

Development of a lifetime evaluation system and lifetime prediction method for GaN RF semiconductors used in manned and unmanned weapon systems*

Choi, Youngrak** · Kang, Yunho*** · Kim, Hyounggook****

ABSTRACT

The aim of this study is to develop a testing system that applies RF (Radio Frequency) stress to predict the lifespan of GaN RF semiconductors, a subject of numerous ongoing domestication studies. Additionally, the study proposes an approach that considers the complex effects of degradation mechanisms in predicting lifespan. When testing the longevity of communication semiconductors, it's essential to apply RF-input to replicate real-world conditions. The system we developed applies wideband, high power RF stress to individual samples. It monitors RF characteristic changes in real-time and provides independent control of temperature and voltage stress for each sample. This ensures both effective lifespan tests and real-time tracking of semiconductor degradation patterns. Unlike traditional GaAs semiconductors, GaN ones exhibit the compounded influence of degradation mechanisms during RF operation. Therefore, a new lifespan estimation method that identifies the IV characteristic parameters for each degradation mechanism and deduces a relationship between the DC-accelerated life test and the RF-accelerated life test was proposed. The proposed method is significant in that it provides foundational data necessary for the systematic planning of semiconductor reliability testing and the direction of test equipment development. If lifespan tests proceed using this proposed method and data related to degradation mechanisms is derived, it is anticipated to positively impact the future reliability improvement of GaN RF semiconductors.

Keywords : GaN semiconductor reliability, lifetime estimation, degradation mechanism, accelerated life test

* This work was supported by Next-generation Intelligence Semiconductor Foundation grant funded by the Korea government (the Ministry of Science and ICT, the Ministry of Trade, Industry and Energy) (No. 20015696, Development of an Intelligent Product Life Test System for Highly Reliable Ultra-High-Speed 5G System Semiconductors).

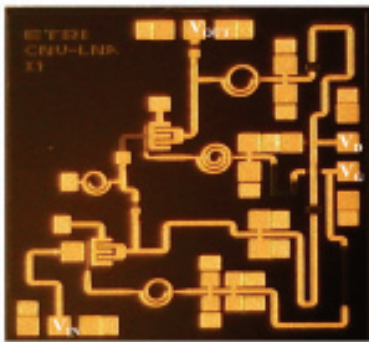
** (First Author) Kwangwoon University, Department of Electronic Convergence Engineering, Ph.D. Candidate and QRT Research and Development Center, Head of R&D Office, youngrak.choi@qrtrk.com, <https://orcid.org/0009-0004-4465-5460>.

*** (Co-Author) QRT Research and Development Center, Assistant Engineer, yunho.kang@qrtrk.com, <https://orcid.org/0009-0007-2393-3814>.

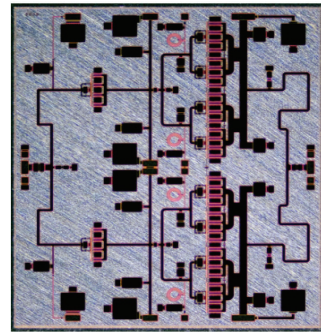
**** (Corresponding Author) Kwangwoon University, Department of Electronic Convergence Engineering, Professor, hkim@kw.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-1518-4100>.

I. 서론

질화갈륨(GaN) RF(Radio Frequency) 반도체는 통신 인프라, 군수·방산, 케이블 통신망, 통신 위성 등의 산업에서 사용되면서 시장규모가 연평균 12%로 성장하고 있으며, 무선통신 및 국방 분야의 규모가 가장 크다.¹⁾ 특히, 5G 무선이동통신 서비스를 위한 기지국의 송신부와 레이더 및 유도탄 등 군수산업제품의 송수신 모듈 내 송신부의 전력증폭기 수요가 커질 전망이다. 전력증폭기는 안테나를 제외한 송신부 최종단으로 통신 신호를 고출력으로 증폭하는 역할을 담당한다. GaN RF 반도체의 일종인 GaN MMIC(Monolithic Microwave IC)는 전력증폭기의 핵심 부품이기 때문에 수요가 커질 것으로 기대된다.²⁾ 국내 방위산업 분야는 반도체 부품의 원천기술 확보와 수출 경쟁력 강화를 위해 X-밴드 GaN RF 반도체 부품의 국산화 방안을 추진해 오고 있다.³⁾ 예를 들어 KF-X(한국형 전투기)에 장착되는 레이더와 유도탄 레이더 등에 사용되는 X-밴드 GaN MMIC를 개발하였다. Figure 1은 GaN MMIC의 국산화 연구결과로 제작된 증폭기 구조이다(Lim et al., 2022; Sung et al., 2022).



(a)



(b)

Note. (a) was quoted from Sung et al. (2022), and (b) was quoted from Lim et al. (2022).

<Figure 1> GaN MMIC low noise amplifier chip (a)²⁾ and
X-band AlGaIn/GaN power amplifier MMIC (b)³⁾

특히, 군 병력감소 현상에 따라 군 병력을 대체할 무인 무기체계가 보편적으로 활용될 전망이며(Jang, 2022), 인공지능(AI) 기반의 유무인(Manned-UnManned Teaming) 및 무무인(UnManned-

1) 이종민, 민병규, 장우진, 지홍구, 조규준, 강동민(2021). 5G 이동통신을 위한 GaN RF 전자소자 및 집적회로 기술동향. ETRI Electronics and Telecommunications Trends, 36(3), pp. 53-64.

2) 이종민, 민병규, 장우진, 지홍구, 조규준, 강동민(2021).

3) 뉴스핌(2021.07.08.). 레이더·위성 핵심기술 국산화...X-band GaN 반도체 개발 추진. <https://www.newspim.com/news/view/20210119000812>

UnManned Teaming) 복합체계 운용에서 통신용 반도체 소자가 필연적으로 요구되므로 GaN RF 반도체의 중요성이 더욱 증대될 것이다.⁴⁾ 이러한 변화 흐름에 따라 국내 반도체 개발 업체의 시장 진출이 확대되고, 다양한 산업 영역에서 GaN MMIC의 개발 진행성과도 다수 발표되고 있다(Ahn et al., 2022; Han, Sung, & Kim, 2022; Jang, 2022; Lee, Kim, & Park, 2022; Lim et al., 2022; Noh et al., 2022; Sung et al., 2022a; Sung et al., 2022b). 국방·방산 분야의 GaN MMIC를 활용한 송수신 모듈 및 제품 수명 관리에서 무기체계(레이더,⁵⁾ 유도탄⁶⁾)의 신뢰성 개선과 안정적 성능의 보장 기간을 확보하는 평가계획의 연구가 진행되고 있다. 하지만, 국내 연구의 경우에 탐색레이더 및 유도탄 등의 송수신 모듈 내 핵심 부품인 GaN MMIC 자체의 신뢰성을 다룬 연구가 미흡하여 관련 연구 활성화가 필요하다. 또한, 송수신 모듈의 정상적 동작 기간을 보증하는 핵심 부품의 수명평가가 중요하므로 이에 적합한 평가장비 및 평가방안에 관한 연구가 요구된다.

반도체의 수명은 열화 메커니즘⁷⁾에 의해 다르게 예측될 수 있어 GaN MMIC의 열화 메커니즘을 고려한 수명예측 방안이 요구된다. 이때 GaN MMIC는 송수신 모듈의 통신에 사용되어 실제 RF 동작에서 발생하는 열화 메커니즘을 고려할 수 있도록 RF 신호가 인가한 상태에서 반도체 수명평가가 진행되어야 한다(Joh & del Alamo, 2010). 그러나 이런 수명평가는 관련 장비 구성의 복잡성과 설치 과정의 어려움으로 상당한 시간과 전문 인력이 소요되며, RF 스트레스 제공을 위해 고가의 장치가 요구되므로 평가 비용이 커지는 문제가 있다. 그래서 지금까지 반도체의 수명평가는 RF

-
- 4) Uppal, R. (2019). Gallium Nitride (GaN) Game Changer for Aerospace and Military Communications, Radar, and Electronic Warfare (EW), Applications.
 - 5) 탐색 레이더는 반도체송수신조립체(Transmit and Receive Module)를 통해 빔의 위상배열을 합성하여, TWTA (Traveling-Wave Tube Amplifier) 방식과 유사한 고출력을 얻을 수 있다. 지상 또는 함정용 레이더는 면당 약 3,000개의 TRM, 항공탐재용 레이더는 약 1,000개의 TRM으로 구성된다. 탐색 레이더 핵심 구성요소인 TRM이 2단계 운용시험평가 중 9차례 고장과 함정 인도 후 8개월 동안 18차례 고장이 발생하여 이에 관한 분석 및 품질개선 연구가 진행되었다. 온도과 진동에 의한 고장을 확인하고 이를 개선하기 위한 모듈 조립성과 열 해석 결과분석을 진행하여 연결구조 변경 및 절연거리 확보로 신뢰성을 개선하였다(Kim & Son, 2022).
 - 6) 유도탄은 일반적으로 제어부, 추진부, 탄두부, 유도부로 구성되며 임무 부여에 따라 여러 형태로 운용된다. 유도탄의 경우에 유훈상태로 대기하다 임무 수행 시점이 발생하면 절차에 따라서 비행 후에 표적을 요격하게 되는데, 이러한 유훈상태 중에도 임무 목적으로 인해 일부 구성품이 동작하는 상태가 요구될 수 있다. 그래서 전략 유도탄은 유도제어부가 동작하는 경계 상태에서 긴 시간 동안 운용되기도 하므로 정상 동작 상태 이하의 부하 상태에서 수명주기 관리가 필요하다. 이에 관하여 Lee et al.(2021)은 기존 유도탄 수명주기를 저장상태로 한정된 신뢰성 평가계획을 실행치 유도탄의 운용개념, 노출환경 그리고 수명주기 프로파일에 의한 신뢰도 영향성이 반영된 평가계획으로 개선할 필요성을 제기하였다.
 - 7) 신뢰성 평가 국제 표준화 기구인 JEDEC에서는 갈륨비소(GaAs) MMIC에 관하여서 HTOL(High Temperature Operating Life) 또는 ALT(Accelerated Life Test)를 통한 수명평가 방안을 제시하고 있다(JEDEC, 2013a/2010). 그러나, GaN MMIC는 항복 전압이 높아서 게이트 엣지에서 높은 전기장이 생성되고, 단위면적당 출력이 높아서 자체 발열이 높을 뿐만 아니라, 물성에 의한 압전효과 발생으로 기존 GaAs MMIC와는 다른 열화 현상이 발생한다(Stocco, 2012). 또한, GaAs MMIC의 경우 여러 열화 메커니즘이 존재하더라도 1가지 열화 메커니즘이 반도체 수명에 우세한 영향을 미치지만, GaN MMIC는 스트레스 조건에 따라 우세한 열화 메커니즘이 달라지는 현상이 있다(Paine, 2015).

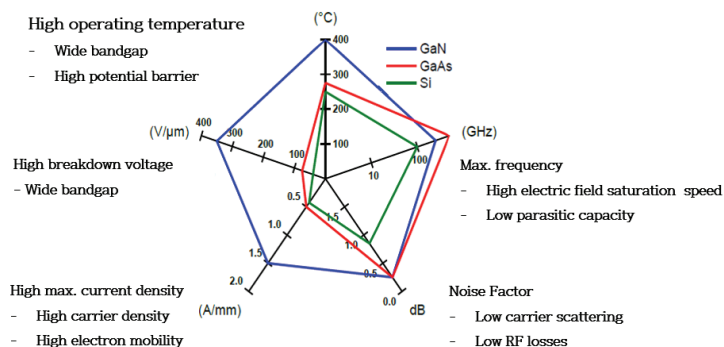
신호의 인가 없이 DC 동작점의 운용상태에서 온도에 의한 가속스트레스를 공급하는 수명평가가 진행되어왔다. 그러나 GaN RF 반도체는 DC 동작 수명평가의 수명결과가 RF를 인가한 동작 수명평가의 수명결과보다 짧아지는 문제가 발생한다(Via, 2014). 이런 문제를 해결하기 위해 본 연구는 질화갈륨(GaN) RF 반도체를 위한 수명평가시스템을 개발하여 시료별로 고출력 광대역 RF 스트레스 인가가 가능하면서 가속인자(온도, 전압, 전류)도 시료별로 개별 제어가 가능하도록 구성하여서 시험의 용이성을 개선하고자 한다. 또한, 본 연구는 개발된 장비를 사용한 수명평가 및 열화 메커니즘을 이해하는 수명예측 방안을 제안한다. 이를 통해 본 연구는 추후 반도체 신뢰성 평가의 체계적인 계획 수립과 평가 장비 개발 방향에 필요한 기초자료를 제시하였다는 점에서 학술적 및 실무적으로 기여하는 바가 클 것으로 기대된다.

II. 이론적 고찰

2.1 질화갈륨(GaN) RF 반도체의 필요성 및 국산화 현황

질화갈륨(GaN) 반도체 및 집적 회로(IC) 기술은 지난 십여 년간 빠르게 성장하였다. GaN는 Ga와 N의 공유결합이 강하여 기존에 사용되어온 GaAs보다 넓은 에너지 밴드갭을 갖는다. 이런 특성으로 이 재료는 고온 환경에서도 안정적으로 작동할 수 있으며, 누설전류의 유출이 적으면서 동시에 열을 효과적으로 전달할 수 있다. 넓은 에너지 밴드갭은 고전압에 대응하는 높은 절연 강도(높은 항복전압)를 가지게 하여 고전압 환경에서도 안정적으로 작동할 수 있게 만들어 전력변환 효율성이 향상된다. 이 재료는 전자 이동성이 뛰어나 전자가 빠르게 이동하고 포화 상태에 도달하므로 더 높은 주파수에서 효과적으로 작동할 수 있다. 또한, RF 최대 전류 밀도 특성으로 반도체를 더 작은 크기로 만들 수 있어 통신용 반도체로써 활용하기에 유용하다. 이러한 GaN RF 반도체 특성(Figure 2)으로 최근에는 송수신 모듈의 중심 부품인 고효율 전력증폭기에 사용되는 고출력 소자로 구성되고 있다. 특히, GaN RF 반도체 중에서 GaN HEMT(High Electron Mobility Transistor) 기술은 초광대역에서 고출력-고효율 전력증폭기 설계를 가능하게 하므로, 최근 개발된 밀리미터파(mmWave) 대역의 국산 MMIC는 GaN HEMT 구조로 설계 및 제작되고 있다.⁸⁾ 국내 국방 연구사업 지원을 통한 GaN MMIC 개발 성과를 살펴보면, 국내외 GaN 파운드리 공정을 사용하여 여러 주파수 대역에서 MMIC 소자를 개발하였다(부록 1).

8) 지홍구, 장동필, 신동환, 염인복(2011, Aug.). GaN, GaAs MMIC 개발 및 전망. ETRI Electronics and Telecommunications Trends, 26(4), pp. 105-114.



<Figure 2> Characteristics of GaN RF semiconductors
(recited from Nakkala, 2015)

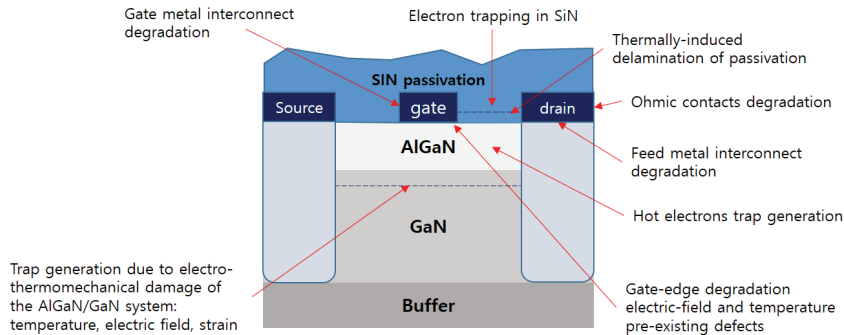
2.2 질화갈륨(GaN) RF 반도체의 열화 메커니즘

반도체의 신뢰성 평가를 위한 가속수명시험(ALT)은 가혹한 스트레스 조건에서 시료를 고장 상태로 만든 후, 그 고장 발생 시점을 기반으로 정상사용 조건(Field condition)의 수명을 외삽하여 예측한다. 하지만 이때 중요한 전제는 열화 메커니즘이 정상사용 조건과 가속 스트레스 조건에서 동일해야만 신뢰성 있는 수명예측이 가능하다는 것이다. 그래서 반도체의 열화 메커니즘 이해와 가속하기 위한 환경 변수 확인을 토대로 가속수명시험을 진행해야 한다. GaN RF 반도체의 주요 신뢰성 문제는 게이트 엣지 열화, 트래핑 및 디 트래핑 효과, 열전자 효과, 자체 발열 효과, 금속 간 확산 및 금속-반도체 간 확산 등이 있다(Chowdhury et al., 2008; del Alamo & Joh, 2009; Meneghesso et al., 2008).

게이트 엣지 열화 모드는 4가지 열화 메커니즘에 의해 발생할 수 있다. 첫째로 GaN과 같은 압전 재료에서 높은 전기장이 인가되는 경우 기계적 응력이 유도될 수 있다. 기계적 결함은 역압전 효과로 인해 격자 손상과 추가 결함을 발생시킨다. 둘째, 게이트와 채널 사이의 전도성 침투 경로 및 트랩의 생성으로 게이트 누설전류가 증가하여 성능 저하가 나타난다. 셋째, GaN 표면이 산소나 수증기에 의해 노출되어 게이트-드레인 가장자리에 점진적인 구조적 손상이 발생하는 경우이다. 마지막으로 반도체의 에피택셜층에서의 확장된 침식 및 균열이 고온 가속 동작 시료에서 발견되는데 표면구멍(Surface pit)을 확인할 수 있다.

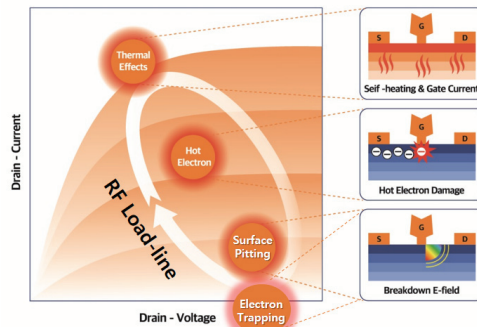
열전자는 포텐셜 에너지 장벽을 극복할 수 있는 충분한 운동에너지를 획득한 전자와 정공이 버퍼, 장벽 또는 절연층에 주입되어 포획되고, 반도체 격자와 충돌하여 원자 결합을 깨고 인터페이스 상태를 생성하거나 트랩을 활성화하는 비평형 전자로써 전기적 특성을 변화시킬 수 있다. 전자-트래핑은 높은 전기장으로 인해 전자가 재료나 소자 내의 특정 위치에 유지되는 현상을 의미하며, 불소(F)로 인한 불안정성 및 결합된 수소의 방출을 포함하여 다양한 메커니즘으로 인해 전자나 정공

의 트래핑이나 새로운 깊은 준위의 생성으로 이어질 수 있다. 열 효과는 자체 발열로 인해 상승된 온도에 의해 구동되는 메커니즘을 의미한다. Figure 3은 이와 같은 열화 메커니즘을 GaN RF 반도체의 일종인 GaN HEMT 내 열화 위치를 나타낸다.



<Figure 3> Failure mechanisms recently identified on GaN HEMTs
(recited from Meneghesso et al., 2010)

열화 메커니즘과 전류-전압특성(CVC)의 관계를 전류-전압(IV) 곡선상에 나타내면(Figure 4), 4가지의 열화 메커니즘이 바이어스 특징에 따라 나타나게 된다. 고전압 영역에서는 높은 전기장으로 전자 트래핑(Electron trapping)의 열화 영향이 크게 나타나고, 고전압이지만 소량의 전류가 흐르는 영역은 표면 구멍(Surface pitting) 열화 영향이 크게 나타난다. 고전류 영역에서는 소자 자체에 발생하는 열 효과(Thermal effect)로 인한 열화 영향이 크게 나타나며, 고전압-고전류로 인한 고전력 구간은 열 전자(Hot electron)로 인한 열화 현상이 가장 큰 영향을 미치게 된다. 열전자 효과 지점은 전자발광 현미경 및 분광법으로 확인이 가능하다. 열전자 효과(Hot electron effect)는 일반적으로 DC 동작 수명시험을 위한 반도체 동작지점인 A급 바이어스 지점에서 나타난다. 앞서 설명한 열화 메커니즘 중, 옴릭 접촉 열화 및 쇼트키 접촉 열화는 300°C 이상의 고온에서도 장기간 견고성을 유지하는 특성이므로 IV 곡선상에서 열화성화 효과 지점의 열화 현상을 예측해 볼 수 있다. 반도체의 RF 동작은 RF 로드-라인을 따라 드레인 전류-전압 특성이 변화하여 4가지의 열화 메커니즘 영향이 나타나는 지점을 연속적으로 지나게 된다. 결국 열화 메커니즘이 복합적이라고 예상할 수 있어 실제 동작 환경의 열화 메커니즘은 RF 스트레스를 인가한 상태에서 반도체를 동작하여 수명평가를 진행해야 한다.



<Figure 4> The RF load line on IV curve of the semiconductor and degradation mechanism according to operating point⁹⁾

2.3 반도체의 RF 수명평가를 위한 기존 신뢰성 표준과 수명평가시스템의 요구사항

자동차용 반도체, 메모리 반도체, 통신용 반도체 및 군수용 제품의 반도체 품질 분야 등에서 사용되고 있는 신뢰성 표준 중, 반도체 수명평가 내용은 MIL-STD-883, AEC-Q100, JEP118A, JESD226 등에 제시되어 있다(부록 2). GaN RF 반도체의 복잡한 RF 동작 조건에서 정확한 수명예측을 위한 열화 메커니즘 검토가 요구되어 GaN 기반의 반도체 인증 표준은 아직 진행 중이지만 JEP118A와 JESD226을 통해 RF 동작 조건의 수명시험에 관하여 이해할 수 있다. JEP118A는 작동 온도 및 정상 바이어스 조건에서의 예상 마모수명을 추정하기 위해서 가속수명시험을 실행하는 것에 관해 설명하고, 반도체 수명평가 조건과 방법 및 유의사항을 명시한다(JEDEC, 2013a).

GaN RF 반도체 수명평가 시 참고할 핵심사항은 다음과 같다. 테스트의 가속인자(Stress)와 조건은 어플리케이션에 따라 달라지며, 초기고장 제거를 위한 스크리닝이 선행되어야 한다. 수명평가를 받을 소자는 시험 전, 중간, 종료 시에 전기적으로 특성화되어야 하며, 주기적으로 IV 특성곡선을 측정해야 한다. 또한, 스트레스가 가속되는 동안에 가능하면 게이트 및 드레인에 대한 실제 스트레스 전압 및 전류를 기록하여 시간 경과에 따른 열화 드리프트를 감시해야 한다. 특히, 전력 및 범용 소자인 경우에 1dB 출력 압축점과 가능한 게이트 전류를 측정하고, 열화 감시를 위한 측정은 125°C 이하의 베이스 플레이트 온도에서 수행해야 한다. 다만, 실온 측정의 상관관계가 확인된 경우, 상승한 온도에서 측정이 허용된다. 반도체 소자의 열화는 온도에 의해 급격하게 나타나기 때문에 채널 또는 Junction 온도를 정확하게 평가해야 한다. 사용된 최고 온도에서 MTTF(Mean Time to Failure)가 최소 100시간은 되어야 하며, 온도상승으로 지배적인 고장 메커니즘이 변화한다면 전

9) Burnham, S. D., & Paine, B. M. (2017, May). Towards an RF GaN reliability standard. In Proceedings of the JEDEC Reliability of Compound Semiconductors Workshop, Indian Wells, CA, USA (Vol. 22). Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Bruce-Paine/publication/322702351_Towards_an_RF_GaN_Reliability_Standard/links/5a6a514f458515b2d0532910/Towards-an-RF-GaN-Reliability-Standard.pdf

이 온도보다 낮은 온도에서 시험을 시행해야 한다.

범용·전력 반도체와 MMIC는 연속적 신호인 RF 스트레스를 받는데, RF 스트레스 레벨은 반도체를 스트레스 온도에서 최소 1dB 출력 압축 상태로 만드는 것이 바람직하다. 수명테스트 동안 반도체를 주기적으로 감시하여 치명적인 오류 발생을 감지하고 적용된 가속인자(온도, 전류, 전압 등)가 엄격한 허용 오차 내에서 변경되지 않도록 장비를 조정한다. 시험 기간 중 반도체의 전기적 스트레스와 채널 온도를 일정하게 유지하는 것이 필요하므로 시험 중 필요에 따라 게이트 전압이나 주변 온도를 주기적으로 조정해야 할 수 있다.

특히, 고장 분석 시 반도체 회로가 스트레스로 치명적인 고장이 발생할 경우에 장치에서 전압을 신속하게 제거하도록 설계한다. 최소 샘플 크기는 50개 디바이스¹⁰⁾를 권장하며, 최소 70% 고장으로 간주되는 모든 온도 그룹의 합계를 나타낸다. 고장분포를 찾는 데 사용되는 데이터는 시료의 10%가 고장을 발생시킨 후에 시작해야 한다. 모든 매개변수의 측정 간격은 단계별 스트레스 시험 결과로 제안될 수 있으며, 전체 모집단의 10% 고장 후 90% 고장이 발생하기 전까지의 기간에서 최소 5개 시간 간격을 제공할 수 있도록 매개변수 측정이 수행되어야 한다. 상기한 수명추정을 위해 필요한 저장 데이터는 다음과 같다(Table 1).

<Table 1> Summary table of required data for semiconductor lifetime evaluation

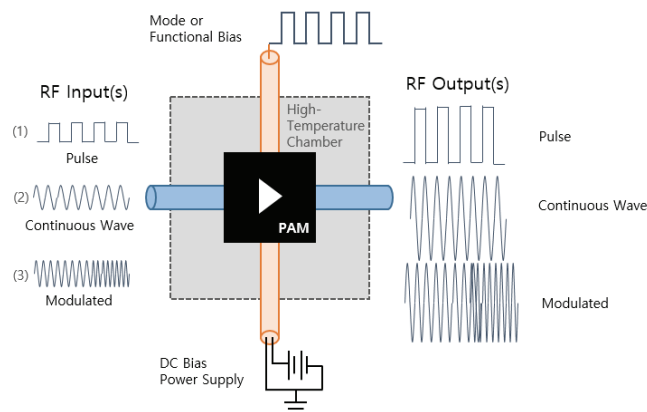
Classification	Details on required data
Device information	Application, average values of thermal-resistance, life test temperature condition, failure criteria
Stress	Case temperature, sample numbers, IV bias condition, RF input power level
Monitoring parameter	Supplying current, leakage current, RF input power and output power, Gain, 1dB compression point at output
Analysis	Primary failure modes and mechanisms, MTTF (Mean Time To Failure) with a 60% confidence limit, life distribution of semiconductor

JESD226은 모바일 소자의 front-end에 사용되는 모듈인 PAM(Power Amplifier Module)에 RF 신호를 인가하는 신뢰성 테스트를 제시한다(JEDEC, 2013b). RF 신호를 인가하면 발열 효과가 나타나게 되며, 순간적인 피크 전압과 전류의 가속효과가 발생하기 때문에 일정한 DC 공급과는 시험이 다르다. 시간에 따른 온도 영향을 이해하고 RF 신호의 인가 조건을 결정하는 것이 필요하다. 실 사용 조건에서 예상되는 모든 모듈의 열 및 전기적 고장 메커니즘을 가속하여 반도체 인증 테스트를 진행하고 그 변화를 감시해야 한다. 이 시험수행은 테스트 시료가 받게 될 특정 열과 전기적 스

10) 가장 낮은 온도의 가속조건 결과는 외삽에 가장 큰 영향을 미치게 되는데, 가속조건이 낮아서 고장이 가장 적을 것으로 예상된다. 수명평가를 위한 시험 완료 후, 고장 발생 시료의 수가 적으면 수명분포의 선택이 어렵기 때문에 다른 온도보다 더 많은 시료로 시험을 진행해야 한다. 그래서 일반적으로 시험은 높은 온도 조건부터 1:2:4의 시료 수를 적용하는 것이 적절하다(Meeker & Hahn, 1985).

트레스 조건을 제공할 수 있는 장비가 필요하다. 그리고 반도체의 바이어스 및 작동 체계는 동작 한계를 고려해야 하므로 과도한 스트레스나 열폭주가 발생하지 않도록 시료의 고장 시에 다른 시료에 과도 전력이 공급되지 않도록 조치해야 한다. 모니터링 장비는 시험 기간에 출력 및 전류, 온도 등에 관한 데이터 수집의 정확성 및 안정성이 보장되어야 한다. 또한, 시료의 시험온도를 제어하는 챔버의 경우 내부 온도차가 적을수록 시험의 정확성이 확보되지만, 실제 챔버 크기와 열전달 방법으로 인해 챔버 내 불균일한 온도가 생성되고 온도 측정을 위한 센서도 종류에 따라서 다르지만 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 정도의 오차가 발생한다. 따라서 부품을 로드되고 전원이 공급되지 않는 동안 챔버 전체의 온도 오차를 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 이내로 허용한다.

MIL-STD810F에서도 일반적으로 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 이내로 시험온도를 유지하지만, 요구되는 시험온도가 100°C 를 넘는 경우에 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 온도차를 허용하고 있다. 반도체의 수명평가를 위한 온도가속 조건은 디바이스의 일반적인 동작 정격 온도인 85°C 이상으로 100°C 넘게도 설정되기 때문에 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 오차가 허용된다. 또한, 전체 모듈에 RF 스트레스를 인가하는 것이 바람직하다. 스트레스 지속 시간은 특정 지침이 없다면 기본 1,000시간, 최소 500시간이다. 시료의 활성화 에너지를 0.7eV 라고 했을 때 125°C 에서 기본 1,000시간의 시험이 완료된 후에 아레니우스 가속모형을 사용하면 실제 사용조건 온도가 53°C 이하일 때 10년 이상의 반도체 수명이 보증된다. 그래서 반도체 수명 10년 보증을 일반적으로 1,000시간 테스트로 규정하고 있다. 가속조건 변화에 걸리는 시간과 중간 측정을 위해서 실온으로 변경되는 시간은 총 시험시간으로 간주하지 않는다. 가속을 위해서 더 높은 전압이 허용되지만, 최대 정격 전압을 초과해서는 안 된다. 모든 작동 모드를 유도하고 할 수 없는 경우에 가장 높은 스트레스 모드를 선택한다. 시험은 대표적인 RF 경로를 선택하여야 하며, 경로에 따른 스위칭이 발생하여 공유하는 신호의 전체 스트레스 시간이 줄어들면 테스트 시간을 늘려야 한다. PAM의 동작 바이어스 구성은 Figure 5와 같다.



<Figure 5> Device drive and stress conditions for RFBL
(RF Biased Life) (recited from JEDEC, 2013b)

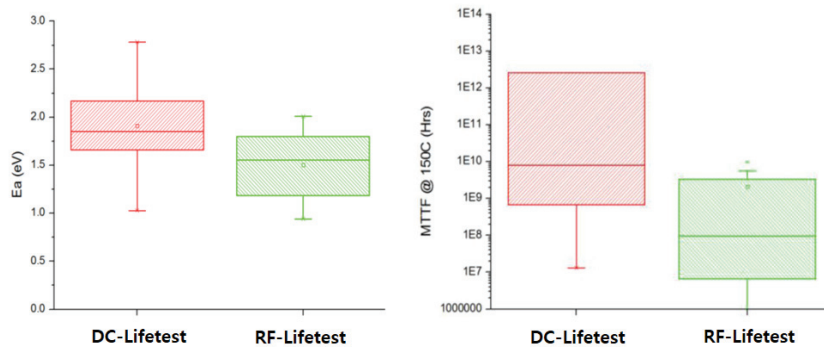
지속적인 동작이 가능한 범위 내에서 최대 동작 조건을 적용하기 위해서 RF 신호가 인가된다. 그러나 온도가속 전에 RF 신호의 크기를 결정하면 회로에 기대하지 않은 영향이 발생할 수 있어 온도를 최대로 하려면 RF 전력 레벨을 최대 설정보다는 낮게 이동해야 할 수 있다. 고온에서 최대 정격 조건을 충족하기 어려운 불안정한 전력증폭기에는 스위칭 스트레스 시험을 적용하고, RF 스트레스 상태에서 소자는 예측가능한 동작을 보장해야 한다. 그리고 최대로 가능한 동작 노드에 신호를 공급하는 조건으로 결정하고, 다양한 주파수 대역의 동작을 테스트해야 한다. 고온 스트레스를 받는 시료는 전원 핀의 전압을 제거하기 전에 55°C 이하로 냉각해야 한다. 열을 가하기 전 또는 챔버의 고온에 도착한 후 10분 이내에 바이어스를 부품에 적용해야 한다. 중간 측정은 시료 PAM에서 바이어스를 제거한 후 96시간을 넘지 않게 가능한 한 빨리 완료해야 하며, 96시간 이내에 시험을 시작하지 못했다면 시험시간을 늘려야 한다. 여기서 96시간은 PAM에 관한 표준 규격으로 시료의 종류나 특성 그리고 신뢰성 시험 종류에 따라서 달리 정의된다. 예를 들어, MIL-STD-750는 HTRB(High Temperature Reverse Bias) 시험 후 바이어스를 제거하고 24시간 이내에 측정을 규정하고 있다(Department of Defense, 1995). 바이어스가 제거되면 시료의 열화현상이 회복되거나 시험조건 외의 외부 조건 변화로 인해서 열화가 가속될 수 있으므로 특정 시간 안에 시료의 기능검사를 진행하도록 규정하고 있다. 모듈 사양의 요구사항을 충족하지 않으면 실패로 정의하고, 매개변수 열화 평가는 매개변수의 종류에 따라서 1dB 또는 10%를 초과하는 변화를 기준으로 사용한다.

반도체 수명평가를 위한 신뢰성 표준의 내용을 통해서 아래와 같은 조건의 수명평가시스템이 요구된다는 것을 알 수 있다.

-
- 3개 이상의 서로 다른 가속조건을 시료별로 적용할 수 있는 평가 장비
 - 온도, 전압, RF 입력 등을 가속인자로 사용할 수 있는 평가 장비
 - 수명평가에 사용되는 가속인자의 한계치 결정을 위한 시험이 가능한 평가 장비
 - 시료의 종류에 따라서 RF 주파수 및 출력이 적합한 스트레스 인가가 가능한 평가 장비
 - 시료별로 RF 스트레스 조정이 손쉬운 평가 장비
 - 동일 온도 설정 시 시료별 온도차이가 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 내로 유지되는 평가 장비
 - 시험기간 동안 필요에 따라 온도제어가 용이한 평가 장비
 - 필요에 따라서 시료별로 공급되는 전압을 변경하거나 제거하는 것이 편리한 평가 장비
 - IV 매개변수 측정을 위한 준비가 편리한 평가 장비
 - 시험 기간 내에 정상온도에서 5회 이상 시료의 열화를 측정할 수 있는 평가 장비
 - 열화 측정 후 신속하게 가속수명시험을 재실행할 수 있는 평가 장비
 - 수명추정에 필요한 데이터의 수집이 가능한 평가 장비
 - 1,000시간 이상 안정적으로 시험환경을 유지할 수 있는 평가 장비
 - 열화 발생 시 공급되고 있던 가속인자(스트레스)를 바로 중단할 수 있는 평가 장비
 - 열화 기준을 다양한 매개변수로 설정하고 변경할 수 있는 평가 장비
-

III. 연구방법

RF 스트레스가 인가되는 RF-가속수명시험은 DC 공급만으로 수행되는 DC-가속수명시험보다 활성화 에너지가 낮아지게 되고 수명추정값 MTTF를 낮추게 된다. Figure 6¹¹⁾을 보면, RF가 인가된 반도체의 열화 메커니즘과 DC 공급만으로 동작하는 반도체의 열화 메커니즘이 다를 것이라고 예상할 수 있으며, RF를 인가하는 수명평가의 필요성을 확인할 수 있다.

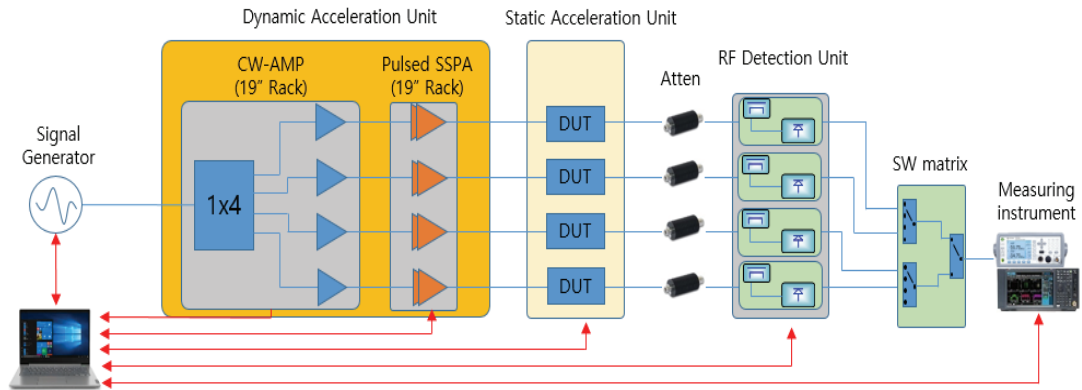


<Figure 6> Change of activation energy and semiconductor lifetime by RF stress (recited from Via, 2014)

이런 영향을 확인하기 위해 RF 스트레스를 인가한 상태에서 수명평가를 진행할 수 있는 시스템이 필요하다. 그래서 본 연구는 RF 스트레스를 인가하는 RF-가속수명시험에 최적화된 수명평가시스템¹²⁾을 개발하고자 한다. 관련 평가 시스템의 시험 구성도는 Figure 7과 같다. 해당 구성도는 전체 시스템의 일부 구조로 동일 구조가 반복되는 형태로 전체 시스템을 확장할 수 있다. 반도체 수명평가를 위한 RF-가속수명시험은 4가지 스트레스(전압, 전류, 온도, RF-입력)를 공급한다. 동적 가속부(Dynamic Acceleration Unit)는 RF 입력 스트레스를 제공하고, 정적가속부(Static Acceleration Unit)는 전압, 전류, 온도 스트레스를 제공한다. 시료의 RF 동작에 따른 열화 경향의 실시간 모니터링은 RF 검출결합부(RF Detection Unit)에서 시료의 출력전력을 검출한다. 이때 고가 장비를 사용한 성능 모니터링이 추가로 필요할 것을 대비하여 스위칭 매트릭스를 구성한다. 수명분석을 위해서 4가지 스트레스를 다양한 조건으로 제공 후, 시료의 열화 정보를 수집하여 고장분포 및 고장시간을 확보하고 이를 외삽하여 정상사용 조건에서 반도체 수명을 예측할 수 있다.

11) 산업적으로 발표되거나 보고된 GaN RF 반도체의 신뢰성에 관한 가속수명평가의 결과를 분포표로 나타낸 것으로, DC-가속수명시험과 RF-가속수명시험의 활성화 에너지(Ea)와 MTTF(Mean time to Failure)의 차이를 보여준다.

12) RF 수명평가에 최적화된 시스템은 해외 몇 기업에서 제작되어왔으나, 장비의 가격이 고가이고 반도체의 성능에 따른 맞춤 제작을 위해서 반도체 정보를 제공하는 것에 부담이 있었으며 제작 기간도 긴 문제가 있었다. 따라서, 국내 방위산업의 반도체 국산화 목표에 발맞추어 반도체 수명평가가 가능한 국산 시스템이 요구되었다.



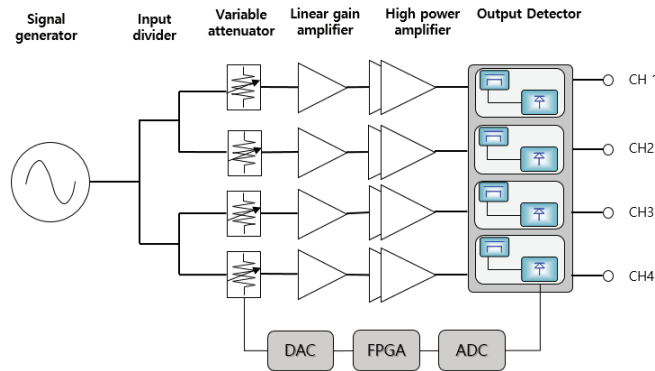
<Figure 7> Configuration of semiconductor lifetime evaluation test under RF stress

3.1 반도체 수명평가 요구사항에 따라 개발된 시스템

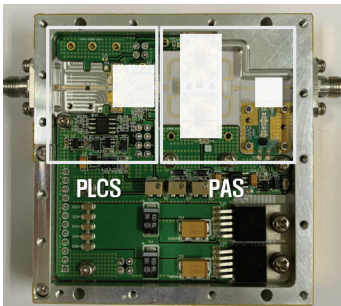
JEP118A에서 명시한 바처럼 수명평가의 정확도는 스트레스별로 3가지 이상의 가속조건을 인가하면서 최소 50개 시료를 테스트하여 확보할 수 있다. 이를 위해 반도체의 정상동작을 방해하지 않는 범위 내에서 최대 RF 스트레스를 인가하면서 온도가 다른 3가지 가속수준에서 시험이 이루어져야 한다. 이러한 시험이 가능하도록 개발된 수명평가 시스템은 시료별로 서로 다른 온도와 RF 스트레스를 인가한다. 기존 RF 열화 특성(Gain, 출력 등) 변화의 측정은 열화 발생 소자의 바이어스 공급을 멈추고 고온 챔버에서 시험하는 시료를 꺼내서 기능을 측정한 후에 다시 챔버에 넣어 가속 수명시험을 이어서 진행해야 한다. 즉, 열화 특성의 검출을 위해서 시험이 끝나기 전까지 간헐적 측정을 시행해야 하는 불편함이 있다. 또한, 이때 모니터링을 위해서 스펙트럼 분석기나 파워미터 같은 계측장비를 별도로 사용한다면 시험비용이 증가하게 되므로 대부분 하나의 계측장비로 50개 이상의 시료를 관측하여 즉각적인 테스트가 불가능하고 시료 측정에 긴 시간이 소요된다. 이와 같은 시간차 측정은 열화가 급격해지는 시점에서 열화 경향 데이터를 확보가 어려우며, 반도체의 열화 특성을 분석하고 반도체 구조 개선에 사용할 자료수집이 쉽지 않은 문제가 존재한다. 따라서 가열블록을 포함한 스마트 시험 고정부(Smart Test Fixture)를 SAU(Static Acceleration Unit)에 부착하여 챔버 없이 시료별로 온도를 제어하고 시료에 따른 가변 전압을 공급하도록 하였다. 그리고 RF 입력을 다양한 시료에 적용할 수 있도록 광대역 고출력 RF 발생부(RF Generation Unit), 광대역의 RF 출력을 실시간 검출하는 RF 검출부(RF Detection Unit)를 포함하는 동적 가속 장비(Dynamic Acceleration Unit)를 개발하였다.

Figure 8은 동적 가속장비의 RGU 구성도 및 전력증폭부 모듈, 그리고 RGU 성능 중 주파수별 출력과 가변 범위 성능을 보여준다. RGU의 19인치 랙(Rack)은 구조에 따라 4~8개의 출력 단자를 가지며, 각 출력은 개별 제어되므로 시료에 서로 다른 RF 입력 스트레스를 인가할 수 있도록 구성

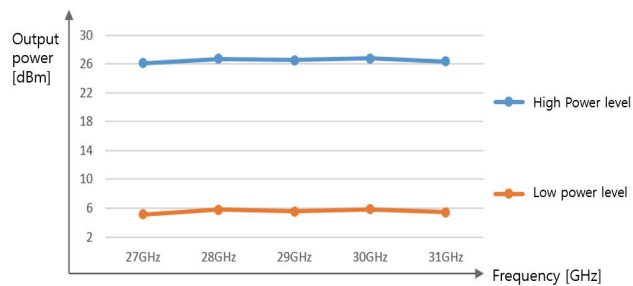
되었다. 신뢰성 평가는 시험이 진행되는 장시간 동안 일정 출력을 시료의 입력으로 인가해야 한다. 그러나 장비가 장시간 운용될 때 장비 내부나 외부의 온도변화에 따라서 출력이 변할 수 있어 구성도에서 보이는 것처럼 RGU의 출력을 검출하여 입력부의 신호를 제어하는 피드백 구조가 적용된다. 더불어 이 구조는 개별 채널 간의 출력 오차 보정 기능을 수행한다.



(a) Diagram



(b) RF signal amplification module



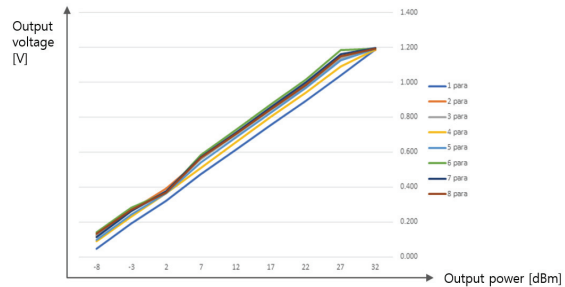
(c) Power and variable ranges

<Figure 8> Developed RGU configuration diagram and RF lifetime evaluation

Figure 9는 동적가속장비의 RDU 구성도 및 실물사진, 검출장치별 성능을 나타낸다. 검출장치는 RF 입력을 받아서 전압으로 변환하여 출력하는데 검출 오차를 줄이기 위해 주파수별로 선형적 구간에서 동작하도록 하고, 이 검출값은 소프트웨어상에 표시한다. 가속수명시험은 온도와 전압을 가속 인자로 사용할 수 있어야 하므로 각 시료에 대해 다른 가속 인자를 제공할 수 있도록 정적가속장비를 개발하였다. SAU(Static Acceleration Unit)는 다양한 시료에 적용할 수 있도록 다수의 전원공급이 필요한 모듈 단위 시료를 위해서 5개 전원공급 채널로 구성하고, 전압을 통해 제어되는 가열블록이 적용된 스마트 시험 고정부(STF)를 사용하여 시료에 일정 온도를 유지하거나 원하는 온도로 변화하게 하였다.



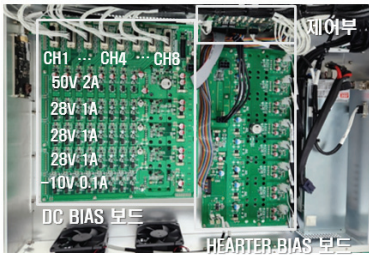
(a) Product picture



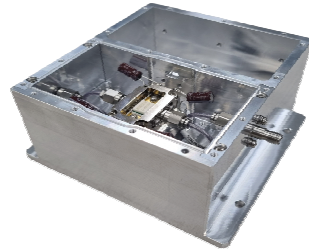
(b) Linear output voltage result by detection power

<Figure 9> RF Detection Unit production picture and performance

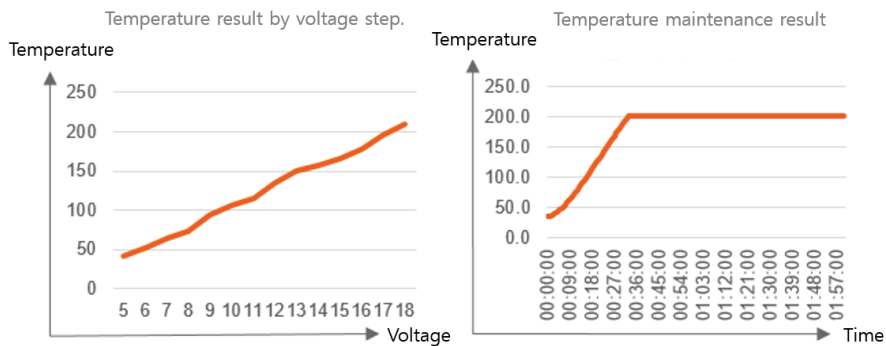
Figure 10은 정적가속장비의 SAU 실물과 온도제어 특성을 나타내며, STF는 mmWave에서 입출력 손실 감소를 위한 구조를 적용한다(Figure 10(b)). 환경시험 표준 MIL-STD-810E는 고온시험 시행 시 열충격방지를 위해 분당 온도변화율을 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 이하로 제한하고, 가능한 시료당 동일 온도조건이 유지되도록 챔버 내의 온도변화를 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 제한한다. 요구되는 온도가 100°C 를 넘으면 온도 허용 오차를 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 로 할 수 있다. 그러나 가속수명시험에서 3가지 이상의 다른 온도에서 시험을 진행하는 것이 일반적인데 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 온도차는 가속조건 간의 간격을 최소 15°C 이상으로 설정할 때만 수명추정을 신뢰할 수 있다. 그러나, 시험 온도조건이 너무 높은 경우 열화 메커니즘이 달라질 수 있고, 최고 온도조건에 의해 제한된 최저 온도조건에서 실질적 시험 가능기간(일반적으로 1,000 시간) 내에 고장(열화)이 발생하지 않는 문제가 생길 수 있다. 게다가, 시료의 활성화 에너지가 크면 온도변화에 의한 수명추정 결과 변화가 커질 수 있어 더 정확한 시험온도 설정이 필요하다. 따라서 본 연구는 설정 온도에서 온도 허용오차가 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 가 되도록 온도제어장치를 개선하였으며, 가속스트레스를 안정적으로 공급하면서 열화 파라미터(RF입력, RF출력, 온도, 전압, 전류)를 실시간 감시할 수 있는 장비를 개발하였다.



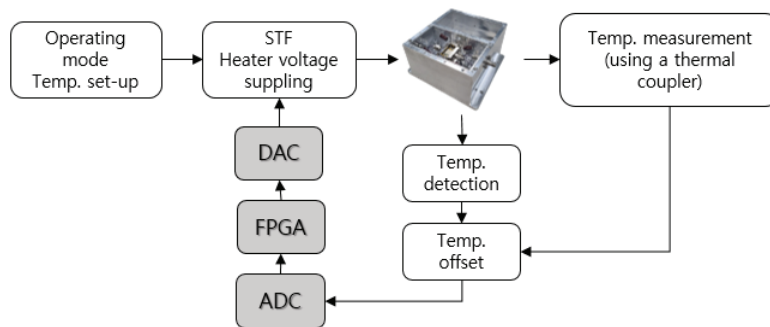
(a) Product picture



(b) Smart Test Fixture (STF)



(c) Temperature control characteristics



(d) Temperature control diagram for each sample

<Figure 10> Temperature control method in static acceleration unit including smart test fixture

Figure 11은 가속수명시험이 가능하도록 최종 개발된 시스템을 보여준다. 동적가속장비는 RF 발생부(RGU), RF 검출부(RDU), 전원 공급부(Power Supply Unit)로 구성되며, 정적가속장비는 정적가속장치(SAU)와 스마트 시험 고정부(STF)로 구성된다.



<Figure 11> Semiconductor RF lifetime evaluation system including dynamic and static acceleration

3.2 반도체 수명평가¹³⁾를 위한 시험방안 및 수명예측 방안

GaN RF 반도체의 열화 메커니즘에 관한 연구가 진행되고 있으나, 관련 표준이 미비하여 RF-동작에 따른 복합 열화 메커니즘을 고려한 수명예측 방안이 결정되지 못한 상황이다. 반면, 국내의 경우 국산화를 위한 다양한 GaN MMIC가 제작·설계되고 이를 사용한 무기체계가 제작되고 있어 본 연구는 RF-동작에 따른 열화 메커니즘을 고려한 수명평가 방안을 제안한다.

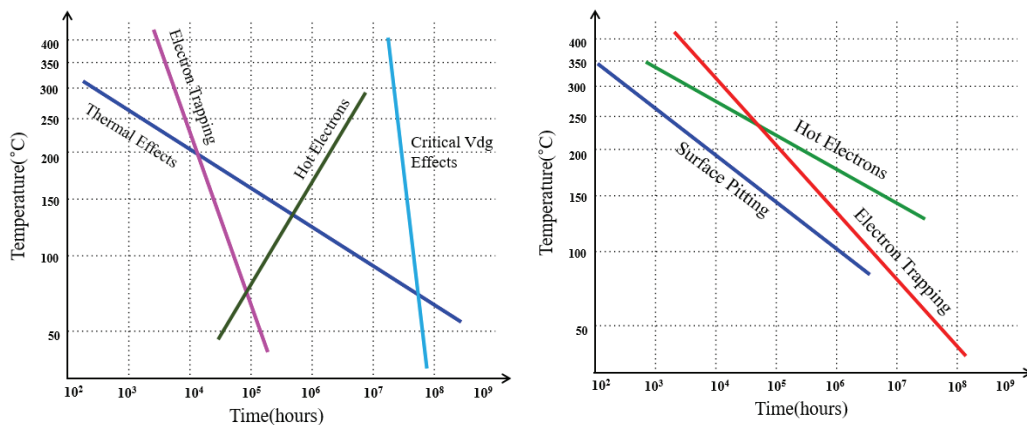
먼저 단계별 스트레스 시험에서 도출된 시료의 가속시험한계 결과를 토대로 가속수명시험을 실시하기 위한 가속조건을 설정한다. 특히, 온도조건은 JEP118A에서 권고한 설정¹⁴⁾을 고려하여 최고 스트레스 온도를 중간수명이 최소 100시간이 되도록 설정하고, 설정 온도에서 24시간 동안 50% 파손이 일어난다면 온도를 최소 20도로 낮추어서 설정한다. 이를 고려하여 다른 가속 조건도 24시간 동안 50% 이상의 파손이 발생한다면 스트레스 조건을 낮출 필요가 있다. 그래서 스트레스를 점점 높여주면서 단계별 시험을 시행할 때 최소 24시간 시험을 진행하여 열화가 급격히 일어나는 고장 조건으로 판정되는 스트레스 수준을 찾아줄 필요가 있다. GaN RF 반도체 수명평가 시에 RF 입력

13) 표준에 명시된 시험방식이라도 잠재적이고 새로운 열화 메커니즘은 시험조건에서 일반적이지 않은 열화 유발 상황을 검토하고, 유사한 제품군의 다른 시료도 검토하여 공통 고장 메커니즘 여부를 확인해야 한다(Automotive Electronics Council, 2007). 특히, 시료의 수명평가 시, 적합한 시험조건 결정을 토대로 시행하면 제품군의 다른 시료에 적용할 수 있는 정보 축적이 가능하여 유사 제품군의 일반적인 신뢰성 입증과 시료별 시험조건 탐색에 도움이 될 수 있다.

14) 최고 스트레스 온도는 중간수명이 최소 100시간이 되도록 설정하고, 설정된 온도에서 24시간 동안 50% 파손이 일어난다면 온도를 최소 20도 낮추어서 설정한다.

스트레스가 적용되면 반도체의 드레인에서 전압과 전류의 크기가 실시간으로 변화하면서 여러 열화 메커니즘(Figure 4)이 복합적으로 영향을 받게 된다. 즉, 한가지 열화 메커니즘과의 관계로 수명 결과를 추정하는 것이 적합하지 않다.

GaAs RF 반도체의 경우 단일의 우세한 열화 메커니즘이 존재하나 GaN RF 반도체는 열화 메커니즘의 영향이 복합하게 나타나며 온도 범위에 따라 더 우세한 메커니즘도 변화하게 된다(Nakkala, 2015). 결국, GaN RF 반도체의 실제 운용 온도에 따라 실사용 조건의 주요 열화 메커니즘이 좌우될 수 있으므로 고온의 온도 가속 조건에서 시험된 결과를 단순히 외삽하여 사용조건의 수명을 구하기가 어렵다. 일반적으로 실사용 조건의 열화 메커니즘과 같은 가속 조건에서의 시험진행이 타당하지만, 시료를 고온조건에서 시험하지 않는다면 제한된 시간 안에 시료의 RF 열화 특성을 확보하지 못할 수 있다. 따라서 본 연구는 고온시험결과를 사용하되 열화 메커니즘별 영향력이 사용조건에서 어떻게 달라질지 예측하여 정상사용조건(Field condition)의 수명을 추정하는 방안을 제안한다. 이를 위해 열화 메커니즘별 영향력을 정량화하는 과정이 요구된다. 이런 GaN RF 반도체에서 보이는 열화 메커니즘별 온도조건에 따른 수명변화, 온도조건의 주요 열화 메커니즘은 Figure 12와 같다.



<Figure 12> Lifetime change by temperature conditions of various degradation mechanisms (recited from Paine et al., 2015a/b)

각 온도조건에서 RF 가속수명시험에 영향을 미친 열화 메커니즘별 가중치를 구하여 사용조건에서의 열화 메커니즘별 가중치를 추정하고, 정상사용조건의 반도체 수명예측 방안을 적용한다. 이를 위해 온도조건에 따라서 반도체 수명에 가장 많은 영향을 미치는 열화 메커니즘이 무엇인지 확인하는 과정이 필요하며, 각 열화 메커니즘별 DC-가속수명시험을 진행하고 아레니우스 가속모형을 사용하여 활성화 에너지를 구한다. Figure 12와 같이 스트레스-수명 그래프로 나타내면 해당 온도 조건에서 수명을 가장 짧게 만드는 요인을 확인할 수 있다. 이때 RF-가속수명시험을 여러 온도조

건에서 진행하고 도출된 시험 결과를 가지고 데이터 분석 기법인 회귀분석을 진행할 수도 있지만, 이 방법만으로는 열화 메커니즘과의 연관성을 입증하기에 부족하다. 따라서, 시험을 통해서 열화 메커니즘별 주요 IV 특성 중 핵심 매개변수(I_{dss} , g_m , g_{mMax} , V_{th} , I_{gss} 등)를 확인하고, 핵심 매개변수의 변화를 가중치에 반영하고자 한다. 이를 아래의 수식으로 표현하였다.

$$Lifetime_{RF}(Temp_m) = \sum_{n=1}^4 \alpha_n(Temp_m) Lifetime_{DCn}(Temp_m) \quad \text{식 (1)}$$

Note. $Temp_m$ (온도 스트레스 조건), $Lifetime_{RF}$ (RF 가속수명시험을 통해서 얻은 MTTF(Mean time to failure)), $Lifetime_{DCn}$ (열화 메커니즘별 바이어스 조건에 따른 DC-가속수명시험을 통해서 얻은 MTTF), $\alpha_n(Temp_m)$ (각 열화 메커니즘별 수명에 관한 가중치로 열화 메커니즘과의 관계를 나타낸 상수), n (열화 메커니즘의 종류), m (가속수명시험의 온도조건 개수).

$$\alpha_n(Temp_m) = \gamma_n \frac{\delta IV_{signature\ parameter}_{RF}}{\delta IV_{signature\ parameter}_{DCn}} \quad \text{식 (2)}$$

Note. $\alpha_n(Temp_m)$ (DC-가속수명시험과 RF-가속수명시험에서 얻은 IV 특성 매개변수에 대한 변화율에 비례하는 값), $IV_{signature\ parameter}_{RF}$ (RF-가속수명시험 전후의 IV 핵심 매개변수 변화량), $IV_{signature\ parameter}_{DCn}$ (DC-가속수명시험 전후의 IV 핵심 매개변수 변화량), γ_n (가중치를 조정하는 비례상수).

RF-가속수명시험을 진행하고 온도조건별 수명을 구할 때, 기존과 다르게 온도조건별 활성화 에너지가 다를 수 있다는 점을 유의한다. RF 반도체 수명은 DC-가속수명시험으로 확인된 여러 열화 메커니즘이 복합적인 영향을 준다. 각 온도조건의 열화 메커니즘별 가중치는 온도수준에 따라서 변화하며 온도조건별 변화율은 함수화할 수 있다고 가정한다. 열화 메커니즘별로 IV 특성 중에 핵심 매개변수가 있다고 할 때, RF-가속수명시험 후 시료별 핵심 매개변수가 얼마나 변화하였는지 확인하고, 매개변수의 변화량으로 각 열화 메커니즘과의 관계상수를 도출한다. 온도조건별 가중치의 변화를 통해서 원하는 온도수준(사용온도조건)에서 가중치를 추정하여 수명을 예측할 수 있다. 이는 기존 RF 가속수명시험의 결과가 일정한 활성화 에너지를 갖는다는 가정에 따른 방법과는 다른 것으로 온도수준에 따라서 주요 열화 메커니즘이 변화하는 GaN RF 반도체의 특성을 반영한 수명추정 방안으로 제안된 것이다. 제안된 수명추정 방안을 적용하기 위해서는 다음과 같은 시험이 요구된다.

개별 열화 메커니즘에 관한 DC-가속수명시험과 복합 열화 메커니즘의 RF-가속수명시험을 진행하기 위해 GaN RF 반도체 소자의 가속인자별(온도, 전압, RF_입력) 스트레스 한계점을 설정해야 한다. 이는 열화 및 고장에 관한 가속인자의 영향을 평가하고 동작 한계를 결정하여, 이후에 진행될 시험에서 적합한 가속조건 범위를 설정하기 위한 것이다. 따라서 첫 번째로, 일정 시간 간격으로 스트레스 조건을 변경하는 단계별 시험을 통해서, 특성 파라미터의 열화 경향이 급격히 변화하

거나 완전파괴가 발생하는 조건을 찾는다. 이때 MTTF가 최소 100시간인 스트레스 조건을 찾거나, 24시간 이내 고장이 발생하는 조건보다 낮은 스트레스 조건을 설정해 준다. MTTF가 100시간보다 작다면 우발고장이나 마모고장이 아니고 초기고장에 들어가기 때문에 수명예측 자료로 사용하기에 부적합하다. 동작 한계에 관한 정밀한 검토를 위해서 단계별 가속조건을 변화시켜 작게 하고 충분한 시간 동안 유지하면서 시험을 시행한다면 더 좋은 데이터를 얻을 수 있다. 각 스트레스에 대한 단계별 테스트를 진행할 때 다른 스트레스 요소는 열화에 영향을 크게 미치지 않게 설정하도록 한다.

두 번째로 반도체 수명에 관련된 여러 열화 메커니즘을 개별적으로 평가하고, 열화 메커니즘에 대해서 특징 매개변수를 찾아주는 시험을 진행한다. 이를 위해 열화 메커니즘이 서로 다른 시험조건을 설정하는 것이 필요하다. 이런 시험조건을 구성하기 위해서는 RF 스트레스를 제공하지 않고, 하나의 전압-전류 공급지점에서 시험이 진행된다. Figure 4와 같이 RF 로드-라인 상에 3-4개의 전류-전압 지점을 선택할 수 있는데, 고전류 동작과 함께 나타나는 자체 발열 효과에 의한 열화, 고전압 동작과 함께 나타나는 전자 트래핑에 의한 열화, 표면 구멍(pitting) 효과에 의한 열화, 열전자 효과로 인한 열화 등으로 분류되는 전류-전압 공급지점이 선택될 수 있다. 선택된 각 지점에서 DC-열화 시험을 시행한 후, IV 특성의 매개변수들이 어떻게 열화되는지 확인하여, 열화 메커니즘 별로 가장 큰 변화를 보이는 특징 매개변수를 결정한다. 온도조건별로 특징 매개변수의 변화량은 수치화되어야 한다. 이 시험은 새로운 종류의 시료로 변경될 때마다 실시해야 한다. 수집된 데이터는 이후의 수명평가를 위한 자료로 사용될 수 있으며, 이러한 다수의 시험으로 수집된 정보를 통해서 일반화된 경향이 도출될 수 있다. 열화 메커니즘별 DC 바이어스 지점에서 최소 500시간 이상 시험을 진행하며, 간헐적 시간 간격으로 IV 특성 매개변수를 측정하고, 이 경향을 기반으로 특징 매개변수와 그 열화 경향을 분류한다. 문헌연구를 기반으로 본다면, 임계전압(V_{th})의 경우 게이트에 가까운 전하 트래핑을 추적하기 위해서, 누설전류(I_{gss})는 역압전 효과를 추적하기 위해서, 최대 전류($I_{d,max}$)는 표면-소공을 추적하기 위해 사용될 수 있다(Paine, 2015c).

세 번째로 DC-가속수명시험은 각각의 열화 메커니즘별 바이어스 지점에서 3가지 이상의 온도조건으로 실시한다. 고장시간 도출을 위한 고장기준은 출력전력의 1dB 이득저하와 동일한 수준으로 Table 2와 같이 결정할 수 있다. 시험에 필요한 시료수는 3가지 온도조건에서 저온부터 4:2:1로 진행하며 최소 고장시료의 수는 6개로 하여 적합한 고장분포 추정을 가능하도록 한다(del Alamo & Joh, 2009). 그러나 이는 시험 여건에 따라서 변경될 수 있다. 시료별 고장시간 결과를 사용하여 각 온도조건에서의 고장분포를 결정해 주고, MTTF를 추정하여 온도조건별 수명을 구해준다. 아레니우스 가속모형을 기반으로 수명 그래프를 그려서 열화 메커니즘별 활성화 에너지를 구할 수 있고, 온도조건별로 가장 짧은 수명을 갖는 열화 메커니즘을 확인할 수 있다.

<Table 2> Criteria for identical failure conditions

Parameter	Failure Criteria
$\delta I_{d,max}$	-10%
δ Threshold voltage	730mV
δ Transconductance	-20%
δV_{gon}	-1270mV
δ RF small signal gain	-1dB
δ Output power at 1 dB gain compression	-1dB

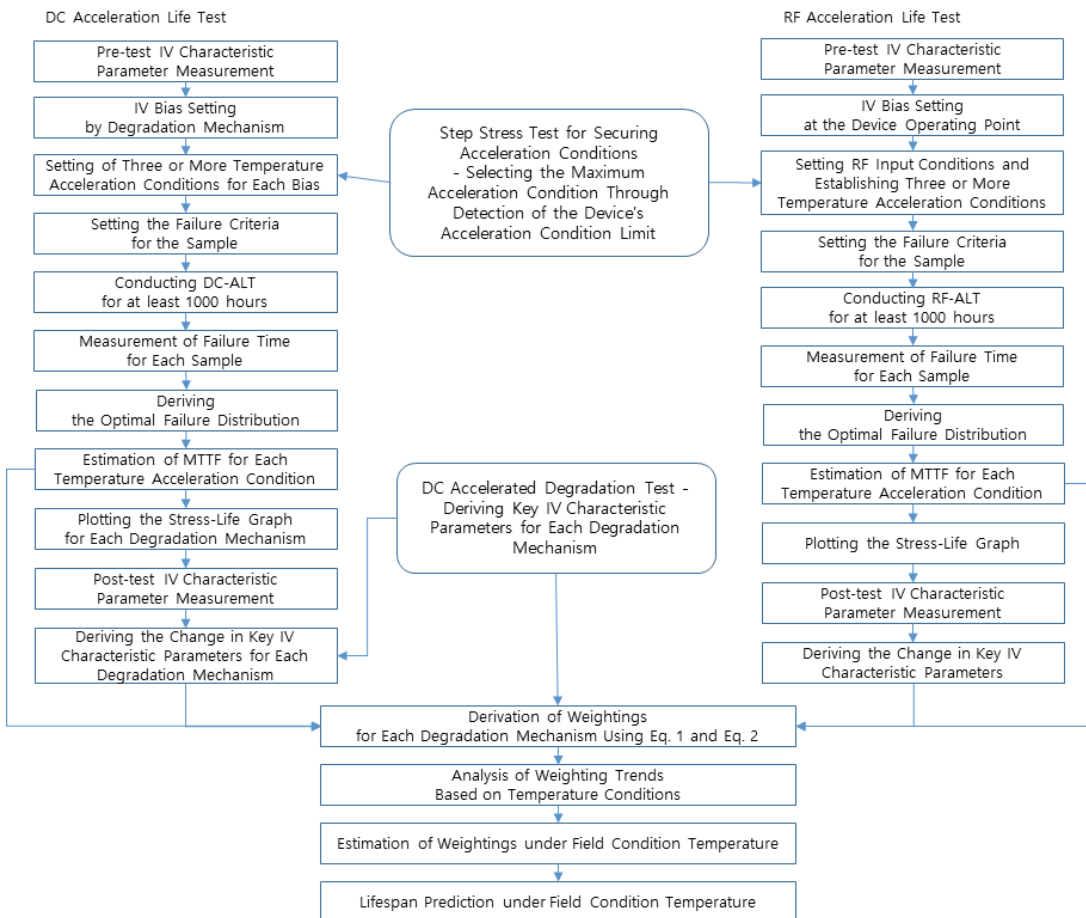
Note. The information in the table is recited from Paine et al. (2015c).

네 번째로 RF-가속수명시험을 실시한다. 시료의 고장시간 도출을 위한 고장기준은 출력전력 의 1dB 이득저하 지점으로 정한다. 고장기준은 시료의 기능 및 요구 성능에 따라서 변동될 수 있다. 적합한 고장분포를 추정하고 온도조건별 MTTF을 타점 해 준다. RF 가속수명시험은 열화 메커니즘의 복합적 영향을 받기 때문에, 온도조건별 고장수명을 확률지 상에 표시하였을 때, 동일한 활성화 에너지(E_a)를 갖는 선형 그래프로 나타나지 않을 수 있다.

다섯 번째로 DC-가속수명시험과 네 번째 RF-가속수명시험의 시행 전후에 IV 특징 매개변수 변화량을 측정하여, 식(2)의 열화 메커니즘별 가중치를 구한다. 그러나 최종적으로 식(1)을 얻을 수 있도록 가중치 $\alpha_n(T_{emp_m})$ 은 조정될 수 있다. 온도 조건별 $\alpha_n(T_{emp_m})$ 의 변화를 함수화하여 사용조건에서 $\alpha_n(T_{emp_m})$ 를 추정해 준다. 그리고 추정된 열화 메커니즘별 가중치를 적용하여 사용조건에서의 최종 수명을 구해준다. 이러한 전체 과정은 Figure 13과 같다.

GaN RF 반도체는 RF 입력에 의한 구동으로 IV 커브 상에 RF-Load line을 따라 전류-전압이 실시간으로 변화하는 동작을 한다. 그런데 GaN RF 반도체는 전류-전압 지점에 따라서 서로 다른 열화 메커니즘을 가지고 있고, 그 중의 특정 메커니즘이 절대적인 영향을 미치는 것이 아니라 여러 메커니즘이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 이러한 영향을 고려한 수명평가 방안이 요구되었다. 따라서 DC-가속수명시험과 RF-가속수명시험의 일반적인 절차를 통해 시료별 고장시간을 도출하고, 시험 전후의 전류-전압 특성 매개변수의 변화를 측정하여 그 관계성을 도출하고 나서 사용조건에서의 수명을 예측하는 방안을 제안하였다. 이를 위해서 GaN RF 반도체의 특성에 관한 논문 및 보고서에서 전압-전류 특성에 관한 열화 메커니즘별 분류를 확인하고 열화 메커니즘에 따른 IV 특성 핵심파라미터를 확인하였다. 가속수명시험은 산업계 및 학계 전문가들이 모여 구성한 표준화 협회에서 제정된 표준자료를 검토하였다. 기존의 제안된 연구는 하나의 온도 가속조건에 관한 RF 동작 가속열화시험을 진행하여 특징 매개변수의 변화량을 측정하고, 이 데이터를 DC-가속수명시험의 특징 매개변수 열화 결과와 비교하여 스케일링을 진행하였지만, 온도 수준에 따른 주요 열화 메커니즘이 무엇인지 확인시키는 방법으로만 사용되었다(Paine, 2015c). 이 방식은 RF 시험을 줄이면서 열화 메커니즘을 이해할 수 있는 장점이 있었다. 하지만 사용조건에서의 RF 동작 수명을 예측

하는 것까지는 적용되지 않았다. 다양한 가속조건에 관한 시험을 기존보다 편리하게 시행할 수 있는 장비를 개발함으로써, RF-가속수명시험의 복잡성에 관한 문제를 해결하였다. 실제 GaN RF 반도체를 포함한 RF 통신용 반도체의 성능에 있어서 RF 출력 저하가 가장 중요한 매개변수인 만큼, 이에 관한 직접적인 RF-가속수명시험 데이터를 확보하고, DC-가속수명시험을 통한 열화 메커니즘별 IV 특성 핵심 매개변수의 변화 관계를 활용하여, 사용조건의 RF 동작 수명을 예측하는 방안을 제안한 것이다.



<Figure 13> RF lifetime prediction method of GaN RF semiconductor with complex degradation Mechanisms

IV. 분석결과

방위산업 원천기술확보를 위한 GaN RF 반도체의 국산화가 진행되면서 GaN MMIC의 성능향상을 위한 반도체 설계 및 제작에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 더불어 유무인 무기체계의 주요 부품인 송수신 모듈의 신뢰성 평가에 관한 연구도 진행되고 있지만, 송수신 모듈의 핵심 소자인 GaN RF 반도체에 관한 신뢰성 평가에 관한 연구가 미흡한 상황으로 특히 반도체의 신뢰성 평가 중 수명평가에 관한 필요성이 요구되고 있다. GaN RF 반도체의 수명평가는 무선통신 기능을 위한 RF 동작이 핵심이므로 RF 입력을 가속인자로 사용하여 실사용 조건을 모사하는 RF-수명평가가 중요하다. 그러나 기존에 RF 입력을 인가하는 가속수명시험의 복잡함과 고비용으로 인하여 반도체의 DC 동작점에 해당하는 DC 전원만을 공급한 상태에서 DC-가속수명시험을 진행해 왔다. 본 연구는 RF 통신용 반도체를 위한 수명평가시스템을 개발하였으며, RF 신호를 포함한 다양한 가속인자를 시료별로 개별적 제어가 가능하도록 구성하여 시험의 복잡성을 낮추고 효율성을 개선하였다. 본 연구를 통해서 개발된 수명평가시스템을 사용하여 열화 메커니즘별 DC-가속수명시험과 RF-가속수명시험의 결과를 더 효과적으로 획득할 수 있다. 또한 본 연구의 GaN RF 반도체의 수명평가 방안은 GaN RF 반도체의 RF 동작에 관한 주요 열화 메커니즘이 한가지로 동일하게 나타나지 않고 가속 온도조건과 시간에 따라 달라질 수 있다는 연구결과를 반영한 것으로 기존 수명평가방식으로 사용온도조건 수명추정이 어려울 수 있다는 문제를 보완하기 위해 제안된 것이다. 수명평가 시스템에서 획득된 결과를 사용하여 열화 메커니즘별로 스트레스-수명 간의 관계를 도출하고 가속 조건 변화에 따른 여러 열화 메커니즘과 반도체 수명과의 관계성을 찾아서 관련 수식을 구함으로써, 정상사용조건에서의 수명을 예측하도록 하는 복합 열화 메커니즘이 고려된 수명예측 방안을 제안하였다. 수식을 구함에 있어서, RF-가속수명시험에서 나타나는 복합 열화 메커니즘의 영향을 반영하기 위해서, RF-가속수명시험으로 나타나는 시료별 IV 매개변수의 변화율을 측정하고, 이를 DC-가속수명시험의 IV 매개변수 변화율과 비교하여 열화 메커니즘별로 획득된 DC 수명의 가중치를 획득한 후에, RF 가속수명시험의 온도수준별 가중치의 변화를 도출하는 방안이 적용되었다.

후속연구는 실제 가속수명시험의 데이터를 바탕으로 제안된 수명예측 방안의 적합성에 관한 검증이 이루어져야 할 것이다. RF-가속수명시험의 온도조건별 MTTF가 아레니우스 가속모형에 관하여 동일한 활성화 에너지의 범위를 벗어날 때, 이것이 주요 열화 메커니즘의 변화인지 시료수의 부족으로 인한 오차 발생인지를 검토할 수 있어야 한다. 또한, 열화 메커니즘별 IV 특성 주요 매개변수가 모든 시료에서 동일하지, 차이가 발생한다면 그것이 타당한 것인지 검토되어야 하며 가속 온도조건과 열화 메커니즘별 가중치의 변화에서 실제로 일정한 관계가 성립하는지 검증되어야 한다. 제안된 수명예측 방안은 여러 열화 메커니즘별 DC-가속수명시험과 열화 메커니즘별 IV 특성 파라미터의 분석이 추가로 진행되어야 하므로, 수명예측을 위한 시험기간 및 비용이 증가하는 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 시험의 간소화를 위해서 IV 특성 매개변수의 변화량 측정 없이 열화

메커니즘별 DC-가속수명시험 결과만을 가지고 RF-가속수명시험과의 관계를 정립하여 가중치를 도출할 수 있는지 확인하는 연구가 필요하다. 개발된 RF-수명평가시스템을 사용하여 여러 GaN RF 반도체 시료에 관한 시험을 진행하고 데이터를 확보함으로써 열화 메커니즘별 가중치의 변화가 시료별로 어떤 경향을 보이는지 분석된다면, 시료별 수명평가를 최소화하면서 복합적 열화 메커니즘의 영향을 고려한 수명예측 방안을 제시하는 방향으로 연구가 진행될 수 있을 것이다. 또한, 정상 사용조건에서 시료의 수명에 가장 큰 영향을 미치는 열화 메커니즘을 확인함으로써 반도체의 열화 현상을 개선하는 방법을 제시하는 연구에 활용될 수 있다.

결과적으로 본 연구는 GaN RF 반도체의 통신을 위한 RF 동작으로 발생하는 복합적인 열화 메커니즘과 수명 관계를 분석하는 기초자료를 제공함으로써, 향후 국산 GaN MMIC의 안정적 동작을 보장하는데 필요한 신뢰성 평가의 계획 수립 및 평가 장비개발에 관한 측면에서 이바지하는 바가 크다고 볼 수 있다.

Acknowledgements

Declaration of Conflicting Interests

The authors declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Author contributions

Conceptualization, Literature review, Resources and Data curation, Investigation and Methodology, Writing, Project administration and Supervision: CY, KY, and KH.

Reference

- Ahn, H. B., Ji, H. G., Kang, D. M., & Han, J. H. (2022). Design of GaN Low Noise Amplifier MMIC for 28 GHz Band 5G FR2 Communication for Base Station. *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, 59(5), 77–82. <https://doi.org/10.5573/ieie.2022.59.5.77>
- Automotive Electronics Council (2007). Standard AEC - Q100 - REV-G: FAILURE MECHANISM BASED STRESS TEST QUALIFICATION FOR INTEGRATED CIRCUITS. Retrieved from http://www.aecouncil.com/Documents/AEC_Q100_Rev_G_Base_Document.pdf
- Burnham, S. D., & Paine, B. M. (2017, May). Towards an RF GaN reliability standard. In Proceedings of the JEDEC Reliability of Compound Semiconductors Workshop, Indian Wells, CA, USA (Vol. 22). Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Bruce-Paine/publication/322702351_Towards_an_RF_GaN_Reliability_Standard/links/5a6a514f458515b2d0532910/Towards-an-RF-GaN-Reliability-Standard.pdf
- Chowdhury, U., Jimenez, J. L., Lee, C., Beam, E., Saunier, P., Balistreri, T., ... & Del Alamo, J. A. (2008). TEM observation of crack-and pit-shaped defects in electrically degraded GaN HEMTs. *IEEE Electron Device Letters*, 29(10), 1098–1100. <https://doi.org/10.1109/LED.2008.2003073>
- del Alamo, J. A., & Joh, J. (2009). GaN HEMT reliability. *Microelectronics Reliability*, 49(9–11), 1200–1206. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2009.07.003>
- Department of Defense (1995). MIL-STD-750D: Test Methods for Semiconductor Devices. Retrieved from https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/NSWC_Crane/SD-18/Test%20Methods/MILSTD750.pdf
- Han, S. H., Sung, H. W., & Kim, D. W. (2022, October, 20–22). *Design and Fabrication of Ku-band GaN Low Noise Amplifier MMIC*. [Paper Conference]. Fall conference 2022 of Society of Electrophysics and Application, Gangneung, Korea. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11205086>
- Jang, Y. (2022). A Study on the Military Application of the Futuristic Unmanned Autonomous Weapon System. *Korea Journal of Military Affairs*, 11, 135–155. <https://doi.org/10.33528/kjma.2022.6.11.135>
- JEDEC (2010). JESD22-A108D: Temperature, Bias and Operating Life. Retrieved from <https://www.jedec.org/sites/default/files/docs/22A108D.pdf>
- JEDEC (2013a). JEP118-A: Guidelines for GaAs MMIC PHEMT/MESFET and HBT Reliability

- Accelerated Life Testing. Retrieved from <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jep-118>
- JEDEC (2013b). Standard JESD226: RF Biased Life Test Method. Retrieved from <https://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD226.pdf>
- Joh, J., & del Alamo, J. A. (2010, December). *RF power degradation of GaN high electron mobility transistors*. In 2010 International Electron Devices Meeting (pp. 20-25). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2010.5703397>
- Kim, J. S., & Son, H. G. (2022). A Study on Methods to Improve The reliability of The Search Radar Semiconductor Transceiver Assembly. *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 23(7), 457-465. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.7.457>
- Lee, S. H., Kim, Y. H., & Park, Y. J. (2022, June, 29 to July 1). *Development of 10W GaN Power Amplifier MMIC in Ka Band*. [Paper Conference]. Summer conference 2022 of The Institute of Electronics and Information Engineers. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11132419>
- Lee, Y. H., Kim, J. Y., Moon, K. S., & Lee, K. S. (2021). A Study on Stockpile Reliability Program for Effective Life Cycle Management of Domestically Developed Missile. *Journal of the Korea Association of Defense Industry Studies*, 28(1), 81-91. <https://doi.org/10.52798/KADIS.2021.28.1.7>
- Lim, B. O., Go, J. S., Ryu, K. K., & Kim, S. C. (2022). A X-band 40W AlGaIn/GaN Power Amplifier MMIC for Radar Applications. *Journal of IKEEE*, 26(4), 722-727. <https://doi.org/10.7471/ikeee.2022.26.4.722>
- Meeker, W. Q., & Hahn, G. J. (1985). How to plan an accelerated life test: Some practical guidelines. ASQC Statistics Division.
- Meneghesso, G., Meneghini, M., Tazzoli, A., Stocco, A., Chini, A., & Zanoni, E. (2010). Reliability issues of gallium nitride high electron mobility transistors. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2(1), 39-50. <https://doi.org/10.1017/S1759078710000097>
- Meneghesso, G., Verzellesi, G., Danesin, F., Rampazzo, F., Zanon, F., Tazzoli, A., ... & Zanoni, E. (2008). Reliability of GaN high-electron-mobility transistors: State of the art and perspectives. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 8(2), 332-343. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2008.923743>
- Nakkala, P. (2015). *Pulsed IV and RF characterization and modeling of AlGaIn HEMTs and Graphene FETs*. [Doctoral dissertation, Université de Limoges]. Retrieved from <https://theses.hal.science/tel-01175525/>
- Noh, Y. S., Kim, S. I., Lee, S. H., Ahn, H. K., & Lim, J. W. (2022, November, 16-18). *A Study*

- on the X band GaN Single-chip Transceiver MMIC Design. [Paper Conference]. Fall conference 2022 of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Gyeongju, Korea. Retrieved from https://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NODE_11197331
- Paine, B. M. (2015). Scaling DC lifetests on GaN HEMT to RF conditions. *Microelectronics Reliability*, 55(12), 2499-2504. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.09.024>
- Paine, B. M., Ng, V. T., Polmanter, S. R., Kubota, N. T., & Ignacio, C. R. (2015c, April). *Degradation rate for surface pitting in GaN HEMT*. In 2015 IEEE International Reliability Physics Symposium (pp. CD-1). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2015.7112786>
- Paine, B. M., Polmanter, S. R., Ng, V. T., Kubota, N. T., & Ignacio, C. R. (2015a). *GaN HEMT lifetesting - characterizing diverse mechanisms*. In Proceedings of the International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology. 321-324. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Bruce-Paine/publication/313207825_GaN_HEMT_Lifetesting_-_Characterizing_Diverse_Mechanisms/links/589282bea6fdcc1b4146c45a/GaN-HEMT-Lifetesting-Characterizing-Diverse-Mechanisms.pdf
- Paine, B. M., Polmanter, S. R., Ng, V. T., Kubota, N. T., & Ignacio, C. R. (2015b). Lifetesting GaN HEMTs with multiple degradation mechanisms. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 15(4), 486-494. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2015.2474359>
- Stocco, A. (2012). *Reliability and failure mechanisms of GaN HEMT devices suitable for high-frequency and high-power applications*. [Doctoral dissertation, Università degli Studi di Padova]. Retrieved from https://www.research.unipd.it/retrieve/e14fb26f-af90-3de1-e053-1705fe0ac030/AntonioStocco_PhD_thesis.pdf
- Sung, H. W., Han, S. H., Kim, S. I., Ahn, H. K., Kim, J. W., & Kim, D. W. (2022a). X-Band GaN Monolithic Microwave Integrated Circuit Low Noise Amplifier Using Inductive Source Degeneration. *The Journal Of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 33(5), 356-364. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2022.33.5.356>
- Sung, H. W., Han, S. H., Kim, S. I., Ahn, H. K., Lim, J. W., & Kim, D. W. (2022b). C-Band GaN Dual-Feedback Low-Noise Amplifier MMIC with High-Input Power Robustness. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 22(6), 678-685. <https://doi.org/10.26866/jees.2022.6.r.137>
- Via, G. D. (2014). GaN Reliability - Where we are and where we need to go. CS ManTech, 15-18. Retrieved from <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=9933aa5d89dd56ec0ad8ae29caeba94f73fc41a8>

원 고 접 수 일 2023년 03월 26일

원 고 수 정 일 2023년 08월 12일

게 재 확 정 일 2023년 08월 18일

<부록>

<부록 1> GaN MMIC 국산화 연구개발 현황

연구개발 내용	주파수 [GHz]	이득 [dB]	P1 [dBm]	사용 공정	연구자
X-대역 GaN MMIC 저잡음 증폭기	8.7~11.5	> 20	17.1~24.3	0.2um GaN HEMT	Sung et al. (2022a)
X-대역40W GaN 전력 증폭기 MMIC	9~10	> 21.6	46.11	0.25um GaN HEMT	Lim et al. (2022)
X대역 GaN 단일칩 송수신 MMIC	9~10.5	> 38	42.8	0.2um GaN HEMT	Noh et al. (2022)
Ku-대역 GaN 저잡음 증폭기 MMIC	15~16	> 21.1	정보 없음	0.2um GaN HEMT	Han et al. (2022)
Ka대역 10W급 GaN 전력증폭기 MMIC	34~39	> 15	40	0.15um GaN HEMT	Lee et al. (2022)
28 GHz 대역 5G FR2 통신 기지국용 GaN 저잡음 증폭기 MMIC	20.5~22	> 13.8	35	0.15um GaN HEMT	Ahn et al. (2022)
C-Band GaN 저잡음 증폭기 MMIC	4.3~7.4	> 21.4	14.3~20.1	0.2um GaN HEMT	Sung et al. (2022b)

<부록 2> 반도체 수명평가 표준

구분	설명
(MIL-STD-883) Test Method Standard for Microcircuits	군사 및 국방 분야에서 사용되는 반도체 부품의 테스트 방법에 관한 표준이다. 이 표준은 반도체 부품의 신뢰성 평가를 위한 다양한 테스트 절차를 다룬다. MIL-STD의 경우, 몇 가지 지침에서 가속수명시험에 관한 지침을 찾을 수 있다. MIL-STD-883의 Method. 1007에서 Operating Life test에 관하여 명시하고 있다. 그러나, RF 스트레스를 인가하는 방식에 관한 구체적인 표준으로 직접 명시된 것은 없다.
(AEC-Q100: Automotive Electronics Council-Q100) Failure Mechanism Based Stress Test Qualification for Integrated Circuits	자동차 산업을 위한 반도체 부품의 신뢰성 평가를 위한 표준이다. 이 표준은 자동차 전자 부품의 수명예측, 신뢰성 테스트, 기능 안정성 등을 다룬다. AEC-Q100은 사용조건보다 가속화된 방식으로 장애를 촉진하는 것을 목표로 한다. 이 사양은 MIL-STD883 “Test Methods and Procedures for Microelectronics”과 JESD-22 “Reliability Test Methods for Packaged Devices”를 참조하였다. 이 표준 또한 고온동작수명시험(HTOL)을 통해서 가속계수를 도출하고 보증수명을 추정하는 방식을 설명하고 있지만, RF 스트레스 인가 방식에 관한 직접적인 언급은 없다.
(JEP118A) Guidelines for GaAs MMIC PHEMT/MESFET and HBT Reliability Accelerated Life Testing/ (JESD226) RF BIASED LIFE (RFBL) TEST METHOD: JEDEC(Joint Electron Device Engineering Council)	반도체 산업의 표준 개발을 위한 국제 표준화 조직으로, 반도체 부품의 신뢰성 평가를 위한 다양한 표준을 발표한다. JESD22시리즈는 반도체 신뢰성 테스트에 대한 다양한 표준을 포함하고 있다. JEP118A에서 GaAs MMIC의 신뢰성 가속수명시험에 관하여 설명하고 있고, JESD226에는 RF Biased LIFE TEST에 관하여 명시하고 있다

유무인무기체계에서 사용되는 질화갈륨(GaN) RF 반도체의 수명평가시스템 개발 및 수명예측 방안*

최영락** · 강윤호*** · 김형국****

국문초록

본 연구의 목적은 질화갈륨(GaN) RF 반도체의 수명예측을 위해서 RF 스트레스를 인가할 수 있는 평가 시스템을 개발하고, 열화 메커니즘의 복합적 영향을 고려하여 수명예측이 가능한 시험방안을 제안하는 데 있다. 통신용 반도체의 수명평가 시에는 실제 사용조건을 모사하기 위해서 RF-입력의 인가가 요구된다. 개발된 수명평가시스템은 광대역 고출력 RF 스트레스를 시료별로 인가하고 시료의 RF 특성변화를 실시간 측정할 수 있도록 구성되었다. 더불어 온도 및 전압 스트레스를 각각의 시료에 대해 독립적으로 제어할 수 있도록 설계 및 제작하였다. 제작된 장비는 시험의 용이성을 개선하여 효율적인 수명평가뿐만 아니라 반도체의 실시간 열화 경향 데이터 확보를 가능하게 하였다. 개발된 수명평가시스템을 활용하여 가속수명시험을 실시하여서 사용조건(Field condition)에서의 반도체 수명을 추정할 수 있다. 그러나 기존의 갈륨비소(GaAs) RF 반도체와 달리 질화갈륨(GaN) RF 반도체는 RF 동작에서 한가지 열화 메커니즘의 영향이 두드러지게 나타나지 않고 열화 메커니즘들의 복합적 영향이 나타나게 된다. 따라서 가속조건별 고장분포에서 추정된 고장시간을 가속모형에 따라 외삽하는 기존 방식으로는 사용조건 수명을 예측하기 어려우므로, 새로운 수명추정 방법을 제안하였다. 열화 메커니즘별 IV 특성 매개변수를 확인하고, 열화 메커니즘별 해석이 가능한 DC-가속수명시험과 복합적 열화 메커니즘을 나타내는 RF-가속수명시험과의 관계를 도출한다. 그 후 사용조건에서 각 열화 메커니즘별 영향에 관한 가중치를 구해서 수명을 예측하는 방법이다. 본 연구는 추후 반도체 신뢰성 평가의 체계적인 계획 수립 및 평가 장비 개발 방향에 필요한 기초자료를 제시했다는 점에서 의의가 있다. 또한, 본 연구의 제안된 방법으로 수명평가가 진행되어 열화 메커니즘에 따른 데이터가 도출된다면 향후 질화갈륨(GaN) RF 반도체의 신뢰성 개선에 긍정적인 영향을 미칠 수 있을 것이다.

주제어 : 질화갈륨(GaN) RF 반도체 신뢰성, 수명예측, 열화 메커니즘, 가속수명시험

* 본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 산업통상자원부)의 재원으로 차세대지능형반도체사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: 20015696, 초고속 5G용 시스템 반도체의 고신뢰를 위한 지능형 수명평가시스템 개발).

** (제1저자) 광운대학교 일반대학원 전자융합공학과 박사과정 (규알티, 기술연구소, 연구실장, youngrak.choi@qrtkr.com, <https://orcid.org/0009-0004-4465-5460>).

*** (공동저자) 규알티(QRT) 기술연구소, 선임연구원, yunho.kang@qrtkr.com, <https://orcid.org/0009-0007-2393-3814>.

**** (교신저자) 광운대학교, 전자융합공학과, 교수, hkim@kw.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-1518-4100>.