

## 반도체형 마이크로 가스센서



정완영

세명대학교 전자공학과 조교수



이덕동

경북대학교 전자전기공학부 교수

### 1. 서론

고체형 가스센서는 안전, 공정 제어, 환경문제 등을 포함하는 다양한 목적에 응용이 되고 있어서 지난 수십년간 광범위하게 연구되어 오고 있다. 지금까지 상업화된 대부분의 가스센서는 그 크기가 비교적 큰 벌크형이나 후막형소자였다. 그러나 최근, 마이크로 가스센서가 실리콘칩위에 제조되거나 집적되므로써 일반IC

와의 호환성과, 제조와 동작에 있어서의 저비용의 관점에서 많은 관심을 끌고 있다. IC와의 호환성은 고성능의 제어 및 구동회로를 동일기판위에 센서와 집적화하므로써 센서자체의 성능향상뿐만아니라 비용절감에도 크게 기여하기 때문에 중요한 기술로 인식되고 있다. 따라서 본고에서는 마이크로센서의 정의를 단순히 초소형의 센서라는 개념이 아니라 실리콘 기판위에 제조된 센서로서 정의하기로 하겠다. 본고에서는 먼저 고체형 마이크로센서의 연구역사, 가스감지원리, 발전방향 등에 대하여 간략히 살펴본 후 금속산화물박막을 감지막으로 하는 반도체형 마이크로 가스센서의 연구개발동향에 대해서 구체적으로 살펴보기로 하겠다.

### 2. 마이크로 가스센서의 분류

실리콘기판을 이용한 고체형 마이크로 가스센서는 1975년 Lundstrom[1]에 의해 수소감지를 위한 Pd게이트 MOSFET소자형태로 보고된 1980년대 중반이래 비교적 활발히 연구되어오고 있다. 지금까지 연구되고 있는 마이크로 가스센서는 표 1과 같이 크게 4종류로 분류할 수 있을 것이다.

MOSFET형 가스센서는 위에서 언급한 바와 같이 처음에는 Pd금속게이트를 사용하여 수소 가스를 감지하기 위하여 제안되

었다. 수소원자가 Pd금속게이트와 SiO<sub>2</sub>절연막사이의 계면부근으로 확산하여 FET의 Schottky 장벽의 높이를 바꾸고 나아가 드레인전류에 대한 플레트밴드전압이나 문턱전압을 바꾸는 원리를 이용하고 있다. 이러한 형태의 가스센서에서 몇 가지 변화된 연구가 수년간 이루어지고 있다. 예를 들면 Pd에 은이나 니켈을 합금한 게이트금속이 수소에 대해 감도와 장기안정성을 향상시키는 연구라든가, 금속게이트위에 작은 구멍을 뚫은 금속산화물박막을 형성한 FET가 고온(160°C)에서 CO가스에 대해 감지성능이 좋다는 보고가 있다.

커패시터형 가스센서는 크게 두가지형태 즉, MOS커패시터와 IDE(interdigital electrode pair)형 커패시터가 있다. MOS커패시터형은 MOSFET소자와 같은 원리로 동작하나 플레트밴드전압의 이동자체를 신호로써 인식하는 차이가 있다[2]. 이 소자는 촉매 게이트나 금속촉매와 흡착금속산화물로 이루어진 게이트구조로서 O<sub>2</sub>, CO나 H<sub>2</sub>등에 비교적 낮은 온도(100°C 이하)에서 반응하는 것으로 알려져 있다. IDE형 커패시터는 센서제조공정의 단순화를 위하여 제안되었다[3]. 실리콘기판위에 형성된 IDE전극쌍이 감지박막(절연막)으로 덮히는 구조를 취하고 있다. 이 코팅된 감지 박막에 가스가 흡착되면 박막의

표 1. 실리콘기판 마이크로 가스센서의 분류

항목 형태		가스감지 변수	특 성	감지가스
MOSFET형		I-V	· 고감도 · 제한된 가스에 대해서만 반응	H <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , CO, H <sub>2</sub> S
커패시 터형	MOS 커패시터 IDE형 커패시터	커패시턴스	동작온도와 습도의 영향에 크게 의존	SO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub>
저항형 (금속산화물 반도체 또는 유기물반도체)		저항	선택성과 감도의 제어가 용의	다양한 환원성 과 산화성가스, N-화합물, S-화합물
접촉연소식		연소열	· 저농도영역에서의 뛰어난 선택성 · 동작온도가 고온이고 선택성이 결여	다양한 연소가스

유전율변화가 일어나고 이것이 결국 소자의 용량을 변화시키게 되는 원리를 이용하고 있다.

금속산화물을 감지막으로 하는 반도체형 가스센서는 가연성 또는 유독성가스에 노출되었을 때 각각의 금속산화물 결정의 접촉부분에서의 쇼트키장벽의 변화에 의해 소자의 저항변화를 일으키게되는 원리를 이용한다. 1962년에 일본의 Seiyama[4]와 Taguchi[5]에 의해 제안된 이래 가연성이나 유독성가스의 누출감지에 중요한 소자로 사용되어오고 있다. 이러한 가스감지특성은 가스감지물질에 귀금속이나 소량의 다른 산화물을 첨가함으로써 크게 개선될 수 있다. 실리콘칩과 금속산화물 감지박막이 결합된 저항형 마이크로가스센서는 미국의 Chang[6]에 의해 처음 제안되었다. rf 스퍼터링이나 MOCVD에 의해 형성된 SnO<sub>2</sub> 박막이 가스감지박막으로 사용되

었다. 금속산화물반도체의 가스에 대한 높은 감지특성은 이러한 형태의 마이크로 가스센서에의 응용잠재력을 더욱 크게 하고 있다.

접촉연소식 가스센서는 백금 코일위에 알루미늄 등의 촉매를 비드(bead)형으로 형성시킨 구조로서 400°C 이상의 고온에서 동작하다가 가연성가스의 흡착에 따라 그 연소열이 촉매덩어리에 몰입된 백금선의 온도를 올리고 이 결과 가스의 농도에 대해 소자의 저항을 변화시키게 된다[7]. 마이크로센서로서 실리콘에 제조될 때 이 형태의 소자는 비록 각종 가연성에 대하여 선택성이 부족한 단점에도 불구하고 저전력과 매우 빠른 응답특성을 나타내는 장점을 가지고있다. 지금까지의 접촉연소식 마이크로 가스센서는 주로 실리콘다이아프램위에 패터닝된 Pt선을 가진 형태의 구조가 주류를 이루었으나 최근에 Najafi 등은 실리콘웨이퍼 기판위의 부

분적으로 가열되는 절연 다이아프램 위에 4~6 nm의 초박막의 금속막구조의 새로운 형태의 센서구조를 제안한 바 있다[8].

이러한 4가지형태 중에 금속산화물박막을 감지막으로 하는 저항형 마이크로 가스센서가 가장 활발히 연구되고있고 또 상업화에서도 그 영역을 넓혀가고 있는 것으로 보여진다. 이 형태는 감지소자, 구동 및 신호처리회로를 집적화시킨 집적회로나 멀티센서의 개발에 가장 적당한 구조로 여겨지고 있다.

### 3. 금속산화물반도체를 이용한 마이크로 가스센서

저항변화로써 가스를 감지하는 금속산화물 반도체 가스센서는 1962년에 처음으로 제안되었고 1969년에 상용화에 성공하였다. 이 센서는 전통적인 세라믹 공정에 의해 제조되었다. 이후의 많은 연구와 개발노력에도 불구하고 이러한 기본제조공정기술은 기본적으로 지금까지 계속해서 통용되고 있다. 실리콘을 기판으로 하는 반도체형 마이크로 가스센서에 대한 접근은 1980년대 중반에 시작되었다[6,9]. 지난 십여년간의 반도체형 마이크로 가스센서의 연구 및 개발역사를 표 2에 요약하였다.

개별 센서소자를 여러개 묶어서 센서어레이를 구성하여, 혼합가스에서 특정가스를 인식하는데 있어서 신호처리 알고리즘과 함께 사용되기 시작하는 새로운 연구경향이 1980년대 중반에 나타나기 시작했다. 이러한 센서어레이는 동일한 종류의 가스센서의 동작온도를 다르게 하거나, 같은 온도에서 다른 감지물질을 사용하여 개별 반도체 가스센서의

표 2. 금속산화물반도체 마이크로 가스센서의 연구동향

소자형태		감지박막	감지가스	년도
단일 소자	후면에칭 다이아프램구조	SnO <sub>2</sub>	에칠알코올	1986
		SnO <sub>2</sub>	CO	1988
		SnO <sub>2</sub>	마취물질 (anesthetic agents)	1990
		SnO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> (+Pt)	LPG	1994
		MoO <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub> , CO	1997
	마이크로 브릿지형 구조	SnO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	1993
SnO <sub>2</sub>		에탄올, H <sub>2</sub>	1997	
집적화 센서 어 레이	후면에칭 다이아프램 구조	SnO <sub>2</sub> , ZnO 와 WO <sub>3</sub> (Al, Cr 등의 첨가 또는 미첨가)	벤젠, 톨루엔, 메탄올	1992 1995
		SnO <sub>2</sub> (순수물, Pt, Pd첨가)	유기 솔벤트	1996
		SnO <sub>2</sub> , ZnO, WO <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> (순수물, Pt, Pd, Cu첨가)		1996
	마이크로 브릿지형 구조	SnO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> (+Pd)	아세트론, formaldehyde, 에탄올, 메탄올	1996
집적화 (센서어레이+신호 처리회로)	10가지 SnO <sub>2</sub> 감지박막(동작온도가 다른)	여러 가지 알코올과 연기를 구별	1995	

선택성의 부족을 향상시키기도 하였다. 최근까지 이러한 신호처리기술은 마이크로화 기술과는 별도로 발전되어왔다.

예를 들면 Holmberg 등은 10개의 CHEMFET 소자, 4개의 다극체 가스센서(TGS)와 하나의 CO<sub>2</sub> 센서로 구성된 하이브리드 가스

센서어레이를 이용하여 5가지의 상업적으로 생산되는 널판지의 냄새를 구별하는 실험을 했다 [10]. 실리콘 마이크로제조공정과 신호처리기술의 최초의 결합은 최근 Bednarczyk 등에 의해 실리콘칩위에 센서어레이와 신호처리회로가 집적됨으로서 시작되었

다[11]. 각기 다른 온도에서 동작하는 10개의 산화주석가스센서로 구성된 센서어레이로부터의 출력 신호가 동일기판위의 신호처리회로로 입력되어 4가지종류의 알코올과 연기를 구분할 수 있었다.

현재의 가스센서기술은 마이크로화 공정기술을 사용한 집적화 센서를 향한 전환점에 서있다고 필자는 생각한다. 현재와 가까운 장래에 마이크로 가스센서의 잠재적인 응용분야는 다음과 같이 요약될 수 있을 것이다.

(1) 대부분의 금속산화물가스센서는 제한적인 선택성을 가진다. 즉 특정한 한가지의 가스에만 반응하는 것이 아니라 일부가스에 대해 폭 넓게 반응한다. 이러한 금속산화물 가스센서의 선택성의 부족은 센서어레이와 보상회로로서 개선이 가능할 것이다.

(2) 센서어레이와 패턴인식기술의 결합은 가스센서의 적용범위를 특정가스누설의 감지에서부터 냄새의 구분으로 확대시키고 있다. 대부분의 경우 패턴인식공정에는 인공 뉴럴네트워크에 의한 학습과 미지의 냄새감지의 2가지 과정을 거치게된다. 이러한 방법들은 센서의 드리프트와 노이즈에 큰 저항성을 가지고 전통적인 방법보다 예고에러율이 낮은 경향을 나타내고 있다. 이러한 시스템은 공기 모니터링(환경모니터링)과 빌딩, 공장 및 자동차내의 냄새조절 외에도 다양한 식료품, 음료수, 알코올의 평가에 적용될 수 있을 것이다.

(3) 여러 종류의 센서(멀티센서)와 신호처리회로의 집적화는 총합제어시스템에 사용이 가능할 것이다. 예를 들면 가스, 습도, 온도, 압력센서와 신호처리회로를 한 칩위에 집적화하여 공기의 청정도, 습도, 온도를 동시에 측

정함으로서 실내와 차량내의 최적환경제어가 가능해질 것이다.

#### 4. 반도체형 마이크로 가스센서를 위한 제조기술

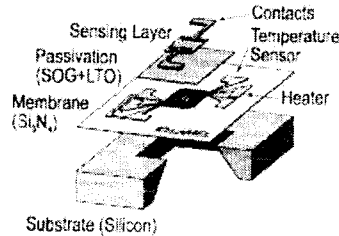
실리콘 웨이퍼위에 반도체형 마이크로 가스센서를 제조하는데에는 고려해야할 몇가지 중요한 문제가 있다. 이를 요약하면 아래와 같다.

##### (1) 열차단

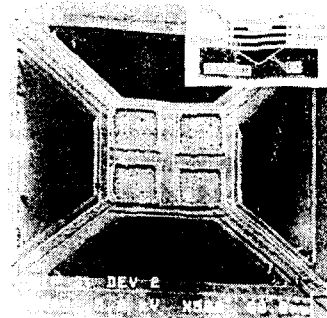
반도체형 가스센서는 가스와의 표면반응을 위해 100°C~500°C의 고온에서 동작하기 때문에 센서의 감지부분과 히터는 실리콘 웨이퍼의 다른 부분으로부터 열적으로 잘 분리, 독립되어야한다. 지금까지 2가지형태의 실리콘이 에칭된 다이아프램이 열차단구조로 널리 사용되어오고 있다. 즉, 실리콘 기판의 뒤쪽에서부터 이방성에칭을 하여 얇은 중심부분에 센서히터부분을 위치시키는 방법(그림1(a))과 위면으로부터의 에칭에 의해 실리콘의 마이크로브릿지를 형성하는방법(그림1(b))이다. 어떤 경우라도 센서부분과 히터는 다이아프램위에 형성되게 된다. 뒤쪽에서 에칭하는 구조는 제조의 편이성과 기계적인 강도가 우수하기 때문에 널리 사용되어오고 있다. 최근에는 마이크로브릿지 구조를 이용함으로써 감지막형성은 마스크없이 최종공정으로 수행하면서 그 이외의 공정은 상용의 CMOS집계소공정(주로 미국의 경우는 MOSIS)을 이용한 마이크로센서가 보고되고 있다[12].

실리콘다이아프램은 KOH나 EDP(ethylene diamine pyrocatechol)을 에칭용액으로 한 이방성에칭에 의해 형성되는데 이러한 기술들은 이미 압저항이나 압커패시터형 압력센서의

제조기술에서 일반적으로 통용되고있는 공정기술이다. EDP가 사용될때는 다이아프램의 두께는 고농도의 붕소층에 의해 쉽게 결정되어진다. 최근에는  $Si_3N_4$ 를 마스크로 했을 때 TMAH



(a)



(b)

그림 1. 센서의 열적분리를 위한 일반적인 센서구조

(a) 뒤쪽에서 에칭된 다이아프램형 구조

(b) 위면으로부터 에칭된 마이크로브릿지 구조

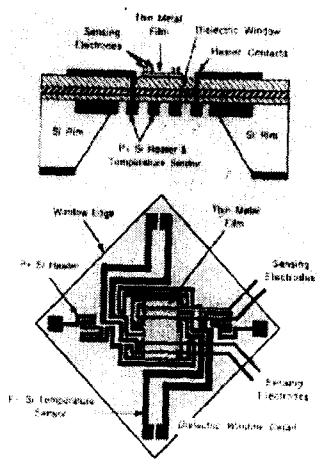
( $(CH_3)_4NOH$ )가 완벽한 선택적 이방성에칭을 나타낸다는 것이 알려져 이 용액을 이용한 이방성에칭이 널리 이용되고있다.

그러나 최근의 마이크로 가스센서의 제조에 있어서는 멤브레인 두께조절의 편이성과 열전도를 낮추기 위해 실리콘 다이아프램보다 질연막 다이아프램이 주로 사용되고 있다. 질산화막

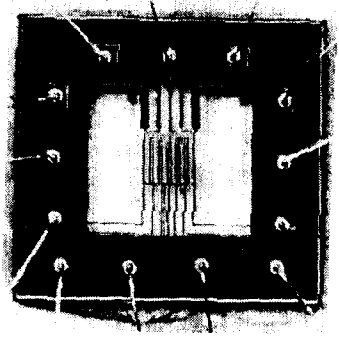
(oxynitride), 실리콘과잉질화막, 산화막-질화막-산화막, 실리콘산화막과 PSG(phospho-silicate glass)-질화막등이 절연멤브레인으로 사용되고 있다. 이러한 물질의 박막이 실리콘기판위에 형성되고 아래실리콘의 일부가 에칭되므로해서 다이아프램이 형성되게된다. 얻어진 다이아프램은 큰 열적스트레스 아래에서 수백도의 동작온도에 견뎌야하고 낮은 열전도도를 가져야 하며, 그 아래의 실리콘기판과 또 그 위에 형성되는 감지막과 결합력이 충분해야하며 적당한 기계적인 강도를 가져야한다.

##### (2) 히터

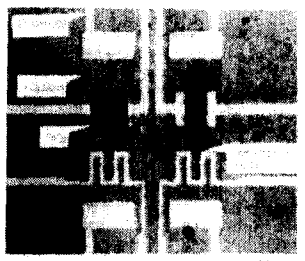
NiFe합금, SiC필름, 확산저항, 다결정실리콘 또는 에칭된 Pt패턴 등이 마이크로 가스센서의 히터로서 연구되어오고 있다. 이중 확산저항, 다결정실리콘, Pt패턴이 가장 널리 연구되어오고 있다. 확산저항형 히터의 경우, 히터와 함께 집적된 p-n다이오드가 온도센서로 사용되기도한다(그림2(a)). Pt히터에서는 온도측정Pt 저항체의 결합에 의해 히터의 온도를 측정해 가열온도를 제어할 수 있다(그림2(b)). 폴리실리콘히터의 경우는 주로 일반적인 IC공정과 공정호환성을 우선적으로 고려해야하는 곳에서 사용되고 있다(그림2(c)). 다이아프램위의 히터를 디자인하고 제조할 때 고려해야할 사항 중에는 열의 경제성, 즉 최소 소비전력에 의한 감지막 가열과 감지막 부위를 균일한 온도로 가열하는 일과 주위의 실리콘 벌크재료의 열확산을 최소로 줄이는 작업이 필요하다. 이러한 히터의 최적화를 위해 히터의 물질의 선택 못지않게 설계능력의 중요성이 되두되고 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 2. 여러 가지 형태의 히터구조

- (a) 확산저항 히터
- (b) Pt 히터
- (c) 폴리실리콘 히터

### (3) 가스감지박막

이상적으로 모든 금속산화물 박막은 마이크로센서의 가스감지박막으로 응용될 수 있다. 그러나 중요한 것은 그 박막의 가스감지특성뿐만 아니라 마이크로센서 제조와 공정의 호환성이다. 스퍼터링, Sn의 열증착에 의한 열산화, 금속유기화합물의 스프인코팅 등의 여러 가지 방법이 각각 장점과 단점을 가지고있기 때문에 부적합한 검지가스, 센서구조와 필요한 가스감지특성 등을 고려하여 적당한 물질과 박막형성방법을 찾아야할 것이다. 최근에는 물리적방법에 의해 형성된 금속산화물박막의 장기안정성 문제를 화학적인 박막형성방법인 솔 겔 스프인코팅에 의해 해결하고 그 박막형성방법을 마이크로 가스센서제조에 적용하려는 노력의 하나로 평면형 마이크로 가스센서가 제안되고있다[13].

### 5. 마이크로가스센서의 열해석

대부분의 금속산화물가스센서는 특정가스에 대한 높은 감도와 적당한 응답특성을 얻기 위하여 약 100°C에서 500°C사이의 온도에서 동작하고있다. 센서의 이러한 고온에서의 동작은 마이크로 가스센서의 제조에 있어서 사용될 수 있는 가능한 실리콘공정을 크게 제한시킨다. 즉, 예를들면 동일한 실리콘기판위의 주변회로로부터 열적으로 고립과 저전력소모를 위해 사용되는 가스감지막과 마이크로히터는 열적으로 차단된 형태를 취하여야된다. 앞절에서 언급했듯이 열고립을 위해서는 크게 두가지형태의 예칭된 다이아프램형태의 실리콘구조 즉, 뒷면으로부터 이방성예칭된 실리콘다이아프램이나[8] 위면으로부터 예칭된 마이크로브릿지형

의 구조를 가져야한다 [12]. 뒷면에서 예칭된 구조는 고정된 편이성과 높은 기계적인 강도 때문에 자주 이용되어오고 있다. 이상적인 열차단(열고립)은 가스감지막이 최적의 온도로 가열되면서 소자의 열손실이나 주변회로의 열피해의 방지를 위해 그외의 부분 즉, 실리콘 벌크나 패키징 부분은 실온을 유지하게 하는 것이다. 그러나 실제소자에서는 그런 이상적인 열전달은 기대하기 힘들다. 그럼에도 불구하고 소자구조의 최적화는 실제 제작된 소자의 열분포와 전력소모를 평가하기 위하여 매우 중요한 요소이다. 현재의 기술로서는 이러한 것을 실험적으로 해결하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 소자를 실제 제조하기 이전에 컴퓨터를 이용하여 마이크로센서의 열특성을 최적화하는 연구가 필요하게된다.

열분석의 중요성을 요약하면 다음과 같다.

(1) 감지박막의 온도는 가스감지특성 즉, 감도, 선택성 및 응답속도에 크게 영향을 주어서 감지막의 온도와 그분포특성이 정확히 평가되어야만 한다. 마이크로센서의 열특성은 히터와 절연층의 물질의 종류뿐만 아니라 기하학적구조와 크기에 큰 영향을 받는다. 컴퓨터시뮬레이션은 최적소자의 구조와 물질의 선택에 도움을 줄 것이다.

(2) 열적 절연을 위해 사용된 얇은 절연박막 맵브레인은 마이크로센서의 수명에 결정적인 영향을 줄 수 있는 거대한 열적스트레스에 노출되어 있다. 따라서 정확한 열해석에 의해 스트레스가 없는 다이아프램을 제조하는 것이 매우 중요하다.

마이크로 가스센서의 열해석

표 3. 가스감지와 관련되는 마이크로센서의 열 시뮬레이션

방 법			센서기능	센서구조	참고문헌 &년도
모델링	소프트웨어	사용장비			
2차원FEM	수학적인 모델	계산	반도체형 가스센서	다이아프램 구조(뒷면에칭)	14 (1987)
2차원FEM		컴퓨터	유체흐름센서	다이아프램 구조	(1992)
FEM	COSMOS	컴퓨터	반도체형 가스센서	다이아프램 구조	(1995)
FDM	자체개발한 소프트웨어	컴퓨터	IR센서	다이아프램 구조	(1995)
	HSPICE	컴퓨터	마이크로히터	마이크로 브릿지 구조	(1994)
	SPICE	컴퓨터	Pt초박막센서 (접촉연소식)	마이크로 브릿지 구조	(1994)
FEM	ANSYS	컴퓨터	반도체형 가스센서	다이아프램 구조	15 (1997)

\*FEM : Finite Element Method, FDM : Finite Differential

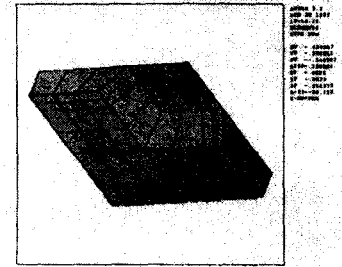
은 그 중요성에 비해 지금까지 많은 주목을 받지 못하였다. 몇가지 열해석의 사례를 표 3에 요약하였다. 1990년대 이래로 대부분의 열해석은 상업용의 소프트웨어제품에 의해 수행되어오고 있다.

국내에서는 필자 등에 의해 수년 전부터 상업용 범용 유한요소법 소프트웨어인 ANSYS를 이용한 마이크로센서의 열해석과 최적설계에 관한 연구가 수행되어오고 있다[15]. 그림 3은 전형적인 다이아프램구조 센서의 입체 열해석사진이다. PC용 소프트웨어의 한계를 고려해 대칭적인 구조의 1/4만을 시뮬레이션하고 있다.

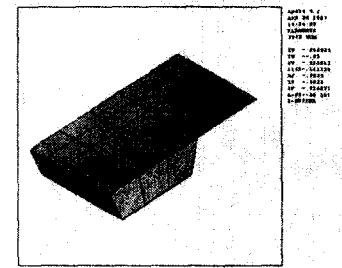
### 6. 결 론

실리콘 미소기술과 마이크로머시닝기술의 결합은 화학센서의 한 분야인 가스센서분야에도

큰 영향을 미치고 있다. 가스센서의 저전력화, 저생산비용, 표준생산, 소형화 등의 특성인 센서구조가 실리콘공정과 결합함으로써 가능해지고 있다. 이러한 실리콘 마이크로 가스센서 중에서도 장래의 전자코(다기능 가스(또는 향기) 인식시스템)에 의한 식료품, 음료수, 알코올의 평가나 지능형 환경제어시스템의 응용에 가장 적합할 것으로 여겨지는 금속산화물 감지막을 이용한 반도체형 마이크로가스센서의 연구개발동향과 그 기술적인 문제들을 살펴보았다. 최근 들어 이들 집적형 가스센서어레이가 신호처리회로와 결합됨으로서 가스인식시스템에서 획기적인 변화가 기대되고 있다. 이러한 활발한 마이크로 가스센서 연구에 의해 가까운 장래에 인간의 후각기능을 대체할 뿐만 아니라 인간의 후각기능의 단점을 극복하는 새



(a)



(b)

그림 3. 전형적인 마이크로센서의 열해석

- (a) 일반적인 FEM 모델
- (b) 센서표면의 온도분포도

로운 인공 후각기능의 개발과 식음료 및 인간감성에 적합한 환경친화적 센서시스템이 개발되길 기대해본다.

## 참고문헌

1. I. Lundstrom, M. S. Shivaraman and C. M. Svensson, "A hydrogen-sensitive Pd-gate MOS transistor", J. Appl. Phys., 46, pp. 3876-3881, 1975.
2. M. Parameswaran, H. P. Baltes, M. J. Brett, D. E. Fraser and A. M. Robinson, "A capacitive humidity sensor based on CMOS technology with adsorbing film", Sensors and Actuators B, 15, pp. 325-335, 1988.
3. C. Plog, W. Maunz, P. Kurzweil, E. Obermeier, C. Scheibe, "Combustion gas sensitivity of zeolite layers on thin-film capacitor", Sensors and Actuators B, 24-25, pp. 403-406, 1995.
4. T. Seiyama, A. Kato, K. Fukiishi and M. Nagatani, "A new detector for gases components using semiconductive thin films", Anal. Chem., 34, pp. 1052-1053, 1962.
5. N. Taguchi, Japan Patent 45-38200, 1962.
6. S. C. Chang and D. B. Hicks, "Tin oxide micro sensors on thin silicon membranes", 1986 IEEE Solid-State Sensors and Actuator Workshop, Hilton Island, SC, USA, June 22-25.
7. S. M. Gall, "The Si-planar pellistor array, A detection unit for combustible gases", Sensors and Actuators B, 15-16, pp. 260-264, 1993.
8. N. Najafi, K. D. Wise and J. W. Schwank, "A micromachined ultra-thin-film gas detector", IEEE Transactions on Electron Devices, 41(10), pp. 1770-1777, 1994.
9. V. Demarne and A. Grisel, "Comparison of the thermomechanical behavior and power consumption between different integrated thin film gas sensor structures", Proc. 4th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducer '87), Tokyo, Japan, June 2-5, pp. 605-609, 1987.
10. M. Holmberg, F. Winquist, I. Lundstrom, J. W. Gardner, E. L. Hines, "Identification of paper quality using a hybrid electronic nose", Sensors and Actuators B, 26-27, pp. 246-249, 1995.
11. D. Bednarczyk, S. P. DeWeerth, "Smart chemical sensing arrays using tin oxide sensors and analog winner-take all signal processing", Sensors and Actuators B, 26-27, pp. 171-274, 1995.
12. J. S. Suehle, R. E. Cavicchi, M. Gaitan and S. Semancik, "Tin oxide gas sensor fabricated using CMOS micro-hotplates and in-situ processing", IEEE Electron device Letters, vol.14, no.3, pp. 118-120, 1993.
13. W.-Y. Chung, D.-D. Lee, N. Miura and N. Yamazoe, "Fabrication of new planar-type micro sensor attached with spin-coated thin film of tin dioxide and its thermal and CO sensing characteristics", T. IEE-Japan, Vol. 118-E, pp. 147-153, 1998.
14. S. B. Crary, "Thermal management of integrated microsensors", Sensors and Actuators, 12, pp. 303-312, 1987.
15. 정완영, 임준우, 이덕동, 노보루 야마조에, 마이크로 가스센서를 위한 저전력 마이크로 히터의 제조-I. 유한요소법에 의한 열분포해석, 센서학회지, 6, pp. 337-344, 1997.

< 장 권의 이사 >