

8 μ m 피치 SXGA급 비냉각 적외선 검출기 개발 및 환경성 평가

Development of 8 μ m pitch SXGA-class uncooled infrared detector and Environmental assessment

전승기*¹⁾ . 권명호¹⁾ . 강상구*¹⁾ . 한명수²⁾

Seung Ki Jeon¹⁾ . Myung Ho Kwon¹⁾ . Sang Gu Kang*¹⁾ . Myung Soo Han²⁾

[초 록]

비냉각형 적외선 검출기를 적용한 열상 시스템의 경우 군수용 및 민수용 분야에서 다양하게 응용 범위를 넓혀가고 있다. 특히 군수용 열상 시스템의 경우 보다 체계의 고도화를 위한 고해상도 적외선 센서 개발이 요구되고, 민수용 열상 시스템의 경우 다양한 애플리케이션에 적용하기 위해 열상 검출기의 소형화 및 경량화가 요구된다. 적외선 센서의 픽셀 피치를 17 μ m 피치에서 8 μ m 피치 크기로 감소시킴으로써, 소형화 및 고해상도 센서 개발이 용이하지만, 이로 인한 적외선 센서 성능이 감소하는 문제를 극복하는 것이 기술 개발 핵심이다. 감소된 픽셀 피치의 적외선 센서의 성능을 극대화하기 위해서는 입사하는 적외선을 흡수하는 영역과 열적 고립을 위한 영역의 구조적 분리가 필요하며 이를 구현하기 위해 복층 구조의 마이크로볼로미터 개발이 요구된다. 본 논문에서는 8 μ m 픽셀 피치를 갖는 SXGA급(1280*1024) 비냉각 적외선 검출기 개발에 관한 것으로 피치가 감소하면서 발생하는 수광 면적 감소 및 열적 고립도 감소를 개선하기 위하여 복층 구조 FPA(Focal Plane Array) 설계 기술 및 0.18 μ m MEMS Technology 설계 기술을 활용하였으며, 소형화 및 경량화를 위해 세라믹 패키지를 적용하여 NETD 50mK 이하의 비냉각형 적외선 검출기를 제작하였다. 또한 비냉각 적외선 검출기에 대한 환경성 및 신뢰성 시험 평가를 수행하여 체계적용성 및 실용성을 검증하였다.

[ABSTRACT]

In the case of a thermal imaging system to which a uncooled infrared detector is applied, the application range is expanding in various ways in the field of military and civilian use. In particular, in the case of a military thermal system, it is required to develop a high-resolution infrared sensor to upgrade the system, and in the case of a civil thermal system, it is required to miniaturize and lighten the thermal detector to apply to various applications. By reducing the pixel pitch of infrared sensors from 17 μ m pitch to 8 μ m pitch size, it is easy to develop miniaturized and high-resolution sensors, but overcoming the problem of decreasing infrared sensor performance is the key to technology development. The structural separation of an area absorbing incident infrared rays and an area for thermal isolation is required to maximize the performance of an infrared sensor with a reduced pixel pitch, and to implement this, it is required to develop a multi-layered microbolometer. In this paper, we develop an SXGA-class (1280*1024) uncooled infrared detector with an 8 μ m pixel pitch and fabricate using multilayered FPA(focal plane array) design techniques and 0.18 μ m 3D MEMS technology design techniques to improve absorption area and thermal isolation reduction as the pitch decreases. For miniaturization and weight reduction of infrared detectors, ceramic packages were applied to manufacture uncooled infrared detectors of NETD 50 mK or less. In addition, environmental and reliability test evaluation of uncooled infrared detectors was performed to verify system applicability and practicality.

Key Words : microbolometer, 8 μ m pixel pitch, uncooled infrared sensor, multiple-level structure, focal plane array

1) 아이쓰리시스템 제2센서사업부 (The 2nd Research and Development Department, i3system Inc, Korea)

2) 국방과학연구소 민군협력진흥원 (Institute of Civil-Military Technology Cooperation, Agency for Defense Development, Korea)

* Corresponding author, E-mail: kangsg@i3system.com Copyright © The Korean Institute of Defense Technology

Received : September 5, 2022

Revised :

Accepted : September 20, 2022

1. 서론

비냉각형 적외선 센서는 상온 동작 특성으로 추가적인 냉각 장치가 불필요하므로 시스템 소형화 및 저전력화가 가능하고 냉각형 센서 대비 가격이 저렴하다는 장점이 있다. 또한 비냉각 적외선 센서의 기술 발전으로 성능이 향상되고 운용 신뢰성을 확보함에 따라 민수용뿐만 아니라 군수용에도 널리 활용되고 있다.^[1]

군수용에 탑재되는 비냉각 적외선 센서는 고해상도 이미지 확보를 위해 대면적 Focal plane array (FPA) 개발이 요구된다. 픽셀 피치를 줄이면 대면적 FPA 개발에 용이하기 때문에 많은 업체들이 센서 픽셀 피치를 줄이는 방향으로 제품 개발을 진행하고 있다. 비냉각 적외선 센서의 경우 17um 픽셀 피치에서 12um 피치로 전환되는 추세로 현재 상용으로 제작되는 비냉각 적외선 센서의 최소 픽셀 피치는 10um 수준이다.^[2]

그러나 픽셀 피치가 줄어들어 따라 적외선 흡수 효율 감소 등의 영향으로 센서 성능이 떨어지기 때문에 픽셀 피치를 감소시키는 동시에 센서 감도를 높이는 것이 기술 개발의 핵심이라고 할 수 있다. 센서 감도를 높이기 위한 방법으로 FPA를 구성하는 적외선 반응체의 구조를 단층구조에서 복층 구조로 제작하는 방법이 있다. 적외선 흡수 효율과 열적 고립을 동시에 증가시킬 때 센서 감도가 높아지는데 복층 FPA 구조는 이러한 흡수 공간과 열적 고립 공간을 각 층에 분리하여 제작이 가능하기 때문에 단층 구조에 비해 효과적이다.^[3]

본 논문에서는 Umbrella 타입 구조^[4] 8um 픽셀 피치 복층 구조의 SXGA(1280*1024)급 FPA 설계 제작 및 체계적용성과 실용화 검증을 위한 환경성 및 신뢰성 평가 결과에 대하여 기술하였다.

2. 비냉각 적외선 검출기 제작

2.1 멀티레벨 구조 8um 픽셀 피치 FPA 설계

볼로미터 적외선 검출기는 일반적으로 NETD(Noise Equivalent Temperature Difference; 온도분해능)를 성능 지수로 사용한다.

$$NETD = \frac{V_n}{V_s (\Delta T_{target} / \Delta T_{target})} \quad (1)$$

NETD는 잡음(Vn)에 대한 단위온도당 신호(Vs/ΔT)의 비율로서, 신호(Vs)는 응답도(Rv)와 입사광(Φ)의 곱이다. 이때, 응답도는 입사광에 대한 전압 변화이며, 바이어스(iR0)가 높을수록, TCR(α)이 높을수록, 흡수율(ε)이 높을수록, 열 전도도(G)가 낮을수록 좋은 특성을 나타낸다.

$$R_v = \frac{V_s}{\Phi} = \frac{iR_0 \alpha \epsilon}{G_{th} \sqrt{(1 + \omega^2 \tau^2)}} \quad (2)$$

단, Ff는 수광 비율, Ad는 수광 면적, F는 렌즈의 f#, dM/dT는 단위 면적당 단위 온도당 광량을 나타낸다.

$$NETD = \frac{V_n}{\frac{F_f A_d}{4F^2} \cdot \frac{iR_0 \alpha \epsilon}{G_{th}} \cdot \left(\frac{dM}{dT} \right)_{298K, 8 \sim 14um}} \quad (3)$$

볼로미터에서 NETD는 픽셀 피치 17um에서 8um로 크기가 감소하면 수광면적(Ad) 감소에 반비례하여 증가하고, 피치 감소에 의하여 연결다리의 길이가 짧아짐에 따라 열 전도도(G) 증가에 비례하여 증가한다.

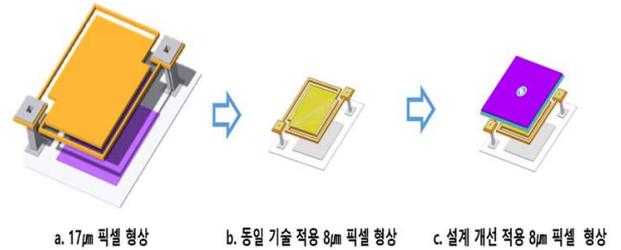


그림 1. 볼로미터 피치 크기 감소 및 설계 변경 모식도

따라서, 그림 1의 'a'와 같은 기존의 17um 피치 설계(설계 NETD 50mK)와 동일한 기술이 적용된 'b'의 경우 수광면적 감소 및 열 전도도 증가로 인하여 300 mK 이상의 설계 NETD를 갖는다.

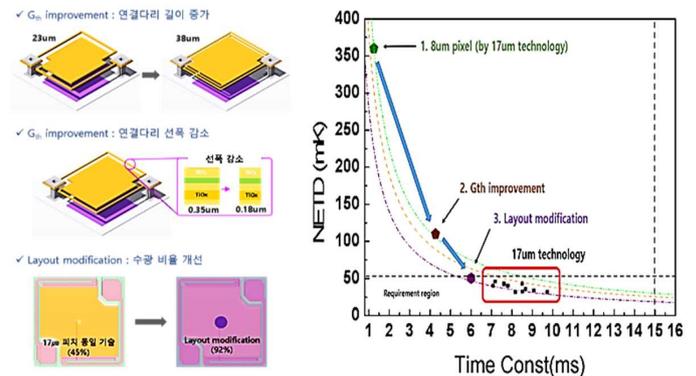


그림 2. 설계 변경에 따른 NETD 변화

이를 개선하기 위하여 연결다리 길이를 늘리면서, 최소 선폭(Critical Dimension)을 0.18um 수준으로 설계를 변경하여 열 전도도(G) 감소 및 수광비율(Ff) 확대를 위해 우산 형상의 복층 구조로 제작함으로써 약 92% 수광면적을 확보하였다. 그 결과 그림 2에서와 같이 약 50mK 이하 수준의 설계 성능을 확보할 수 있다.

표 1.은 8um 픽셀 피치 복층 FPA 구조와 기존 17um 픽셀 피치 단층 FPA 구조 대한 특성을 비교한 표이다. 복층 FPA 구조 설계 개선을 통해 단층 FPA 구조체와 유사한 성능을 가질 수 있음을 확인 할 수 있다.

특성	17um Pixel Pitch	8um Pixel Pitch
픽셀면적	17um x 17um	8um x 8um
최소 선폭	0.35um	0.18um
수광 면적	130um ² (45%)	59um ² (92%)
연결다리 길이	23um	38um
성능지수	≤ 45mK	48mK

표 1. 복층 FPA 구조 타입별 특성 비교

2.2 멀티레벨 구조 8um 픽셀 피치 FPA 제작

멀티레벨 구조 8um 픽셀 피치 마이크로볼로미터 FPA를 제작하였다. 그림 3의 공정 흐름도에서 보듯이 FPA 는 ROIC 웨이퍼 위에 모노리식하게 제작되어 ROIC 회로와 일체화되고 동시에 전기적 연결된다. 마이크로볼로미터는 투과된 적외선 에너지 재흡수를 위한 반사층, λ/4 이격층을 위한 희생층, ROIC와 전기적 연결 및 구조의 지지를 위한 금속 기둥 지지층, 흡수한 적외선 에너지에 의해 저항 변화를 일으켜 신호를 획득하는 감지물질층 그리고 보호층으로 구성되었다.

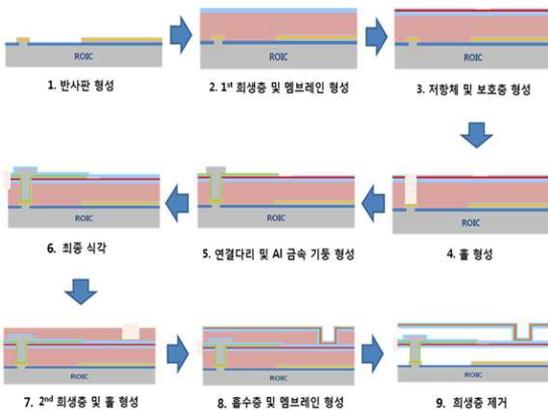


그림 3. 멀티레벨 구조 8um 픽셀 피치 마이크로볼로미터 공정 흐름도

그림 4는 제작이 완료된 마이크로볼로미터 단위 픽셀의 SEM 관찰 이미지이다. 그림 4(a) 와 같은 멀티레벨 구조 8um 픽셀 피치의 마이크로볼로미터의 적외선 에너지 흡수 면적은 92%이며, 그림 4(b) 와 같은 싱글레벨 구조 17um 픽셀 피치의 마이크로볼로미터 적외선 에너지 흡수면적 45% 이다. 멀티레벨 구조에서는 전기적 연결, 열적 고립을 위한 연결다리 등 1층 구조에 형성하고 2층 구조는 전 영역에 흡수층만 구성되어 있기 때문에 흡수면적 증가가 가능하다.

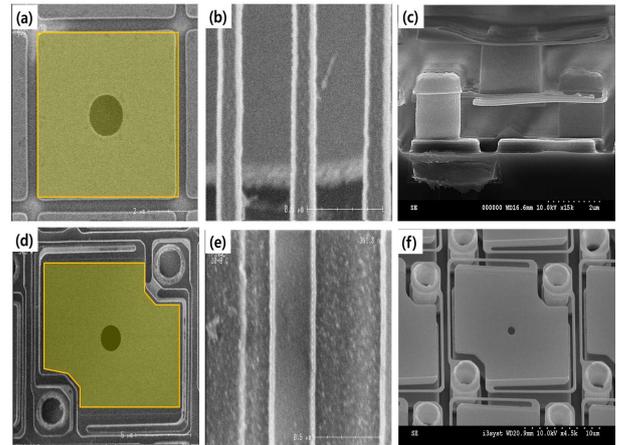


그림 4.(a) 8um 피치 복층 구조 마이크로볼로미터 적외선 흡수 면적 (b) 볼로미터 0.18um 3D MEMS 미세 패턴 구형 형상 이미지 (c) 8um 피치 복층 구조 마이크로볼로미터 형상 이미지 (d) 17um 피치 마이크로볼로미터 적외선 흡수 면적 (e) 마이크로볼로미터 0.35um 3D MEMS 미세 패턴 구형 형상 이미지 (f) 17um 피치 마이크로볼로미터 형상 이미지

2.3 진공 패키지 제작

볼로미터는 입사 된 적외선 에너지가 반응체의 온도 변화에 온전히 기여 할 때 높은 반응도를 갖는다. 그러나 입사 된 적외선 에너지가 온도 변화에 온전히 기여하지 못하는 이유는 외부로의 열 손실이 존재하기 때문이다. 열 손실의 원인 중 가장 큰 부분은 연결다리를 통한 열 전도이고, 다른 하나는 기체 분자에 의한 열 전도이다.^[5] 진공 패키지의 목적은 기체 분자로 인하여 나타나는 열 손실을 최소화하기 위함이다.

진공 패키징 기술은 내부 진공을 유지하고 완전 밀봉을 위한 금속 솔더와 접합 기술, 아웃개싱(outgassing) 컨트롤 기술이 필요하다.

금속 솔더는 기계적, 물리적 특성이 완전 밀봉에 적합한 Sn97.5wt%/Ag2.5wt% 제1공용점(eutectic point)를 사용하였다. 접합온도는 Sn 과 Ag 의 조성비에 민감하기 때문에 조성비를 고려하여 250도 이하에서 고진공 상태(10⁻⁶ Torr 이하)에서 아웃개싱 제거 후 접합하였다.

그림 5(a) 세라믹 패키지가 적용된 비냉각 적외선 검출기이다. 그림 5(b)와 같은 기존 금속 패키지(무게 25g) 대비 무게는 약 70% 감소한 7g 수준이며, 부피도 감소하여 소형화 및 경량화가 가능하다.

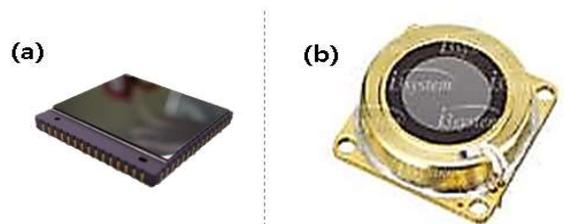


그림 5. (a) 세라믹 패키지 적용 비냉각 적외선 검출기, (b) 금속 패키지 적용 비냉각 적외선 검출기

3. 비냉각 적외선 검출기의 환경성 평가

3.1 환경성 시험 평가

비냉각 적외선 검출기의 체계적용성 및 실용성을 검증하기 위해 환경성 시험 진행 후 성능 측정 평가를 진행하였다. 환경성 시험 규격은 MIL-STD-810G 기준을 적용 하였고 환경성 시험 평가 항목은 그리고 고도 시험, 열충격, 진동시험 및 충격시험 등을 진행하였다.

고도 시험 조건은 Method 500.6 규격을 적용하여 고도 4572m 에 해당하는 압력에서 시험을 진행하였다. 열충격 조건은 Method 503.6 규격을 적용하여 해당하는 온도 범위를 -40°C 및 63°C 에서 1분 이내 이송 시험을 진행하였고, 진동시험 조건은 Method 514.7 규격을 적용하여 각각 3축(XYZ축)에 인가하였으며, 충격시험 조건은 Method 516.7 규격에 해당하는 충격을 3축으로 인가하였다. 표 2.는 환경성 시험 후 성능인 NETD 측정 결과이다. 시험전/후 평균 NETD 48mK(측정오차 ±2% 이내) 수준으로 변화가 없음을 확인하였다.

환경성 시험 후 주요 성능 지수인 NETD 성능을 충족하는 우수한 내환경 특성을 가진 비냉각 적외선 검출기가 제작하였다.

시험 항목	샘플번호	시험 전	시험 후
고도 시험	#1	48.7mK	49.9mK
열충격 시험	#2	48.5mK	47.3mK
진동 시험	#3	47.3mK	47.1mK
충격 시험	#4	46.4mK	46.5mK

표 2. 8um 피치 비냉각 적외선 검출기 환경성 시험 NETD 측정데이터

3.2 신뢰성 시험 평가

비냉각 적외선 검출기의 내부는 진공환경에서 운용되므로 장기 진공 수명에 대한 신뢰성이 요구된다.

‘아레니우스 가속도 모델’을 근거로 하여 120°C에서 21일간 ‘가속도 수명 시험’을 수행하여, 성능 및 응답도 확인한다. 성능 및 응답도가 유지하게 되면, 신뢰도 90% 수준으로 상온수명(응답도 90% 이상) 14년 이상을 유지할 수 있음을 의미한다.

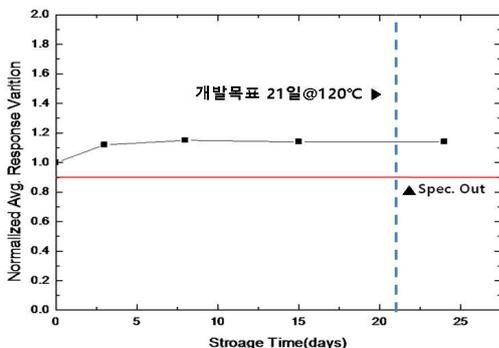


그림 6. 120°C 고온 저장 시험 진공수명 평가

제작된 8um 픽셀 피치 SXGA급(1280*1024) 비냉각 적외선 검출기를 활용하여, 위와 같은 조건의 장기 수명 신뢰성 시험 결과 그림 6와 같이 적외선 검출기의 장기 수명 신뢰성 목표인 120°C에서 21일간 검출기의 성능이 유지되었음을 확인하였다.

4. 결론

8 um 픽셀 피치를 갖는 복층 구조의 FPA 및 세라믹 패키지를 적용한 SXGA(1280*1024)급 비냉각 적외선 검출기를 제작 하였다. FPA성능 개선을 위하여 흡수 효율 개선, 열전도도 개선 기술을 적용하였으며, 소형화 및 경량화를 위해 세라믹 패키지를 적용하여 제작한 8um 픽셀 피치 마이크로볼로미터 비냉각 적외선 검출기의 체계적용성 및 실용성 검증을 위한 환경성 및 신뢰성 시험을 진행하였다. 환경성 및 신뢰성 시험 평가 후 NETD 성능 측정 결과 그림 7(a)와 같이 약 48mK의 성능을 확인하였다. 이는 해외 선도업체 검출기 대비 앞선 수준의 성능으로, 고성능, 고신뢰성의 비냉각 적외선 검출기가 제작되었음을 확인하였다

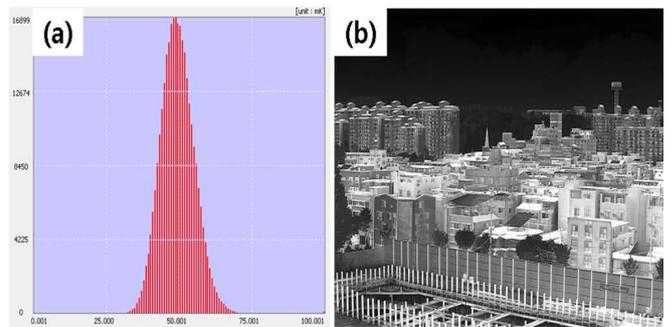


그림 7. 8um 픽셀 피치 SXGA(1280x1024)급 비냉각적외선 검출기 (a) NETD 성능지수, (b) 영상 이미지

5. 감사의 글

본 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민간협력진흥원에서 수행하는 민간기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.(협약번호 : UM18314RD3)

References

[1] A. Rogalski, et. al., “Challenges of small-pixel infrared detector: a review,” Rep. Prog. Phys. 79, 046501, pp. 42, 2016.
 [2] George D. Skidmore, “Uncooled 10um FPA Development at DRS,” Proc. Of SPIE Vol. 9819, 98190, 2016.
 [3] Shigeru Tohyama, et. al., “New thermally isolated pixel structure for high-resolution (640x480) uncooled infrared focal plane arrays,” Optical Engineering, 45, 014001, 2006.
 [4] Chuan Li, et. al., “Advancement in 17 micron pixel pitch uncooled focal plane arrays,” Proc. Of SPIE

Vol. 7298, 72980S, 2009.

- [5] Frank Niklaus, Christer Jansson, Adit Decharat, Jan-Erik Källhammer and Håkan Pettersson, Infrared Technology and Applications XXXIII, Proc. SPIE. Vol. 6542 (2007)