

열전 효과를 이용한 적외선 센서와 응용

주 병 권 오 영 제
한국과학기술연구원 재료연구부

1. 서 론

온도나 적외선과 같은 열 신호를 감지하는 열 센서는 동작 원리에 따라 Table 1에 보인 바와 같이 bolometer 소자, pyroelectric 소자, pneumatic 소자, 그리고 thermopile 소자 등으로 구분된다. Bolometer 소자는 저항체의 온도 계수 변화, pyroelectric 소자는 초전 효과(pyroelectric effect), pneumatic 소자는 열에 의한 기체의 팽창을 이용하며, 출력은 각각 저항 변화, 전하/전류 변화, 그리고 membrane의 휨 등으로 얻어진다. Thermopile 소자는 복수 개의 열전쌍(thermocouple)들을 직렬 연결시킨 소자로서 Seebeck 효과에 의해 동작하며, 출력이 전압으로 얻어진다. 열전쌍은 Fig. 1에 보인 바와 같이 한 쪽이 연결된 두 종류의 금속 선으로 이루어지며, 양단에 온도차가 일어날 경우 Seebeck 계수의 차($\alpha_1 - \alpha_2$)와 온도차(ΔT)에 비례하는 전압(ΔV)이 연결되지 않은 단에서 나타난다. 이러한 열전쌍들을 N 개의 수 만큼 직렬 연결하면, 총 출력 전압의 변화는 $\Delta V = N(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T$ 가 된다.

Si-Thermopile은 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술과 IC(Integrated Circuit) 집적화 기술을 사

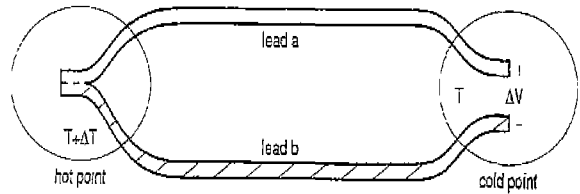


Fig. 1. 열전쌍의 동작 원리

용하여 가공된 Si 웨이퍼 위에 열전쌍들을 박막 형태로 구성된 소자이다. 즉, Fig. 2에 보인 바와 같이 열 손실을 방지하기 위해 미세 가공된 Si 구조물 위에 박막형 열전쌍들이 직렬로 연결되어 있으며, 고온부에 입사되는 열 신호가 저온부에서 전압으로 검출된다.

이러한 Si-thermopile의 특징으로는 개별 열전쌍의 낮은 감도(0.5~1 mV/K 정도)를 복수 개의 직렬 연결에 의해 증가시킬 수 있고, 오픈 셋에 의한 왜곡이 적고, 출력 신호가 전압이므로 회로 구성이 간단하고, 동작 온도 범위가 넓으며, 표준 반도체 공정을 이용하여 일괄 제조되므로 신뢰성, 재현성, 그리고 생산성 면에서 우수한 점을 들 수 있다. 이를 토대로 하여 다양한 센서 소자로서 응용될 수 있는데, 적외선 센서로서 군수 기기(야간 투

Table 1. 열 센서의 종류

Detector	Heat Sensing	Output
Bolometer	TC of resistance	Resistance change
Pyroelectric	Pyroelectric effect	Charge / current
Pneumatic	Gas expansion	Membrane deflection
Thermopile	Seebeck effect	Voltage

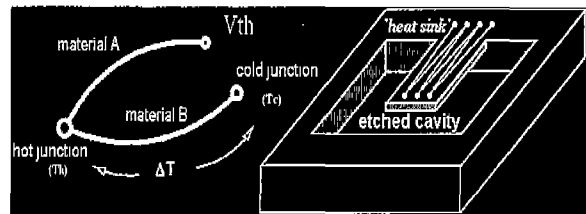


Fig. 2. Si-thermopile의 개념



시, 미사일 추적), 보안 기기(전물 통제, 침입자 감지), 방사 온도계(마이크로 웨이브 오븐, 토스터), 차량용 감지기(후방 감지), 의료 기기(열상 진단기) 등을 비롯하여, 열 변환기(RMS converter, ac-dc standards, 전력계), 집적 센서류(흐름, 압력, 진공, 위치, 화학, 가스 센서), 그리고 재료의 열적 특성 분석 기기(열 전도도, Seebeck 계수, 열 용량 측정) 등에 활용될 수 있다.

2. 주요 기술

Si-thermopile을 개발하는 과정에 있어서 주요 기술로는 열전쌍 재료 기술, 고온부의 열 흡수층 기술, 열적 절연을 위한 마이크로 구조체 가공 기술, 회로 집적화 기술, 조립 및 패키징 기술, 그리고 특성 평가와 관련된 기술 등을 들 수 있다.

2-1. 열전쌍 재료

열전쌍에 이용되는 주요 재료들과 Si에 대한 Seebeck 계수, α_s 를 Table 2에 나타내었다. Si-thermopile에서는 Seebeck 계수와 함께 반도체 공정에 대한 친화성도 고려하여, Al-p형 Si, Al-다결정 Si, 다결정 Si-Au 등이 주로 사용된다. 예를 들어 P나 B가 도핑된 다결정 Si의 경우, $0.4 \mu\text{m}$ 의 두께와 $250 \sim 2,500 \Omega$ 의 면저항을 가질 때 $\alpha_s = \pm 200 \sim \pm 500 \mu\text{V/K}$ 를 얻을 수 있다.

2-2. 열 흡수층

열(적외선) 흡수층의 경우, 정해진 파장 대역 내에서

방사(radiation) 에너지를 열 에너지로 변환시키는 역할을 한다. 이때 시정수를 감소시키기 위하여 막의 두께는 가능한 얇아야 하고, 측정 파장 범위 내에서 흡수 정도는 높은 반면에 반사율 및 투과율은 낮아야 한다. 일례로 인체 감지의 경우 측정 파장은 $2 \sim 14 \mu\text{m}$ 대역에 해당한다. 열 흡수층으로는 주로 금속 박막이 사용되는데, 전기 화학법으로 형성되는 다공질 Pt black이나 저진공 질소 분위기에서 증착되는 금속막 등이 이에 해당한다. 아울러 다층 박막 구조에 의한 샌드위치형을 적용할 경우 패터닝에 의한 평균 흡수 정도를 조절할 수 있으며, 표면 미세 가공에 의해 제조되는 interferometric 흡수층 구조도 있다.

2-3. 마이크로 구조체

마이크로머시닝 기술이 적용되는 구조체의 경우, 고온부에 흡수된 열이 하부 기판으로 손실되는 것을 방지하며, 이는 소자의 감도를 향상시키기 위하여 반드시 필요하다. Si-thermopile에서 사용되는 열적 절연용 마이크로 구조체의 종류를 Fig. 3에 보였는데, 고온부는 열의 보호를 위해 얇게 가공된 부분의 중앙이나 끝 부분에 형성되고 저온부는 열의 방출을 위해 두꺼운 벌크 부분에 만들어 짐을 특징으로 한다. Membrane은 주로 매우 얇은 Si 층이나 혹은 단층 및 다층 구조의 절연막(oxide, oxide-nitride-oxide)으로 이루어지며, 원형, 사각형 등의 형태를 취한다. Floating membrane과 cantilever의 경우도 마찬가지이며, Fig. 2는 벌크 마이크로머시닝을 이용한 구조체이다. 표면 마이크로머시닝 등이 적용됨으로써 더욱 정교하고 효과적인 구조를 형성하기도 한다.

Table 2. 금속 및 Si의 Seebeck 계수 [$\mu\text{V/K}$]

재료	273K	300K	273K~373K (평균치)
Aluminum (Al)		-1.7	
Antimony (Sb)			43
Bismuth (Bi)			-79
Chrome (Cr)	18.8	17.3	
Copper (Cu)	1.70	1.83	
Gold (Au)	1.79	1.94	
Nickel (Ni)	-18.0		
Platinum (Pt)	-4.45	-5.28	
n형 다결정 Si		-200~500	
p형 단결정 Si		300~1,000	

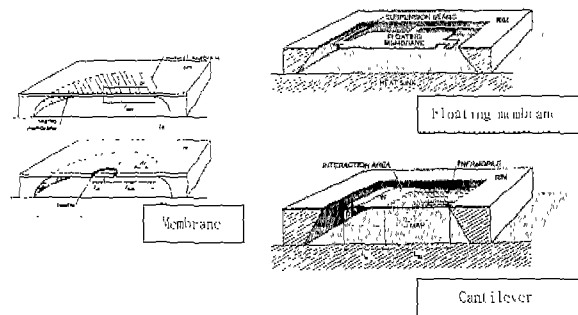


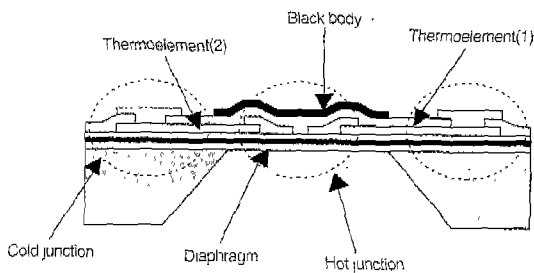
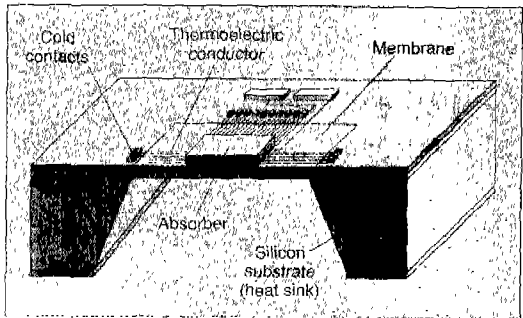
Fig. 3. Si-thermopile 용 마이크로 구조체



Fig. 4. 절연막으로 이루어진 마이크로 구조체의 휨 현상

Si-thermopile의 마이크로 구조체를 제작하는데 있어서, 구조물의 재료와 두께, 크기 등의 기하학적 모양은 열 차단 성능, 지지 강도, 그리고 응력에 따른 변형 등을 고려하여 설계, 제작되어야 하며, 이 외에도 습식 가공 과정에서 앞면 회로부의 보호 기능, 어레이 구현을 위한 대면적 membrane의 가공 등이 부가적으로 개발되어야 한다. 일례로서 하중과 응력 등에 의하여 휨 현상이 발생한 절연막 구조체의 모양을 Fig. 4에 보였다.

현재까지 기술한 내용인 열전쌍 및 열 흡수층 형성, 그리고 마이크로 구조체 가공에 의해 제작된 Si-thermopile의 일반적인 구조를 Fig. 5에 나타내었다. 즉, 벌크 마이크로머시닝에 의하여 가공된 ONO(oxide-nitride-oxide) 절연막 membrane 위에 열전쌍 어레이들이 직렬 연결되어 있으며, 고온부에는 열 흡수층이 형성되어 있다. 저온부는 가공되지 않은 기판 위에 위치하며, 온도



The cross-sectional sketch of the thermopile

Fig. 5. Si-thermopile의 기본 구조

Table 3. CMOS 회로용 재료의 열 센서 응용도

Materials	Use
Metal layer	IR reflector
	Mechanical building block
	Thermal conductor
	Thermal mass
	Thermopile component
Passivation	IR absorber
	Mechanical building block
	Thermal isolation
Polysilicon	Thermal mass
	Heating resistor
	Mechanical building block
	Temperature monitor
	Thermal conductor
Silicon dioxide	Thermal mass
	Thermopile component
	Mechanical building block
	Thermal isolation
	Thermal mass

차이로 인한 열전 전압(thermoelectric voltage)을 출력하기 위한 전극들이 저온부에 구성된다.

2-4. 회로 집적화

Si-thermopile은 재료 및 전기적인 특성을 고려할 때, CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 회로와의 친화성이 높다. CMOS와의 집적화를 통하여 신호처리 기능은 물론 시스템의 저전력화 및 초소형화를 이룰 수 있으며, 따라서 배터리 구동과 포켓형이 가능하게 된다. Table 3은 CMOS 회로용 재료(박막)가 Si-thermopile을 비롯한 열 센서부에 사용될 수 있는 용도를 정리한 것으로, 실리콘 산화막은 열적 절연체 역할을 할 수 있으며, 다결정 Si와 금속층은 열전쌍 재료와 가열원, 열 전도체 등으로 활용이 가능하다.

2-5. 조립 및 패키징

회로가 집적화 된 경우에는 MEMS 센서의 일반적인 패키징 개념에 따라, 센서부와 회로부의 선택적인 노출 및 보호 기능이 적용되어야 하나, 회로 집적화가 이루어지지 않은 경우에는 일반적으로 Fig. 6에 보인 바와 같이 Si-thermopile 소자를 헤드 위에 탑재하고 와이어 본딩을 한 후에 용도에 따라 캡을 덮는다. 이때 적외선 센

써모파일의 구성

써모파일 센서는 열전쌍, 흑체, 적외선 투과창, 온도보상 소자(부저창 세미스터)와 TO-39 금속 패키지 등으로 구성되어 있다.

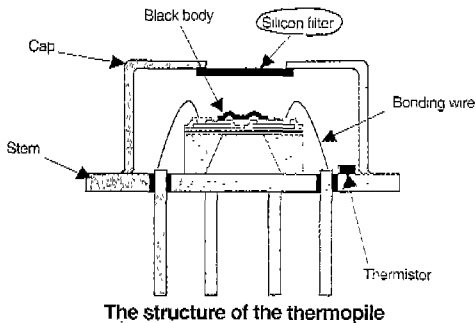


Fig. 6. Si-thermopile을 이용한 적외선 센서의 기본 패키징 구조

서로 사용하고자 하면 원하는 파장 선택도를 갖는 적외선 필터가 설치된 캡을 사용한다. 적외선 필터로서 실리콘 기판을 주로 사용하는 점을 고려하여 Si-thermopile을 적외선 필터와 접합하여 일체화 시킨 사례도 보고되고 있다.

2-6. 동작 특성의 평가

Si-thermopile의 동작 특성은 온도차에 대한 출력 전압을 기본으로 하여, 어떠한 용도로 사용하는가에 따라 측정 인자를 달리한다. 가장 일반적으로 활용되는 분야인 적외선 센서에 있어서는 감도, 잡음, 시정수, 주파수 응답 등이 주요 인자가 되는데, 감도는 센서에 입사되는 단위 방사(radiated power)에 대한 출력 전압의 크기로 정의된다. 감도는 적외선 필터의 투과도, 흡수층의 흡수 정도, 그리고 센서 패키지의 열 특성 등에 의존하며, 일반적으로 5 ~ 100 V/W 정도의 값을 가진다.

잡음의 경우, 0 ~ 100 Hz의 범위 내에서 잡음(V_n)은 총 내부 저항(R)의 열 잡음에 의해 주로 결정되며, 이는 $V_n = (4kTR)^{1/2}$ (k : 볼츠만 상수, T : 온도)로 얻어진다. 상온에서는 일반적으로 10 ~ 50 nV/Hz^{1/2} 정도의 값을 가진다. 시정수(τ)는 입력이 변화했을 때 출력 신호가 최종치의 63%에 이르기까지의 시간에 해당하며, 일반적으로 10 ~ 100 ms의 값을 가진다. 이 외에 주파수 응답은 사용된 재료의 열 전도도, 칩의 구조, 그리고 하우징의 열 특성에 주로 관계하며, 5 ~ 10 Hz가 한계이다. 일례로 Fig. 7에 Si-thermopile 적외선 센서의 감도를 측

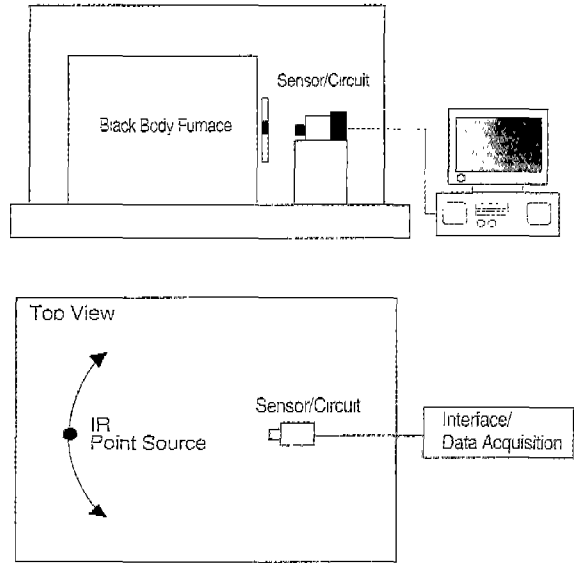


Fig. 7. Si-thermopile 적외선 센서의 감도 측정을 위한 구성도와 측정 일례

정하기 위한 구성도와 입사각에 따른 감도 측정 방식을 보였다.

2-7. 주변 기술

이상 언급한 부문 이외에도 Si-thermopile이 적외선 센서를 비롯한 제반 소자로서 활용되기 위해서는 다양한 주변 기술들을 필요로 한다. 예를 들어 열 이미지를 얻기 위해서는 센서 어레이 구성 기술이 이루어져야 하는데, 여기에는 멀티플렉서 등과 같은 회로 집적화 기술 이외에도 대면적 membrane의 가공, 픽셀간의 열적 절연 및 분해능 향상을 위한 최소 선폭 가공 등이 요구된다. 이와 함께 열 센서로서 감도를 증가시키고 분해능을 향상시키기 위한 마이크로 렌즈 어레이 기술, 선택도 및 투과도가 우수한 적외선 필터 기술 등이 개발되어야 한다.

3. 연구 개발 동향 및 응용 분야

Si-thermopile의 응용 분야는 열(적외선) - 전기적 변환 기능을 바탕으로 하여 적외선 센서, 물리 센서(가속도, 흐름, 진공 등), 바이오-화학 센서(반응, 열량 등), 전

가-열 변환기(RMS 변환기, 열전 발생기 등), 열 이미지 센서(thermal imager) 등과 같이 매우 다양하다. 이들 각각에 대하여 최근 발표된 개발 결과들을 중심으로 다루어 보면 다음과 같다.

EG&G Heimann(USA)에서 개발된 Si-thermopile 적외선 센서 제품(TPS 모델)을 Fig. 8에 보였다. 이는 Si의 벌크 마이크로머시닝에 의해 제조되며, 1 μm 두께의 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ membranc 위에 40여 개의 다결정 Si-Al 열전쌍과 적외선 흡수층이 형성되어 있다. 주파수 특성을 살펴보면, 약 5 ~ 10 Hz 범위에서 1/f 감소가 일어나는데, 이는 내부 구조나 하우징 등의 열 특성에 의존한다. 이러한 소자는 가전 및 산업용 비접촉 온도 측정이나 가

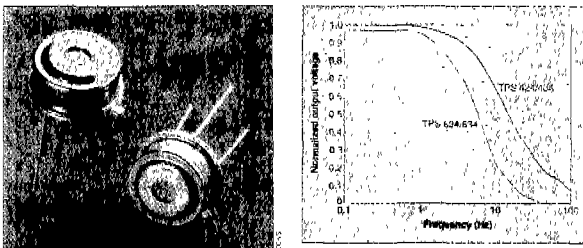


Fig. 8. Si-thermopile 적외선 센서 (EG&G Heimann-1995)

스 모니터링 등의 용도로 사용할 수 있다.

Meggitt Avionics(USA)에서 개발된 적외선 센서들을 Fig. 9에 나타내었는데, 비접촉 온도계, 방사계, 가스 분석 기기, 그리고 화염 빛 침입자 경보계 등에 사용할 수 있다. 이는 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 의 영역 내에 20 ~ 100 개에 이르는 박막 열전쌍들이 집적화 되어 있으며, 0.2 ~ 50 μm 영역의 응답 스펙트럼을 가진다. 또한, 약 200°C에 이르기까지 동작이 가능하고, 감지 가능 각도는 약 100°이

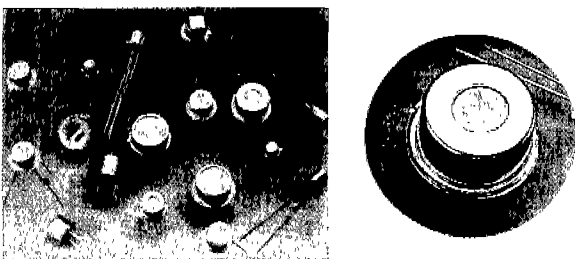


Fig. 9. 박막 열전쌍 어레이를 이용한 적외선 센서 (Meggitt Avionics-1996)

며, 동작 특성에 따라 10여 종류의 소자를 개발하여 제공하고 있다. 특히 NDIR(Non-Dispersive Infra Red) 계측기에 설치되어 의료용 진단, 자동차용 배기 가스 분석, 에어 컨디셔닝, 그리고 공정 제어 등에 활용 가능하다.

Thermometrics Technologies(Korea)에서 개발된 적외선 센서 제품을 Fig. 10에 나타내었다. 이는 Si 벌크 마이크로머시닝 기술에 의해 제조되며, 사용 파장 대역에 따라 응용도를 달리한다. 즉, Si 필터를 사용하는 $\lambda = 6 \sim 14 \mu\text{m}$ 에서는 자동차의 타이어 온도나 에어 컨디션 전자 렌지, 그리고 인체 감지용으로 사용되며, 사파이어 필터를 사용하는 영역인 $\lambda = 2 \sim 5 \mu\text{m}$ 에서는 화염 감지용으로 이용된다. 또한, CaF_2 필터를 사용하는 $\lambda = 1 \sim 10 \mu\text{m}$ 범위에서는 화염 감지, 열 분석 기기와 같은 분석 장비용으로

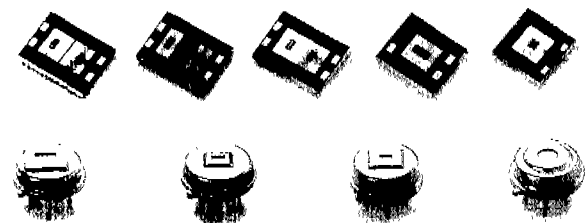


Fig. 10. Si-thermopile 적외선 센서 (Thermometrics Technologies-2000)

로 응용이 가능하다.

TIMA(France)에서 개발된 CMOS Si-thermopile을 이용한 흐름 센서를 Fig. 11에 나타내었는데, 이를 이용하면 기체 흐름의 속도와 방향을 측정할 수 있다.

즉, floating membrane 위에 4 개의 가열 저항체가 있고, 기관과의 연결 부분에 각각 thermopile이 구성되어 있다. 기체의 흐름에 의해 열 평형 상태의 대칭 구조가 변화하고, 이를 측정함으로써 흐름의 속도와 방향이 얻어진다.

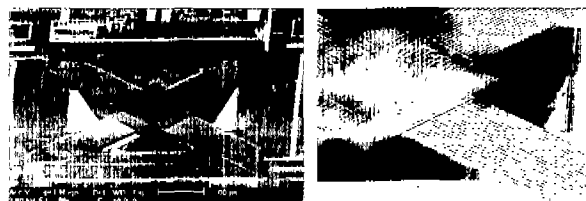


Fig. 11. Si-thermopile을 이용한 흐름 센서(TIMA-1999)

IMEC(Belgium)에서 개발된 바이오용 대면적-고감도 Si-thermopile 센서를 Fig. 12에 보였다. 이는 대면적(20 ~ 25 cm²) rubber membrane 위에 666 개의 Al-p⁺ 다결정 Si 박막 열전쌍들이 형성된 구조로 되어 있으며, 25 V/W의 높은 감도를 갖는다. Si 기판의 벌크 마이크로머시닝에 의해 제작되었는데, 대면적이므로 열전쌍의 수를 증가시킬 수 있고, 열적 절연이 우수한 rubber membrane 재질을 이용하였으며, 유연성이 있어 높은 감도를 필요로 하는 바이오 및 유체 시스템 등에 효과적으로 적용할 수 있다.

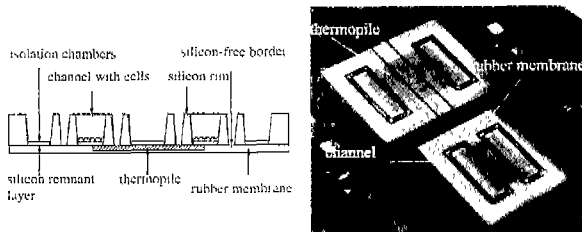


Fig. 12. 바이오용 고감도-대면적 온도 센서 (IMEC-1999)

ETH Zurich(Switzerland)에서 개발된 CMOS 형 화학 반응용 열량 센서의 구조를 Fig. 13에 보였다. 화학 반응에 따른 온도 변화가 다결정 Si-Al thermopile에 의해 측정되며, 이를 통하여 발열 및 흡열 반응의 정도, 반응물의 농도 등을 감지할 수 있어 전자 코 등에 이용될 수 있을 것으로 보인다.

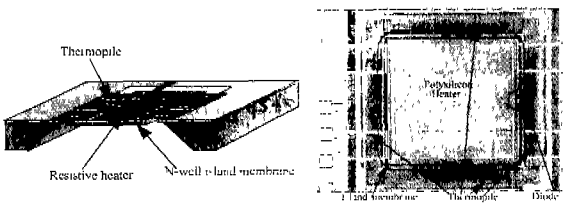


Fig. 13. CMOS 형 화학 반응용 열량 센서 (ETH Zurich-2000)

TIMA(France)에서 개발된 전기-열 변환기를 Fig. 14에 보였다. 이러한 소자에 의하여 입력 전류가 열로 변환되고, 열이 전압으로 변환된다. 표준 CMOS 공정에 의해 제작되고, 열의 손실을 방지하기 위한 구조체, 가열 저항, 온도 측정용 thermopile로 이루어져 있으며, 전기-열 회로 차단기 등에 이용할 수 있다.

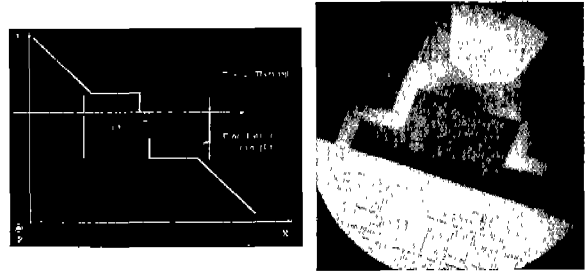


Fig. 14. 전기-열 변환기 (TIMA-1999)

ETH Zurich(Swiss)에서 개발된 것으로, Si-thermopile을 이용한 비냉각 방식의 열 이미지 센서를 Fig. 15에 보였다. CMOS 공정과 MEMS 공정을 이용하여 10×10 개의 적외선 센서 어레이와 어드레싱 및 신호 처리를 위한 회로를 집적화 하였다. 이는 동작 온도의 안정이나 냉각 과정을 거치지 않고 상온 환경에서 동작이 되며, 물체 감지, 원격 온도 측정 및 제어, 그리고 건물 통제 등에 사용될 수 있다.

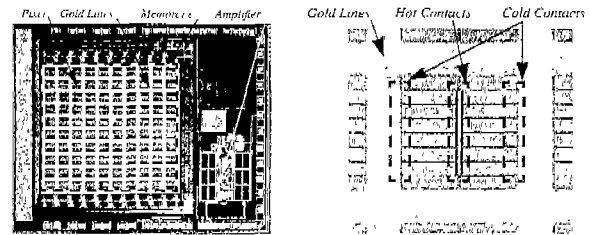


Fig. 15. 비냉각 적외선 이미지 센서 (ETH Zurich-2000)

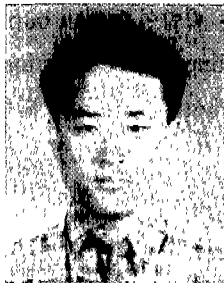
4. 결 론

Si-thermopile 소자에 대하여 동작 원리, 제조 기술, 연구 개발 동향, 그리고 응용 분야 등을 다루어 보았다. 동작 속도, 주파수 응답 등에서 한계가 있을지라도 비냉각형으로서 특정 분야에 대해 활용성이 높을 것으로 보인다. 국내 MEMS 기술의 연구 개발 노력 과정에 비해, 현재에 이르기까지는 산업화 정도가 기대에 이르지 못하고 있는 상황하에서, Si-thermopile은 압력 센서, 가속도 센서, 잉크젯 프린터 헤드와 함께 제품화에 접근하고 있는 분야이기도 하다. 금후 열전쌍 소재와 반도체 공정과의 친화성 개선, SOI(Silicon-On-Insulator) 기판

등을 이용한 표면 마이크로머시닝 기술의 적용, 플라스틱 패키징에 의한 가격 절감 등이 흥미로운 개발 주제가 될 수 있을 것으로 보인다.

참고 문헌

1. TIMA Laboratory Annual Report 1999 (2000.3.)
2. Miyazaki, Proc. IEEE-MEMS, Japan (2000.1.)
3. MEMS : Infrared Sensors Catalog, Thermometrics Technologies, Ltd., (2000).
4. M.C. Foote et al., "Uncooled thermopile infrared detector linear arrays with detectivity greater than 10^9 cmHz^{1/2}/W," IEEE Tr. Electron Devices, **45** (9). 1896-1902 (1998).
5. H. Baltes et al., "Micromachined thermally based CMOS microsensors," Proc. IEEE, **86** (8). 1660-1678 (1998).
6. Micromachined Transducers Sourcebook, edited by G.Kovacs, WCB/McGraw-Hill, USA, 421-427 (1998).
7. U. Munch et al., "Industrial fabrication technology for CMOS infrared sensor array," Transducers '97, 205-208 (1997).
8. P. Eriksson et al., "Theoretical and experimental investigation of interferometric absorbers for thermal infrared detectors," Sensors and Actuators, **9** (2) 117-130 (1997).
9. H. Baltes et al., "Thermal sensors fabricated by CMOS and micromachining," Sensors and Actuators, **8** (6) 409-421 (1996).
10. W. Schmidt et al., "New manufacturing technology improves thermopile sensors," Laser Focus World (1995).
11. N. Schneeberger et al., "Optimized structured absorbers for CMOS infrared detectors," Proc. Transducers '95, 648-651 (1995.6).
12. W. G. Baer et al., "A 32-element micromachined thermal imager with on-chip multiplexing," Sensors and Actuators, **A48**, 47-54 (1995).
13. Semiconductor Sensors, edited by S.M. Sze, John Wiley & Sons, Inc., USA, 331-382 (1994).
14. W. Lang et al., "Absorbing layers for thermal infrared detectors," Sensors and Actuators, **A34**, 243-248 (1992).
15. 주병권 등, "실리콘 Thermopile 집적센서의 기술동향," 전자공학회지, **16** (6) 546-555 (1989. 12.).



주 병 권

- 1962년 7월 3일생
- 1995년 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 1988년~1995년 KIST 정보전자연구부 연구원
- 1995년~현재 KIST 디스플레이 및 나노 소자 연구실 팀장
- 1996년 Univ. South Australia(Australia) 방문연구원
- 주관심분야 : Flat panel display(FED, OLED), MEMS, Micro-sensor



오 영 제

- 1977년 연세대학교 요염공학과 공학사
- 1987년 연세대학교 대학원 공학박사
- 1988-1989년 미국 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Post-Doc.
- 1982년~현재 KIST 재료연구부 책임연구원
- 1995년~현재 연대 세라믹공학과 객원교수
- 2000년~현재 한국센서학회 응무이사
- 2001년~현재 한국세라믹학회 편집운영위원
- 2000년 홍릉벤처밸리사업단 신산업창업보육센터장
- 2000년 러시아 한립(공학)원 증진석좌회원