

SiC 반도체 기술현황과 전망

Status of Silicon Carbide as a Semiconductor Device

김 은 동
(Eun-Dong Kim)

Abstract

반도체 동작시에 파워 손실을 최소화하는 것은 2000년대의 에너지, 산업전자, 정보통신 산업분야에서의 가장 주요한 요구 사항중의 하나이다. 실리콘계 반도체 소자들은 완전히 새로운 구동기구의 소자가 개발되지 않는 한, 실리콘 재료의 낮은 열전도율이나 낮은 절연파괴전계와 같은 물리적 특성한계 때문에 이러한 요구를 만족시키는 것이 불가능한 실정이다. 따라서 21세기를 위한 대안으로 고열전도율의 WBG(Wide Band-Gap) 물질 그 중에서도 탄화규소(SiC) 반도체가 제시되고 있다. SiC 반도체는 실리콘에 비하여 밴드 갭(band gap: E_g)이 높을 뿐만 아니라 절연파괴강도(E_b)가 한 자릿수 이상 그리고 전자의 포화 drift 속도, v_s 및 열전도도 k 가 3배 가량 크다. 따라서 SiC는 고온 동작 내지는 고내압, 대전류, 저손실 반도체를 제작하는데 아주 유리하다. 본고에서는 응용성이 넓고, 단결정 제조가 비교적 용이한 SiC 반도체의 기술현황에 대하여 살펴보고자 한다.

Key Words : silicon carbide, wide bandgap, low loss

1. 서 론

전기에너지는 전 세계적인 소비에너지의 약 36%에 이르며 전기에너지 절약기술이야말로 세계적인 에너지 절감 노력의 최대 관심사로 떠오르고 있다. 일반적으로 전기에너지의 60% 이상은 산업현장에서 소비되고 있기 때문에 전기 에너지의 절약은 궁극적으로 산업경쟁력의 강화로 이어질 수 있어 기술선진국에서는 여러 가지 지원책으로 에너지기술개발을 지원하고 있다. 전 세계적으로 보면 생산유통전력의 약 85% 정도가 전력반도체를 이용한 전력변환 및 제어 과정을 거쳐 소비되고 있다. 현재 실리콘 반도체소자들에서의 전력소모는 전력반도

체소자들의 처리전력의 약 6%에 이르고 있다. 현재 이와 같이 전력소모가 큰 이유는 실리콘반도체의 물리적 특성의 한계와 반도체소자에서의 기술적 한계에 기인한다. 뿐만 아니라 현재의 고집적화 추세는 칩 면적 당 발열의 급속한 증가를 가져오므로 현재의 실리콘의 열적 특성의 한계 때문에 곧 한계에 직면하게 될 것이다.

이러한 21세기의 정보화 산업사회에서의 초저손실 고열전도율 고온반도체에 대한 요구는 실리콘의 대안을 요구하고 있다. 실리콘보다 반도체적 물성이 뛰어난 새로운 물질들이 에너지 절약을 위한 반도체 재료로 각광받고 있다. 그 중에서도 탄화규소(SiC: silicon carbide)는 우수한 물성을 보유하고 있을 뿐만 아니라 단결정 및 에피택시 성장 기술이 확립되어 있어 반도체를 구현하는데도 여타의 wide bandgap 반도체 물질에 비하여 뛰어나다. 본 고에서는 SiC 반도체의 기술현황과 국내외 연구개발 활동을 소개하고 앞으로의 기술발전 방향

한국전기연구원 전력반도체그룹
(경남 창원시 성주동 28-1,
Fax : 055-280-1590
E-mail : edkim@keri.re.kr)

에 관하여 전망해 보고자 한다.

2. 반도체로서의 SiC

이상적인 반도체는 내전압은 무한히 높고 온전압은 0인 것이다. 그러나 현실적으로 반도체 소자에 있어 내전압과 온전압은 서로 상보관계(trade-off)에 있다. 이론적으로 소자의 내전압(reverse blocking voltage)은 두 개의 주 전극(다이오드/사이리스터에서 음극(cathode)과 양극(anode), FETs에서 소스(source)와 드레인(drain), 바이폴라 트랜지스터의 경우 에미터(emitter)와 콜렉터(collector)) 간의 거리에 의존한다. 또한 주 전극 사이 온-상태 전압강하는 전극간 거리에 비례한다. 결국 내전압을 높이하고자 하면 필연적으로 온 전압이 커져 손실이 증가하게 된다.

절연파괴강도(V_B)가 높은 물질로 반도체소자를 만들면 동일한 내전압의 소자에서도 온-상태 전력손실을 획기적으로 줄일 수 있다. 특히 바이폴라계 소자에서는 고전압 지지층의 두께가 줄어들면 스위칭 속도가 개선되므로 스위칭 손실도 줄일 수 있는 장점도 있다. 결국 반도체에서의 절연파괴강도는 밴드갭 에너지가 증가하면 커지므로 실리콘(약 1.1 eV)보다 큰 밴드갭을 가지는 WBG(Wide Band-Gap) 반도체가 차세대 반도체로 검토되고 있다.

한편 전력반도체에서 단위면적당 사용전류가 증가하거나 스위칭 주파수가 증가하면 전력손실이 급격히 증가하는 경향이 있다. 전력손실이 증가하면 소자 내부의 온도상승이 일어난다. 따라서 이러한 손실에 의한 온도상승이 사용전류나 허용 주파수를 제한한다. 실리콘 소자의 경우, 대부분 최고접합온도가 150℃ 이내로 제한된다. 실리콘 소자에서의 이러한 발열 문제를 극복하기 위하여 강제냉각 방식이 도입되고 있다. 뿐만 아니라 고집적소자에서도 고집적화에 따르는 단위면적 당 발열량의 증가는 궁극적으로 초고집적화의 한계를 가져올 것이다. 따라서 에너지 밴드갭이 큰 재료를 이용하면 진성반도체 특성에 이르는 온도가 높아지므로 보다 높은 온도에서 안전하게 동작할 수 있다.

또한 실리콘은 비교적 낮은 열전도율을 가지고 있어 소자정합에서 발생된 열을 방출하는 능력이 비교적 낮은 편이므로 안전온도영역에서 사용하기 위해서는 방열 비용이 많이 든다는 단점을 가지고 있다.

한편 검토되고 있는 WBG 반도체 재료들은 강한 공유결합을 하고 있어 격자에너지 산란(phonon scattering)이 적어 현존하는 물질들 중에서 가장 높은 열전도율을 나타내는 것으로 알려져 있다. 이러한 특징 때문에 실리콘을 대체할 가능성이 있는 반도체로 WBG 반도체가 추천되고 있다. 방열 특성만을 고려한다면 다이아몬드가 가장 이상적인 반도체가 될 것이다.

WBG 반도체로, 원소 반도체로는 탄소로만 구성된 다이아몬드, 질화물(nitride)로는 질화 갈륨(GaN)과 질화 알루미늄(AlN) 등이 있고, 탄화물로는 탄화 규소(SiC)가 있다. AlN은 낮은 캐리어 이동도와 웨이퍼기술의 미성숙 때문에 반도체로 이용은 어려운 실정이나 높은 절연파괴강도와 열전도율, 낮은 유전을 때문에 반도체 절연기판으로서 응용이 활발하다.

SiC는 여러 가지 점에서 실리콘보다 뛰어난 물성을 보유하고 있는데 표 1은 SiC와 실리콘의 물리적 특성을 비교하고 있다.

표 1. SiC의 물리적 특성의 우수성.

	Si	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC
밴드 갭, E_g (eV)	1.12	2.20	2.86	3.26*
열전도도 (W/m-K)	1.51	4.9	4.9	4.9
전자 이동도, μ_e (cm ² /Vs)	1500	850	460	700
정공 이동도, μ_h (cm ² /Vs)	450	70	10	100
유전율 ϵ_r	11.9	9.72	9.66	-
절연파괴전압 E_B (V/cm)	3x10 ⁵	2x10 ⁶	2.5x10 ⁶	2.2x10 ⁶

SiC의 단결정 및 단결정박막(epitaxy) 성장기술의 확립이 야말로 여타의 WBG 반도체와 비교하여 특히 우위에 선 특징이라 할 수 있다. 이런 기술은 실질적으로 반도체를 구현하는데 필수적인 것으로서 기술발전에 중요한 요인으로 거론된다. 예를 들어 다이아몬드는 물리적 특성 면에서는 가장 이상적인 소재임에도 불구하고 대규모 단결정 기술이 정립되어 있지 못하다. 뿐만 아니라 결합에너지가 너무 강하여 불순물 주입이 어렵고, 급속화와 같은 소자공정 등에서도 극복해야할 장벽이 너무 높아 당분간은 반도체로서의 실용화가 쉽지 않을 전망이다. 질화물 반도체들도 여전히 단결정 성장에 애로사항이 있다. SiC 반도체 웨이퍼는 직경 2'급이 대중을 이루고 있으나 최근에 미국 Cree에서 직경 3'급의 생산을 개시하였다. SiC에는 불순물 확산이 사실상 불가능하므로 에피택시 기술은 반도체를 구현하는데 매우 중요한데 수 μ m~수십 μ m 두께의 p형 및 n형 에피택시 층의 형성이 가능하며 이를 상업적으로 공급하는 미국, 유럽, 일본의 업체가 다수 있다.

3. SiC 반도체의 응용분야와 기술현황

3.1 전력반도체 분야

SiC 소자의 이용에 따르는 효과가 가장 바르고 크게 나타날 수 있는 분야 중의 하나는 역시 전력반도체 분야로 기대되고 있다. 그것은 SiC 절연파괴강도가 실리콘에 비하여 약 10배 가량 높기 때문에 내전압이 높으면서도 손실이 작은 전력소자의 구현이 가능하기 때문이다.

그림 1은 전력소자로서의 용량과 스위칭 주파수 관점에서 바라본 SiC 소자의 경쟁력을 나타낸 것으로 대용량의 소자일 수록 그리고 스위칭 주파수가 커질수록 실리콘에 비하여 SiC 전력소자의 경쟁력이 높음을 알 수 있다.

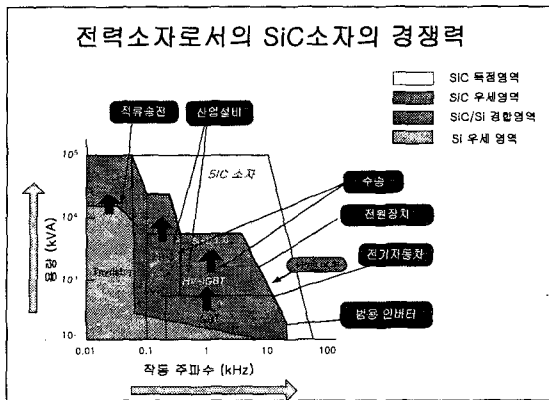


그림 1. SiC 전력반도체의 응용분야와 경쟁력.

최근에 일본의 간사이 전력은 미국 Cree와 공동으로 온전압 강하가 4.1V인 6200V급 SiC다이오드를 개발한 바 있다. 이 밖에도 고전압 MOSFET, 사이리스터 등이 개발되고 있다.

3.2 고주파 전력반도체 분야

21세기는 바야흐로 실질적인 정보화 사회가 될 것이다. 특히 방송과 통신이 복합(hybrid)화된 시스템이 일반화될 것이다. 이렇게 되면 인터넷으로 전세계의 방송을 청취할 수 있을 것이다. 또한 휴대용 개인정보통신 시스템의 보급이 일반화될 것이다.

이러한 추세를 뒷받침하기 위한 위성 및 공중파 방송/통신 시스템의 요구가 급증할 것이다. 현재까지는 실리콘이나 GaAs를 이용한 고주파 소자들의 경우, 열적 한계 때문에 대용량화가 어려워 송출(transmitter)시스템에 만들 수 있는 증폭모듈은 만들지 못하고 있는 실정이다. 따라서 많은 시스템에서 TWTA를 이용하고 있다.

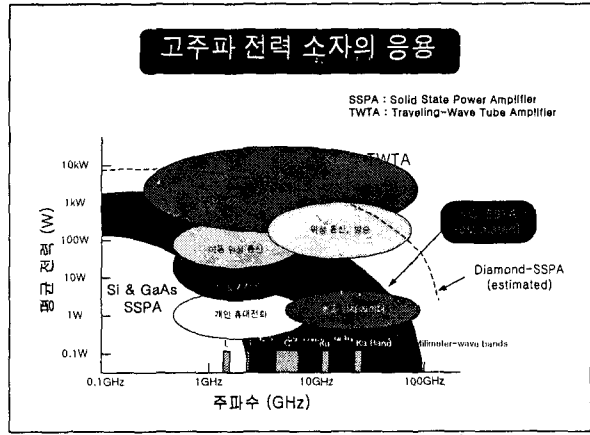


그림 2. SiC 고주파 증폭기(amplifier)의 응용영역.

현실적으로 아래 같은 응용을 위하여 수십 와트급의 전력증폭모듈을 개발하기 위한 노력들이 이루어지고 있다.

- (1) 2000년 초반부터 상용화 예정인 IMT-2000용 기지국/중계기용/단말기용 전력 증폭 모듈
- (2) LEO(Low Earth Orbit) 위성통신 시스템용 RF 송신부의 전력증폭 모듈
- (3) 지상 및 위성방송 시스템의 RF 송신 전력증폭 모듈
- (4) Microwave 이착륙 시스템 및 공항자동화 장치
- (5) Wireless CATV, WLAN등의 master transmitter

3.3 고집적회로소자 및 극한소자 분야

시스템 IC 기술 분야에서는 가격과 제조기술의 성숙도로 미루어 보아 당분간은 SOI(Silicon On Insulator) 기술이 이끌어 갈 것으로 예견된다. 그러나 실리콘을 기지(base)로 한 SOI 기술의 경우, 저손실화, 고속화에는 적합하나 방열 특성이 나쁘다는 단점을 극복하는데 많은 노력이 필요할 것으로 사료된다.

이러한 초고집적화는 칩 단위면적 당 발열량의 증가를 가져온다. 따라서 열잡음이 큰 문제로 대두될 것이다. 또한 사용접합온도의 한계는 실질적인 초고집적화의 한계를 가져올 것이다. 이러한 문제점들을 한꺼번에 극복할 수 있는 기술로 SiC 기술이 검토되고 있다. 또한 SiC 소자 기술은 700℃ 이상에서도 동작할 수 있으므로 화력발전소 연소기나 자동차 엔진에 직접 붙여 사용할 수 있는 연소제어용 시스템 IC의 실현을 이루어 줄 것으로 기대된다.

4. SiC 반도체 기술개발 동향

4.1 국내의 SiC 연구개발 프로그램

1999년부터 산업자원부 차세대신기술개발사업으로 "SiC

반도체 기술개발" 연구가 시작되어 현재 제 1단계의 3차년도 사업이 진행중이다. 한국전기연구원이 총괄하여 진행중인 이 사업에는 12개 산학연 관련기관이 참여하고 있으며 SiC MOSFET와 쇼트키 다이오드, 고주파 MESFET 및 IC 기술 개발과 함께 SiC 기반공정기술을 동시에 개발하고 있다.

4.2 기술선진국에서의 연구개발 프로그램

표 2에 나타낸 바와 같이 많은 기술선진국에서 국가적 차원의 SiC 반도체 기술개발 프로그램을 운용하고 있다. 미국의 대표적 프로그램은 DARPA와 EPRI가 주도하는 Megawatt Solid State Program으로 5개의 연구 콘소시움을 구성하여 1.0 MW 이상의 정류소자 및 스위치 소자가 개발중이다. 일본도 통산성 주도의 연구개발 프로그램을 진행중이다.

대부분의 연구개발 프로그램은 SiC 반도체 산업 육성의 차원보다는 21세기에는 보다 심각한 문제로 다가올 에너지 및 지구환경 문제의 해결차원, 즉 에너지절약이라는 명제를 푸는 한 해결책으로 제시되고 있다.

표 2. 기술선진국들의 국가주도형 SiC 기술개발 프로그램 요약.

국가	프로그램 명	내 용
미국	Megawatt Solid-State Electronics	<ul style="list-style-type: none"> ▲ DARPA/공군 프로그램 - 전투용 hybrid power system - 0.1~1.0 MW급 정류소자 및 스위치소자 ▲ DARPA/전력연구소 프로그램 - 군사용 및 전력(전기)용 - 1MW 이상의 정류소자 및 스위치 소자 - 5개의 연구 콘소시움 구성
	공군	- 고온 연소 센서 및 제어시스템
	NASA	- 고온/내방사선 전자
	해군	- 고온전자
일본	R&D of Ultra-Low Loss Power Device Technologies	<ul style="list-style-type: none"> ▲ 에너지절약을 위한 국가연구개발사업 -1단계('98-2002): 정부연구비 총 70억엔 ▲ Hard Electronics - ETL 주관/ SiC 재료기술 중심 ▲ Advanced Power Devices - NEDO의 FED(미래전자소자협회) 관리 - 기업주관, 대학 기초기술 지원 JFET, MOSFET, JRC
스웨덴	SiCEP (SiC Electronics Program)	<ul style="list-style-type: none"> ▲ 전력기술에 초점을 맞춘 국가 R&D사업 ▲ '97년 시작, 2단계 10년 프로그램 ▲ Technology Block - KTH 중심/ 재료 및 공정기술 개발 ▲ Device Block - 기업(ABB) 중심/대전력 소자 개발
영국	SCEPTRE	<ul style="list-style-type: none"> ▲ 전기/전기교통/산업기기용에 초점을 맞춘 국가지원 R&D 사업 ▲ SiC 재료 및 공정/Devices/Packaging ▲ Evaluation and Applications

5. 결 론

2000년대에 인류가 공통으로 풀어야 할 문제들 중 가장 중요한 것으로 에너지와 지구환경 문제를 들 수 있다. 이를 위한 기술들 중의 하나는 에너지 절약기술임을 부인할 수 없을 것이다. 따라서 총 소비에너지의 약 36%에 이르고 있으며 그 비중이 점차 늘어나고 있는 전기에너지 절약기술의 중요성도 점차 증가하고 있다.

SiC 반도체 개발은 기존의 실리콘 소자에 비하여 이론적으로는 전력소모가 1/100에 지나지 않아 획기적인 에너지 절감 효과를 가져다 줄 것이다. 이러한 초저손실 반도체소자들은 산업전자, 정보통신 등의 21세기를 주도할 산업분야에서 기존의 실리콘 일렉트로닉스의 한계를 극복하여 줄 것으로 기대되고 있다.

참 고 문 헌

- (1) 김은동 외, SiC 반도체기술개발 기획보고서, 한국전기연구소(1999).
- (2) V. Tsvetkov et. al., Silicon Carbide, III-Nitrides and Related Materials, Elsevier, North Holland(1999).
- (3) R. S. Okoji et al., IEEE Trans. Elect. Dev., 46, 269(1999).
- (4) H. Matsunami, 研究成果報告書, ETL(1997).
- (5) M. G. Spencer et al. Eds., Silicon Carbide and Related Materials, Inst. of Phys., London(1994).
- (6) D. Kawase et al. Eds., Silicon Carbide and Related Materials VI.