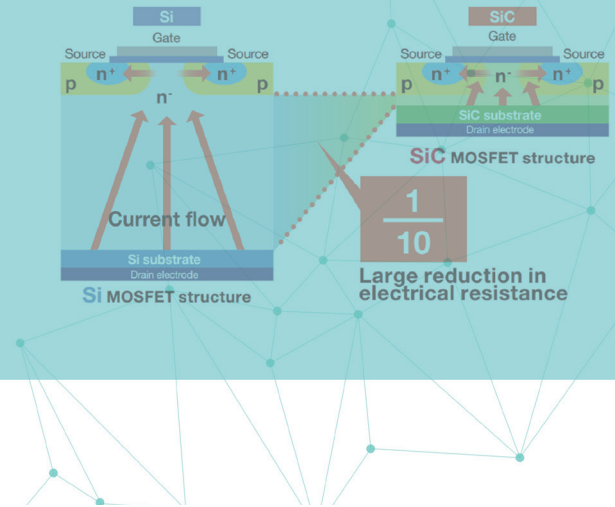


SiC MOSFET의 특성 및 응용

김 래 영 | 한양대학교 전기생체공학부 (전기공학전공) 교수



1. 서 론

Silicon

Carbide(SiC)와 Gallium Nitride(GaN)로 대표되는 Wide Bandgap(WBG) 전력

반도체는 기존 Silicon(Si) 전력 반도체에 비해 낮은 도통 손실, 높은 차단 전압, 빠른 스위칭, 높은 운전 온도 등의 다양한 장점을 가진 차세대 전력 반도체로서 주목 받고 있으며, 이에 대한 중요성도 날로 커지고 있다. 이에 따라 [1]-[3]에서 WBG 전력 반도체를 위한 게이트 드라이브 설계 및 응용 토폴로지에 대한 기술 동향 등이 상세히 다루어진 바 있으나, WBG 전력 반도체에 대한 기본적인 특성에 대한 이해와 고려 사항에 대해서는 자세히 다룬 바가 없는 듯하다. 이에 본 기고에서는 WBG 전력 반도체 응용을 위한 주요 전기적 특성을 SiC MOSFET을 대상으로 가능한 쉽게 설명하고자 한다.

2. SiC 전력 반도체의 이해

표 1에 4H-SiC를 포함한 Si 및 GaN의 물성적 특성을 나타내었다. 여기서 4H는 SiC의 결정 구조를 나타내는 것으로, SiC에는 다양한 결정 구조가 가능하며 특성도 다르게 나타난다. 표에 나타난 물성적 특성은 측정시 온도, 기압 등 조건에 따라 다르므로, 이의 정확한 값을 논하는 것은 큰 의미가 없다. 다만 SiC는 기존 Si에 비해 Breakdown Field가 대략 10 배 정도 크고, Energy Gap 또한 대략 3 배 정도 크다는 것을 확인하면 되겠다. 다음에서는 이를 통해 SiC MOSFET의 주요한 장점을 이해해 보도록 하겠다.

그림 1은 동일 전압 정격을 가진 Si MOSFET과 SiC MOSFET의 구조를 나타내고 있다. Si MOSFET의 경우 전압 정격을 높이기 위해 낮은 불순물 농도(그림에서 n-로 표현된)를 가진 긴 Drift Layer를 가지고 있다. 낮은 불순물 농도는 자

표 1. SiC의 물성적 특성 [4]

Properties	Si	4H-SiC	GaN
Energy Gap : E_G (eV)	1.12	3.26	3.39
Electron Mobility : μ_n ($cm^2/V \cdot s$)	1400	950	1500
Breakdown Field : E_B (V/cm) $\times 10^6$	0.3	3	3
Thermal Conductivity (W/cm $^{\circ}C$)	1.5	4.9	1.3
Saturation Drift Velocity v_s (cm/s) $\times 10^7$	1	2.2	2.5
Relative Dielectric Constant : ϵ_S	11.8	9.7	9.5

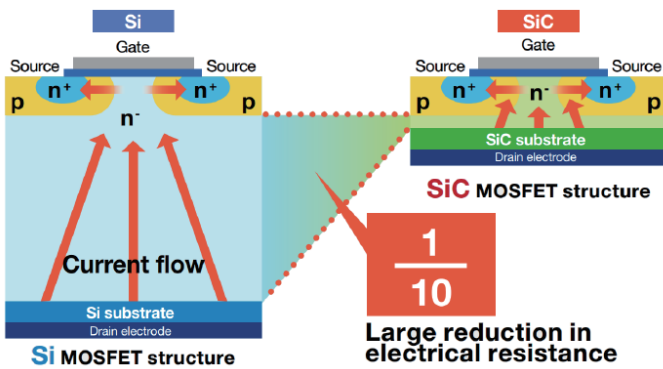


그림 1. SiC MOSFET의 구조

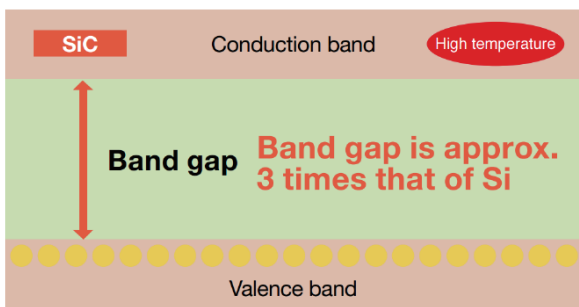


그림 2. Wide Band Gap하에서의 전자 이동

유 전자 밀도를 낮추고 이로 인해 Drift Layer는 큰 저항을 가지게 된다. 이에 반해 SiC MOSFET의 경우, 높은 Breakdown Field라는 SiC의 물성적 특성으로 인해 Drift Layer를 얇게 하는 것이 가능하고, 따라서 낮은 도통 손실의 장점을 가지게 된다.

또한 그림 2에 나타난 바와 같이 SiC는 Si에 비해 넓은 Energy Gap를 갖고 있다. 이는 전자가 열 에너지에 의해 Conduction Band로 쉽게 이동하지 못함을 의미하며, 따라서 고온에서도 자유 전자에 의한 누설 전류가 작게 되는 등 반도체 소자로서 우수한 특성을 가진다.

3. SiC 전력 반도체의 특성 및 응용 [5]

지금부터는 SiC MOSFET을 응용하기 위한 중요한 전기적 특성에 대해 알아보기로 한다. 전기적 특성은 크게 정적 특성과 스위칭 특성으로 구분할 수 있는데 Curve Tracer, Impedance Analyzer, Double Pulse Test 장비를 사용하여 측정할 수 있다. 이러한 측정 장비 및 방법에 대해서는 이미 많은 문헌에서 자세하게 다루고 있으며, 해당 제품의 카탈로그 또한

많이 나와 있으므로 이를 참조할 수 있겠다.

그림 3은 Curve Tracer를 통해 측정된 SiC MOSFET의 주요한 정적 특성인 Output characteristics를 보여준다. 이는 게이트-소스 전압(V_{GS}) 및 온도를 변화하면서 드레인-소스 전압(V_{DS})과 드레인 전류(I_D)를 측정하는 것으로, 동일 V_{DS} 에서 높은 I_D 를 갖는 것이 낮은 R_{DS} 를 의미한다. 그림을 통해 V_{GS} 를 증가함에 따라 낮은 R_{DS} 를 얻을 수 있음을 알 수 있고, 또한 $V_{GS}=15V$ 이상부터는 R_{DS} 가 거의 감소되지 않음을 추측할 수 있다. SiC MOSFET을 이용하여 낮은 도통 손실을 달성

하기 위해서는 Output characteristics에 대한 이해가 중요하며, 이것이 $V_{GS}=15V$ 가 SiC MOSFET용 게이트 드라이버의 온 출력 전압으로 많이 사용되는 이유이다. 한편 온도 증가에 따른 R_{DS} 의 변화는 V_{GS} 가 15V 미만인 경우, 온도 증가에 따라

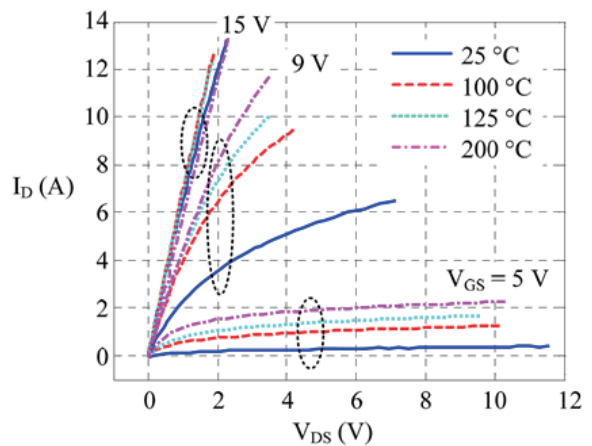


그림 3. $V_{DS}-I_D$ 특성 곡선

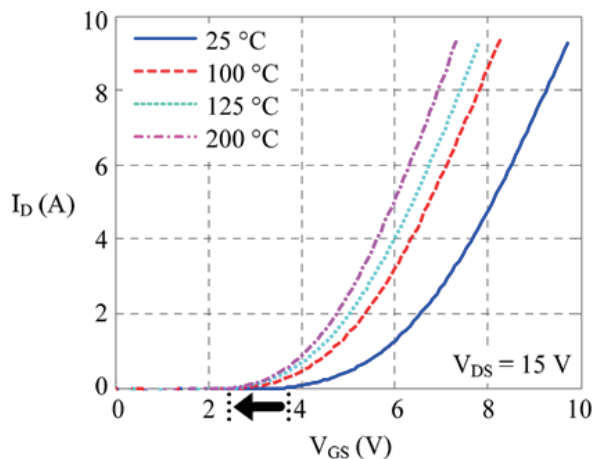


그림 4. $V_{GS}-I_D$ 특성 곡선

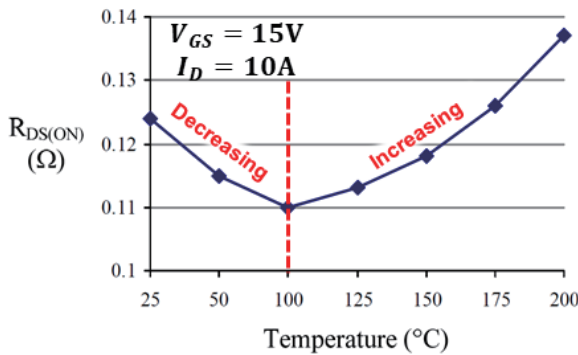


그림 5. $V_{GS} = 15V$ 인가시 온도에 따른 R_{DS} 변화

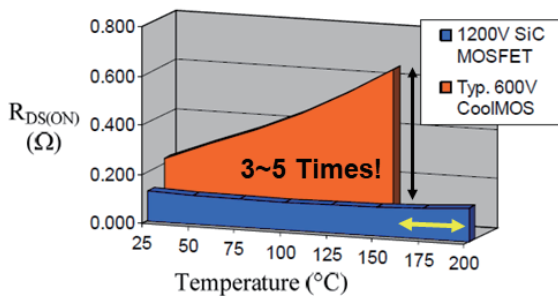


그림 6. Si MOSFET과 SiC MOSFET의 온도 변화에 대한 R_{DS} 비교

R_{DS} 는 감소하며 V_{GS} 가 15V 이상인 경우에는 이러한 경향이 명확하게 나타나지 않음을 알 수 있다. 이에 대해서는 그림 5를 통해 추가적으로 살펴보기로 한다.

그림 4는 Curve Tracer를 통해 측정된 SiC MOSFET의 Transfer characteristics를 나타낸다. 이는 $V_{DS}=15V$ 를 인가한 후 온도를 변화하면서 V_{GS} 와 I_D 를 측정하는 것으로, 대략 $V_{GS} = 2V \sim 4V$ 에서부터 전류 도통이 시작됨을 알 수 있다. 또한 온도를 증가시키에 따라 전류 도통이 시작되는 V_{GS} 는 점차 낮아짐을 알 수 있다. 이때 전류 도통이 시작되는 V_{GS} 를 임계 전압 (Threshold voltage, $V_{GS(TH)}$)라 칭하며, MOSFET에 의한 스위칭 회로 단락 방지 및 낮은 도통 손실을 실현을 위해서 이와 같은 $V_{GS(TH)}$ 의 특성 변화를 적절히 고려하여 Dead Time을 설정할 필요가 있다. 또한 온도가 증가함에 따라 $V_{GS(TH)}$ 에 낮아지므로 Fault Trigger 현상을 방지하기 위하여 $-5V$ 를 SiC MOSFET용 게이트 드라이버의 오프 전압으로 사용할 수도 있다.

그림 5는 $V_{GS} = 15V$ (또는 이상)인 경우, 온도에 변화에 따른 R_{DS} 의 변화를 나타내고 있다. (V_{GS} 가 15V보다 작은 경우에 대해서는 그림 3을 통해 이미 설명한 바 있다.) 이때 I_D 는 10A

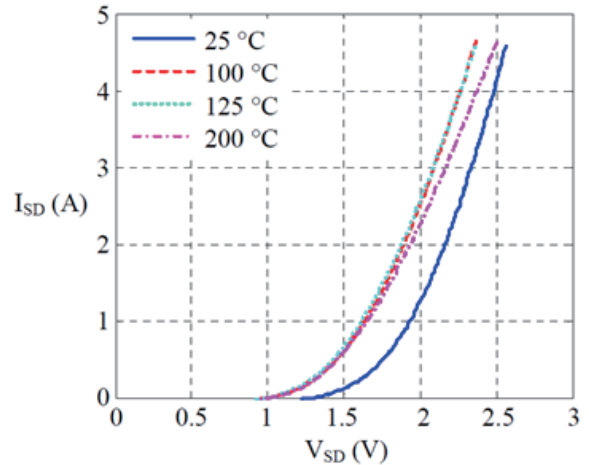


그림 7. SiC MOSFET Body Diode의 $V_{SD}-I_{SD}$ 특성

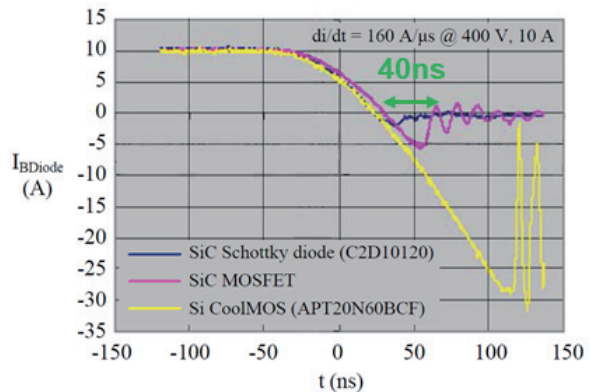
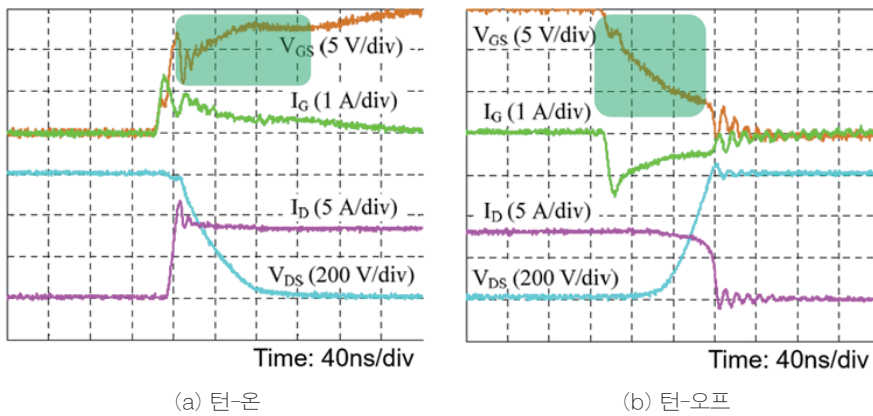


그림 8. Body Diode 역회복 특성 비교

로 고정하였다. 그림에서 보듯이, SiC MOSFET은 대략 $100^{\circ}C$ 보다 낮은 온도에서 R_{DS} 의 감소가 나타남을 알 수 있다. 반면 $100^{\circ}C$ 를 넘게 되면, R_{DS} 점차 증가하게 된다. 이러한 현상은 $100^{\circ}C$ 이하에는 Channel 저항이 지배적으로 나타나며 $100^{\circ}C$ 이상에서는 Drift 및 JFET 저항이 지배적으로 나타나기 때문으로 Channel 저항은 온도 증가에 따라 Channel 내의 전자 mobility가 증가하게 되어 감소하는 반면, Drift 및 JFET 저항은 온도 증가에 따라 Lattice vibration이 활발하게 되어 점차 커지게 되기 때문이다. 그러나 이러한 변화는 그림 6에서 보이는 바와 같이 기존 Si MOSFET에 비하면 매우 작으며, 특히 $150^{\circ}C$ 이상의 고온에서도 SiC MOSFET은 낮은 도통 손실을 보인다. 따라서 동작 온도의 적절한 선정을 통해 방열 설비를 최소화할 수 있으며 또한 고밀도화도 가능하게 된다.

그림 7은 온도를 변화에 대한 SiC MOSFET Body Diode의 V_{SD} 및 I_{SD} 의 관계를 나타낸 것이다. 동일한 I_{SD} 에서 낮은 V_{SD} 를



(a) 턴-온

(b) 턴-오프

그림 9. SiC MOSFET의 전형적인 스위칭 파형


가지는 경우가 낮은 도통 손실을 의미한다. Body Diode의 도통 손실 변화는 R_{DS} 과 유사하게 나타난다. 즉, 대략 125°C 보다 낮은 온도에서는 도통 손실이 작아지는 반면, 125°C 를 넘는 경우 점차로 증가하게 된다.

그림 8은 1.2kV SiC Schottky Barrier Diode, 1.2kV SiC MOSFET 및 600V Si MOSFET(CoolMOS)의 역회복 특성을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 SiC MOSFET Body Diode는 Si MOSFET에 비해 현저히 줄어든 역회복 전하량과 40nsec의 빠른 역회복 시간 등 매우 우수한 특성을 보인다. (그림에도 불구하고 이러한 역회복 손실을 무시하는 것은 어렵다.) 이는 높은 Breakdown Field의 SiC 물성적 특성에 따른 결과로, Drift Layer 얇게 하고 동시에 Minority Carrier의 Lifetime를 최소화함으로써 달성된다. 기존 Si MOSFET과는 달리 SiC MOSFET의 Body Diode는 Free Wheeling Diode로 활용될 수 있으며, 보다 우수한 역회복 특성 및 낮은 도통 손실이 요구되는 경우에는 SiC Schottky Barrier Diode를 병렬로 추가하게 된다.

그림 9는 600V, 8A에서 1.2kV SiC MOSFET의 일반적인 스위칭 파형을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 대략 80 nsec 및 50 nsec 내에서의 빠른 턴-온 및 턴-오프가 달성됨을 알 수 있으며, 능동 운전 영역을 나타내는 Miller Plateau 영역이 Si MOSFET에 비해 불분명하게 나타나는 특징을 보인다. 통상 턴-온 스위칭 에너지 손실은 턴-오프에 비해 2배 이상 크게 나타나며, 게이트 저항에 따라 다르기는 하지만 일반적으로 에너지 손실은 100~300uJ 범위로 알려져 있다.

4. 결 론

최근 SiC와 GaN과 같은 WBG 전력 반도체에 대한 관심이 증가하고 있다. 이는 현대 전력전자 산업이 전력 계통, 신재생 에너지, 전기 운송 시스템, 항공 우주 등 다양한 분야로 확장되고 있고, 이들 분야에서 전력 변환 장치는 낮은 손실 및 고압화, 고효율화, 고속 스위칭, 소형

화, 고밀도화, 고신뢰성 등을 끊임없이 요구 받고 있기 때문일 것이다. 즉, WBG 전력 반도체는 이러한 전력전자 산업의 경쟁력 확보를 위한 당면의 목표를 달성할 수 있는 효과적인 수단이다. 따라서 WBG 전력 반도체의 정확한 특성에 대한 이해가 중요하며, 이에 본 고에서는 대표적인 WBG 반도체 소자인 SiC MOSFET에 대해 가능한 쉽게 전기적 특성을 설명하고자 노력하였다. 본 기고를 통해 WBG 반도체 소자에 대해 보다 친숙하게 다가갈 수 있기를 기대한다. 

참고문헌

- [1] 우현민, 안준영, 이명준, 나재두, 차세대 전력반도체 SiC와 GaN의 응용, 대한전기학회, 전기의 세계, pp. 24-28, 2014. 5
- [2] 이일운, 김종우, 전력전자분야에서 GaN 전력반도체를 위한 회로기술 연구동향, 대한전기학회, 전기의 세계, pp. 34-43, 2016. 2
- [3] 김종수, Wide Bandgap 소자 기반 전력변환장치의 현황, 대한전기학회, 전기의 세계, pp. 15-26, 2016. 2
- [4] SiC Power Devices and Modules, Application Note, Rohm Semiconductor
- [5] Zheng Chen, Characterization and Modeling of High-Switching-Speed Behavior of SiC Active Devices, Thesis, Virginia Tech, 2009
- [6] <http://www.cree.com/>