



## SiC 전력반도체 소자기술 동향

글 \_ 강인호, 방욱, 문정현, 나문경  
한국전기연구원

### 1. 서론

전력반도체소자는 20세기 중반 실리콘을 기반으로 상용화된 이후 다이오드, 바이폴라접합 트랜지스터 (Bipolar Junction Transistor, BJT) 및 사이리스터류의 바이폴라 계열의 소자가 1980년대까지 꾸준히 개발되어 사용되었다. 이후 MOS 계열의 소자가 전력용으로 개발되었으나 고전압 동작에서 높은 온-저항으로 인해 낮은 전압영역에서 응용분야를 개척하였다. 1980년대 중반 금속산화막 반도체 전계효과트랜지스터 (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)의 장점과 BJT의 장점을 결합시킨 절연게이트바이폴라 트랜지스터 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 소자가 개발된 이후 전력반도체 소자의 비약적인 발전이 이루어졌다. IGBT의 발전을 통해 소자의 전류밀도 측면에서 매 10년간 5~6 배의 전류밀도 향상 등의 특성 향상이 이루어졌다. 이러한 발전으로 전력반도체 시장은 전체 반도체 시장의 약 10%에 달하는 거대 시장을 형성하였으나 기존 실리콘 기반 재료의 물성적 한계로 인해 최근 발전 속도가 떨어지고 있는 추세이고 더 이상의 성능향상을 기대하기 어려운 실정이다. 이러한 기술적 한계를 극복하기 위해 신진 전력반도체 업계는 실리콘보다 우수한 물성을 가진 탄화규소 (SiC) 및 질화갈륨 (GaN)을 이용하여 전력반도체소자를 개발하고 있다. 뿐만 아니라 최근에는 기후 변화 및 화석자원 고갈 그리고 일본의 원전사고 등으로 기존의 전기시스템에서 전기에너지를 효율적으로 사용

할 수 있게 만드는 저손실 전력반도체에 대한 관심이 더욱 증폭되는 추세이다. 예를 들어, 일본은 전기에너지가 전력변환장치를 거쳐간 비율 (electrification ratio)이 1980년도에는 12.2%에서 2018년에는 19.8%로 증가할 것으로 예상되고 있어 전력변환손실은 큰 이슈가 되고 있다. 특히 COP19에 의하면 2050년까지 CO<sub>2</sub>를 50% 수준으로 감소시켜야 하므로 에너지, 특히 전기에너지의 효율적인 이용이 더욱 절실한 실정이다. 또한 2030년에 peak power가 현재 대비 약 10%가 증가할 것으로 예상되며 이 중 5%는 SiC 소자를 전력변환장치에 적용함으로써 해결할 수 있고 나머지 5%는 계통에 EMS (Energy Management System)를 적용함으로써 해결할 수 있을 것으로 판단하고 있다.<sup>1)</sup>

SiC (silicon carbide, 탄화규소)는 실리콘에 비하여 밴드갭이 넓은 이른바 와이드밴드갭 반도체 (wide bandgap semiconductor)이다. 전력반도체에 사용될 물질로 거론되는 와이드밴드갭 소재로는 SiC, GaN, 다이아몬드 등 여러 반도체 재료들이 있으나 에피택시 및 반도체 단결정 성장 등 재료기술의 성숙도, 소자 제조공정 상의 용이성 면에서 SiC가 여타 재료들을 압도하고 있으므로 현재 실리콘을 대체할 수 있는 가장 유력한 전력반도체 재료로 간주되고 있다.

전력반도체로서 우수한 특성을 실현하기 위해서는 높은 항복전압, 적은 손실, 높은 전류분담능력이 필수적 요소이다. Fig. 1은 현재 전력반도체로서 가장 광범위하게 사용되고 있는 실리콘과 SiC를 반도체 물성 관점에서 비



교한 것이다. SiC는 전력반도체 재료로서의 우수한 물질 특성을 갖고 있는데 특히 절연과괴전계가  $3 \times 10^6 \text{V/cm}$ 로 실리콘의 약 10배, 에너지밴드갭은 3.26eV로 실리콘의 약 3배, 열전도도는  $3.7 \text{W/cm} \cdot \text{K}$ 으로 실리콘의 약 3배로서, 이를 쉽게 요약하자면 SiC는 실리콘에 비하여 높은 항복전압을 가지면서도 손실은 적고 열방출특성은 우수하며 고온 및 고방사환경에서도 사용 가능한 반도체 재료라고 정의할 수 있다.<sup>2)</sup>

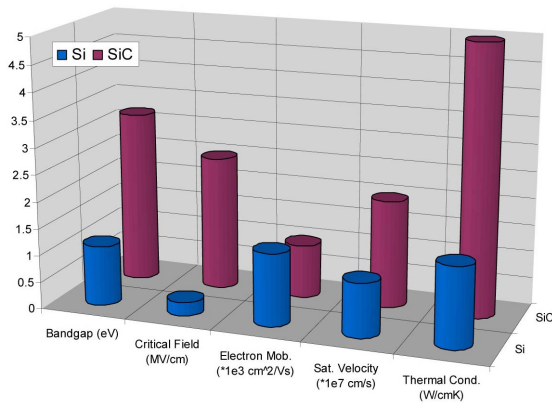


Fig. 1. 실리콘과 SiC 재료의 반도체로서의 물성 비교.

Fig. 2는 실리콘과 SiC를 비롯한 몇 가지 반도체 재료의 전력반도체로서의 성능지수를 이론적으로 계산하여 비교한 것이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 높은 주파수와 대전력 응용의 이점을 나타내는 Johnson의 성능지수로 SiC는 실리콘에 비해 약 600배 크다. 또한 SiC는 다이아몬드에 이어 2번째로 높은 성능지수를 보여주고 있으며 실제로 웨이퍼 기술 등 반도체를 구체적으로 제작

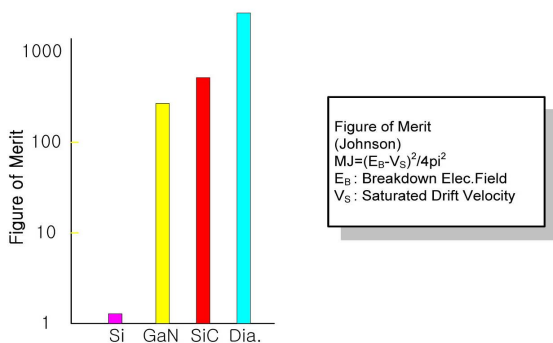


Fig. 2. 실리콘과 와이드밴드갭 반도체 재료의 존슨 성능지수 비교

하기 위한 현실적인 여건을 고려하면 사실상 가장 우수한 성능지수를 가지는 물질임을 알 수 있다.

Fig. 3은 SiC와 실리콘으로 각각 5,000V급 수직구조 MOSFET를 제작한다고 가정하고 그 설계 사양을 모식도로 나타낸 것이다. 동일한 항복전압을 구현하는 두 가지 소자의 가장 큰 차이점은 드리프트 층의 두께이다. Fig. 3에서와 같이 SiC-MOSFET의 드리프트 층의 두께는 실리콘 MOSFET의 약 1/10으로 줄어들 수 있는데, 이는 SiC 절연과괴전계가 실리콘보다 약 10배 높기 때문이다. 다른 하나의 중요한 차이점은 드리프트 층의 농도에서도 나타난다. SiC 소자의 드리프트 층의 농도는 실리콘 소자보다 약 102배 높아질 수 있다. 결국 동일한 5,000V 항복전압을 구현하면서도 SiC 소자의 드리프트 층은 실리콘에 비하여 두께가 1/10로 훨씬 얇으면서도 비저항이 작아지게 된다.

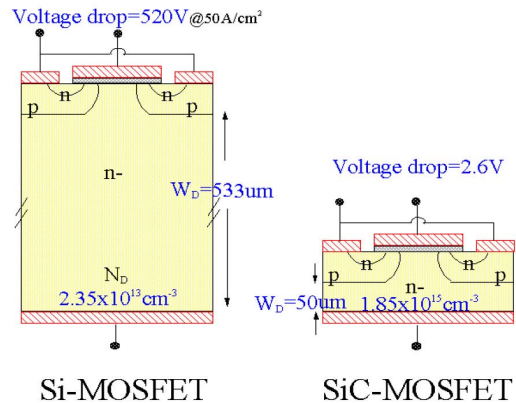


Fig. 3. 5000V급 SiC-MOSFET와 Si-MOSFET의 비교 모식도.

결과적으로 온(on)-저항으로부터 환산된 전압강하는 SiC 소자에서 실리콘 소자의 약 200분의 1로 감소할 수 있다. 이는 SiC 소자를 구현할 경우 실리콘 소자보다 전압저지 능력이 뛰어나면서도 통전손실이 작은 고전압 소자를 구현할 수 있다는 의미로서 이상적인 전력반도체에 근사한 것이라 할 수 있다. 이렇듯 SiC 반도체의 동작 손실이 작은 것은 주로 절연과괴전계가 실리콘에 비하여 약 10배 이상 큰 데 기인한다. 이러한 물질 특성으로부터 SiC를 사용하여 고전압 전력소자를 제작할 경우 기존의 실리콘 전력소자와는 비교할 수 없을 정도로 큰 장점을

기대할 수 있다. 특히 이론적으로 SiC 파워 MOSFET는 실리콘 IGBT와 비교하여도 온-저항을 작게 할 수가 있으며, 온-저항이 작은 것은 당연히 소자의 크기를 작게 만들 수 있다는 의미를 가진다. 즉, 단위 면적당 발열량을 똑같이 설계하면, 온-저항이 작은 경우 칩 크기가 작아지게 된다. 칩 크기의 축소는 칩 비용의 저감, 시스템 용적의 소형화에 공헌함은 물론 전류를 차단하는 스위칭 속도에도 큰 변화가 있음을 알 수 있다. 전력변환장치(power conversion system)는 전력반도체를 이용하여 턴-온과 턴-오프 동작을 반복하여 출력 전력을 제어하게 된다. 이 때 전력전자 시스템은 전력반도체에서 비롯되는 손실이 발생하게 되는데 이러한 전력반도체의 손실은 시스템 전체 손실의 대부분을 차지하게 된다. 300V~3,000V급 SiC 쇼트키 다이오드의 경우 실리콘 소자에 비하여 스위칭 손실이 약 1/100 수준으로 작은 것으로 알려져 있다. 또한 3,000V~20,000V급 SiC PiN 다이오드는 동급의 실리콘 소자에 비하여 1/10 정도의 스위칭 손실이 있는 것으로 알려져 있다. 또한 스위칭 손실과는 별도로 다이오드가 켜진 상태에서의 통전 손실 또한 실리콘 동급 소자에 비하여 현저히 적은 것으로 알려져 있다. 따라서 SiC 전력반도체에 의한 손실의 절감은 곧 전력변환장치에서의 손실을 대폭적으로 줄일 수 있게 해 준다.

반도체 소자의 온도가 상승하면 역 바이어스 p-n 접합에서 누설전류(leakage current)에 의한 손실이 증가한다. 이보다 더 고온이 되면 반도체의 밴드갭을 열적으로 뛰어넘어 생성된 캐리어가 증가하여 그것이 불순물 농도를 넘어서게 되면 소자로서의 동작특성을 상실하게 된다. SiC가 실리콘보다 에너지 밴드갭이 약 3배 정도 크기 때문에 Si 소자의 최대 동작온도인 250°C 보다도 훨씬 높은 온도인 300~500°C까지의 고온에서도 사용이 가능한 소자를 실현시킬 수 있다. 따라서 기존의 Si 소자의 경우, 예를 들면 자동차 엔진근처에 적용할 때, 위치 선정에 세심한 주의를 기울여야 하지만 SiC 소자의 경우 그럴 필요가 없어지게 된다. 또한 전력소자의 발열에 따른 냉각 시스템을 간단히 할 수 있어서 전체적인 시스템의 소형, 경량화 및 고효율화를 이룰 수 있다. 이것은 전력 시스템, 자동차 등의 성능향상에 매우 유리한 점이 된다.

## 2. SiC 전력반도체 기술 동향

### 2.1. 국내 SiC 반도체 기술 동향

국내의 SiC 반도체 기술개발은 2000년대에 들어서서 시작되었으며 민간 주도가 아닌 국가연구개발사업 위주로 진행되었다. 1999년 12월부터 시작된 산업자원부 차세대신기술개발사업은 최초의 SiC 반도체 관련 연구개발로서 2007년에 종료되었으며 사실상 국내의 SiC 연구 기반을 갖추는 역할을 수행하였다. 이 사업에서 추진한 주요 소자개발 추진과제로는 고전압 쇼트키 다이오드 개발 및 2 GHz급 고주파용 SiC MESFET 개발을 수행하였다. 또한 2.5인치급 6H-SiC 단결정 기술개발도 성공적으로 수행되었다. 국내 최초의 SiC 전력소자는 2007년 한국전기연구원과 (주)이츠웰이 공동 개발한 600V-5A급 SiC 쇼트키 다이오드이다. 이 당시의 SiC 쇼트키 다이오드는 600V의 내전압 및 순방향 통전 특성 등의 기본적인 성능을 구현한 것이었다. 또한 서울대학교와 쌍신전자통신(주)가 공동으로 10W급의 MESFET 소자 시작품을 SiC 반도체 기술로 구현한 바 있다. Fig. 4는 2011년도에 종료된 “친환경자동차용 SiC 기반 전력변환소자 개발”의 결과인 600V/20A급 4H-SiC 쇼트키 다이오드 외관 및 전기적 특성을 보여주고 있다. 50A급까지 제작되었으며 20A급의 소자의 경우 750V의 항복전압과 600V에서 20 μA 이하의 누설전류를 갖은 우수한 결과를 얻었다. 또 제작된 쇼트키 다이오드는 15kW 인버터에 적용이 되어 Si 다이오드 대비 1% 향상되는 결과를 얻었다.

SiC 반도체 소재기술은 2003년부터 차세대신기술 개발사업의 일부로서 네오세미테크(주)에서 개발하기 시작

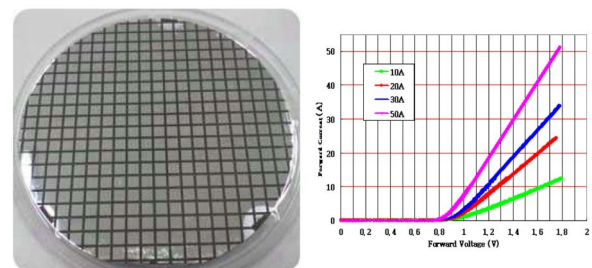


Fig. 4. 국내에서 개발된 600V급 SiC 쇼트키 다이오드 외관 및 전기적 특성.



하여 2006년에 2.5인치급 6H-SiC 단결정 및 웨이퍼 개발까지 성공하였다. 다만 전자기동도가 상대적으로 높아 전력소자로 주로 사용되는 4H-SiC 단결정 성장기술은 “친환경자동차용 SiC 기반 전력변환소자 개발” 사업 이후에야 확보되었다. 1990년대 초반 3C-SiC의 에피박막 (heteroepitaxy) 성장 연구가 서울대를 비롯하여 전북대, 화학연구원에서 시도된 바 있고 2000년대에 들어서 전남대, 동신대 등 몇몇 대학에서 3C-SiC 박막을 성장하여 MEMS 등으로의 연구가 시도된 바 있으나 기초 연구에 머물 수준으로 평가할 수 있다. 전력반도체 제작에 사용될 수 있는 6H- 및 4H-SiC에 대한 에피택시 성장 연구는 2000년대에 들어서 서울대에서 유일하게 연구되기 시작하였고, 전기연구원에서 2004년부터 본격적인 연구를 시작하여 2인치급 에피박막 성장 장치의 개발 및 이를 이용한 성장기술을 확보하였다. 2010년을 전후하여 친환경 자동차, 신재생 에너지 산업 등의 급부상으로 그 수혜종목 중의 하나인 전력변환 반도체, 특히 SiC와 같은 차세대 전력용 반도체에 관심이 급증하면서 국내 대기업들의 SiC 반도체에 대한 직접 참여가 두드러지게 나타났다. 2010년 지식경제부는 WPM (World premier material) 사업의 하나로 “초고순도 SiC 소재개발”을 선정하였으며, 이 사업의 세부과제로서 포스코가 6인치급 SiC 단결정을, LG이노텍이 역시 6인치급의 SiC 에피택시 기술개발을 최종목표로 하여 연구개발을 진행하고 있다.

SiC 전력반도체를 이용한 전력변환장치 연구는 아직까지 국내산 SiC 상용 소자가 없기 때문에 외국산 SiC 반도체 소자를 이용하여 진행되어왔다. 동아일렉콤은 2008년 PDP TV용 전원장치에 SiC 쇼트키 다이오드를 적용하여 효율이 우수한 PDP TV 전원장치를 개발하였다. 또한 (주)윌링스는 태양광 인버터의 효율을 극대화하고자 SiC 전력반도체 적용사례를 발표한 바 있다. 요약하면, 2000년대 들어서 연구소와 대학을 중심으로 단결정 및 에피택시 등 소재개발과 함께 소자기반기술 개발이 수행되었으며, 2010년 이후로는 국내 대표기업들이 SiC 반도체 연구개발에 본격 참여하여 집중적으로 투자하기 시작하였고 조속한 활성화가 전망된다.

## 2.2. 국외 SiC 반도체 개발 동향

### 2.2.1. SiC 전력용 다이오드 기술 동향

SiC 다이오드는 가장 간단한 구조의 반도체로서 pn 다이오드, 쇼트키 다이오드, 제너 다이오드 등이 있으나 일반적으로 교류를 직류로 정류하는 기능이 가장 널리 사용되고 있어 가장 기본적인 반도체 소자라 할 수 있다. SiC 다이오드는 2002년에 최초로 300V 및 600V급 SiC 쇼트키 다이오드가 시판되기 시작하였으며 이는 최초의 SiC 전력반도체 시장 진입 사례이다. 현재 세계적으로 10여개의 기업에서 600V, 1200V, 및 1700V SiC 쇼트키 다이오드를 상품화하였으나 국내 기업은 상품화한 사례가 없다. SiC 쇼트키 다이오드는 가전기기 및 산업용전원의 역률보상회로 (PFC) 블럭, 직류-직류 변환기 (DC-DC converter)에 이미 채용되어 사용되고 있으며 향후 중전력 영역 (1.7~6.5 kV)까지 확장될 것으로 예상하고 있다.

SiC 다이오드는 지난 10년간 그 가격이 당초의 30% 수준으로 하락하였으며 이 추세가 가속화되어 전 세계적으로 시장규모가 더욱 급속하게 확대될 것으로 전망된다. Fig. 5는 미국 Cree사 반도체 제품의 연도별 가격변동을 보여주고 있다.<sup>3)</sup>

역회복 특성이 대단히 우수한 SiC 쇼트키 다이오드의 개발은 전력변환장치 연구에 획기적 전환을 가져왔다.

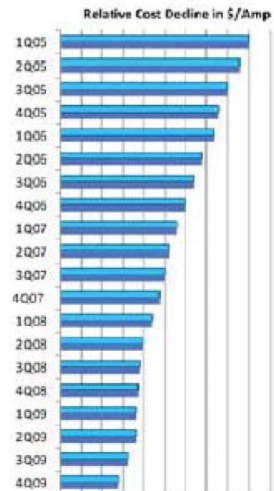


Fig. 5. 미국 Cree사의 SiC 반도체 제품의 가격 변동 추이.

대표적으로 SiC 쇼트키 다이오드와 실리콘 IGBT를 결합한 많은 전력변환장치가 다수 개발되었으며 특히 SiC 소자와 실리콘 소자의 하이브리드 형태의 전력변환장치에서 최대 52%의 효율 개선을 보이는 등 큰 폭의 에너지 절감을 실현한 사례가 매우 많다. 대부분의 SiC 쇼트키 다이오드는 쇼트키접합에서 발생하는 쇼트키장벽 감소로 인해 누설전류가 증가하는 현상을 줄이기 위해 순수한 쇼트키 접합 대신 복합 접합구조를 사용하고 있다. Fig. 6은 SiC 쇼트키 다이오드에서 많이 사용되고 있는 p-n 접합을 삽입한 구조인 접합장벽쇼트키 (junction barrier Schottky) 구조 혹은 p-n 접합 일체형 쇼트키 (merged p-n Schottky) 구조 또는 함몰형 p-n 쇼트키 (buried p-n Schottky) 구조를 보여주고 있다. 최근에 톰에서는 기존 SiC 다이오드에 비해 역방향 서지특성이 현저히 향상된 이중접합 다이오드 (HJD, hetero junction diode)를 개발하여 기존에 문제가 되어 왔던 SiC 기반 전력반도체의

신뢰성 문제해결에 큰 성과를 얻었다.<sup>4)</sup> 또한 Infineon은 SiC의 높은 열전도 특성과 열전도 특성이 우수한 접착층 (adhesive)을 이용하여 칩 크기를 줄이고 기판을 얇게 만들어 내열 특성 및 역방향회복 특성 우수한 제품을 판매하고 있다.<sup>5)</sup>

## 2.2.2. SiC 스위치소자 기술개발 동향

이른바 full SiC 인버터 즉 SiC 다이오드와 SiC 스위칭 소자가 결합한 전력변환장치를 개발하였을 경우 종래의 실리콘 소자에 비하여 최대 80%의 전력변환손실 감소효과가 있는 것으로 널리 알려져 있다. 특히 낮은 손실과 우수한 스위칭 특성으로 인해 수동소자 크기 감소 및 냉각장치의 간소화가 가능해 전체 시스템의 크기를 감소시킬 수 있었다.<sup>6)</sup>

Normally-off 특성 및 전압제어 등의 장점을 가지는 금속산화막반도체 (Metal Oxide Semiconductor, MOS) 형 게이트를 가지는 전력소자의 개발에 있어서 SiC는 Si와 달리 게이트 산화막의 신뢰성문제, 낮은 채널이동도로 인해 초기에는 MOS 구조가 아닌 p-n 접합으로 구성된 접합형 전계효과 트랜지스터 (Junction Field Effect Transistor)나 바이폴라접합 트랜지스터 (Bipolar Junction Transistor)가 대안으로 널리 연구되어왔다. Fig. 7은 SiC JFET의 구조를 보여주고 있다. 이러한 구조의 장점은 소자의 모든 구조가 강건한 p-n 접합으로 이루어져 신뢰성에서 우수한 특성을 보인다. 또한 게이트 구조를 어떻게 설계하느냐에 따라 normally-off 특성을 가지는 전력소자를 제작할 있다는 장점이 있다. 하지만 이러한 소자를

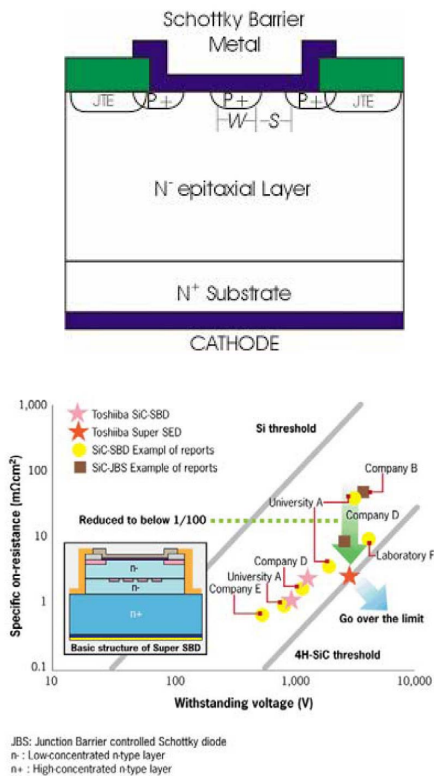


Fig. 6. JBS (혹은 MPS) 및 Buried p-n Schottky 다이오드

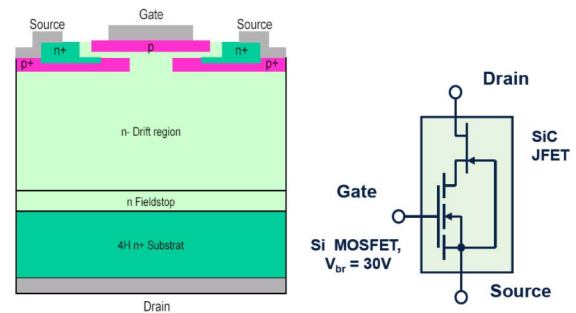


Fig. 7. SiCED사의 수직형 JFET 구조 및 캐스캐이드 방식의 스위치소자.



제작할 때 온-저항이 증가하는 단점이 있기 때문에 최근에는 그림에서와 같이 트랜지터의 온-오프 제어는 실리콘 MOSFET로 구현하고 내압 및 온-저항은 SiC JFET이 구현하도록 만든 이른바 캐스캐이드 구조가 널리 사용되고 있다(Fig. 8). 2006년 일본의 AIST에서는 normally-off SiC buried-gate SIT (JFET) 소자를 이용하여 동급의 다른 스위칭 소자 대비 최저급인  $1.0 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ 의 낮은 온저항 ( $R_{on}$ ) 700V급 소자를 제작하였다.<sup>7)</sup> 에피택 성장 공정과 건식식각 공정을 이용하여 이온주입 없이 제작한 것이 특징이다. 미국 럿거스대학 (Rutgers University)에서는 VJFET과 LJFET 구조에 대한 연구가 진행하여 2008년 이온주입공정을 이용하여 제작한 1700V 수직구조의 VJFET (normally-on) 및 1000V 수평구조 LJFET (normally-off) 소자 개발을 보고한 바 있다.<sup>8,9)</sup> 2011년에는 SiC JFET 기술에서 가장 앞선 미국 Semisouth사에서는 1200V 20A SiC JFET를 상용화하였다. 또한 SiC JFET과 SiC 다이오드를 결합한 파워모듈도 제품화하였다. 특히 Semisouth사에서 개발한 normally-off VJFET의 경우 게이트드라이브를 최적화하였을 때 SiC MOSFET보다 손실이 더 작은 것으로 나타났다 (Fig. 9).<sup>10)</sup> 그러나 Semisouth사는 최근 폐업하였으며 독일의 SiCED사만 SiC JFET과 관련된 사업을 여전히 진행하고 있다.

SiC JFET은 강건한 구조로 인해 전력소자 외에 고온 및 고방사 환경에서도 사용가능한 전자시스템에도 응용되고 있다. NASA는 기존에 개발하였던 JFET 기반 SiC

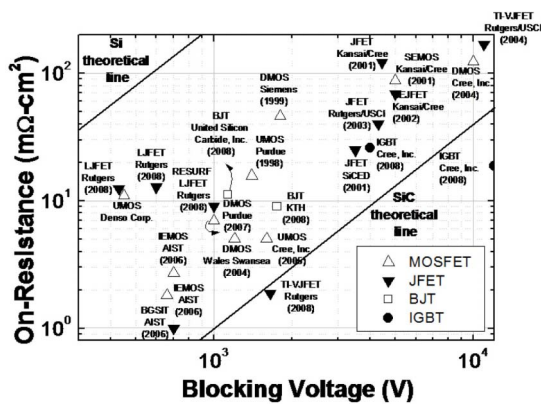


Fig. 8. 최근 발표된 SiC FET 전력 반도체 소자의 온저항-내전압 그래프.

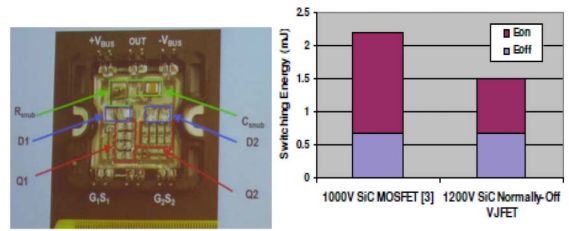


Fig. 9. 미국 Semisouth사의 VJFET을 이용한 하프 브리지 모듈과 전력손실 비교

electronics들에 대해 누적된 자료를 통해 신뢰성을 검증하고 있으며 우주환경에서의 검증을 위해 우주비행체 (MISSE-7 실험)에도 탑재하여 테스트한 바 있다.<sup>11)</sup>

SiC 바이폴라트랜지스터 (BJT)는 JFET와 유사하게 강건한 p-n 구조를 가지고 있으면서도 JFET와는 달리 전도도변조 (conductivity modulation)가 가능하기 때문에 저손실 소자로 연구 되어져 왔다. Fig. 10은 SiC BJT의 구조를 보여주고 있다. SiC bipolar는 p-n 구조를 가지고 있기 때문에 basal plane dislocation (BPD)이라는 결함이 있어 트랜지스터 성능이 저하되는 단점이 있었으나 최근 에피 성장기술의 향상으로 BPD는 거의 제거되었다. 또한 표면에서의 전자-정공 재결합에 의한 이득감소는 표면을 질화 후처리한 산화막으로 덮어서 문제를 해결하고 있다. 그러나 BJT는 베이스 전류를 통해 트랜지스터를 제어하는 방식이기 때문에 드라이브 회로에 부하가 많이 걸린다는 단점이 있다. 이를 해소하기 위해 최근에는 달링턴 구조를 사용하여 베이스에 작은 전류를 흘려도 트랜지스터가 제어되도록 구조를 바꾸고 있다. BJT는 스웨덴의 KTH 대학에서 창업한 TranSiC사와 미국의 Genesic사 중심으로 제품이 꾸준히 개발되고 있다. BJT는 Transic사에서 1200V급 SiC BJT를 개발하여 제품을 출시한 이래 최근에 Genesic사에서 1700V/16A급 소자가

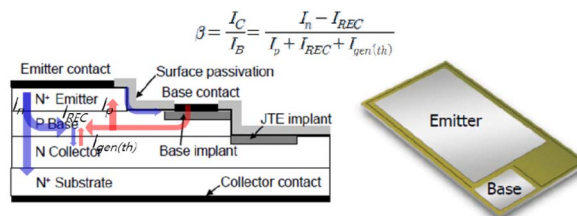


Fig. 10. SiC 바이폴라트랜지스터 구조.

지 개발하여 판매하고 있다. 또한 TranSiC사는 2011년 초에 미국계 Fairchild사에 인수되었다.

JFET 및 BJT가 SiC 스위치에서는 가장 먼저 상용화 되었음에도 불구하고 최근에는 이와 관련된 연구개발이 줄어들고 있는 추세에 있으며 이는 MOSFET가 산화막 신뢰성 문제를 상당히 해결하고 조기 상용화가 되었기 때문으로 판단된다.

SiC 전계효과 트랜지스터 중에서 가장 널리 그리고 오랫동안 연구된 소자가 MOSFET이다. SiC MOSFET에 대한 연구는 1990년대 중반부터 시작되었으나 2011년이 되어서야 전력변환장치에 사용할 수 있는 사양으로 시판되기 시작할 정도로 난이도가 높은 기술이다. Fig. 11은 수직형 SiC MOSFET의 대표적인 단면구조를 보여주고 있다. 실리콘 전력소자의 경우에는 고전압 응용에 적용되는 소자일수록 에피층의 두께가 두꺼워져 드레인(drain)에서 소스(source)로 전류가 흐르는 경로에서 에피층에 의한 온-저항의 증가가 도통손실(conduction loss)의 주된 원인이었다. 그러나 SiC의 경우에는 에피층 두께 증가에 의한 온-저항의 증가보다는 산화막-SiC 계면에 존재하는 높은 트랩농도에 의해 발생하는 낮은 전자 이동도 및 전자농도에 의한 높은 채널저항이 도통손실의 주된 원인이 되고 있다. 즉 MOSFET의 상용화를 지연시켰던 가장 큰 문제는 게이트 산화막 품질이었다. SiC는 화합물반도체 중에서 유일하게 열산화공정이 가능한 물질이지만 열산화공정 과정에서 게이트 산화막과 SiC 계면에 탄소클러스터가 형성되어 이들에 의해 산화막-SiC 계면에서 결함이 발생된다.

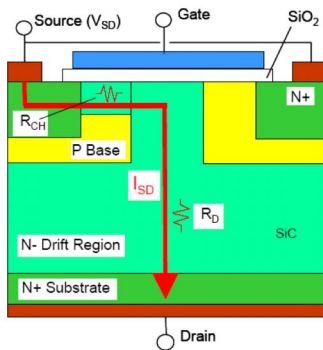


Fig. 11. 수직형 SiC MOSFET 구조 및 온-저항을 결정하는 저항성분.

탄소클러스터는 주로 산화 후 질화처리를 통해서 제거가 되고 주입된 질소의 일부는 실리콘과의 강한 결합을 이루어 결함을 감소시키는 것으로 알려져 있다.<sup>12)</sup> 하지만 질화처리의 가장 큰 단점은 MOSFET의 문턱전압을 낮추고 온환경에서 오동작을 일으킬 수 있다는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 미쯔비시 그룹에서는 질화처리 후 습식산화를 진행하면 전하이동도가 크게 나빠지지 않고 문턱전압을 높일 수 있다는 연구결과를 발표하기도 하였다.<sup>13)</sup> 또한 전하이동도를 높이기 위해서 기존의 Si면이 아닌 C면에 소자를 제작하거나 전하이동도가 높은 결정방향으로 채널이 형성되도록 MOSFET를 제작한 연구결과도 있다. 최근 이온 주입된 p-well층보다 박막성장된 층에서 더 높은 전하이동도를 얻을 수 있다는 연구결과에 기반하여 p-well층 위에 얇게 에피층을 성장시켜 MOS 구조의 증가모드(accumulation mode)를 이용한 소자들이 우수한 특성을 나타낸다는 연구결과도 보고되고 있다.<sup>14)</sup> 현재 MOSFET는 바디 다이오드(body diode)의 턴-온 전압을 낮추기 위해 폴리실리콘을 이용한 이중접합다이오드 혹은 증가모드형 채널을 갖는 MOSFET에 대한 연구가 진행 중이다. 이러한 연구 성과에 힘입어 미국의 Cree사는 2011년 1월 세계 최초로 1200V, 20A급 SiC MOSFET를 상업적으로 판매하기 시작하여 현재는 1700V/5A급 SiC MOSFET를 판매하고 있다(Fig. 12). 또한 일본의 Rohm사도 1200V/35A급 SiC MOSFET를 상용화하였고 전류밀도를 높이기 위해 trench 게이트형 MOSFET도 개발한 상태이다.

파워 MOSFET에 있어서 기존의 DC test는 MOSFET

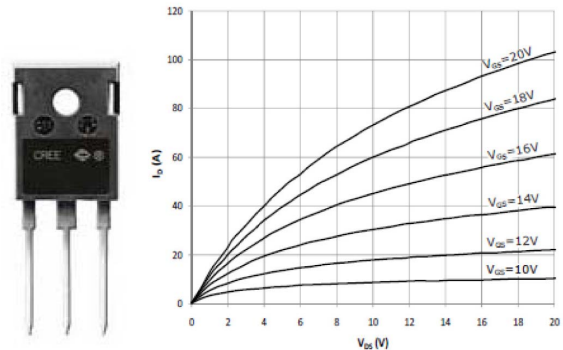


Fig. 12. Cree사의 상용 SiC MOSFET 사진 및 전류-전압특성.



동작 특성을 제대로 반영할 수 없으므로 AC test를 이용하고 있다. Cree사 MOSFET의 경우 AC test 결과 1000시간 동작 시에도 문턱전압(threshold voltage) 변동은 0.1V 이하로 감소하여 충분한 신뢰성이 확보된 것으로 알려져 있다.

JFET의 경우에서와 같이 SiC MOSFET는 전력소자 응용 외에도 가혹환경에서 사용되는 전자시스템에 적용하는 연구가 진행되고 있다. 미국 GE에서는 n-MOSFET를 이용하여 유정 등에 사용될 SiC electronics들을 개발하는데 주력하고 있다. 독일 Bosch에서 개발한 SiC MOSFET은 400°C 및 2MV/cm 환경에서 약 10,000시간 동작하여 가혹환경에서도 안정적으로 동작하였음을 확인하였다.

### 2.2.3. SiC 파워모듈 기술개발 동향

파워모듈은 인버터 및 컨버터와 같은 전력변환장치에 사용되는 전력소자를 개발소자가 아닌 응용에 따라 두 개의 스위치소자를 직렬로 연결한 half-bridge 형과 삼상 전원을 제어하기 위해 half-bridge 세 개가 병렬로 연결한 six-pack형이 있다. 미국 Cree는 2009년에 미국 국방부 용역사업의 결과물로서 Fig. 13과 같이 1200V 100A급 파워 모듈을 개발한 바 있다. 이 파워모듈은 항공기용으로 테스트되어 매우 뛰어난 온도 안정성과 우수한 효율을 구현하였다. 이러한 연구결과를 기반으로 Cree사에서는 1200V/100A half-bridge 모듈과 1200V/50A급 six-pack 모듈을 상용화하였다.

SiC 전력반도체를 적용한 하이브리드자동차 및 전기

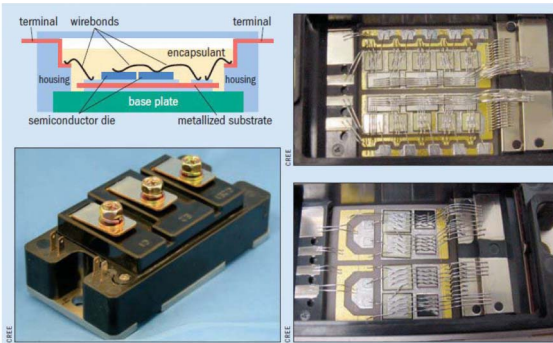


Fig. 13. Cree SiC MOSFET 파워 모듈(1200V-100A급 2009년).

자동차용 1200V/230A 인버터가 개발되었는데 이러한 SiC 모듈이 전기자동차에 적용될 경우 25~40% 정도의 에너지효율이 향상될 것으로 예측되고 있다. 현재 중전력 영역에서의 Si 소자 대비 SiC 소자의 경쟁력을 보면, SiC MOSFET으로 7kW급 태양광인버터를 제작할 경우 약 3%의 효율이 향상되는 것으로 보고 있다. 일본 AIST에서는 2011년 9월에 모터 구동용 SiC 인버터를 개발하였다. 개발한 인버터의 용량은 15kW급으로 수냉식이 아닌 공랭식을 채용한 것이 특징으로 200°C의 고온에서도 동작하며 실리콘 소자를 채용한 인버터에 비하여 체적을 최대 1/10 수준으로 줄였다고 보고하였다.

Fig. 14는 실리콘 고속회복 다이오드 대신에 SiC 쇼트키 다이오드를 사용할 경우 전체 시스템 측면에서의 원가절감 시나리오를 보여주고 있다. 전력변환장치의 실리콘 전력반도체를 SiC 전력반도체로 대체할 경우 우선 전력변환손실을 상당량 줄일 수 있는 이점이 있을 뿐만 아니라 고주파 스위칭이 가능하여 DC-DC 컨버터 등에서는 SiC 소자 채용에 의한 고주파 스위칭으로 부품의 크

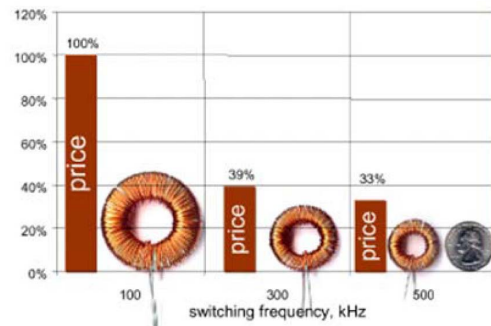
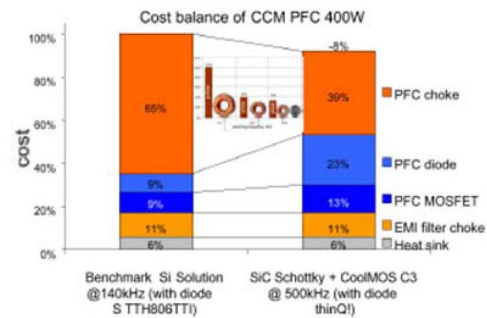


Fig. 14. 400W PFC 다이오드를 SiC 쇼트키 다이오드로 바꾸었을 경우 전체 시스템 측면에서의 가격 비교



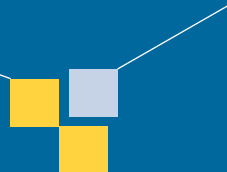
기를 줄일 수 있어 원가 절감과 출력밀도 (power density) 향상을 기할 수 있다.

### 3. 결론

전력반도체 관점에서 우수한 물성을 갖는 탄화규소는 쇼트키다이오드의 상용화에 이어 MOSFET까지 상용화 되어 전력변환장치에 적용되고 있다. 또한 SiC 전력소자를 사용한 시스템은 효율 1~3% 향상이 되었으며 부피 및 무게는 최대 1/10 이상으로 감소되었다. 이러한 장점에도 불구하고 SiC 전력소자의 최대의 문제점은 가격이다. 물론 시스템 전체 측면에서는 실리콘 소자 대비 가격을 낮출 수 있지만 이들과 경쟁하기 위해서는 지속적으로 가격을 낮추어야 한다. 희망적인 소식은 SiC 웨이퍼 구경이 계속 커져 현재 6인치 웨이퍼가 개발이 되었고 많은 시스템 벤더들이 SiC 전력소자를 제품에 적용하기 때문에 가격은 계속 낮아질 것으로 예상된다. 또한 SiC 소재 및 소자 제품 개발을 위해서 더 많은 세계적인 반도체업체들이 합류하고 있어 이러한 추세는 이어질 것이다. 다만 SiC 전력소자가 미래에도 여전히 경쟁력을 가지기 위해서는 SiC 기판 및 박막성장 기술이 더욱 성장하여 실리콘과 유사한 수준의 결합을 가지도록 노력해야 할 것이다.

### 참고문헌

1. K. Kyuma, "Strategic Energy Policy for a Sustainable Society-expectations for SiC Power Devices," ICSCRM 2013.
2. B. Jayant Baliga, Silicon Carbide Power Devices, World Scientific Publishing.
3. SiC 시장보고자료, Yole Development, 2010.
4. T. Hayashi, H. Tanaka, Y. Shimoida, S. Tanimoto, and M. Hoshi, "New High-voltage Unipolar Mode p+ Si/n-4H-SiC Heterojunction Diode," *Mater. Sci. Forum*, **953** 483-85 (2005).
5. <http://www.infineon.com/cms/en/product/discretes-and-standard-products/diodes/silicon-carbide-schottky-diodes/650v-thinq!!22-sic-diodes-generation-5>
6. H. Zhang, L. M. Tolbert, and B. Ozpineci, "Impact of SiC Devices on Hybrid Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Ind. Appl.* (2008) **47** [2] 912-21 (2008).
7. Y. Tanaka, K. Yano, M. Okamoto, A. Takatsuka, K. Fukuda, M. Kasuga, K. Arai, and T. Yatsuo, "Fabrication of 700V SiC-SIT with Ultra Low On-resistance of  $1.01\text{m}\Omega\text{-cm}^2$ ," *Mater. Sci. Forum*, **527-29** 1219 (2006).
8. Y. Zhang, K. Sheng, J. H. Zhao, P. Alexandrov, X. Li, L. Fursin, and M. Weiner, "Development of 4H-SiC LJJFET-based Power IC," *IEEE Trans. Elec. Dev.*, **55** 1934 (2008).
9. X. Li and J. H. Zhao, "Design of 1.7 to 14kV Normally-off Trenched and Implanted Vertical JFET in 4H-SiC," *Mater. Sci. Forum*, **457-60** 1197 (2003).
10. D. C. Sheridan, A. Ritenour, V. Bondarenko, J. B. Casady, and R. L. Kelly, "Low Switching Energy 1200V Normally-off SiC VJJFET Power Modules," *Mater. Sci. Forum*, **679-80** 583 (2010).
11. P. G. Neudeck, N. F. Prokop, L. C. Greer, L.-Y. Chen, and M. J. Krasowski, "Low Earth Orbit Space Environment Testing of Extreme Temperature 6H-SiC JFET on the International Space Station," *Mater. Sci. Forum*, **679-80** 579 (2010).
12. T. Kimoto, Y. Kanzaki, M. Noborio, H. Kawano, and H. Matsunami, "Interface Properties of Metal-oxide-Semiconductor Structures on 4H-SiC{0001} and (1120) Formed by N<sub>2</sub>O Oxidation," *JJAP*, **44** [3] 1213 (2005).
13. M. furuhashi, T. Tanioka, M. Imaizumi, N. Miura, and S. Yamakawa, "Novel Gate Oxide Process for Realization of High Threshold Voltage in 4H-SiC MOSFET," *ICSCRM*, 2013.
14. H. Linewith, S. Dimitrijevic, C. E. Weitzel, and H. B. Harrison, "Novel SiC Accumulation-mode Power MOSFET," *IEEE Trans. Elec. Dev.*, **48** 1711 (2001).



## 특 집 ■■■ 강인호, 방욱, 문정현, 나문경

### ●● 강인호



- 2004년 광주과학기술원 정보통신공학과 박사
- 2004년 삼성테크윈 책임연구원
- 2005년 한국전기연구원 전력반도체연구센터 선임연구원

### ●● 방욱



- 1997년 서울대학교 무기재료공학과 박사
- 1997년 AIST(일) 특별연구원
- 2000년-현재 한국전기연구원 전력반도체연구센터 책임연구원

### ●● 문정현



- 2010년 서울대학교 재료공학부 박사
- 2010년 (주)삼성모바일디스플레이 책임연구원
- 2011년 한국전기연구원 전력반도체연구센터 선임연구원

### ●● 나문경



- 2005년 포항공과대학교 화학공학과 석사
- 2005년 한국전기연구원 연구원