

실리콘 Thermopile 집적센서의 기술동향

朱炳權, 金炯坤, 吳明煥

韓國科學技術院 應用 物理 電子研究部

I. 서 론

미세전자(microelectronics)기술의 발달과 함께 마이크로 프로세서와 저가격 반도체 메모리소자를 중심으로한 고체전자소자의 응용범위는 의료용, 산업공정, 그리고 군사용에 이르기까지 급속히 확장되고 있으며, 초정밀 계측 및 제어시스템등에 의해 이들의 중요성이 잘 반영되고 있다. 그러나 대다수 계측시스템의 기술적 성장속도는 주변환경과 전자시스템을 접속하는 고기능 저가격센서의 개발에 결정적으로 제한되고 있으며, 최적의 기능/가격 조건을 갖춘 소형 전자 감지소자의 출현을 통해 전자공학 기술의 응용범위를 비 전자적인 분야로까지 크게 확장할 수 있을 것이다. 최근 이러한 기술적 중요성이 인식되어 마이크로 컴퓨터와 직접 접속할 수 있는 센서의 실현을 위해, 센서부와 신호처리부의 단일칩화를 목표로 하는 지능형 집적센서의 연구가 세계적으로 진행되고 있다.^[1]

이의 일례로서 현재 연구개발 수준이 초창기 단계라 할 수 있는 Si thermopile 집적센서는 반도체기술을 이용하여 열전쌍(thermocouple)들을 Si 기판상에 어레이형으로 구성한 소자로서 "Seebeck효과"에 의해 동작하며, 열 에너지영역의 신호를 전기 에너지영역의 신호로 변환하여 검출하고자 하는 것이다. 이 센서는 발달된 표준 IC공정에 의해 제작되므로 일괄처리공정에 따른 센서의 소형화, 균일화, 저가격화는 물론 VLSI형 신호처리부의 동시-단일칩의 구현이 가능하다. 또한 동작특성면에서 볼 때, 기전력의 자체발생효과로 오프셋 및 드리프트현상이나 잠음간섭 등이 적으며 외부전원의 공급이 불필요할 수도 있다. 아울러 Si의 Seebeck 계수가 상용되는 금속 재료에

비해 크며, 기계적으로 다양하게 가공된 Si의 미세구조를 이용하여 신호전달매체의 손실이나 전달속도의 지연등을 방지할 수 있으며, 다수의 열전쌍들을 직렬연결하므로 매우 높은 감도를 얻을 수 있다.

상술한 계특성들을 바탕으로 최근 각 기술선진국들의 학제나 연구기관에서는 발달된 반도체 공정기술을 thermopile형 센서에 응용하기 위해 열, 전기, 자기, 기계, 방사, 화학등 전 에너지영역에 걸쳐 활발한 연구를 수행중이다. 이들 연구의 결과로서 Si thermopile을 이용한 적외선 센서^[2,3], 진공센서^[4], 흐름센서^[5] 열변환기^[6-8]등이 연구개발 완료 단계에 있으며 금후 실용화될 전망이다. 이에 본 고에서는 상술한 현황을 고려하여 Si의 Seebeck 효과를 간략히 기술하고 집적화된 Si thermopile 센서의 동작특성, 제작방법, 응용도 및 전담등에 관해 포괄적으로 기술하고자 한다.

II. Si과 Seebeck 효과

1. Seebeck 계수

그림 1(a)에 보인 바와 같이 서로 다른 두 종류의 반도체 a와 b의 접합부가 고온이고 이 점과 저온부간에 ΔT 의 온도차가 존재할 때 저온부에 놓인 단자간에 전압 ΔV 가 발생하는 현상을 Seebeck 효과라 하며 다음식으로 표현된다.

$$\Delta V = \alpha \Delta T \quad (1)$$

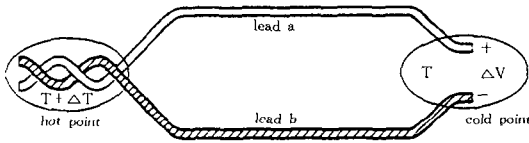
이때 α 는 Seebeck 계수로 V/K 의 단위를 갖는다. 한편 단일 반도체내의 양단간에 온도구배가 발생한 경우 벌크특성을 고려하여 ΔV 는 전기화학적 준위인 ϕ_f 로 나타나는데 ϕ_f 는 Fermi 에너지의 구배에 관계

된다. 즉,

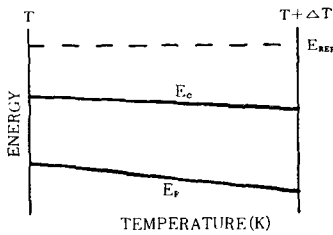
$$\phi_f = VE_f/q = \alpha VT \quad (2)$$

으로 주어지며 이때 α 는 재료의 화학적인 조성과의 온도에 의존한다. 예를 들어 Si의 경우 그림 1(b)에 보인 바와 같이 양단간의 온도차 ΔT 에 의해 Fermi 준위의 변화가 발생하며 이때 Si의 Seebeck 계수인 α_s 는 (2)식으로부터 온도에 따른 Fermi 준위의 기울기로 얻어진다.

$$\alpha_s = dE_f/qdT \quad (3)$$



(a) 온도차에 따른 Seebeck 전압의 발생



(b) 온도 구배에 따른 Fermi 준위의 변화

그림 1. Seebeck 효과^[9]

비축퇴형 Si일 때 Fermi 준위의 온도의존성에 중요한 영향을 미치는 효과는 다음과 같다.^[9] 첫번째는 온도가 증가할수록 Si이 보다 진성화가 되는 현상이다. 두번째는 온도변화가 전하운반자의 평균속도와 산란 확률에 영향을 미쳐 Si의 고온부 혹은 저온부에 전하 축적현상을 일으키는데 이는 온도에 따른 운반자의 평균수명에 관계한다. 세번째로 Si내의 온도차에 의해 고온부로부터 저온부로 포논의 흐름이 발생하여 저온부로 향하는 전하운반자들을 지연시키는 포논지연효과(phonon drag effect)이다. 이상의 세가지 효

과들을 모두 고려할 때 비축퇴형 Si의 Seebeck 계수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\alpha_s = -k/q \{ \ln(N_c/n) + 5/2 + S_n + \phi_n \} : n\text{형} \quad (4)$$

$$\alpha_s = k/q \{ \ln(N_v/p) + 5/2 + S_p + \phi_p \} : p\text{형} \quad (5)$$

이때, k , q , N_c , N_v , n , p 들은 각각 볼츠만 상수, 단위전하량, 전도대 및 가전자대의 상태밀도, 전자 및 정공농도이고 S 는 위에서 고려한 두번째 효과에서 운반자의 평균수명과 에너지간의 관계상수로 약 -1에서 2사이의 값을 가지며, 또한 포논지연효과 관계상수 ϕ_n 및 ϕ_p 는 Si의 불순물농도와 온도에 의존하여 0에서 100 사이의 값을 갖는다^[10].

현재까지 연구된 실험결과들을 살펴볼 때, 그림 2에 보인 바와 같이 상온에서 α_s 는 저항률의 함수로 주어진다. 이를 통하여 α_s 는 사용하고자 하는 Si 기판의 저항률 즉, 불순물농도에 의거하여 다음과 같이 실용적으로 간단히 근사화할 수 있다^[11].

$$\alpha_s = mk/q \ln(p/\rho_0) \quad (6)$$

단, ρ_0 와 m 은 상수로서 각각 $5 \times 10^{-6} \Omega m$ 와 2.6 정도의 값을 갖는다.

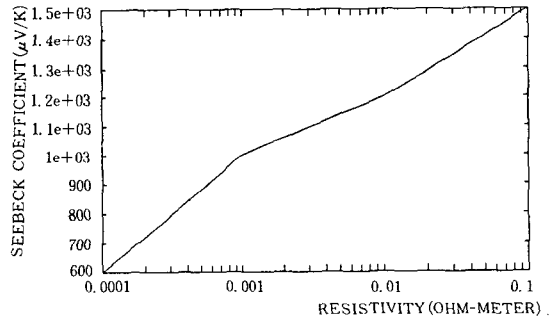


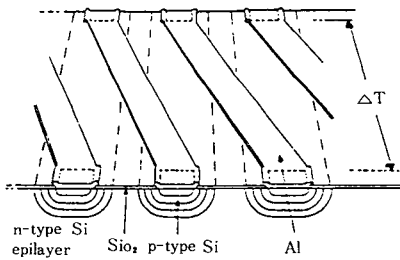
그림 2. 상온에서 Si의 저항률과 Seebeck 계수간의 관계^[6, 11-13]

2. 단결정 Si의 Seebeck 효과

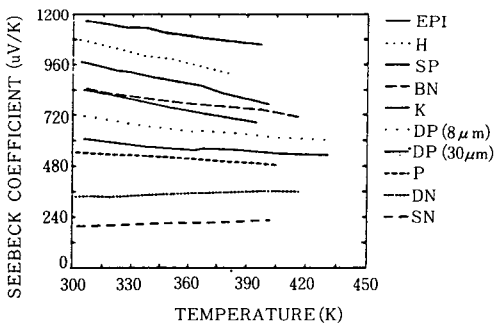
불순물농도를 달리한 벌크한 Si 단결정시편들의 Seebeck 계수들이 20~360K의 온도범위에서 측정되었다^[12]. 최근에는 IC공정을 이용한 thermopile의 제작을 위해 확산, 이온주입, 에피택시등의 공정을 통해 그림3(a)와 같이 Si-Al_s 스트립들이 직렬로 연결된

thermopile들을 제작하여 면저항, 접합깊이, 불순물침가 방법등에 따른 Seebeck 계수의 변화가 측정되었다^[13]. 이때 Si 스트립들은 각각 다음의 공정을 통하여 제작되었으며 측정된 Seebeck 계수의 값을 그림 3(b)에 나타내었다.

- n형 매몰 확산층(BN:R_s=20Ω/□)
- 얇은 p형 확산층(SP:R_s=200Ω/□)
- 얇은 n형 확산층(SN:R_s=7Ω/□)
- 깊은 p형 확산층(DP:R_s=9.5Ω/□)
- 깊은 n형 확산층(DN:R_s=5Ω/□)
- n형 epi층(EPI: R_s=400Ω/□)
- 붕소 이온 주입층(H:10¹³/cm²-150KeV, R_s=2500Ω/□, K:10¹⁴/cm²-150KeV, R_s=528Ω/□, P:10¹⁵/cm²-100KeV, R_s=90.6Ω/□)



(a) Si/Al 구조의 thermopile



(b) 각 IC공정별 Si 스트립에 대한 Seebeck 계수의 온도 의존성

그림 3. 집적화된 Si thermopile^[6, 11, 13]

이를 살펴보면 낮은 면저항을 가진 시편일수록 Seebeck 계수의 온도의존도가 낮다는 것을 알 수 있으며 측정치들은 앞서 Geballe등^[12]에 의해 얻어진 동일한 불순물 농도를 갖는 벌크형 시편의 경우와 일치한다. 또한, 그림 2에 보인 바와 같이 Seebeck 계수는 불순물 농도에 크게 의존하므로 Si내에서의 불순물 분포에 큰 영향을 받는다. 이 현상은 스트립 폭/접합깊이 비가 다른 시편들을 이용하여 조사되었으며, 예를 들어 그림 3(b)의 2개의 DP형 시편들은 각각 8 μm/10 μm와 30 μm/10 μm의 스트립 폭/접합깊이 비를 갖는 경우이다.

3. 다결정 및 비정질 Si의 Seebeck 효과

CVD 공정을 통해 증착된 다결정 Si과 Au박막을 직렬연결하여 구성된 thermopile에 대해 다결정 Si의 전도도에 따른 Seebeck 계수가 측정되었다^[2]. 측정결과를 살펴보면 붕소가 첨가되고 면저항이 60Ω/□인 두께 1 μm의 p형 다결정막의 경우 상온에서 약 117 μV/K의 Seebeck 계수를 나타내었으며, 인이 첨가되었을 경우 100Ω/□와 600Ω/□의 면저항에 대해 각각 -176 μV/K 및 -200 μV/K를 보였다. 이러한 다결정 Si을 thermopile용 재료로 이용하면 공정이 비교적 간단할뿐만 아니라 수율향상에도 도움이 될 것으로 보인다.

한편 비정질 Si의 Seebeck 계수는 Si:H막과^[14]과 Si:H:F막^[15]을 대상으로 하여 측정되었다. 인이 첨가된 비정질막은 200~500K의 온도범위에서 인의 농도 및 온도에 의존하여 -0.7~2mV/K의 값을 갖는다. 이때 Seebeck 계수의 값은 인의 농도와 온도에 반비례하나 온도증가에 따른 감소정도는 비교적 미소한 편이다. 불순물농도가 높은 비정질 Si:H:F막의 경우 Seebeck 계수는 n형과 p형에 대해 각각 180~210 μV/K정도였다. 이 값들은 금속과 마찬가지로 온도에 비례하는 현상을 보였는데 이는 Fermi 준위가 축소되었음을 의미한다. 상온에서 Seebeck 계수의 온도계수는 n형 및 p형에 대해 각각 0.8%/K와 0.7%/K로 매우 작은 값을 갖는다.

4. Seebeck 효과를 이용한 Si Thermopile의 구조

Si thermopile에 응용되는 Si의 미세구조에는 캔틸레버 빔과 다이아프램, 그리고 이들의 복합구조등의 있는데 이러한 구조들은 다음 장에 서술한 Si의 미세가공기술을 통하여 제작된다. 일례로서 그림 4에 빔형 구조와 원형 다이아프램 구조를 이용한 Si ther-

mopile 센서를 도시하여 비교하였다. 소자의 열용량을 감소시키고 열적 격리부분을 형성하기 위해 가열 저항이 위치한 반응부와 thermopile부는 모두 Si의 얇은 부분에 구성된다. 입력신호에 의해 반응부에서 발생한 열량이나 온도변화는 thermopile의 양단간에 온도차를 유발하고 이로인해 열 기전력이 발생한다. 발생된 열 기전력, 즉 thermopile의 출력전압 U_{tp} 는 다음과 같이 Si 구조의 기하학적 크기, 재료의 물리적 특성등의 함수로 표현된다^[4,9]

캔틸레버 빔 구조[그림 4(a)]:

$$U_{tp}(L) = N \alpha_s \Delta T_L = N \alpha_s RPL(1 - 1/3 \cdot GRL^2) \quad (7)$$

원형 다이아프램 구조[그림 4(b)]:

$$U_{tp}(R) = N \alpha_s \Delta T_R = 1/2 \cdot N \alpha_s PR_{st}(1 - 1/12 \cdot GRR_0^2) \quad (8)$$

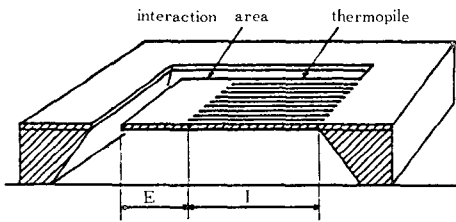
이때 N은 열전쌍의 갯수, ΔT_L 및 ΔT_R 은 반응부와 heat sink인 벌크부간의 온도차, R은 구조의 열저항, R_{st} 는 열적 면저항($K/W \square$), P는 반응부에 입력되는 열량, G는 주변분위기의 열전도도, L은 빔의 길이, R_0 는 원형 다이아프램의 반경을 나타낸다.

상술한 두 구조의 동작특성을 비교하여 볼 때 빔형 구조는 원형 다이아프램 구조에 비해 보다 우수한 몇

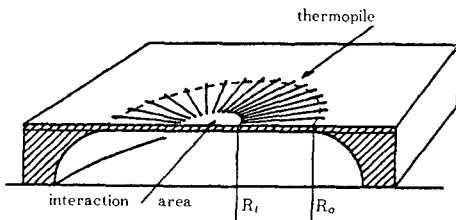
몇 특성들을 지니고 있다. 즉, $L=2R_0$ 로 동일한 칩면적을 고려하면 G의 함수로서 오프셋($G=0$ 일 때)에 대한 신호의 비는 빔형 구조일 경우 16배정도가 크며, 또한 R_s 가 2배정도 크므로 얻을 수 있는 출력전압도 이에 비례하여 크다. 아울러 제작면에 있어서 원형 다이아프램 구조일 경우 방사형으로 형성할 수 있는 열전쌍들의 수가 제한되어 있으므로 높은 감도를 갖는 소자의 제작이 어렵다.

III. Thermopile 센서의 제작에 응용되는 Si의 미세 가공기술

2-4절에서 언급하였듯이 신호의 손실 및 전달 지연시간을 가능한 줄이기 위해서는 센서가 형성될 Si 기판을 수~수십 μm 의 범위하에서 정밀식각하거나 혹은 일정영역의 Si를 주변부와 열 및 전기적으로 차단되도록 완전히 제거하는등의 기술이 필요하다. 아울러 제작된 센서가 고온의 거친 환경하에서 안정하게 동작하기 위해서는 정전 열접합이라는 특수한 패키징기술이 요구된다. 이상과 같이 Si 기판상에 2차원구조를 형성하는 평면공정에서 탈피하여 3차원적으로 다양한 기계식 가공공정을 행하는 기법을 Si의 미세가공기술이라하며, thermopile을 비롯한 Si센서연구의 활성화와 함께 점차적으로 확산 보급되고 있는 신기술 분야이다^[16-19].

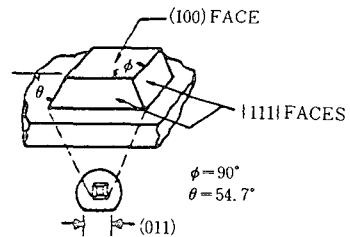


(a) 캔틸레버 빔형

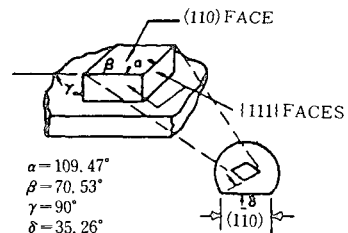


(b) 원형 다이아프램형

그림 4. Si thermopile 센서의 구조^[4]



(a) {100} Si



(b) {110} Si

그림 5. 단결정 Si의 비등방성 식각^[8]

표 1. Si의 식각 용액별 특성

식각액	조성비	온도 (°C)	식각률 (μm/min)	비등방성 (100)/(111) 식각률비	불순물농도 의존성	식각 마스크(식각률)				
Eth. D. Pyroc. Water	75ml	115	1.25	35 : 1	≥7×10 ¹⁸ cm ⁻³ 의 붕소 : 1/50×식각률	SiO ₂ (2 Å/min) Si ₃ N ₄ (1Å/min) Au, Cr, Ag, Cu, Ta				
	12gr									
	24ml									
	75ml									
	12gr	115	0.75	35 : 1						
	10ml									
	107ml									
	34gr									
	17ml	115	1.00	35 : 1						
KOH Water	44gr	85	1.4	400 : 1	≥10 ²⁰ cm ⁻³ 의 붕소 : 1/20×식각률	Si ₃ N ₄ SiO ₂ (=20Å/min)				
	100ml									
	50gr	50	1.5	400 : 1						
	100ml									
H ₂ N ₄ Water	100ml	100	2.0	비등방성	의존도 없음	SiO ₂ (2Å/min) Al				
	100ml									
	70-80ml	100	1.3							
	100ml									
NaOH Water	10gr	65	0.25~1.0	비등방성	≥3×10 ²⁰ cm ⁻³ 의 붕소 : 1/10×식각률	Si ₃ N ₄ SiO ₂ (7Å/min)				
	100ml									
HF HNO ₃ Water	10ml	22	0.7~3.0	등방성	≤10 ¹⁷ cm ⁻³ n/p형 : 1/150×식각률	SiO ₂ (30Å/min)				
	30ml									
	80ml									
	25ml						22	40.0	의존도 없음	Si ₃ N ₄
	50ml									
25ml										

1. 단결정 Si의 비등방성 식각

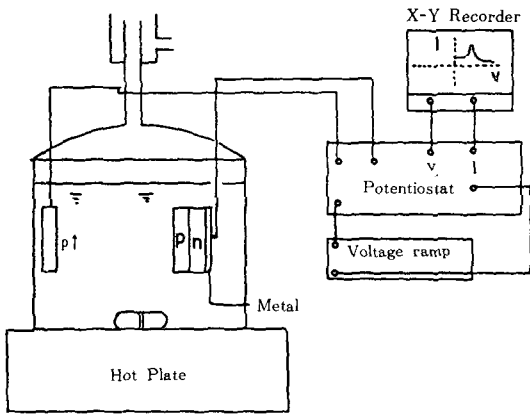
그림 5(a)와 같이 {100} Si를 비등방성 식각할 경우 식각면을 {111} 면에 일치시키기 위해 {110} 기준면에 대해 수평/수직으로 식각마스크를 정렬한다. 비등방성 식각용액내에서 각 결정면에 대한 식각률은 [100] - [110] - [111] 방향순으로 나타나므로 [111] 방향에서의 측면식각은 거의 일어나지 않으며 식각장벽으로 작용하는 {111} 면은 {100} 표면에 대해 54.7°의 경사를 뒀다. 이때 결정방향에 따라 식각률이 다른 이유는 각 결정면간의 Si 원자밀도 및 불완전 결합수 (dangling bond's number)의 차이에 기인한다.^[16] 그림 5(b)는 {110} Si를 비등방성 식각한 경우로서 {110} 면과 {111} 면이 직교하므로 표면에 수직인 식각구조가 형성된다. 일반적으로 비등방성 식각을 이용하여 단결정 Si를 미세가공할 경우, 식각마스크를 일정한 결정방향으로 정렬시키면 측면방향으로의 식각이 매우 적을 뿐 아니라 식각공정이전에 간단한 결

정확적인 모델링을 하여 식각 프로파일을 정확히 예측할 수 있으므로 Si 미세기체구조의 제작에 특히 유용하다. 단결정 Si의 식각용액별 식각특성을 표 1에 요약하였다.

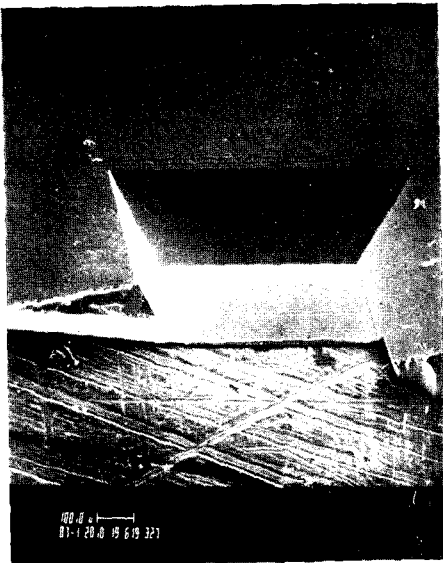
2. 전기화학적 자동식각정지

p-n 접합이 형성된 Si 웨이퍼를 HF수용액내에 넣고 바이어스를 인가하면 p형 기관만이 선택적으로 식각되는 효과는 Si의 세척(polishing)이나 박판화(thinning)등에 효과적으로 응용되어 왔다. 아울러보다 정교한 Si의 식각구조가 요구되면서 전기화학적 식각용액으로 EPW 용액, KOH수용액, N₂H₄수용액등의 비등방성 식각용액이 응용되기 시작하여 Si를 미세두께로 가공하는데 있어서 매우 효과적인 기술로 응용 개발되고 있다. 전기화학적 식각정지가 일어나는 반응기구는 다음과 같다.

(1) n형 epi Si이 성장된 p형 기관에 적당한 역 바



(a) 전기화학적 식각 장치



(b) 두께 20 μ m의 Si 다이아프램

그림 6. 단결정 Si의 전기화학적 식각^[17]

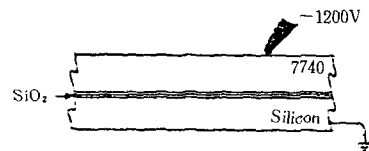
이어스를 인가하면 양극(n-Si)으로부터 음극(Pt 전극)으로 적은 양의 역방향 전류가 흐르고 식각용액내에서는 전계의 영향없이 p형 기판의 화학적 식각이 진행된다.

- (2) p형 기판의 식각이 완료되어 n형 epi Si층만 남게되면, p-n 접합부에서의 전위장벽이 소멸함에 따라 큰 순방향 전류가 용액내를 흐른다.
- (3) 이 전류에 의해 n형 epi Si표면에서는 양극산화가 일어나 이때 형성되는 SiO_x막이 식각마스크로 작용하여 식각이 종료된다.

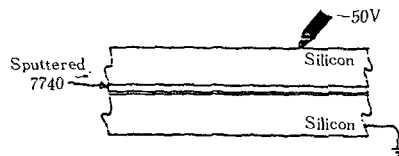
전기화학적 식각정지방법은 epi Si층의 두께를 변화시켜 구조의 두께를 임의로 조절할 수 있고, 식각 진행중 지속적인 관찰이 불필요할 뿐아니라 식각정지 후 용액내에 장시간동안 방치하여도 더 이상의 식각이 일어나지 않는 등의 장점을 지니고 있으므로 그 응용도는 계속 확장될 것이다. 참고적으로 본 연구실에서 수행한 전기화학적 식각실험에 있어서 식각장치와 제작된 두께 20 μ m의 n형 Si 다이아프램을 그림 6에 나타내었다.

3. 정전 열 접합

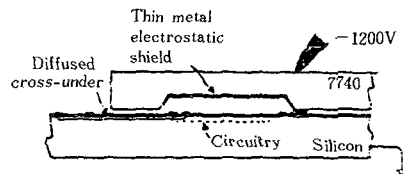
상용되는 IC소자의 경우 주위의 충격에서 보호하기 위해 대개 세라믹, 금속, 플라스틱등으로 패키징하고 있으나 센서는 자연발생적인 신호원에 직접 혹은 간접적으로 접촉되어 동작하므로 실질적으로 완전한 밀봉은 불가능하다. 특히 thermopile센서의 경우 접촉되는 신호원은 주로 열 에너지원이므로 신호처리부와의 단일칩화를 위해서는 센서부와 신호처리부간의 선택적인 고기능 밀봉이 이루어져야한다. 이를 위해 밀봉의 내부식성, 접합강도, Si이 받는 기계적 응력,



(a) 유리-Si 접합



(b) Si-Si 접합



(c) 회로보호용 접합

그림 7. 정전 열 접합(thermal electrostatic bonds)^[16]

밀봉매개물의 화학적 특성등을 고려하여 나름대로의 장점을 갖는 효과적인 센서패키징 기법들이 제안되어 왔다. 특히 정전포텐셜에 의한 열접합법을 이용하면 Si-Si 접합뿐이 아니라 유리-반도체, 유리-금속, 유리-박막, 유리-유리등을 접합매개물을 사용하지 않고 강하고 안정하게 선택적으로 접합할 수 있다⁽¹⁹⁾. Si-유리의 접합을 예로서 그 반응기구를 설명하면 다음과 같다.

- (1) Si과 유리를 400~500℃의 온도하에 접촉시킨 뒤 +500~+1500V 정도의 전압을 Si측에 인가하면 유리내에 존재하는 Na⁺, Li⁺이 Si-유리 접합부로부터 유리내부로 이동한다.
- (2) 따라서 Si과 유리사이의 계면에는 양이온 결핍 현상에 의해 강한 전기장(>10⁷V/cm)이 유도 되고 이는 350psi 이상의 강한 접합을 형성한다.

그림7(a)에 보인 바와 같이 Si-유리 접합의 경우 유리판을 경면연마된 Si 표면이나 SiO₂막에 접촉시키고 400℃정도로 가열하면서 Si에 1200V정도의 전압을 인가하면 Si-유리간의 강한 접합을 얻을 수 있다. 그림7(b)는 Si 표면에 스퍼터링된 유리박막층을 형성한 다음 Si-Si접합을 이룬 경우로 유리층의 두께가 얇아 필요한 전압은 50V를 넘지않는다. 그림7(c)는 공동이 형성된 유리를 회로가 구성되어 있는 Si 기판상에 접합하여 선택적인 회로보호용 밀봉을 이룬 경우이다. 이러한 정전 열 접합법은 공정 과정이 간단하고 오염물의 발생을 방지할 수 있을 뿐 아니라 Si과 열팽창계수가 비슷한 Corning #7740 BSG를 사용하면 접합부에 발생할 수 있는 기계적 장력을 막을 수 있다는 등의 장점으로 인해 앞으로 유용한 패키징 방법이다.

보다 소형의 높은 감도를 갖는 Si thermopile 센서를 개발하기 위해서는 언급한 Si의 미세가공 이외에도 다양한 기술들이 부수적으로 응용 개발되어야 한다. Al, Bi, Sb, Cu, Ni등 thermopile용 금속박막층은 진공증착이나 스퍼터링등을 통해 형성되며 다층 단결정 박막의 성장이나 소자보호막, 금속산화막, 무응력막등을 고순도로 증착하려면 각종 CVD 및 epitaxy기술이 필요하다. 이와 함께 다수의 열전쌍 어레이로 이루어진 thermopile 칩의 소형화를 도모하기 위해서는 정교한 양면 리소그래피가 필요한데, 최근 Si 집적센서의 개발동향에 편승하여 micron 단위의 양면정합기가 출현하고 있다. 또한 건식 및 습식식각을 이용

한 Si 미세구조의 제작이나 파이렉스를 비롯한 패키징 재료의 가공도 추가로 연구되어야 할 분야이다.

IV. Si Thermopile 집적센서의 응용

Si thermopile 센서는 앞서 서술한 미세가공기술과 IC 일괄처리공정을 통하여 Si 기판상에 소형 다량으로 제작될 수 있으며 신호전달매체로는 열신호를 이용한다. 측정될 수 있는 신호량에는 적외선의 파장 및 강도, 진공도, 유체의 유속 유량 및 흐름방향, 온도(차), 교류신호의 실효치, 반응 엔트로피등이 있으며 금속 방사적-열적 신호영역을 중심으로 그 응용 분야는 크게 확대될 전망이다.

1. 적외선 신호의 측정

일반적으로 적외선 감지소자는 열형센서와 광자형 센서로 나눌 수 있다. 열형센서에서는 흡수층에서 흡수된 적외선이 포논을 발생시킴으로써 격자온도의 변화를 초래하고 이로 인해 재료의 전기적인 특성이 변화하는데 반해 광자형센서에서는 흡수된 적외선이 직접 재료의 특성을 변화시킨다. 따라서 열형센서의 동작속도가 광자형센서의 배해 느린 감이 있으나, 고속 응답특성이 강하게 요구되지 않을 경우 광범위한 제

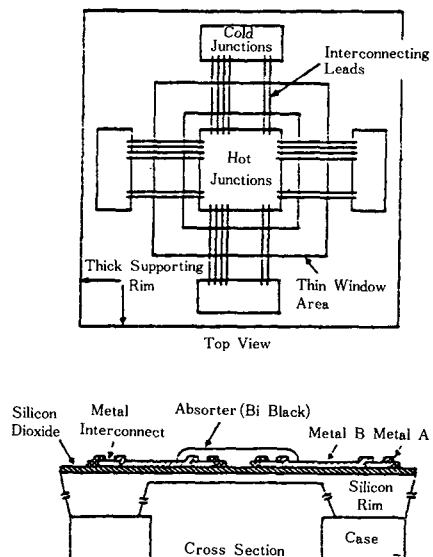


그림 8. 적외선 감지용 Si thermopile 센서의 예⁽²⁾

표 2. 발표된 박막형-적외선 감지용 Si thermopile 센서^[9]

열전쌍 갯수	재 료	침면적 (mm ²)	감 도 (V/W)	시정수 (ms)	thermopile의 저항 (k Ω)
6		1	15	80	8
15		0.78	23.5	32	3
12		0.78	9.5	40	3.25
60	Bi-Sb	0.36	6	15	36
60	(p)polySi-Au	0.36	7	15	
60	(n)polySi-Au	0.36	9.6	15	
32	(n)polySi-Au		20-25	25	73-82
32	(p)polySi-Au		52-56	25	220-280
54	Te-InSb	1	95	30	500
11	Te-Ag		1.1	300	70
50	Bi-Sb	1	30-50	15-30	20
44	(p)Si-A	7.3	10.6	128	50

측대역, 저 가격, 동작의 용이성, 동작환경의 변화에 대한 영향이 적다는 등의 장점을 갖는 열형센서가 상용되고 있다. 적외선센서의 응용분야로는 가스 분석기, 침입경보기와 같은 안전유지기구, 비접촉형 온도 측정기기, 분광계 등이 있다.

Si thermopile 센서중 적외선 센서는 연구 개발이 매우 활발한 분야로 그 구조를 살펴보면 다음과 같다. 고온접합부는 얇은 다이아프램상에서 흡수층과 접촉되어 있는데 이러한 구조는 열 및 전기적 손실을 가능한 방지하여 신호를 효과적으로 흡수할 수 있도록 한다. 이때 저온접합부는 heat sink 역할을 하는 가장자리의 두꺼운 부분에 위치한다. 그림 8에 Lahiji^[2]에 의해 제작된 적외선감지용 thermopile센서를 보였다. 열전쌍 재료로는 Bi-Sb와 다결정 Si-Au를 사용하였고 감도를 향상시키기 위해 SiO₂/Si 다이아프램상에 형성되었다. 동작특성에 있어서 감도면에서는 다결정 Si-Au쌍이 2배정도 향상된 특성을 보인 반면 Bi-Sb쌍을 이용할 경우 보다 미세한 신호를 측정할 수 있다. 또한 이를 이용하여 40개의 다결정 Si-Au쌍으로 이루어진 thermopile들이 16×2개로 상호 교차된 선형 어레이 구조가 발표되었는데 센서어레이의 주변에는 출력제어를 위한 MOS형 16:1 멀티플렉서, 보정용 저항 및 다이오드, 그리고 출력비교를 위한 트랜지스터형 온도센서등이 단일집적되어 있다^[3]. 표 2에 지금까지 발표된 박막형 thermopile 적외선 센서들의 동작특성을 요약하였다.

2. 진공도의 측정

임의의 폐쇄공간에서 두 지점간의 열전도도를 이용하여 내부압력을 측정하고자할 때, 공간내에 존재하는 기체분자의 평균자유행로가 두 지점간의 거리 즉, 센싱 소자의 기하학적 크기보다 클 경우 기체분자에 의한 열전도도는 공간의 절대압력에 비례한다는 물리적 효과를 이용할 수 있다. 이를 이용하여 최근 Herwaarden등^[4]은 그림 4(a)와 같은 구조로 Si상에 집적화된 thermopile형 진공센서를 제작하였다. 이는 캔틸레버 빔의 끝단부에 있는 반응영역을 전력 P로 가열시킨 다음 heat sink인 벌크부와의 온도차를 thermopile을 이용하여 측정한다. 이때 온도차의 정도는 기체분자의 열전도도인 G의 함수이며 G는 물론 폐쇄공간의 내부압력에 관계한다. 이 관계식은 앞서 주어진 식(7) 및 (8)과 같다. 제작된 센서는 면적 3.6×2.8mm², 두께 10 μ m의 Si 빔상에 반응영역인 p형 Si 저항과 Al-p형 Si 열전쌍들로 이루어진 thermopile로 구성되는데 1mPa로부터 10KPa까지의 진공도를 측정할 수 있다.

3. 흐름 신호의 측정

기체나 액체등의 유량이나 흐름방향등을 열적으로 측정하기 위해 가열된 표면으로부터 유체까지의 열전달 계수를 측정하는 방법이 널리 사용되는데, 이는 표면상에서 유체-경계층의 열적 특성을 이용하므로 경계층 방법(boundary layer method)이라 한다. 열전달 계수는, 표면에서 유체로 전달되는 열량과 표면-유체간의 온도차의 비로, 특히 유속에 크게 의존하는데 유체가 가열된 표면을 흐를 경우 유체의 가열로 인해 흐름의 상층부로 갈수록 크게 나타난다. 따라서 센서상에서 가열부를 형성하여 흐름내에 두면 흐름 방향에 일치하여 센서 양단간에 온도차가 발생하며 이를 측정함으로써 유체의 유량 및 흐름방향을 알 수 있다. 이 방법은 2차원적인 흐름변수도 측정할 수 있다는 장점이 있으나 열전달 계수가 센서의 기하학적 구조, 유체의 비열이나 흐름모양등에 크게 의존하므로 측정시 고려하여야 변수가 많다.

일반적으로 경계치 방법을 이용하여 Si 기관상에서 온도차를 측정하려면 열-전기 변환특성을 갖는 소자들을 기관상에 구성하여야 하며, 이들은 온도-저항률 관계를 이용하는 저항브릿지, 온도-pn접합특성 관계를 이용하는 다이오드, 온도-콜렉터전류 관계를 이용하는 트랜지스터회로, 그리고 Si thermopile 등이 있다^[5,9]. 특히 thermopile을 이용하면 오프셀 문제가 없을 뿐아니라 바이폴라공정을 이용하여 p형 저

항과 Al스트립만으로 이루어진 thermopile을 제작할 경우에도 개개의 열전쌍에 대한 감도는 0.5~1.0mV/K정도를 나타내므로 이를 다수개로 직렬연결하면 여타 소자들에 비해 매우 큰 감도를 얻을 수 있다.

4. 열 변환기에의 응용

비록 센서는 아닐지라도 thermopile의 유용한 응용 분야로써 열 변환기를 들 수 있는데 이는 전기신호를 열신호로 바꾼 뒤 소자내의 온도 변화 정도를 감지하여 전기신호의 양을 측정하는 소자이다. Kerkhoff등^[6]은 정현파신호의 크기를 측정하기 위해 Si 내에서의 Seebeck효과를 이용하였다. 또한 열전쌍이 부착된 저항선을 진공 유리구로 밀봉한 열 변환기들이 1ppm 정도의 오차범위하여 교류신호의 실효치 측정에 이용되어 왔다^[7].

최근에는 전기신호에 의해 발생한 열량을 다이오드, 트랜지스터, 그리고 Si thermopile등을 이용할 수 있는 집적화된 열 변환기가 보고된 바 있다. 예를 들어 Hocsternbach^[8]는 thermopile을 이용하여 집적화된 실효치 측정용 열 변환기를 제작하였다. 이는 두께 14 μ m, 지름 3mm인 원형 Si 다이아프램상에 형성되었는데, 중심부에는 가열저항이 있고 가장자리에 64개의 열전쌍으로 이루어진 thermopile이 방사형으로 구성되어 있다. 동작특성면에서 볼 때 수 백 ppm/K의 온도계수를 가지며 8.5V/W의 감도를 보인다. 또한 주파수특성도 우수하여 10MHz에서 0.1% 이하의 측정오차를 보였다.

상술한 분야 이외에도 Si thermopile 센서는 자계 및 화학적 신호영역에도 응용할 수 있다. 예를 들어 전계-자계-온도의 관계에 근거한 Nernst효과를 이용한다면 자계의 세기를 100 μ T 정도의 분해능으로 감지할 수 있다^[9]. 또한 얇은 산화막과 같은 다공질 반도체(porous semiconductor)나 금속박막의 일부분을 가연성 가스와 산소간의 반응에 의해 가열시킨 뒤 열량을 측정하면 가스의 연소비나 연소 열량등을 감지할 수 있다. 이러한 소자들은 동작이 용이하고 전력 소모가 적으며 상온에서 동작하므로 휴대용으로 사용이 가능하다.

V. 결 론

이상 thermopile을 이용한 Si 센서의 동작원리, 제작기술, 응용도 등에 대해 포괄적으로 다루어 보았다. 기술한 내용을 토대로 할 때 측정감도, 감지영역, 집

적도 등에 있어서 thermopile을 이용할 때 열 감지 동작 특성의 향상을 꾀할 수 있음이 확인되었으며 이를 위해 보다 정교한 Si의 미세가공기술이 수행되어야 함을 알았다.

또한 Si 집적센서의 개발에 있어서 센서의 다기능화 및 지능화가 궁극적인 목표인만큼 부가적으로 VLSI 회로-센서의 동시 설계 및 제작기술, 회로-시스템 접속기술등이 첨가되어야 할 것이다. 즉, 복수신호들의 동시감지를 위해 온도-압력, 적외선-접촉-온도, 진공도-유량, 유량-흐름방향-압력-온도등의 감지기능의 복합화가 이루어져야 하며, 센서부와 함께 VLSI형 신호처리부를 단일칩상에 형성하여 감지된 신호의 증폭, 변조, 연산, 신호의 전송기능 및 감지동작의 진단 보정기능을 갖는 지능형센서로의 접근이 시급하다.

상술한 제 접근방식을 바탕으로 초박막 및 소자제작기술, Si의 미세가공기술, 센서 패키징기술, 회로시스템기술등이 효과적으로 부합된다면 열 및 방사에너지영역의 정밀감지에 있어서 Si thermopile센서는 머지않아 주목받는 첨단 센서소자로 등장하게 될 것이다.

參 考 文 獻

- [1] W.R.Iversen, Electronics, p.54, 1989.
- [2] G.R.Lahiji et al., IEEE Tr. Electron Dev, vol. ED-29, no.1, p.14, 1982.
- [3] I.H.Choi et al., IEEE Tr. Electron Dev., vol. ED-33, no.1, p.72, 1986.
- [4] A.W.v.Herwaarden et al., Sens. Actuat., vol.8, p.187, 1985.
- [5] B.W.v.Oudheusden et al., Sens.Actuat., vol.16, p.109, 1989.
- [6] H.G.Kerkhoff et al., Proc.ESSCIRC, Southampton, U.K., p.31, 1979.
- [7] F.L.Hermach et al., IEEE Tr. Instrum. Meas., vol. IM-25, p.524, 1976.
- [8] H.P.Hochstenbach, Internal Report, EE Dept., Delft Univ. Technol., 1984.
- [9] A.W.v.Herwaarden et al., Sens. Actuat., vol.10, p.321, 1986.
- [10] R.R.Heikes et al., Thermoelectricity: Science and Engin.Interscience Pub., New York, 1961.

- [11] A.W.v.Herwaarden, *Ssens.Actuat.*, vol. 16, p.245, 1984
- [12] T.H.Geballe et al., *Phys.Rev.*, vol.98, p.940, 1955.
- [13] G.D.Nieveld, *Sens.Actuat.*, vol.3, p.179, 1982/83.
- [14] D.I.Jones et al., *Phil.Mag.*, vol.36, p.541, 1977.
- [15] S. Kodato et al., *J.Non-Cryst.Solids*, vol.59/60, p.1207, 1983.
- [16] K.E.Peterson, *Proc.IEEE*, vol.70, no.5, p. 420, 1982.
- [17] B.K.Ju et al., *J.KIEE*, vol.26, no.11, 1989.
- [18] A.I.Stoller, *RCA Rev.*, p. 271, 1970.
- [19] G.Wallis et al., *J.Appl-Phys.*, vol.40, no.10, p.3946, 1969. (19)

筆者紹介



朱炳權
 1962年 12月 2日生
 1986年 2月 서울시립대 전자공학과 졸업
 1988年 2月 서울시립대 대학원 전자공학과 공학석사

1988年 2月~현재 KIST 응용전자연구실 연구원.
 주관심분야 : 실리콘 미세가공 및 지능형 집적화 마이크로 센서.



吳明煥
 1943年 6月 10日生
 1965年 서울대학교 전기공학과 졸업
 1972年 서울대학교 대학원 전기공학과 공학석사
 1979年 프랑스 Paul Sabatier Univ. 전기공학과 공학박사

1976年~1979年 프랑스 CNRS Lab. Génie Electrique 연구원

1986年~1987年 미국 North Carolina Univ. 객원 연구원

현재~KIST 응용물리·전자연구부 책임 연구원, 연구부장

주관심분야 : 금속-산화물 반도체, 평판표시장치, 지능형 집적화 마이크로 센서



金炯坤
 1952年 4月 5日生
 1974年 한국항공대학 전자공학과 졸업
 1983年~1985年 영국 Kent Univ. 공학석사 및 박사학위 취득.

현재~KIST 집적시스템연구실 책임연구원 및 연구실장

주관심분야 : VLSI 아키텍처 디자인 및 지능형 집적화 마이크로센서.