

NEXT GENERATION POWER ELECTRONICS

NATIONAL MANUFACTURING INNOVATION INSTITUTE

차세대 전력전자 미국 제조 혁신기관

차세대 전력전자 미국 제조 혁신기관을 지원하고 있는 DfR Solutions 사는 현재 발행하고 있는 뉴스레터에 이와 관련된 글을 소개함으로써 WBG와 기타 반도체 기술에 대한 경험과 지식의 일부를 공유할 예정이다. 이러한 소개 주제는 디바이스와 디바이스 구조, 도체 신뢰성 평가(물리적, 전기적, 기계적), 설계와 가속 시험 수행, 그리고 기술적 애플리케이션을 포함한다.

글 | 에드워드 와이어스(Edward Wyrwas), DfR Solutions

문의 | 권 형 안 대표, 엑슬리트엠티

2014년 1월 오바마 대통령은 노스캐롤라이나 주를 미국에서 최첨단 연구기관 중 하나를 추진할 지역으로 선정했다. 백악관에 따르면, 이 차세대 전력전자 국립 제조 혁신 연구소(National Manufacturing Innovation Institute 또는 Power America)는 미국의 제조산업 분야를 강화하고, 첨단 제조기술을 육성하며, 성장하는 중간계층이 필요로 하는 좋은 일자리를 창출하기 위해 만들어진 3개의 새로운 제조 혁신 연구소 중 첫 번째에 해당한다.

이 연구소에는 향후 5년 내에 와이드 밴드갭(Wide Band Gap, WBG) 반도체 기술을 현재의 실리콘(Si) 기반 전력전자 제품보다 원가경쟁력이 높도록 만들어, 에너지 효율이 높은 차세대 대전력 전자 칩과 디바이스가 가능하도록 선도하는 임무가 주어졌다. 이러한 개선이 성공적으로 달성되면, 자동차, 소비가전은 물론 전력망(power grid)이 더 빠르고, 더 작으며, 더 효율적으로 동작할 수 있도록 지원하는 전력 전자장치를 만들 수 있게 된다.

DfR Solutions 사(한국 독점대리점 엑슬리트엠티)는 비 실리콘(Non-Silicon) 기반 반도체 소자에 대한 전력전자 제품의 신뢰성과 설계 분야의 리더십을 보유하고 있기 때문에 이 기관에 참여할 수 있는 업체로 선정됐다. DfR Solutions는 대전력 WBG 반도체 소자와 패키징에 대한 견고한 물리기반 모델(Physics-based model)을 개발하는 일을 돕게 된다. 또한, 이러한 모델을 Sherlock ADA™ 툴에 포함시킴으로써 참여 혁신기관 모두에게 핵심적인 신뢰성 데이터를 제공할 예정이다. 프로토타입이 만들어지기도 전에 물리기반 신뢰성 예측(Physics-based Reliability Prediction)을 할 수 있는 Sherlock ADATM 기능은, 첨단 기술에 대하여도 제조업체들이 제품 도입과 생산을 간소화할 수 있도록 도와줄 수 있다.

WBG 소개

지난 30년간 증폭기 시스템의 대부분에서 고체 소자(Solid-state devices)가 아닐

로그 회로와 진공관을 대체했지만, 이 혁명은 아직 완성되지 않았다. 통신 전송장치나 대전력 스위칭 애플리케이션을 위한 높은 RF 전력 분야는 여전히 견재하다. 이러한 애플리케이션을 지원하는 새로운 고체 소자의 개발과 고온에서도 동작하도록 여러 반도체 재료를 결합하는 것은 아직까지 반도체 전자분야에 남아 있는 미지의 개척 영역이다.

WBG 반도체 기술은 다른 능동소자 기술과 함께 발전하고 있다. 진공관 이래 고체 소자 기술은 더 빠르고, 더 강력하고, 더 신뢰성 있는 능동소자를 만들어내기 위해 발전하고 있다. 1940년대 말 처음 개발된 게르마늄 기반 소자는 1980년대에 갈륨비소(Gallium Arsenide, GaAs) 소자에 의해 추월을 당했다. 상업적인 실용화까지의 기간이 진공관보다는 짧았지만, 실리콘 기반 소자의 개발 성숙 기간보다는 훨씬 길었다. 다른 첨단 기술처럼, 제조공정을 개발하고 튜닝하는 기간은 그 소자의 대규모 상용화를 주도하는 요인이 된다. 1980년대에 BetaMax에 비해 VHS가 앞설 수 있었던 것처럼, 상대적으로 값싼 공정이 그 소자의 제

조나 대량 보급에 더 유리하게 작용한다. 이러한 경향은 제조기술의 향상을 통해 칩의 크기를 계속 줄이는 동시에 트랜지스터의 수를 늘려온, 무어의 법칙(Moore's Law)이 적용된 실리콘 기반 반도체 소자에서도 찾아볼 수 있다. WBG 재료의 높은 항복전압(breakdown voltage)과 높은 전자 이동성 및 포화 속도의 특성상 질화갈륨(Gallium Nitride, GaN) 소자는 대전력, 고온 애플리케이션에 이상적인 후보이다.

GaAs의 빠른 상업화와 마찬가지로, GaN과 탄화규소(Silicon Carbide, SiC)가 반도체 기술에서 영향력을 행사하고 있다. GaN이 주로 LED용 저전압 애플리케이션에 사용되는 데 반해, 중/고 전압 애플리케이션에서의 사용 확산은 제한적인데, 이는 큰 무결함 기판(Large Defect-free Substrates)을 생산하지 못하고 열전도성(thermal conductivity)이 약하며, 전력 애플리케이션에서 MOSFET과 IGBT를 생산할 수 없기 때문이다.

재료 특성화

고체 물리학(Solid State Physics)에서, 이 밴드 갭은 전자 상태가 존재하지 않는 고

체의 에너지 범위이다. 반도체 재료는 도체와 절연체 사이의 전기 저항을 갖는다. 반도체 재료가 전기를 전도하기 위해서는 원자가 전자대에서 전대로 뛰어오를 수 있을 정도의 에너지(밴드갭과 동일)를 전자가 얻어야만 한다. 밴드갭 에너지는 온도가 상승함에 따라서 줄어드는 경향이 있기 때문에, 더 작은 밴드갭을 가진 반도체는 고온에서 더 불안정하게 된다. 1.2 eV의 밴드갭을 가진 실리콘과 달리, WBG 재료는 전하이동을 시작하기 위해 더 많은 에너지를 요구한다(GaN은 3.4 eV 요구). 따라서 고온 애플리케이션에서는 WBG 재료가 고온 불안정성의 영향을 덜 받게 된다. 또한 이것들은 더 큰 열전도성을 가지고 있어서 채널(도체 경로) 온도가 섭씨 300도까지도 이를 수 있도록 한다. 실리콘 트랜지스터가 섭씨 140도 이상에서는 작동을 멈춘다는 사실을 기억하자.

WBG 재료의 비교

표 1은 SiC 대 GaN의 속성을 특성 면에서 구분한 것이다. SiC는 다양한 크리스탈 구조를 가지고 있어서 단지 공통적인 것만 보여주고 있다.

• 밴드갭

큰 밴드 갭은 더 높은 온도에서도 작동하게 한다. GaN은 이런 영역에서 장점을 보여주지만 소자에서의 온도 한계는 소자의 패키지나 시스템 수준 패키징과 같은 외부 수단에 의해 정해진다. 예를 들어, SiC 다이오드는 섭씨 200도 이상에서 작동하지만 TO-220 표준 패키지로 만들어지면 섭씨 200도 이하로 제한된다.

• 항복 전계

(Breakdown Field)

더 높은 전압 디바이스는 더 큰 항복 전계가 요구된다. SiC는 이 영역에서 GaN보다는 유리하지만 그 차이는 크지 않다. 어느 재료든 높은 전압 동작을 위한 좋은 선택이 될 것이다. 이 디바이스의 최대 동작 전압은 재료의 최소 두께를 결정한다. 그러나 다이 가장자리에서의 높은 전계 때문에 금속의 수지상(dendritic) 성장이 있을 수 있고, 이는 제약 요소가 될 수 있다.

• 이동성 및 포화 속도

(Mobility and Saturated Velocity)

정공과 전자의 이동성은 낮은 전계에

표 1 | SiC 대 GaN의 속성 비교

속성	6H-SiC	4H-SiC	GaN
밴드갭 (eV)	3.03	3.26	3.45
항복 전계(Breakdown Field) (KV/cm)	2500	2200	2000
전자 이동성(Electron Mobility) (cm ² /V-s)	500	1000	1250
정공 이동성(Hole Mobility) (cm ² /V-s)	101	115	850
포화 E-Drift 속도(Saturated E-Drift Velocity) (10E7/cm)	2	2	2.2
열전도성(Thermal Conductivity) (W/cm-K)	4.9	4.9	1.3
열팽창(Thermal Expansion) (x10E-6/K)	3.8	4.2	5.6

서의 디바이스 속도를 결정한다. 수치가 더 높으면 더 빠른 디바이스임을 나타내는데, GaN이 RF 애플리케이션에서 뛰어나다. 그러나 이는 낮은 전계에서다. 포화 속도는 높은 전계에서 정공/전자의 최대 속도이다. 저전력 디지털 게이트 또는 MOSFET과 같이 대전력 스위치 소자와 같은 스위칭 애플리케이션에서는, 이런 것이 재료의 속도를 결정하는 핵심 파라미터다. GaN은 이런 영역에서 SiC보다는 약간 낫다.

• 열전도성 (Thermal Conductivity)

열전도성이 높으면, 열저항이 더 낮아지고 접합부(junction)에서 열을 빼기 쉽다. 이는 전력 소자에서 중요한 파라미터인 RJC(접합부에서 케이스로의 열저항)에 직접적인 영향을 미친다. 특히 높은 열저항을 야기할 수 있는 높은 항복전압을 위한 두꺼운 에피 층 기판(Epi Layer Substrate)이 사용되는 곳에서의 고전압 소자에 대해 특히 그렇다. 표에서 보면, SiC가 GaN보다 상당히 우수해 전력 애플리케이션에서 탁월한 반도체 재료로 보인다.

• 열팽창 (Thermal Expansion)

열팽창은 다이 구조나 소자의 패키징에 문제를 초래할 수 있다. 예를 들어, 기판과 산화막 같은 재료들 사이에서 열팽창의 차이가 너무 크면 갈라질 가능성이 커진다. 다른 반도체 재료에 비해서 GaN이 높다.

전력 애플리케이션

고주파용으로 설계된 MOSFET 및 BJT 같은 표준 실리콘 반도체 소자는 낮은 항복전압에 의해 RF 출력 생성이 근본적으로 제

한된다. 이들의 상대적으로 떨어지는 열전도성은 적당한 열저항을 가진 디바이스를 만들어내기 어렵게 한다. 높은 RF 출력용으로 설계된 디바이스는 고온에서 작동하는 경향이 있고, 이는 곧 디바이스 성능을 제한한다. 대전류를 사용하는 전원장치 설계는 더 큰 단면적을 가진 디바이스를 필요로 한다. 큰 단면적은 임피던스 일치를 아주 어렵게 만드는 낮은 임피던스 입력 값을 생성한다.

대전력 실리콘 MOSFET은 온저항(on-resistance)과 그 항복전압 사이의 트레이드오프 특성 때문에 높은 온저항을 가진다. 따라서 디바이스 전도 손실(Conduction Loss)을 최소화하고 디바이스 정전용량을 높이기 위해서는 큰 칩 영역이 필요하다. GaN HEMT(High Electron Mobility Transistor)는 반대로 상당히 낮은 온저항을 가지고 있다. 따라서 칩 영역이 크게 줄어들어서도 낮은 온저항과 낮은 디바이스 정전용량을 유지하도록 한다. 결과적으로 게이트-구동 주파수를 실리콘 전력 MOSFET보다 100배 더 크게 할 수 있다.

SiC는 전력 애플리케이션에 사용된다. 실리콘 소자에 비해 가진 장점은 월등한 열전도성(4.9 W/cm-K 대 1.5 W/cm-K)과 약 3배의 밴드갭이다. 그러나 지난 30년 간 SiC 소자가 가진 지속적인 신뢰성 이슈가 있다. SiC와 마찬가지로, GaN은 자체적인 개발 이슈가 있지만 중/고 전압 애플리케이션에서 더 나은 솔루션으로 입증되고 있다.

GaN은 전력 애플리케이션에서 SiC와 비교해 볼 때 두 가지 이슈가 있다. GaN의 열전도성은 SiC에 비해 낮는데, 표준 실리콘 소자에 비해서도 낮다. 이런 이유로 SiC보다는 더 낮은 전력 애플리케이션에 사용된다. 자연 산화막 처리(Native Oxide Processing)가 GaN 전력 소자에 대해 해결되지 않은 것이 또 다른 이슈이다. 산화막이 없이는, MOSFET이나 IGBT 어느 것도 아직은 GaN로 개발할 수 없다. 단지 가능한 디

바이스는 간단한 구조를 가진 JFET인데, 그 사용도 제한적이다. GaN은 높은 이동성과 포화 속도를 가지고 있어서 RF나 광학 애플리케이션에서는 훌륭한 디바이스가 될 수 있다. 논문이나 몇몇 제조사의 인터넷 사이트를 리뷰해 보면, GaN에 대한 관심은 성능을 높일 수 있는 RF 애플리케이션에 주로 집중돼 있음을 알 수 있다. 만일 SiC 전력 소자와 동일한 것이 GaN으로 만들어졌다고 하면, 낮은 수율과 더 많은 처리 단계 때문에 비용은 항상 더 높게 된다.

디바이스 구조

WBG 재료의 고유 특성은 실리콘 단독으로는 불가능한 새로운 디바이스 유형을 만들 수 있게 한다. GaN의 재료 속성을 이용하면 독특한 트랜지스터 유형을 개발할 수 있다. 그 고유한 특성으로 인해, GaN은 마이크로웨이브(MW) 전력 애플리케이션에서 HEMT의 핵심이 된다. 이는 대전력 회로를 스위칭 할 수 있는 훨씬 큰 스위칭 주파수를 허용한다. GaN HEMT는 MOSFET보다 더 나은 잡음 성능을 가지고 있다. GaN 소자의 최종 활용 시나리오는 셀룰러폰, 기지국, 고성능 군용 전자제품(예, 하이브리드 어셈블리나 전력증폭을 위한 MMIC의 디스크리트 소자)의 저잡음 수신기, 스위칭 전원공급장치 등을 포함한다.

HEMT 이외에도, 실리콘 공정을 사용해 제조되고 있는 기반이 잘 갖추어진 다른 디바이스 타입의 사용에 대하여도 GaN 역시 장점이 있다. GaN 기반 다이오드는 컴퓨터, 소비가전 분야, 산업용 제품의 스위치 모드 전원공급장치(Switch Mode Power Supplies, SMPS)를 더 작고, 더 효율적이고, 더 낮은 가격으로 설계하고 생산할 수 있게 한다. GaN HEMT WiMAX 디바이스는 증폭기에 크기와 에너지 면에서 핵심적인 이

점을 제공한다. Cree 사는 자신들의 GaN HEMT가 경쟁 시스템에 비해 25% 더 작고, 에너지 효율이 적어도 2배가 되는 솔루션을 제공할 수 있다고 발표했다. 더 작고, 더 가볍고, 더 효율적인 증폭기는 직접적인 결과물로서 공중 HD 방송(Airborne High-Definition Broadcasting) 등의 애플리케이션에 보다 성공적으로 사용되고 있다. 이런 유형의 증폭기는 NBC 방송국의 일요일 밤 미식축구 텔레비전 방송 송출을 제공하는 항공기나 비행선에서 사용된다. RF 전력전자 제품을 위해 GaN 기술에 의해 제공되는 주요 장점은 더 높은 출력 전력 밀도(높은 주파수에서도), 더 높은 출력 임피던스(더 쉬운 매칭), 더 넓어진 대역폭, 다른 기존 기술보다 나은 선형성을 결합할 수 있다는 데 있다.

이중 접합 바이폴라 트랜지스터(heterojunction bipolar transistors, HBT)는 FET에 비해 여러 가지 장점이 있다. HBT는 일반적으로 더 나은 임계값 균일성(threshold uniformity), 더 나은 디바이스 선형성, FET보다 더 낮은 위상 잡음을 제공한다. 또한 HBT 구조는 본질적으로 기생 용량에 대해 더 높은 비율의 출력 전류를 제공한다. HBT에 대한 또 다른 중요한 애플리케이션은 비교적 높은 주파수에서 높은 전압을 스위칭하기에 바람직할 수 있는 고전압 스위칭 애플리케이션이다. GaN 공정은 수동부품 구조를 생성하기 위한 안정된 기판을 제공하기도 한다. 이러한 능력은 패키지에 수동소자의 필요성을 감소시키고 상호 연결층을 줄여줄 것이다.

산업계 제한

WBG 소자는 교류와 직류(AC/DC) 사이의 전환에 관련된 전력손실의 90%까지 제거할 수 있다. 또한 이것은 실리콘 소자보다 10배 이상의 전압을 처리할 수 있고 2



출처 | Power America

배 이상의 온도를 견딜 수 있다. 가속 시험(accelerated testing)과 반도체 신뢰성 평가에 대한 가이드라인이 부족해서, 시장 진입과 산업계 수용을 어렵게 만드는 제한이 있다. WBG 소자의 신뢰성 시험의 중요성은 매우 과소평가되거나 무시돼 왔다. 이 작업은 대학교(새로 만들어진 NC 기관은 예외)에서 이루어지고 있지 않으며 신생 회사나 연구개발 회사가 감당하기에는 너무 비용 부담이 크다. 제조사와 고객 사이의 이러한 간격을 연결하는 데이터가 없이는, OEM은 그 기술을 앞장서 채택하지 않을 것이다.

NC 기관은 산업계 WBG 개발 계획이 공급망에 직접 맞춰지고 시장까지 가속화시킬 수 있는 필요한 지원 플랫폼을 제공할 수 있다. 이러한 바탕에서, WBG 기반/실리콘 기반 애플리케이션의 신뢰성 과제와 시스템 해택은 제대로 평가되고 경량화할 수 있다. 또한, 이러한 정보가 생성되면, 신뢰성 메트릭과 비용-성능 데이터 포인트 평가들이 시장 채택을 돕기 위해 활용될 수 있다. 이 기관의 구조는 시장이 제품개발 사양을 효율적으로 맞출 수 있도록 하고 고장 모드와 근

본 원인 분석(Root Cause Analysis)을 더 잘 이해하기 위해 듀티 사이클 데이터 포인트를 데이터베이스에 역으로 제공할 수 있다. 결국은 WBG 소자 신뢰성 시험에 대하여 하나의 표준 초안이 만들어 질 수 있다.

후속 논의

차세대 전력전자 미국 제조 혁신기관을 지원하고 있는 DfR Solutions 사는 현재 발행하고 있는 뉴스레터에 이와 관련된 글을 소개함으로써 WBG와 기타 반도체 기술에 대한 경험과 지식의 일부를 공유할 예정이다. 이러한 주제는 디바이스와 디바이스 구조, 도체 신뢰성 평가(물리적, 전기적, 기계적), 설계와 가속 시험 수행, 그리고 기술적 애플리케이션을 포함한다.

특별한 WBG 또는 반도체 주제에 관심이 있다면, Edward Wyrwas(ewyrwas@dfrrsolutions.com) 또는 hakwon@ex1337.com으로 이메일을 보내면 도움을 받을 수 있다. AE