

탄화규소(SiC) 반도체소자의 동향

김상철, 방 욱, 서길수, 김기현, 김형우, 김남균, 김은동

한국전기연구원 전력반도체그룹

Trend of SiC Power Semiconductor

Sang-cheol Kim, Wook Bahng, Kil-soo Seo, Kee-hyun Kim, Hyung-woo Kim,

Nam-Kyun Kim, Eun-dong Kim

Korea Electrotechnology Research Institute, Power Semiconductor Group

Abstract

탄화규소 전력반도체 소자는 실리콘 전력반도체 소자에 비해 우수한 물질특성을 갖고 있어 성능 측면에서 뿐 만 아니라 전력변환장비의 크기를 획기적으로 줄일 수 있는 새로운 반도체 소자이다. 특히 unipolar 계열의 소자에서 괄목할 만한 특성을 보이고 있다. 현재 쇼트키 장벽 다이오드의 경우 5kV급, UMOSFET의 경우 3kV급의 소자까지 보고되고 있으며 반도체 물질 중에서 가장 활발히 연구가 진행되고 있는 분야 중의 하나이다. 단결정성장 분야에서도 3인치 급이 상용화 되었으며 4인치 크기의 웨이퍼의 상용화가 조만간 실현될 것으로 기대되고 있다. 이러한 기술적 발전을 토대로 600V, 1200V급 쇼트키 다이오드가 PFC boost 용으로 시판되고 있으나 아직은 다른 반도체 소자에 비해 미미한 실정이다. 현재에는 250°C까지의 온도영역에서 실리콘 SOI(Silicon on Insulator) 소자가 주로 사용되고 있다. 그러나 300°C를 넘는 온도 영역에서는 실리콘으로는 한계가 있고, 특히 SOI는 전력소자에 적용하기는 한계가 있어 주로 저전력 고온소자가 필요한 부분에 적용이 되고 있다. 따라서 전력용에 적합한 고온소자로 탄화규소 소자의 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재의 추세로 보아 200 - 300°C 영역의 응용분야에서는 SOI와 탄화규소가 함께 적용될 것으로 예상되며, 300°C를 넘는 온도영역에서는 탄화규소 소자의 우월적 지위가 예상된다. 이러한 이유로 탄화규소 반도체소자의 응용 분야는 크게 확대될 것으로 예상되며 국가적 차원의 지원 및 육성이 요구되는 분야 중의 하나이다.

Key Words : Silicon Carbide, Power Semiconductor, Technical Trend

1. 서 론

탄화규소(SiC: silicon carbide)는 4족 원소들인 탄소(C)와 규소(Si)가 고온에서 화학결합하여 만들어지며, 밴드갭이 넓은 반도체 재료 중에서 가장 많이 연구되는 물질이다. 탄화규소는 100여종 이상의 결정다형이 있으나 반도체 재료로 사용되는 것은 4H-SiC와 6H-SiC 등으로 한정되고 있다. 4H-SiC 및 6H-SiC의 밴드갭은 각각 3.3, 2.8eV로 실리콘(1.12eV)에 비교하여 2~3배 정도 넓으며 이런 이유로 밴드갭이 넓은 반도체로 분류된다.

탄화규소 전력반도체소자는 실리콘 전력반도체소자에 비해 우수한 물질특성을 갖고 있어 성능 측면

에서 뿐 만 아니라 전력변환장비의 크기를 획기적으로 줄일 수 있다[1]. 탄화규소 반도체 분야에서의 최근의 비약적인 발전을 통해 고전압 전력소자로서의 활용가능성이 매우 높아지고 있다[2]. 특히 unipolar 계열의 소자에서 괄목할만한 특성이 보고되고 있다. 전압 탄화규소 쇼트키 장벽 다이오드의 경우 5kV급의 소자가 보고되고 있으며 이 소자의 온저항 R_{on} 은 실리콘의 이론적 한계값의 1/420에 불과하다[3]. 이 값은 탄화규소 반도체소자의 이론적인 한계값에 불과 두배정도 큰 값이다. 실리콘 소자와 비교되는 성능한계는 반도체 물질의 본질적 물성 차이에 기인한 이득지수를 비교해 보면 쉽게 예측할 수 있다. 그림 1은 고주파 응용과 대전력

응용의 이점을 나타내는 Johnson의 이득지수로써 탄화규소를 비롯한 밴드갭이 넓은 반도체 재료와 실리콘을 비교한 것이다. 트랜지스터의 전력과 주파수의 한계를 항복전압과 포화전자 이동속도로부터 유도한 것으로 탄화규소가 실리콘에 비해 약 600배 정도 크다[4].

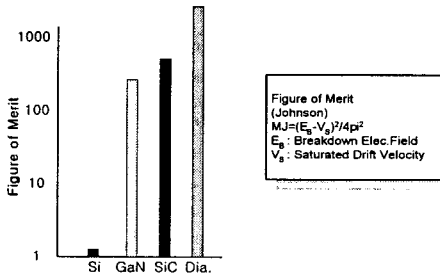


그림 1. 실리콘과 wide bandgap 반도체 재료의 Johnson 이득지수 비교.

2. 탄화규소반도체 기술현황

2.1 단결정 기술현황

실리콘의 경우 1기압, 1410°C에서 congruent melting을 하기 때문에 액상에서의 안정적인 단결정 성장이 용이하며, 우수한 결정성과 단결정 성장속도를 가진다. 이에 비해 탄화규소는 1기압에서 포정(peritectic)반응을 하기 때문에 액상 성장 방법에 의한 결정성장이 사실상 불가능하다. 화학 양론적인 탄화규소 단결정을 성장시키기 위해서는 열역학적으로 다이아몬드 합성과 비슷한 100,000기압 이상의 압력과 3200°C 이상의 온도가 필요하나 이러한 열역학적인 조건을 유지하는 것 자체가 매우 비 경제적이다. 따라서 탄화규소 단결정 성장은 기상에서 고체상으로의 상전이(승화)를 주로 이용하고 있다. 승화현상을 단결정 성장에 이용하기 위해서는 인위적인 탄화규소 기상의 과포화도의 유지와 계속적인 기상의 공급이 필요하다. 이러한 기상의 이동이 단결정 성장의 본질적 과정이기 때문에 승화를 이용한 모든 결정성장 방법을 PVT(physical vapor transport)라 한다.

초기단계에 SiC는 주로 약 2,500°C의 고온에서 silica와 coke의 합성에 의하여 만들어졌다(Acheson법)[5]. 그러나 Acheson법을 사용하여 SiC 결정성장을 했을 때 여러 불순물의 함유와 불규칙한 모양의 작은 결정이 성장됨으로 인하여 전

기공학소자에 이용하는데 많은 어려움이 있었다. 그 후 1955년에 비교적 순수한 6H-SiC가 승화법에 의해 만들어졌다(Lely법)[6].

이러한 기술개발에 기초하여 1960~1970년대에 전자공학분야에 응용 가능한 수준의 SiC에 대한 연구가 집중적으로 실시되었다. 이러한 활발한 연구는 Lely법이 자연핵 발생을 이용함으로써 인하여 polytype이 혼재하기 쉽고 크기가 작아 안정된 wafer의 공급이 어렵다는 큰 문제 때문에 잠시 주춤하였으나, α-SiC boule 성장시 polytype을 조절할 수 있는 혁신적인 seeded-승화법(modified Lely method)이 개발됨에 따라 향상된 고품위의 SiC 결정성장이 가능하게 되었다[7].

이러한 결정성장의 방법이 계속적으로 발전하여 최근에는 3인치 웨이퍼가 상용화되고 4인치 웨이퍼 성장이 가능해졌으나(그림 2), 기본적으로 탄화규소 웨이퍼에는 면결함(basal plane tube), 균열(crack), 결정도메인(crystal domain), 마이크로파이프(micropipe) 전위(dislocation) 및 적층결함 등이 있다. 이 중에서 마이크로파이프는 탄화규소에서 유일하게 나타나는 결함이며, 직경이 수 μm 정도 되는 원기둥의 형태로, 보통 성장방향에 평행인 [0001] 방향으로 boule 전체를 관통한다. Lely 단결정은 마이크로파이프 밀도가 1-3 cm⁻²로 매우 작으나 M-Lely(종자정) 단결정은 약 10²-10³ cm⁻²이다. Micropipe은 일종의 3차원적 결함이므로 반도체 소자 구현에 있어 해로운 영향을 미칠 것임이 분명하다.

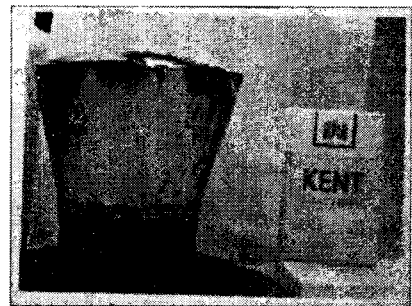


그림 2. 4인치급 탄화규소 단결정 ingot.

최근 일본의 도요타연구소에서 마이크로파이프가 없는 순수한 탄화규소 단결정 성장을 보고하였다.[] 도요타연구소는 성장된 탄화규소웨이퍼의 결함이

없는 부분을 절단하여 수직한 방향으로 결정성장시키고 다시 성장된 결정의 순수한 부분을 취하여 수직한 방향으로 결정성장을 시키는 등의 단계를 반복하면서 마이크로파이프가 없는 순수한 결정 성장에 성공하였다.

2.2 에피택시 기술현황

고성능 전자소자를 실현하기 위해서는 고품위의 결정과 더불어 정밀한 두께 제어나 도핑 등이 요구되는데, 이러한 modified Lely법으로는 아직도 많은 어려움이 있다. 따라서 이러한 요구에 부응할 수 있는 방법으로서 실리콘이나 탄화규소 기판 위에 탄화규소 박막을 성장시키는 기술이 고안되었다. 탄화규소의 박막성장에 있어서 주류를 이루는 두 가지 방법은 β -SiC/Si와 같은 이중박막성장과 α -SiC/ α -SiC의 동종박막성장이다. 3C-SiC/Si 이중박막성장에 있어서는 carbonized buffer layer 기술[?]을 이용한 CVD(chemical vapor deposition)법이 사용되어, 많은 연구자들에 의해 MESFET이나 MOSFET과 같은 소자개발이 시도되고 있다. 그러나 Si와 3C-SiC의 격자상수차이(20%)와 열팽창계수의 차이(8%) 등으로 인하여 소자화 가능한 3C-SiC 박막성장이 어려운 실정이다. 최근에는 MBE(molecular beam epitaxy)[?]법에 의한 3C-SiC의 성장으로 Si의 탄화층[?]에 대한 기초적인 연구와 원자준위 조절에 대한 연구가 이러한 문제들을 극복하기 위해 지속적으로 수행되고 있다.

일본의 관련 연구기관으로서, 국공립기관으로 산업기술종합연구소, 일본 원자력 연구소 등이 있고, 대학으로는 교토대학, 교토공예섬유대학, 오사카대학, 오카야마대학, 오카야마이과대학, 호세이대학, 아이치교육대학, 도쿄이과대학, 토카이대학 등이 있다. 또한 민간 연구기관으로는 산요전기, 신일본제철, 샤프, 도시바 재료연구소, 토요타 중앙연구소, 니산자동차 기초연구소, 호야 재료연구소, 간사이 전력, 후지전기, 후지쯔 연구소 등에서 활발히 수행하고 있다.

미국의 경우, 정부관련 연구소로는 해군연구소(Naval Research Lab.), NASA Luis연구소 등에서, 민간기업으로는 Cree, Westinghouse, GE Corp. R&D, Rockwell International Science Center, Kulite Semicond. Product, ATM(Advanced Tech. Materials), Northrop Grumman 등에서 대단히 활발하게 수행하고 있다.

2.3 소자기술 및 생산현황

탄화규소를 이용한 소자 개발은 1980년대부터 대학 및 연구소 등에서 시작되었다. 초기 연구분야는 쇼트키 다이오드 및 pn 다이오드 등의 다이오드 소자가 주를 이루었으며 최근에는 고전압 MOSFET 분야에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 많은 기업들이 실리콘을 이을 차세대 소자로 연구를 진행시키고 있으나 아직은 원재료의 가격부담, 재료자체의 결함 등으로 큰 시장은 형성하지 못하고 있는 실정이다. 그러나 최근 웨이퍼의 구경이 점차 커지면서 4인치급의 웨이퍼까지 개발되고 있으며 micropipe 억제 및 도핑농도 조절 등의 분야에서 괄목할만한 진전이 이루어지면서 소자 개발도 큰 폭의 진전이 이루어지고 있다.

쇼트키 다이오드의 시장 진출은 독일의 Infineon 사에 의해 2000년 초에 시작되었다. 300V 및 600V 급 SiC 쇼트키 다이오드가 역률보상회로(Power Factor Correction)용 소자를 목적으로 시장에 출하되기 시작하였다. TO-type 패키지를 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. 이러한 정격의 쇼트키 다이오드는 실리콘으로 제작되는 pn 다이오드와도 비슷한 사양으로까지 되었으며 역방향 회복시간이 매우 짧아 스위칭 특성이 매우 우수하다는 장점으로 현재 역률보상회로 및 모터구동 등의 일부 분야에서 실리콘 소자와 경쟁을 하고 있다. 또한 고주파 및 RF 분야에서의 진출도 크게 늘어나고 있다. Cree사 및 미시시피대학에서 spin-off된 미국의 Semisouth사에서 MESFET소자를 판매하기 시작하였다. 동작주파수가 3GHz 정도이며 동작전압도 48V로 매우 높아 통신분야 등에서 많은 응용이 예상되고 있다.

일본의 경우는 간사이 전력회사 등의 응용회사에서 연구 및 개발이 시작되어 현재 상용회로의 제품을 만들고 있다. 간사이 전력회사는 미국 Cree사와 공동으로 많은 전력소자에 대한 연구를 수행하고 있다. 특히 Bipolar 계열의 소자에 강점을 가지고 연구가 진행되고 있으며 실리콘에서도 최근에 개발된 IGBT 및 IGCT 등의 소자에서 상당한 수준의 시작품을 개발하였으며 JFET 및 pn 다이오드는

패키지까지 개발되어 특성평가 중에 있다.

가격적인 측면에서는 아직 실리콘 소자에 비해 경쟁력을 갖지는 못한 실정이다. 그러나 원재료의 가격이 큰 폭으로 하락하고 있으며 실리콘 소자의 주요 공정을 사용할 수 있고 또한 탄화규소의 가장 큰 특징인 높은 열전도성 및 고온특성 등으로 냉각 시스템의 간편화 및 소형화를 통한 원가절감 등으로 시스템 장착측면에서는 충분한 경쟁력이 예상된다.

2.4 시장현황

탄화규소 전력소자 및 고주파소자의 시장은 불과 2000년에 들어서면서 형성되기 시작되었다. Infineon 및 Cree 등의 주요기업에서 쇼트키 다이오드 및 MESFET을 출하하면서 본격적으로 형성되기 시작하였다. Cree사의 발표에 의하면 소자판매에 의한 매출액 기여가 전체 매출액에서 1% 미만으로 아직은 큰 폭의 시장은 형성되지 못한 것으로 판단된다. 그러나 탄화규소 pn 다이오드 및 MOSFET 등의 현재 개발 중인 제품이 시장에 나오고 원재료의 가격경쟁력이 크게 향상되면 많은 부분에서 실리콘과의 경쟁이 치열해질 것으로 예측된다. 아래의 그림 3에 SiC를 이용한 전력소자 및 광소자의 시장규모를 나타내었다. 그림에서 2004년까지는 광소자 분야에서 기반재료로의 시장이 주를 이루나 2005년 이후에는 전력소자 및 RF소자등의 분야에서 큰 폭의 매출이 예상되며 2007년 이후에는 소자분야의 시장이 광응용분야의 시장보다 더 커질 것으로 예측된다.

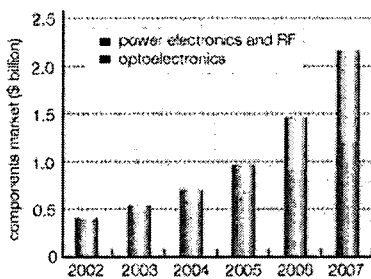


그림 3. SiC 시장규모 예측.

표 1에 현재 판매되고 있는 SiC 쇼트키 다이오드의 각 회사별 전압 및 전류등급을 나타내었다. 기

술적인 면에서는 Infineon이 가장 먼저 상용화를 시도하였으나 단결정 및 에피성장 분야에서 기술적으로 가장 앞서있는 Cree사에서는 최근에 1,200V/20A급의 쇼트키 다이오드를 전력응용계통에서 역률보상회로의 응용을 목적으로 생산·판매하고 있다.

표 1. SiC 쇼트키 다이오드 개발 및 상용화 현황.

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

2.5 국내 연구동향

국내의 탄화규소 반도체 연구 동향은 일본 및 미국의 기술 수준에 비해서는 많이 뒤쳐져있는 실정이다. 1999년부터 국가연구개발사업으로 시작하여 탄화규소 단결정성장, 에피탁시, 고전압 소자 및 집적소자로의 연구가 진행되고 있으며 현재 2단계까지 총 5년의 연구가 종료되었으며 3단계 3년의 연구를 수행하고 있다. 1단계 3년간의 연구는 탄화규소 반도체 재료로 접근 가능한 중요 소자 전반에 걸친 응용연구로 그 적용가능성을 확인함과 아울러 탄화규소 반도체공정에 대한 기초연구를 수행하였다. 1단계 연구결과를 바탕으로 2단계에서는 상업화 가능성이 높은 몇 가지 소자들을 선정, 상업화를 위한 기반연구를 수행하였다. 단결정성장분야에서는 자체 제작된 성장장비를 이용하여 현재 2인치급 성장기술이 개발되었으며 기판으로 사용이 가능한 가공기술을 개발하고 있다. 또한 고전압소자 분야에서는 600V/6A급 쇼트키장벽 다이오드가 개

발되어 실장시험을 하고 있는 수준이다.

3. 탄화규소반도체 전망

현재까지 에너지, 산업전자, 정보통신, 광전자 및 극한전자 분야를 뒷받침하고 있는 실리콘 반도체 기술의 발전은 실리콘의 물리적 특성제한으로 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. 탄화규소 반도체는 21세기 에너지전자, 정보통신전자 및 극한분야를 이끌 차세대 반도체로 기술선진국들에서 국가적 차원의 지원을 토대로 중점 연구되고 있으며 그 실용성이 상업적으로 증명되고 있다.

21세기에는 UN의 기후변동협약의 발효에 따라, 우리나라에서도 에너지절약 및 효율극대화 기술개발은 국가정책에서 선택사항이 아니라 필수정책이 되어야만 한다. 또한 개별기업들도 제품 당 생산에너지를 절감은 무한 경쟁시대 기업생존의 관점에서 검토하여야만 하는 시점에 이르고 있다. 따라서 전력, 전철, 항만설비 등과 같은 사회간접자본재, 철강, 중화학공업 등 국가기간산업 등에서는 물론 수출주도산업인 반도체, 자동차, 기계공업 등에서의 산업자본재 즉, 자동화생산설비 및 산업생산 기기의 전력 공급장치 및 제어장치의 핵심부품인 전력용 반도체에서의 고속 스위칭, 저손실, 고신뢰성 탄화규소 반도체는 전기에너지 변환손실을 현재의 6% 대에서 2% 대로 낮출 수 있게 할 것이며, 높은 신뢰성의 확보로 산업생산성의 증진도 기할 수 있을 것이다.

그림 4에 전력소자로서의 탄화규소 응용가능성을 나타내었다. 또한 소자가 직접적으로 고온환경에서 동작이 가능하면, 좀더 신뢰성 있고 정확한 측정 및 제어가 가능할 뿐만 아니라 시스템의 소형 및 경량화 실현, 빠른 응답특성, 결과적인 효율향상 등 여러 가지 장점을 얻을 수 있다.

표 2에 고온 환경에 적용되는 반도체 소자의 응용분야 및 온도영역을 나타냈다. 현재에는 250°C까지의 온도영역에서 실리콘 SOI(Silicon on Insulator) 소자가 주로 사용되고 있다. 그러나 300°C를 넘는 온도 영역에서는 실리콘으로는 한계가 있고, 특히 SOI는 전력소자에 적용하기는 한계가 있어 주로 저전력 고온소자가 필요한 부분에 적

용이 되고 있다. 따라서 전력용에 적합한 고온소자로 탄화규소 소자의 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재의 추세로 보아 200 - 300°C 영역의 응용분야에서는 SOI와 탄화규소가 함께 적용될 것으로 예상되며, 300°C를 넘는 온도영역에서는 탄화규소 소자의 우월적 지위가 예상된다.

특히 탄화규소반도체의 이러한 고온동작특성은 방열구조의 간편화를 추구할 수 있게 한다. 따라서 기존의 실리콘계열의 소자에서 해결하기 어려웠던 시스템의 경량화 및 소형화 문제를 상당부분 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 고온동작조건을 만족시키기 위한 패키지의 개발이 시급한 관건이다.

표 2. 고온소자의 응용분야.

분 야	세부분야	온도범위 (°C)
석유탐사, 굴착 등	오일 및 가스 유정관	75~225
	Steam injection	200~300
	Geothermal well	200~600
항공우주	전자제동장치	~ 250
	Rack mounted avionics	~ 250
	Engine control/monitoring	~ 300
	'Smart Skins'	~ 350
산업응용	Hot process (플라스틱 성형 등)	~ 600
	유체 모니터링	~ 1000
	연소 모니터링	~ 600
가전	TV	~ 200
	전자오븐	~ 500
	주방기기	~ 200
자동차	Engine compartment	-40~165
	On-engine and on-transmission	-40~165
	휠 부속 부품	-40~250
	연소챔버	~ 1000
기타	군사	~ 250
	통신	~ 250
	중공업 장비	~ 300
	Space system	~ 600
	대기오염제어	~ 550
	핵반응로 모니터링	~ 550

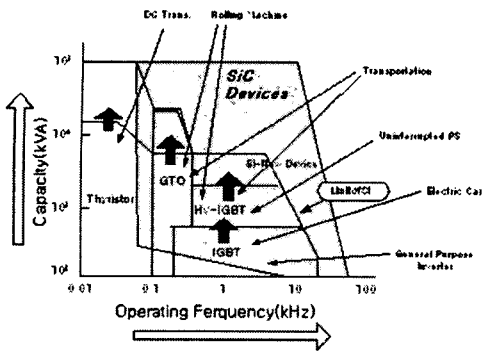


그림 4. 전력소자로서의 탄화규소 응용가능성

4. 결론

현재까지 에너지, 산업전자, 정보통신, 광전자 및 극한전자 분야를 뒷받침하고 있는 실리콘(Si)반도체 기술의 발전은 실리콘의 물리적 특성 한계에 직면하고 있어 21세기를 이끌 대안이 필요한 실정이다. 특히 21세기 고도 정보화 사회에서는 기존의 실리콘 반도체의 한계를 뛰어넘는 반도체의 도입이 필수적이라고 판단된다.

탄화규소반도체는 21세기 에너지전자, 정보통신 전자 및 극한전자분야를 이끌 차세대 반도체로 기술선진국들에서 국가적 지원으로 중점 연구되고 있으며 부분적으로는 그 실용성이 상업적으로 증명되고 있다. 21세기에는 UN의 「기후변동협약」의 발효에 따라, 우리나라에서도 에너지 절약 및 효율극대화 기술개발은 국가정책에서 선택사항이 아니라 필수정책이 되지 않으면 안 될 것이다. 또한 개별기업들도 제품 당 생산에너지의 절감은 무한 경쟁시대 기업생존의 관점에서 검토하여야만 하는 시점에 이르고 있다. 따라서 전력, 전철, 항만설비 등과 같은 사회간접자본체, 철강, 중화학공업 등 국가기간산업 등에서는 물론 수출주도산업인 반도체, 자동차, 기계공업 등에서의 산업자본체 즉, 자동화생산설비 및 산업생산 기기의 전력 공급장치 및 제어장치의 핵심부품인 전력용 반도체에서의 고속 스위칭, 저손실, 고신뢰성 탄화규소 반도체는 전기에너지 변환손실을 현재의 6%대에서 2%대로 낮출 수 있게 할 것이며, 높은 신뢰성의 확보로 산업생산성의 증진도 기할 수 있을 것이다.

한편 21세기 정보화 사회에서는 통신과 방송이 통합되는 디지털 컨버전스 시대가 될 것이다. 또한 유비쿼터스 시대가 되어 개인들이 취급하는 정보량

도 급격히 증가하게 될 것이고, 모바일 환경에서의 통신이 필수적이 될 것이다. 다시 말하면 무선통신이 기반이 될 것이며, 늘어나는 정보량을 처리하기 위해서는 초고주파 응용이 필수적으로 될 것이다. 현재 2-3 GHz 대역까지는 기존의 실리콘이나 GaAs 소자가 적용 가능하지만 그 이상의 경우에는 손실이 너무 커 적용이 어렵다. 향후 수십 GHz 대역시대에는 탄화규소 소자 시대가 될 것이다.

참고 문헌

- [1] Y. Sugawara: Trans. of Electron., Information and Communication Engineers Japan, Vol. J81-C-II, No. 1, p. 8 (1998)
- [2] Y. Sugawara, Proc. of 15th ISPSD, p. 10 (2003)
- [3] T. Hayashi, K. Asano, Y. Kobayashi, R. Saito and Y. Sugawara, Japan SoC. of Appl. Phys., 29a-ZR-10, p. 430 (2002)
- [4] T.P. Chow, et al., "SiC and GaN bipolar power devices", Solid-State Electronics, 44, 277-301, 2000.
- [5] R. I. Scace and G. A. Slack, "The Si-C and Ge-C phase diagrams," in Silicon carbide, High temperature semiconductor, Proc. Conf. Silicon Carbide, Boston, April 2-3, 1959, Eds. J. R. O'Connor and J. Smiltens (Pergamon Press, New York, 1960) pp. 24.
- [6] Acheson, A. G., Engl. Pat. 17911 (1982); the method has been described in Knippenberg, W. F. (1963). "Growth Phenomena in Silicon Carbide." Philips Research Reports 18, pp. 161-274, Edited by the Research Laboratory of N. V. Philips Gloeilampenfabriken, Eindhoven, Netherlands.
- [7] Lely, J. A. "Silizium carbide von Art und mendge der eingebeunten verunreinigungen." Ber. Dtsch. Kerm. Ges. 32 229 (1955).
- [8] Burk, A. A. Jr., Rowland, L. b., Agarwal, A. K., Sriram, S., Glass, R. C., and Brandt, C. D. "Vapor phase homoepitaxial growth of 6H and 4H silicon carbide." Kyoto ICSCRM, pp. 201-204 (1995).
- [9] Takahashi, J., Kanaya, M., and Fujiwara, Y. "Sublimation growth of SiC single crystalline ingots on faces perpendicular to the (0001) basal plane." J. Cryst. Growth 135 61-70 (1994).