

특집 : SiC 전력반도체 소자의 기술동향

# SiC 전력반도체 기술개발 동향

김 상 철

(전기연구원 에너지반도체센터 팀장)

전력반도체소자는 1947년 트랜지스터의 출현으로 반도체 시대가 도래한 이후 사이리스터, MOSFET 및 IGBT 등으로 발전하였다. 개발당시에는 10A 정도의 전류처리 능력과 수백 V 정도의 전압저지능력을 가지고 있었지만, 현재에는 정격전류로는 약 8,000A, 정격전압으로는 무려 12kV 급까지 발전되었다. 그러나 전력반도체 소자의 대부분은 실리콘을 원료로 제작되고 있으며 현재 실리콘의 물성적 한계에 직면하여 고전압, 저손실 및 고속 스위칭화에 대한 새로운 도전이 시작되고 있다.

SiC 전력용 반도체는 실리콘 반도체의 이론적 물성한계를 극복할 수 있는 소재로서 80년대 이후 각광받아 왔다. 하지만 대구경의 단결정 웨이퍼 및 저결함의 에피박막의 부재로 90년대 중반까지는 가능성 있는 재료로서만 연구되었다. 90년대 중반 단결정 웨이퍼가 상용화된 이후 단결정 웨이퍼의 대구경화 및 저결함화가 급속히 진전되어 전력용 반도체 소자의 개발도 활기를 띄게 되었다. 본 기고에서는 탄화규소 반도체소자의 기술동향에 대해 소개하고자 한다.

## 1. 서론

최근 전 세계적인 유가급등, 자원고갈과 지구온난화의 위협 등으로 에너지소비의 고효율화가 매우 중요한 사회적 이슈로

대두되고 있다. 2007년 기준 국내 1차 에너지원별 소비실적은 234,323천toe이고, 석유 및 석탄 등 화석 에너지의 소비실적은 164,378천toe로 전체 에너지 소비량 중 화석에너지가 차지하는 비중이 70%를 넘는다<sup>[1]</sup>. 또한, 국내 총 전력 생산량은 403GWh이며, 이 중 무연탄, 유연탄, 중유 및 LNG 등의 화석연료를 사용하는 평균 전력생산량은 255GWh로 전체 전력생산량의 63%를 차지한다<sup>[2]</sup>. 이러한 화석연료로 인해 지구온난화의 주범인 이산화탄소 배출량의 40%가 전력생산에 기인하고 있다는 점을 고려하면 에너지의 효율적인 이용이 매우 중요해진다. 이러한 에너지의 효율적인 이용을 위해서는 전력변환기술, 특히 전력변환용 스위치소자의 고효율화 및 고신뢰성을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 탄화규소 전력반도체 소자는 기존의 실리콘 기반의 전력반도체 소자의 한계를 극복하여 전력변환기술의 고효율화를 달성하기 위한 대안으로 급 부상하고 있다.

SiC 전력반도체소자는 실리콘 전력반도체소자에 비해 우수한 물질특성을 갖고 있어 성능 측면에서 뿐만 아니라 전력변환장비의 크기를 획기적으로 줄일 수 있다<sup>[3]</sup>. SiC 반도체 분야에서의 최근의 비약적인 발전을 통해 고전압 전력소자로서의 활용가능성이 매우 높아지고 있다<sup>[3]</sup>. 특히 소자가 직접적으로 고온 환경에서 동작이 가능하면, 좀 더 신뢰성 있는 정확한 측정 및 제어가 가능할 뿐만 아니라 시스템의 소형 및

경량화 실현, 빠른 응답특성, 결과적인 효율향상 등 여러 가지 장점을 얻을 수 있다. 현재는 250℃까지의 온도영역에서 실리콘 SOI(Silicon on Insulator) 소자가 주로 사용되고 있다. 그러나 300℃를 넘는 온도 영역에서는 실리콘으로는 한계가 있고, 특히 SOI는 전력소자에 적용하기는 한계가 있어 주로 저전력 고온소자가 필요한 부분에 적용이 되고 있다. 따라서 전력용에 적합한 고온소자로 SiC 소자의 연구가 활발히 진행되고 있다.

## 2. 선진국 기술동향

탄화규소 전력반도체소자는 실리콘 전력반도체소자에 비해 전력밀도를 3~10배 높일 수 있는 고밀도 전력반도체이며 2012~2015년 경에 상용화가 전망되고 있다. 탄화규소의 우수한 물성으로 전력변환 스위칭 소자로 사용할 경우 실리콘 기반의 전력소자와 비교하여 소자 크기는 1/10, 도통손실은 1/300으로 감소되며, 이를 시스템에 적용할 경우 변환 손실이 1/3로 줄어들 수 있을 것으로 기대된다. 전력변환장치의 대용량화 추세에서 고온동작 안정성, 작은 부피, 경량화 및 저손실의 시스템이 요구된다. 특히 대용량화와 경박단소화의 상충되는 개념을 만족시키기 위해서는 전력반도체의 전력밀도를 획기적으로 높일 수 있는 새로운 개념의 전력반도체가 필요하게 된다. 아래의 그림 1에 실리콘, 탄화규소 및 다이아몬드 등의 각종 반도체 재료의 전력밀도로드맵을 나타내었다.

이러한 탄화규소 전력반도체 소자를 개발하기 위해서는 단결정, 에피박막 및 소자제작공정 등의 여러 분야에서의 기술적 진보가 필요하며 본 절에서는 각 분야별 기술동향을 간략히 살펴보도록 한다.

### 2.1 탄화규소 소재기술동향

탄화규소 전력반도체 소자는 1980년대 탄화규소 단결정 성장 기술이 개발되었으며 1990년대 소자에 적용할 수 있는 상용 웨이퍼가 출현하였다. 2001년 이후 웨이퍼 업체의 수가

증가하였고 품질 및 가격경쟁이 시작되었다. 2006년부터 4인치급의 웨이퍼가 공급되기 시작하여 현재 3인치 및 4인치 웨이퍼 공정이 주로 진행되고 있다. 개발 초기에는 웨이퍼의 dislocation 및 micropipe 등의 결함밀도가 높았으나, 현재 defect-free 급의 웨이퍼 기술의 개발로 상용화에 근접하고 있다. 단결정의 경우 미국 Cree사가 최고의 기술을 확보하고 있으며 1cm<sup>2</sup> 대용량 소자를 기준으로 90% 이상의 수율을 확보한 상태이다. 그림 2에 미국 Cree사의 micropipe 결함 개선 추이를 나타 내었다.

탄화규소 웨이퍼를 전력반도체소자에 적용하기 위해서는 에피박막 기술 또한 매우 중요하다. 1994년 step-controlled epitaxy 기법의 개발로 저온에서 고품질의 박막 형성이 가능해지면서 4°, 8°-off 기판이 주종이 되었으며, 2003년 이후 on-axis 기판에서의 에피택시 기법 개발로 인해 웨이퍼의 단가를 획기적으로 낮추고, 결함을 최소화하여 소자의 신뢰성을 향상시키게 되었다. 현재 에피박막 기술의 주된 관심사는 소자의 신뢰성에 영향을 미치는 stacking fault 및 basal plane 전위 감소를 위한 연구가 주를 이루고 있다.

### 2.2 탄화규소 소자기술동향

탄화규소 전력반도체는 쇼트키 다이오드, MOSFET, MESFET 등의 unipolar 소자 개발이 주를 이루고 있다. 2002년 최초로 300V 및 600V급 탄화규소 쇼트키 다이오드가 상용화되기 시작하여 현재 1200V급까지 상용화가 진행되어 역률보상 등의 산업용 전원장치에 적용되고 있다. 또한 탄화규소 쇼트키 다이오드와 실리콘 IGBT를 결합한 전력변환 시스템이 개발 중이며 특히 탄화규소 소자와 실리콘 소자의 hybrid 형태의 전력변환시스템에서 변환손실이 52%까지 감소되는 것이 보고되고 있다.

또한, 탄화규소 MOSFET소자의 게이트 산화막의 신뢰성 및 낮은 채널영역의 이동도, 공정의 복잡성 등으로 실용화 측면의 어려움을 극복하기 위해 JFET 및 SIT 등의 소자도 최근 활발히 연구되고 있다. 탄화규소 JFET 및 SIT

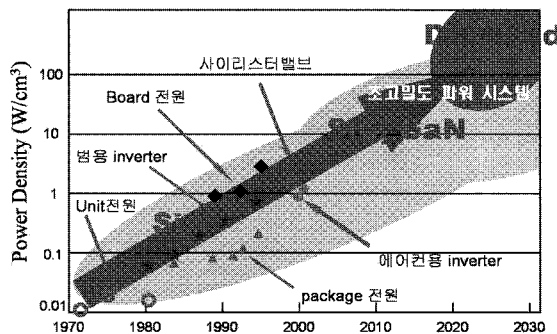


그림 1 반도체 재료의 전력밀도 로드맵

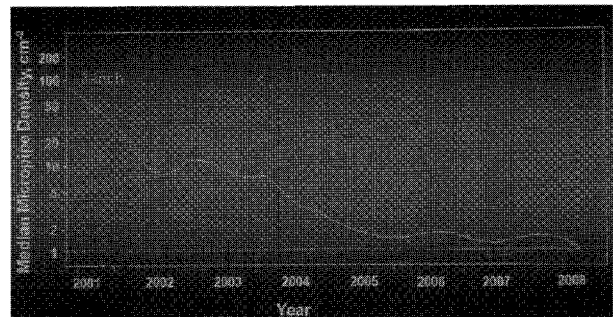


그림 2 Cree사 웨이퍼에 존재하는 micropipe 결함 개선 추이

는 수십MHz 이상의 빠른 동작 주파수, 고온 동작특성, 우수한 내전압 특성, 높은 전하이동도 및 높은 기술성숙도 등으로 인해 많은 기술적 진보가 이루어졌으며, 일부 기업을 통해 상용화 단계에 접근하고 있다. 2006년 일본의 AIST에서는 normally-off 특성의 탄화규소 JFET 소자를 이용하여 같은 class의 다른 스위칭 소자 대비 가장 낮은 수준인  $1.0\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 의 낮은 온저항(Ron)의 700V급의 소자를 에피택시 공정과 건식식각공정을 이용하여 이온주입 없이 개발에 성공하였다. 2008년에는 미국 Rutgers대학에서 이온주입공정을 이용하여 normally-on type 수직형 1700V급 JFET 및 normally-off type 수평형 LJFET 소자의 개발을 보고하였다.

MOSFET의 경우 앞에서 언급한 이유로 아직까지 상용화된 소자는 없으나 모든 관련 기업 및 연구기관들이 이론치에 가까운 채널 이동도를 갖는 MOSFET 개발에 연구 역량을 집중하고 있다. 궁극적으로 10kV 이하의 전압영역에서 가장 경쟁력을 확보하기 위해서는 탄화규소 MOSFET 개발이 필연적이다. 현재 미국 및 일본의 기업이 중심이 되어 10kV/20A급의 MOSFET 소자 개발이 보고되었으며 1200V/60A급의 탄화규소 DMOSFET 소자도 실험실 수준에서 개발이 보고되었다(그림 3). 또한 2008년 ECSCRM 학회에서 발표된 900V급의 탄화규소 trench MOSFET의 경우 온저항이  $2.9\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 이고 전류밀도가  $1200\text{A}/\text{cm}^2$ 로 발표되었다. 그러나 아직은 장기신뢰성 등의 문제를 해결해야 하는 등의 기술적 보완이 시급한 실정이다. 아래의 그림 4에 최근 까지 발표된 탄화규소 FET 소자의 온저항-내전압 상관관계를 나타내었다.

10kV급 이상의 응용분야에서는 양극성(bipolar)소자의 장점을 극대화하고자 하는 측면에서 탄화규소 IGBT 소자의 연구가 진행되고 있다. IGBT 소자는 높은 게이트 임피던스와 전도도변조로 인한 저손실 전압제어소자이나 탄화규소의 특성을 활용한 IGBT를 구현하기 위해서는 p-기판 및 채널의 이동도 향상 문제, 게이트 구조의 안정적 형성 문제 및 상대

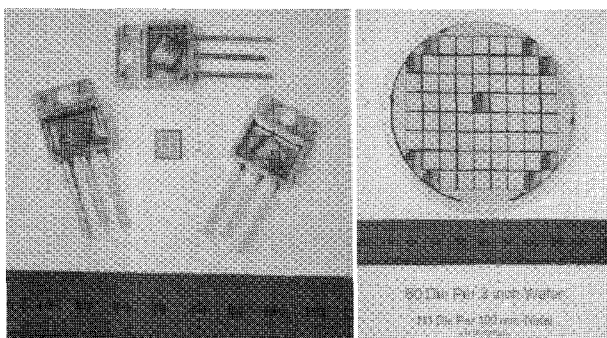


그림 3 Cree사에서 최근 발표한 1200V/60A급 탄화규소 DMOSFET 소자

적으로 복잡한 소자 구조 및 공정으로 인해 매우 제한적으로 연구가 진행되고 있다. 미국 퍼듀대학에서 20kV까지의 탄화규소 IGBT 소자 연구를 진행시키고 있으나 주목할 만한 진전은 없는 것으로 보인다. 또한 Cree사에서는 2008년 specific on resistance가  $18.6\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 인 12kV급 p-channel IGBT 개발을 보고하였으나 턴-오프 시간이 길고 순방향 전압강하가 큰 단점을 내포하고 있다.

### 2.3 탄화규소 응용 시스템 기술 동향

앞에서 개발된 탄화규소 전력반도체 소자를 기반으로 저손실 전력변환 시스템의 개발도 활발히 진행 중이다. 일본 간사이 전력의 경우 Cree사와 공동으로 탄화규소 전력변환소자의 송배전 및 변전급 대용량 소자로의 적용을 위해 많은 연구를 진척시켜 왔으며 2002년 이후 대용량 다이오드 모듈 및 3상 인버터 개발에 성공하였다. 이를 통해 2004년 12kVA급 PWM 주파수 2kHz 3상 인버터를 계통에 연계하여 실증실험을 진행 하였다. 그림 5에 간사이전력에서 개발한 탄화규소 스위치 모듈 및 3상 인버터 시스템 내부구조를 나타내었다.

일본 도요다자동차의 경우 HEV에 적용하기 위해 전력밀도가 높은 탄화규소 전력변환 시스템에 큰 관심을 갖고 연구를 진행하고 있다. 최종 사용자 측면에서의 접근이므로 요구되는 자동차 응용회로에서의 소자 특성 최적화를 가장 잘 할 것으로 기대된다. 2008년 9월 롬사와 혼다자동차는 세계최초로 EV 및 HEV용 탄화규소 파워 모듈(1200V/230A급) 개발을 발표하였다. 발표된 모듈이 EV에 적용될 경우 25~40% 정도의 연비 향상이 예측된다.

미쓰비시사에서는 탄화규소 MOSFET를 이용하여 3.7kW급 인버터를 제작하여 구동하는데 성공하였으며, 실리콘 기반의 인버터에 비해 54%의 손실 감소효과를 얻었다. 또한 일본 및 독일을 중심으로 신재생에너지(태양광발전)용 인버터 시스템의 고효율화를 위해 탄화규소 소자를 적용하는 연구가

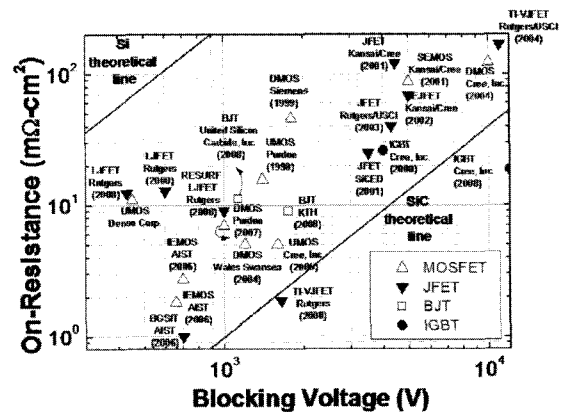


그림 4 최근까지 발표된 탄화규소 FET소자의 온저항-내전압 그래프

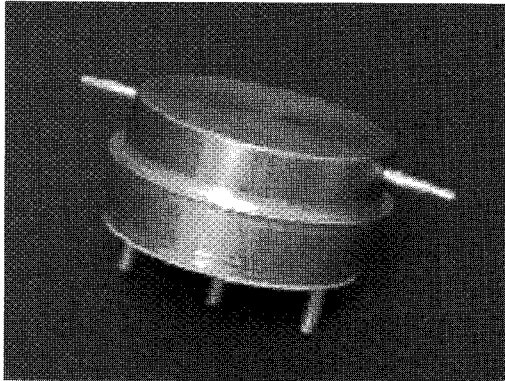
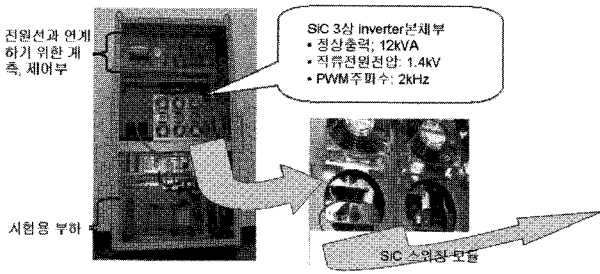


그림 5 개발된 12kVA급 탄화규소 3상 인버터 시스템 내부구조 및 탄화규소 스위칭 모듈

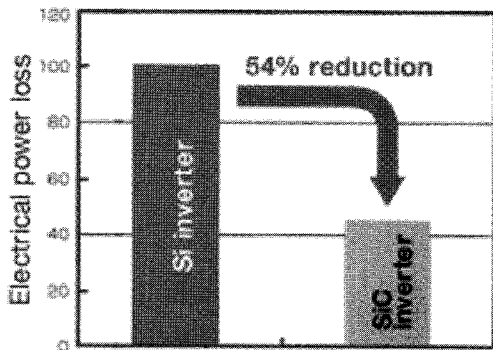
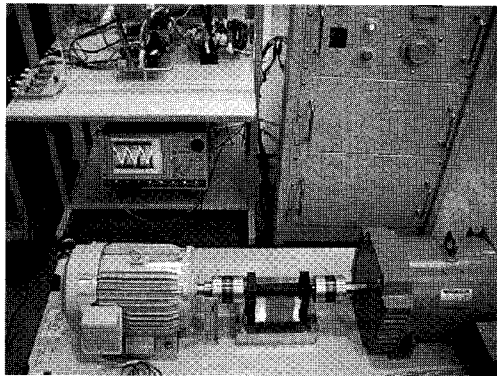


그림 6 미쯔비시에서 발표한 탄화규소 인버터 시스템 시연 장면

활발히 진행되어 PV 인버터에서 기존의 실리콘 IGBT를 적용한 경우에 비해 탄화규소 MOSFET 적용시에는 약 2.4%의 변환효율이 향상됨을 보고하였다. 일본의 AIST에서는 탄화규소 SIT를 이용한 인버터 회로를 구현하여 실리콘 IGBT에 비해 손실이 1/12로 감소된 결과를 보고하였으며, 독일의 프라운호퍼 연구소는 미국 Cree사의 SiC 전력반도체를 이용하여 태양광발전을 위한 5kW급 인버터 개발을 발표하였다.

### 3. 국내 탄화규소 반도체 개발 현황

탄화규소 소재 분야에서는 2003년 차세대 신기술 개발사업으로 국내 벤처기업인 네오세미테크에서 탄화규소 단결정 기판을 개발하기 시작하였으며, 2005년 초 2인치급 6H-SiC 단결정 및 웨이퍼 개발을 보고하였다(그림 7). Cree사 등의 웨이퍼에 비해 결함밀도가 높아 아직은 소자에 적용하기에는 문제가 있으나 2011년 경에는 3인치 4H-SiC 웨이퍼의 상용화가 가능할 것으로 전망되어 가까운 장래에 탄화규소 반도체 소재의 국내 생산이 이루어질 것으로 예측된다.

에피박막 분야는 비교적 일찍 연구가 시작되어 1990년대 초반 3C-SiC 에피박막 성장 연구가 서울대, 전북대, 화학연 등에서 시도된 바 있다. 이후 MEMS 등의 응용을 위한 3C-SiC 박막성장 연구는 2000년대에 들어서 전남대, 동신대 등의 몇몇 대학에서 시도된 바 있으나, 전력소자용으로의 6H- 및 4HSiC에 대한 박막성장 연구는 2004년에 들어 서울대에서 유일하게 연구되기 시작하였고, 전기연구원에서 본격적인 연구가 시작되어 2인치급 에피박막 성장장치의 개발 및 이를 이용한 성장기술이 진행되고 있다.

탄화규소 전력반도체소자는 전기연구원의 주도로 2005년 600V/5A급의 쇼트키 다이오드가, 2007년에는 전기연구원과 이츠웰 공동으로 1200V/8A급 쇼트키 다이오드가 개발되

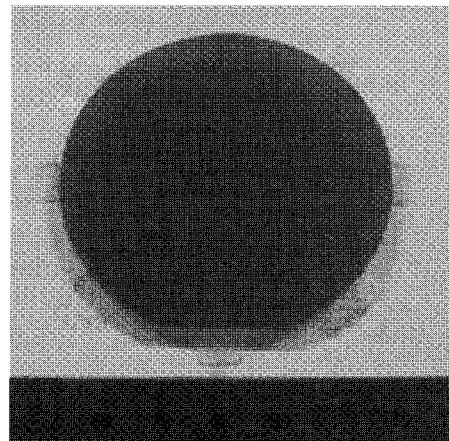


그림 7 국내기술로 개발된 2인치급 6H-SiC 단결정 웨이퍼

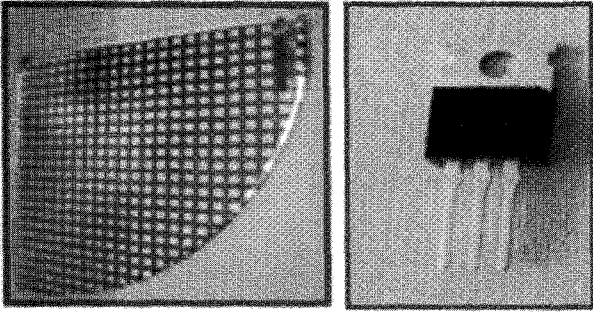


그림 8 1200V/8A급 SiC 쇼트키 다이오드

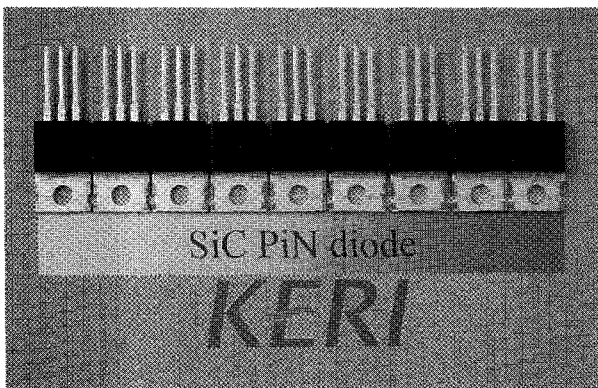


그림 9 2kV급 SiC PiN 다이오드

있으며(그림 8.) 전기연구원과 SPTpl와 공동으로 2kV급 SiC PiN 다이오드도 개발되었다(그림 9). 또한 고속통신용 RF 소자인 탄화규소 MESFET prototype이 쌍신전자통신과 서울대학교 공동으로 개발되었다. 이를 바탕으로 현재 페어차일드코리아와 KEC 등의 전력반도체 전문기업에서 쇼트키 다이오드를 전략품목으로 선정하여 실리콘 위주의 제품군을 다변화 하고자 내부적으로 개발을 진행하고 있다. 현재 600V/20A급의 탄화규소 쇼트키 다이오드 및 MOSFET 개발을 목표로 하고 있으며 1200V급 탄화규소 MOSFET의 기반기술 확보를 위한 연구개발도 정부과제로 진행 중이다.

#### 4. 결론

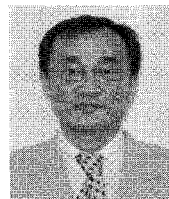
탄화규소 전력반도체기술은 미래원천기술 확보 측면에서

정부주도의 사업으로 진행되어 현재까지 쇼트키 다이오드 소자가 주력으로 개발되었고 kV급의 고전압화 기술을 보유하고 있다. 탄화규소 MOSFET와 IGBT 등과 같은 3단자 스위칭 소자에 대한 기술 확보 또한 기반기술 확보차원에서 진행되고 있다. 2000년 초반에는 국내에서 탄화규소 소자 제조공정을 진행 할 수 없는 상황 이었으나 현재 3개의 기업을 포함하여 최소한 5개 이상의 기관에서 탄화규소 반도체 소자 공정을 수행할 기반시설을 보유하고 있는 실정이다. 재료기술로는 국내기술을 통한 4인치급 4H-SiC 단결정 성장기술의 확보와 동시에 정교한 불순물 농도 제어가 가능한 에피박막의 성장 여부가 국내 탄화규소 전력반도체 연구의 커다란 전기가 될 것으로 전망된다.

#### 참고 문헌

- [1] 한국전력 전력통계속보, 2008.08, 358호
- [2] 한국전력 전력통계속보, 2008.08, 358호
- [3] Sei-Hyung Ryu, Anant Agarwal, James Richmond, John Palmour, Nelson Saks, and John Williams, IEEE Electron Device Letters, Vol. 23, No. 6, pp. 321, June, 2002.
- [4] J. Wang and B. W. Williams, "Evaluation of high-voltage 4H-SiC switching devices", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 46, pp. 589-597, 1999.
- [5] Cree, www.cree.com
- [6] SiCED, www.siced.com
- [7] SemiSouth, www.semisouth.com
- [8] 전력산업연구개발 기획보고서, 2008. 10

#### < 필 자 소 개 >



##### 김상철(金相喆)

1964년 2월 1일생. 1987년 한양대 물리학과 졸업. 1990년 동 대학원 졸업(석사). 2001년 부산대 물리학과 박사수료. 1992년~현재 전기연구원 에너지반도체센터 팀장.