

## 저항성 홀배열이 적용된 볼로미터의 적외선 흡수 특성 변화

김태현 · 오재섭 · 박종철 · 김희연 · 이종권<sup>†</sup>

### Variation in IR Absorption Characteristics of a Bolometer by Resistive Hole-array Patterns

Tae Hyun Kim, Jaesub Oh, Jongcheol Park, Hee Yeoun Kim, and Jong-Kwon Lee<sup>†</sup>

#### Abstract

In order to develop a highly sensitive infrared sensor, it is necessary to develop techniques for decreasing the rate of heat absorption and the transition of the absorption wavelength to a longer wavelength, both of which can be induced by decreasing the pixel size of the bolometer. Therefore, in this study, 1  $\mu\text{m}$  hole-arrays with a subwavelength smaller than the incident infrared wavelength were formed on the amorphous silicon-based microbolometer pixels in the absorber, which consisted of a TiN absorption layer, an a-Si resistance layer and a SiNx membrane support layer. We demonstrated that it is possible to reduce the thermal time constant by 16% relative to the hole-patternless bolometer, and that it is possible to shift the absorption peak to a shorter wavelength as well as increase absorption in the 4–8  $\mu\text{m}$  band to compensate for the infrared long-wavelength transition. These results demonstrate the potential for a new approach to improve the performance of high-resolution microbolometers.

**Keywords:** Microbolometer, hole-array, amorphous-Silicon, thermal mass, wavelength transition

#### 1. 서 론

적외선 영상 센서는 초기 군수용으로 주로 사용되어 오다가 점차 산업전반에 걸쳐 보편화 되어 사용되어 오면서, 최근에는 모바일 제품에 장착하여 언제 어디서나 적외선 영상을 획득할 수 있는 다양한 어플리케이션과 연동되어 그 사용이 확대되고 있다[1]. 이러한 적외선 감지센서는 적외선을 감지해 내는 방식에 따라 광자형 감지소자와 열형 감지소자로 나눌 수 있다[2]. 광자형 감지소자는 입사되는 적외선이 광흡수 물질에 있는 전자를 높은 에너지 준위로 여기 시킴으로써 얻어지는 전기적 신호를 이용하여 빠른 응답속도와 높은 감지능력을 보이지만, 잡음의 영향을 감소시키기 위해 저온 동작을 시켜야 하는 단점이 있게 된다. 한편, 열형 감지소자의 경우는 흡수된 적외선의 에

너지가 감지소자의 온도를 상승시키게 되고 감지소자의 전기 전도도 또는 열팽창과 같은 온도 의존성이 높은 물성의 변화를 전기적 신호로 감지하여 측정하게 된다. 특히, 볼로미터형 적외선 센서는 열형 적외선 센서의 일종으로써 입사된 적외선에 의한 온도변화에 따른 저항변화를 MEMS(micro electro mechanical system) 기술을 이용하여 제작된 마이크로 볼로미터와 신호검출 회로(ROIC)를 결합하여 제작하게 된다[3].

통상적으로 볼로미터 방식의 적외선 영상센서는 다수개의 센서가 집적되어 사용되는데, 같은 면적에 집적되는 정도가 높아 질수록 높은 품질의 영상을 얻을 수 있어, 최근 기술의 발전에 따라 적외선 센서의 화소 크기가 점차 소형화되어 가고 있다. 하지만, 적외선 센서의 크기가 소형화 될수록 열을 흡수하는 흡수층의 면적이 감소할 수 밖에 없는데, 적외선 센서의 화소 크기가 20  $\mu\text{m}$  이하로 줄어들게 될 경우에는 흡수층의 온도 변화량이 면적의 감소보다 더 작아지는 문제점이 발생하므로 적외선 센서의 높은 열고립이 필요한 상황이다. 또한 흡수층의 면적이 작아질 경우 흡수되는 파장이 점차 장파장 대역으로 이동하는 현상이 발생하는데, 이는 본래 측정하고자 하는 관심 파장대역의 효율을 떨어지게 하는 문제점을 야기하게 된다[4].

저항층, 흡수층, 볼로미터층 및 기계적 지지체층으로 구성된 마이크로 볼로미터에서 화소의 흡수층은 열적 절연을 제공하기 위해 높은 열저항 값을 사용하여 금속 반사층 위에 형성하게 된다. 이 경우 마이크로 볼로미터의 응답 속도는 감도에 필요한

나노종합기술원 나노구조기술개발부 (Department of Nanostructure Technology, National Nanofab Center)

National Nanofab Center, 291 Daehak-ro, Yuseoung-gu, Daejeon 34141, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author: jklee7@nnfc.re.kr

(Received: Aug. 27, 2018, Revised: Sep. 12, 2018, Accepted: Sep. 13, 2018)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

매우 높은 열저항에 의해 영향을 받게되며, 열 시상수는 화소의 흡수 멤브레인의 열질량에 비례하므로 응답 속도를 증가시키기 위해서는 열질량을 줄여야 한다. 여기서 열질량은 흡수막의 질량에 비례하게 되므로, 열질량을 줄이기 위해 더 얇은 흡수 멤브레인을 사용할 수 있지만, 기계적으로 한정된 두께의 지지층이 반드시 필요한 마이크로 볼로미터 구조에서 열질량을 감소시키는 데는 한계가 있게 된다. 따라서, 멤브레인에 홀패턴 등을 형성하여 열질량을 줄이면서 금속층 또는 기관 상에 서브파장 크기의 홀들을 형성함으로써 다양한 전자파 대역에 대한 금속층 표면에서의 입사광의 위상 및 진폭의 급격한 변화를 유도하고, 이를 통해 고유한 스펙트럼 응답특성을 조절하는 기술들이 연구되고 있다[5-7]. 이러한 2차원 형태의 홀패턴 구조는 메타표면의 일종으로, 등가 유효 표면 임피던스를 갖는 얇은층으로서 협대역 또는 파장변조 흡수체를 구현하기 위한 다양한 구조가 최근에 제안되고 개발되고 있다[7-9].

본 연구에서는 비정질-Si기반 마이크로 볼로미터의 화소영역에  $1\ \mu\text{m}$  크기를 갖는 직사각형 형태의 홀배열을 3가지로 다르게 하여 흡수층, 저항층, 지지층을 관통하여 형성하였다. 이를 통해, 홀패턴이 없는 기준 화소대비 열 질량을 줄여 열시상수가 16% 개선됨을 보였다. 아울러, 화소내에 형성된 홀배열 구조들에 의해 적외선 흡수대역이 단파장쪽으로 변화됨을 확인함으로써, 볼로미터의 화소 크기가 소형화됨에 따라 나타나는 흡수된 적외선이 장파장 대역으로 천이하는 것을 보상할 수 있음을 보였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 저항성 홀배열이 적용된 볼로미터 구조 설계

적외선 검출회로가 형성된 기관상에 반사판과 보호막을 포함하는 반사부를 형성하고, 적외선을 흡수하여 온도가 상승하는 흡수부는 기관 상부에 일정거리 떨어져 형성된 Fig. 1의 구조를 적용하였다. 흡수부의 양측에는 앵커가 형성되어 흡수부를 지지하며, 앵커와 기관 사이에는 금속패드가 형성된다. 흡수부의 양측에는 한 쌍의 레그가 형성되어 흡수부에서 흡수한 적외선에 의해 상승된 온도가 앵커를 통해 열전달되는 것을 최소화 한다. 마이크로 볼로미터로 입사되는 적외선은 반사부로 입사된 후 반사되어 흡수부로 재흡수된다. 흡수부는 흡수층과 저항층을 포함 하는데, 흡수층은 직접적으로 적외선을 흡수하여 온도가 상승하게 되고, 저항층은 흡수층으로부터 열을 전달받아 온도가 상승함에 따라 전기적 특성(저항)이 변화한다. 앵커는 저항층과 기관에 형성된 적외선 검출회로를 전기적으로 연결하고, 적외선 검출회로는 저항층에서 변화하는 전기적 특성을 측정함으로써 볼로미터에 입사 및 흡수된 적외선의 복사량을 측정한다. 이와 같은 볼로미터에서는 적외선 흡수율을 높이기 위해 반사판으로부터 흡수층까지  $\lambda/4$ 거리만큼 위치하여  $\lambda$ 의 파장으로 입사

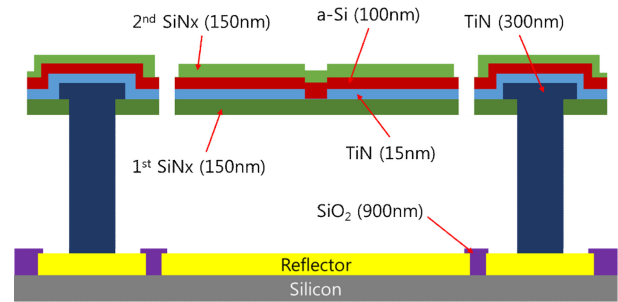


Fig. 1. Schematic vertical view of a-Si based micro-bolometer adopting the Salisbury Screen structure.

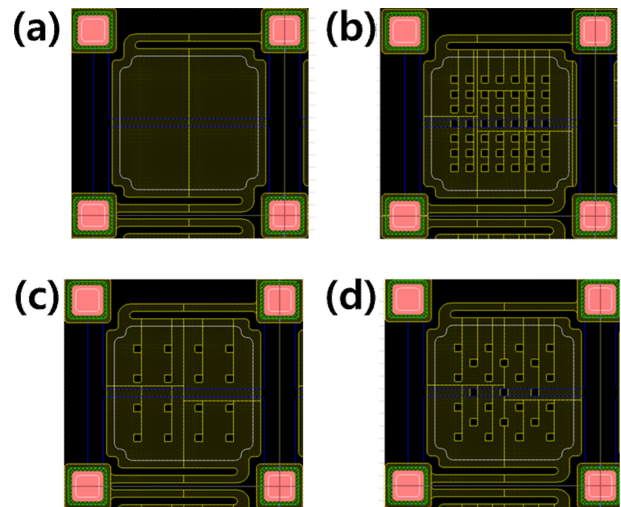


Fig. 2. Design layouts of (a) the micro-bolometer pixel without hole patterns and the micro-bolometer pixels with  $1\ \mu\text{m}$ -sized holes: (b) sample A (7 by 7 hole array), (c) sample B (4 by 4 hole array), and (d) sample C (25 holes).

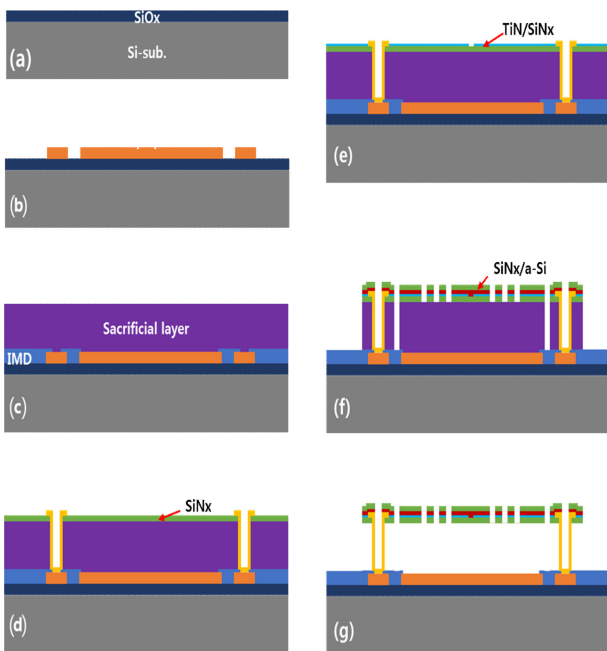
된 적외선의 대부분이 멤브레인에 흡수되는 Feby-Perot 공진구조가 적용된다.

센서의 화소가 소형화되는 경우를 고려해 보면, 예를 들어  $30\ \mu\text{m}$  크기인 센서의 화소를 원래 크기의 절반인  $15\ \mu\text{m}$ 로 줄이는 경우, 앵커의 직경은 원래 센서의 앵커 직경의 절반이 되어야 하고, 소형화된 센서의 레그의 폭은 원래 센서의 레그 폭의 절반이 되어야 한다. 하지만, 적용되는 반도체 공정상의 문제와 적외선 센서의 구조적 문제로 인해, 앵커와 레그는 일정 크기 이하로 줄일 수 없으므로, 센서 화소의 흡수층 유효면적을 절반 이상의 크기로 줄여야만 한다. 이러한 적외선 센서가 구조적으로 소형화 될수록 실질적으로 열을 흡수하는 흡수판은 그 길이 및 면적이 더욱 줄어들 수 밖에 없으므로, 충분한 열을 흡수할 수 없어 높은 열고립이 필요하다. 따라서, 홀패턴이 형성되지 않은 기준 화소(Fig. 2a) 대비, 그 크기가  $1\ \mu\text{m}$  인 홀을 센서 화소의 배열과 같은 사각배열 형태로 형성하였고, 홀과 홀 사이의 간격을  $2\ \mu\text{m}$  (Fig. 2b, sample A),  $4\ \mu\text{m}$  (Fig. 2c, sample B), 그리고 대각방향 홀 사이 간격이  $2.8\ \mu\text{m}$  (Fig. 2d, sample C)로 각

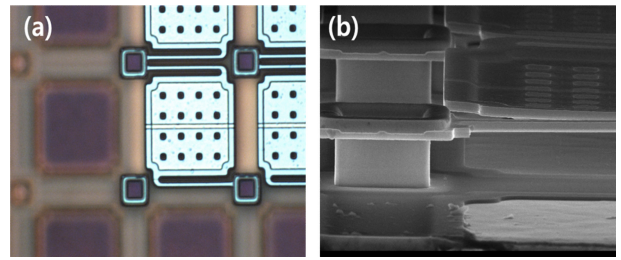
각 설계하고, 이를 바탕으로 마이크로 볼로미터 화소들을 제작하였다.

### 2.2 저항성 흡배열이 적용된 볼로미터 제작 공정

전체적인 센서의 구조는 최상부에 매우 얇은 금속 박막과 최하부 금속층인 반사층과 흡수되는 중심파장에 대하여 공명 흡수되는 구조로 구성되어 있다. 우선 Fig. 3a와 같이 SiO<sub>x</sub> 증착되어진 Si 기판 위에 스퍼터 (sputter) 장비를 이용하여 약 700 nm의 Ti/Al/TiN을 증착시키고, 이를 식각하여 mirror 및 하부 전극을 제작하였다(Fig. 3b). 제작된 하부전극 위에 IMD(Inter Metal Dielectric) SiO<sub>x</sub> 증착 및 평탄화 공정을 거친 후 2 μm의 희생층을 증착한다(Fig. 3c). 그 위에 PECVD를 이용하여 SiN<sub>x</sub> 150 nm를 증착하고 하부전극까지 Via를 형성한다(Fig. 3d). 하부전극의 최상층인 TiN과 같은 물질로 공진구조의 기둥인 앵커를 형성하고 흡수층의 효율을 극대화 하기 위해 TiN 15 nm를 스퍼터 장비를 이용하여 증착 및 식각한다(Fig. 3e). 그 위에 비정질-Si를 증착하고, 희생층 위의 SiN<sub>x</sub>와 동일한 두께로 SiN<sub>x</sub>를 증착하여 흡수층을 중심으로 SiN<sub>x</sub> 샌드위치 구조를 형성한다. 그 이후 화소 모양으로 식각하여 개별 화소로 분리하고 화소내 흡수층/저항층/기계적 지지층을 관통하는 홀 패턴을 형성한다(Fig. 3f). 마지막으로 등방성 식각 공정을 통해 희생층을 제거하여 단



**Fig. 3.** Process flow to fabricate the a-Si based micro-bolometer with 1μm-sized hole array in the absorbing pixel. (a) SiO<sub>x</sub> deposition on a Si-substrate, (b) formation of the mirror layer(Ti/Al/TiN) and the bottom electrode, (c) deposition of IMD (Inter Metal Dielectric) and sacrificial layers, (d) SiN<sub>x</sub> deposition and via hole formation, (e) Anchor formation and TiN deposition, (f) a-Si/SiN<sub>x</sub> deposition and hole pattern formation, (g) completion of pixel structure by removing the sacrificial layer.



**Fig. 4.** (a) Optical microscope image and (b) Scanning Electron Microscope image of the fabricated sample C.

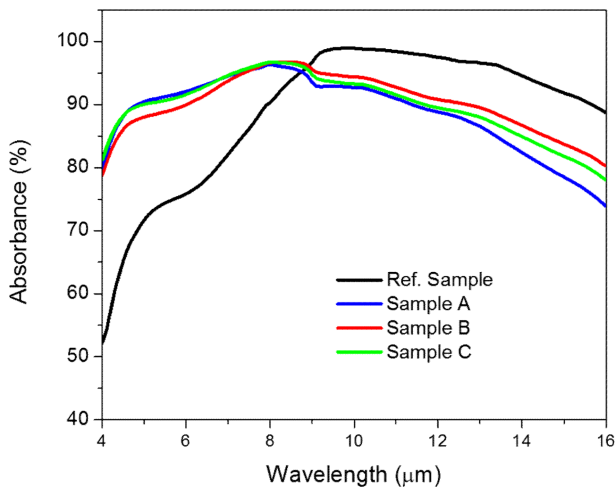
위 화소를 완성하였다(Fig. 3g). Fig. 4는 제작된 비정질-Si볼로미터의 광학현미경 사진(Fig. 4a)과 SEM(scanning electron microscope) 사진(Fig. 4b)으로 크기가 25 μm × 25 μm 화소에 형성된 Sample C의 흡배열 구조를 보여주고 있다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 흡배열이 적용된 볼로미터의 흡수 스펙트럼

Fig. 5에는 화소크기가 25 μm × 25 μm인 비정질-Si 볼로미터(Ref. sample)를 기준으로, 볼로미터 화소의 흡수부 (흡수층:TiN, 저항층:a-Si, 지지부:SiN<sub>x</sub>멤브레인)를 관통하여 형성된 홀패턴이 있는 세 종류의 볼로미터 샘플들에 대해 측정된 적외선 흡수도를 나타내고 있다. 여기서, sample A(B)는 1 μm 크기의 홀이 2 μm (4 μm) 주기로 7×7 (4×4) 직각 배열로 형성되어 있고, sample C의 경우는 1 μm 크기의 홀이 대각선 방향으로 2.8 μm 주기로 25개 형성되어 있다. Fig. 5에 보여진대로 홀패턴이 형성되지 않은 적외선 센서에 비해서 홀패턴이 화소에 형성된 볼로미터 센서들이 4.0~8.5 μm 대역에서 흡수도가 더 높아진 것을 확인할 수 있다. 반면에 8.5 μm~16.0 μm대역에서는 홀패턴이 형성되지 않은 샘플에서 흡수도가 높게 측정되었다. 이를 통해, 동일한 구조를 갖는 흡수층에 단순히 홀패턴을 형성한 경우에는 적외선 흡수광의 피크 위치가 홀패턴이 형성되지 않은 샘플대비 단파장쪽으로 천이됨을 알 수 있다. 즉, 적외선 센서가 소형화 될수록 흡수되는 적외선 대역이 장파장대로 변동되는 점을 감안하면, 원하는 흡수 피크의 위치 (8~10 μm) 영역에서 높은 흡수율을 유지하는데 이러한 홀패턴들이 적용될 수 있음을 알 수 있다.

Salisbury구조 기반의 기준 마이크로 볼로미터 센서 (Ref sample)에서는 저항 흡수층의 면저항이 377 Ω/□이 되도록 흡수층의 두께 및 구조가 형성되어, Fig. 5에서 처럼 흡수 피크의 위치가 8~9 μm 영역에서 최대화되어 나타난다. 한편, 1 μm 크기의 홀패턴이 형성된 샘플들에서는 흡배열 형태에 따라 유효흡수면적이 Ref. Sample (400 μm<sup>2</sup>)대비 sample A는 87.7%, sample B는 96%, sample C는 93.8%로 감소됨에 따른 면저항값 변화로 sample



**Fig. 5.** Measured absorbance spectra as a function of wavelength ranging from 4 to 16  $\mu\text{m}$  for the a-Si based micro-bolometers (sample A, B, and C) with 1  $\mu\text{m}$ -sized hole arrays, in comparison with the bolometer (Ref. Sample) without the hole array.

A, C, B순서로 흡수도 피크의 위치가 차츰 단파장쪽으로 이동함을 알 수 있다. 또한, 입사광장대역 보다 훨씬 작은 흡수대역 주기와 크기로 인해 메타표면에서 나타나는 입사광의 위상 및 진폭의 변화가 4~8  $\mu\text{m}$  대역에서 그 흡수대역을 증가시키게 됨을 알 수 있다.

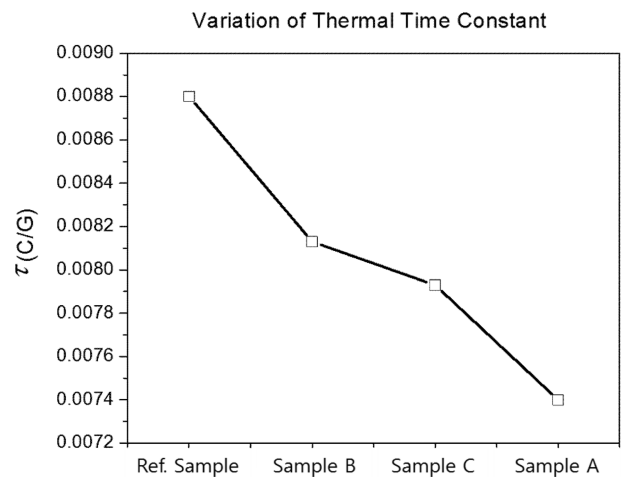
따라서, 저항성 흡배열이 적용된 마이크로 볼로미터의 등가 유효 임피던스를 최적화하기 위해 흡배열 별로 흡수층의 두께 및 구조를 변화시켜 면저항을 변화시킴으로써, 기준 볼로미터 샘플과 동등한 수준의 피크 흡수도와 보다 넓은 대역에서의 적외선 흡수를 실현 할 수도 있다.

### 3.2 흡배열이 적용된 볼로미터의 열시상수

고성능의 마이크로 볼로미터 구현을 위해서는 응답 속도 향상이 요구되는데, 이를 위해서는 열질량을 줄여야 한다. 이를 위해 앞서 기술한 1  $\mu\text{m}$  크기의 홀이 화소내에 배열된 볼로미터의 열시상수 변화를 기준샘플과 비교해서 조사해 보았다. 흡배열이 없는 기준 볼로미터의 경우 흡수부의 부피가 166.0  $\mu\text{m}^3$ 인 반면, 흡배열이 형성된 sample A, B, C의 경우에는 그 부피가 각각 139.7  $\mu\text{m}^3$ , 153.4  $\mu\text{m}^3$ , 149.6  $\mu\text{m}^3$ 으로 기준 샘플보다 줄어든다. 이러한 부피변화에 따른 열용량 (Heat Capacitance,  $C$ )의 변화율과 측정된 샘플의 열전도도 (Thermal conductance:  $G$ )를 Table 1에 나타냈다. 얻어진 열용량과 열전도도를 이용해서 얻어진 열시상수 ( $\tau=C/G$ )의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 기준 샘플대비 유효부피가 Sample B, C, A의 순으로 점차적으로 감소됨에 따라서, 해당하는 열질량도 이에따라 감소하게 된다. 따라서, 기준 샘플대비 흡배열이 형성된 볼로미터 샘플들의 열시상수 변화율을 보면, sample A의 경우 16.0% 감소하여 가장 많이 줄어들었

**Table 1.** List of volume, heat capacitance, and thermal conductance for the micro-bolometer with the hole patterned array (Sample A, B, and C) and those for the ref. sample without the hole array

Sample	Volume [ $\mu\text{m}^3$ ]	Heat Capacitance [J/K]	Thermal Conductance [W/K]
Ref. Sample	166.0	2.446E-10	2.78E-8
Sample B	153.4	2.260E-10	2.78E-8
Sample C	149.6	2.205E-10	2.78E-8
Sample A	140.0	2.058E-10	2.78E-8



**Fig. 6.** Variation of the thermal time constant for the micro-bolometers with the resistive hole-array patterns (sample A, B, and C) relative to that of the reference bolometer.

고, 그 다음으로 Sample C에서는 10% 감소, Sample B에서는 7.6% 감소됨을 확인할 수 있었다.

고성능을 갖는 고해상도의 마이크로 볼로미터를 구현하기 위해서, 열전도도는 가급적 낮춰야 하고 적외선 흡수도는 광대역에서 가능한 한 높여줘야 하며 열시상수를 낮추기 위해서는 열용량을 줄이는 전략이 필요하다. 이러한 관점에서 볼 때, 본 연구에서는 마이크로 볼로미터 화소상에 흡배열 구조를 도입함으로써, 열질량을 줄여 열시상수를 개선할 수 있을 뿐만 아니라 고해상도 적외선 영상센서 구현시 화소크기 감소에 따른 적외선 흡수대역의 장파장 천이를 흡배열 기반의 화소구조로 보완할 수 있음을 보였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 TiN 흡수층과 비정질-Si 저항층, 그리고  $\text{SiN}_x$  멤브레인 지지층으로 구성된 흡수부에 1  $\mu\text{m}$  크기의 흡배열을 마이크로 볼로미터 화소에 형성시켰다. 이를 통해, 열시상수를 흡배열이 없는 볼로미터 대비 16% 줄일 수 있었고, 적외선 흡

수피크가 단파장쪽으로 천이되며 4~8  $\mu\text{m}$ 대역 흡수도가 증가되는 현상을 관찰하였다. 따라서, 고해상도 볼로미터 구현시 화소 크기 감소에 따른 적외선 흡수피크의 장파장 천이현상을 저항성 흡배열 패턴에 의한 단파장 천이 효과로 보상함으로써, 관심 파장대역(8~14  $\mu\text{m}$ )의 적외선 흡수도를 유지하면서 열질량 감소에 따른 반응시간 개선을 통해 고해상도 볼로미터의 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 접근법을 제시할 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단-나노·소재기술개발사업 (NRF-2015M3A7B7044730), 교육부의 재원으로 한국연구재단-기초연구사업 (2017R1D1A1B030 34672) 및 산업통상자원부의 국제공동기술개발사업 (N000 2454)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 아울러, 나노종합기술원의 나노구조공정팀과 나노소자공정팀의 볼로미터 제작공정 협조에 감사드립니다.

### REFERENCES

- [1] A. Rogalski, P. Martyniuk, and M. Kopytko, "Challenges of small-pixel infrared detectors: a review," *Rep. Prog. Phys.* Vol. 79, p. 046501, 2016.
- [2] A. Rogalski, "Infrared detectors: status and trends," *Prog. Quant. Electron.* Vol. 27, p. 59, 2003.
- [3] M. Kim, S. Park, K. Lee, and H.-J. Yoo, "Uncooled Infrared Micro-Bolometer FPA for Multiple Digital Correlated Double Sampling," *IEEE Photonic Tech. Lett.* Vol. 30, p. 517, 2018.
- [4] J. J. Yon, E. Mottin, L. Biancardini, L. Letellier, and J. L. Tissot, "Infrared microbolometer sensors and their application in automotive safety," *Adv. Microsystem for Automotive Appl.*, p. 137, 2003.
- [5] J.-Y. Jung, K. Song, J.-H. Choi, J. Lee, D.-G. Choi, J.-H. Jeong, and D. P. Neikirk, "Infrared broadband metasurface absorber for reducing the thermal mass of a microbolometer," *Sci. Rep.* Vol. 7, p. 430, 2017.
- [6] J. Kim, K. Han, and J. W. Hahn, "Selective dual-band metamaterial perfect absorber for infrared stealth technology," *Sci. Rep.* Vol. 7, p. 6740, 2017.
- [7] T. Maier and H. Brückl, "Wavelength-tunable microbolometers with metamaterial absorbers," *Opt. Lett.* Vol. 34, p. 3012, 2009.
- [8] A. Tittl, A.-K. U. Michel, M. Schaferling, X. Yin, B. Gholipour, L. Cui, M. Wuttig, T. Taubner, F. Neubrech, and H. Giessen, "A Switchable Mid-Infrared Plasmonic Perfect Absorber with Multispectral Thermal Imaging Capability," *Adv. Mater.* Vol. 27, p. 4597, 2015.
- [9] J. Grant, M. Kenney, Y. D. Shah, I. Escercia-Carranza, and D. R. S. Cumming, "CMOS compatible metamaterial absorbers for hyperspectral medium wave infrared imaging and sensing applications," *Opt. Express* Vol. 26, p. 10408, 2018.