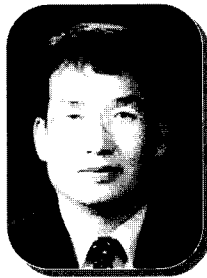




## SiC 반도체를 이용한 고온용 가스센서 기술



· 김창교 ·  
순천향대  
정보기술공학부 교수



· 조남인 ·  
선문대  
전자정보통신공학부 교수

### 1. 서론

실리콘(Si) 반도체를 이용한 센서의 연구개발은 1980년대 초부터 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술의 태동과 함께 시작되었으며 정보통신기술의 발전과 더불어 빠르게 진전되고 있다. 실리콘을 이용한 센서는 압력센서, 가속도센서, 자기센서, 가스센서 등의 형태로 상용화되어 있으며, 컴퓨터 기술의 발전에 따라서 자동화를 위한 기반이 마련된 후에 우리가 이용하고 있는 많은 시스템의 상태를 전기적 신호로 변환해주는 센서가 필요하게 되어 발전 속도는 더욱 가속화되고 있다. 현재 사용되고 있는 대부분의 정보통신 장비나 시스템에서는 다양한 형태의 실리콘 센서가 사용되고 있다. 그러나 고온이나 고압, 그리고 부식하기 쉬운 열악한 환경에서 실리콘 센서를 안정적으로 사용하기에는 여러 제한 조건이 따르고 있다. 실리콘 반도체가 각종 센서기술의 기초 소재로 사용되게 된 것은 실리콘 집적회로의 공정기술 발전에 기인한 것이며, 아울러 실리콘이 우수한 기계적 성질을 갖고 있고 미세가공 (micro-machining technology)이 가능하기 때문이다. 그러나, 실리콘은 에너지 밴드 갭 ( $E_g=1.1\text{ eV}$ )이 적기 때문에 실리콘을 기본 소재로 하는 센서는 상대적으로 낮은 온도에서

만 동작하는 제약이 따르게 된다. 실리콘을 이용한 전자 소자는 접합 문제 때문에  $200^\circ\text{C}$  보다 낮은 온도에서 동작시켜야 하며 그 이상의 온도에서는 소자로써의 역할을 할 수 없다(1). 그리고 마이크로머시닝 기술을 이용하여 제작한 실리콘 구조물은  $500^\circ\text{C}$ 에서 변형이 시작되기 때문에 이 온도보다 낮은 온도에서 동작시켜야 한다(2). 즉, 실리콘을 기본 소재로 하는 센서는 동작과 저장에 제약이 따르며, 한 예로 자동차 배기가스를 모니터링 하거나 엔진 내의 압력 감지는 실리콘 센서를 사용할 수 없다. 한편 실리콘카바이드 (SiC) 반도체는 결정구조에 따라서 에너지 밴드 갭이  $2.2\sim 3.3\text{ eV}$ 의 값을 가지며, 그 값이 실리콘보다 훨씬 크기 때문에 고온에서 동작하는 센서로서 적합한 물질일 뿐 아니라 화학적으로 매우 안정되어 있어서 부식 가능성이 있는 열악한 환경에서도 동작시킬 수 있다. SiC 소재의 전기적, 재료적 성질을 살펴 보면, 우선 wide band gap 반도체이고 (3,4), 높은 breakdown electric field ( $2.5\ 10^6\text{V/cm}$ )를 갖고 있으며(5), 높은 열전도도 ( $4.9\text{ W/cm.K at } 300\text{K}$ )를 갖고 있다(6). 이것은 고온, 고전압, 고속 스위칭이 필요한 분야에서 매우 유리한 성질이다(7-9). 에너지 밴드 갭이 다이아몬드보다는 작으나 다이아몬드 소자에서는 가능하지 않은 성질을 SiC는 가지고 있다. SiC를 소자로 이용할 경우 p

형 반도체 또는 n형 반도체를 형성할 수 있도록 열역학적으로 안정되어 있고 양질의 산화막(SiO<sub>2</sub>)을 형성할 수 있다는 점이다. 이러한 SiC의 많은 장점에도 불구하고 SiC의 성장의 어려움 때문에 센서 및 소자로의 이용이 용이하지 않았으나, 최근에 많은 기술적 진보가 이루어져서 센서 재료로 각광을 받기 시작하고 있다. 이처럼 SiC 반도체를 이용한 센서는 고온, 고압, 고방사선, 부식성의 극한 환경에서 동작할 수 있으며, 기능 다양화를 도모할 수 있다는 장점 때문에 1990년대 이후로 해외에서는 본격적으로 활발한 연구 개발이 진행되고 있다. 본고에서는 SiC 반도체를 이용한 가스센서 기술의 연구개발 동향, SiC 가스센서 동작원리와 더불어 센서제작에 이용되는 MEMS 기술에 대하여 알아보도록 한다.

## 2. 국내외 연구동향

국내에서 SiC 반도체를 이용한 가스센서에 대한 연구는 일부 대학에서만 이루어져 왔는데, 이들은 SiC 쇼트키 다이오드를 이용하여 600°C까지의 고온에서 수소가스와 탄화수소 가스를 감지하는 연구를 수행하였다(10,11). 그러나 아직 국내의 다른 연구 그룹에서 연구 진행보고는 없는 실정이다.

국외의 SiC 가스센서 연구개발은 스웨덴의 Volvo 자동차 그룹, ACREO AB, 독일의 Daimler Benz 자동차 그룹, First Sensor Technology, 미국 Ford 자동차 그룹, 미국 NASA 등에서 고온에서 동작하는 센서에 대한 연구가 1990년대 이후에 진행되고 있다. 이러한 자동차 관련 기관들과 공동연구를 진행하는 대학으로는 스웨덴의 Linköping University (I. Lundström 교수), 독일의 Technical University of Berlin (E. Obermeier 교수), 미국 Case Western Reserve University (C.C. Liu 교수 및 M. Mehergany 교수), Purdue University (G.W. Auner 교수), 일본 Ishinomaki Senshu University (Shinji Nakagomi 교수), 러시아의 St. Petersburg Electrochemical University, Russian Academy of Science 등을 들 수 있다. 이상의 연구동향에서 알 수 있는 것은 SiC 반도체를 이용한 가스센서는 자동차의 엔진의 압력이나 연소에 관련된 감지를 하므로 자동차 회사를 중심으로 이루어지고 있다는 것이다. SiC는 실리콘을 이용하는 경우의 단점을 크게 보완할 수 있다. 예컨대, 실리콘을 이용하는 센서는 실리콘의 에너지 밴드갭이 작기 때문에 200°C 이하의 온도에서만 안정적으로 동작하지만, 메탄가스는 400°C 이상의 고온에서 분해가 되기 때문에 메탄가스를 감지하기 위해서는 실리콘을 기관으로 사용하기가 어렵다. 또한 자동차 배기가스와 보일러의 배기(flue) 가스와 같이 고온과 가혹한 조건의 환경을 감지하기 위해서는 것을 이러한 조건에서 동작이 가능한 SiC를 기관으로 사용함으로써 실리콘이 갖는 한계를 극복할 수 있다. 자동차 배기가스 센서는 900°C에서 4,000시간 또는 160,000km를 고장 없이 동작하여야 하고 산화가스 분위기와 환원가스 분위기가 서로 바뀔 때 10msec 이내에 반응하여야 한다. 1975년 스웨덴의 I. Lundström에 의해 H<sub>2</sub> 가스를 감지할 수 있는 Pd-MOS (Pd-gated

metal-oxide-semiconductor) 다이오드가 처음 보고된 이래로(12,13) 쇼트키 장벽 다이오드, MOS (metal-oxide-semiconductor) 구조의 캐패시터와 MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor) 소자를 기본 구조로 하는 가스 센서에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있고 다양한 가스를 감지할 수 있음을 보여주고 있다. 캐패시터 구조를 갖는 SiC 가스 센서는 1992년에 스웨덴의 Lundström 그룹에 의해 발표되었고(14), SiC 쇼트키 다이오드 구조를 이용한 가스 센서도 같은 해에 미국 NASA에서 발표되었는데(15), MISiC (metal-insulator-silicon carbide) 캐패시터 센서의 경우에 환원 가스에 매우 민감하게 반응하는 장점이 부각되고 있다(14). SiC는 에너지 밴드갭이 넓기 때문에 1,000°C까지의 고온에서 동작이 가능한 것으로 보고되고 있다(16). Pt를 게이트로 하는 가스 센서는 자동차 배기가스 같은 산소가 부족한 환경(oxygen deficient environment)에서 환원가스에 아주 민감하게 반응한다. CO 가스 뿐만 아니라 수소가스나 탄화수소가스도 감지할 수 있다. 500°C 이상의 온도에서 반응시간은 msec 정도이다. 즉 MISiC 센서는 자동차 업체에서 필요로 하는 기능을 갖추고 있고 자동차 엔진과 같은 연소기관(combustion)의 가스 상태를 모니터링하기 위한 가스 센서로도 최적임을 알 수 있다. 가스센서에서는 장기적 안정도가 중요한데, 이 안정성은 대부분의 센서에서 문제점으로 대두되었다. 센서의 장기적 안정도가 떨어지는 것과 센서 반응 기구를 이해하는 것이 중요하다. 스웨덴 Linköping University의 I. Lundström 그룹과 ACREO 사와의 합작 프로젝트에 의하여 고온에서 동작되도록 설계된 MOSFET 구조의 가스센서는 600°C 이상의 온도에서 안정적으로 동작하였다(17). 또한 배기 가스에서 CO 가스를 모니터링할 때 이용할 수 있다. 현재 사용되고 있는 방법은 FTIR (fourier transform infrared) 같은 광학적 기술을 이용하고 있으나, 고가이고 작은 규모일 경우에는 관리가 복잡하다. 실험결과 flue 가스에 포함되어 있는 O<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub> 가스의 농도가 변할 때도 CO 가스 농도를 정확하게 감지함을 알 수 있었다. 이러한 구조를 갖는 센서의 감도나 선택도는 Pd 또는 Pt 같은 촉매 금속 게이트의 종류, 촉매 금속 게이트의 미세 구조 그리고 동작온도에 의해 결정된다.

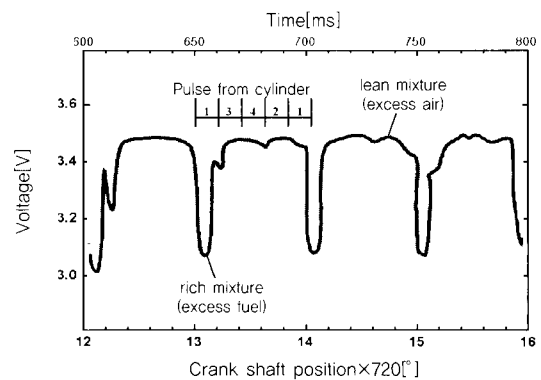


그림 1. SiC 가스 센서의 동작.

현재 출시되고 있는 자동차의 대부분은 (H)EGO ((heated) exhaust gas oxygen) 가스센서를 장착하고 있다(18). HEGO 센서는 그림 1에서 보는 바와 같이 공기/연료 비 (air/fuel ratio)에 반응하고 공기 (산소)가 과잉으로 있는 분위기에서는 낮은 신호를 내보내고 연료 (환원성 가스)가 과잉인 분위기에서는 높은 신호를 내보내는 디지털 출력 반응을 보여준다. 또한 더 넓은 감지영역을 갖는 HEGO 센서인 UHEGO (universal heated exhaust gas oxygen) 센서가 있다(19). 이러한 조건을 만족하는 가스센서는 SiC 반도체를 이용한 MOS 디바이스나 쇼트키 다이오드 형태의 디바이스이다. 그러나 현재 상용화되어 있는 HEGO 센서는 실린더의 특정 연소 제어(cylinder specific combustion control) 용으로는 반응속도가 빠르지 않았으나, 최근 빠른 반응 속도를 갖는 HEGO 센서가 보고되었다(20). 이 센서는 여러 사이클 동안의 평균 공기/연료비를 감지하고, 센서가 배기관 (exhaust pipe)의 중간에 위치하여 모든 실린더로부터 나오는 가스들의 평균값을 취하고 있다. 이러한 센서들은 모두 SiC 반도체를 이용한 센서로 대체함으로써 기능을 강화시킬 수 있다. 왜냐하면 SiC 반도체 재료는 넓은 에너지 밴드갭을 갖고 있고 화학적으로 매우 안정되어 있기 때문에 가혹한 (aggressive) 환경 조건과 900°C의 높은 온도에서 동작할 수 있는 센서 재료로 적합하기 때문이다(21). 한 예로 A/F 비가 높고 (rich) 낮은 (lean) 실린더가 동시에 있는 경우에 HEGO 센서는 두개의 실린더가 rich 상태이고 두개의 실린더가 lean 상태일 때 서로 보완하여 (compensating) 감지할 수 없었으나 Lundstrom 그룹이 Volvo 자동차회사와 공동으로 개발된 SiC 센서는 각각의 실린더의 A/F 비를 감지함으로써 각 실린더의 점화 불발이나 점화 불량을 조사할 수 있었다(22).

SiC 고온 동작용 가스 센서는 현재 사용되고 있는 TiO<sub>2</sub> 또는 ZrO<sub>2</sub>를 이용한 센서(23)와 상호 보완적으로 사용 가능한데, SiC를 이용한 센서는 수소를 포함하고 있는 배기가스를 감지할 수 있는 반면에 금속 산화물 가스 센서는 가스에 포함되어 있는 산소의 양에 반응하기 때문이다. Fluorine 가스는 화학공정 중에 많이 사용되고 있으나 낮은 농도에서도 매우 독성이 강하기 때문에 이 가스를 감지하기 위한 센서가 반드시 필요한 실정이다. 현재 사용하고 있는 fluorine 가스 센서의 단점은 액체 전해질을 사용한다는 것이다(24). Murin은 fluorine을 감지하기 위하여 전위차를 이용하는 고체 디바이스용으로 Pt로 도포된 LaF<sub>3</sub>의 단결정의 사용을 제안하였다. 그러나 이 센서는 가스와 반응하는 전극의 안정화를 위한 단결정화를 해야하므로 제작단가가 상승하는 단점이 있다(25). 이러한 문제들은 전류의 변화를 감지하는 고체 전해질을 이용함으로써 어느 정도 해결할 수 있으나(26), 아직 상업화에는 이르지 못하였다. 한편, fluorine 가스를 감지하기 위해 SiC를 기반으로 하는 MIS (metal-insulator-semiconductor) 구조를 이용하면 센서의 전기화학적 요소와 전기신호의 증폭기 기능을 같은 디바이스 상에 구성할 수 있기 때문에 감지 구조의 개선이 가능하다. 이처럼 SiC 반도체를 이용한 능동 소자, 즉 쇼트키 다이오드, MIS 캐

패시터, MOSFET 디바이스로 제작하여서 가스 반응 시 출력의 변화를 측정함으로써 가스 센서의 감도와 성능, 동작범위를 크게 확장시킬 수 있다. 또한, 가스센서의 구조를 개선하여 열적 안정성을 꾀할 수 있다. 일 예로 MHP (microhotplate) 구조를 들 수 있는데, SiC는 마이크로 히터와 가스 감응물질을 위한 멤브레인으로 사용하게 된다. MHP는 박막으로 만들어지므로 열용량을 낮추어서 가스 센서를 고온으로 유지할 경우에도 전력 소모를 감소시킬 수 있으며, 현재까지 대부분의 MHP는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>나 SiO<sub>2</sub> 멤브레인을 이용하고 있다. 그러나 이 재료는 장기적 안정도가 없어서 실용화 측면에서 문제가 되고 있다. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>나 SiO<sub>2</sub> 대신에 SiC를 이용하면, 우수한 열전도도, 고온에서의 장기적 안정성, 화학적인 안정성, 우수한 기계적 강도 등의 특성 인하여 실용성이 부각되고 있다. SiC를 이용한 MHP의 연구는 주로 독일의 Daimler Benz 자동차 회사에서 진행하고 있는데, SiC로 제조된 MHP는 1,000°C 까지 안정적으로 동작하고 있는 것으로 보고되고 있다(27).

### 3. SiC 가스센서의 동작원리

SiC 반도체를 이용한 센서 중에서 그 실용성이 가장 큰 센서는 가스센서이며, SiC 가스센서의 동작 원리를 요약하면 다음과 같다. SiC 가스센서는 능동소자를 이용할 수 있는데, SiC 가스 센서는 쇼트키 다이오드 구조, MIS (metal-insulator-semiconductor) 구조, MISFET(metal-insulator-semiconductor field effect transistor) 구조로 되어 있다. Pd-MOS 구조의 SiC 가스 센서는 1975년 I. Lundstrom에 의해 보고되었다(12,13). 이러한 구조는 그림 2와 같이 SiC 표면 위에 매우 얇은 절연층 위에 촉매 금속을 증착하여 제작한다. 촉매 금속은 Pd, Ir, Pt 등이 있으며, 디바이스 구조상으로는 게이트 역할을 한다. 경우에 따라서 많은 전류가 흐르지 않을 때 촉매층으로 SnO<sub>2</sub>와 같은 산화물 반도체가 사용되기도 한다. 디바이스의 촉매 금속은 수소분자 감지하기 위해 사용된다. 촉매 금속위의 수소 분자 분자는 촉매 작용에 의해 수소 원자로 분해된다. 결과적으로 발생한 수소 이온은 촉매 금속층을 통해 촉매 금속 표면과

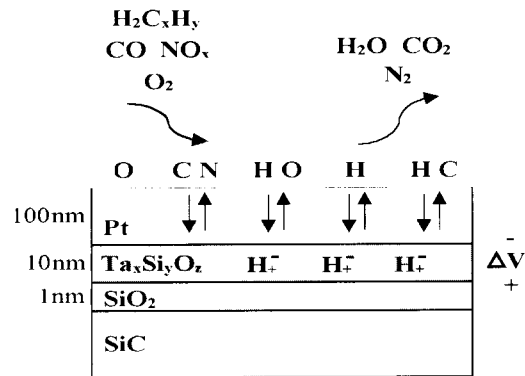


그림 2. 가스센서 동작 원리.

절연층 사이의 계면으로 수나노 초 또는 수 마이크로 초 이내에 확산되어 이동한다. 이것이 절연 층의 표면에 분극 층(polarized layer)으로 나타난다. 분극 층은 쇼트키 다이오드나 MISFET의 I-V 곡선이나 MOS 캐패시터의 C-V 곡선 상의 flat-band 전압에 영향을 미치게 된다. 그림 3은 프로판과 산소 분위기에서의 쇼트키 다이오드의 I-V 곡선을 보여주고 있다. 한편 그림 4는 MISFET 구조의 SiC 가스 센서를 보여주고 있다. 수소를 포함하는 가스 분위기에서 O<sub>2</sub>, NO,와 CO 가스 등은 촉매금속의 표면에서의 화학반응에 의해 간접적으로 측정할 수 있다. 표면에서의 화학반응은 금속-절연층 계면에서 분극 층 (polarized species)의 농도에 영향을 미친다. 예를 들면 산소 가스는 촉매 금속의 표면에서 수소원자와 반응을 하기 때문에 분극 층을 감소시킨다.

#### 4. SiC MEMS 기술

MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술을 이용하여 압력 센서, 가속도센서, 마이크로스위치, 릴레이, 마이크로모터 또는 마이크로웨이브 소자와 같은 전기, 전자소자 및 마이크로 펌프,

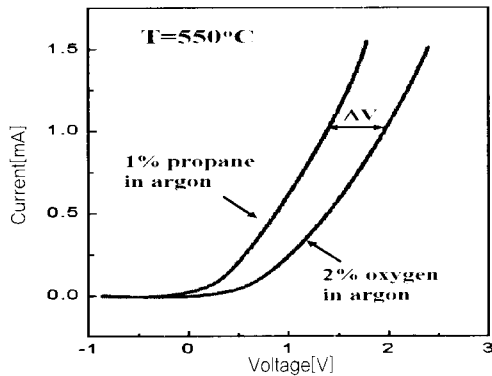


그림 3. 프로판과 산소 분위기에서의 쇼트키 다이오드의 I-V 곡선.

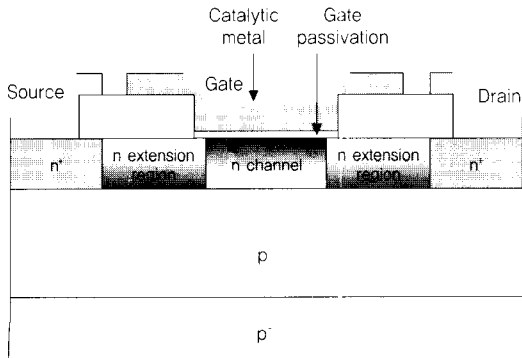


그림 4. MISFET 디바이스 형태의 가스센서의 구조.

마이크로 로봇, 마이크로 엔진과 같은 기계 소자들을 나노급 단위 까지 제작할 수 있기 때문에 21세기의 기술로 관심이 집중되고 있다. MEMS 기술로 제작된 디바이스는 소형화 및 대량생산 방식에 의한 저가격이 가능하기 때문에 각국에서 집중적인 연구개발에 대한 투자가 이루어져서 많은 발전이 이루어지고 있다. 또한, 기존에 축적되어 있는 Si 반도체 공정을 SiC MEMS 기술에 이용함으로써 소형화 및 저가격화라는 개념을 뛰어 넘어 새로운 시스템의 창출 및 실현 등 발전 가능성이 매우 크기 때문에 대부분의 선진국에서 국가적인 사업으로 지정하여서 연구를 진행하고 있다. 이러한 MEMS 기술은 이미 개발된 실리콘 반도체공정을 이용하기 때문에 실리콘 웨이퍼 상에 구현된다.

SiC 미세구조를 얻기 위해 마이크로머시닝 기술을 개발해야 한다. SiC가 실리콘 기판 위에 증착된 상태에서 SiC 박막 아래에 있는 실리콘 기판의 벌크와 표면 마이크로머시닝 기술이 SiC 마이크로 구조를 얻을 수 있는 시작점이다.

##### 4.1. SiC 벌크 마이크로 머시닝

실리콘 벌크 마이크로머시닝 기술이 실리콘 기판 위에 성장한 단결정, 다결정 또는 비정질 SiC에 적용될 수 있다. 그림 5에서처럼 전면 및 후면 마이크로머시닝 기술이 필요하다. 벌크 실리콘을 제거하기 위한 KOH, TMAH 또는 EDP 같이 일반적으로 사용되는 비등방성 식각 용액에 대한 SiC 식각율이 매우 낮기 때문에 그림 5에서와 같은 공정이 이루어진다. 후면 벌크 마이크로머시닝의 경우에 SOI (silicon on insulator) 웨이퍼 공정과 유사하다. 그러나 이 경우에 SiC가 SiO<sub>2</sub>보다 훨씬 식각율이 낮기 때문에 SiC 멤브레인에 대한 식각 정지막의 역할은 훨씬 우수하다. 전면 마이크로머시닝 공정을 이용하여 free standing 구조를 얻을 수 있는데, 이 경우 건식 식각 (dry etching) 공정을 이용하여 SiC 박막을 패터닝 한 후에 벌크 실리콘의 식각공정이 진행된다.

수 마이크로론에서 수십 마이크로론 사이의 낮은 스트레스를 갖는 단결정 및 다결정 SiC 박막을 벌크 마이크로머시닝 구조 용으로 사용된다. 비정질 SiC 박막은 일반적으로 더 얇고 기계적 스트레스는 더 크다. 또한 SiC는 가끔 SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 또는 다결정 실리콘과

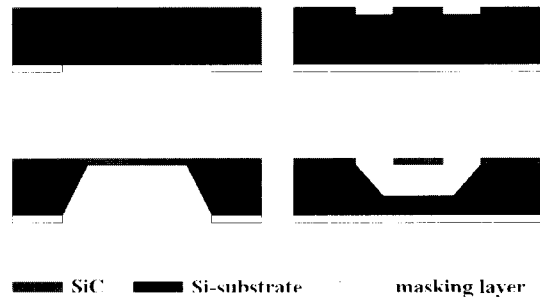


그림 5. SiC 벌크 마이크로머시닝 기술의 공정도 : a) 후면 식각, b) 전면 식각

샌드위치 구조에 사용된다.

#### 4.2. SiC 표면 마이크로머시닝

전술한 바와 같이 단결정 SiC 박막은 단결정 실리콘 위에 직접 성장되어야 하며, 따라서 실리콘 위에 성장한 단결정 SiC 박막은 일반적인 표면 마이크로머시닝이 불가능하다. 반대로 다결정 또는 비정질 SiC 박막은 여러 기판위에 성장되거나 증착될 수 있고 표면 마이크로머시닝에 적합하다. 다결정 SiC는 일반적으로 다결정 실리콘 층이나 산화막 위에서 성장한다. SiC는 그림 6에서 보는 것처럼 다결정 실리콘이나 산화막이 희생 층으로 사용되는 반면에 기계적 특성을 갖는 층으로 이용된다. KOH 또는 TMAH 수용액을 이용하여 다결정 실리콘을 희생 층으로 하여 SiC 미세 구조물을 형성한다. 이때, 산화막 (SiO<sub>2</sub>)은 마지막 희생 층을 식각하는 동안에 아래에 있는 실리콘을 보호하는 역할을 한다. 산화막을 희생 층으로 사용되면 일반적인 표면 마이크로머시닝과 같이 HF 용액이 사용된다. HF를 이용하여 SiC를 식각하기가 매우 어렵기 때문에 기계적 성질을 갖는 층은 어떠한 보호막도 필요하지 않으며 다층 구조가 가능한 장점을 갖고 있다. 기판 보호막과 희생 층으로 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 막과 SiO<sub>2</sub> 막을 이용하여 다결정 실리콘과 다결정 SiC를 기계적 성질을 갖는 층으로 이용할 수 있고 [28], 비정질 SiC 박막에 일반적인 표면 마이크로머시닝 기술을 적용할 수 있다. 더욱이 400°C 이하의 낮은 증착 온도 때문에 이러한 박막들을 금속에 증착할 수 있으므로 희생 층으로 금속을 사용하면 표면 마이크로머시닝 기술이 가능해진다.

Si-MEMS 기술을 SiC-MEMS 기술로 확장시키는 것 또한 가능한데, 이는 DRIE 또는 에피 마이크로머시닝 같은 새로운 실리콘 MEMS 기술을 SiC MEMS 기술로 이용할 수 있기 때문이다. Si 웨이퍼에 SiC 박막을 성장시킬 수 있고 동일 fluorine을 함유한 화학물에서 플라즈마 식각이 가능하다면 DRIE를 SiC와 Si에 동시에 적용할 수 있다. 이러한 에피 마이크로머시닝 공정은 실리콘 위에 에피 성장된 단결정 SiC 웨이퍼를 사용할 때 표면 마이크로머시닝을 대신하는 공정이다. SiC 층은 건식 식각법으로 패턴링이 가

능하고 아랫면에 있는 실리콘은 다공질로 만들 수 있거나 제거될 수 있다.

### 5. 결론

실리콘 카바이드 (SiC) 반도체는 종래의 실리콘 재료로 동작하기 어려운 환경에서 동작하는 센서 재료로 각광을 받고 있다. SiC 센서는 고온 동작이 가능하고, 화학적으로 안정되기 때문에 화학적 부식 가능성이 있는 환경에서 사용할 수 있으며, 내방사선 특성이 있기 때문에 방사선 지역에서 동작이 가능하고, 기계적 강도가 크기 때문에 마찰이 많은 모터 등에서 효과적으로 사용이 가능하다. 즉, SiC 센서는 고온, 고전압, 고속 스위칭이 필요한 분야에서 실리콘 센서보다 유리한 성질을 보유하고 있으며, 다이아몬드 재료와 비교하면, p형 반도체 또는 n형 반도체를 형성할 수 있도록 열역학적으로 안정되어 있고 양질의 산화막을 형성할 수 있다는 장점이 부각되고 있어 차세대 센서로써 기능 다양화를 도모할 수 있다. 그러나, 고온, 다기능의 센서재료로서 사용하기 위한 기술적인 문제는 재료 그 자체에 있는 것이 아니고 금속화 공정, 보호막 형성 및 패키징과 같은 디바이스 기술이 해결되어야 하며, 화학적 반응성, 동작 안정성 등과 같이 디바이스 특성에 영향을 미치는 다른 요소도 고려되어야 한다.

SiC 센서로써 가장 실용적인 분야는 가스센서이며, 이 분야에 대한 국내 연구개발이 절실하다. 또한, SiC-MEMS 기술은 새로운 연구분야로써 압력센서, 가속도센서, 마이크로스위치, 릴레이, 마이크로 모터 또는 마이크로웨이브 소자와 같은 전기, 전자 및 마이크로 펌프, 마이크로 로봇, 마이크로 엔진과 같은 기계 소자들을 나노 급 단위까지 제작할 수 있기 때문에 21세기의 기술 분야로 관심이 집중되고 있다. SiC를 MEMS 용 재료로 이용하기 위해서 SiC 박막을 합성하기 위한 기술에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 저온 SiC 박막 합성 기술과 공정 기술에 대한 연구도 이루어져야 할 것이다.

### 참고 문헌

- [1] MRS Bulletin, "Silicon carbide electronic materials and devices", Vol. 22, No. 3, p. 19, March 1997.
- [2] G. Muller, et al., "SiC for sensors and high temperature electronics," Sensors and Actuators A, Vol. 43, p. 259, 1994.
- [3] C. Gaberstroh, R. Helbig, and R. A. Stein, "Some new features of the photoluminescence of SiC(6H), SiC(4H) and SiC(15R)," J. Appl. Phys., Vol. 76, p. 519, 1994.
- [4] G. B. Dubrovskii, "Superstructure, energy spectrum and polytypism of silicon carbide crystals," Sov. Phys.-Solid State, Vol. 13, No. 8, p. 2107, 1972.

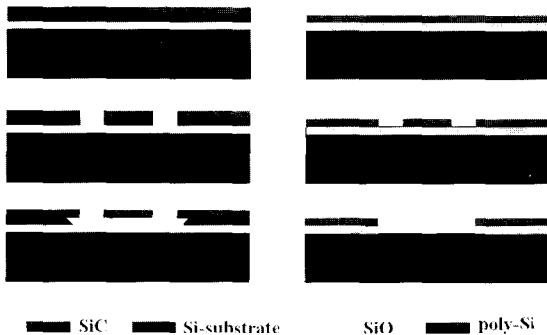


그림 6. SiC 표면 마이크로머시닝 기술의 공정도 : a) 희생층으로 다결정 실리콘 이용, b) 희생층으로 SiO<sub>2</sub> 층 이용.

- [5] W. V. Muench and I. Pfaffeneder, "Breakdown field in vapor-grown silicon carbide p-n junctions," *J. Appl. Phys.* Vol. 48, p. 4831, 1977.
- [6] G. A. Slack, "Thermal conductivity of pure and impure silicon, silicon carbide, and diamond," *J. Appl. Phys.* Vol. 35, p. 3460, 1964.
- [7] W. Xie, J. A. Cooper, Jr., and M. R. Melloch, "Monolithic NMOS digital integrated circuits in 6H-SiC," *IEEE Electron Devices Lett.*, Vol. 15, p. 455, 1994.
- [8] M. Bhanagar, D. Alok, and B. J. Baliga, "SiC power UMOSFET: design, analysis, and technological feasibility," in *Proc. 5th SiC and Related Materials Conf.*, Washington, D.C., p. 703, Nov. 1-3, 1993.
- [9] S. Sriram, R. C. Clarke, A. A. Burk, Jr., T. J. Smith, C. D. Brandt, McMullin, P. A. Orphanos, R. R. Siergi, T. J. Smith, C. D. Brandt, M. C. Driver, and R. H. Hopkins, "RF performance of SiC MESFETs on high resistivity substrates," *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 15, p. 458, 1994.
- [10] C. K. Kim, J. H. Lee, S. M. Choi, I. H. Noh, H. R. Kim, N. I. Cho, C. Hong, and G. E. Jang, "Pd- and Pt-SiC Schottky diodes for detection of H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> at high temperature," *Sensors and Actuators B*, Vol. 77, p. 455, 2001.
- [11] C. K. Kim, J. H. Lee, Y. H. Lee, N. I. Cho, D. J. Kim, and W. P. Kang, "Hydrogen sensing characteristics of Pd-SiC Schottky diode operating at high temperature," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 28, No. 3, p. 2202, 1999.
- [12] I. Lundstrom, M. S. Svensson, and L. Lundkvist, "Hydrogen sensitive MOS field-effect transistor," *Applied Physics Letters*, Vol. 26, p. 55, 1975.
- [13] I. Lundstrom and T. Sestefano, "Influence of hydrogen on Pt-SiO<sub>2</sub>-Si structures," *Solid State Commun.*, Vol. 19, p. 871, 1976.
- [14] A. Spetz, A. Arbab and I. Lundstrom, "Gas sensors for high-temperature operation based on metal oxide silicon carbide (MOSiC) devices," in *Euroensors VI*, San Sebastian, Spain, p. 9, Oct. 5-7, 1992.
- [15] G. W. Hunter, P. G. Neudeck, G. D. Jefferson, G. C. Madzsar, C. C. Liu, and Q. H. Wu, "The development of hydrogen sensor technology at NASA Lewis Research Center," in *4th Ann. Space System Health Management Technology Conference*, Cincinnati, OH, NASA Technical Memo, 106, 1992.
- [16] A. L. Spetz, A. Baranzahi, P. Tobias, and I. Lundstrom, "High-temperature sensors based on metal insulator silicon carbide sensors to simulated and real exhaust gases," *Phys. Stat. Sol. (a)* Vol. 162, p. 493, 1997.
- [17] S. Savage, H. Svenningstorp, L. Uneus, A. Kroutchine, P. Tobias, L.-G. Ekedahl, I. Lundstrom, C. Harris, and A. Lloyd Spetz, *Proceedings of ECSCRM2000*, Kloster Banz, Germany, September 3-7, 2000, *Mater. Sci. Form.* p. 353, 2001.
- [18] H. P. Wertheimer and D. J. Romine, *Oxygen Sensor for Automotive Combustion Control*, Mechanical Failures Prevention Group Meetings 32, Santa Monica, Detection, Diagnosis, and Prognosis, p. 62, 1980.
- [19] A. D. Colvin, J. S. Rankin, and K. R. Carduner, "A proportional air-fuel ratio zirconia oxygen sensor," *Sensors and Actuators B*, Vol. 12, p. 83, 1993.
- [20] Uwe Lampe, Josef Gerblinger, and Meixner, "Comparison of transient response of exhaust gas sensors based on thin films of selected metal oxides," *Sensors and Actuators B*, Vol. 7, p. 781, 1992.
- [21] Anita Lloyd Spetz, Amir Baranzahi, Peter Tobias, and Ingemar Lundstrom, "High temperature sensors based on metal-insulator-silicon carbide devices," *Phys. Stat. Sol. (a)* Vol. 162, p. 493, 1997.
- [22] Amir Baranzahi, Anita Lloyd Spetz, Peter Tobias, I. Lundstrom, P. Martensson, M. Glavmo, A. Goras, J. Nytons, P. Salomonsson, and H. Larsson, "Fast responding air/fuel sensor for individual cylinder combustion monitoring," *SAE Technical Paper Series*, 97240.
- [23] E. M. Logothetis and W. J. Kaiser, "TiO<sub>2</sub> film oxygen sensor made by chemical vapor deposition from organometallics," *Sensors and Actuators*, Vol. 4, p. 333, 1983.
- [24] T. Ichichi, S. Uchikoshi, and M. Ishizuka (Riken Keiki Co.), *Potentiostatic electrolytic acid gas sensor*, Japanese Patent 0755768, 3 March 1995.
- [25] I. W. Murin, O. W. Glumov, and D. B. Samusi, "Potentiometric sensor for the determination of fluorine in gases," *Zh. Prikl. Khim.* Vol. 64, No. 10, p. 2171, 1991.
- [26] A. A. Vasiliev, A. V. Pislakov, and D. B. Samusik, "Screen-printing technology of metal oxide and electrochemical gas sensors", *VI European Conference Euroensors-6*, Budapest, p. 346, 1993.
- [27] F. Solzbacher, C. Imawan, H. Steffers, E. Obermeier, and M. Eickhoff, "A highly stable SiC based microhotplate NO<sub>2</sub> gas-sensor," *Sensors and Actuators B*, Vol. 78, p. 216, 2001.
- [28] P. M. Sarro, et al., "Low-stress PECVD SiC thin films for IC-compatible microstructures," *Sensors and Actuators A*, Vol. 67, p. 175, 1998.

## 저 자 약 령

**성명 : 김 창 교**

**❖ 학 령**

- 1981년 연세대 전기공학과 공학사
- 1983년 연세대 대학원 전기공학과 공학석사
- 1992년 Vanderbilt University 공학박사

**❖ 경 령**

- 1993년-현재 순천향대 정보기술공학부 부교수
- 1999년-현재 순천향대 신기술혁신센터 소장

**성명 : 조 남 인**

**❖ 학 령**

- 1974년 2월 서강대 전자공학과 공학사
- 1984년 5월 University of Texas at Austin 공학석사
- 1988년 2월 University of Texas at Austin 공학박사

**❖ 경 령**

- 1974년-1981년  
국방과학연구소 선임연구원
- 1988년-1989년  
University of Texas at Austin,  
Post-Doc
- 1989년-1992년  
전자통신연구원 선임연구원
- 1992년-현재  
선문대 전자정보통신공학부 교수

