

論文2001-38SD-11-3

실리콘 기판 두께에 따른 PZT 박막 적외선 감지소자의 성능 변화 (Performance Evaluation of Thin Film PZT IR detectors in terms of Silicon Substrate Thickness)

高宗秀*, Weiguo Liu**, Weiguang Zhu**

(Jong Soo Ko, Weiguo Liu, and Weiguang Zhu)

요약

실리콘 웨이퍼 두께에 따른 PZT 박막 적외선 감지소자의 성능변화를 이론적 해석 및 실험적 검증을 통하여 분석하였다. 실리콘이 모두 식각되었을 때 최대값을 보이는 전류응답도는 소자의 뒷면에 남아있는 실리콘의 두께가 50 μm 로 두꺼워질 때까지 기하급수적으로 줄어들다가, 그 이상의 두께에서는 전류응답도의 감소폭이 현저히 줄어들었다. 실리콘이 모두 식각된 적외선 감지소자는 450 μm 두께의 실리콘이 남아있는 소자에 비해 100배 이상의 높은 전류응답도를 보였다. 이러한 이론적인 해석을 검증하기 위하여 실리콘 기판미세가공법을 이용하여 세 가지 다른 실리콘 두께를 가진 적외선 감지소자를 제작하였다. 제작한 소자에서 측정된 전류응답도의 변화는 이론적 해석값과 좋은 일치를 보였다. 한편, 실험을 통하여 실리콘 두께가 소자의 전류응답도 뿐만 아니라 응답속도에도 큰 영향을 준다는 것을 확인하였다.

Abstract

The effects of silicon substrate thickness on the performance of thin film PZT IR detectors are theoretically and experimentally investigated. Theoretical analyses show that the pyroelectric current responsivity of a detector without a silicon substrate is about two orders higher than that of a detector with a 450 μm thick silicon substrate. At a fixed chopping frequency of 100Hz, the pyroelectric current responsivity decreases exponentially with increasing silicon substrate thickness up to 50 μm , and above 50 μm the decreasing rate become slow. The thinner the silicon substrate is, the less the thermal loss by conduction is, and thus the higher responsivity is resulted. To verify the theoretical analyses, micromachined PZT thin film IR detectors with different silicon substrate thicknesses are fabricated and characterized. The theoretical and experimental results show the similar tendencies for all silicon substrates with varying thickness.

I. 서론

적외선 감지소자는 물체에서 방출되는 열복사선을

감지하여 이를 전기적 신호로 바꾸어주는 장치이다. 이러한 적외선 감지소자는 비접촉 온도측정, 화재경보, 적외선 침입경보기, 의료장비 등의 여러 분야에 응용되고 있다. 최근 들어서는 적외선 영상소자에 대한 연구가 활발히 진행중인데, 가시광선이 전혀 없이도 사물을 보기 위해서는 태양이나 달과 같은 광원에 대한 반사가 아닌 물체 자체가 내는 열복사선을 감지해야 한다. 따라서 300K(27 $^{\circ}\text{C}$) 근처의 상온의 물체가 내는 복사를 감지하는 수단으로 적외선 영상소자에 대한 관심이 집중되고 있다.

* 正會員, 韓國電子通信研究院 情報通信源泉技術研究所 (Telecom. Basic Research Lab., ETRI)

** 正會員, 싱가포르 난양工科大學敎 電子工學科 (Electrical & Electronic Eng., NTU, Singapore)

接受日字:2001年5月22日, 수정완료일:2001年10月4日

적외선 감지소자는 감지방식에 따라서 크게 양자형(photon detector)과 열형(thermal detector)으로 나뉘어진다. 양자형 소자는 감지방식 특성상 높은 감지도(detectivity)와 빠른 응답도(responsivity)를 제공하지만, 제조공정이 까다롭고 온도에 의한 열잡음(thermal noise)을 줄이기 위해서 77K로 냉각해서 사용해야한다. 반면, 열형 소자는 양자형 소자보다 감도와 응답성은 떨어지나, 비교적 제조가 용이하고 가격이 저렴하며 냉각이 필요하지 않고 감도의 과장 의존성이 없기 때문에 일상생활의 실용적인 목적에 적합한 소자이다^[1]. 열형 소자 중 현재 가장 많이 응용되고 있는 방식은 PT, PZT, PLT, TGS, BST, PVDF 등의 가열전기특성(pyroelectricity)을 가지는 단결정과 다결정 세라믹스를 이용한 것이다.

전자제품의 경박단소(輕薄短小)화 경향은 전자재료의 박막화를 요구하고 있으며, 이러한 박막화는 소자의 복잡화·집적화를 가능케 하고 가공의 용이성, 크기효과(size effect) 등 후막이나 단결정으로 얻을 수 없는 많은 이점을 제공한다. 최근 들어서는 실리콘 웨이퍼 위에 센서와 회로를 동시에 제작하는 일체형 미소기전집적시스템(MEMS) 기술의 등장으로 이러한 경박단소의 추세가 급격히 빨라지고 있다^[2]. 수 마이크로미터 이하의 박막형태의 적외선 감지소자를 실리콘 웨이퍼 위에 제작하는, 이른바 실리콘 미세가공기술이 1990년대 들어서 응용되기 시작하였다. 구체적인 예로, 열질량(thermal mass) 및 전도에 의한 열손실을 최소화하기 위하여, 적외선 감지부를 지지하고 있는 실리콘 기판의 뒷면을 완전히 식각해 내는 기판미세가공(bulk micromachining)법이 시도되었다^{[3],[4]}. 이와 더불어 표면미세가공(surface micromachining)법을 이용하여 감지부의 양끝이나 가장자리만을 실리콘 기판에 고착시킨 상태로 적외선 감지부를 기판으로부터 수 마이크로미터의 높이로 띄운, 육교형태의 적외선 감지소자가 개발되었다^[5-6]. 열질량과 전도에 의한 열손실을 최소화할 수 있는 이러한 실리콘 기판의 식각으로 소자의 성능이 비약적으로 향상되었으며, 이는 고품질, 대량생산, 저가의 적외선 영상장비를 구현할 수 있는 중요한 기초기술로 평가받고 있다.

현재 실리콘 미세가공기술로 제작되고 있는 비냉각 방식의 2차원 배열형 적외선 감지시스템에 들어가는 단위 픽셀의 크기가 수십 마이크로미터 이하로 극소화되고 있기 때문에, 이러한 열손실에 의한 응답도 감소

가 더욱더 중요한 문제로 대두되었다. 전도에 의한 열손실을 최소화하기 위한 방안으로 미세가공기술을 도입하여 얇은 막이나 육교형태의 감지부를 가진 적외선 감지소자가 널리 제작되고 있으나, 기판의 두께가 적외선 감지소자의 성능에 어떠한 영향을 주는가에 대한 연구는 극히 미미한 편이다^[7-9]. 최근까지의 연구는 주로 미소기전집적시스템 기술을 이용한 비냉각형 적외선 감지소자의 박막화와, 감지부의 용적율을 극대화시키려는 데에 맞추어져 있었다.

이에 따라, 본 연구에서는 실리콘 기판의 두께가 적외선 감지소자의 성능에 미치는 영향을 이론적·실험적 분석을 통하여 규명하고자 한다. 이같은 연구목적을 수행하기 위해서, 성능지수가 높은 PZT 가열전기박막 및 적외선 흡수층으로 사용되는 니켈층을 개발하였으며, 실리콘 미세가공법을 이용하여 상이한 실리콘 기판 두께를 가진 적외선 감지소자를 제작 및 측정 한 후, 이론적 해석결과와 비교·검토하였다.

II. 적외선 감지소자의 이론적 해석

2.1 적외선 감지소자의 구조 및 해석

본 연구를 위하여 고안한 적외선 감지소자는 기본적으로 윗전극, 아래전극, 감지부, 그리고 기판으로 구성

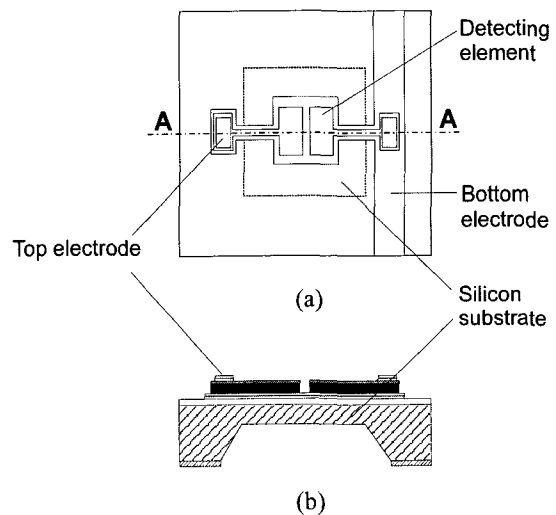


그림 1. 제작할 적외선 감지소자의 개념도 : (a) 정면도, (b) 단면도

Fig. 1. Schematic top and cross sectional views of an IR detector : (a) Top view, (b) Cross sectional view along A-A.

되며, 제작할 적외선 감지소자의 정면도 및 단면도를 그림 1에 도시하였다. 뒷전극으로 사용되는 Ni(10nm)층은 적외선 흡수용도로도 사용된다. 그리고 배선을 위해 별도의 Au(400nm)/Ti(50nm) 패드가 제작되었다. 아래전극으로 사용되는 Pt(100nm)/Ti(50nm) 층에서 Ti는 Pt와 Si₃N₄의 접착강도를 강화시키기 위해서, Pt는 전극용도 외에 PZT 박막의 결정화를 돕기 위한 씨앗층 용도로도 사용된다.

감지부는 Ni 흡수층과 초전재료인 PZT 층으로 구성된다. 기판은 Si₃N₄(200nm)/SiO₂(500nm)/Si 순서의 적층으로 구성되어 있다. Si₃N₄ 층은 고온공정시 발생하는 아래전극물질과 실리콘 사이의 상호확산을 방지하고, 실리콘이 완전 식각되었을 경우 감지부를 지지하기 위한 용도로 사용된다. SiO₂ 층은 Si₃N₄와 Si 층 사이에 발생하는 내부 잔류응력을 완화시키고 동시에 Si₃N₄ 층과 같이 실리콘이 완전 식각되었을 때 감지부를 지지하기 위한 용도로 사용된다. Si는 감지부를 지지하는 용도로 사용되며, 상이한 두께의 실리콘 기판을 만들기 위해 감지부 뒷면의 실리콘을 부분 또는 완전 식각한다.

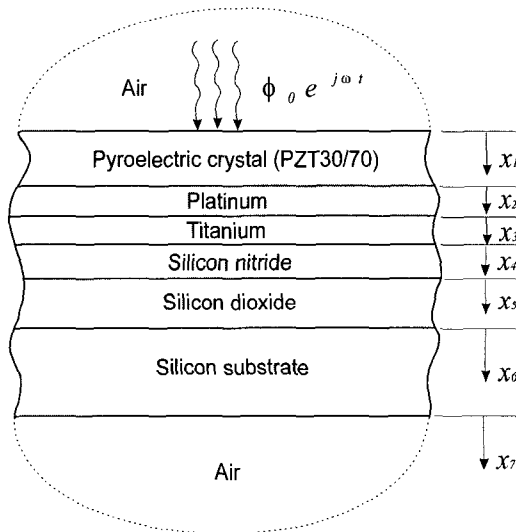


그림 2. 감지소자의 적층구조 및 이론적 해석을 위한 좌표설정

Fig. 2. Cross section of a thin film IR detector for the theoretical analysis.

이론적인 해석을 위한 - 상·하 공기층을 포함한 - 8층 구조의 적외선 감지소자 모델의 단면은 그림 2에서 보는 바와 같다. 회전주파수 ω 인 단축기에 의해 정현파형의 단위면적당의 복사광 $\phi(t) = \phi_0 e^{j\omega t}$ 는 흡수

층 위에 입사된다. 여기서 ϕ_0 는 진동하는 복사광에너지의 최대 진폭을 나타낸다. 10nm 두께의 Ni 흡수층은 극히 얇은 두께 때문에, 이 층을 타고 흐르는 열손실을 무시할 수 있을 것으로 판단하여 모델링에서 제외하였다. 다만 제작된 Ni 층의 흡수율 η 가 0.7임을 감안하여, 입사된 복사광의 70%가 흡수된다는 것을 수식 전개시 고려하였다. 또한 소자의 수직방향으로의 두께에 비해 수평방향으로의 크기가 충분히 크다고 판단되어, 이 문제를 수직방향을 통한 1차원 열전달 문제로 가정하였다.

입사된 복사광은 흡수층에 의해 흡수되고, 흡수된 광에너지는 곧 열에너지로 바뀌게 된다. 이때 생긴 열에너지는 흡수된 광에너지와 같은 주파수인 ω 로 진동하는, 이른바 열파(thermal wave) 형태를 띠게 되며, 이러한 열파는 흡수층을 시발점으로 하여 x방향으로 전파된다. 이러한 정현파형의 열파에 의해 각 층의 깊이에 따라 역시 같은 주파수인 ω 로 진동하는, $T(x_i, t) = T(x_i)e^{j\omega t}$ 와 같은 반복적인 온도장(periodic temperature field)이 생기게 된다. 여기서 $T(x_i)$ 는 i번째 층의 상단에서부터 x_i 거리만큼의 아래 지점에서의 온도와 외부온도와의 차를 나타낸다.

온도장 $T(x_i, t)$ 는 아래와 같은 2계 선형 편미분 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial T(x_i)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 T(x_i, t)}{\partial x_i^2} \quad (1)$$

여기서, $D_i = k_i / \rho_i c_i$ 로서 열확산계수(thermal diffusivity)이며, k_i, ρ_i, c_i 는 각각 i번째 층의 열전도도, 밀도, 비열을 나타낸다. 식 (1)의 일반해는 다음과 같다.

$$T(x_i, t) = T(x_i)e^{j\omega t} = [A_i \cosh(\mu_i x_i) + B_i \sinh(\mu_i x_i)]e^{j\omega t} \quad (2)$$

여기서 $\mu_i = (1+j)\sqrt{\omega \rho_i c_i / 2k_i}$ 이다.

이런 경우, 단위면적당 유기되는 초전류 i_p 는 초전계수 p' 와 가열전기박막 두께에 대한 평균온도의 시간 변화율의 함수로 표현될 수 있다.

$$i_p = p' \frac{\partial T_1(x_1, t)}{\partial t} = p' \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{d_1} \int_0^{d_1} T_1(x_1) e^{j\omega t} dx_1 \right] \quad (3)$$

상수인 A_i 와 B_i 는 공기층과 가열전기박막과의, 각층과의, 그리고 실리콘과 공기층과의 온도 및 열전달에 관한 경계조건에 의해서 결정되며, 각각의 경계조건을 정리하면 아래와 같다.

(1) 공기층과 가열전기박막간의 경계조건 ;

$$\eta \Phi = q_{conv.} + q_{cond.} \quad (4)$$

(2) 각층간의 경계조건 (for $i=1, 2, 3, 4, 5$) ;

$$\begin{aligned} T(x_i = d_i) &= T(x_{i+1} = 0) \\ q_{cond.}(x_i = d_i) &= q_{cond.}(x_{i+1} = 0) \end{aligned} \quad (5)$$

(3) 실리콘과 공기층간의 경계조건 ;

$$q_{cond.} = q_{conv.} \quad (6)$$

여기서 d_i 는 i 번째 층의 두께를 의미한다.

위에서 제시한 경계조건들을 자세히 정리하면 - A_i 와 B_i 그리고 각 층에 관련된 매개변수 사이의 - 아래와 같은 매트릭스 형태의 관계식을 도출할 수 있다.

$$[M_7][M_6][M_5][M_4][M_3][M_2] \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = hT_o. \quad (7)$$

여기서,

$$B_1 = \frac{1}{k_1 \mu_1} [h(A_1 - T_o) - \eta \Phi_o],$$

$$[M_i] = \begin{bmatrix} \cosh \mu_{i-1} d_{i-1} \\ \frac{h_{i-1} \mu_{i-1}}{k_i \mu_i} \sinh \mu_{i-1} d_{i-1} \\ \sinh \mu_{i-1} d_{i-1} \\ \frac{h_{i-1} \mu_{i-1}}{k_i \mu_i} \cosh \mu_{i-1} d_{i-1} \end{bmatrix}$$

for $i = 2 \sim 6$,

$$[M_i] = (k_{i-1} \mu_{i-1} \sinh \mu_{i-1} d_{i-1} + h \cosh \mu_{i-1} d_{i-1})$$

$$k_{i-1} \mu_{i-1} \cosh \mu_{i-1} d_{i-1} + h \sinh \mu_{i-1} d_{i-1})$$

for $i = 7$

이며, h 와 T_o 는 각각 공기의 대류 열전달 계수와 외부 온도를 나타낸다.

전류응답도 R_I 는 적외선 감지소자에서 발생하는 단위면적당의 초전류 i_p 와 흡수된 단위면적당의 광에너지 $\eta \Phi_o$ 의 비로 정의된다.

$$R_I = \left| \frac{i_p}{\eta \Phi_o} \right| \quad (8)$$

식 (7)에서 구한 A_1 과 B_1 을 식 (3)에 대입하여 x_1 에 대한 적분 및 t 에 대한 편미분을 취하면 i_p 를 구할 수 있다. 여기서 구한 i_p 를 식 (8)에 대입하면 이론적인 전류응답도를 구할 수 있게 된다. 이론적인 해석을 위해 사용된 각 상수 값들을 표 1에 정리하였다. 해석 및 실험에 사용된 가열전기박막의 재료로는 $250 \mu\text{C}/\text{m}^2\text{K}$ 의 가열전기계수(pyroelectric coefficient)를 가진 PZT30/70(Zr:Ti=30:70)이었고, 흡수층으로는 0.7의 흡수율을 가지는 10nm 두께의 니켈이었다. 제작된 적외선 감지소자의 성능측정시 확인한 복사광의 단위면적당 입사에너지 ϕ_o 는 $9.2 \times 10^3 \text{W}/\text{m}^2$ 이었다. 또한 제작된 가열전기박막의 면적($0.2 \times 0.3 \text{mm}$)을 고려하여 계산한 자연 대류 열전달 계수 h 는 300K에서 $13 \text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 이었다^[10]. 한편, PZT30/70에 대한 열전도도와 비열에 관한 기존 연구결과의 부족으로 인하여, 해석시 PLZT8/35/65의 열전도도와 PZT54/46의 비열값을 사용했음을 밝힌다. \

실리콘 기판의 두께 변화에 따른 전류응답도의 변화 추이를 살펴보기 위해, 실리콘을 모두 식각한 기판(이하

표 1. 이론적 해석에 사용된 재료의 물성치

Table 1. Values of parameters for the pyroelectric current responsivity calculation.

Material	Thermal conductivity (W/mK)	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kgK)	Thickness (10 ⁻⁶ m)
PZT30/70	1.45 ^a	7300 ^b	425 ^c	0.55
Pt	69.5 ^d	21450 ^d	134 ^d	0.1
Ti	20.5 ^d	4500 ^d	527 ^d	0.05
Si ₃ N ₄	28.0 ^d	3000 ^d	712 ^d	0.2
SiO ₂	0.8 ^e	2180 ^e	780 ^e	0.5
Silicon	148.0 ^f	2330 ^f	712 ^f	-
Air	0.026 ^e	1184 ^e	105 ^e	-

a. S. B. Lang, ISAF98, pp. 195.(PLZT8/35/65 data)

b. B. Jaffe et al., J. Research of the National Bureau of Standards, pp. 239(1955).

c. B. M. Kulwicki et al., ISAF92, pp. 1.(PZT54/46 data)

d. A. J. Meses, Handbook of Electronic Materials (1971).

e. N. A. Lange, Handbook of Chemistry(1961).

f. A. F. Mills, Heat Transfer, pp. 810.

실리콘이 없는 기판), 10 μ m 두께의 실리콘 기판(이하 10 μ m 실리콘 기판), 50 μ m 두께의 실리콘 기판(이하 50 μ m 실리콘 기판), 그리고 450 μ m 두께의 실리콘 기판(이하 450 μ m 실리콘 기판)에 대해 해석을 수행하였으며, 해석을 위해 상용소프트웨어인 Matlab 5.3을 사용하였다.

2.2 해석 결과

그림 3에서의 실선 그래프는 상이한 기판 두께를 가진 적외선 감지소자의 - 단속주파수에 따른 전류응답도의 - 이론적인 해석결과를 나타낸다. 실리콘이 남아 있는 적외선 감지소자의 경우에는, 각 곡선이 평평한 구간과 경사진 구간으로 나누어진다. 평평한 구간에서는 흡수된 열에너지가 가열전기박막으로부터 실리콘 기판으로 충분히 전달되어 가열전기박막과 기판 사이에 열적 평형상태를 이루지만, 경사진 구간에서는 이러한 열전달이 충분히 이루어지지 않는다. 주파수가 높아질수록 기판을 통한 열전달은 더욱 빠른 속도로 저하되며, 더 높은 주파수에서는 실리콘 기판의 두께에 상관없이 모든 적외선 감지소자의 전류응답도가 실리콘이 없는 기판 적외선 감지소자의 전류응답도에 근접하게 된다.

실리콘의 두께가 얇아질수록 오름 경사가 시작되는 단속주파수가 더욱 높아짐을 알 수 있는데, 이 또한 실리콘을 통한 열전도 시간과 관계가 있다. 그런데 경사진 구간에서는 평평한 구간과는 달리 주파수에 따라서 전류응답도가 달라지기 때문에 소자의 선형성이 떨어지게 된다.

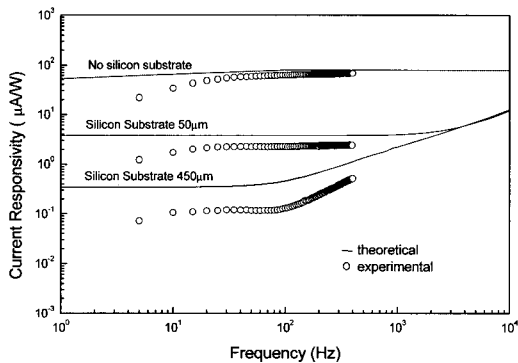


그림 3. 단속주파수에 따른 전류응답도의 이론적 해석 결과 및 측정결과
Fig. 3. Measured and calculated current responsivities as a function of chopping frequency of detectors with respect to silicon substrate thickness.

그림 3에서 확인할 수 있듯이, 실리콘의 두께에 따라 각 곡선의 평평한 구간의 절대값은 커다란 차이를 보인다. 평평한 구간에서는 가열전기박막과 기판 사이에 열적 평형 상태를 이루고 있으므로 실리콘 두께가 얇을수록 가열전기박막에서부터 실리콘 기판 쪽으로 흘러나가는 열이 줄어들게 되며, 이러한 열손실의 감소는 곧 전류응답도의 증가로 나타난다. 실리콘이 없는 적외선 감지소자는 450 μ m 실리콘 두께의 적외선 감지소자에 비해 100배 이상의 높은 전류응답도를 보였다.

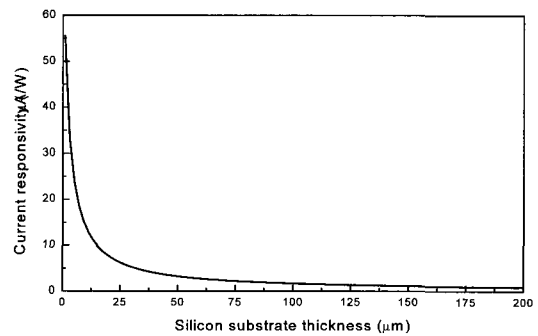


그림 4. 단속주파수 100Hz에서의 실리콘 기판 두께에 따른 전류응답도의 변화
Fig. 4. Current responsivity as a function of silicon substrate thickness at 100Hz.

그림 4는 100Hz의 단속주파수에서의 실리콘 두께에 따른 적외선 감지소자의 전류응답도 변화를 나타낸다. 이 곡선은 실리콘 두께와 전류응답도 사이의 관계를 명확히 보여준다. 실리콘 두께가 0 μ m에서부터 50 μ m에 이를 때까지 전류응답도는 기하급수적으로 감소하다가, 그 이상의 두께에서는 전류응답도의 감소폭이 크게 줄어들음을 알 수 있다.

III. 적외선 감지소자의 제작 및 측정

3.1 적외선 감지소자의 제작

이론적 해석결과와 검증의 검증을 위하여 세 가지 상이한 기판 두께를 가진 적외선 감지소자를 제작하였다. 제작한 적외선 감지소자의 실리콘 두께는 각각 0 μ m, 50 μ m, 그리고 450 μ m 이었으며, 제작 중에 생길 수 있는 공정 오차를 최소화하기 위하여 그림 5에서처럼 같은 웨이퍼 위에 0 μ m(영역I), 50 μ m(영역II), 450 μ m(영역III) 두께의 실리콘 기판을 가진 적외선 감지소자를 동시에 제작하였다.

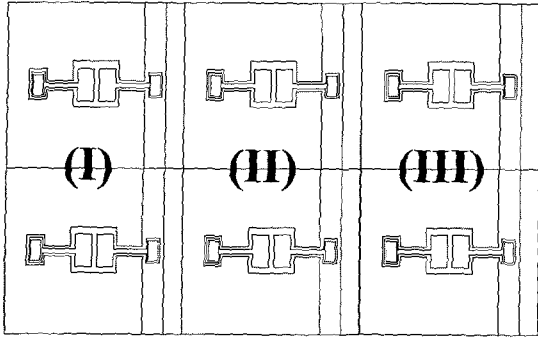


그림 5. 상이한 실리콘 두께를 가진 감지소자의 배치도
Fig. 5. Batch of the detectors with different silicon substrate conditions.

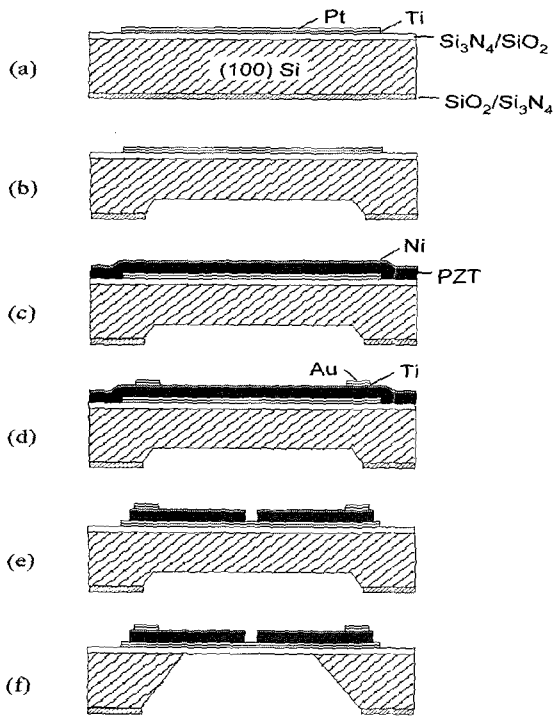


그림 6. 실리콘이 모두 식각된 적외선 감지소자의 제작 공정 : (a) Pt/Ti 바닥전극패턴, (b) 뒷면의 실리콘 식각창 패턴 및 1차 실리콘 식각, (c) Ni/PZT 증착, (d) Au/Ti 와이어본딩 패드 제작, (e) Ni/PZT 패턴, (f) 2차 실리콘 식각
Fig. 6. Fabrication process of the IR detector with no-silicon substrate : (a) Pt/Ti bottom electrode patterning, (b) backside etch-window patterning and first silicon etching, (c) Ni/PZT deposition, (d) Au/Ti wire bonding pad formation, (e) Ni/PZT patterning, (f) second silicon etching.

적외선 감지소자 제작을 위하여 총 4장의 마스크가

소요되었다. 제작과정의 자세한 이해를 위해 선택한 다섯가지 주요공정을 그림 6에 도시하였다. 먼저, 공정 a에서 양면가공된 $450\mu\text{m}$ 두께의 n형 (100) 결정방향의 실리콘웨이퍼의 양면에 열산화막 $\text{SiO}_2(500\text{nm})$ 와 LPCVD $\text{Si}_3\text{N}_4(200\text{nm})$ 를 증착한다. 그리고 뒷면에 스퍼터링 방법으로 Ti(50nm)와 Pt(100nm)를 증착한 후, 아래 전극을 형성할 부분을 제외한 Pt/Ti를 습식식각한다. Pt 식각을 위해 왕수를 사용하였는데, 식각시 왕수로부터 아래전극이 될 Pt 패턴을 보호하기 위해, 식각 마스크로 내화학성이 뛰어난 감광물질(photoresist)인 AZ1518을 두 번 코팅 및 패터닝하여 사용하였다. 공정 b에서는 그림 6의 영역III를 제외한 영역 I 과 II의 뒷면의 Si_3N_4 를 RIE(reactive ion etching)를 이용하여 식각한 후, 영역 I의 SiO_2 를 BOE(buffered oxide etchant)를 이용하여 선택적으로 식각한다. 그리고 난 후, 18wt%의 TMAH(tetramethyl ammonium hydroxide, $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$) 용액에서 영역 I의 실리콘을 $50\mu\text{m}$ 깊이로 1차 식각한다. 공정 c에서는 증착으로 550nm 두께의 PZT30/70 박막을 12회 코팅 및 건조하여 제작한 후, 적외선 흡수 및 윗전극용으로 사용될 10nm 두께의 Ni 층을 증착한다. 그림 7의 TEM(transmission electron microscopy) 단면사진으로부터, 제작한 PZT30/70 박막이 주상구조를 띠는 것을 확인할 수 있다. 이어, 공정 d에서 와이어본딩 패드 제작을 위해, 리프트오프(lift-off) 기법을 이용하여 Ti(10nm)와 Au(400nm)를 연속 증착한다. 공정 e에서는 Ni와 PZT를 선택적으로 식각한다. Ni 식각액으로 $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF}=20:1:1$ 을, PZT 식각액으로 $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}:\text{HF}=50:50:1$ 을 사용하였으며, 식각 마스크로 내화학성이 뛰어난 AZ1518을 사용하였다. 마지막으로 공정 f에서는 10:1 HF 용액을 이용하여 영역 II의 뒷면의 SiO_2 를 식각한 후, $50\mu\text{m}$ 깊이로 1차 식각되어 있는 영역 I과 함께 30wt%의 KOH 용액을 이용하여 2차 실리콘 식각을 수행한다.

식각은 영역 I의 실리콘이 완전 식각되어, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 층만이 남았을 때 종료된다. 이때 영역 II의 실리콘은 약 $50\mu\text{m}$ 가 남게 되며, Si_3N_4 로 덮여있는 영역 III는 실리콘 식각이 이루어지지 않았기 때문에 원래 두께인 $450\mu\text{m}$ 의 실리콘이 남게 된다^[11]. Ni, PZT, Ti는 KOH 용액에 대한 저항성이 거의 없으며, KOH 용액이 미소량이라도 PZT 가열전기박막에 침투했을 경우에는 $-\text{K}^+$ 이온이 PZT 박막내에서 자유전자 역할을 하기 때문에 $-\text{PZT}$ 박막을 더 이상 사용할 수 없게 된다. 그러므로 2

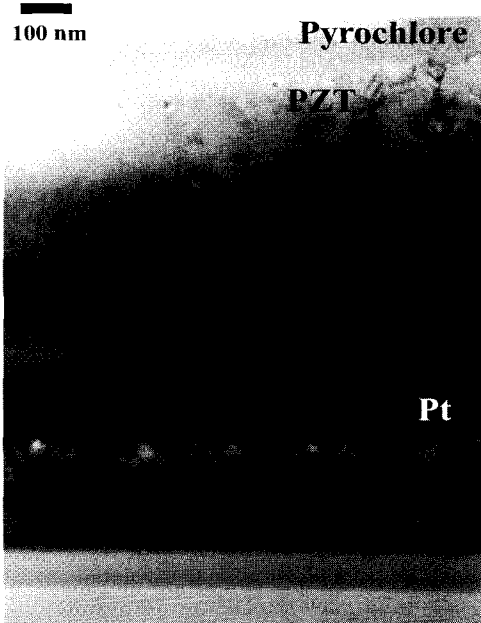
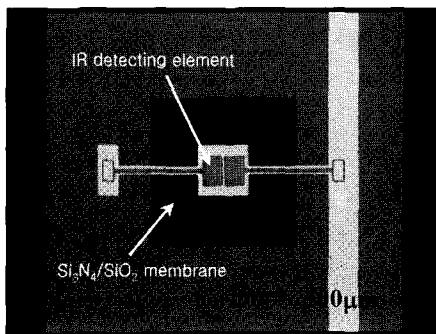
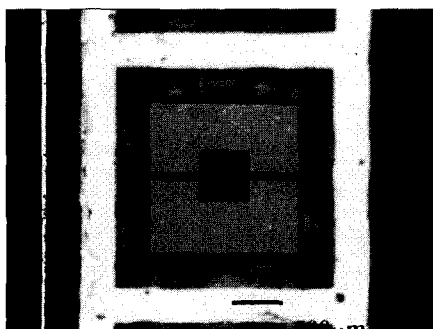


그림 7. 제작한 PZT30/70 박막의 단면 TEM 사진
Fig. 7. Cross sectional TEM image of the PZT30/70 thin film.



(a) Top view



(b) Bottom view

그림 8. 제작한 적외선 감지소자의 윗면과 아랫면 사진
Fig. 8. Top and bottom views of a pair of a fabricated IR detector.

차 식각시에는 KOH 용액으로부터 윗면을 보호할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 기계적인 지그를 체결할 때, 실리콘 웨이퍼에 생기는 응력이 거의 걸리지 않도록 특별한 실리콘 식각 지그를 고안하여 사용하였다.

2차 실리콘 식각을 마친 적외선 감지소자의 윗면과 아랫면의 확대사진을 그림 8에 나타내었다. 제작된 소자의 감지부 크기는 $0.2 \times 0.3 \text{mm}^2$ 이며, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 멤브레인 크기는 $1.5 \times 1.5 \text{mm}^2$ 이다. 공정 f를 마친 적외선 감지소자는 단위소자별로 자른 후, 패키징한다.

3.2 성능 측정

제작된 적외선 감지소자의 전류응답도를 측정하기 위하여 레이저, 광학렌즈, 단말기와 연결된 단속기(chopper), 전류증폭기, 신호분석기를 사용하여 그림 9와 같은 Chynoweth 적외선 감지소자 측정 시스템을 구성하였다. 632nm 파장의 He-Ne 레이저광은 렌즈를 통하여 빔의 반경이 넓어지며, 단속기를 통과하면서 연속적인 사각펄스 형상을 갖게 된다. 제작된 감지소자에 입사되는 레이저광의 단위면적당 파워는 $9.2 \times 10^3 \text{W/m}^2$ 이었다. 한편, 제작된 적외선 감지소자는 측정시 외부로부터 들어오는 빛이나 전자기파에 의한 잡음을 줄이기 위하여 알루미늄으로 제작한 전자기파 차단상자 속에 위치하게 된다. 단속조사된 레이저광을 받은 PZT 가열 전기박막의 온도는 올라가게 되고, 박막의 온도변화로 가열전기박막 내에서 분극현상이 심화되며, 이러한 분극현상에 의해 가열전기박막의 양단에 미세한 가열전류(pyroelectric current)가 유기된다. 이러한 미세한 가

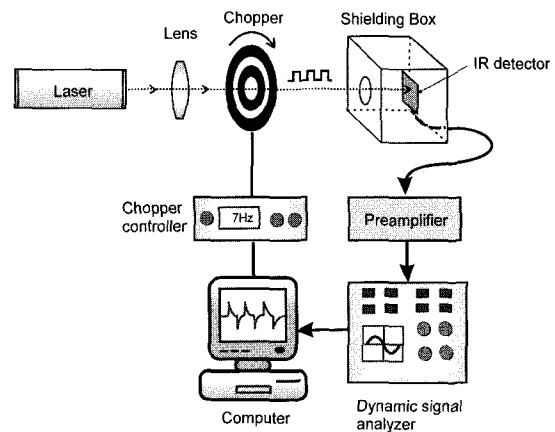


그림 9. 측정 시스템 구성도
Fig. 9. Measurement set-up for device characterization.

표 2. 제작된 적외선 감지소자의 전류값과 10%~90% 응답시간

Table 2. Measured current and 10% to 90% response time of fabricated IR detectors with different substrate conditions.

	Current (RMS)	10%to90% response time (ms)
No-silicon substrate	11.59 nA	0.76
50 μ m silicon substrate	772.8 pA	8.3
450 μ m silicon substrate	38.64 pA	12.21

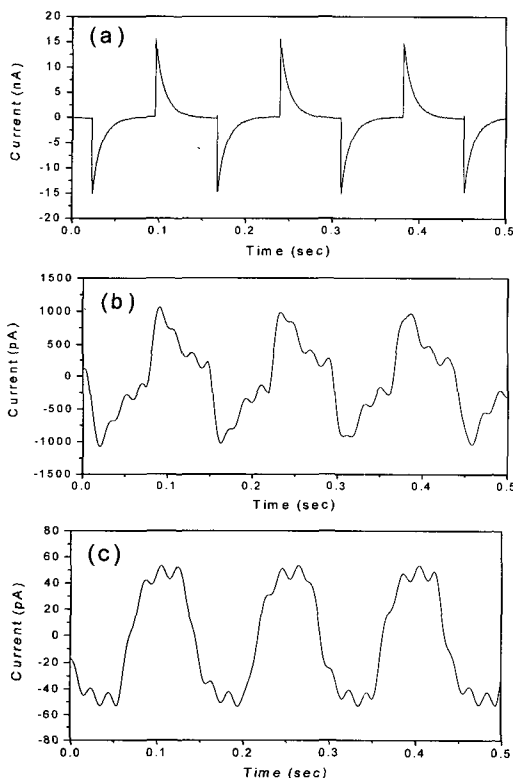


그림 10. 상이한 실리콘 두께에 따른 적외선 감지소자의 전류응답 과정

Fig. 10. Current responses as a function of time with different silicon substrate thickness: (a) no silicon substrate; (b) 50 μ m silicon substrate; (c) 450 μ m silicon substrate.

열전류는 전류증폭기에 의해 증폭되며, 마지막으로 신호분석기와 단말기를 통해 기록 및 해석된다.

그림 3은 이론적으로 계산된 전류응답도와 제작된 적외선 감지소자에서 측정된 실험결과값을 보여준다.

단속주파수 7Hz에서 얻어진 전류파형은 그림 10에서와 같으며, 그 때 측정된 전류값과 10% to 90% 응답시간을 표 2에 정리하였다.

IV. 토 의

실리콘이 없는 기판의 경우, 실험결과가 이론적인 예상과 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 하지만 이러한 이론적인 예상과 실험결과와의 일치는 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 복합박막 아래의 실리콘이 완전 식각되지 않고 남아있음으로 해서 깨어지게 된다. 그림 3의 50 μ m 및 450 μ m 실리콘 두께를 가진 적외선 감지소자의 예에서도 알 수 있듯이, 이러한 이론치와 실험치 사이의 간격은 적외선 감지소자를 지지하고 있는 실리콘 기판의 두께가 증가할수록 커지게 된다. 실리콘이 없는 기판의 경우, PZT 감지부에서 발생한 열에너지는 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 박막으로 흡수되지만, 700nm라는 극도로 얇은 두께와 낮은 열전도도 때문에 PZT로부터 발생한 열이 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 박막의 측면을 타고 빠른 속도로 빠져나가지 못한다. 이럴 경우, 열손실의 대부분은 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 자체로의 전도 및 공기 중으로의 대류에 의해 발생하게 되며, 이러한 열손실 경로는 수직방향으로의 1차원 열전달 모델링에 아주 적합한 것이다.

반면 실리콘 기판의 경우, 실리콘은 SiO_2 에 비해 열전도도가 약 200배 가량 높기 때문에, PZT에서 발생한 열이 빠른 속도로 실리콘을 통해 빠져나간다. 이 때 실리콘을 통한 열방사는 PZT 감지부에서 실리콘 기판으로 흐르는 수직방향으로의 열전도 뿐만 아니라, 실리콘 기판의 측면을 타고 흐르는 수평방향으로의 열전도 또한 무시할 수 없을 정도로 클 것으로 생각된다. 이러한 추론의 근거로, 그림 3에서 실리콘 기판의 두께가 두꺼울수록 이론 예상값과 실험결과값 사이의 간격이 커짐을 들 수 있다.

한편, 이러한 실리콘의 두께가 전류응답도에만 영향을 주는 것이 아니라, 소자의 응답속도에도 큰 영향을 준다. 표 2에서와 같이, 실리콘이 없는 기판 적외선 감지소자는 450 μ m 실리콘 기판 적외선 감지소자에 비해 16배 빠른 응답속도를 보였다. 적외선 감지소자의 응답시간은 소자의 적용가능한 주파수대에 직접적인 영향을 주므로, 가능하면 빠른 응답시간을 갖는 구조가 유리하다.

그림 3으로부터, 주파수 증가에 따른 데이터 분포의

경향이 이론적인 예상과 실험결과 사이에 거의 일치함을 알 수 있다. 그 한 예로, $450\mu\text{m}$ 실리콘 기판의 경우, 평평한 구간에서 경사진 구간으로 접어드는 주파수가 공히 100Hz 근방으로서 거의 일치한다는 것이다.

실리콘을 통한 수평방향으로의 열손실 때문에, 1차원 열전달 모델링은 실리콘 두께가 얇아질수록 실제 적외선 감지소자의 열전달 현상에 더욱 근접함을 알 수 있다. 제작된 적외선 감지소자의 크기가 $200 \times 300\mu\text{m}^2$ 임을 감안할 때, 실리콘 기판의 두께가 수백 마이크로미터 정도가 되면 사실상 수평방향으로의 열전도가 수직방향으로의 열전달 못지 않은 중요한 열손실 경로가 될 것이다.

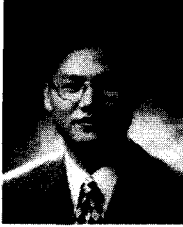
V. 결 론

상이한 실리콘 기판 두께를 가진 적외선 감지소자의 이론적 해석을 수행하였으며, 해석결과의 검증에 위하여 실리콘이 없는 기판의 적외선 감지소자와 $50\mu\text{m}$, $450\mu\text{m}$ 의 실리콘 두께를 가진 적외선 감지소자를 제작한 후 성능을 측정하였다. 실리콘이 없는 기판의 적외선 감지소자는 $450\mu\text{m}$ 실리콘 두께의 적외선 감지소자에 비해 100배 이상의 높은 전류응답도와 16배의 빠른 응답시간을 보였다. 이같은 전류응답도와 응답시간의 차이는 가열전기박막에서부터 실리콘으로 빠져나가는 열손실에 기인한다. 응답시간은 소자의 적용가능한 주파수대에 직접적인 영향을 주므로, 고주파수영역에서 사용할 적외선 감지소자인 경우에는, 적외선 감지소자를 빠른 응답시간을 갖는 구조로 제작할 필요가 있다. 한편, 실리콘 두께가 $0\mu\text{m}$ 에서부터 $50\mu\text{m}$ 에 이를 때까지 전류응답도가 기하급수적으로 감소하다가, 그 이상의 두께에서는 전류응답도의 감소폭이 크게 줄어든다. 그러므로 소자가 구조적으로 안전하다면, 가열전기박막 아래에 있는 실리콘을 남김없이 식각하는 것이 유리하며, 이런 의미에서 표면미세가공법이 성능 좋은 적외선 감지소자 제작을 위한 좋은 수단이 된다.

참 고 문 헌

- [1] R. D. Hudson, *Infrared system engineering*, John Wiley & Sons, 1969.
- [2] 조영호, "미소 기계-전자 집적시스템의 응용과 실제," 대한기계학회지, 제32권, 제2호, 588~603쪽, 1992년
- [3] R. Takayama, Y. Tomita, J. Asayama, K. Nomura, and H. Ogawa, "Pyroelectric infrared array sensors made c-axis-oriented La-modified PbTiO_3 thin films," *Sensors and Actuators A*, Vol. 21-23, pp. 508~512, 1990.
- [4] D.-H. Lee, J. S. Lee, S. M. Cho, H. J. Nam, J. H. Lee, J. R. Choi, K.-Y. Kim, S.-T. Kim, and M. Okuyama, "Microstructures and electrical properties of (pb, La) TiO_3 thin films grown on the Pt electrode with a percolating network structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 34, pp. 2453~2458, 1995.
- [5] D. L. Polla, C. Ye, and T. Tamagawa, "Surface-micromachined PbTiO_3 pyroelectric detectors," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 59, pp. 3539~3541, 1991.
- [6] B. E. Cole, C. J. Han, R. E. Higashi, J. Ridley, and J. Holmen, "Monolithic 512×512 CMOS-microbridge arrays for infrared scene projection," *Tansducers'95*, Stockholm, Sweden, pp. 628~631, June 1995.
- [7] S.-Y. Wu, "Effects of the substrate on the response of pyroelectric detectors," *IEEE Trans. Elec. Dev.*, Vol. 27, No. 1, pp. 88~91, 1980.
- [8] B. Zigon and B. B. Lavrencic, "Pyroelectric thin-film detector performance," *Sensors and Actuators A*, Vol. 36, pp. 167~171, 1993.
- [9] D. H. Chang, S. J. Kang, and Y. S. Yoon, "Response of thin film pyroelectric sensors," *Proc. 11th IEEE ISAF 1998*, Montreux, Switzerland, pp. 213~216, 1998.
- [10] M. Kohli, Y. Huang, T. Maeder, C. Wuethrich, A. Bell, P. Murali, N. Setter, P. Ryser, and M. Forster, "Processing and properties of thin film pyroelectric devices," *Microelectronic Engineering*, Vol. 29, pp. 93~96, 1995.
- [11] J. S. Ko, G. H. Kim, Y.-H. Cho, K. Lee, B. M. Kwak, and K. Park, "A self-diagnostic airbag accelerometer with skew-symmetric proof-mass," *MEMS '95*, Amsterdam, the Netherlands, pp. 163~167, January 1995.

저 자 소 개



高宗秀(正會員)

1991년 2월 : 부산대학교 기계공학과 학사. 1994년 2월 : KAIST 기계공학과 석사. 2000년 8월 : KAIST 기계공학과 박사. 1998년 11월~2000년 2월 : 싱가포르 Nanyang Technological University 연구원. 2000년 9월~현재 : 한국전자통신연구원 원천기술연구소 선임연구원. <주관심분야> MEMS Sensors & Actuators



Weiguo Liu

BSc 1985 : Xidian University, MEng. 1988 : Xidian University, PhD. 1995 : Xi'an Jiaotong University, China. 1996~1999 : Associate Professor, Department of Instrument Engineering, Xi'an Institute of Technology, China. 1999~present : Assistant Professor, School of EEE, Nanyang Technological University, Singapore, <Research Interests> Ferroelectric thin films & their applications to sensors & actuators.



Weiguang Zhu

BSc and MSc Shanghai Jiao Tong University, China, PhD Purdue University, USA, Present : Associate Professor, School of EEE, Nanyang Technological University, Singapore. <Research Interests> Electronic and smart materials, thin and thick films, sensors and actuators, ferroelectrics.