

특집 : 전력용 반도체 소자의 응용

탄화규소(SiC) 전력반도체 현황

김 남 균, 김 상 철, 방 욱, 김 은 동
(한국전기연구원 전력반도체그룹)

1. 서론

탄화규소(SiC: silicon carbide)는 4족 원소들인 규소(Si)와 탄소(C)가 고온에서 화학결합한 것으로서 두 원소 간에 만들어질 수 있는 유일한 화합물이다¹⁾. 반도체 공학자들은 SiC 반도체를 실리콘에 대비시켜 화합물반도체(compound semiconductor)로 부르기도 하고, 밴드갭이 최대 3.3eV로 실리콘(1.12eV)에 비교하여 3배 가까이 넓어 밴드갭이 넓은 반도체(wide band gap semiconductor)의 하나로 부르기도 한다. 탄화규소는 100여 종류 이상의 결정형이 있으나 반도체 재료로 사용되는 것은 4H-SiC와 6H-SiC 등으로 한정되고 있다. 그 중에서도 4H-SiC는 6H-SiC에 비하여 전자 이동도와 포화 드리프트 속도가 높아 현재는 대부분의 SiC에 관한 연구는 대부분 4H-SiC 재료를 기반으로 하여 이루어지고 있다.

SiC 전력반도체가 실리콘 전력반도체소자에 비해 우수한 물질특성을 갖고 있는데 이는 기본적으로 재료물성의 차이에 기인한다. 그림 1은 실리콘과 SiC의 반도체 물성을 비교한 것으로 거의 모든 SiC 물성이 실리콘보다 우수한 것을 알 수 있다. 고전압 저지능력의 척도가 되는 절연파괴 전계강도(critical electric field)를 보면 약 8배 높는데 이는 같은 두께의 실리콘 반도체에 비하여 SiC 반도체는 8배의 전압저지 능력을 보유한다는 의미이다. 이를 뒤집어보면 같은 내전압을 가진 전력반도체의 경우 SiC 소자의 드리프트 층이 훨씬 얇아 온 상태의 저항이 실리콘에 비하여 현저히 낮다는 의미가 된다. 이론적으로는 동일한 내전압 소자에서 SiC 소자는 실리콘 소자의 온 저항의 1/100 이하로 작다.

고전압이면서도 저손실이라는 특징과 더불어 고온에서도 안정한 점은 SiC 전력반도체에 있어서 매우 중요한 장점으로

부각된다. 그림 1에서 보듯이 SiC는 실리콘에 비해 밴드갭이 넓어 약 800℃까지 안정적으로 동작이 가능하며 더구나 반도체 소자에서 발생된 열은 자체의 높은 열전도 특성으로 쉽게 방출되는 장점이 있다. 이는 대다수의 실리콘 전력반도체의 최대 접합온도(Tjmax: maximum junction temperature)가 150℃로 한정되어 열방출을 위하여 히트 싱크와 냉각팬 등의 부대장치가 필요한 것과 대비된다.

요약하자면 재료물성 관점에서 예측되는 SiC전력반도체의 장점은 고전압이면서도 저손실, 그리고 고온에서의 안정적 동작을 꼽을 수 있겠다.

2. SiC 반도체 재료기술 현황

반도체를 제조하기 위해서는 칩재료 기본재료 즉 단결정 웨이퍼의 공급가능 여부와 둘째로 제조공정 기술의 난이도가

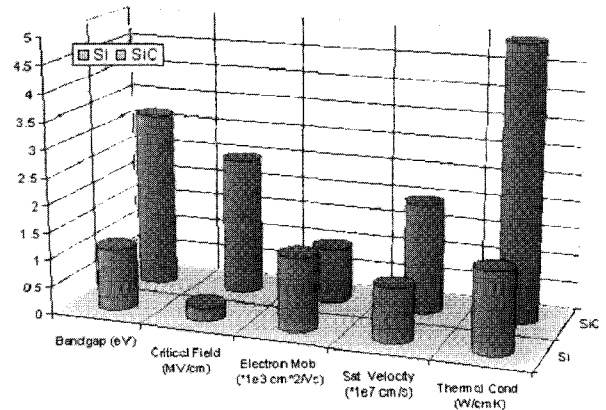


그림 1 SiC와 실리콘의 반도체 물성 비교

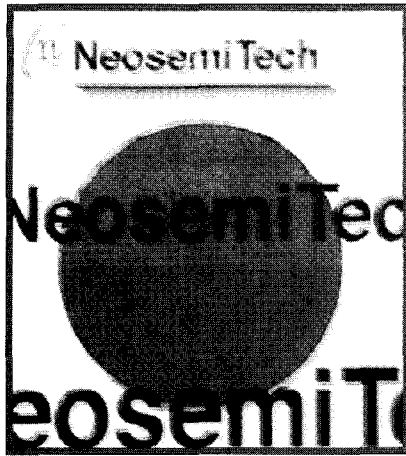


그림 2 한국에서 개발된 2인치 직경 SiC웨이퍼(2004년)

높지 않아야 한다는 전제조건이 있다. 이 두 가지 관점에서 SiC는 밴드갭이 넓은 여러 반도체 중에서 가장 앞서 있다고 하겠다.

우선 반도체의 기본재료인 SiC 단결정 웨이퍼 기술을 살펴 보면 탄화규소 단결정 성장은 기상에서 고체상으로의 상전이 즉 승화반응을 주로 이용하고 있다. 승화현상을 단결정 성장에 이용하기 위해서는 인위적인 탄화규소의 기체상태 파포화도 유지와 계속적인 기상의 공급이 필요한데 이에 필요한 온도가 2000℃ 이상이다. 단결정 웨이퍼 제조 온도가 매우 높고 또한 반응속도가 더딘 승화 메커니즘에 의존하다보니 웨이퍼 가격이 실리콘에 비하여 상당히 높을 수밖에 없다. 현재 전력반도체 제조에 사용되고 있는 2인치 직경 SiC 웨이퍼와 6인치 직경의 실리콘 웨이퍼의 단위면적당 가격을 비교하면 SiC가 실리콘에 비하여 30~60배 비싸다.

SiC 단결정 성장 기술의 발전으로 1990년대 중반에는 직경 1.5인치, 1998년에는 2인치 그리고 최근에는 3인치 웨이퍼가 상용화되었으며 실험실에서 4인치 웨이퍼 성장이 가능해졌다. 일반적으로 반도체 공업에서 웨이퍼의 대구경화는 저가격화를 수반하므로 향후 10년 내에 실리콘 웨이퍼 가격의 10배 이내로 하락할 것으로 예상된다.

그림 2는 국내의 SiC 반도체 개발사업단(참여기업 네오세미테크)이 2004년도에 발표한 직경 2인치급 SiC 단결정 웨이퍼를 보여 주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 SiC 웨이퍼는 불투명한 실리콘과 달리 투명하며 도핑용 불순물의 종류에 따라 착색되는 현상이 있다.

실제로 반도체 제조의 수율(yield)을 결정하는 것은 웨이퍼의 결정학적 결함의 존재 여부이다. 비록 SiC 단결정 기술이 획기적으로 발전하고 있으나 아직 SiC 웨이퍼에는 실리콘과 비교하여 결정결함이 많다. 기본적으로 탄화규소 웨이퍼에는

면결함(basal plane defect), 균열(crack), 결정도메인(crystal domain), 마이크로파이프(micropipe) 전위(dislocation) 및 적층결함 등이 있다. 이 중에서 마이크로파이프는 탄화규소에서만 유일하게 나타나는 결함이며, 직경이 수 μm 정도 되는 원기둥의 형태로, 보통 웨이퍼의 위아래 방향으로 발달한다.

이러한 웨이퍼상의 결함은 SiC 전력반도체의 전류용량을 제한하는 요소로 작용한다. 즉 100A급 실리콘 IGBT의 경우 약 1cm^2 의 칩 면적을 갖는데 SiC 전력반도체의 경우 이러한 면적에서 한 개의 치명적 결정결함이라도 포함되면 고유의 반도체 특성을 발현하기 어렵다. 따라서 수백 압패어 이상의 전류용량을 갖는 SiC 전력반도체를 제조하기 위해서는 결정결함이 거의 없는 SiC 웨이퍼의 공급이 필수불가결하다. SiC 단결정에서 특히 치명적으로 알려져 있는 마이크로파이프의 밀도가 현재 cm^2 당 1~3 개 이하로 줄어들었으나 수년 내에 웨이퍼 당 1개 이하로 줄여야 하는 과제가 남아있다.

3. 국내외 SiC 전력반도체 개발현황

SiC를 이용한 소자 개발은 1990년대 초반부터 미국의 대학 및 연구소 등에서 시작되었다. 초기의 연구 분야는 쇼트키 다이오드 및 pn 다이오드 등의 다이오드 소자가 대부분이었으며 최근에는 고전압 MOSFET 분야에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 많은 기업들이 실리콘을 이을 차세대 소자로서 SiC 연구를 진행시키고 있으나 아직은 원재료의 가격 부담, 재료자체의 결함 등으로 큰 시장은 형성하지 못하고 있는 실정이다. 그러나 최근 웨이퍼의 구경이 점차 커지면서 4인치급의 웨이퍼까지 개발되었을 뿐만 아니라 결정결함을 줄이는 기술까지 개발되어 소자 개발도 큰 폭의 진전이 이루어지고 있다.

SiC 전력반도체를 연구하는 사람들은 일찍이 단일 전송자 소자(unipolar device) 개발 쪽으로 관심을 기울여 왔다. 그것은 SiC에서 전자 이동도(electron mobility)에 비하여 정공 이동도(hole mobility)가 심한 경우 약 1/10 정도로 낮아 정공과 전자 모두를 전송자로서 사용하는 이른바 바이폴라 반도체의 이점이 크지 않기 때문이다.

단일 전송자 계열의 SiC 전력반도체의 대표적인 소자로서 파워 MOSFET와 MESFET 및 쇼트키 다이오드를 들 수 있다. 그 중에서도 상업적으로 가장 활발한 개발이 이루어진 소자가 쇼트키 다이오드이다. 실리콘 쇼트키 다이오드의 경우 200V의 내전압이 최고이지만 SiC 쇼트키 다이오드는 5,000V의 내전압 실현 사례가 보고된 바 있으며 일부의 실험실에서는 15kV 이상의 내전압을 실현한 사례도 있다.

표 1은 SiC 쇼트키 다이오드의 제품화 현황을 요약한 것이다. SiC 쇼트키 다이오드의 시장 진출은 독일의 Infineon사

표 1 SiC 쇼트키 다이오드의 상용화 제품

회사명	전압 정격(V)	전류정격 (A)	응용분야	비고
Cree (미국)	300	10, 20	PFC boost	
	600	1, 4, 6, 10, 20	PFC boost	
	1200	5, 10, 20	PFC boost	
Infineon (독일)	300	8	PFC boost SMPS	세계최초 상용화
	600	2, 4, 5, 6, 8	PFC boost SMPS	
Semisouth (미국)	600	-	PFC, SMPS, Motor driver	

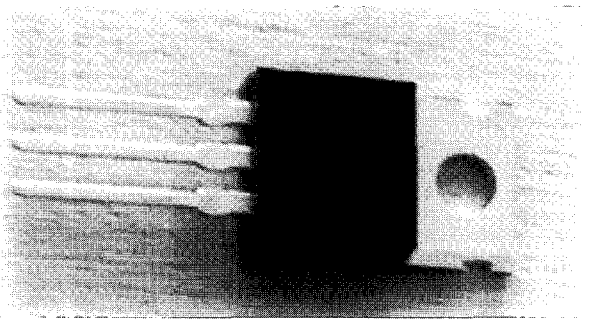


그림 3 한국전기연구원이 개발한 600V-6A SiC 쇼트키 다이오드 시제품

에 의해 2000년 초에 시작되었다. 300V 및 600V급 SiC 쇼트키 다이오드가 역률보상회로(Power Factor Correction)용 소자를 목적으로 시장에 출하되기 시작하였다. 패키지로 TO-type을 사용하였으며 전류정격은 2~8A 급이 주종을 이루고 있다. 2002년도 후반에 들어서 미국의 Cree사에서 최고의 웨이퍼기술을 앞세워 300V, 600V, 및 1200V 쇼트키 다이오드를 판매하기 시작하였다. 600V 및 1200V급 소자는 220V 및 380V의 상용 전원에 연결하여 사용할 수 있으며 전류 정격은 20A급까지 큰 폭으로 증가되었다. 국내에서는 한국전기연구원 주도로 연구개발이 진행되어 2004년도에 그림 3과 같은 600V-6A급 시제품을 개발하여 발표한 바 있다.

이러한 정격의 SiC 쇼트키 다이오드는 실리콘으로 제작되는 pn 다이오드와도 비슷한 사양으로까지 개발되었으며 역방향 회복시간이 매우 짧아 스위칭 특성이 매우 우수하다는 장점을 특징으로 하고 있다. 현재 SiC 쇼트키 다이오드는 역률보상회로(power factor correction) 및 모터구동 등의 일부 분야에서 실리콘 pn 다이오드와 경쟁하고 있다.

SiC 전력반도체는 높은 온도에서도 소자가 파괴되지 않는

장점이 있는데 전기연구원의 연구개발 경험에 따르면 SiC 쇼트키 다이오드 소자가 300℃ 이상에서도 안정적으로 동작함을 확인한 바 있다. 현재 일반적으로 250℃까지의 온도영역에서 실리콘 SOI(Silicon on Insulator) 소자가 주로 사용되고 있다. 그러나 300℃를 넘는 온도 영역에서는 실리콘 반도체의 한계가 있다. 따라서 전력용에 적합한 고온소자로 SiC 소자의 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재의 추세로 보아 200~300℃ 영역의 응용분야에서는 실리콘 SOI와 SiC 반도체가 함께 적용될 것으로 예상되며, 300℃를 넘는 온도영역에서는 SiC 소자의 우월적 지위가 예상된다.

SiC MOSFET에 대한 활발한 연구는 실리콘 파워 MOSFET의 단점 즉 고전압화 할수록 순방향 손실(온저항)이 크게 증가하는 현상을 해소할 수 있다는 기술적 예측에 기반하고 있다. 즉 일반적으로 사용되는 파워 MOSFET는 저지전압을 높이기 위하여 드리프트 층을 두껍게 하여야 하고 그에 따라 필연적으로 파워 MOSFET이 턴온되었을 시의 온저항이 커지게 된다. 따라서 1,000V 이상의 고전압 MOSFET를 구현할 경우 온저항이 매우 커지게 되어 전력 전자 회로 상의 손실을 매우 크게 한다.

서론에서 이미 소개된 바와 같이 SiC는 절연과괴전계강도가 실리콘의 약 8배 이상이어서 고전압 소자 제조시 순방향 저항 성분이 작은 전력소자를 만들 수 있다. 현재 UMOSFET의 경우 3kV 내전압을 가진 소자가 보고된 바 있으며 SiC 반도체 중에서 가장 활발히 연구가 진행되고 있는 분야 중의 하나이다.

이론적으로는 SiC 파워 MOSFET는 실리콘 IGBT와 비교하여도 온저항을 작게 할 수가 있으며, 온저항이 작게 되면 당연히 소자의 칩 크기를 작게 만들 수 있다. 즉, 단위 면적당 발열량을 똑같이 설계하게 되면, 온저항이 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. 파워 MOSFET의 스위칭 속도를 주로 결정하는 것은 게이트의 입력용량 C와 게이트의 저항 R로부터의 CR 시정수이므로 칩 크기가 작아지게 되면 동반하여 게이트의 입력용량과 게이트의 저항도 작아지게 되어 상승적으로 스위칭 속도가 개선되게 된다.

SiC가 열산화막을 통하여 MOS 디바이스로 제작될 수 있다는 장점에도 불구하고 실제로는 아직까지 실리콘 파워 MOSFET에 필적할 만한 특성이 발견되지 못하고 있다. 그것은 아직까지 10~40cm²/V-sec 정도에 머물고 있는 전자의 반전층 채널 이동도(electron inversion channel mobility) 때문이다. 현재 500 cm²/V-sec 수준인 실리콘의 경우에 못 미치고 있으나 만일 SiC에서 200 cm²/V-sec 이상의 채널 이동도가 실현될 경우 1000 V 이상의 경쟁력 있는 SiC 파워 MOSFET가 가능할 것으로 예측된다. 최근에 일본에서는

230 cm²/V-sec의 채널 이동도를 가진 SiC 파워 MOSFET를 제작을 보고한 바 있어 조만간 실용화가 이루어질 것으로 전망된다.

현재까지 pn 다이오드 연구는 미국의 Cree와 일본의 간사이전력(關西電力)의 공동연구로 많은 진전이 있어 왔다. 1999년에 Cree가 일본 간사이전력과 공동으로 제작한 SiC PiN 다이오드의 경우 항복전압 5900V, 순방향전압강하 5.6V(100A/cm²)를 구현하였다.

그림 4는 Cree사에서 2003년도 SiC 국제학회(ICSCRM)에 보고한 pn 다이오드 최신결과로서 약 8kV 내압을 얻었으며 더욱이 100A/cm²의 전류밀도에서 4.9V의 낮은 전압강하를 얻었음을 보여주고 있다.

바이폴라형 소자의 연구는 주로 미국에서 오래 전부터 행해졌다. 바이폴라형 SiC 소자의 큰 장점은 고온 환경에서도 안정한 특성을 발휘한다는 것이다. 2000년에 Zhao 등은 800V 급 4H-SiC 바이폴라 트랜지스터를 보고한 바 있었으나 당시에는 전류이득(current gain: β)이 9 정도인 등 특성은 그다지 좋지 못하였다. 2001년에 Cree에서는 1800V-4A 급 바이폴라 트랜지스터를 제작하였는데 300V에서 전류 이득은 20 정도였으며, 전류밀도(J_C) 193A/cm²에서 V_{CE}=5V였다. 2003년에 Cree에서는 1800V-10A 급 바이폴라 트랜지스터를 제작한 바 있다. 또한 Zhao 등은 500V-70A (J_C=630A/cm²)급 소자에서 전류이득 44를 성취한 바 있다.

초고전압 소자를 사용하는 전력분야에서도 SiC 전력반도체 연구가 활발하다. 일본의 간사이 전력에서는 많은 전력소자에 대한 연구를 수행하여 2003년에 SiC 초저손실 5kV급 SIFET 및 12kV급 다이오드를 개발한 바 있다. 특히 간사이 전력은 SiC 전력반도체를 이용하여 200kVA급 초저손실 Power quality stabilizer 시제품을 제작하였으며 종래의 것보다 50%의 전력변환 손실을 절감하였다고 발표한 바 있다.

4. 앞으로의 전망

현재까지 에너지, 산업전자 및 정보통신 분야를 가능케 한 것은 실리콘 반도체기술이다. 그러나 실리콘 반도체의 넓은 응용영역에도 불구하고 경박단소의 새로운 제품요구에 따라 점차 실리콘의 물성적 한계에 직면하고 있어 새로운 반도체 물질 및 소자의 개발이 절실한 실정이다. 특히 21세기 고도 정보화 사회에서는 기존의 실리콘 반도체의 한계를 뛰어넘는 반도체의 도입이 필수적이라고 판단된다.

SiC 반도체의 특징은 고전압이면서도 저손실 그리고 고온에서 안정한 등 신뢰성이 높다는 점이다. SiC의 가장 큰 특징인 높은 열전도성 및 고온에서의 안정적 동작특성은 전력전자 시스템의 냉각부분의 간편화 및 소형화를 통한 원가절감 등으로 시스템 측면에서는 충분한 경쟁력이 예상된다. 이에

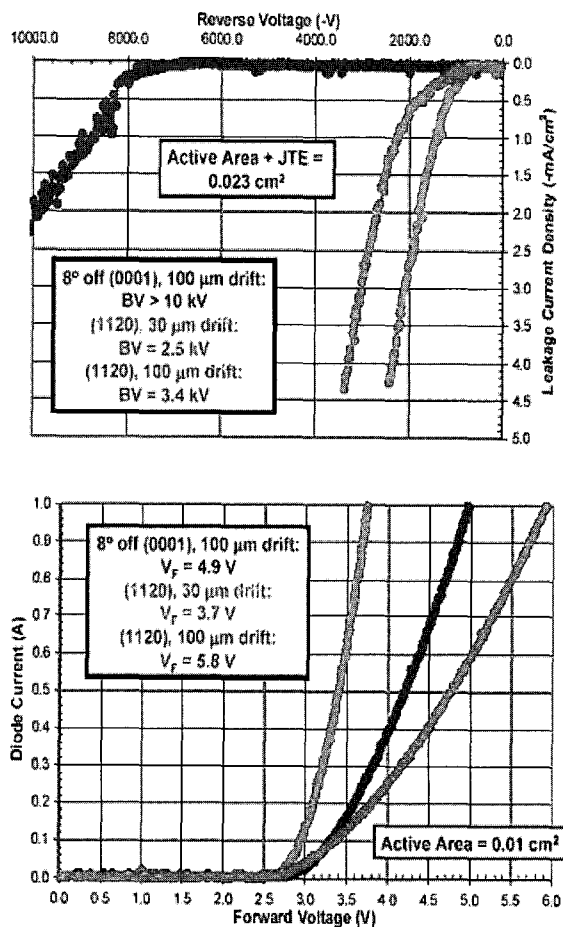


그림 4 ICSCRM 2003에서 발표된 최근의 PiN 다이오드 성과

따라 SiC 전력반도체는 전력전자 시스템의 고밀도화와 고효율화 그리고 고주파화를 가능케 할 차세대 반도체로 앞으로 그 실용성이 크게 부각될 것으로 보인다.

SiC 전력반도체가 비록 성능이 뛰어나다고 하더라도 현실 세계에서 가격적인 측면에서는 아직 실리콘 소자에 비해 경쟁력을 갖지는 못한 점은 사실이다. 그러나 SiC 단결정 웨이퍼 등 재료의 가격이 지속적으로 하락하고 있고 소재의 결합 등이 획기적으로 줄어들 것으로 보여 멀지 않은 장래에 가격 대비 성능은 실리콘 전력반도체를 능가할 것으로 기대된다. 따라서 SiC 쇼트키 다이오드 등 SiC 전력반도체에 대한 전력전자 연구자들의 배전의 관심이 필요하다 하겠다. ■

참고 문헌

- [1] H. Ohashi, "Possibility of power electronics Paradigm shift with wide band gap

- semiconductors", Mater. Sci. Forum, Vol.457-460, pp.21-26(2004).
- [2] J.A. Cooper, "Opportunities and technical strategies for silicon carbide device development", Mater. Sci. Forum Vols. 389-393 pp.15-20, 2002.
- [3] M.K. Das et al., "High power 4H-SiC PiN diodes with minimal forward voltage drift", Mater. Sci. Forum, Vol.457-460, pp.1105-1108(2004).
- [4] Yoon Soo Park Ed. "SiC Materials and Devices", Academic Press. 1998.
- [5] T.P. Chow, et al., "SiC and GaN bipolar power devices", Solid-State Electronics, 44, 277-301, 2000.
- [6] Y. Sugawara, "SiC Devices for High Voltage high Power Applications", Mater. Sci. Forum, Vol. 457-460, pp. 963-968(2004).
- [7] W. Bahng, N. K. Kim, S. C. Kim, G. H. Song and E. D. Kim, 'Suppression of macrostep formation in 4H-SiC using a cap oxide layer, Mater. Sci. Forum, 368-372, 2002.
- [8] C.E. Weitzel et al., "Silicon carbide high-power devices", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 43, No. 10, 1732-1741, 1996.
- [9] Y. Sugawara et al., "12-19kV 4H-SiC PiN diodes with Low power loss", 13th ISPSD, Osaka, Japan, June 4-7, 2001.
- [10] H. M. McGlothlin et al., "4 kV Silicon Carbide Schottky Diodes for High-Frequency Switching Applications," IEEE Device Research Conf., Santa Barbara, CA, June 28 - 30, 1999.
- [11] Tairov, Yu. M., and Tsvetkov, V. F. "General principals of growing large-size single crystals of various silicon carbide polytypes." J. Cryst. Growth 52 146 (1981).
- [12] V. Saxena, J. Nong, and A. Steckl, "High-Voltage Ni- and Pt-SiC Schottky Barrier Diodes utilizing Metal Field Plated Termination", IEEE Trans. Electron Dev. 46[3] 456-64(1999).
- [13] 한국전기연구원, "SiC 반도체 기술개발 기획연구", 산업자원부 연구보고서, 1999.
- [14] 한국전기연구원, "SiC 반도체 기술개발 제 2단계 연구

결과 보고서", 산업자원부 연구보고서, 2004.

- [15] R. Singh and J. Richmond, "SiC Power Schottky Diodes in Power Factor Correction Circuits", Cree Application note.

〈 저 자 소 개 〉



김남균(金南均)

1962년 1월 15일생. 1984년 서울대 무기재료공학과 졸업. 1990년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(박사). 1990년 한국전기연구원 입사. 1987년~1988년 독일 막스플랑크 재료금속연구소 연구원. 1995년~1996년 일본 과학기술청 무기재료연구소 연구원. 현재 한국전기연구원 책임연구원/전력반도체연구그룹장.



김상철(金相喆)

1964년 2월 1일생. 1987년 한양대 물리학과 졸업. 2001년 동 대학원 물리학과 졸업(박사수료). 1992년~현재 한국전기연구원 선임연구원/기술팀장.



방 옥(房煜)

1967년 5월 3일생. 1990년 서울대 무기재료공학과 졸업. 1997년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(박사). 1997년~2000년 일본 전자기술종합연구소(ETL) 연구원. 2000년~현재 한국전기연구원 선임연구원.



김은동(金垠東)

1958년 12월 5일생. 1980년 부산대 재료공학과 졸업. 1985년 KAIST 재료공학과 졸업(박사). 1986년~현재 한국전기연구원 책임연구원, 재료응용연구단장. 1989년~1990년 프랑스 국립과학연구소 센터 전기공학연구소. 1997년~현재 과학기술부 중점국가연구개발사업 전력용반도체기술개발사업단장. 1999년~현재 산업자원부 차세대신기술개발사업 SiC 반도체기술개발사업단장.