

主題

고출력 RF 전력증폭기를 위한 SiC 트랜지스터 기술

정보통신부 전파연구소 이근호
광운대학교 김남영, 문옥주, 이제영

차례

- I. 서론
- II. SiC 물성
- III. SiC 공정기술
- IV. RF용 SiC 트랜지스터 기술
- V. SiC의 상업적 응용분야
- VI. 결론

I. 서론

SiC(Silicon Carbide)는 실리콘이나 갈륨비소(GaAs) 반도체보다 약 3배 큰 밴드갭 에너지에 기인한 여러 물리 및 전기적 성질에 의하여 최근에 고온 및 고출력을 요하는 전자회로의 중요 소자로 개발되고 있다. 비록 “미래의 물질”이라는 수식어가 붙을 정도로 SiC에 대한 관심과 기대감이 최근에 와서야 고조되고 있지만 사실상 1824년에 SiC에 대한 최초의 보고서가 있을 정도로 다른 어떤 반도체보다도 그 발견이 앞선다는 사실을 아는 사람은 많지 않다. SiC의 상업적응용은 발광다이오드(LED)를 시작으로 최근의 공정기술의 급진전으로 인하여 전력소자등 전자회로의 능동부품 분야로 그

응용을 넓혀가고 있다. 본 고에서는 최근 이동통신 시장의 확대와 관련 기지국용 고출력 전력증폭기 수요가 급증함에 따라 연구개발이 활발히 진행되고 있는 SiC RF 트랜지스터 기술의 현황을 살펴보고자 한다.

II. SiC 물성

SiC는 하나의 Si(C) 원자가 4개의 C(Si) 원자와 4면체 구조로 결합 하나의 SiC 층을 이루며 이 SiC층의 배열 주기에 따라 200개 이상의 다른 성질을 띠는 다구조(polytypes) 형태를 갖는다.[1] SiC층은 3가지 방식(A,B,C)으로 쌓아 올려질 수

있으며 이러한 층 배열의 주기성에 따라 만약 ABC ABC의 주기성을 띠면 3C-SiC로 ABCABC ABCABC의 주기성을 띠면 6H-SiC 등으로 분류 된다(그림 1 참고).

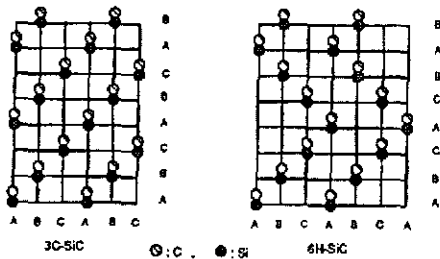


그림 1. 3C-SiC 와 6H-SiC의 원자배열

현재 3C-SiC는 상업적 가치를 갖는 적정 크기의 고품도단결정 웨이퍼 제작이 어려운 관계로 6H-SiC 및 4H-SiC가 상업적 목적에 이용되고 있고 그중 6H-SiC는 주로 광전자(optoelectronics) 소자용으로 4H-SiC는 RF 소자용으로 쓰이고 있다. 표 1은 3C-SiC, 6H-SiC 및 4H-SiC의 주요 전기적 특성을 Si 및 GaAs의 특성과 비교하여 보여 주고 있다. 4H-SiC의 경우 비록 전자 이동도는 GaAs에 비하여 현저히 낮으나 8 배 이상의 열전도도, 5배의 항복 전계 및 2배의 포화 전자속도는 고출력, 고주파 응용에 있어 탁월한 성능을 나타낼 수 있는 잠재력을 알 수 있게 한다.

표 1. SiC의 주요 전기적 특성

상온 특성	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC	Si	GaAs
항복 전계 (10^6 MV/cm)	> 15	3.2	3.0	0.6	0.6
전자 이동도 (10^{13} MV/cm)	750	370	800	1100	6000
포화전자속도 (10^6 cm/s)	25	2.0	2.0	1.0	1.0
열전도도 (W/cm-K)	50	4.9	4.9	1.5	0.5

III. SiC 공정기술

1. 결정 성장기술

성숙된 결정 성장기술을 갖고 있는 다른 반도체와는 달리 SiC의 경우 고품질, 충분한 크기의 웨어퍼 양산이 가능한 단결정 벌크를 얻을 수 있는 결정 성장기술은 근래에서야 가능하였다. 기존의 용해(melt)방식은 너무 큰 고온(3200°C)과 고압($>1000,000\text{ atm}$)을 요하므로 승화결정법(seeded sublimation) 방법에 의한 물리적증착(Physical Vapor Deposition: PVD)이 상용 결정 성장기술로 이용되고 있다(변형된 Lely 방법: 그림 2). [2] 이러한 변형된 Lely 방법의 단점은 지름 $0.1 - 0.5\ \mu\text{m}$ 의 육각형 단면 공동모양의 결함(micropipe defects)의 형성으로 SiC 집적 회로 제작에 중요한 걸림돌로 작용하고 있다.

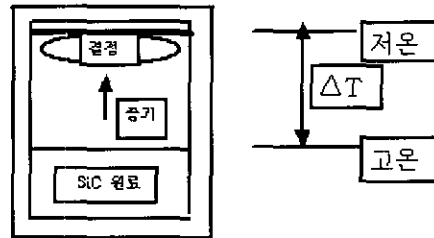


그림 2. 변형된 Lely 방법에 의한 SiC 결정 성장기술

이러한 마이크로파이프 결함을 줄이기 위한 많은 노력이 행하여지고 있으며 현재 미국의 Cree사의 경우 $1/\text{cm}^2$ 이하의 결함 밀도를 갖는 100mm(4 inch) 크기의 웨이퍼를 제작할 수 있다.

2. 에피층 형성 및 도핑기술

임의조정이 가능한 고품질 에피층 형성 및 선택적 도핑 기술은 SiC 전자소자 제작에 있어 가장 중요

한 기술 중 하나이다. 현재 양산을 위한 에피층 형성은 화학적 증착(Chemical Vapor Deposition: CVD) 방법이 주로 사용되고 있으며 CVD 에피 형성중 도핑을 동시에 할 수 있는 기술(in situ site-competition epitaxy)도 개발되었다. 현재 SiC n형 반도체는 나이트로젠을 p형 반도체는 알루미늄을 도핑 불순물로 사용하며 단단한 SiC의 결합구조는 확산방식의 도핑을 어렵게 하므로 주로 이온주입 방식이 사용되어진다. 이온주입은 정교한 조정이 가능한 선택적 도핑 및 양질의 평면구조 소자 제작이 가능한 반면 에피층 형성과정중의 도핑에 비하여 마이크로파이프 결합에 영향을 받으며 고온의 담금 과정(annealing)을 필요로 한다.

에 의하여 그 이동이 조절되며 다른 FET 소자의 I-V 곡선에서 볼 수 있는 포화 영역이 존재하지 않는다.

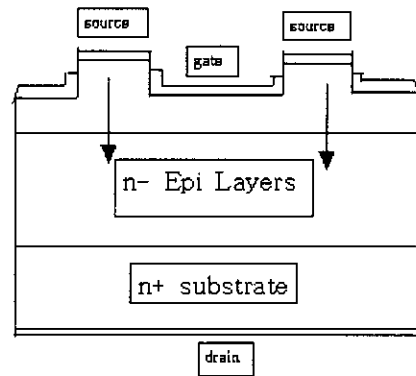


그림 3. SiC SIT의 단면 구조

3. 기타 공정기술

위에서 언급한 공정기술외에 고출력 SiC RF 트랜지스터를 제작하기 위한 기술로는 식각(etching), 산화(oxidation), 금속공정(metallization)등을 들 수 있다. 식각의 경우는 RIE(Reactive Ion Etching)이라는 건식방식이 주로 쓰이고 있으며 통상의 실리콘공정에서와 같이 열적산화 방식이 쓰이고 있으나 고온성능이 우수한 SiO₂ 공정을 위하여서는 아직도 많은 연구를 필요로 하고 있다. 그 외 접촉저항을 줄이기 위한 방법 및 높은 Schottky 장벽 게이트 접촉을 위한 공정기술 등도 연구되었다.[3]

SiC SIT는 매우 높은 순간 최대출력을 필요로 하는 레이더나 텔레비전 송신용으로 이용될 수 있으며 Northrop Grumman사는 UHF 대역에서 2kW 또 S 밴드 대역에서 300W 출력의 고출력 전력증폭기 모듈을 개발한바 있다.[4],[5]

IV. RF용 SiC 트랜지스터 기술

1. SiC SIT(Static Induction Transistor)

SiC SIT는 source 와 drain이 수직으로 배열되어 있으며(그림 3) 일반 BJT와는 달리 전자만의 이동에 의한 단극자 소자로 게이트의 정전 전기장벽

2. SiC MESFET

최근의 이동통신 시장의 급증에 따른 기지국용 고출력 전력 증폭기의 수요도 팽창하고 있다. 현재 기지국용 고출력 전력 증폭기용 트랜지스터로는 실리콘 LDMOS FET이 주로 쓰이고 그 다음으로 BJT 및 GaAs MESFET이 많이 쓰이고 있다. 하지만 최근의 공정기술의 발달에 따른 고성능 SiC MESFET의 출현은 기존 전력소자 시장의 판도변화를 예견하고 있다. 현재 MESFET은 주로 4H SiC이 이용되며 표2에서 알 수 있듯이 다른 트랜지스터에 비하여 상당히 큰 출력밀도 및 단위 출력당 작은 다이 크기는 작고 단순한 고출력 전력 증폭기 모듈제작을 가능케 한다.[6],[7]

표 2. 고출력 전력 증폭기용 트랜지스터 성능 비교

성능	SiC MESFET	실리콘 LDMOS	GaAs MESFET
PAE(%)	50	35	50
RF 출력(W/mm)	4	0.4	1
이득(dB)	10	10	12
상대적 다이크기	1.0	3.1	1.4
패키지크기(mm ²)	200	320	300

현재까지 벤치마크는 미국의 Cree사가 고저항 기관 위에 제작한 0.5 μm 게이트 길이와 $1.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 채널 도핑 밀도를 갖는 4H SiC MESFET으로 차단주파수 $f_T = 14.0 \text{ GHz}$ 와 최대 진동주파수 $f_{max} = 30.5 \text{ GHz}$ 를 기록하였다.[8] Cree사는 또 양산 가능한 CDMA통신 기지국 드라이버 전력 증폭기용 4H SiC MESFET 모듈을 선보이고 있는데 48V DC 작동전압 입력 하에 2 GHz에서 12dB 이득, 50% PAE 그리고 -30 dBc 이하 IIP3의 성능으로 10W의 A급 출력을 보여주고 있다.[9]

V. SiC의 상업적 응용분야

위에서 언급한 RF응용분야 외에도 SiC은 다양한 상업적응용이 가능한데 우선 LED 및 자외선 광전다이오드등 광전자(optoelectronics) 소자 응용분야를 들 수 있다. 청색의 6H SiC LED는 가전 제품 및 측정기의 지시광으로 사용될 수 있고 GaN으로 만든 적색 및 녹색의 LED와 결합 총천연색 표시도 가능케 하고 있다. 또 다른 응용분야로는 기존 실리콘 소자 보다 월등한 성능의 다양한 전력용 소자 응용인데 표 3 에 개발된 SiC 전력용 소자의 성능을 요약하였다. 그 외 응용 분야로는 큰 밴드갭 성질을 이용한 비휘발성 메모리 (nonvolatile memories)로 실리콘 DRAM(Dynamic RAM)에 필적할 만한 빠른 쓰고 지우기 시간(70-130

nsec)에 무한정한 재쓰기가 가능하며 500도 이상의 고온에서도 600초 이상의 긴 저장이 가능한 기술도 발표되었다.[10]

표 3. SiC 전력용 소자의 성능 요약

소자	최대 작동온도(°C)	성능
4H DMOSFET	300	900V, 5mA
4H UMOSFET	300	1100V
6H PN Diode		4500V blocking
Schottky Diode		1750 blocking
4H Thyristor	500	900V, 2A

VI. 결론

비록 근래에 와서야 공정기술의 발전에 힘입어 SiC의 상업적 응용이 가능하였으나 현재의 고조된 관심과 기술개발 노력을 볼 때 몇 년 이내에 6 inch 웨이퍼 양산도 가능할 것이므로 SiC 트랜지스터를 이용한 고출력 RF 전력증폭기의 미래는 밝다고 하겠다. 특히 정교한 공정에 의한 0.5 μm 이하 길이의 게이트를 갖는 SiC MESFET도 가능할 것이고 지금 활발히 진행되고 있는 SiC MMIC 기술도 빠른 시일 내에 성숙단계에 이를 것으로 예상되므로 고출력을 요하는 많은 무선통신 응용분야에서 SiC 트랜지스터가 중요한 역할을 할 것이다.

※참고문헌

- [1] J. F. A. Nijss ed., *Advanced Silicon and Semiconducting Silicon-Alloy Based Materials and Devices*, Institute of Physics Publishing, pp. 283-319, 1994.
- [2] D. L. Barrett, R. G. Seidensticker, W. Gaida, R. H. Hopkins and W. J. Choyke, "SiC Boule Growth by Sub-

- limation Vapor Transport," *Journal of Crystal Growth*, Vol.109, pp. 17-23, 1991.
- [3] S. J. Pearton ed., *Processing of Wide Band Gap Semiconductors*, Willian Andrew Publishing, pp. 178-249, 2000.
- [4] R. R. Siergiej et al., "SiC Microwave Power Transistors," *Silicon Carbide and Related Materials Conf. Digest*, pp. 769-772, 1996.
- [5] A. W. Morse et al., "Application of High Power Silicon Carbide Transistors at Radar Frequencies," *IEEE MTT-S Digest*, pp. 677-680, 1996.
- [6] C. D. Brandt et al., "Advances in SiC Materials and Devices for High Frequency Applications," *Silicon Carbide and Related Materials Conf. Digest*, pp. 659-664, 1995.
- [7] R. G. Davis, "The Potential Performance of Wide Bandgap Microwave Power MESFETs," *Materials Science and Engineering B*, Vol. 61-62, pp. 419-423, 1999.
- [8] S. T. Allen et al., "4H-SiC MESFET's on High Resistivity Substrates with 30 GHz fmax," *IEEE/DRC Device Research Conference Digest*, pp. 102-103, 1995
- [9] J. Browne, "SiC MESFET Delivers 10-W Power At 2 GHz," *Microwave & RF*, October, pp. 138-139, 1999.
- [10] J. W. Palmour, J. A. Edmond, H. S. Kong and C. H. Carter, Jr., "6H-Silicon Carbide Devices and Applications," *Physica*, Vol. 185, pp. 461-465, 1993.

이근호

1986년 연세대학교 물리학과 졸업(학사)
 1988년 연세대학교 물리학과 대학원 졸업(석사)
 1995년 미국 존스 홉킨스 대학 물리학과 졸업(Ph.D)
 1996년 한국 과학재단 Post Doc. (서울대학교)
 1996년~1998년 정보통신부 전파연구소 이천분소
 기술과장
 1999년~2000년 미국 메사추세츠 대학교, 조지아텍,
 어번 대학교 전자공학과 객원 연구원
 현재 정보통신부 전파연구소 RF기술 팀장

김남영

1987년 광운대학교 전자공학과 졸업(학사)
 1991년 뉴욕 주립대 전자공학과 졸업(석사)
 1994년 뉴욕 주립대 전자공학과 졸업(Ph.D)
 1994년 뉴욕 주립대 전자공학과 연구원
 현재 광운대학교 RF Research and Education
 Center 센터장, 광운대학교 전자공학부 부교수.

문옥주

1999년 광운대학교 전자공학과 졸업(학사)
 2000년 미션 테크노 중앙 연구소 연구원
 현재 광운대학교 전자공학과 석사과정 재학 중

이제영

1999년 광운대학교 전자공학과 졸업(학사)
 2000년 광운대학교 전자공학과 대학원 재학
 2000년 미션 테크노 중앙 연구소 연구원
 2000년~현재 미국 어번대학교 전자공학과 교환 연구원