



열 기계 스트레스에 대한 전력전자용 질화갈륨 소자의 신뢰성

GaN-on-Si High-electron-mobility transistors(이하 “GaN 소자”라 칭함)는 실리콘(Si)기반 소자에서 제한된 최대 접합온도(junction temperature, T_j) 150 °C 이상의 온도에서 동작 가능하다고 여러 연구에 소개돼 왔다^{[1],[2]}. GaN 소자가 150 °C 이상의 온도에서 동작이 가능한 것은 GaN 물질의 에너지 밴드 갭(3.4 eV)이 Si보다 2배 이상 높기 때문이다. 이러한 가능성에도 불구하고 150 °C 이상의 온도에서 동작하는 GaN 소자를 전력전자 시장에서는 아직 접할 수가 없다. 현재 상업화된 제품들의 최대 동작 온도가 실리콘 제품과 동일하게 150°C로 제한 되어있고, 이것은 GaN 제조사들이 기존의 가용 온도 범위 밖에서 GaN 소자의 신뢰성을 보장할 수 없음을 의미한다.

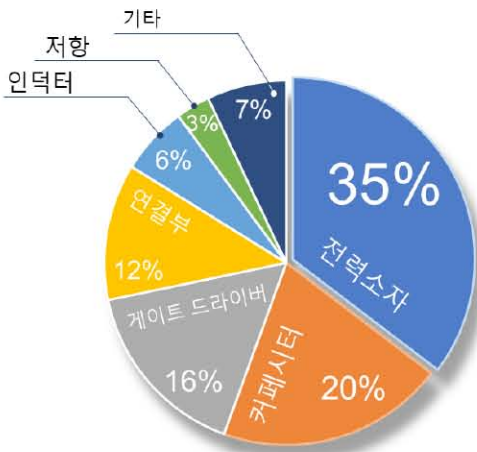
GaN 소자를 사용하는 전력 변환 시스템은 Si 소자를 사용하는 것에 비해 높은 전력 밀도를 달성할 수 있다^[3]. GaN 소자의 빠른 스위칭 특성은 능동 소자들의 부피를 줄여 시스템상에서 높은 전력 밀도를 가능하게 한다. 또한 전력 소자(power device) 측면에서 GaN 소자는 Si 소자보다 같은 면적에서 높은 전력량을 처리 가능하다. 이러한 장점은 공간이 제한된 다양한 활용 분야에 유리할 수 있다. 하지만 높은 전력 밀도는

높은 열 스트레스의 집중을 의미한다. 이는 열관리 및 신뢰성 측면에서 소자의 수명에 매우 부정적 영향을 끼친다. 그러므로, GaN 소자의 신뢰성에 대한 논의가 필요하다.

전력 소자는 전력 변환 시스템의 불량에 가장 크게 기여하는 부품이며, 전력소자의 불량은 주로 열과 관련된 스트레스에 의해 발생한다^{[4],[5]}. 그림 1은 전력 변환 시스템(power conversion systems)에서 어떤 소자가 가장 많은 불량을 야기하며, 전력소자의 불량을 유도하는 주요 스트레스 요인이 무엇인지 설명해 준다. 열 기계 스트레스는 현장에서 발생하는 전력 소자 고장의 주요 원인이 된다^[6]. GaN 소자가 향후 전력전자 시장에서 더 많은 선택을 받기 위해서, 열 기계 스트레스에 대한 GaN 소자의 신뢰성은 매우 중요한 검증 사항이다.

파워 사이클링 테스트는 전력 스위칭 소자의 열 기계 스트레스에 대한 신뢰성 검증, 수명 모델링, 불량 메커니즘 연구에 활용된다. 전력 소자는 스위칭 동작 시 소자 내 전력 소모에 의한 가열과 전력 차단에 의한 냉각을 지속해서 반복한다. 전력소자 내 가열과 냉각의 사이클은 궁극적으로 열 기계적 스트레스를 지속해서 유발한다. 파워 사이클링 테스트는 이러한 열 기계적 스트레스를 원하는 조건에 맞추어 재현

a 주요 부품별 불량 기여도(전력변환 시스템)



b 주요 스트레스 요인(전기 장치)

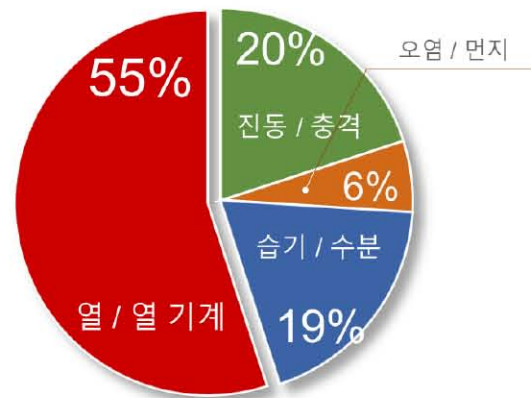
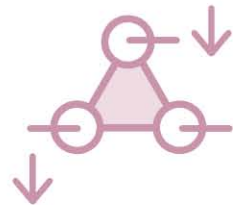


그림 1 (a) 전력 변환 시스템에서 주요 부품 별 불량 기여도, (b) 전기장치에 영향을 주는 주요 스트레스 요인^{[4],[5]}

한다. 파워 사이클링 테스트는 Si 기반의 소자들로 이미 많은 연구가 이루어졌다^{[7],[8]}. 하지만 GaN 소자와 같은 와이드 밴드 갭(WBG) 소자로는 아직 연구 초기 단계에 있다. GaN 소자는 Si에 기반한 소자들과는 소자 구조에서부터 패키징 기술까지 많은 차이점을 가진다. 그래서 우리는 상용화된 GaN 전력 소자들 중 가장 우수한 성능을 가진 650 V 제품을 선택하여 GaN 소자의 동작 특성을 고려한 파워 사이클링 테스트 방법을 제안, 테스트를 수행하였다^[9].

본 글에서는 이 파워 사이클링 테스트에서 확인된 불량 메커니즘에 대하여 설명하고자 한다. 테스트 결과 두 가지 불량 현상이 확인되었다. 먼저 열 전도도 열화 현상이 관측되었으며, 특히 Si 소자로 수행된 파워 사이클링 테스트에서는 전혀 보고되지 않았던 드레인과 소스 간 누설 전류 불량 현상이 새롭게 발견되었다. 이 현상의 메커니즘은 다양한 불량 분석 방법; 빛 방출 현미경(photon emission microscope, EMMI), 초점 이온 빔(focused ion-beam), 전자 현미경(scanning electron microscope)을 통해 자세히 해석될 예정이다. 소자의 세부적 구조를 반영한 3차원 모델과 함께 유한요소법(FEM) 시뮬레이션을 수행하여, 소자 내부의 국지적 열 기계적 스트레스의 집중을 해석하였다. 이 시뮬레이션 결과는 EMMI의 해석과 함께 비교 논의될 예정이다.



1. 양방향 파워사이클링 테스트

전력 변환 회로에서 GaN 소자는 추가 환류(freewheeling) 다이오드 없이 양방향 전도가 가능하다. 환류 다이오드는 유도성 부하 인덕터에서 발생하는 회기 전류로부터 전력 스위칭 소자를 보호하는 역할을 한다. Insulated gate bipolar transistor(IGBT)는 역방향으로 전류를 전달할 수 없으므로 반드시 환류 다이오드가 병렬로 이미터와 컬렉터에 연결되어야만 한다. Si 및 SiC MOSFET의 경우 body 다이오드가 그 역할을 할 수 있지만 그들의 높은 역회복 전하 때문에 전력 효율 측면에서 매우 불리하다. 때때로 Si 및 SiC MOSFET 효율을 높이기 위해 빠른 회복 특성을 가지는 쇼트키 다이오드를 추가로 사용하기도 한다. 하지만 GaN 소자는 이러한 동작에서 추가 소자 없이, 높은 효율의 역방향 전도가 가능하다. 이러한 장점을 활용한 연구들도 활발히 진행 중이다^{[10],[11]}.

GaN 소자에 양방향으로 전류를 흐르게 하는 것은 순방향뿐만 아니라 역방향에서도 소자 내부에 열 기계 스트레스를 유발할 수 있다는 것을 의미한다. 특히 역방향 조건에서는 GaN 소자의 게이트 하부 채널 저항이 순방향 대비 높아져 내부의 열 분포가 달라질 수 있다. 이 차이는 전도 모드에 따라 서로 다른 불량 메커니즘을 만들어 낼 수도 있다는 점을 의미한다. 순방향과 역방향의 불량 메커니즘에 대한 차이를 규명하기 위해 두 가지 전도 모드로 파워 사이클링 테스트가 진행되었다. 파워 사이클링 테스트 전략은 1초 가열구간 2초 냉각구간을 한 사이클로 구성하고, 가열 구간 1초 동안 원하는 온도 차를 만족하는 전류가 초기 스트레스 조건으로 설정되었다. 테스트

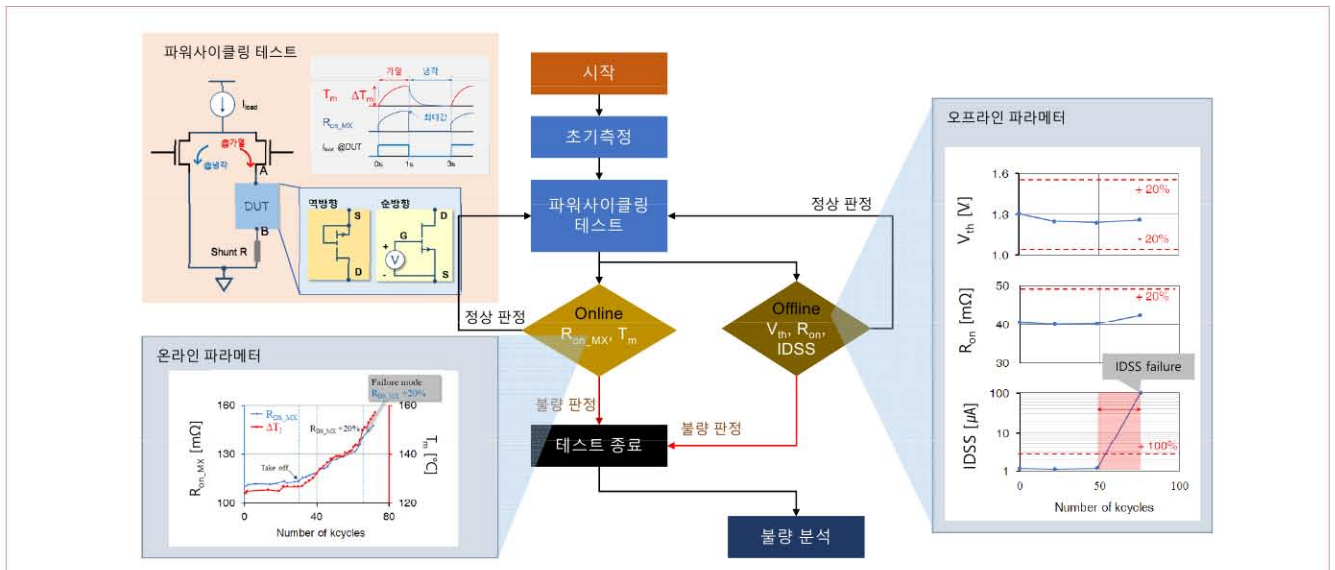


그림 2 양방향 파워사이클링 테스트 플로우 차트, 온라인, 오프라인 파라미터^[14]

표 1 파워사이클링 테스트 결과 (7개 시료, 3가지 테스트 조건)

시료	전도방향	$\Delta T_m [^{\circ}C]$ ($T_{m_MX} \sim T_{m_MIN}$)	$P_{Loss}[W]$	결함 확인 사이클 수	불량 현상
REV#1	역방향	99.9 (51.1~151.0)	25.5	160k	- 열전도도 열화 - 누설전류 불량
REV#2		-	27.1	74~106k	
REV#3		100.2 (52.3~152.5)	23.5	214~305k	
FWD#1	순방향	124.2 (23.7~147.9)	32.5	49~73k	- 열전도도 열화 - 누설전류 불량
FWD#2		124.1 (26.2~150.3)	33.9	22k	
FWD#3		120.2 (26.1~146.3)	31.0	38k	- 열전도도 열화
FWD#4		100 (24.1~124.1)	12.9	274k	- 열전도도 열화 - 누설전류 불량

종료까지 초기 전류 조건은 고정된다. 이 전류 조건은 테스트 결과와 함께 표1에 표시하였다. 이러한 테스트 전략은 참고 문헌 [12]에서 소개된 4가지의 파워 사이클링 테스트 전략 중 가장 가혹한 조건이며, 필드에서의 실제 동작 조건과 가장 유사하다. 소자의 온 저항(on-state resistance) 및 온도변화는 테스트 중에 실시간으로 모니터링된다. 소자의 온도(T_m)는 패키지 상부에서 고성능 적외선 카메라로 측정하였다. 본 패키지의 높은 열전도 특성 때문에 측정된 온도는 약 1 °C 차이로 소자 내부 접합 온도를 반영한다^[13]. 온저항은 오실로스코프로 측정한 두 가지 전압으로 계산한다. 먼저 Shunt 저항으로부터 측정된 전압은 전류값으로 환산되고, GaN 소자의 드레인과 소스 간의 전압과 함께 소자의 온저항이 계산된다. 이 온저항은 파워 사이클링 가열 구간 동안 온도 변화에 의해 변하므로 구간 내 최댓값(R_{on_MX})을 기준으로 불량을 판정하였다. 이 두 값은 온라인 파라미터로 표기한다. 그리고 주기적으로 소자의 문턱 전압(V_{th}), 온저항(R_{on}), 누설전류(IDSS)가 파워 사이클링 테스트 회로에서 벗어나 커브 트레이서에서 측정되었다. 이들은 오프라인 파라미터로 표기한다. 테스트에서 테스트되는 소자(device under test, DUT)의 불량 판정 기준은 누설 전류를 제외한 모든 값은 테스트 초기치에서 +/- 20 %로, 누설 전류의 경우는 +100 %로 적용하였다. 그림 2는 전반적인 테스트 플로 차트와 테스트 중 소자의 불량을 판단하는 근거가 되는 온라인/오프라인 파라미터를 보여준다.

2. 파워사이클링 테스트 결과

총 7개의 소자를 3가지 다른 스트레스 조건에서 테스트하였다. 표 1은 결과를 보여준다. 전도 방향에 따른 불량현상의 뚜렷한 차이점은 관찰되지 않았다. 기본적으로 온도 변화가 큰 조건에서 짧은 수명을 보여주었다. 이들의 주요 불량 현상은 공통으로 소자의 열 전도도 열화 현상과 누설전류 불량이 관찰되었다. 열 전도도 열화 현상은 실온에서 측정된 오프라인 파라미터 R_{on} 의 변화 없이 관찰되었다^{[9],[13],[15],[16]}. 이것은 패키지 내 상부 전기적 연결 부위의 불량 없이 오직 열전달 구간에서의 불량을 의미한다. 기존 연구에서 이와 같은 불량은 주로 솔더 접합부와 관련이 있었다. 소스와 드레인 간의 누설 전류 불량은 기존 파워 사이클링 테스트에서 보고되지 않은 새로운 불량 현상이다. 이러한 불량 현상은 GaN 다이, 패키지, 혹은 PCB 보드 상에서 모두 발생할 수 있으므로 광범위한 불량 분석이 요구된다. 확인된 두 불량 현상은 다음 장에서 자세히 분석될 예정이다.

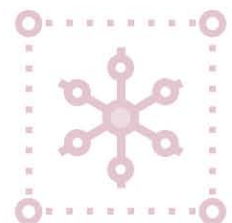




그림 3 (a) GaN 소자 footprint & 열화상 이미지, (b) FWD#1의 파워사이클링 테스트 전후 솔더 접합층SAM 분석 결과, (c) FWD#1의 소스 패드, 드레인 패드, TPAD 위치의 SEM 단면 분석 결과

3. 불량 분석

우리는 파워 사이클링 테스트 결과에서 두 가지 불량 현상을 확인하였다; 1. 열 전도도 열화, 2. 누설전류 불량. 첫 번째 불량 현상은 기존 파워 사이클링 테스트에서도 확인되었던 불량 현상이며, 불량의 원인은 다이 표면에서 히트싱크까지 이어지는 열 전달 경로에서 찾을 수 있다. 두 번째 불량의 특이 점은 온저항 및 문턱접압의 불량 없이 누설 전류 불량만이 확인되었다. 실제 이러한 불량현상은 기존 Si 소자에서는 확인할 수 없었던 새로운 불량 현상이며, 만약 현장에서 누설 전류 불량 현상이 발생한다면 쇼트서킷(short circuit) 현상을 유발하여 GaN 소자뿐만 아니라 시스템 전체에 손상을 줄 수 있다. 열전도도 열화 현상의 원인분석을 위해 스캐닝 어쿠스틱 현미경(SAM)을 사용하였다. 이것은 비 파괴 검사로 음파를 이용하여 소자를 구성하고 있는 층들의 내부 바리, 보이드(void), 결함 등을 찾을 수 있게 해준다. 분석 방법은 테스트 전 촬영 이미지와 불량 발생 이후 촬영 이미지를 비교하여 이상 여부를 확인할 수 있다. 실제 스캐닝 될 시료는 GaN 소자, 솔더 접합 층, 그리고 Al PCB로 구성되어 있다. 그림 3(b)는 FWD#1의 분석 결과를 보여준다. 스캔은 전층을 대상으로 실시하였으며, 솔더 접합 테스트 전후에 확연히 달라진 열 패드(TPAD) 하부 솔더 층을 보여준다. 실제 동작 시 주요 열전달 경로인 TPAD의 솔더는 심한 변화가 보이지만 전기적 연결을

제공하는 다른 솔더 층에는 특별한 이상이 보이지 않았다. 이 분석 결과 테스트가 진행되는 동안 TPAD 하부 솔더 층이 심한 열 기계 스트레스에 노출되었음을 보여준다.

솔더 접합부의 불량 형태를 확인하기 위해 단면 분석을 진행하였다. 시료 준비는 GaN 소자가 PCB 보드에 붙어 있는 상태로 에폭시 몰딩을 진행하였다. 이후 물리적으로 분석 위치까지 갈아서, 이상 위치의 단면을 확보하였다. 그림 3(c)-B는 TPAD 하부의 분명한 솔더 접합부 균열을 보여준다. SAM 분석 결과와 동일하게 TPAD 영역을 제외하고는 모두 정상 솔더 품질을 확인할 수 있다. 확인된 솔더 층의 균열은 테스트 중에 발생한 열전도도 열화 현상의 원인이 된다.

누설 전류 불량에서는 정확한 불량 분석 위치를 찾는 과정이 선행되어야 한다. 누설 전류량은 수 마이크로암페어 정도이며, 마이크로미터 단위의 작은 결함 크기에서도 충분히 발생할 수 있다. 실제 패키지 상에서 수 마이크로 단위의 작은 불량 위치를 찾기는 매우 어렵다. 정확한 결함 위치를 2차원 상태에서 확인하기 위해 광 방출 현미경(EMMI) 분석 방법을 이용하였다. 분석을 위한 시료 준비는 패키지 상태의 GaN 소자를 PCB로부터 분리한 후, 패키지의 하부 부분을 화학적으로 부식시켜 분석하고자 하는 GaN 다이 하부를 노출하였다. 이 상태에서 패키지 상부의 모든 전기적 연결 구조물(Cu vias and Cu plats) 들은 남아 있다. 우리는 Cu vias를 통해 외부에서 소스와 드레인 사이에 분석에 필요한 전기적 바이어스를

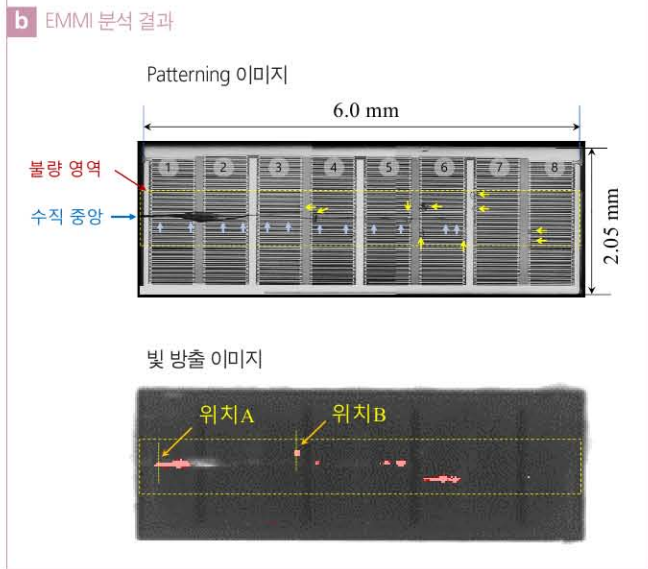
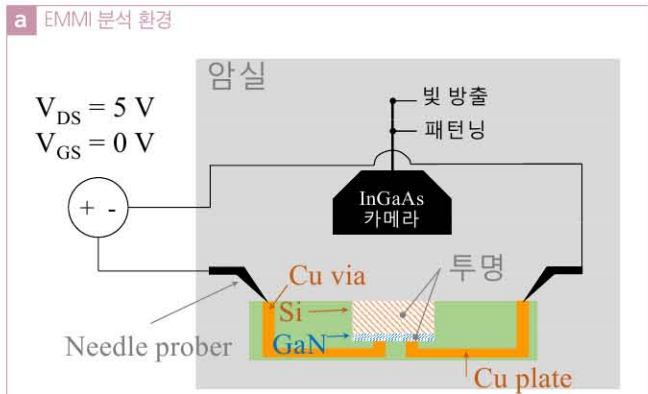


그림 4 (a) EMMI 분석 환경: 소자의 하부가 노출된 다이 상태, (b) FWD#4 EMMI 분석 결과: patterning 이미지, 빛 방출 이미지

가할 수 있다. 분석 시 InGaAs 카메라를 사용하여, 먼저 소자 내부 구조를 스캐닝 하여 patterning 이미지를 확보하였으며, 전류가 흐르는 조건에서 발생하는 미세한 빛을 스캐닝 하여 빛 방출 이미지를 확보하였다. 두 과정 모두 적외선 영역의 미세한 빛을 감지하기 위해 암실에서 진행된다. 그림 4(a)는 EMMI 분석 환경을 보여준다.

GaN 다이 영역에서 누설전류의 원인이 되는 이상 위치를 EMMI 분석을 통해 확인하였다. 그림 4(b)는 확인된 patterning 이미지와 빛 방출 이미지를 보여 준다. Patterning 상에서 확인된 결함 형태는 크게 두 가지 그룹으로 나누어 설명할 수 있다. 먼저 수직 중앙의 왼쪽 끝에서 중앙까지 가로 지르는 결함이 확인되었다. 이것은 파란색 화살표 그림 4(b)에 표시되었다. 또한, 총 8개 영역으로 나누어진 단위 GaN HEMTs 블록의 가장자리 부근에서 다수의 점(dot) 패턴 결함이 확인되었다. 이들은 노란색 화살표로 그림에 표시되었다.

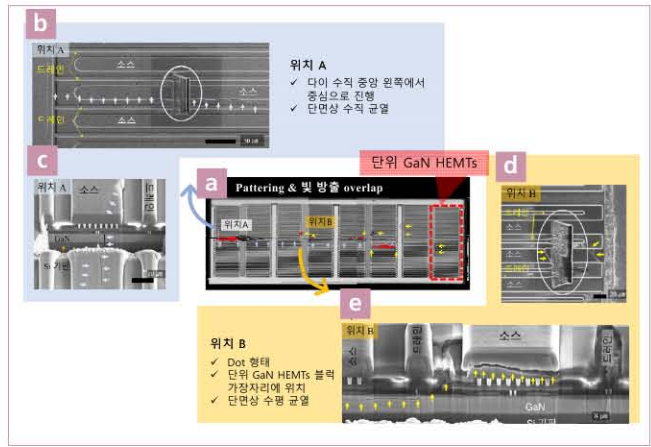
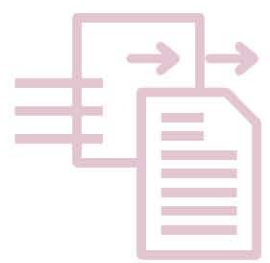


그림 5 (a) Patterning과 빛 방출 overlap 이미지, (b) 위치 A 평면도 이미지, (c) 위치 A FIB cutting 단면 이미지, (d) 위치 B 평면도 이미지, (e) 위치 B FIB cutting 단면 이미지

모든 결함은 다이의 수직 중앙 부근에 집중되어 있다. 이러한 결함이 어떻게 소스와 드레인 간의 누설전류에 직접적으로 영향을 주는지 확인하기 위해 그림 4(b)의 빛 방출 이미지에 표시된 두 위치에서 단면 분석을 수행하였다.

FIB와 SEM을 이용한 단면 분석 결과로부터 우리는 GaN HEMTs의 누설 전류 메커니즘을 이해할 수 있다. 그림5는 앞서 제시된 두 위치의 단면 분석 결과를 보여준다. 그림5(b)는 분석 위치A의 상부 면을 보여준다. 긴 형태의 균열이 소자의 소스와 드레인을 가로지름을 볼 수 있다. 그림 5(c)는 단면 이미지상 해당 균열이 다이의 상부 표면부터 GaN HEMT가 있는 주요 영역까지 깊이 진행되었음을 볼 수 있다. 그림 5(d)는 dot 형태의 결함이 관찰된 분석 위치B의 상부 면에서 확인되는 다중 균열을 보여준다. 그림 5(e)는 단면 분석 결과 GaN HEMT의 소스와 드레인을 관통하여 수평 방향으로 진행된 심각한 균열이 확인되었다. 여기서 확인된 단위 소자 내의 심각한 균열 들은 파워 사이클링 테스트에서 확인된 드레인과 소스 노드 사이 누설전류 불량원의 원인이 된다. 그러므로 파워 사이클링 테스트에 의해 새롭게 확인된 GaN 소자의 누설전류 불량은 반복된 열 기계적 스트레스에 의해 발생된 다이 내부 절연층의 다중 균열에 기인하였음이 불량분석 결과를 통하여 확인되었다.



4. FEM 시뮬레이션

패키지 내부의 열 기계 스트레스의 발생 원리를 이해한다면, 불량개선책을 도출할 수 있다. 열 기계 스트레스는 열 분포에 직접적 영향을 받는다. 다이 표면의 열 분포는 이전 불량 분석 과정에서 확인된 흥미로운 균열 발생 위치의 경향을 이해하는 데 도움을 주며, 소자의 열 기계 스트레스에 대한 취약점을 보완할 수 있도록 해준다. 실제 물리적 구조에 가까운 3차원 모델과 FEM 시뮬레이션을 통해 다이 상부의 열 분포를 간접적으로 해석할 수 있다.

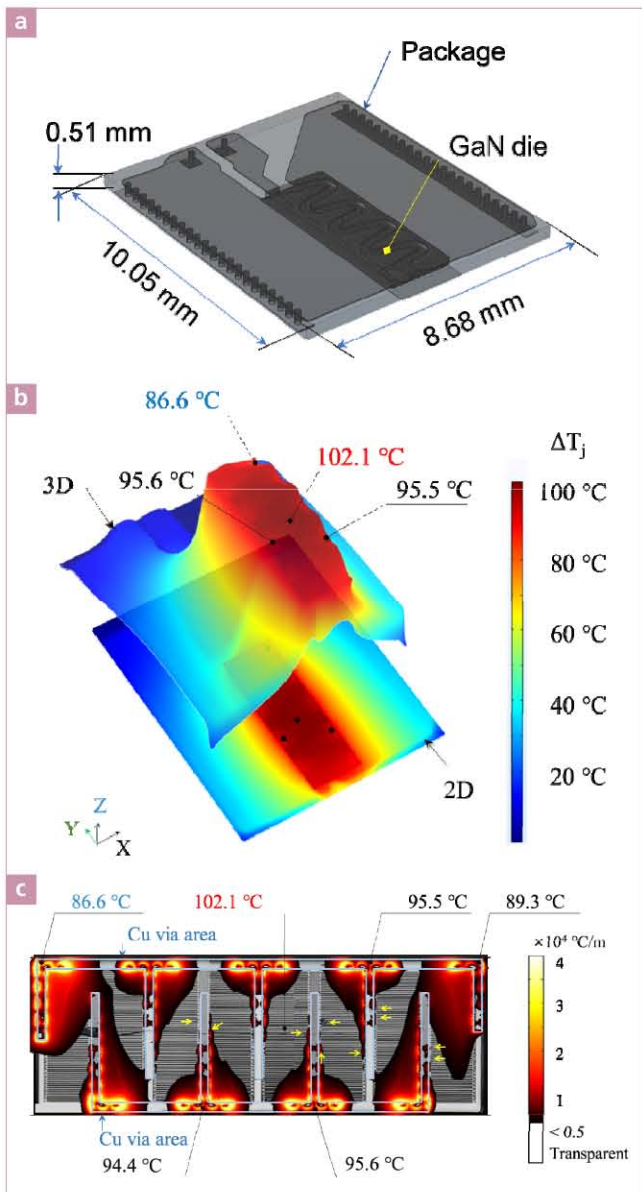


그림 6 (a) 열 FEM 시뮬레이션을 위한 3차원 물리적 모델, (b) 파워사이클링 테스트 동안 GaN 소자의 다이 높이에서 발생하는 온도 변화량, (c) 다이 영역 내 다이에 직접적으로 접합되는 Cu vias의 설계 형태와 FEM시뮬레이션으로부터 확인된 온도 구배

그림 6은 시뮬레이션에서 확인된 단일 사이클 동안 발생하는 온도 변화의 차이와 다이 상부 표면에서 국지적으로 집중되는 온도구배 그래프를 보여준다. 그림 6(a)에 보이는 3차원 모델은 실제 소자로부터 역공학(reverse engineering) 분석을 진행하여 마이크로미터 단위의 미세한 Cu 구조물들까지 실제에 매우 근접하게 구현하였다. 이 모델의 구현 과정과 실제 동작과의 정합성은 참고문헌 [18]에 자세히 설명되어 있다. 그림 6(b)는 단일 파워 사이클링 동안 다이 표면 높이에서 패키지 전체 발생하는 온도 변화의 차이를 보여 준다. 온도 변화가 가장 높은 부분은 다이 중앙 부분이고, 가장 낮은 부분은 다이 상부 왼쪽 부분으로 확인되었다. 왼쪽 가장자리 영역은 상부와 하부의 온도 차가 비대칭으로 확인되었다. 다이 표면에서 나타나는 전반적 온도 변화량의 차이는 테스트하는 동안 강력한 열 기계 스트레스를 유발할 수 있다. 이러한 스트레스 형태는 앞서 확인된 다이 왼쪽 끝에서부터 중심으로 길게 진행된 수직 형태의 균열과 매우 깊은 상관관계가 있어 보인다. 또한 다이 표면 열 분포 형태는 다이 표면 상부에 위치한 Cu plates의 형태와 닮았다. 이것은 온도 분포가 Cu plates의 설계 형태에 영향을 받음을 의미한다. 그림 6(c)는 다이 표면에서 발생하는 국지적 온도 구배를 그래프로 표현하였다. 그림에서 푸른색으로 표현된 영역은 다이에 직접적으로 접합되는 Cu vias를 설계 패턴을 보여준다. Cu의 높은 열전도도 때문에 Cu 주변으로 매우 큰 온도 기울기가 확인되었다. 이러한 급격한 온도 기울기 역시 국지적으로 심각한 열 기계적 스트레스를 유발할 수 있다. 그림 5(a) 확인된 점 형태의 수평 균열 패턴들은 모두 그림 6(c)에 표시된 Cu vias 근처에 위치한다. 열 분석 FEM 시뮬레이션 결과 앞서 확인된 결함 위치는 모두 패키지 내부의 Cu vias 및 Cu plate 설계 형태와 매우 큰 상관관계가 있다.

5. 논의

우수한 성능을 가진 상업용 GaN 소자를 열 기계적 스트레스에 노출했을 때 발생할 수 있는 불량 현상을 찾고 고장에 대한 메커니즘을 다양한 분석 기법을 통해 밝혔다. 먼저 GaN 소자의 양방향 전도 특성을 반영한 파워 사이클링 테스트가 소개되었다. 3가지의 다른 스트레스 조건에서 7개의 소자를 테스트하였다. 그 결과 열 전도도 열화와 누설 전류 현상이 확인되었다. 열 전도도 불량은 솔더 접합층의 균열에 의해 발생하였음을, 누설 전류 고장 현상은 GaN 다이 영역에 절연체 균열에 의해 발생하였음을 불량 분석을 통해 밝혔다.


테스트된 GaN 소자들의 고장 진단까지 사이클 수는 유사한 조건에서 수행된 기존의 Si 소자의 테스트와 비교하였을 때 상대적으로 길게 확인되었다^{[17][18]}. 이전의 파워 사이클링 테스트에서 주요 불량 현상은 와이어 본드 열화와 솔더 접합층의 열화 현상이다. 이 열화 현상은 보통 단일테스트에서 함께 발생하며, 하나의 불량 현상이 다른 하나의 열화를 가속화하기도 한다^[7]. 본 테스트에서 사용된 GaN 소자는 와이어 본드 대신 Cu vias와 Cu plates 구조물을 사용하였다. 이들은 패키지 내에 존재하는 기생 인덕턴스를 획기적으로 줄여 줄 뿐 아니라, 열 기계 스트레스 관점에서도 유리하다. 실제 테스트에서도 이 구조물 자체의 불량은 관찰되지 않았다. 테스트에서 확인된 결과가 모든 GaN 소자의 수명을 반영한다고 볼 수는 없지만, 와이어 본드를 사용하지 않는 패키지 구조가 사용된 경우보다 열 기계적 스트레스에 유리함을 확인하였다.

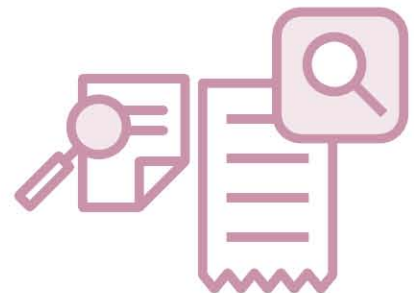
우리는 GaN 소자와 PCB 사이의 접합부의 신뢰성을 높일 수 있는 몇 가지 대안을 제시하고자 한다. 첫째로 기존 솔더 대신 은 소결(silver sintering)접합을 적용할 수 있다. 은 소결 접합은 기존의 솔더 보다 높은 열 전달 특성을 가질 뿐만 아니라 열 기계 스트레스에도 기존 솔더 보다 강하다^[19]. 두번째로 열 전달 특성을 높이기 위해 본 테스트에는 Al PCB가 사용되었다. 이것은 열 전달 특성에서는 유리한 면이 있으나, 열 기계 스트레스 관점에서는 Al의 높은 열 팽창 계수(CTE) 때문에 최적의 조건은 아니다. CTE 정합성 측면에서 우수한 direct bonded copper(DBC)를 Al PCB 대신 사용함으로써 솔더에 가해지는 물리적 스트레스를 감소시킬 수 있다.

다이 상부 절연층의 균열로부터 발생한 누설 전류 불량에 대한 대비와 개선책이 필요하다. 현장에서 이러한 불량은 쇼트 서킷 동작으로 이어지며, 심각한 경우 시스템 전체에 화재를 일으킬 수도 있다. 그러므로 설계자는 반드시 이 쇼트 서킷 동작에서 안전하게 시스템을 정지시킬 수 있는 구체적 대비책이 필요하다. 불량분석 결과 균열의 위치는 패키지 내부 Cu 구조물의 비대칭 설계 형태와 관련 있음이 EMMI 분석과 열 FEM 시뮬레이션을 통해 확인되었다. 우선 상부 Cu 구조물의 설계 형태가 대칭을 이루게 함으로써 다이 표면에 유발되는 열 기계적 스트레스를 줄일 수 있다. 열 기계 스트레스 관점에서 패키지 내 Cu vias 와 plates의 최적의 설계 조건은 추가적인 연구를 통해 제안될 수 있다. 또한 두꺼운 Si 기판도 다이 상부 균열에 부정적 영향을 줄 수 있다. 전체 GaN 다이에서 Si 기판이 90% 이상의 부피를 차지 한다. 가열 구간에서 두 층 간의 부피 차이와 열 팽창계수의 차이는 열 기계 스트레스를 가속화하는 요인이 된다. Si 기판의 두께를 줄임으로써 가열 시 다이에 가해지는 스트레스를 줄일 수 있다. 보다

얇은 Si 기판 두께는 소자의 높은 열 전도도 및 낮은 열 기계 스트레스 특성을 보장할 수 있다.

6. 결론

열 기계 스트레스 측면에서 향후 GaN 소자가 현재 온도 제한을 넘을 수 있는 가능성을 확인하였다. GaN 소자의 실제 동작 특성을 반영한 양방향 파워 사이클링 테스트를 제안하였으며, 총 7개의 시료가 3가지 스트레스 조건에서 테스트되었다. 테스트 결과 GaN 소자가 기존 와이어 본드를 사용하는 Si 기반 전력 소자에 비해 긴 수명을 가지는 것이 확인되었다. 테스트 결과 시료의 열 전도도 열화 현상과 GaN 소자의 소스와 드레인 간의 누설 전류 고장 현상이 확인되었다. 열 전도도 열화 현상은 열 기계 스트레스에 의한 GaN 전력 소자와 Al PCB 간 솔더 층의 균열에 기인 하였음이 SAM 과 SEM 단면 분석 결과를 통해 확인되었다. 누설 전류 불량은 열 기계 스트레스에 의한 GaN HEMTs 영역의 광범위한 다발성 절연 층 균열에 의해 발생하였음을 EMMI, FIB, 단면 SEM 분석을 통해 확인하였다. 패키지를 구성하고 있는 Cu vias와 Cu plates의 설계 형태가 이 절연 층 균열에 직접적 영향을 준다는 것이 FEM 시뮬레이션을 기반으로 설명되었다. 추가로 열 기계적 스트레스에 대한 신뢰성 특성을 개선할 수 있는 방향이 논의되었다. 이 글에서 설명된 불량 메커니즘 기반으로 추후 그들의 취약점이 보완된다면, GaN 전력 소자는 보다 높은 열 기계 스트레스에 대한 신뢰성을 보장할 수 있을 것이다. 



참고문헌

- [1] R. Chu et al., "Normally-off GaN-on-Si metal-insulator-semiconductor field-effect transistor with 600-V blocking capability at 200 °C," 24th ISPSD, Jun. 2012.
- [2] D. Marcon et al. "Excellent stability of GaN-on-Si high electron mobility transistors with 5 μm gate-drain spacing tested in off-state at record drain voltage of 200 V and 200 °C," Japanese journal of applied physics.
- [3] S. Song et al. "Performance assessment of commercial gallium nitride-on-silicon discrete power devices with figure of merit," IECON 2016, Oct. 2016.
- [4] S. Yang, "An industry-based survey of reliability in power electronic converters," IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 47, No. 3, May/June, 2011.
- [5] Handbook for robustness validation of automotive electrical/electronic modules, ZVEI, Frankfurt am Main, Germany, 2013.
- [6] M. H. Rashid, "Power electronics handbook-4th edition," Sep. 2017.
- [7] L. R. GopiReddy et al., "Power cycle testing of power switches: a literature survey," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 30, No. 5 May 2015.
- [8] U. Choi, F. Blaabjerg, and S. Jørgensen, "Power cycling test methods for reliability assessment of power device modules in respect to temperature stress," in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 3, pp. 2531-2551, Mar. 2018.
- [9] S. Song, S. Munk-Nielsen, C. Uhrenfeldt, and I. Trintis, "Failure mechanism analysis of a discrete 650V enhancement mode GaN-on-Si power device with reverse conduction accelerated power cycling test," 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, pp. 756-760, 2017.
- [10] W. Qian, J. Lu, H. Bai, and S. Averitt, "Hard-switching 650-V GaN HEMTs in an 800-V DC-grid system with no-diode-clamping active-balancing three-level topology," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 7, No. 2, pp. 1060-1070, Jun. 2019.
- [11] M. Wolf, O. Hilt, and J. Würfl, "Gate control scheme of monolithically integrated normally OFF bidirectional 600-V GaN HFETs," in IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 65, No. 9, pp. 3878-3883, Sep. 2018.
- [12] U. Scheuermann and S. Schuler, "Power cycling results for different control strategies," Microelectronics Reliability, pp. 1203-1209, Vol. 50, No. 9-11, Nov. 2010.
- [13] S. Song, S. Munk-Nielsen, and C. Uhrenfeldt, "How can a cutting-edge gallium nitride high-electron-mobility transistor encounter catastrophic failure within the acceptable temperature range," in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, No. 7, pp. 6711-6718, July 2020.
- [14] S. Song, "Reliability of GaN-on-Si high-electron-mobility transistors for power electronics application," Aalborg University, Ph.D. Thesis, Nov. 2018.
- [15] S. Song, S. Munk-Nielsen, C. Uhrenfeldt, and K. Pedersen, "Power cycling test of a 650 V discrete GaN-on-Si power device with a laminated packaging embedding technology," 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, pp. 2540-2545, 2017.
- [16] S. Song, S. Munk-Nielsen, and C. Uhrenfeldt, "Failure mechanism analysis of off-state drain-to-source leakage current failure of a commercial 650V discrete GaN-on-Si HEMT power device by accelerated power cycling test," Microelectronics Reliability journal, Sep. 2017.
- [17] A. Morozumi, K. Yamada, T. Miyasaka, S. Sumi, and Y. Seki, "Reliability of power cycling for IGBT power semiconductor modules," IEEE Transactions on industry application, Vol. 39, May/June. 2003.
- [18] U. Scheuermann and S. Schuler, "Power cycling results for different control strategies," Microelectronics Reliability, Vol. 50, No. 9-11, pp. 1203-1209, Sep./Nov. 2010.
- [19] J. Dai et al., "Comparative thermal and structural characterization of sintered nano-silver and high-lead solder die attachments during power cycling," IEEE Transaction on device and materials reliability, Vol. 18, No. 2, Jun. 2018.