

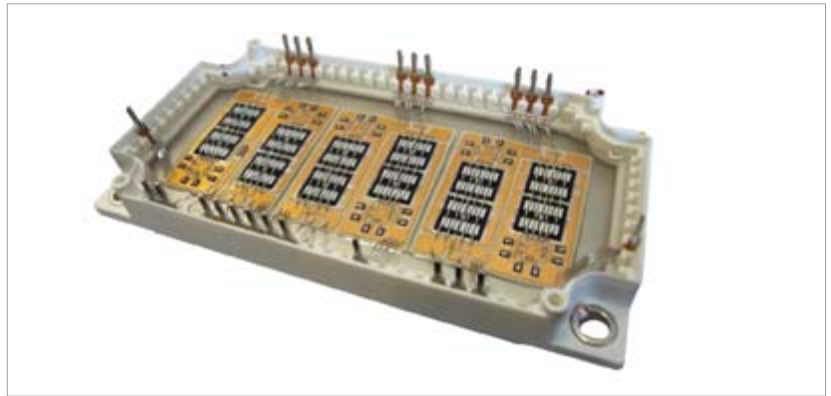
전력 반도체의 미래: 견고한 고성능 SiC 트랜지스터

SiC 다이오드 기술의 성공적인 시장 진출에 이어 SiC 기반 트랜지스터가 다음의 주요 단계가 될 것이다. 현재 넓은 밴드갭 재료로부터 훨씬 높은 성능이 기대되고 있으며, 견고성과 시스템 중심의 제품 특성은 신속한 시장 보급을 위한 핵심적인 요소이다.

글 | 피터 프리드리히(Peter Friedrichs) 박사, 마크 부쉬쿨레(Marc Buschkuhle), 인피니언 테크놀로지스

실리콘 카바이드(SiC)를 기반으로 하는 전력 반도체 솔루션은 지난 수년 간 사용이 크게 증가했으며, 획기적인 변화를 예고하고 있다. 이러한 성장의 배경에는 에너지 절약, 소형화, 시스템 통합, 신뢰성 향상 등이 원동력으로 작용하고 있다.

SiC 소자는 이러한 시장의 과제를 모두 만족하는 최적의 특성을 갖추었다. 새롭고 넓은 밴드갭 기술은 지난 몇 해에 걸쳐 매년 새로운 세대의 실리콘 전력 소자에서 보아왔듯, 발전적인 진전을 넘어 실제로 업계의 판도를 바꿀 수 있는 능력을 갖고 있다. SiC 기반 시스템은 성능의 가파른 변화로 특징지을 수 있는 혁신적인 기능으로, 획기적이고 파격적인 솔루션을 목표로 하는 설계자에게 매력적인 대안을 제공한다. IGBT 또는 초접합(Super-Junction) MOSFET과 SiC 다이오드의 결합은 이미 태양광, 충전 시스템 또는 전원공급과 같은 다양한 애플리케이션에서 표준으로 자리잡고 있다. 고속 실리콘 기반 스위치와 SiC 다이오드의 이러한 결합은 종종 “하이브리드” 솔루션이라는 용어로 불린다. 최근 수년 간 인피니언은 수백만 개의 하이브리드 모듈을 생산해



[그림 1] 2006년부터 양산된 세계 최초 하이브리드 모듈 솔루션

왔으며, 다양한 고객의 제품에 이들 제품이 탑재되는 것을 보았다. 세계 최초 하이브리드 모듈은 10여 년 전에 인피니언의 EconoPACK™ 패키지 플랫폼을 기반으로 개발됐다.

어떤 애플리케이션 분야는 새로운 기술을 초기에 채택하는 반면, 또 어떤 분야는 실제적인 시스템 가치에 따라 새로운 기술의 비용 대 성능이 충분히 매력적이 될 때 높은 수준의 새로운 기술 솔루션으로 전환하는 방식을 택한다. 고급형 전원에서 SiC 다이오드를 사용한 설계는 이미 확고히 구축됐으며, 인피니언은 이러한 새로운 기술로부터 가장 많은 혜택을 얻을 수 있는 분야로 태양광 인버터와 부스트 회로를 꼽고 있다.

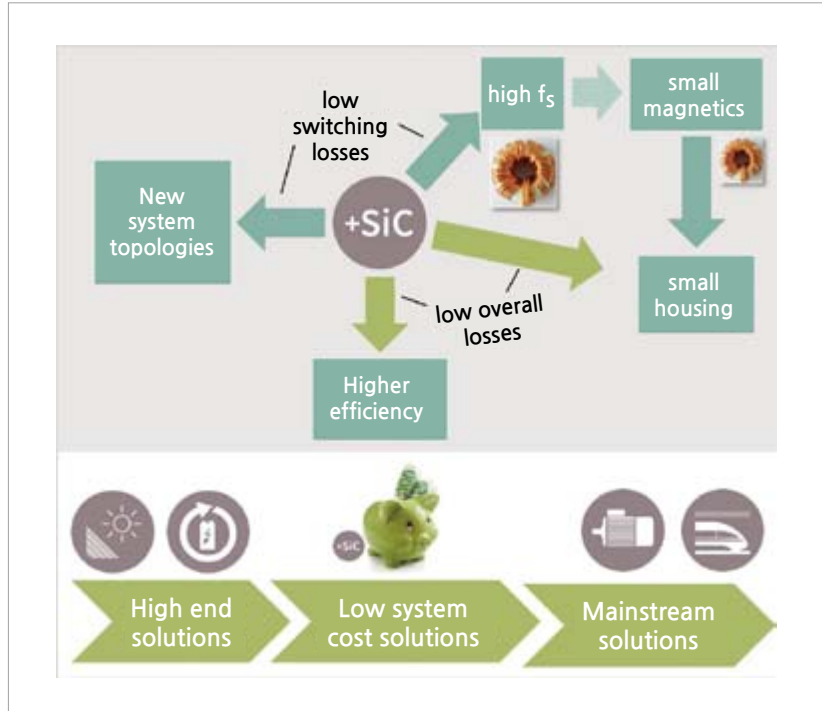
다음으로 무정전 전원장치(UPS) 및 충전 시스템과 관련된 시장 분야가 그 뒤를 이을 것으로 보고 있으며, 모터 드라이브와 트랙션, 그리고 보다 장기적으로 자동차 애플리케이션이 향후 새로운 반도체 기술로 본격적인 전환에 높은 관심을 보일 것이다.

과거에는 에너지 효율이 태양광 컨버터에서 핵심적인 설계와 성공적인 마케팅 방식이었다. 예를 들어 부스터 회로의 일부로 사용되는 SiC 다이오드는 98% 이상의 효율 레벨을 달성하는 최고의 솔루션이었다.

오늘날 태양광 설계의 지속적인 주요 동향은 낮은 스위칭 손실을 바탕으로 전력 밀도를 증가시킴으로써 더 작은 히

트싱크와 더 높은 동작 주파수, 보다 작은 자기 부품을 구현하는 것이다. SiC 다이오드는 최근의 태양광 스트링 인버터 솔루션뿐 아니라 마이크로 인버터 애플리케이션에서도 점점 더 중요한 부품이 되고 있다. 최근 인피니언의 SiC 다이오드 기술은 5세대에 도달했다. SiC 다이오드는 다이 축소 옵션을 적용해 더욱 매력적인 가격대를 달성함으로써 한 단계 더 발전했다. 이 밖에 새로운 기술은 이전 세대에 비해 더 낮은 순방향 전압 강하와 그로 인한 낮은 도통 손실, 증가된 서지 전류 성능, 브레이크다운 (breakdown) 특성 향상과 같은 특성을 구현함으로써 고객에게 추가적인 혜택을 제공한다. 하이브리드 솔루션은 오늘날 전 세계 태양광 인버터의 표준이 되고 있다. 인피니언은 15년이 넘는 제품 공급, 검증된 실적, 안정적인 대량 생산으로 이러한 기술의 신뢰할 수 있는 파트너가 됐다.

SiC 칩 생산은 대량생산 실리콘 전력 칩과 동일한 생산 라인을 이용해 제조하는 통합된 생산 개념을 특징으로 하므로, 인피니언은 실리콘 레벨과 동일한 수준의 신뢰성과 공정 안전성을 보장할 수 있다. 또한 이러한 통합된 개념은 수량 유연성을 가져다주며, 이는 빠르게 변하는 시장 분야에서 요구되는 새로운 기술을 다루기 위한 핵심 요소이다. 인피니언은 시스템에 대한 깊은 이해와 비용 성능에 대한 명확한 설정을 바탕으로 실리콘과 실리콘 카바이드 기반 반도체 간에 최적화된 결합을 구성함으로써 제품을 성공적으로 정의할 수 있었다. 이러한 추진 전략은 순수한 반도체 기술 중심의 제품 정의와 달리 타깃 시스템에



[그림 2] 분야 및 애플리케이션에 따른 SiC 이점

맞춤화된 솔루션을 지향하므로 미래에 SiC의 성공을 위한 핵심적인 요소로 간주될 수 있다. 다이오드 기술에 축적된 경험을 바탕으로 다음 수년 간 SiC 트랜지스터가 이와 유사한 전개를 따를 것이다. 이것은 SiC가 주류 기술의 수준으로 한층 더 다가갈 수 있게 하는 중요한 다음 단계이다. 여기에는 다음과 같은 핵심 요소가 있다.

- 검증된 견고성
- 측정 가능한 시스템 이점을 제공하는 매력적인 비용 대 성능
- 대량생산 능력
- 시스템 이해에 기반을 한 제품 정의

지난 수년 동안 주로 SiC의 시스템 이점에 대한 광범위한 연구가 수행됐다. 유니폴라 SiC 트랜지스터를 사용하는

컨버터는 스위칭 주파수를 향상시켜 자기 부품의 부피와 무게를 크게 줄일 수 있다. 인피니언에서 실시한 분석에 의하면 SiC 소자를 기반으로 하는 컨버터는 현재의 Si에 기반을 한 기준 솔루션에 비해 크기는 1/3, 무게는 25%를 달성하는 것으로 나타났다.

크게 감소된 부피와 무게로 인해 시스템 비용 또한 20% 이상 줄일 수 있다.

SiC 솔루션은 향후 몇 년 내에 산업용 또는 트랙션 드라이브와 같은 다른 애플리케이션 분야로 확대될 것이다. 이러한 예상이 가능한 이유는 낮은 손실로 인해 향상된 효율뿐 아니라 줄어든 히트싱크 요구로 인한 작은 패키지를 실현할 수 있어, 이에 대한 시장의 요구가 존재하기 때문이다. 그림 2에서 보듯 SiC는

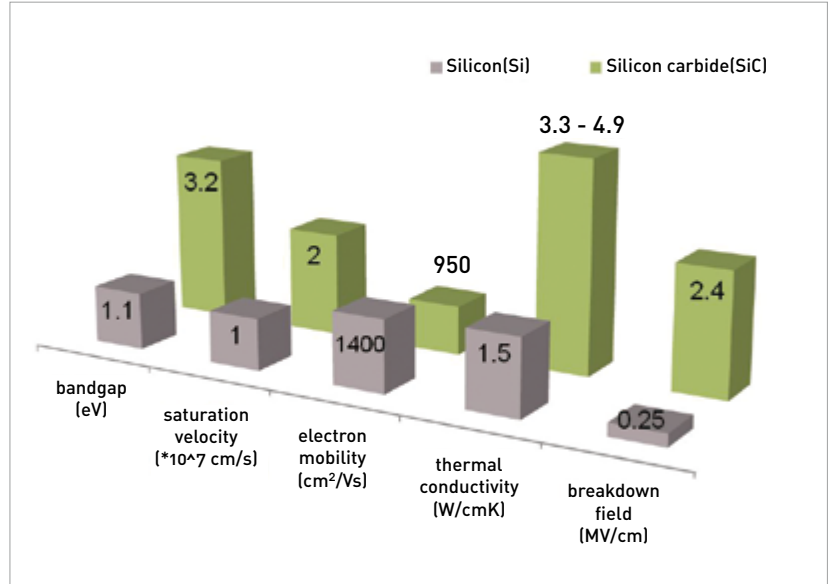
이미 고급형과 틈새 솔루션에 적용되고 있다. 최근의 설계는 이러한 이점을 이용해 특정 애플리케이션 분야에서 시스템 비용을 낮추고 있다.

앞으로 점점 더 많은 애플리케이션이 SiC 솔루션 구현을 통해 달성되는 대폭적인 손실 감소를 활용하게 될 것이다. 이러한 점에서 다음의 주요 발전 단계는 SiC 스위치의 도입이 예상된다.

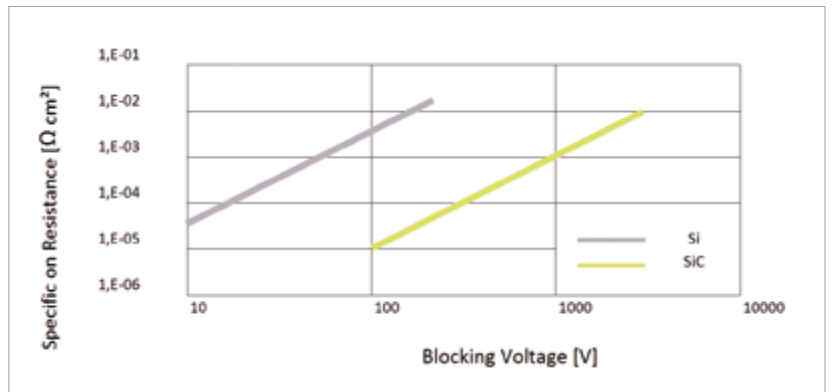
Si와 SiC 솔루션의 차이를 이해하려면 실리콘 카바이드 소자가 이른바 넓은 밴드갭 반도체에 속한다는 사실을 명확히 알 필요가 있다. Si와 SiC 재료 특성에 대한 비교는 그림 3에서 볼 수 있다. 고속 및 유니폴라 쇼트키 다이오드 뿐 아니라 전계효과 기반 SiC 스위치(MOSFET, JFET)는 1000 V 이상으로 확장할 수 있다. 이러한 확대는 다음과 같은 SiC 재료의 내재적인 특성으로 인해 가능하다.

- 금속 반도체 장벽이 쇼트키 다이오드보다 2배 높아 고전압 쇼트키 다이오드에서 낮은 누설전류 가능
- Si에 비해 breakdown field 강도가 약 10배 높아 유니폴라 트랜지스터의 매우 매력적인 면적당 온-저항 달성

그림 4는 바람직한 차단 전압과 비교한 서로 다른 반도체의 최소 면적당 온-저항을 보여준다(여기에서는 드림프트 영역만 사용했으며, 저항력에 대한 기판의 영향은 무시했다). 각 라인의 최종 지점은 초접합 MOSFET을 제외한 유니폴라 구성에서 특정 반도체의 사용 가능한 전압 범위를 상징적으로 보여준다.



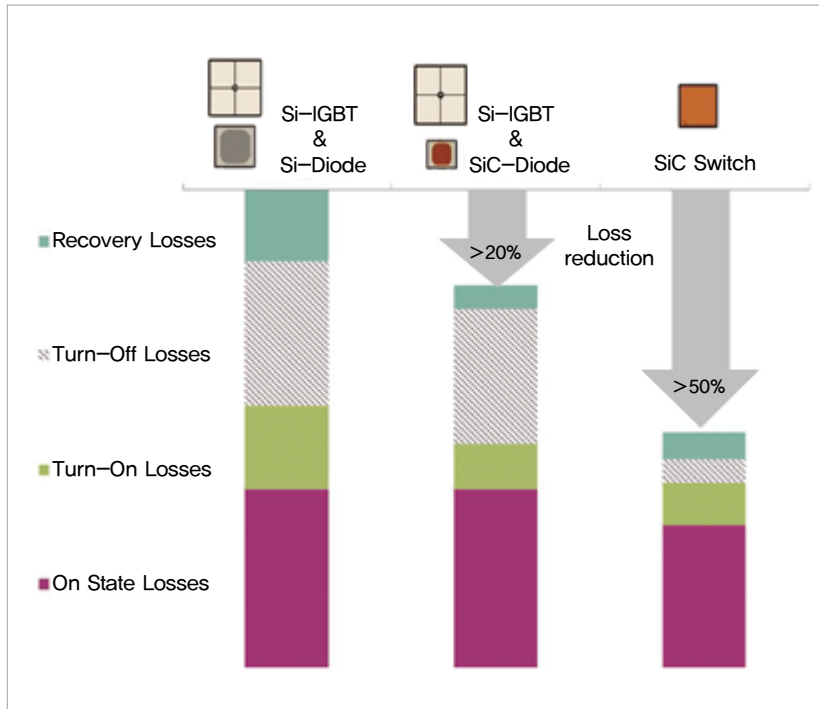
[그림 3] 실리콘과 실리콘 카바이드의 재료 특성 비교



[그림 4] SiC와 Si의 온-저항 및 차단 전압 비교

SiC 트랜지스터는 산업용 전력전자 분야에서 기존 IGBT 기술을 대체할 대안으로 기대되고 있다. SiC의 전용 재료 특성은 높은 차단 전압에서 charge modulated IGBT 디바이스 대신 소수 캐리어가 없는 유니폴라 디바이스 설계를 가능하게 한다. 이러한 설계는 주로 넓은 밴드갭에 의해 제공되는 높은 임계 전계에 기반을 한다. IGBT의 손실 제약은 소수 캐리어의 동적 특성으로 인해 발생한다. MOSFET에서 이러한 소

수 캐리어는 제거된다. 예를 들어 SiC MOSFET에서는 100 k V/ μ s보다 높은 범위에서 극히 높은 dv/dt 기율기가 측정된다. 처음엔, 1200 V가 넘는 영역에서 IGBT에 비해 SiC 기반 트랜지스터의 우수한 동적 성능이 가장 중요한 이점으로 간주되었다. 그러나 인피니언의 TRENCHSTOP™5 기술에서 보여주듯 최근의 결과는 IGBT 기술에서도 중요한 미래의 잠재적 가능성을 보여준다. 하지만, 장기적 관점에서 IGBT와 유



[그림 5] IGBT에서도 5 kHz dv/dt 동작과 같은 경우 50% 손실 감소를 실현할 수 있다.

니콜라 SiC 스위치의 근본적인 차이는 점점 더 많은 주목을 받게 될 것이다. 두 가지 주요 차이점이 있다.

첫째, 출력 특성이 임계값이 없는 선형적 I-V 곡선을 갖는다는 것이다. 둘째, 바디 다이오드와 동기 정류의 옵션을 통합할 수 있다는 점이다. 이러한 특성을 바탕으로 디바이스는 동기 정류 모드에서 임계값이 없는 전도 특성을 제공한다. 뿐만 아니라 필요한 부품 수도 절반으로 낮출 수 있다. 이에 따라 필요한 전력 모듈 풋프린트를 크게 줄일 수 있다.

시스템 수준에서 임계값이 없는 도통 특성은 손실을 낮추는 큰 잠재적 가능성을 제공한다. 많은 시스템은 수명의 대부분을 부분 부하 조건에서 동작하며, 도통 손실은 경쟁하는 표준 IGBT 기술에 비해 훨씬 낮다. 심지어 5 kHz 미만의 매우 낮은 주파수에서도 변하지 않는

dv/dt 기울기로, 바디 다이오드를 통한 한 임계값이 없는 스위치는 동기 정류 모드에서 현재 나와 있는 상용 IGBT 솔루션과 비교해 전체 손실을 50% 낮출 수 있다. 손실 비교는 그림 5에서 볼 수 있다.

물론 dv/dt 제한이 없고 훨씬 높은 스위칭 주파수로 동작하는 애플리케이션에서 손실 감소를 더 크게 달성할 수 있다는 것은 분명하다. 이러한 특성은 더 작고, 가볍고, 저렴한 자기 부품의 이점을 제공하는 DC-DC 부스트나 벅/부스트 토폴로지에 일반적이다. 다양한 연구에서는 광범위한 애플리케이션에서 - 비싼 전력 스위치의 경우에도 - BOM 비용을 낮출 수 있다는 것을 이미 입증하고 있다. SiC 기반 부품은 시간이 지나면서 가격이 하락할 것으로 예상되므로 중반기에 들어서면 적용 가능한 애

플리케이션 수가 증가할 것이다.

SiC 트랜지스터 설계의 목표는 대부분의 부품에서 가장 낮은 면적당 온-저항(on-resistance)을 달성하는 것이다. 이 파라미터는 비용을 정의하는 것은 물론, 칩 캐패시턴스 값에 의해 초래되는 나머지 동적 손실을 간접적으로 정의하므로 상당히 타당하다. 주어진 저항에 대해 다이가 작을수록 캐패시턴스 값이 낮다.

높은 결합 밀도는 SiC MOS를 기반으로 하는 디바이스의 다양한 특이성 또는 특징에 반영된다. 한 가지 예로 낮은 임계 전압과 결합하는 경우 실리콘 기반 전력 MOSFET에 비해 약한 트랜스컨덕턴스(transconductance)를 갖는다.

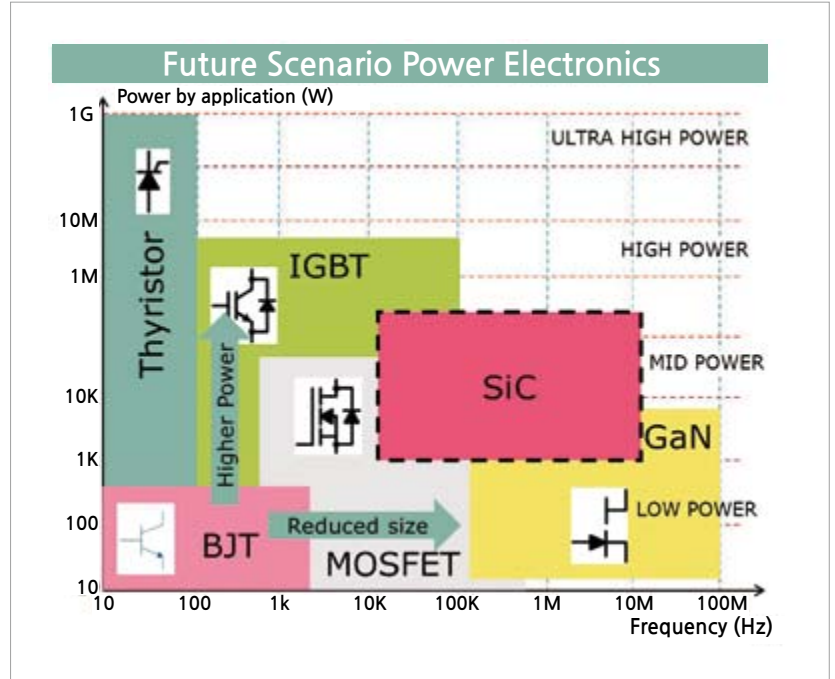
또 다른 효과는 온-저항의 비물리적 온도 특성이다. 물리학에 의하면 일반적으로 온저항(R_{ON})은 높은 온도에서 증가한다. 현재 시중에 나와 있는 부품들은 제로 또는 심지어 마이너스 온도 종속성을 보여준다. 이것은 결합과 관련된 저항 기여도가 마이너스 온도 계수를 가지며, 따라서 서로 다른 온도 특성이 관찰된다는 사실에서 기인한다. 온도에 따른 R_{ON} 증가가 적을수록, 채널 결합이 디바이스 성능에 미치는 영향이 크다. 결합 관련 저항 기여도는 온-상태(on-state)에서 산화물에 인가되는 전계를 실리콘 기반 MOS 전력 소자에 통상 사용되는 값보다 높게 증가시킬 때만 효과적으로 낮출 수 있다. 온-상태에서 산화물 전반에 걸친 높은 전계는 차단 능력 마모를 가속화할 수 있으므로 장기적인 신뢰성 위험을 초래할 수 있다.

전반적인 목표는 SiC가 갖는 낮은 R_{ON} 가능성과 충분히 검토된 안전한 산화물

새로운 기술에는 새로운 과제가 따라오겠지만, 강력한 SiC 스위치는 실리콘 기반 부품과 유사한 수준의 입증된 견고성을 제공하므로 전력전자 애플리케이션에서 밝은 미래가 기대된다.

전계 조건 내에 부품이 머무는 동작 조건을 결합하는 데 있다. 온-상태에서 이러한 상태는 높은 결합 밀도를 가진 상태에서 평면 표면으로부터 멀리 떨어지고, 보다 우호적인 다른 표면 방향으로 이동함으로써 달성할 수 있다. 이른바 SiC의 표면 상의 MOS 채널은 최소 10배 더 낮은 결합 밀도를 제공한다. 이러한 이유로 한 가지 가능한 방법은 최근의 많은 실리콘 전력 소자와 유사한 TRENCH 기반 구조를 사용하는 것이다. 이와 같은 구조는 낮은 채널 저항 외에도 셀 밀도가 평면 구조보다 자연적으로 더 높기 때문에 보다 효과적인 재료 이용이 가능하다. 이 밖에 더 낮은 면적당 온-저항을 제공할 수 있다. 그러나 트렌치(Trench)-기반 부품에서 트렌치 코너 산화물에 대한 전계 응력은, 특히 SiC에서 핵심적인 문제이므로 많은 관심을 불러일으키는 논쟁이 될 수 있다. 이 반도체 칩은 Si 솔루션보다 약 10배 높은 전기장에서 사용하도록 제안된다. 임계 영역의 효과적인 차폐를 실현할 수 있는 deep pn 소자와 같은 다양한 가능한 방법이 있을 수 있다. DMOS에서 온-상태 딜레마와 달리 오프-상태 과정은 혁신적인 설계를 통해 해결될 수 있다.

새로운 기술에는 새로운 과제가 따라오겠지만, 강력한 SiC 스위치는 실리콘 기반 부품과 유사한 수준의 입증된 견



[그림 6] 10 kHz-MHz에서 1 kW- 500 kW의 SiC 스위치 시장

고성을 제공하므로 전력전자 애플리케이션에서 밝은 미래가 기대된다. 최적의 가장 효과적인 방법으로 기술을 이용하기 위해서는 처음부터 추가적인 노력이 수행되어야 한다. 이러한 과제에는 빠른 스위칭으로부터 발생하는 EMI 문제, 훨씬 높은 전력 밀도로 인한 냉각 문제 등이 포함된다. 후자는 칩 축소와 관련되는 문제로서 피할 수 없으며, 이는 예상되는 손실 감소에 의해 상쇄할 수 없다.

SiC 트랜지스터 기술의 보다 신속한 확산을 위해 이와 같은 유효한 문제를 해결하는 것이 중요하다. 이러한 점에서 고객과 협력을 통해 새로운 기술에서 필요로 하는 설계와 구현 과정을 최소화하는 것이 필수적이다.

새로운 반도체 기술이 전력 반도체를 기반으로 하는 애플리케이션의 증가하는 전력 밀도와 효율 향상 요구를

만족하는 데 핵심 역할을 할 것이라는 점은 의심의 여지가 없다. 그러나 실리콘 기반 부품의 대체는 해가 바뀌면서 해결되는 그런 문제가 아니다. 대신 넓은 밴드갭 기술이 실리콘 기반 솔루션을 보완할 수 있으며, 특히 현재의 기술로 해결할 수 없는 새로운 틈새 애플리케이션을 창출할 수 있다. 그림 6에서 보듯이 SiC는 100 V 이상의 차단 전압과 최대 수백 킬로와트의 출력 정격을 갖는 부품을 타깃으로 하는 산업용 전력 애플리케이션에서 중요한 혁신을 제공한다. SiC 다이오드 기술의 성공적인 시장 진출에 이어 SiC 기반 트랜지스터가 다음의 주요 단계가 될 것이다. 현재 넓은 밴드갭 재료로부터 훨씬 높은 성능이 기대되고 있으며, 견고성과 시스템 중심의 제품 특성은 신속한 시장 진출을 위한 핵심적인 요소이다. ES