

Silicon Carbide 전력 소자의 기술 동향

조영득 석사과정, 최창용 석사과정, 구상모 교수 (광운대 전자재료공학과)

1. 서론

최근 전 세계적인 유가급등, 자원고갈과 지구온난화의 위협 등으로 에너지소비의 고효율화가 매우 중요한 사회적 이슈로 대두되고 있다. 2007년 기준 국내 1차 에너지원별 소비실적은 234,323천 toe이고, 석유 및 석탄 등 화석 에너지의 소비실적은 164,378천 toe로 전체 에너지 소비량 중 화석에너지가 차지하는 비중이 70%를 넘는다. 또한, 국내 총 전력생산량은 403 GWh이며, 이 중 무연탄, 유연탄, 중유 및 LNG 등의 화석연료를 사용하는 평균 전력생산량은 255 GWh로 전체 전력생산량의 63%를 차지한다 [1]. 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 급부상하고 있다. 다이오드, BJT, MOSFET, IGBT 등의 구조는 전력공학 분야에서 가장 중요한 소자들이다. 하지만 이러한 구조적인 개선을 통해서도 실리콘 전력소자의 성능은 한계점에 이르렀다. 실리콘 카바이드(SiC)는 이러한 실리콘 소자들의 한계를 뛰어넘을

수 있는 혁신적인 물성을 가지고 있다. 무엇보다, SiC 전력반도체소자는 실리콘 전력반도체소자에 비해 우수한 물질특성을 갖고 있어 성능 측면에서 뿐만 아니라 전력변환장비의 크기를 획기적으로 줄일 수 있다 [2]. SiC 반도체 분야에서의 최근의 비약적인 발전을 통해 고전압 전력소자로서의 활용가능성이 매우 높아지고 있다 [3]. 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 효율 향상 등 여러 가지 장점을 얻을 수 있다. 현재는 250도까지의 온도영역에서 실리콘 SOI (Silicon on Insulator) 소자가 주로 사용되고 있다. 그러나 300도를 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. SiC의 특성과 SiC 전력 소자의 필요성

SiC는 스웨덴의 J. Berzelius가 1824년 그 합성에 대해 최초로 보고하였으나 1950년대 이후에 박막성장 기술이 발전되었고, 1978년 Seeded Sublimation 기법에 의한 고순도 SiC Wafer의 보고 이후, 1989년 미국 Cree社의 고순도 에피기술이 보고되면서 지속적인 연구가 가속화되었고 1994년 Step-controlled Epitaxy기법의 개발로 저온에서 고품질의 박막 형성

이 가능하게 되었으며, 최근의 2006년에 4인치 웨이퍼 공급이 시작되는 단계의 기술 수준에 이르렀다. SiC Wafer는 미국 Cree社의 독주 체제에 몇몇 유럽과 일본 업체가 시장에 진입하며 본격적인 가격경쟁 및 저가화가 시작되었고, 초창기부터 큰 문제가 되었던 Micropipe결함이 현저히 감소 (<수/cm²)되었고, 1 cm² 대용량 소자기준으로 90 % 이상의 수율이 확보된 상황이다.

수백여 종의 Polytype을 갖는 것으로 알려진 SiC는, 실리콘보다 대략 3배정도 높은 에너지 밴드 갭을 가지며, 정방형 (Cubic)의 3C 구조와 정육방형 (Hexagonal)의 4H, 6H의 구조가 가장 대표적인 Polytype이고, 4H-SiC은 ~3.26 eV의 에너지 밴드 갭을 갖고 있다. SiC는 실리콘에 비해 10배 정도 큰 임계전계 (Electric Breakdown Field)를 지니는데 이런 특성은 차단 (Blocking) 시에 동일한 전압을 인가한

실리콘 소자보다 공핍되는 드리프트 영역을 1/10배로 감소시킨다.

또한 4H-SiC의 열전도율은 실리콘의 열전도율에 비해 약 3배 높다. 이와 함께 큰 밴드에 기인한 높은 진성 반도체 온도로 인하여 SiC 소자는 실리콘 소자와 비교하여 더욱 높은 온도에서 안정적으로 동작할 수 있다 [4]. 그리고 SiC 소자에서는 드리프트 영역의 도펀트 (Dopants)의 농도를 실리콘 소자의 유동역역의 농도에 비해서 100배정도 높일 수 있다. 높은 항복전압을 갖는 파워 소자의 경우, 온-저항은 대부분이 유동역역의 온-저항에 의해 결정되게 되므로 SiC 전력 소자들의 온-저항은, 동일한 항복전압을 갖는 실리콘 소자 온-저항의 1000분의 1정도까지 줄일 수 있게 된다. 4H-SiC의 포화 드리프트 속도 (Saturated Electron Drift Velocity)는 실리콘의 경우에 비해 약 2배 이상이므로, 실리콘 소자보다 작게 만들 수 있으며, 또한 이러한 물리적 특성들로 인하여 SiC 스위칭 파워 소자들은 실리콘 스위칭 파워 소자들에 비해 빠르게 동작할 수 있다.

이미 kV급의 SiC 쇼트키 다이오드는 상용화되었고, Si와 같은 SiO₂를 성장시킬 수 있어 다양한 구조의 MOSFET에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. SiC는 열전전도가 높기 때문에 소자에서 발생하는 열을 추가적인 방열 구조 없이 방출할 수 있는 큰 장점이 있다. 그림 2는 SiC를 기반으로 제작한 소자들의 on-저항과 항복전압의 특성을 보여준다. 그림에서 보듯이 기존 Si기반 소자의 한계를 넘어서는 SiC 기반 소자들이 연구 보고되었다. 현재로서는 세계적

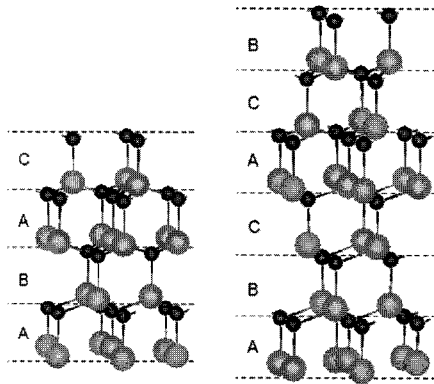


그림 1. 4H와 6H-SiC의 결정 구조도.

표 1(a). SiC와 다른 물질의 물리적 특성비교.

	(unit)	Si	GaAs	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC	2H-GaN	diamond
Eg	(eV)	1.12	1.43	2.4	3.0	3.2	3.4	5.5
Lattice a	(Å)	5.43	5.65	4.36	3.08	3.08	3.189	3.567
Lattice c	(Å)	n/a	n/a	/na	15.12	10.08	5.185	na
Bond length	(Å)	2.35	2.45	1.89	1.89	1.89	1.95	1.54
T.E.C	(10 ⁻⁶ /K)	2.6	5.73	3.0	4.5		5.6	0.8
Density	(g/cm ³)	2.3	5.3	3.2	3.2	3.2	6.1	3.5
Th. cond. λ	(W/cmK)	1.5	0.5	5.0	5.0	5.0	1.3	20.0
Melting point	(°C)	1420	1240	2830	2830	2830	2500	4000
Mohs hardness				9.0	9.0	9.0		10.0

T.E.C. = Thermal Expansion Coefficient

표 1(b). SiC와 다른 물질의 전기적 특성 비교

	(unit)	Si	GaAs	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC	2H-GaN	diamond
E_g	(eV)	1.12	1.43	2.4	3.0	3.2	3.4	5.6
E_c	(MV/cm)	0.25	0.3	2.0	2.5	2.2	3.0	5.0
V_{sat}	(10^7 cm/s)	1.0	1.0	2.5	2.0	2.0	2.5	2.7
$\mu_{v \perp c}$	(cm^2/Vs)	1350	8500	1000	500	950	400	2200
$\mu_{v \parallel c}$	(cm^2/Vs)	na	na	na	100	1150	na	na
μ_p	(cm^2/Vs)	480	400	40	80	120	30	1600
ϵ_r		11.9	13.0	9.7	10.0	10.0	9.5	5.0
Th. cond. λ	(W/cmK)	1.5	0.5	5.0	5.0	5.0	1.3	20.0

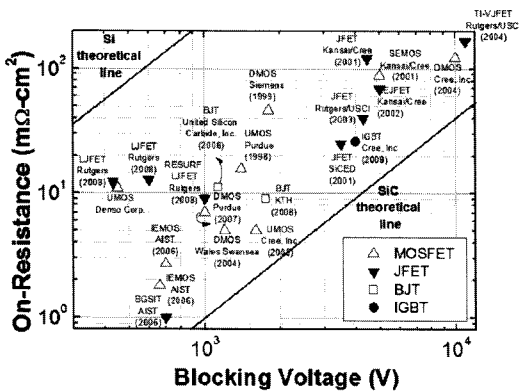


그림 2. SiC 기반 전력 소자들의 특성.

으로 SiC웨이퍼를 제조할 수 있는 연구소나 회사는 소수이기 때문에 가격이 비싸고, 웨이퍼의 생산 크기도 한정된 상황이나, 앞으로 개선될 것으로 기대되고 있다. MOSFET의 SiC채널과 SiO₂의 계면 문제는 신뢰도 면에서 신속히 해결해야 할 문제점이다. 계면상태와 결합으로 생성되는 문제로써, 전자기동도가 저하되고, 온도에 따른 문턱전압의 변화가 발생하게 된다 [5]. 그러나 이러한 웨이퍼 문제와 신뢰도 문제는 지속적인 연구와 개발로 개선되어 질 가능성이 높다고 볼 때 SiC를 기반으로 한 고전압 소자 개발은 희망적이다. 최근 들어 MOSFET이 가지는 이러한 계면 문제를 줄일 수 있는 JFET나 BJT에 대한 개발이 활발히 진행되고 있다. 전통적인 구조의 JFET소자는 Normally-on특성이라는 단점이 있으며, Normally-off로 제작할 경우 온-저항이 높아지게 되고 게이트 구동 전압 범위가 자유롭지 못하다는 측면이 있다. 이를 해결한다면 조만간 이상적인

JFET 전력 소자를 생산할 수 있을 것이다 [6]. FET를 포함한 생성과 재결합을 위한 시간이 필요하지 않은 단극성 (Unipolar) SiC 소자들은 600~3300 V의 전압 등급에서 양극성 Si 소자들을 대체할 것으로 기대되고 있다. 단극성 SiC 소자는 스위칭 주파수를 매우 증가시킬 수 있고, 시스템적인 측면에서도 증가된 스위칭 주파수는 유지하면서도 수동소자의 크기가 적어진다는 장점이 있다. 나아가 매우 낮은 스위칭 손실 특성은 효율이 중시되는 여러 응용분야에서의 핵심문제인 에너지 절약과 관련된다. 그리고 이러한 효율적인 스위칭 손실의 장점 외에도 패키징 된 SiC 소자는 더 높은 접합 온도에서 동작될 수 있다는 장점이 있다. 특히, 자동차용 DC-DC 컨버터는 LC 구성 요소에서의 크기와 무게의 감소 면에서, 나아가 추가적인 냉각회로 역시 생략되어 질 수 있으므로, SiC로부터 큰 이익을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

3. SiC 전력 소자의 특징과 동향

3.1 SiC 다이오드

오늘날 SiC 쇼트키 다이오드는 주로 서버나 통신 산업 등의 고급 전력공급분야에서 사용되고 있다. 태양전지 인버터보다 제조단가가 낮으며, 고주파 (>>100 kHz), 고전력 (>500 W)용으로 많은 메리트를 갖고 있다. 그림 3과 같은 쇼트키 다이오드와 PN-SiC 다이오드가 합쳐진 새로운 SiC 다이오드의 구조 (JBS-Diode)는 고전력이 흐르는 동안 불안정한 전류가 발생하는 문제를 해결 할 수 있다 [7]. SiC 다이오드의 쇼트키 다이오드에만 전류가 인가되면 소자에 전류가 흐르게 되고, 5~6배의 전류를 가하면 바이폴

라 캐리어들이 주입되고 소자가 파괴되는 것을 방지하고 소자의 저항을 대폭 감소시키게 된다. 이런 복합적인 구조에서는 기생 요인들이 증가될 수 있는 측면도 있지만, 소자에 수 ns동안 역바이어스 흐름 경우, 드리프트 영역과 캐리어수명은 과잉캐리어를 제거할 수 있기 때문에, 바이폴라 모드에서는 스위칭 손실을 걱정할 필요가 없다.

하이엔드 PFC 전력 공급기와 100 kW급 산업용 모터의 전력소자시장으로 600 V 쇼트키 장벽 다이오드 (SBD; Schottky Barrier Diode) 구조를 갖는 SiC의 보급이 시작된 이래, 2006년 5월에 Siemens는 최초로 690 V, 100 kW급 주파수 컨버터를 발표했다. 1700 V Si IGBT와 1700 V SiC SBD는 전력 모듈 설비 장비에 사용되고 있다. 수십 kHz의 스위칭 주파수 때문에 조용한 작동을 할 수 있고 매우 효율적으로 에너지 절약을 가능케 하는 장점이 있다. 또한 작은 집적 가능한 사인파 필터로 인해 새로운 케이블의 설치를 생략할 수 있기 때문에 화학 산업 설비 등의 개량에 이상적으로 적용될 수 있다.

일반적으로 3 kV ~ 10 kV의 전압용 컨버터의 스위칭 손실은 낮은 전압의 Freewheeling 다이오드에 의해 작아지며, 짧은 n형 베이스 영역과 소수캐리어 수명 때문에 동일한 Si PIN 다이오드보다 작은 양의 Reverse Recovery Charge로 동작한다. SiC 다이오드의 특성은 기판 결함 밀도, 에피택셀과 이미터와 베이스의 적정 설계 측면에 영향을 받으며, 최적 설계 시 정방향 전압 드리프트 문제를 크게 최소화할

수 있다. 2002년 300 V 및 600 V급 SiC 쇼트키 다이오드가 상용화되어 시판되기 시작하였으며, 이는 최초의 SiC 전력반도체 시장 진입 사례이다. 현재 세계적으로 10여개의 기업에서 600 V 및 1200 V SiC 쇼트키 다이오드를 상용화하였으며 대부분의 경우 역률보상 등 산업용 전원장치에 적용되고 있다.

3.2 SiC JFET

SiC JFET은 JFET/SIT는 전력분배기, 자동차 및 태양발전용 인버터 등에 활용이 기대되는 소자로서, MOSFET계열의 소자가 게이트 산화막의 신뢰성문제, 낮은 채널이동도, 공정의 복잡성 등의 난점을 가지므로 상대적으로 높은 기술성숙도에서의 이점 외에도, 수십 MHz이상에 달할 정도의 빠른 동작주파수, 고온 동작특성, 우수한 내전압 특성, 높은 전하이동도 등을 활용할 수 있는 소자로 주목받아왔다. SiC JFET은 전류가 기판에 수직인 방향으로 흐르는 Vertical JFET 또는 SIT와 수평인 방향으로 흐르는 Lateral JFET이 각각 연구되고 있으며, 2006년 일본의 AIST에서는 Normally-off SiC Buried-Gate SIT (JFET) 소자를 이용하여 같은 Class의 다른 스위칭 소자 대비 최저급의 1.0-mΩcm²의 낮은 온저항 (Ron)의 700 V급 소자를 제작한 바 있다. 특히 구조상 에피성장공정과 건식식각공정을 이용하여 이온주입 없이 제작이 용이한 장점을 가지고 있다. 또한 태양광 발전 계통 연계를 위한 응용으로, 일본 AIST에서는 SiC SIT를 이용한 인버터 회로를 구현하여 실리콘 IGBT의 1/12로 감소된 손실을 보인바 있으며, 2008년 독일의 태양에너지시스템을 연구하는 프라운호퍼 연구소는 미국 Cree Inc.의 SiC 전력반도체를 이용하여 태양광 발전을 위한 5kW급 인버터를 발표한 바 있다.

그림 4는 전형적인 크기와 도핑 농도를 갖는 Lateral JFET의 단면을 보여준다 [8]. Lateral 소자는 드레인과 게이트 전극 사이에 RESURF 구조를 갖도록 설계할 필요가 있다. 그림 5는 공핍층의 형성과 RESURF 영역의 유무에 따른 구조 내에서 게이트-드레인 영역 내부의 전계 분포를 보여주며, 공핍층은 소자가 OFF 상태일 때 게이트와 드레인 사이의 유동역에서 수직적으로 확장함을 알 수 있다. 유동 영역의 전계 세기는 거의 균일하고, 게이트 전극 주

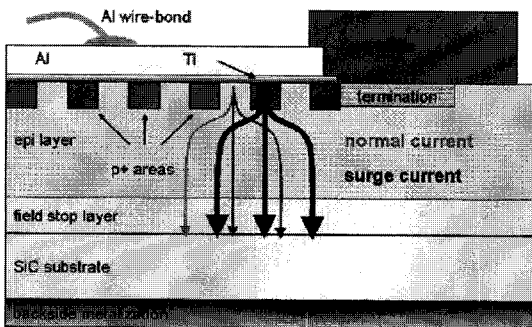


그림 3. 쇼트키 다이오드와 PN-SiC 다이오드가 합쳐진 SiC JBS 다이오드의 구조.

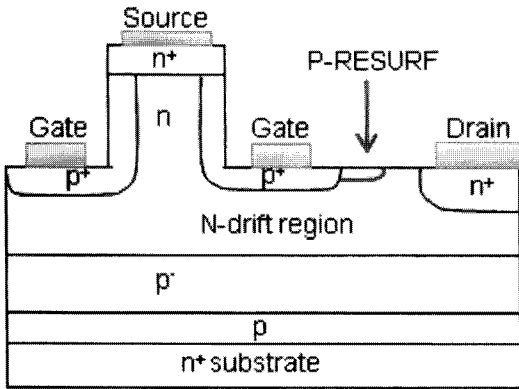


그림 4. RESURF JFET의 단면 구조도.

변의 전계는 감소되므로, 구조는 전계 집중에 의해 발생하는 항복(Breakdown)의 발생을 억제하고, 소자의 항복전압을 향상시킨다. 다시 말해 드리프트 영역에서 평균 전계 세기가 높게 설계될 수 있어서, 이 경우, 영역과 동일한 항복전압을 갖으면서 RESURF구조를 갖지 않는 소자에 비해 짧은 유동영역과 낮은 온-저항을 갖게 된다. 또한 드리프트 영역에서 전계 세기의 분포는 도펀트 농도에 독립적이기에, 도펀트 농도는 높게 할 수 있고 그림으로써 온-저항을 낮출 수 있는 것이다. 다시 말해, SiC RESURF-JFET은 높은 항복전압과 낮은 온-저항의 두 가지 측면에서 이점이 있고 SiC의 물성이 이와 같은 대부분의 특성을 만든다.

SiC RESURF-JFET구조는 ~600 V 항복전압에, 5.2 mΩcm²의 낮은 온-저항, 10 ns 미만의 빠른 스위칭 시간을 갖는 소자가 보고된 바 있다. 이런 특성 값들은 실리콘의 물리적 제한을 넘어서며 동일한 항복전압과 전류제어능력을 갖는 Si MOSFET의 특성보다 수많은 우수한 특성을 갖는다. 그러므로 비록 SiC Lateral RESURF-JFET이 고전류 응용분야에서 수직 소자보다 떨어질지라도, 저-중전류 응용분야에서 전력전자 장치의 향상에 기여할 수 있는 고-전압, 저손실, 고속-스위칭 소자로서 사용될 수 있다. 현재 전형적인 저-중 전류 스위칭 전력공급기는 Si-MOSFET이나 IGBT가 DC/DC 컨버터와 DC/AC 컨버터로 사용되고 있는데, 이러한 응용분야에 있어서 더 작은 장비 크기와 더 높은 효율을 추구하는 것이 중요하며, 스위칭 전력 공급기를 축소하는 하나의 방법은 고주파 스위칭 전력 소자의 사용이다. 전력 소자가 스위칭 동작을 할 때의 주파수가 증가하면, 전력 손실이 증가하며, 이것은 고주파 동작에서 스위칭 손실뿐만 아니라 온-저항 손실을 줄이기 위해서도 필요하다는 것을 의미한다. 그러므로 낮은 온-저항과 빠른 스위칭 능력은 전력 소자에서 중요하며 이는 SiC 소자를 통하여 구현할 수 있다.

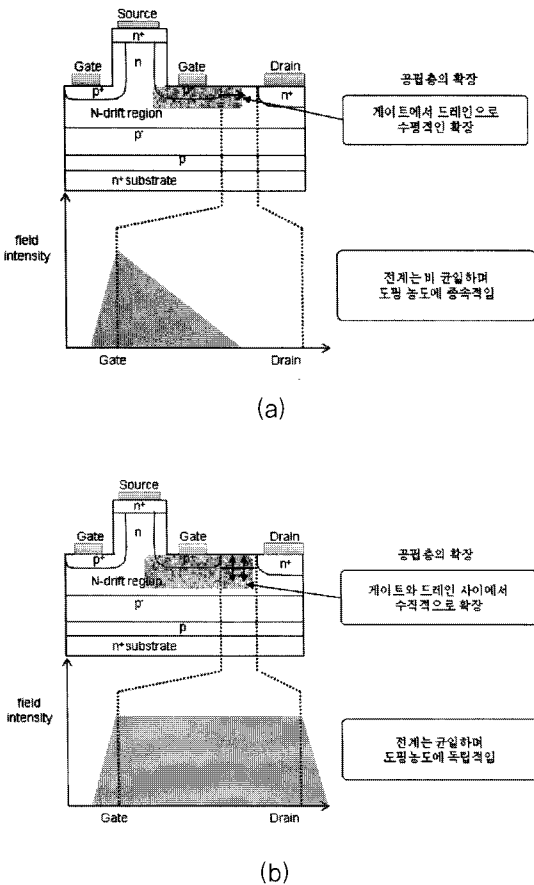


그림 5. 공핍층의 형성과 RESURF 영역의 유무에 따른 구조 내에서 게이트-드레인 영역 내부의 전계 분포.

3.3 SiC MOSFET

SiC MOSFET은 JFET과 기본적으로 같은 응용분야를 갖는다. 일반적으로 소자가 Normally-off이고 일반적인 게이트 동작회로이기 때문에 호환성이 더

속 좋다. 그러나 현재까지 SiC MOSFET는 계면 상태와 관련된 문제로 인하여 낮은 반전 채널 이동도 면에서 악영향을 받는다. 뿐만 아니라, MOS 시스템에서 Oxide의 높은 전계 응력에 의한 장시간 안정성은 문제를 야기할 수 있다 [9]. 수년간 전력소자용으로 저-저항 MOSFET의 공정상 문제는 4H-SiC가 매우 낮은 반전 채널 이동도를 가진다는 것이고, 일반적으로 MOS의 계면 문제에 관심이 집중된다. 이러한 두 가지 요인으로 인해서 MOS 계면의 질을 높이기 위한 노력 (질소 가스 상에서의 Post-oxidation Anneal과 MOS 채널 형성을 위한 불규칙한 격자면의 사용 등)이 요구된다.

MOS 채널 이동도를 크게 향상시키기 위한 노력으로 일반적으로 사용되는 <0001>면을 사용하는 것이 아니라 ~200 cm²/Vs보다 높은 채널 캐리어 이동도를 갖는 <1120> 격자면을 사용할 수도 있다 [10].

한편, p형으로 주입된 영역의 채널의 경우 이온주입의 손상으로 인해 이동도는 더 낮아진다. 그러므로 최근의 실제적인 전력 MOS구조는 에피성장된 p형 기판이 제안되고 있다. 최근 낮은 온저항 (25 °C에서 5 mΩ cm²/150 °C에서 8.5 mΩ cm²)을 갖는 1.2 kV급 4H-SiC MOSFET이 보고되었다 [11]. 10 kV, 5 A급의 6 × 10¹⁴ cm⁻³ 도핑 농도와 100 μm 두께의 n형 에피 드리프트 층과 NO에서 열성장된 게이트 산화막의 구조를 갖는 4H-SiC 전력 DMOSFET의 단면의 예가 그림 6에서 보여지고 있다 [12].

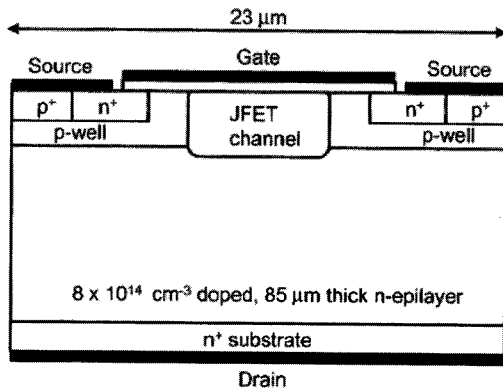


그림 6. 4H-SiC DMOSFET 구조의 단면도.

3.4 SiC Thyristors/IGBT

최근 전도성을 효과적으로 변조시킬 수 있는 SiC-GTO (SiC Gate Turn-off Thyristor)는 개발되고 있다. SICGT (SiC Commutated Gate Turn-off Thyristor)가 최근 보고된 바 있으며 [13], 그림 7의 SICGT 구조 단면도에 보이듯, SICGT 모듈은 금속 패키지 안에 두 개의 6 × 6 mm²의 SiC PN 다이오드로 구성될 수 있다. 110 kVA PWM (Pulse-width Modulation) 예를 들어 400 °C에도 버틸 수 있는, 열에 강한 레진으로 코팅된 8 × 8 mm²의 칩에서 4.5 kV, 120 A급의 SICGT가 보고된 바 있다.

주로 10 kV급 이상에서는 양극성소자의 장점을 극대화하고자 SiC IGBT연구도 진행되고 있으며, 2008년 Cree社에서는 On저항이 18.6 mΩ cm²인 12 kV급의 SiC p-channel IGBT 소자를 발표한 바 있다 [14]. 또한 퍼듀대학에서는 15~20 kV급의 SiC p-IGBT 소자가 설계되었다. 스위칭 성능을 향상시키기 위하여 Buffer 층의 캐리어 수명과 도핑, 두께의 조건을 연구하며 최적화를 진행시키고 있다 [15]. 그림 8은 이러한 SiC IGBT의 간단한 구조를 나타낸 단면도이다. 앞에 언급한 것처럼, 소형화된 소자 A는 소자 B보다 더 작은 커패시턴스와 더 빠른 스위칭 시간을 갖는다. 미래에는 소자의 소형화를 개선시킴으로써 스위칭 시간은 더 빨라질 것으로 기대된다.

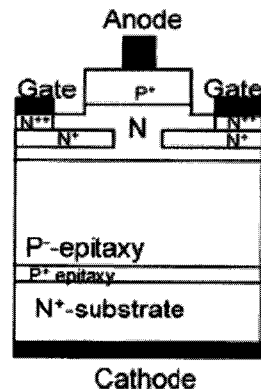


그림 7. SICGT 구조의 단면도.

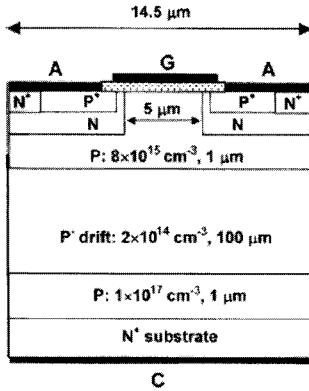


그림 8. SiC IGBT 구조의 단면도.

4. 기타 응용분야 및 결론

SiC는 고에너지갭 반도체는 일반적인 반도체로 동작하기 힘든 고온, 고압 등의 열악한 환경에서 동작이 가능하고 화학적, 물리적 관점을 고려할 때도 상당한 이점을 갖는다. 그러므로 전력소자 외에도, 고온, 고압 등의 환경에서 고속 동작이 요구되어지는 마이크로머신 분야 등에서 관심이 집중되고 있다. 이외에 바이오센서 분야로의 가능성이 점쳐지고 있다. 또한 화학적으로 보다 안정하고 생화학물질과의 결합 가능성이 높다는 장점을 활용하여, 세포의 생물학적, 화학적인 반응과, 이온 반응 등을 감지할 수 있는 바이오센서를 제작 연구도 시도되어지고 있다 [16]. 더 나아가 머지않은 미래에 하이브리드 자동차로 인해 자동차 산업 전반적으로 매우 많은 발전을 가져다 줄 것이다. 우선적으로 가스나 화석연료를 소비하지 않는 연료전지의 혁신이 있을 것이고, 제한된 적재 공간, 엔진룸의 고온 환경 등에서 개선을 가져올 것이다.

유럽에서는 신재생에너지(태양광발전)용 인버터 시스템의 고효율화를 위해 SiC 소자를 적용하는 연구가 시작되었으며, Si 기반의 소자를 사용할 때는 소자의 수가 거의 2배 이상 소요되는 최신 회로기술을 이용하여 98%의 전력 변환 효율을 얻었지만, 모두 SiC 소자들로 구성하는 경우 간단한 회로기술로도 98%의 변환효율을 보일 수 있다.

전력소자의 경우, 본문에서 살펴본 바와 같이 Si IGBT의 전력범위를 커버하면서도 전력손실은 적은 SiC MOSFET은 Si IGBT를 대체할 유망한 소자 기술이며, 고주파 스위칭에 있어서도 다수캐리어의 동작으로 인해 IGBT보다 더 적합하다. 휴대전화의 세대 교체에 있어서 고용량, 고속 동작은 점점 더 많은 필요성이 요구되는 특성들이다. SiC JFET은 휴대성과 무선통신용 10 GHz 미만의 마이크로웨이브 고전력 출력에 강점을 지니고 있다. SiC 소자로의 교체는 소형화, 저손실과 쿨링시스템의 단순화라는 측면에서 많은 장점을 가질 것이다.

SiC 소자는 기존의 Si 소자와는 차별화된 가능성을 지니며, 전력 반도체 소자 및 관련 산업의 혁신을 가져올 수 있는 기술이다. 현재까지는 상용화의 초기 단계에 있지만, 향후 지속적인 연구개발로 새로운 시대를 이끌어 갈 수 있으리라 기대된다. SiC 소자는 세계적으로 몇몇 연구 그룹을 중심으로 꾸준한 연구개발이 이루어지고 있는 상황에 비하여, 국내 기술은 특어나 기술적인 취약점이 드러나 있는 상태이다. 이 시점에서 전략적인 기술획득이나 공동연구로써 기술격차를 따라 잡을 수 있는 발판을 마련해야 할 것이다. 그러므로 국가경쟁력을 강화하고, 반도체 강국으로써의 기술적 우위를 확보하기 위하여, SiC 소자에 대한 지속적인 관심과 중장기적인 투자가 요구된다고 할 수 있을 것이다.

참고 문헌

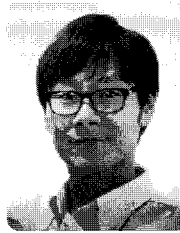
- [1] 한국전력 전력통계속보, 2008.08, 358호.
- [2] Sei-Hyung Ryu, Anant Agarwal, James Richmond, John Palmour, Nelson Saks, and John Williams, IEEE Electron Device Letters, Vol. 23, No. 6, p. 321, June, 2002
- [3] J. Wang and B. W. Williams, "Evaluation of high-voltage 4H-SiC switching devices", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 46, p. 589-597, 1999.
- [4] Charles E. Weitzel, John W. Palmour, Calvin H. Carter, Jr., Karen Moore, Kevin J. Nordquist, Scott Allen, Christine Thero, Mohit Bhatnagar, "Silicon Carbide High-Power Devices", IEEE Transactions of electron devices, Vol. 43, No. 10, 1996.
- [5] V. Tilak, K. Matocha, and G. Dunne, "Electron-

Scattering Mechanisms in Heavily Doped Silicon Carbide MOSFET Inversion Layers", IEEE Transactions of electron devices, Vol. 92, 4053, 2002.

- [6] P. Friedrichs and D. Stephani, "Unipolar SiC power devices and elevated temperature", Microelect. Eng., Vol. 83, 181, 2006.
- [7] Leo Lorenz, "Power Semiconductor Devices-Development Trends and System Interactions", Power Conversion Conference - Nagoya, PCC '07, p. 348-354, 2007.
- [8] Yongxi Zhang, Kuang Sheng, Ming Su, Jian H. Zhao, Petre Alexandrov, Leonid Fursin, "1000-V 9.1-mΩ cm² Normally Off 4H-SiC Lateral RESURF JFET for Power Integrated Circuit Applications", IEEE Electron device letter, Vol. 28, No. 5, 2007.
- [9] P. Friedrichs, R. Elpelt, "Layout considerations for improving the on-state performance of vertical SiC switching devices", Power Electronics Specialists Conference, IEEE, p. 987-990, 2007.
- [10] Miura N., Fujihira K., Nakao Y., Watanabe T., Tarui Y., Kinouchi S., Imaizumi M., and Oomori T. "Successful development of 1.2 kV 4H-SiC MOSFETs with very low on-resistance of 5 mV cm²", Proc. Int. Symp. Power Devices and ICs, ISPSD, p. 261-264, 2006.
- [11] Ryu, S.-H., Krishnaswami, S., Hull, B., Richmond, J., Agarwal, A., and Hefner, A., "10 kV, 5 A 4H-SiC power DMOSFET", Proc. Int. Symp. Power Devices and ICs, ISPSD, p. 265-268, 2006.
- [12] Ryu, S.-H., Krishnaswami, S., Hull, B., Richmond, J., Agarwal, A., and Hefner, A., "10 kV, 5 A 4H-SiC power DMOSFET". Proc. Int. Symp. Power Devices and ICs, ISPSD '06", p. 265-268, 2006.
- [13] Sugawara, Y., Miyanagi, Y., Asano, K., Agarwal, A., Ryu, S., Palmour, J., Shoji, Y., Okada, S., Ogata, S., and Izumi, T., "4.5 kV 120 A SICGT and Its PWM three phase inverter operation of 100 kVA Class". Proc. Int. Symp. Power Devices and ICs, ISPSD '06", p. 117-120, 2006.
- [14] Qingchun Zhang, Jun Wang, Charlotte Jonas, Robert Callanan, Joseph J. Sumakeris, Sei-Hyung Ryu, Mrinal Das, Anant Agarwal, John Palmour, and Alex Q. Huang, "Design and Characterization of High-Voltage 4H-SiC p-IGBTs", IEEE Transactions of electron devices, Vol. 55, No. 8, p. 1912-1919, 2008.

- [15] Tomohiro Tamaki, Ginger G. Walden, Yang Sui, and James A. Cooper, "Optimization of on-State and Switching Performances for 15-20kV 4H-SiC IGBTs", IEEE Transactions of electron devices, Vol. 55, No. 8, p. 1920-1927, 2008.
- [16] I. Cimalla, et al, "AlGaIn/GaN biosensor-effect of device processing steps on the surface properties and biocompatibility", Sensors and Actuators B. Chemical, Vol. 123, 740, 2007.

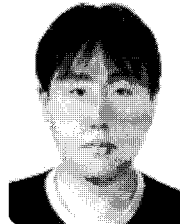
저|자|약|력



성 명 : 조영득

◆ 학 력

- 2008년
광운대 전자재료공학과 공학사
- 현재
광운대 대학원 전자재료공학과 공학 석사과정



성 명 : 최창용

◆ 학 력

- 2008년
광운대 전자재료공학과 공학사
- 현재
광운대 대학원 전자재료공학과 공학 석사과정



성 명 : 구상모

◆ 학 력

- 1997년
고려대 전기공학과 공학사
- 1999년
스톡홀름 왕립공대 대학원
재료공학과 공학석사
- 2003년
스톡홀름대 대학원 전자공학과
공학박사

◆ 경 력

- 1999년
· 2003년
미국 메사추세츠 공대 객원연구원
스웨덴 스톡홀름왕립과학원 박사 후
연구원
- 2003년 - 2006년
미국 국립표준기술연구소(NIST)
연구원
- 2006년 - 현재
광운대학교 전자재료공학 조교수