

특집 : SiC 전력반도체 소자의 기술동향

SiC M/NEMS 연구개발 현황

정 귀 상

(울산대 전기전자정보시스템공학부 교수)

광대역 반도체중에서도 SiC(Silicon Carbide)는 우수한 전기적, 기계적, 열적, 화학적, 광학적 그리고 생체 적합성 등으로 인하여 지난 반세기 동안 급속히 발전하고 있는 Si M/NEMS(Micro/Nano Electro Mechanical System)를 대체할 수 있는 차세대 M/NEMS로써 고온, 고압, 고진동, 고습도 등의 극한 환경에서도 사용 가능한 자동차, 선박, 우주항공, 산업 플랜트용 마이크로 센서 및 액추에이터, 초고주파수 정보통신용 부품 그리고 바이오 센서 등의 분야에 크게 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 현재 SiC M/NEMS의 연구개발 현황에 대해서 소개하고자 한다.

1. 서론

최근 반도체 가공기술 즉, 마이크로머시닝을 이용한 미세구조물 형성이 용이해짐에 따라 이 기술을 이용하여 지금까지 관심이 없었던 전자소자와 기계부품 그리고 신호처리용 마이크로프로세스까지 집적화된 M/NEMS를 구현하고자 하는 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

현재, Si 블럭 및 표면 마이크로머시닝기술을 기반으로 하는 MEMS중에서 KOH, EDP, TMAH 등의 이방성 습식 식각기술에 의해서 제작된 미세구조물은 Si의 결정면에 의해서 구속되기 때문에 구조물의 형상이 제한된다. 더구나, 1.1 eV

의 낮은 에너지갭 때문에 온도가 상승하며 역 바이어스 pn 접합에서 누설전류로 인해서 소자의 특성 상실로 Si으로 제조된 M/NEMS의 동작온도는 약 100℃보다 낮은 온도로 제한되며 누설전류 발생으로 인해서 결과적으로 M/NEMS의 효율이 떨어지고 압전효과와 열적 잡음은 신호대 잡음비 그리고 동작범위를 크게 줄이며 고온, 고압, 고진동 그리고 고습도 등의 극한 환경에서는 사용할 수 없다.

한편, 100℃ 이상의 고온에서도 사용 가능한 M/NEMS를 연구개발하기 위하여 능동소자 혹은 표면 미세구조물을 제작하기 위해서는 Si 벌크 마이크로머시닝기술과 기존 IC 제조 기술 그리고 Si foundry와 단결정 Si의 우수한 기계적 성질뿐만 아니라 전기적 절연체 상부에 단결정 Si 박막이 존재하는 SOI(Si-on-Insulator) 구조의 기판을 이용하는 것이 가장 적합한 기술로 지난 '90년대 초반부터 활발하게 연구개발이 진행되고 있으며 200℃까지 사용 가능한 M/NEMS가 개발되었다⁽¹⁾.

그러나, 기존의 Si을 기반으로 제조된 부품은 초고집적화와 초고속화에 따르는 큰 발열문제를 해결하기 어려우며 시스템 IC와 sub-system들 간의 전압분리는 Si 반도체의 낮은 절연 파괴강도와 SOI의 발열특성 한계로 인하여 기존의 Si 반도체의 한계를 뛰어넘을 수 있는 새로운 광대역 반도체 재료의 개발이 절실히 요구되고 있다.

최근에 미국, 일본, 유럽 등의 기술선진국에서는 고내열, 내방사성, 내부식성, 내산화성, 고열전도, 고내전압 특성을 고루 갖춘 SiC를 차세대 광대역 반도체의 하나로 주목하고 있다²⁾. 수많은 결정구조를 갖는 SiC 중에서도 입방형 결정구조(β -혹은 3C-SiC)는 공유결합으로 인해 높은 경도, 내마모성, 내부식성, 고온 및 화학적 안정성 등이 뛰어난 물리적, 화학적, 기계적 특성 그리고 생체 적합성 때문에 초고온, 고주파, 고전력, 극한 환경 그리고 바이오용 M/NEMS로써 주목을 받고 있다.

따라서, 본 논문에서는 M/NEMS용 3C-SiC 박막의 결정 성장 및 제작공정 기술과 그 응용에 관하여 논한다.

2. 본 론

2.1 M/NEMS용 3C-SiC 박막 성장 기술

현재, 직경 2인치 크기의 벌크 4H-, 6H-SiC 기판은 상용화되고 있으며 고전력 및 고주파수용 부품에 활용되고 있지만, 고가이며 미세구조물 제작이 매우 어렵다. 우수한 특성을 갖는 3C-SiC M/NEMS를 연구개발하기 위해서는 무엇보다도 void-free, 저 스트레스, 대면적, 고품질의 SiC 박막 성장 기술이 선행되어야 한다. 3C-SiC는 가장 적은 복잡률 구조를 갖고 낮은 온도에서 안정한 상이지만, 결정성장이 매우 어렵다.

2.1.1 벌크 M/NEMS용 단결정 3C-SiC 박막 성장

단결정 3C-SiC는 일반적으로 캐리어 가스로 수소, Si source gas로 실란(SiH_4) 그리고 C source gas로 프로판($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$)을 사용하여 CVD(Chemical Vapor Deposition)법으로 Si기판위에 이종결정 성장시킨다. 또한, Si의 source gas로 dichlorosilane(DCS; SiH_2Cl_2)과 C source gas로 acetylene 혹은 methyltrichlorosilane(MTS; CH_3SiCl_3)과 methylsilane(CH_3SiH_3) 같은 C-와 Si-를 포함한 원료를 사용하고 있다. 3C-SiC는 0.436 nm의 일정한 격자를 가지는 삼아연석구조로 Si는 0.543 nm의 일정한 격자를 가지는 다이아몬드 구조를 이루어 20%의 격자 비정합이 존재한다. 따라서, C-와 Si- 두 원료를 포함한 source gas에 의한 성장 공정으로 Si기판에 직접적으로 3C-SiC막을 형성할 수 있다. 반응 장치내에서 Si기판의 표면과 탄화수소로부터 분리된 탄소의 결합에 의해 박막 형태인 이종결정 3C-SiC막이 생성된다.

Si기판위에 SiC 이종결정성장에 있어서 SiC/Si 표면에서 10^5 voids/cm² 크기의 void 형성이 문제점이다. Void 형성 메카니즘은 분명하지 않지만, 그것은 carbonization 공정동안 Si기판의 탄화되지 않는 영역으로부터 Si의 out-diffusion에 의한 결과로 void가 형성된다고 알려져 있다. 또한,

carbonization 공정에서 온도의 lamp-up rate에 의지해서 void의 형성이 나타나므로 carbonization 온도의 느린 lamp-up을 이용하여 매우 적은 2 voids/cm² void 밀도를 갖는 막 성장 공정이 개발되고 있다.

2.1.2 표면 M/NEMS용 단결정 3C-SiC 박막 성장

다결정 3C-SiC는 단결정 3C-SiC, 6H-SiC 그리고 SiO_2 와 같은 안정적인 희생층에 넓게 증착할 수 있다. SiC는 CVD, 스퍼터링 그리고 200-1000°C에서 이온주입 공정으로 성장 가능하다. 특히, CVD법은 기판의 크기와 종류에 상관없이 일괄 공정에 의한 다결정 3C-SiC막 증착이 용이함으로 M/NEMS 분야에 적합하다.

입방형 결정구조인 3C-SiC는 벌크 상태로 성장이 불가능하나 Si기판위에 이종결정성장에 의한 대면적의 성장이 가능하며 전자 및 기계적 특성이 상용화되고 있는 Cree사의 벌크 SiC기판에 상용하고 일괄공정에 의한 기존의 Si 기판기술을 이용할 수 있다. 그러나, Si기판위에 이종결정성장은 경계면에서 8%의 열팽창계수차와 20%의 격자부정합, 박막내의 높은 부정합 전위밀도, cracking, APB(Anti Phase Boundary)생성 등 반도체 이종접합구조 성장에 따른 다양한 문제점이 발생되어 3C-SiC 소자의 성능이 떨어진다. 이러한 문제점을 완화시키기 위한 방법으로 완충층 도입, 화학처리, 계면 활성제 및 촉매 이용, 말단기, 방향성 및 각도 조절 등으로 Si기판 표면을 변형시켜 줌으로서 에피층과 기판의 계면 결합을 안정화시켜 결함이 없는 고품위 3C-SiC 반도체 결정에 관한 연구가 지속되고 있다.

M/NEMS용 다결정 3C-SiC 박막의 대면적화에 관한 연구는 UC Berkeley Sensors & Actuators Center와 Case Western Reserve Univ가 선도적이며 최근 직경 4인치 가능하다³⁾. 그림 1은 본 저자 연구실에서 현재 최적의 CVD 성장 조건하에서 증착된 직경 2" 크기의 다결정 3C-SiC 박막의 표면 사진과 AFM(Atomic Force Microscopy) 이미지로 거울면처럼 평탄도가 대단히 우수함을 알 수 있다.

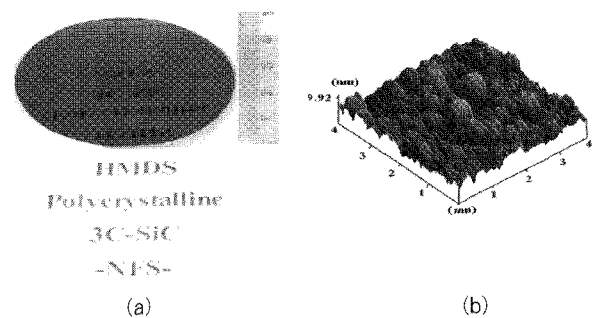


그림 1 CVD로 성장된 직경 2인치 크기의 3C-SiC 박막의 (a) 표면 광학사진과 (b) AFM 이미지

2.2 SiC M/NEMS용 제작공정 기술

2.2.1 3C-SiC M/NEMS용 옴익접촉공정

고출력 부품에서 접촉 저항이 크면 열 방출이 증가하여 소자의 온도가 상승함으로 특히, 초고온용 3C-SiC M/NEMS를 제작하기 위해서는 SiC와 금속간의 저항성 접촉은 고온에서 높은 접촉 저항 때문에 고온에서도 안정된 전극 형성 연구가 선행되어야 한다⁴⁾.

지금까지 3C-SiC의 저항성 접촉 금속 전극으로는 Al과 Ni을 주로 사용하고 있다. Al은 실온에서 $\rho_c = 5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 이며 400°C에서는 $\rho_c = 1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 산화로 인해 접

촉 저항이 증가하며 용융점이 660°C로 낮기 때문에 고온에서는 사용될 수 없다. 한편, Ni은 500°C 이상의 열처리에서는 SiC와 Ni 계면간의 화학적인 반응으로 실리사이드(NiSi₂)가 형성되므로 950°C의 매우 높은 온도에서 낮은 저항성 접촉 ($5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$)이 형성되기 때문에 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, Ni의 접촉저항 특성이 온도에 따라 너무 심하게 변하는 것이 문제점이다.

최근에는 고온에서도 안정적인 W, Ti, Pt 등을 이용한 고온용 저항성 접촉 특성에 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있으며 Pt는 경제적인 측면에서 금속 공정으로 적합하지 못하고, 합금 재료인 TiW는 고온에서 응용 범위가 넓으며 저항이 80~85 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 으로 낮고 SiC와 선택적인 반응이 용이하기 때문에 저항성 접촉으로 가장 적절한 재료로 기대된다. 표 1은 지금까지 개발된 3C-SiC 저항성 접촉 특성에 관한 연구 내용을 정리한 것이다.

표 1 금속 및 형성조건에 따른 3C-SiC 저항성 접촉 저항 특성

Metallization	Deposition Method	Annealing Condition	ρ_c at RT ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Al	Thermal evap.	As-Deposited	1.6×10^{-1}
Ni	Thermal evap.	1250°C/5min	1.4×10^{-1}
Cr	Thermal evap.	1250°C/5min	7.0×10^{-2}
Au-Ta (97-3 at.%)	Thermal evap.	1250°C/5min	3.0×10^{-2}
TaSi ₂	Thermal evap.	850°C/5min	2.0×10^{-2}
W	Sputtering	850°C/5min	2.4×10^{-1}
Ti	Sputtering	300°C/30-90min	$7.6-9.2 \times 10^{-3}$
W	Sputtering	as-Deposited to 600°C/10min	$1.5 \times 10^{-3} - 9.2 \times 10^{-3}$
TiSi ₂	Sputtering	1000°C/10s+450°C	1.6×10^{-1}
WSi ₂	Sputtering	1000°C/10s+450°C	1.6×10^{-1}
Mo	E-beam evap.	as-Deposited and 1200°C/6-min	$6.2 - 4.03 \times 10^{-2}$
Au/Pt/Ti	Sputtering	Operated at 650°C/1h	1.6×10^{-1}
Au/Pt/W	Sputtering	Operated at 650°C/1h	1.6×10^{-1}
Au/Pt/TiN/Ti	Sputtering	Operated at 650°C/1h	1.6×10^{-1}
Pt/TiW/Ti	Sputtering	Operated at 650°C/1h	1.6×10^{-1}
W	Sputtering	as-Deposited	1.6×10^{-1}
Ta	Sputtering	as-Deposited to 1000°C/1h	-
Re	Sputtering	as-Deposited to 900°C/30min	-
Pt	Sputtering	as-Deposited to 900°C/30min	-
NiSi ₂	Sputtering	as-Deposited to 950°C/30min	5×10^{-4}

2.2.2 3C-SiC M/NEMS용 식각공정공정

SiC에서도 육방형 결정 구조를 갖고 벌크로 성장된 4H-혹은 6H-SiC는 화학적으로 결합력이 강하여 Mohs' 지수가 약 9 정도로 다이아몬드에 버금가는 견고함을 지니고 있어 고온, 고압 등 극한 환경에 장점이 되고 있지만, 마이크로머시닝을 위한 미세가공기술이 어렵다. 그러나, Si기판위에 이중 결정성장된 3C-SiC는 비교적 미세구조를 제작이 용이하다. 산화막 혹은 질화막 위에 저온에서 성장 가능한 다결정 3C-SiC는 표면/벌크 마이크로머시닝 기술을 쉽게 적용할 수 있기 때문에 SiC M/NEMS용으로 연구가 활발히 진행중이다. 물리적, 화학적으로 안정하고 광대역 반도체인 다결정 3C-SiC를 차세대 산업분야에 적용하기 위해서는 무엇보다도 미세 가공기술 연구가 선행되어야 한다.

SiC 식각 기술은 세가지 방법으로 연구 개발되고 있다. 첫 번째로 용융점 식각기술은 500°C의 고온에서 KOH 용액에 몇 분간 시료를 넣어두는 방법으로서 OH-와 Si 원자가 반응하여 Si(OH)₄로 되고 수 $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 속도로 SiC가 식각이 된다고 보고되고 있다. 그러나, 완전한 이온성 반응때문에 SiC의 공유결합이 강하게 형성되어 식각속도가 변화함으로 임의의 형상으로 식각하는 것이 곤란하다.

두 번째로 광전기화학 식각기술은 실온에서 HF의 전해질 용액으로 SiC를 음극, 백금을 양극으로 하고 가시광을 조사하면서 식각이 가능하지만, 적절한 마스크가 없기 때문에 이방성 식각이 어렵다.

마지막으로, 건식식각 기술중에서 RIE는 CF₄와 SF₆와 O₂의 혼합하는 방법으로 연구가 이미 진행되었다. CF₄에 20% O₂ 가스를 첨가하여 식각한 3C-SiC는 식각 속도가 350 Å/min 이고, SF₆에 20% O₂ 가스를 첨가할 때 식각 속도는 450 Å/min으로 각각 나타난다. 그러나, 이들 가스는 반응생

성물이 시료에 부착됨으로 인하여 퇴적물이 발생하고 식각 후 표면이 거칠어지는 문제점이 보고되고 있다.

SiC의 선택적인 식각을 위해 마스크는 식각된 표면보다도 더 낮은 식각율을 가져야 한다. 일반적으로 Al, Ni과 같은 금속 마스크를 사용하지만, SiC와의 식각 선택비가 약 10 정도로 높은 선택비를 보였다. 그러나, 플라즈마 형성 동안에 산소 반응으로 마이크로 마스크가 형성되어 식각된 표면에 거칠어지는 문제점이 보고되고 있으며, 이것은 IC 공정에 심각한 결함을 줄 수 있다. 이를 해결하기 위해서 비금속인 산화막 혹은 질화막이 대체 마스크로 떠오르고 있다. 또한, 다결정 3C-SiC는 표면 마이크로머시닝에 적용하기 위해서 먼저 희생층 간의 식각선택비를 알아야 한다. 식각 선택비의 연구된 결과, 3C-SiC의 평균 식각 속도는 375 Å/min일때, 3C-SiC/Si 은 2 : 1, 3C-SiC/SiO₂은 1 : 3.6로 아직 식각 마스크로는 한계가 있음을 보여준다.

전식 식각중에서 ICP/TCP(Inductively/Transformer Coupled Plasma)는 유도 코일을 이용하여 높은 밀도의 플라즈마 식각이 가능하며 3C-SiC 식각 속도는 약 3600~4000 Å/min으로 ECR(Electron Cyclotron Resonance)은 마그네틱 코일을 이용하여 SiC 식각율이 700 Å/min로 빠르지만,

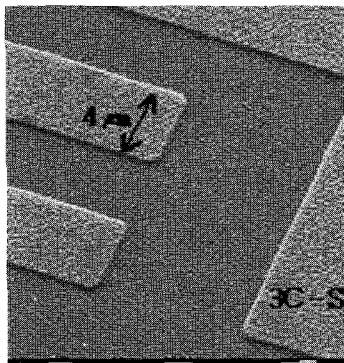


그림 2 마그네트론 RIE로 식각된 3C-SiC 막의 표면 SEM 사진

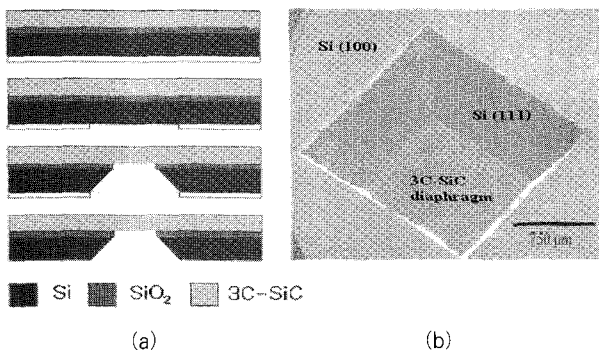


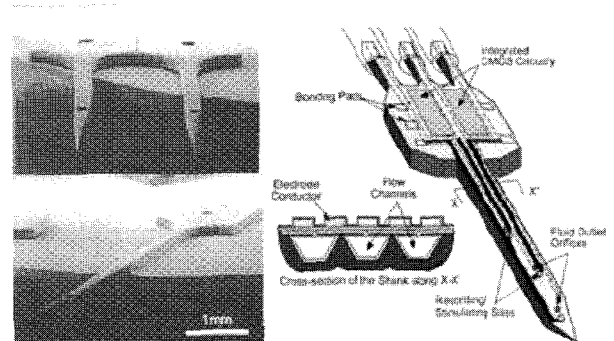
그림 3 3C-SiC의 마이크로 다이어프램의 (a) 제작공정도 (b) SEM 이미지

장비가 고가이다. 또한, 높은 이온 에너지는 이온 충돌로 인해 기판에 손상을 줄뿐만 아니라 낮은 식각 선택비를 갖는다^[5].

그림 2는 최근 본 저자 연구실에서 기존의 RIE보다 적은 에너지에서 기판에 손상 없이 식각이 가능한 RF 마그네트론 RIE를 이용하여 퇴적물을 줄이고 측벽 보호막의 형성으로 인해 수직적 식각이 가능한 CHF₃와 반응 가스인 O₂, Ar을 혼합하여 최적조건에서 식각된 다결정 3C-SiC의 SEM 사진이다.

2.2.3 3C-SiC 블록 마이크로머시닝공정

그림 3은 Si 마이크로머시닝기술과 CVD에 의한 단결정 혹은 다결정 3C-SiC 박막성장기술을 각각 이용하여 블록 SiC M/NEMS용 3C-SiC 마이크로 다이어프램의 도식적 제작공정과 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 또한, 그림 4는 SiC를 식각함으로 바이오용 SiC 프로브로 제작된 SEM 이미지다^[6]. 이러한 마이크로 다이어프램 혹은 프로브는 3C-SiC의 우수



Photos courtesy of N. Tabet and A. Pflaum, UC Berkeley
Diagram courtesy of K. Wise, U. Michigan.

그림 4 블록 마이크로머시닝으로 제작된 바이오용 SiC 프로브로 SEM 이미지

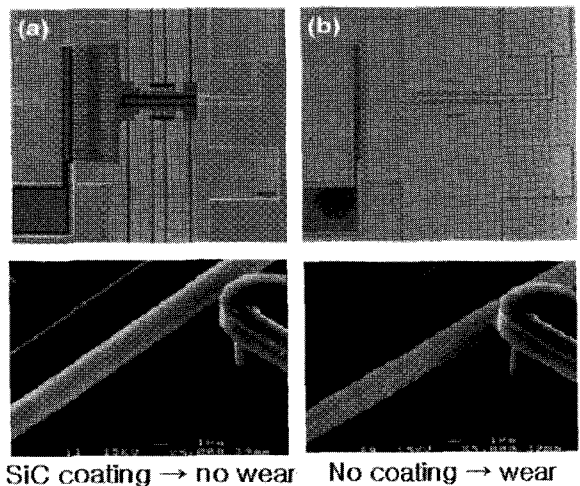


그림 5 3C-SiC 막이 코팅된 Si 마이크로구조물의 SEM 이미지

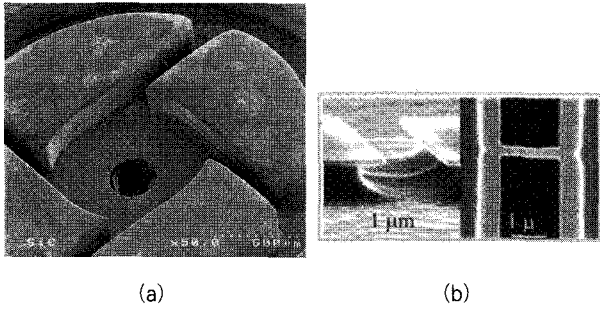


그림 6 3C-SiC 표면 마이크로머시닝으로 제작된 SiC (a) 마이크로 분사기와 (b) 나노 공진기의 SEM 이미지

한 기계적, 열적 초고압 그리고 바이오용 M/NEMS에 유용하게 응용이 가능할 것이다.

한편, 그림 5는 ICP-RIE로 제작한 Si 마이크로 구조물에 3C-SiC 막을 코팅한 SEM 이미지로 SiC 막이 Si 구조물에 요철없이 평탄하게 코팅됨을 확인했다. 따라서, SiC는 높은 물리적 안정성, 내마모성, 내산화성, 내방사선, 생체 적합성 등으로 인해 극한 환경뿐만 아니라 바이오용 Si M/NEMS에 코팅물질로 적합할 것이다.

2.2.4 3C-SiC 표면 마이크로머시닝공정

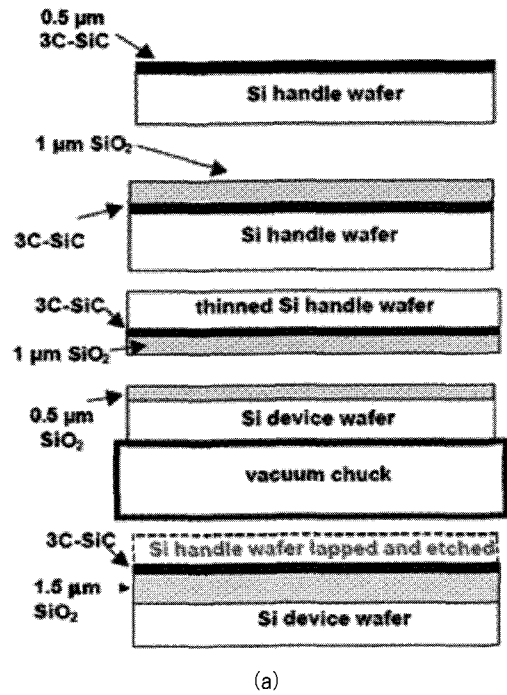
Si 표면 마이크로머시닝기술과 동일한 방법으로 다결정 Si 혹은 열산화막을 희생층과 다결정 3C-SiC 박막 성장기술을 이용한 SiC M/NEMS용 3차원 미세구조물 제작이 가능하다. 그림 6 (a)는 마이크로 가스 터빈용으로 제작한 초소형 SiC 분사기의 SEM 사진이며 (b) 나노 크기의 double clamped SiC 공진의 SEM 이미지이다⁷⁾.

2.3 SiC 마이크로 센서

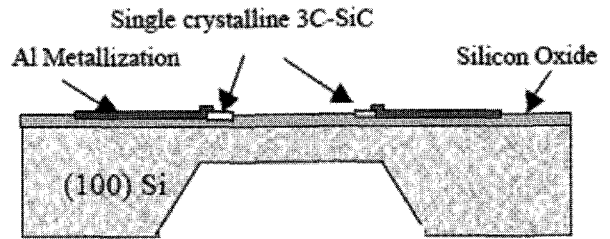
지금까지 여러 연구그룹들이 SiC M/NEMS형 각종 센서류들을 개발하고 있으며 이 중에서 본 논문에서는 SiC 특성을 가장 잘 활용할 수 있는 대표적인 관성 및 화학 센서류에 대한 동향을 소개한다.

최근 자동차, 우주항공, 산업자동제어, 핵발전소 등의 산업 분야에서는 300℃ 이상의 고온에서도 동작이 가능한 극한 환경용 센서를 요구하고 있다. 특히, 엔진을 제어할 수 있는 연소 챔버(200~450℃), 디젤 엔진(200~450℃), 제트 터빈(400~650℃), 배기 압력(850℃), 연료 가스(1000℃), 증기 압력(200~300℃) 뿐만 아니라, 유체 모니터링(1000℃), 핵 모니터링(550℃) 등의 압력을 측정하기 위해서 고온용 압력 센서가 필요하다.

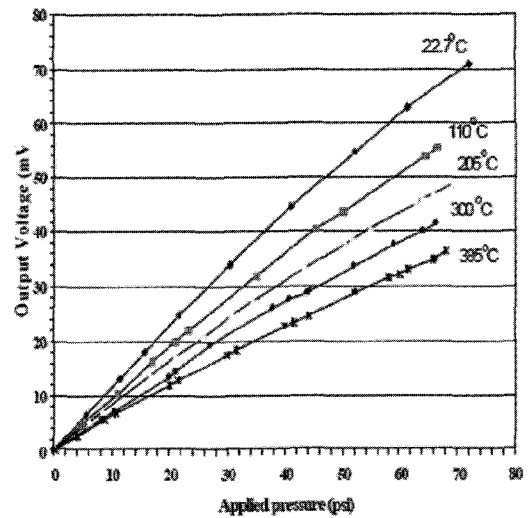
Si를 기반으로 하는 압저항형 압력센서는 pn 접합부 누설 전류로 인하여 120℃ 이상의 온도에서는 사용이 불가능하다. 또한, 이방성 식각기술에 의한 압력센서용 박막 멤브레인을



(a)



(b)



(c)

그림 7 SiC형 마이크로 압력센서의 (a) 제작 공정도, (b) 단면도 및 (c) 출력특성

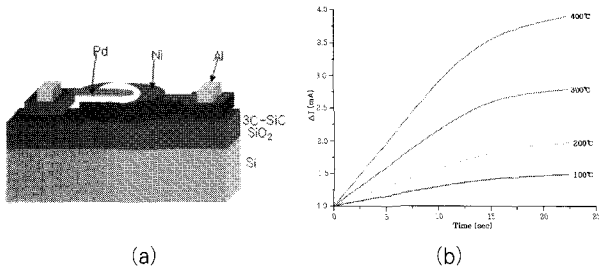


그림 8 Pd/다결정 3C-SiC 쇼트키 다이오드의 (a) 도식도와 (b) 수소센서의 온도 특성

제작할 경우, 두께를 정확하게 제어하기가 어렵다. 이를 해결하기 위해 두께를 제어 가능한 SOI와 PSOI(Poly-Si-on-Insulator)의 압력 센서가 개발 되어 200~250°C까지 견딜 수 있지만, 재현성과 선형성 문제가 있다

세라믹을 압저항을 이용한 압력센서도 개발되어 Si 보다 향상된 온도 200°C까지 압저항 특성을 보였지만, 낮은 감도, 수율, 재현성 문제를 보였다. 또한, Si₃N₄ 다이어프램형 압력센서는 700 bar의 높은 압력과 오일 부식에도 견딜 수 있지만, 낮은 감도와 낮은 온도(<150°C), 재현성의 어려움이 있다.

6H-SiC의 압력센서는 500°C까지 안정하지만, 기판의 크기 한계로 낮은 수율과 식각의 어려움으로 인해 극한 환경용으로 아직 문제점이 많다.

그림 7(a) 단결정 3C-SiC 박막 성장기술과 SDB(Si-wafer Direct Bonding)법으로 제작된 SiCOI(SiC On Insulator)형 마이크로 압력센서의 제작 공정도를 도식적으로 나타낸 것이며 (b)는 단면도 그리고 (c)는 대표적인 온도에 따른 출력특성을 각각 나타낸 것이다⁸⁾. 본 센서는 400°C의 고온에도 안정하지만, 기판의 낮은 수율과 고가격의 문제가 남아있다.

최근 엔진을 제어할 수 있는 연소 챔버, 자동차 및 항공기용 엔진, 배기관 등에서 화학가스의 누설, 반응비 그리고 모니터링을 제어하기 위한 고온용 화학센서의 중요성이 커지고 있다. 따라서 고온, 고압, 고전력에서 견디며 높은 열전도성 및 내화학성 특성을 갖는 SiC 광대역 반도체를 이용한 고온용 마이크로 센서에 관한 연구가 크게 주목을 받고 있다.

그림 8(a)은 Pd/다결정 3C-SiC 쇼트키 다이오드의 도식도와 (b)는 1000 ppm 수소 분위기에서 온도 변화에 따른 과도 상태 응답을 각각 나타낸 것으로 C-V, I-V 특성 곡선을 통해서 문턱 전압(0.45 V), 전류 밀도 (2×10^{-3} A/cm²), 장벽 높이(0.58 eV) 등을 측정되었다⁹⁾. 산화막위에 증착된 다결정 3C-SiC으로 제작된 Pd/3C-SiC 쇼트키 다이오드는 400°C 이상에서도 동작하기 때문에 향후 수소, 황화수소, 메탄, 알코올 등의 고온용 화학센서의 연구개발에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

2.4 SiC 마이크로 액추에이터

진동은 어떠한 시스템이 작동하는 과정에서 부가적으로 발생하는 것이므로 시스템 자체에 대한 정보를 가지고 있다는 것에서 중요한 의미를 가진다. 그러므로 시스템의 진동을 측정하여 정보를 해독해내고자 하는 연구가 계속되어 왔고, 이를 통하여 어떤 기계의 상태를 진단하고자 하는 기술이 개발되었다. 이러한 기술은 진동과 시스템의 상태와의 상관관계를 이끌어 내어 이를 이용한 소자 개발이 가능하다. 마이크로 머시닝기술에서는 이렇게 진동을 이용하여 다른 물리량을 측정하는 기기들이 개발되고 있으며, 그 중 대부분이 공진기를 기반으로 하고 있다. 공진기란 외력에 의해 고유 진동수 근처에서 진동을 하게 되면, 그 진동 폭이 급증하는 특성, 즉, 공진특성을 이용하는 소자를 말하며, 모든 기계구조물은 고유의 공진주파수를 가진다. 따라서 반도체 및 미세가공기술이 발달함에 따라서 미세 구조물을 제작하고 공진특성을 분석하려는 연구가 국내외에서 활발히 이루어지고 있다.

일반적으로 현재 사용되고 있는 공진기는 크게 전기적인 공진기와 기계적인 공진기가 있으나, 상대적으로 훨씬 높은 품질계수를 갖는 기계적 공진기가 주로 이용되고 있다. 그 중에서도 현재 가장 많이 사용되고 있는 공진기는 유전체와 표면 탄성파(SAW: Surface acoustic wave)를 이용하고 있다. 초고주파 회로용 유전체 필터는 SAW 필터에 비해 낮은 삽입 손실을 가지면서 충격이나 진동과 같은 외부 잡음에 안정한 특성을 지니고 있으나, 소형 회로 구현의 한계가 있으며 MMIC(monolithic microwave integrated circuit) 화가 어렵다. 반면, SAW 필터는 유전체 필터에 비해 소형이며 반도체 공정을 이용하여 제작하기 때문에 대량생산이 가능하다는 장점이 있다. 그러나, 단결정 압전기판을 사용하기 때문에 상대적으로 고가이며 요구되는 동작 주파수가 높아지더라도

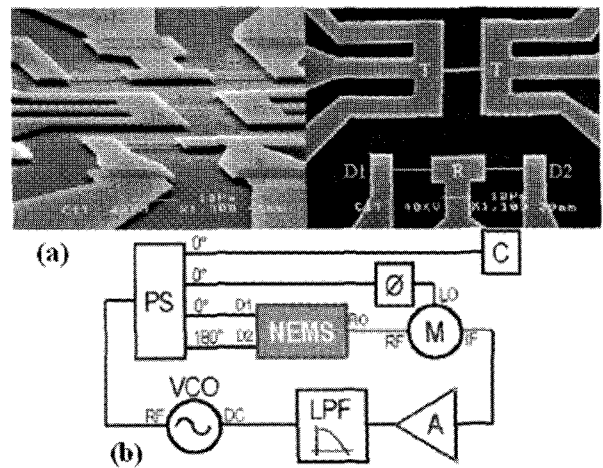


그림 9 나노 3C-SiC 공진기의 (a) SEM 이미지와 (b) 질량 측정용 블록다이아그램

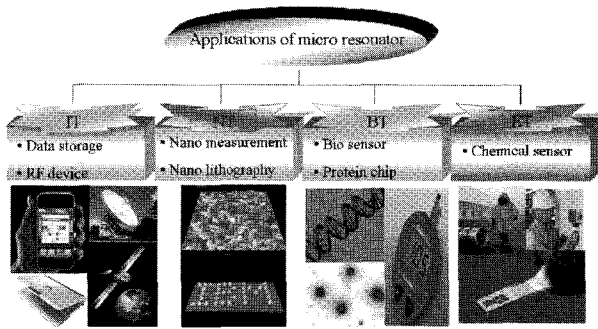


그림 10 나노 3C-SiC 공진기의 응용분야



그림 11 SiC M/NEMS의 응용분야

IDT(interdigital transducer) 구현 선폭이 약 0.5 μm 정도가 한계이므로 사용 주파수대의 한계 그리고 MMIC화가 불가능하다.

이러한 기존의 공진기의 문제점을 해결하기 위해 M/NEMS를 이용한 기계적 공진기에 관한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. M/NEMS형 기계적 공진기는 위에서 언급한 공진기에 비해 더 높은 품질계수를 가질 뿐만 아니라, MMIC화가 가능하며, 초소형화가 가능하다. 하지만, 상대적으로 공진 주파수가 낮은 단점을 지닌다. 이를 보완하기 위하여 여러 방식을 통하여 M/NEMS형 공진기의 공진 주파수를 끌어올리기 위한 연구가 진행 중이다.

나노역학 공진기 연구의 선구자라 할 수 있는 미국 캘리포니아 공과대학의 M. L. Roukes 교수 연구팀 SiC NEMS 기술로 제작된 $1.1 \times 0.12 \times 0.075 \mu\text{m}^3$ 나노 크기의 양단이 고정된 빔 (doubly clamped beam)형 공진기를 제작 및 특성을 분석했으며 그림 9(a)와 (b)는 나노 공진기의 SEM 이미지와 출력 측정원리를 나타낸 블록다이어그램이다¹⁰⁾. 이 공진기는 4.2 K의 극저온과 7 Tesla의 강한 자기장하에서 1 GHz의 공진 주파수를 갖고 또한, 상온 및 상압에서도 1 attogram (10-18 g)보다 작은 질량까지도 측정이 가능한 3C-SiC 외팔

보 (cantilever)형 공진기를 Nature에 발표하였다.

이러한 마이크로 공진기의 대표적인 응용분야로는 공진기의 공진신호를 이용하는 무선통신 부품소자 분야와 외력에 의한 공진주파수의 변화를 이용한 센서분야로 크게 나눌 수 있으며 그대표적인 응용분야를 그림 10에 요약했다.

4. 결론


본 논문에서는 Si M/NEMS를 대체할 수 있는 차세대 SiC M/NEMS의 연구개발 동향을 간단히 소개했다.

그림 11은 SiC M/NEMS의 응용분야를 요약한 것으로 SiC 부품은 기계적 특성이 우수하고 고온, 고압에서도 매우 우수한 반도체이며 화학적으로 대단히 안정하기 때문에 극한 환경에서 사용가능한 자동차, 선박, 항공, 기계 등 수송기계용 고온, 고압 전자기계부품을 연구 개발하는데 최고의 대안으로 전망되며 특히, 수송기계용 고온, 고압 전자·기계부품의 응용분야는 석유탐사 및 굴착, 항공우주(전자제동장치, Rack mounted avionics, Engine control/monitoring), 산업응용(Hot process, 유체 및 연소 monitoring), 자동차(엔진 compartment, On-engine & on-transmission), 군수 및 핵반응로 모니터링 등 극한 환경 수송기계용 M/NEMS로 사용될 것이다.

자동차 분야에서는 연소챔버, 흡/배기 엔진제어, 디젤 압력 측정 controller, turbo charge, jet turbine 제어시스템 등 흡기관 압력 감지용 압력센서, 흡입 공기량 측정 유량센서 그리고 최적의 매연을 조절하기 위한 페르프-연소제어시스템용 연료대 공기의 비 감지용 산소센서 등으로 자동차 엔진주위에 설치되는 전자제어유닛(ECU)이 -40~125℃의 주의온도에서 동작해야 하는데, 현재에는 특별히 유닛을 엔진과 격리하여 별도의 공간을 필요하다. 그러나, SiC 부품은 엔진 실린더 헤드 또는 배기 파이프에 직접 설치가 가능하므로 연료 효율을 향상시키고 배기가스의 유해물질 제거가 용이하다.

항공우주 및 선박분야에서는 엔진부근에 300~600℃에서 동작하는 SiC 부품은 종래의 유압방식의 제어에서 지능형 제어로 변환이 가능하기 때문에 기내의 배선과 접속을 90%이상 줄일 수 있다. 이 밖에도 석유탐사 및 굴착시 Geothermal well, 산업응용으로 Hot process, 유체 및 연소 모니터링, 가전분야로는 TV와 전자오븐, 초고온에서 동작할 수 있는 전자부품으로 사용 가능할 것이다. 더구나, 우주선의 경우 SiC소자는 내방사선 특성과 시스템의 부피와 무게를 크게 줄여 궤도에 진입하는 무게당 비용을 크게 절감할 수 있다.

따라서, SiC를 기반으로 하는 M/NEMS형 센서 및 액츄에이터에 대한 연구는 세계적으로도 아직 초기단계에 불과하기 때문에 기술선진국으로부터 기술이전을 받을 수도 없으며

SiC M/NEMS의 자체 개발을 위한 기반기술 확보로 국가경쟁력뿐만 아니라 기계, 자동차, 조선, 우주항공, 정보통신, 바이오 등의 전략산업 발전에 크게 기여하리라 기대된다. 

참 고 문 헌

- [1] G. S. Chung, "Thin SOI structures for sensing and integrated circuit applications", *Sen. & Actu.*, Vol. 39, pp. 241-251, 1993.
- [2] C. A. Zorman and M. Mehregany, "Silicon carbide for MEMS and NEMS - An Overview", *Proc. of the IEEE*, Vol. 2, pp. 1109-1114, 2002.
- [3] M. B. J. Wijesundara, G. Valente, W. R. Ashurst, R. T. Howe, A. P. Pisano, C. Carraro, and R. Maboudian, "Single-source chemical vapor deposition of 3C-SiC films in a LPCVD reactor", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 151, pp. C210-C214, 2004.
- [4] J. A. Edmond, J. Ryu, J. T. Glass, R. F. Davis. "Electrical contacts to silicon carbide thin films," *J. Electrochem. Soc.* Vol. 135, pp. 359-362, 1998.
- [5] D. Gao, M. B. J. Wijesundara, and C. Carraro. "Transformer coupled plasma etching of 3C-SiC films using fluorinated chemistry for microelectromechanical systems applications", *J. of Vacuum Sci. & Tech. B.* Vol. 22, pp. 513-518, 2004.
- [6] G. Kotzar, M. Freas, P. Abel, A. Fleischman, S. Roy, C. Zorman, J. M. Moran, and J. Melzak, "Evaluation of MEMS materials of construction for implantable medical devices", *Biomaterials*, Vol. 23, pp. 2737-2750, 2002.
- [7] S. C. Jun, X. M. H. Huang, M. Manolidis, C. A. Zorman, M. Mehregany and J. Hone, "Electrothermal tuning of Al-SiC nanomechanical resonators", *Nature Nanotech.*, Vol. 17, pp. 1506-1511, 2006.
- [8] C. H. Wu, C. A. Zorman, and M. Mehregany, "Fabrication and testing of bulk micromachined silicon carbide piezoresistive pressure sensors for high temperature applications", *IEEE Sen. J.*, Vol. 6, pp. 316-324, 2006.
- [9] G. S. Chung and J. H. Ahn, "Characterization of polycrystalline 3C-SiC thin film diodes for extreme environment applications", *Microelectronic Eng.*, Vol. 85, pp. 1772-1775, 2008.
- [10] M. Li, H. X. Tang, and M. L. Roukes, "Ultra-sensitive NEMS-based cantilevers for sensing, scanned probe and very high-frequency applications", *Nature*, Vol. 2, p.114-120, 2007.

〈 필 자 소 개 〉



정귀상(鄭貴相)

1961년 6월 20일생. 1983년 영남대 공과대학 전자공학과 졸업. 1992년 TUT 정보시스템공부 졸업(공학). ETRI 선임연구원. UC 버클리 연구교수. 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수.