

논문 2017-53-3-5

MEMS 기술을 이용하여 제작한 적외선 영상 투사용 에미터 단위 소자의 특성 분석

(The analysis on properties of IR emitter unit device fabricated by
using MEMS technology for Infrared Scene Projector)

박 기 원*, 신 영 봉*, 강 인 구*, 이 희 철**

(Ki Won Park, Young Bong Shin[Ⓞ], In-Ku Kang, and Hee Chul Lee)

요 약

본 논문에서는 가상의 적외선 영상을 투사하여 적외선 검출기의 성능 평가를 위한 목적으로 사용되는 적외선 영상 투사장치 (Infrared scene projector, IRSP)의 내부에서 적외선을 방사하는 역할을 하는 적외선 에미터 소자에 대한 연구가 수행되었다. 적외선 에미터 소자의 구조를 설계한 후 설계된 소자의 특성 파라미터들을 추출하였으며 각 특성 파라미터에 근거한 소자의 성능을 유한 요소법을 통해 예측하였다. 또한 소자를 구성하는 각 부분의 특성에 따른 물질 선정 후 MEMS 기반 반도체 공정기술을 적용하여 에미터 단위소자를 제작하였고 중적외선 대역(3~5 μ m)의 적외선을 관찰할 수 있는 적외선 영상 현미경을 사용하여 진공 환경을 갖춘 챔버 내부에서 소자의 성능을 측정한 결과 최대 423K의 유효온도 및 22msec의 응답 시간을 나타내는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, designed infrared (IR) emitter device for infrared scene projector (IRSP) which is used for evaluating the performance of IR sensor systems was simulated by using finite element analysis (FEA) tool and fabricated by using MEMS (Micro Electro-Mechanical System) technology. The performance of the fabricated IR emitter unit device was characterized in the vacuum chamber by using IR image microscope for MWIR(3~5 μ m), which showed 423K apparent temperature (T_{app}) and 22msec time constant (τ).

Keywords : IRSP, IR emitter, MEMS, apparent temperature, radiance rise time

I. 서 론

최근, 군수용뿐만 아니라 민수용 목적으로도 적외선 센서의 활용이 확대되고 있고 이에 따라, 적외선 센서의 성능 평가에 대한 관심이 증가하고 있다. 기존의 방

* 학생회원, ** 정회원, 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (The school electrical engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Ⓞ Corresponding Author (E-mail : bong13@kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 한국과학기술원 초고속비행체특화센터에서 수행되었습니다.

Received ; May 23, 2016

Revised ; February 6, 2017

Accepted ; February 13, 2017

식인 현장 테스트를 통해 성능을 평가하게 될 경우 장비의 실 가동에 대한 비용과 시간 소요가 크다는 단점을 가진다. 이러한 단점을 극복하기 위한 대안으로써 인위적으로 적외선을 발생시켜 적외선 이미지를 투사하는 가상의 테스트 방식을 사용하여 현장 테스트의 단점을 개선한 적외선 영상 투사장치 (IRSP, Infrared Scene Projector)의 개발이 진행되었다. 적외선 영상 투사 장치는 thermal type, modulation type, photonic type 등 적외선 영상을 투사하는 방식에 따라 여러 가지로 분류된다^[1]. Pulse를 인가하여 초소형 거울의 미세한 움직임을 통해 반사되는 적외선의 양을 조절하여 gray scale을 표현하는 방식인 Deformable Mirror Devices (DMD)

방식의 경우 modulation type의 대표적인 예로 고속 동작에는 유리하지만 공정 자체가 매우 복잡하고 시스템 구현이 어렵다는 단점을 가지고 있으며 레이저 다이오드를 통해 적외선을 방출하는 방식인 photonic type의 경우 고온 동작이 가능하며 높은 성능을 갖지만 laser의 특성 상 넓은 공간 해상도를 갖는 대면적 array 제작이 힘들다는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 thermal type의 경우 비냉각식 적외선 센서 (bolometer)와 유사한 구조를 갖는 특징 때문에 기존의 축적된 적외선 센서 제작 기술을 적용하여 소자 제작에 활용할 수 있으며 고온 표현, 고속 동작과 동시에 대면적화 기술 개발에 용이하다는 장점을 가진다^[2-3]. 따라서 본 연구에서는 thermal type을 채택하였고, 전기적 신호 통로이자 공중에 떠 있는 구조체를 지탱하는 역할을 하는 leg에 의해 열적 격리 구조를 갖는 적외선 에미터 (IR emitter) 단위소자에 대한 연구 및 구조 설계를 진행하였다. 이후 MEMS 공정 기술을 이용하여 실제 에미터 소자를 제작하였으며, 바이어스 인가에 따른 중적외선 (MWIR, Middle Wave Infrared) 대역에서의 소자의 온도 및 응답 특성을 분석함으로써 국내 최초로 thermal type의 IRSP 개발의 기초를 마련하였다.

II. 본 론

2.1. 원리 및 성능 지수

Thermal type의 적외선 에미터는 다음과 같은 원리로 동작한다. 동작 회로에서 인가된 전류에 의해 저항체에서 파워가 소모되고, 소모된 파워는 물질적 특성 및 구조에 따른 열 전도 특성과 연관되어 소자의 온도를 변화시키는 역할을 한다. 인가된 파워 대비 소자의 실제 온도 증가에 대한 관계식은 식 (2)에 나타내었으며 식 (1)에 표현된 열 전달 방정식의 평형상태에서 얻어질 수 있다^[4].

$$C \frac{dT_{phys}}{dt} = I^2 R - G[T_{phys} - T_{sub}] \quad (1)$$

$$I^2 R = G[T_{phys} - T_{sub}] \quad (2)$$

이 때 G값은 열전도도, T_{phys} 와 T_{sub} 는 각각 소자의 실제 온도와 기판의 온도를 의미한다. 인가된 파워에 의해 야기된 실제 소자 표면의 온도 변화와 실제 적외선 센서로 투사되는 적외선이 나타내는 온도인 유효온도 (T_{app})를 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\lambda}(T_{app}) d\lambda \\ & = ff \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{opt}(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda) \cdot B_{\lambda}(T_{phys}) d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

위 식 (2)에서 알 수 있듯이, 소자의 실제 온도인 T_{phys} 에서 적외선 센서에 투사되는 온도인 T_{app} 로의 변환은 소자의 fill factor (ff), 파장에 따른 물질의 방사율(ϵ), 광학부의 투과도 (τ_{opt}) 등에 영향을 받는다.

에미터 소자에서 투사할 수 있는 최대 유효 온도와 소자의 동작 속도에 따라 소자의 성능이 결정된다고 할 수 있다. 앞서 언급한 두 가지 소자 성능에 결정적인 영향을 미치는 인자로는 열 전도도 (G)와 열 용량 (C)이 있다. 작은 G 값을 갖는 구조에서 같은 파워가 인가되었을 경우에 큰 G 값을 갖는 소자에 비해 더 높은 온도를 나타내게 되고 그에 따라 표현 가능한 유효온도 값이 증가하기 때문에 유효 온도 성능은 좋아진다고 할 수 있다. 하지만 G값이 작아짐에 따라 소자의 열적 응답 시간이 길어져 소자의 동작 속도가 느려지게 된다. C 값의 경우 작은 값을 갖는 소자일수록 열적 응답 시간이 짧아져 높은 열적 응답 속도를 갖는 것으로 알려져 있으며 열적 응답 시간과 관련된 소자의 열적 시상수 값은 식 (1)의 열 전달 방정식을 통해 유도할 수 있으며 식 (4)에 나타내었으며 열적 시상수 값으로부터 소자의 상승시간을 예상할 수 있다.

$$\tau = C/G \quad (4)$$

식에서도 확인할 수 있듯이 유효온도와 응답 특성은 G 인자에 의해 trade-off 관계에 있기 때문에 이를 고려하여 적외선 에미터 구조를 설계하였다.

2.2. 구성 요소 및 구조 설계

적외선 에미터 소자의 구성 요소는 저항체, 지지층, 희생층, 반사판 및 하부 전극, 이 네 가지로 이루어진다. 각 구성요소의 특징을 파악하여 물질 선정 기준을 확립하고 해당 요소의 물질을 선정하였다. 반사판 및 하부 전극은 높은 반사율과 높은 전기전도도를 가지는 Al을 선정하였고, 희생층은 높은 응착력을 가지며 공정이 용이한 폴리이미드를 선정하였다. 지지층은 작은 비열과 열 팽창 계수를 가지며 박막의 기계적 안정성이 높은 질화규소 물질을 사용하였고, 저항체는 낮은 열 전도도와 낮은 TCR (Temperature Coefficient of Resistance) 값을 가지는 질화 티타늄을 선정하였다^[5-6].

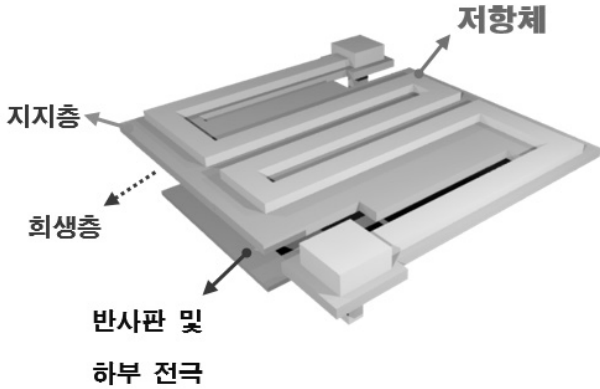


그림 1. 적외선 에미터 단위소자의 구조와 구성 요소
Fig. 1. The structure and components of the Infrared emitter unit device.

적외선 에미터의 높은 온도를 표현하기 위해 열 격리 구조를 사용하여 G 값을 감소시킨다. 그리고 빠른 응답 속도를 위해 낮은 C 값을 가질 수 있는 구조를 선택한다. 이를 만족하는 공중에 떠 있는 형태의 membrane을 이용하여 적외선 에미터의 구조를 설계하였다. 아래에 해당 물질의 특성 값을 문헌을 통해 조사한 뒤, 설계한 구조체의 각 층의 두께 정보를 통해 열용량 값을, Leg의 길이와 폭 및 두께 등을 바탕으로 열전도도 값을 계산하였으며 이를 통해 얻어진 열적 시상수, 소자의 표면의 온도 그리고 열적 시상수 값을 통해 소자의 온도가 10%에서 90%까지 도달하는데 소요되는데 필요한 rising time에 대한 계산값을 표 1에 나타내었다. 또한 유한요소법을 이용하여 공중에 떠 있어 열적으로 격리된 구조를 갖는 소자의 전류 대비 구조체의 온도 변화를 시뮬레이션을 통해 확인하였으며 이를 그림 2에 나타내었다.

표 1. 문헌상의 물질 특성 값을 통해 계산한 에미터 단위소자의 성능 (R=15k Ω , I=150 μ A)
Table1. The performance of the infrared emitter unit device calculated from material properties (R=15 k Ω , I=150 μ A).

인자	G [W/K]	C [J/K]	τ [sec]	P [μ W]	T_{phys} [°C]	Rising time (sec)
계산값	1.83 $\times 10^{-6}$	9.13 $\times 10^{-9}$	4.98 $\times 10^{-3}$	338	209.4	10.96 $\times 10^{-3}$

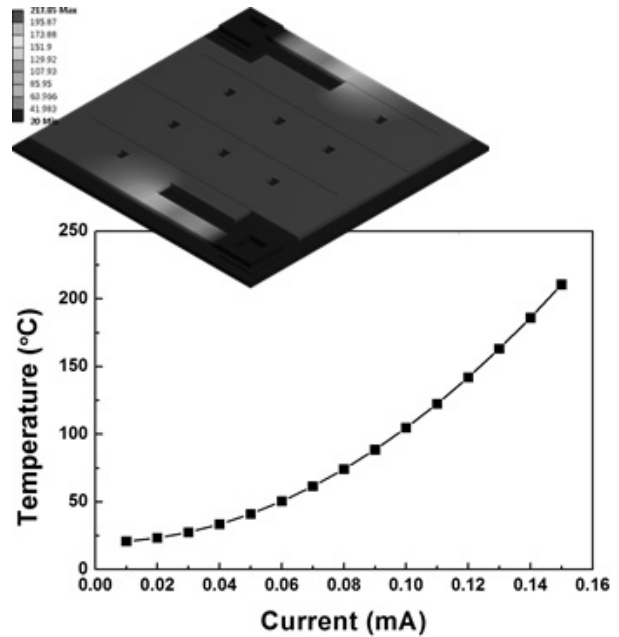


그림 2. 전류 대비 소자온도 변화 시뮬레이션 결과
Fig. 2. The simulation result of device temperature with increasing bias current.

2.3. 소자 제작

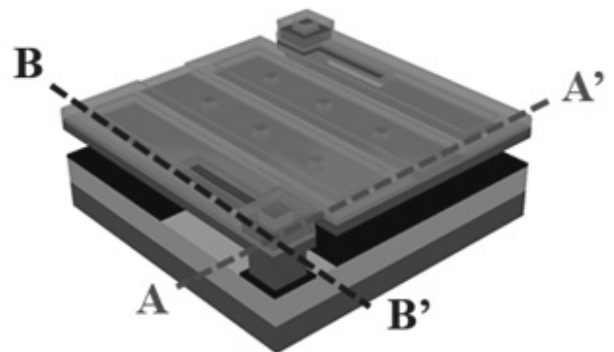
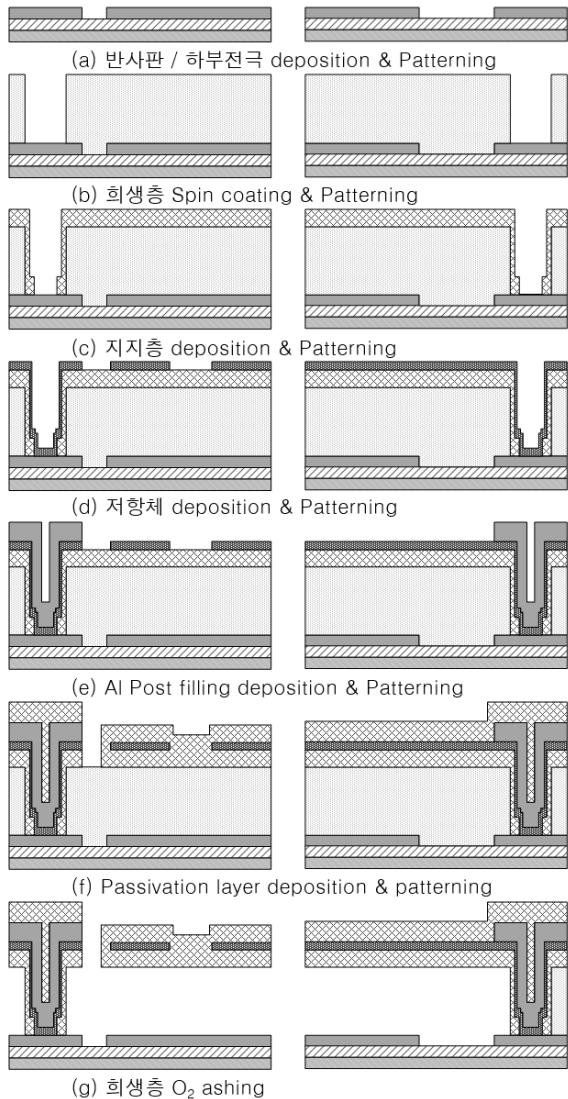


그림 3. 설계된 에미터 소자의 공정 완료 후 형태
Fig. 3. The emitter device configuration after finishing the fabrication process.

적외선 에미터 단위소자를 제작하기 위해 반도체 공정을 이용하였고, MEMS (Micro Electro-Mechanical System) 기술인 표면 미세 가공 (Surface micromachining) 기술을 적용하였다. 그리고 각 구성 요소 층의 패턴에 맞는 마스크를 제작하여 포토리소그래피 공정에 사용하였으며 소자 제작 공정의 흐름도에 따른 소자 단면의 모습을 그림 4에 나타내었다.

가장 먼저 반사판 및 하부 전극으로 사용되는 알루미늄 물질을 evaporator 장비로 300nm 증착하였다. 그리고 폴리이미드를 희생층으로 사용하여 스핀 코팅을 통



A.....A' B.....B'

그림 4. 에미터 소자의 제작 순서 및 각 단계별 공정에 따른 단면도

Fig. 4. The cross-section diagram of infrared emitter device following the step of the fabrication process.

해 1 μ m 두께를 형성하였다. 이후 Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching (ICP-RIE)을 통한 건식 식각으로 포스트 홀을 형성하였으며 이 후 지지층으로 사용된 질화규소 물질을 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)를 통해 375nm를 증착하였고 Buffered Oxide Etchant (B.O.E)를 통한 습식 식각으로 포스트 홀 부분의 질화규소를 제거함으로써 포스트 부분의 전극을 표면에 노출시켰다. 이 후 저항체인 질화 티타늄 물질을 sputtering 방식을 통해 100nm 증착하였고 패터닝을 통해 저항체 부분과 전극 사이의 전기적 컨택을 발생시켰으며 포스트 filing용 알루미늄을

sputtering을 통해 추가로 증착하여 저항체 부분과 포스트 홀의 아래 부분에 위치한 전극과의 보다 확실한 전기적 접촉을 형성하였다. 다음으로 마지막 단계의 O₂ ashing 공정에 노출될 경우 저항체의 전기적 특성이 변화되는 것을 방지하기 위한 보호층으로 PECVD 방식을 통해 증착한 질화규소를 사용하였다. 이 후 ICP-RIE를 통한 건식 식각을 통해 소자 구조체를 제외한 나머지 부분의 질화규소를 제거하고 ashing을 위한 hole을 형성하였다. 마지막으로 O₂ ashing을 통해 희생층을 제거하여 공중에 떠 있는 형태의 소자를 완성하였다. 아래는 공정 순서에 따라 제작 된 에미터 소자의 모습이다.

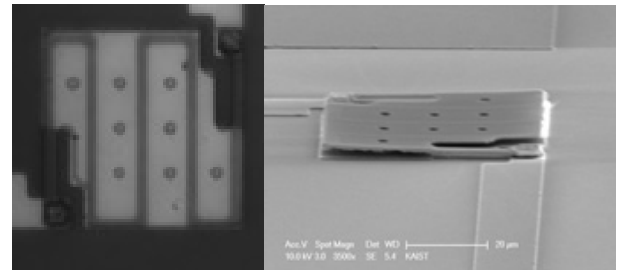


그림 5. 제작된 적외선 에미터 단위소자의 현미경 사진 (왼쪽)과 Scanning electron microscope (SEM) 사진(오른쪽)

Fig. 5. The images of the microscope and scanning electron microscope (SEM).

III. 실험 및 결과

제작한 적외선 에미터 단위소자의 온도 및 응답 특성을 평가하기 위해 한국 기초 과학 지원 연구원(KBSI)에 있는 열 영상 현미경을 사용하였다. 적외선 열 영상 현미경은 InSb (Indium Antimonide) 물질을 사용하여 중적외선 대역(3~5 μ m)에서의 적외선을 검출하여 온도를 측정하는 장비이며, 8배율 렌즈를 사용하여 56 μ m \times 56 μ m 크기의 단위소자의 온도를 측정하였다.

대기 중으로의 열 손실을 최소화하기 위해 진공 상태에서의 특성 평가를 위해 진공 시스템을 구축하였다. 챔버 프레임을 제작하고 목표하는 중적외선 대역에서 97%이상의 투과율을 나타낼 수 있도록 anti-reflective coating된 Si window를 부착하여 챔버 내부의 소자로부터 방사되는 적외선을 외부의 적외선 현미경을 통해 측정할 수 있도록 구성하였고 로터리 펌프와 터보분자 펌프를 사용하여 0.6mTorr의 진공도를 형성하였으며 이를 convectron gauge를 통해 확인하였다. 진공 챔버의 외부로부터 챔버 내에 위치한 에미터 소자에 전기적

신호를 입력하기 위해 챔버 외부로부터 연결된 패드와 소자의 하부 전극 부분을 wire-bonding하여 연결하였다. 실험은 외부 핀에 DC 전원을 연결하고 전압을 인가하여 전압대비 소자 온도를 측정하는 방식으로 진행하였다.

실험 결과, 0.6mTorr에서 15kΩ의 저항값을 갖는 적외선 에미터 단위소자에 100μA 만큼의 전류가 흘렀을 때, 증적외선 대역(3~5μm)에서 시물레이션을 통해 예측한 온도보다 약 50°C가 높은 150°C의 온도가 측정되었다. 이는 실제 제작된 소자의 G값이 예상 값에 비해 약 2배 정도 낮기 때문인 것으로 해석된다. 이는 공정상의 over-etch로 인해 제작된 소자 크기의 변화에 기인한 것으로 보여진다.

또한 소자의 응답 속도는 소자에 인가된 파워가 변했을 때 온도가 평형상태에 도달하는 데 걸리는 시간을 통해 판단하였다. 검출 속도가 100Hz인 열 영상 현미경을 사용하여 10초 동안의 온도 측정 데이터를 추출하였고 그 사이 인가전압을 증가하여 rising time을 측정하였다. 측정 결과, 최종 도달 온도의 10% ~ 90%까지 온도가 증가하는데 소요된 시간은 설계 시 예상 값인 10.96msec보다 약 2배정도 느린 22msec로 확인되었으며 역시 G 값이 2배 가까이 작아진데 따른 결과로 해석된다. 따라서 확인한 응답 속도로부터 약 45Hz 수준의 프레임 속도를 갖는 영상 투사 장치를 구현할 수 있다는 결과를 도출하였다.

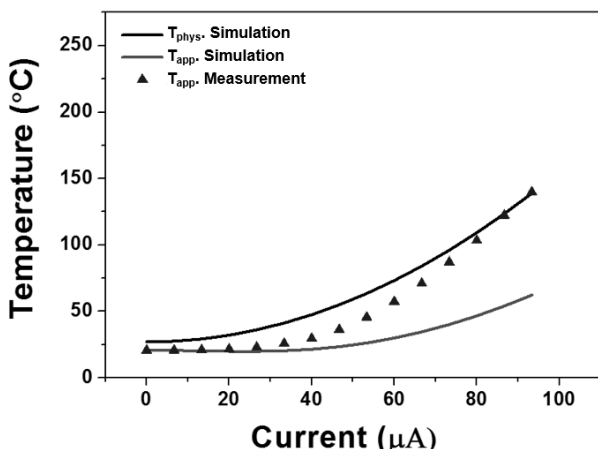


그림 6. 인가 전류 증가에 따른 적외선 에미터의 온도 변화 시물레이션과 측정치 비교

Fig. 6. The apparent temperature comparison of simulation and measurement data of infrared emitter device with increasing the bias current.

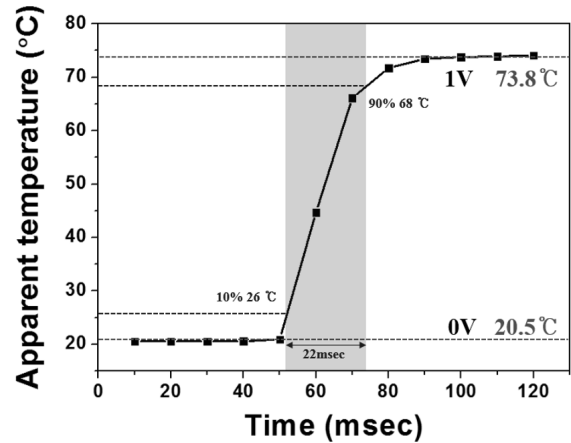


그림 7. 전압 인가에 따른 소자의 rising time 측정
Fig. 7. The rising time measurement result of infrared emitter device with applying the bias voltage.

IV. 결 론

적외선 에미터 구조체의 설계 및 각 구성요소의 물질을 선정하였고 설계된 구조와 사용된 물질의 특성을 바탕으로 소자의 성능을 예측하였으며 MEMS 기반 공정 기술을 사용하여 설계된 에미터 소자의 제작을 완료하였다. 제작된 소자의 성능을 측정하기 위한 진공 환경을 구축한 후 적외선 현미경을 사용하여 온도 및 응답 특성을 확인하였다. 그 결과 최대 150°C의 온도와 22msec의 응답 속도가 측정되었으며 측정된 온도 값은 기존에 설계한 구조체가 가질 것으로 예상되는 온도 값보다 공정의 variation으로 인해 높은 값을 나타냈으며 소자의 응답속도는 설계 값보다 느린 것으로 확인되었다. 본 연구를 통해 설계된 소자의 성능과 실제 성능 간의 관계를 확인할 수 있었고 추후 소자의 설계 파라미터의 변경에 따른 성능 예측이 가능할 것이다. 따라서 국내에서는 최초로 적외선 에미터 제작과 진공에서의 성능 측정을 이루어내어 국내 자체 개발 기술을 확보하였다는 의의를 가지며 추후 설계의 변경과 공정 프로세스의 추가 확립으로 성능이 향상된 에미터 소자의 개발과 대면적 에미터 어레이화를 통해 국내 최초 IRSP의 자체 개발을 기대할 수 있다.

REFERENCES

[1] Ronald G. Driggers et al, "Review of infrared scene projector technology-1993", Opt. Eng. 33(7), pp. 2408-2417 Jul 1994.
[2] O. Williams et al, "Performance characteristics of

thin film resistor arrays for infrared projector applications”, in Characterization, Propagation, and Simulation of Sources and Backgrounds II, Proc. SPIE 1687, pp. 71-81, 1992.

- [3] P. Bryant, S. Solomon and J. James, “Bolometers Running Backward : The Synergy Between Uncooled IR Sensor & Dynamic IR Scene Projectors,” Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVII, Proc. SPIE, Vol. 6207, pp. 6207J1-12, 2006.
- [4] B. E. Cole et al, “Monolithic 512×512 CMOS-Microbridge arrays for infrared scene projection” The 8th international Conference on Solid State Sensors and Actuators, Stockholm, Sweden, 1995.
- [5] S. Solomon and P. Bryant, “Adventures in High Temperature Resistive Emitter Physics”, Proc. SPIE Vol. 5092, pp. 52-60, 2003.
- [6] S. Solomon, “Continuing Adventures in High Temperature Resistive Emitter Physics & Materials”, SPIE Proc. Vol.5408, pp. 127-135, 2004.

— 저 자 소 개 —



박 기 원(학생회원)
 2014년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업.
 2016년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업.
 <주관심분야: Infrared emitter device, MEMS fabrication>



신 영 봉(학생회원)
 2013년 한양대학교 전자통신공학부 학사 졸업.
 2015년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업.
 2015년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 박사과정 재학.
 <주관심분야: Infrared emitter device, MEMS fabrication>



강 인 구(학생회원)
 2010년 성균관대학교 전자공학과 학사 졸업.
 2012년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업.
 2012년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 박사과정 재학.

<주관심분야: Transition metal oxide for uncooled infrared detectors and nanotechnology>



이 희 철(정회원)
 1978년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1986년 동경공업대학교 전자공학과 석사 졸업.
 1989년 동경공업대학교 전자공학과 박사 졸업.

2004년~2010년 나노종합기술원 소장 역임.
 1989년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 교수.

<주관심분야: Infrared scene projector, Infrared detector, Radiation hardened device and circuit design>