한다. 2DEG는 얇은 계면 영역에 제한된 전도층으로, 벌크 영역에서 발생하는 결함·불순물·포논 산란의 영향을 적게 받기 때문에 산란율이 낮고 실제 이동도는 벌크 값보다 훨씬 높아질 수 있다. 이러한 특성은 고전류 운반 능력과 고주파 응답성을 향상시키는 핵심적인 요소로 작용한다.

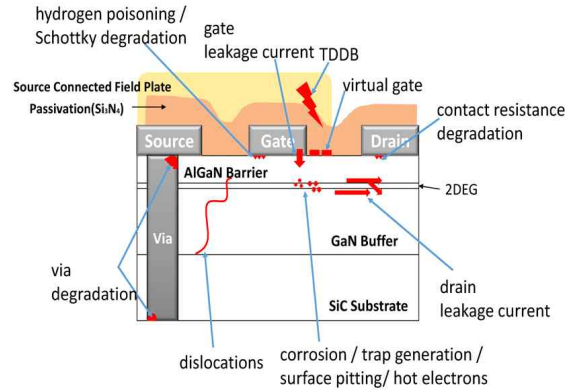
또한 GaN은 높은 포화속도( $v_{sat}$ )를 가지며, 이는 높은 전계 환경에서도 전자의 속도가 쉽게 포화되지 않음을 의미한다. 이로 인해 고주파 조건에서의 소자 응답 속도가 향상되며, 스위칭 및 RF 동작에서 우수한 성능을 구현할 수 있다.

한편, GaN의 열전도도( $\theta$ )는 SiC 보다는 낮지만 Si과 유사한 수준이다. 열전도도는 GaN의 잠재적 약점으로 언급되기도 하지만, 높은 항복전계를 기반으로 소자의 드리프트 영역을 크게 줄일 수 있어, 결과적으로 칩 면적이 감소함에 따라 발생 열량 자체가 낮아지는 장점이 있다. 이는 GaN이 고전력 소자에서도 실질적인 열적 신뢰성을 확보할 수 있게 하는 요소로 작용한다.

결과적으로, 표 2에 제시된 GaN의 물성값( $E_g$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\mu_n$ ,  $v_{sat}$ ,  $E_{br}$ ,  $\theta$ )을 종합적으로 살펴보면, GaN은 넓은 밴드갭과 높은 항복전계에 기반한 고전압 특성, 낮은 유전율과 높은 포화전자속도에 의한 고주파 응답성, 이종접합에서 형성되는 고이동도 2DEG 채널을 통한 높은 전류 운반 능력, 그리고 열적

설계가 가능한 수준의 열전도도를 동시에 확보하고 있다. 이와 같은 물성 조합은 GaN이 기존 Si 또는 GaAs 기반 소자가 도달할 수 없는 고전력·고전압·고주파 영역에서 뛰어난 성능을 제공하는 근본적 기반이 된다.[2]

2.2 GaN HEMT의 주요 열화 및 고장 메커니즘



[그림 1] GaN HEMT 구조에서의 고장 메커니즘

GaN HEMT의 주요 열화 및 고장 메커니즘은 그림 1에서 확인할 수 있듯이 여러 위치에서 발생하며, 각 원인에 따라 복합적으로 나타난다.[1][2] 이러한 내용을 표 3에 정리하였다.

[표 3] GaN HEMT 고장 발생 메커니즘

구분	발생원인	발생결과
Gate-Drain Edge 표면 열화	·Drain-side Gate-edge 전계 집중(E-field peak) ·Inverse piezoelectric strain에 의한 AlGaIn 격자 변형 ·crack/pitting/void 생성 ·습도에 의한 전기화학적 부식	·Gate leakage 증가 ·Drain current 감소 ·표면/계면 결함 확장 ·장기 안정성 저하
Hot Electron Damage	·AlGaIn barrier 내부 trap 생성 ·Interface trap 증가 ·RF stress에서 trap 충전 반복	·current collapse (DC/RF) ·Gate leakage 증가 · $V_{th}$ 이동, gm 감소 ·채널 전도도 저하
Access Region Virtual Gate 형성	·non-gated 영역 trap 포획 ·채널 부분적 공핍 (virtual gate)	·Drain access 저항 증가 ·Drain current 감소 ·RF gain 감소, power compression · $V_{th}$ 증가/이동 ·Ron 증가
Ohmic Contact 열화	·고온에서 Ti/Al 계 금속 상호확산(interdiffusion) ·void 형성 ·표면 거칠기 증가	·Contact resistance 상승 ·Drain current(ID) 감소 ·RF 손실 증가 (skin effect) ·출력전력/효율 감소
Schottky Gate 금속 열화	·금속 grain boundary 확산 ·금속-AlGaIn 계면 반응 (interfacial reaction) ·수소오염에 의한 계면 변형	·Gate leakage 증가 ·Schottky barrier height ( $\Phi_B$ ) 감소/불균일화 · $V_{th}$ 이동 ·Gate controllability 저하
Passivation 및 Field Plate 유전체 열화	·SiN Passivation 내부 defect 증가 ·FP-edge 전계 집중 ·TDDB 경향	·유전체 절연 강도 감소 ·Gate/Drain leakage 증가 ·전계 분포 왜곡 ·barrier 제어 능력 약화 →drift/collapse

### 2.3 GaAs 기반 신뢰성 평가방식의 적용 한계

GaAs 기술은 오랜 기간 JEDEC JEP118 표준에 기반하여 DC-HTOL 중심의 수명평가 체계를 통해 신뢰성이 확립되어 왔다. 이 표준은 비교적 단순한 동작 특성을 갖는 GaAs LNA 응용을 대상으로 단일 주요 열화 메커니즘을 가정하고, 이를 기반으로 단일 Arrhenius 활성화에너지( $E_a$ )를 추출하는 방식으로 구성되어 있다. 이러한 접근은 GaAs 기술에서 실제 고장 모드가 비교적 단순하고, 온도 기반 열화 메커니즘이 지배적이었기 때문에 타당하였다. 그러나 GaN HEMT의 신뢰성은 GaAs와 크게 다른 특성을 가진다.[3]

첫째, GaN은 구조·공정·응용편차가 크고, 여러 고장 메커니즘이 동시에 발생(multiple concurrent mechanisms)한다. 전계 기반 열화, hot-electron damage, trap-assisted degradation, 금속-접촉 열화, Passivation-Field Plate 유전체 파괴(TDDDB) 등이 모두 가속 조건에 따라 서로 다른  $E_a$ 를 갖는다. 이로 인해 GaAs 방식처럼 “단일  $E_a$ ”를 가정하는 JEP118 접근법은 GaN에서 유효하지 않다.[4]

둘째, GaN HEMT는 RF 동작에서 DC 바이어스와는 전혀 다른 영역을 빠르게 순환하며, 그림2에서 확인할 수 있듯이 열·전계·트래핑·self-heating이 복합적으로 중첩되는 RF 스트레스 환경을 갖는다. 실제로 다수의 연구에서 RF 수명시험 결과가 DC 수명시험 결과와 다르게 나타났으며, RF 조건에서 열화가 더 빠르게 진행되는 경우도 관찰되었다. 이는 GaAs에서 흔하지 않은 현상으로, GaN 수명평가에서는 RF 스트레스 인가 자체가 필수 요소임을 의미한다.[5]

종합적으로, GaAs에서 사용되던 기존의 JEP118 기반 수명평가 방식은 GaN 기술의 특성을 반영하기 어렵고, 실제 고장 특성을 정확하게 예측할 수 없다. 이에 따라 GaN HEMT는 RF 기반 복합 스트레스 시험, 매커니즘 분리형 DC-life test, 정확한 열·전계 모델링 등을 통합한 새로운 수명평가 체계가 요구된다.

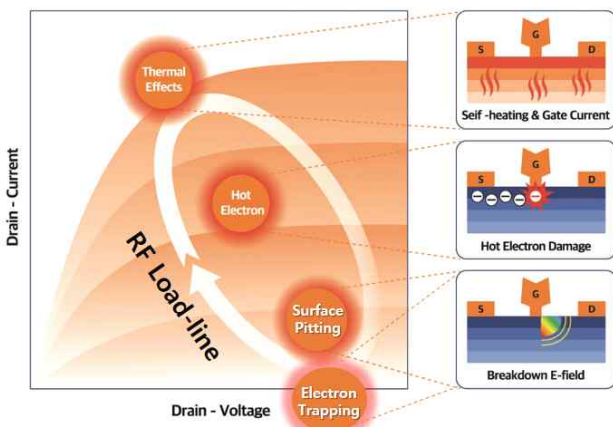
### 3. 결론

문헌조사를 통해 GaN HEMT의 열화는 단일 인자가 아닌 복합적인 스트레스 요인에 의해 발생하며, 기존의 DC 기반 열화시험만으로는 실제 RF 구동 환경에서의 열화 특성을 충분히 설명하기 어렵다는 점을 확인하였다.

특히 현재 제조사에서 제공하는 신뢰성 정보가 대부분 DC 기반 가속시험으로부터 도출된 표준화 MTTF에 한정되어 있어, RF 응용 시스템에 이를 직접 적용 및 신뢰성을 예측하기에는 한계가 존재한다. 따라서 RF 구동 조건을 반영한 신뢰성 평가 방법 및 수명예측 모델의 정립이 필요하며, 이를 기반으로 GaN HEMT 전용 신뢰성 평가 기준과 표준화된 수명평가 체계를 마련할 필요가 있다.

### 참고문헌

- [1] 최영락, 김형국, “RF 분야의 GaN HEMTs 수명평가에 관한 문헌연구”, 신뢰성응용연구 제23권, 제4호, 2023, pp.400-410.
- [2] Antonio Stocco, A. “Reliability and failure mechanisms of GaN HEMT devices suitable for high-frequency and high-power applications”, 2014
- [3] Shawn D. Burnham, Bruce M. Paine, “Towards an RF GaN Reliability Standard”, JEDEC ROCS, 2017, pp 3.2.
- [4] Glen David Viam, “GaN Reliability-Where we are and where we need to go”, CS ManTech, 2014, pp.15-18.
- [5] Choi Youngrak, “Development of a lifetime evaluation system and lifetime prediction method for GaN RF semiconductors used in manned and unmanned weapon systems”, 선진국방연구 제6권 제2호, 2023. pp.63-90



[그림 2] RF load line 별 GaN 열화 매커니즘