

논문 21-11-9

λ/4 흡수층 구조를 갖는 NDIR 이산화탄소 가스센서용 적외선 센서의 제조 및 특성

Fabrications and Characteristics of Infrared Sensor Composed of λ/4 Absorbing Structure for the Application of NDIR CO₂ Gas Sensor

이성현^{1,2,a}, 남태운¹
(Sung-Hyun Lee^{1,2,a} and Tae-Woon Nam¹)

Abstract

A noble infrared λ/4 absorbing structure using metal reflector was studied for uncooled infrared sensors. This paper described the design and the fabrication of IR uncooled detectors which were composed of 21 by 21 elements using the surface micromachining technology. The characteristics of the array were investigated in the spectral region of 4.26 μm. The fabricated detectors exhibited the thermal mass of 9.75x10⁻⁹ J/K, the thermal conductance of 1.31x10⁻⁶ W/K, the thermal time constant of 7.4 ms, the responsivity of 1.07x10⁵ V/W and the detectivity of 1.04x10⁹ cmHz^{1/2}/W, at the chopper frequency of 10 Hz and the bias current of 9.22 μA. Finally the absorptance efficiency of λ/4 absorbing structure was about 23.2 % higher than that of absence absorbing structure.

Key Words : λ/4 absorbing structure, Micromachining, Microbolometer, Absorptance efficiency

1. 서론

최근 적외선 센서에 적용되는 산업용, 의료용, 군수용 및 민수가전용 등의 수요가 급증함에 따라서 활발한 연구가 진행되고 있으며, 특히 비 냉각 방식의 적외선 센서는 마이크로머시닝 기술발전에 따라서 우수한 성능을 갖는 비 냉각형 열영상(Uncooled Thermal Imager) 장비로 지속적으로 발전하고 있는 추세이다[1-3].

이러한 비 냉각형 적외선 센서의 대표적인 적외선 감지센서인 저항형 볼로미터는 적외선이 감지 소자에 입사할 때 발생하는 소자의 온도변화에 따른 저항변화를 측정하는 원리로 다른 적외선 감지 소자에 비해 초퍼가 필요 없으며, 적외선 감지도 및 반응에 대한 응답도가 우수하며 집적회로

(Integrated Circuit) 제조공정을 적용할 수 있는 장점이 있다[4-7].

집적화된 회로를 기반으로 볼로미터를 적용한 연구가 국내에서도 최근 활발하게 진행되고 있으며, 이에 따른 적외선 소자의 열적 고립구조와 소자구조의 안정성에 대한 공정기술 개발 및 적외선 흡수효율에 영향을 미치는 박막층에 대한 연구를 중점적으로 하고 있다[8,9]. 이에 따라서 볼로미터의 흡수면적을 극대화 시키고, 적외선 흡수체의 온도저항계수를 높이고, 효율적인 열적 고립구조를 통한 열손실의 최소화로 잡음특성을 줄여 감도특성을 높여야만 한다.

본 연구에서는 4.26 μm 파장대역에서 공진흡수를 하는 이산화탄소 가스를 측정하는데 적용되는 광학방식의 적외선 센서의 적외선 감지성능을 향상시키기 위한 소자의 구조설계, 해석 및 소자 구조물제작을 위한 마이크로머시닝 공정과 감지특성을 최적화하는 적외선 감지막 재료에 대한 연구를 진행하였으며, 금속 반사층을 적용하여 λ/4 공진흡수구조로 제작하였으며, 공진흡수구조가 적외선 흡수효율에 미치는 영향에 대하여 수행하였다.

1. 한양대학교 금속재료공학과
(경기도 안산시 상록구 사3동 1271)
2. 에스엘주식회사 기술연구본부
a. Corresponding Author : rsp9698@empal.com
접수일자 : 2008. 10. 1
1차 심사 : 2008. 10. 16
심사완료 : 2008. 10. 23

2. 실험

2.1 볼로미터 설계 및 해석

저항형 볼로미터는 Honeywell 타입으로 웨이퍼 상에서 기울기를 갖고 상부에 띄우는 브리지구조로 설계하였으며, 이 때 볼로미터의 크기는 $78 \times 78 \mu\text{m}^2$ 로 하였다. 적외선 감지물질로는 V-W-O 합금으로 설계하였으며, $\lambda/4$ 구조를 갖기 위하여 굴절율을 고려한 박막층의 두께를 공정설계에 적용하였다.

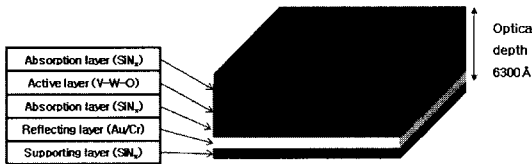


그림 1. $\lambda/4$ 흡수층 구조 설계.

Fig. 1. $\lambda/4$ absorbing structure design.

이산화탄소 가스의 공진과장인 $4.26 \mu\text{m}$ 를 기준으로 $1.065 \mu\text{m}$ 의 두께가 필요하며, 흡수층인 SiN_x 의 굴절율 1.7로 나누어 계산하면 6300 \AA 이므로 반사판 상부의 흡수층 3000 \AA , 감지층 300 \AA , 흡수층 3000 \AA 으로 설계하였다. 감지층의 두께는 흡수층에 비하여 매우 작으므로 SiN_x 의 굴절율을 적용하여 설계하였다. 볼로미터 구조의 열고립 구조 특성상 상부에 띄우는 브리지구조로 설계되어있기 때문에 구조의 물리적 안정성에 대한 부분을 고려하여 유한요소법(Finite Element Method)으로 자체 하중에 의한 비틀림 또는 변형에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 볼로미터의 지지다리는 $5 \mu\text{m}$ 의 폭으로 하였고 전극패턴은 $3 \mu\text{m}$ 의 폭으로 설계하였으며, 볼로미터 브리지의 크기는 $48 \mu\text{m}$ 으로 하였고, 감지층의 크기는 $46 \mu\text{m}$ 로 설계하였다. 이 때 시뮬레이션을 위한 각 재료상수로 탄성계수, 포아송비 및 밀도를 이용하였다[10].

표 1. 볼로미터 재료상수.

Table 1. Material constants of bolometer.

Parameters	SiN_x	Cr	Au
Young's Modulus (GPa)	247	248	77
Poisson's ratio	0.25	-	0.42
Density (kg/m ³)	3100	7190	19320
Specific heat (J/K kg)	1450	129	448
Leg length (μm)	107	107	107
Leg width (μm)	5	3	3
Leg thick. (μm)	0.6	0.05	0.03

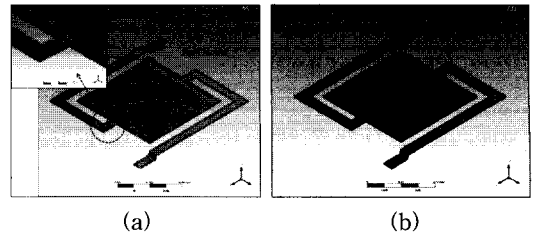


그림 2. 유한요소법 시뮬레이션 설계.

(a) Shell 모델 (b) Mesh

Fig. 2. Simulation design of finite element method (a) Shell model (b) Mesh.

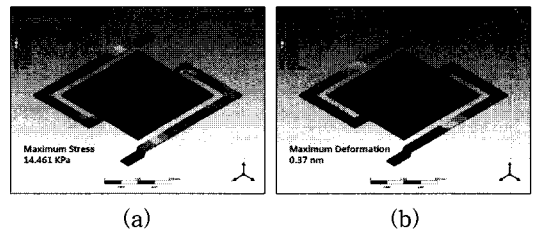


그림 3. 유한요소법 시뮬레이션 결과.

(a) 최대응력(14.461 kPa) (b) 최대변형(0.37 nm)

Fig. 3. Simulation results of finite element method (a) Stress max.(14.461 kPa) (b) Deformation max(0.37 nm).

볼로미터 구조상에 브리지층과 전극패드를 연결하는 지지다리의 각도는 70° 로 설정하였으며 유한요소법으로 각 단위 mesh의 분해능은 $1 \mu\text{m}$ 로 하였다. 이렇게 설계된 시뮬레이션의 결과 자체 하중에 의한 stress는 14.461 kPa , 변형은 0.37 nm 로 자체 하중에 의한 변형은 무시할 정도임을 확인할 수 있었다.

단위 셀의 크기는 $78 \times 78 \mu\text{m}^2$ 로 21×21 배열의 어레이 형태로 구성하여 적외선센서를 설계하였다. 각 열의 셀은 직렬로 회로를 구성하였으며, 전체적으로는 병렬로 회로를 구성하여 각 저항에 대한 변화를 최대한으로 하는 전체 저항값을 갖도록 하였다. 설계된 볼로미터의 열용량(C)과 열전도도(G) 및 열시정수(τ)는 다음과 같은 공식으로 산출하였다[11].

$$C = \rho c V = \rho c w l (J / K) \quad (1)$$

$$G = \kappa \frac{w d}{l} (W / K) \quad (2)$$

$$\tau = \frac{C}{G} \text{ (sec)} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 밀도, c 는 비열, κ 는 열전도도, V 는 센서 층의 부피, wd/l 은 지지대 치수를 나타낸다. 상기와 같은 식으로 표 1의 값을 대입하여 계산하면, 열용량은 9.75×10^{-9} J/K, 열전도도는 1.31×10^{-6} W/K, 열시정수는 7.4 ms를 얻을 수 있었다.

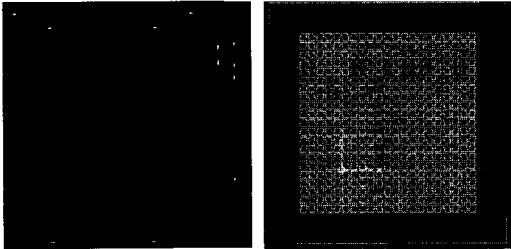


그림 4. 볼로미터 셀 및 어레이.
Fig. 4. Bolometer unit cell and array.

2.2 볼로미터 제조

볼로미터는 마이크로머시닝 기술을 이용하여 4인치 웨이퍼에서 제작되었다. 열고립구조를 만들기 위하여 희생층으로 사용된 폴리이미드 PI2610을 코팅 후 soft baking을 hot plate에서 95 °C, 115 °C에서 각각 1분씩 수행한 후 hard baking을 오븐에서 150 °C부터 4 °C/min의 속도로 승온하여 300 °C에서 30분간 유지하고 상온으로 냉각시키는 방법으로 curing을 진행하였다. 폴리이미드의 식각형상에 따라서 지지다리의 경사 및 형상이 결정되므로 완만한 경사를 이루고 under-cut 현상이 없게 하기 위하여 AZ9260 thick photoresist를 식각 마스크로 사용하여 구조체의 안정성과 후속공정에 대한 문제를 해결하였다.

폴리이미드 위에 PECVD SiN_x 1000 Å을 절연막으로 형성한 후 e-beam evaporator로 반사판을 Au/Cr 500 Å/300 Å 증착 후 wet etching 하였으며, PECVD SiN_x 2000 Å을 증착하여 지지대 및 절연막을 형성한 후 Au/Cr 전극패턴을 e-beam evaporator로 제작하였다.

적외선 감지물질은 V-W 합금 target을 적용하여 RF magnetron sputter로 200 Å 비정질박막을 형성한 후 300 °C에서 30분 동안 오븐에서 산화열처리를 진행하여, 300 Å 두께의 V-W-O를 얻을

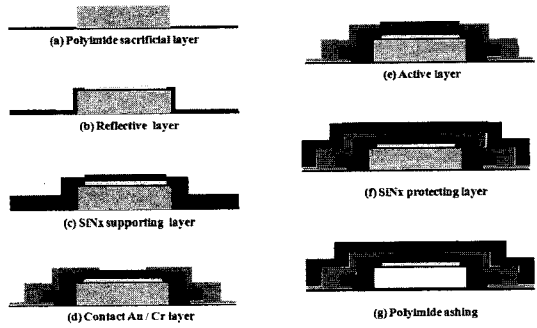


그림 5. 볼로미터 제조공정.
Fig. 5. Bolometer manufacturing process.

수 있었다. SiN_x 절연막 3000 Å 증착 및 패터닝 후 O₂ microwave plasma asher로 폴리이미드 희생층을 제거한 후 절단하여 적외선 센서를 제조하였다.

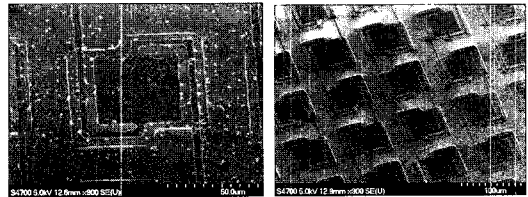


그림 6. 제조된 볼로미터 SEM 이미지.
Fig. 6. SEM image of manufactured bolometer.

2.3 볼로미터 평가

볼로미터의 특성 평가 시 소자의 열고립과 열요동 배제가 중요하므로 적외선필터가 장착된 진공패키지를 제작하여 소자의 성능평가를 수행하였다. 진공패키지는 rotary pump와 연결되어 1x10⁻³ Torr 이하의 진공도를 유지시켜 대류에 의한 열 손실을 최대한 억제하였다.

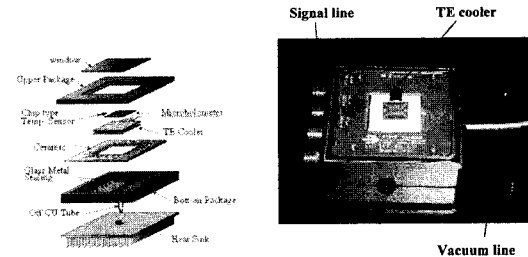


그림 7. 진공패키지.
Fig. 7. Vacuum package.

볼로미터의 적외선 특성측정은 독일 Graseby Infrared사의 모델 533 black body source(BBS)를 사용하였으며, BBS의 aperture를 통과해 조사되는 적외선은 chopper에 의하여 주파수가 변하며, 변화된 주파수에 따라 적외선 센서는 물리적인 양인 저항값이 변하게 된다. 이러한 저항차이로 발생하는 전압차이를 pre-amplifier를 이용하여 증폭하여, 입사광량에 해당하는 교류신호를 추출하여 증폭된 신호를 lock-in amplifier에서 증폭하여, 이로부터 잡음전압, 신호전압 등을 측정하였다. 신호전압의 측정은 chopper의 주파수와 동일한 주파수에서 얻었으며 chopper 주파수를 기준으로 lock-in amplifier에 입력하여 얻을 수 있었다.

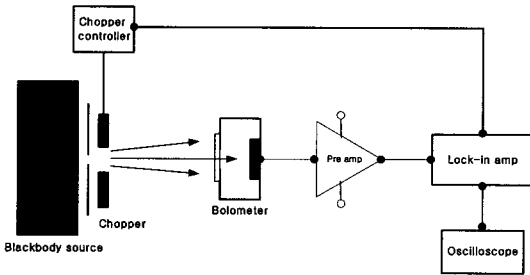


그림 8. 볼로미터 측정 시스템.
Fig. 8. Bolometer measuring system.

적외선필터는 $\lambda/4$ 구조특성을 갖는 $4.26 \pm 0.09 \mu\text{m}$ 파장대역을 갖는 필터를 적용하여 흡수층에 대한 효율을 측정하였고, 이에 대한 비교로 일반적인 적외선 $10 \pm 2 \mu\text{m}$ 파장대역을 갖는 적외선필터로 각각 측정하였다.

볼로미터의 응답특성(R)은 출력전압(V_{out})을 소자에 입사된 입력 복사에너지(P_{in})로 나눈 값으로 정의된다[11].

$$R = \frac{V_{out}}{P_{in}} \quad (4)$$

일반적으로 소자의 면적과 검출회로의 대역폭에 따라서 성능이 영향을 받기 때문에 측정된 값을 표준화하는 기준이 필요하며, 이와 같은 기준으로 감지도는 입사한 적외선을 전기적신호로 변환시켜 주는 정도와 미세한 온도차이를 구분하는가를 나타내는 척도로 표현된다.

$$D^* \approx \frac{R\sqrt{A_d\Delta f}}{V_{nRMS}} \quad (\text{cm}\sqrt{\text{Hz}}/W) \quad (5)$$

여기에서 A_d 는 소자의 적외선 흡수면적을 나타내며 Δf 는 등가잡음밴드폭(Equivalent Noise Bandwidth, ENBW)으로 검출회로 내의 적분시간에 반비례하는 값으로 $1/(2T_{int})$ 로 주어지고 V_{nRMS} 는 잡음신호이다.

3. 결과 및 고찰

볼로미터의 특성 측정은 $4.26 \mu\text{m}$ 파장대역 필터를 적용한 $\lambda/4$ 흡수층 구조로 제작된 것과, $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 파장대역의 적외선 필터를 적용한 것으로 구분하여 반사판과 흡수층을 이용한 적외선 흡수에 대한 실험을 진행하였다. 표 2는 각 파장대역에서 응답특성과 감지도를 측정하기 위한 측정 파라미터를 나타낸다.

제조된 볼로미터의 바나듐텅스텐 옥사이드 감지물질 면적은 $2116 \mu\text{m}^2$ 이며, BBS와 소자간의 측정거리는 각각 3 cm, 8 cm에서 측정을 진행하였다. BBS로부터 소자에 입사된 광량은 Plank's equation에 의하여 BBS의 온도, aperture 크기, 반응면적, chopper와 소자사이 거리 및 필터의 투과율 등에 따라서 계산하고, modulation factor(=0.42)를 곱하여 정확한 입사광량을 구하였다.

계산된 광량에 주파수 10 Hz에서 lock-in amplifier에서 측정된 신호전압을 이용하여 식 (4)로부터 응답도(R)를 계산하였으며, 감지도특성은 식 (5)를 이용하여 값도 lock-in amplifier에서 구할 수 있으므로 측정된 소자의 반응면적을 대입하여 감지도(D^*)를 계산하였다.

표 2. 측정 파라미터.

Table 2. Measuring parameters.

Parameters	4.26 μm	8~12 μm
BBS temperature (K)	973	1073
BBS aperture (inch)	0.2	0.25
Active area A_d (μm^2)	2116	2116
Distance (cm)	3	8
Filter Transmission (%)	70	98
The intensity of radiation (W)	6.86×10^{-9}	7.9×10^{-9}
Leg thick. (μm)	0.5	0.05
Output voltage at 10Hz (mV)	78.16	58
Noise voltage at 10Hz (mV)	0.0236	0.02
ENBW Δf	0.25	0.25
Amp gain	100	250

표 3. 응답도 및 감지도.

Table 3. Responsivity and detectivity.

Measurement results	4.26 μm	8~12 μm	HEIMANN
응답도 (V/W)	1.07×10^5	2.94×10^4	7.4×10^5
감지도 ($\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$)	1.04×10^9	8.44×10^8	9.1×10^7

표 3은 본 연구에서 제작된 적외선 센서를 4.26 μm 파장대역 필터를 적용한 $\lambda/4$ 흡수층 구조로 제작된 것과, 8~12 μm 적외선 파장대역 필터를 적용하여 적외선 특성 응답도와 감지도를 기존 상용화 제품인 HEIMANN 센서와 비교하여 나타낸 것이다[12].

$\lambda/4$ 흡수층 구조로 제작된 센서의 응답도는 1.07×10^5 V/W, 감지도는 1.04×10^9 $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 로 반사판을 이용한 흡수층의 효과로 매우 우수한 적외선 센서의 특성을 나타냈으며, 8~12 μm 적외선 파장대역 필터를 적용하여 측정된 결과 응답도는 2.94×10^4 V/W, 감지도는 8.44×10^8 $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 로 나타났다. $\lambda/4$ 흡수층 구조효과에 대한 효율을 비교하여 보면 감지도 특성이 23.2 % 우수한 결과를 나타내며, 입사된 적외선이 $\lambda/4$ 공진구조에 의해 흡수 효율 특성을 향상시켜주는 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 $\lambda/4$ 공진흡수층 구조를 갖는 볼로미터는 유한요소법을 이용하여 구조적 안정성을 시뮬레이션 한 후 마이크로머시닝 공정을 이용하여 제작 후 볼로미터의 적외선 특성을 측정하였다. 흡수층에 대한 효과를 비교하기 위하여 파장대역이 다른 일반 적외선영역에 대한 효율성 실험을 진행하였으며, 4.26 μm 에서 23.2 % 정도 감지도가 우수함을 확인하였다.

4.26 μm 공진구조를 만족하는 볼로미터를 설계한 결과 열용량은 9.75×10^{-9} J/K, 열전도도는 1.31×10^{-6} W/K, 열시정수는 7.4 ms로 계산되었으며, 응답도는 1.07×10^5 V/W, 감지도는 1.04×10^9 $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 를 얻을 수 있었다. 본 실험을 통해서 $\lambda/4$ 공진흡수층 구조를 갖는 볼로미터형 적외선 센서의 성능에 대한 결과를 확인하였다.

참고 문헌

[1] B. E. Cole, "Monolithic two-dimensional arrays

of micromachined microstructures for infrared applications", Proceedings of the IEEE, Vol. 86, p. 1679, 1998.

[2] Paul W. Kruse, "A comparison of the limits to the performance of thermal and photon detector imaging arrays", Infrared Phys. Tech, Vol. 36, p. 869, 1995.

[3] H. K. Lee, J. B. Yoon, E. S. Yoon, S. B. Ju, Y.-J. Yong, W. Lee, and S. G. Kim, "A high fill-factor infrared bolometer using micromachined multilevel electrothermal structures", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 46, p. 1489, 1999.

[4] L. Dobrzanski, E. Nossarzewska-Orowska, Z. Nowak, and J. Piotrowski, "Micromachined silicon bolometers as detectors of soft X-ray, ultraviolet, visible and infrared radiation", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 60, p. 154, 1997.

[5] R. J. Herring and P. E. Howard, "Design and performance of the Ultra 320 by 240 uncooled focal plane array and sensor", SPIE, Vol. 2746, p. 1, 1996.

[6] L. Mechin, J.-C. Ville'gier, and D. Bloyet, "Suspended epitaxial YBaCuO microbolometers fabricated by silicon micro-machining: Modeling and measurements", J. Appl. Phys., Vol. 81, p. 7039, 1997.

[7] E. Iborra, M. Clement, L. V. Herrero, and J. Sangrador, "IR uncooled bolometers based on amorphous $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$ on silicon micromachined structures", J. Microelectro Mechanical Systems, Vol. 11, p. 322, 2002.

[8] P. L. Richards, "Bolometers for infrared and millimeter waves", J. Appl. Phys., Vol. 76, p. 1, 1994.

[9] A. Rogalski, Infrared Detectors, Gordon and Breach Science Publishers, ch. 1, 2000.

[10] CRC Handbook, [Http://www.matwab.com](http://www.matwab.com)

[11] Paul W. Kruse and David D. Skatrud, "Uncooled infrared imaging arrays and systems", Academic press.

[12] www.hiemanssensor.com