

위상잠금 열영상 현미경의 온도분해능 분석

Thermal Resolution Analysis of Lock-in Infrared Microscope

김기석*, 이계승*, 김건희*, 허환*, 김동익**, 장기수*†

Ghiseok Kim*, Kye-Sung Lee*, Geon-Hee Kim*, Hwan Hur*, Dong-Ik Kim** and Ki Soo Chang*†

초 록 본 연구에서는 기존의 열영상 측정 장치에 비해 위상잠금기법을 채용한 열영상 측정 장치의 온도분해능이 얼마나 향상될 수 있는지를 평가하기 위해 흑체시스템과 마이크로 레지스터 시편을 이용한 실험을 수행하여 개선된 온도분해능을 확인하였다. 일반적으로 적외선 열영상 측정 장치의 노이즈 수준 또는 온도분해능은 연속적으로 측정된 열영상의 픽셀별 온도의 평균과 각각의 측정값의 편차에 대한 제곱의 평균으로 정의되는 잡음등가온도차(noise equivalent temperature difference, NETD)라는 척도를 이용하여 평가되고 있다. 하지만 위상잠금 열영상 기법을 적용하면 더욱 편리한 방법을 이용할 수 있는데 이는 측정된 열영상 신호의 위상과는 무관한 온도의 진폭에 관한 정보를 이용하는 것이다. 연구결과를 통해 알 수 있듯이, 위상잠금 기법을 적용하게 되면 측정된 신호의 온도분해능 성능을 보여주는 잡음등가온도차가 크게 향상되었으며 이는 위상잠금기법이 내부적으로 수행하는 평균화 작업과 필터링 기능 때문인 것으로 판단되고 있다.

주요용어: 위상잠금 열영상기법, 잡음등가온도차, 적외선현미경, 온도분해능

Abstract In this study, we analyzed and showed the enhanced thermal resolution of a lock-in infrared thermography system by employing a blackbody system and micro-register sample. The noise level or thermal resolution of an infrared camera system is usually expressed by a noise equivalent temperature difference (NETD), which is the mean square of the deviation of the different values measured for one pixel from its mean values obtained in successive measurements. However, for lock-in thermography, a more convenient quantity in the phase-independent temperature modulation amplitude can be acquired. On the basis of results, it was observed that the NETD or thermal resolution of the lock-in thermography system was significantly enhanced, which we consider to have been caused by the averaging and filtering effects of the lock-in technique.

Keywords: Lock-in Thermography, Noise Equivalent Temperature Difference, Infrared Microscope, Thermal Resolution

1. 서 론

위상잠금 열영상기법은 폴리마이드 기판 위에 증착된 구리박막에서 발생하는 마이크로 크기의 결함을 검출하기 위해서 처음 소개되었으며 이후 다양한 분야의 비파괴검사에서 꾸준히 연구되고 있다[1]. 이 기법은 측정된 열영상 신호를 시간에 대해 평균화하는(averaging nature) 특성과 신호의 필터링 역할로 인해 잡음을 효과적으로 줄이고 측정분해능을 향상시킬 수 있으므로 일반적인 방

법으로 이용되는 열영상 카메라의 온도분해능보다 향상된 결과를 보여주는 것으로 알려져 있다[2,3].

최근 들어, 반도체 메모리와 같은 마이크로 전자부품들에 요구되는 데이터 전송 속도와 저장 공간은 증가되는 반면에 그 크기와 전력소모량은 감소하고 있는 추세로 인해 반도체산업에서는 트랜지스터를 적층한 3차원 형상의 메모리반도체 개발에 주력하여 system-in-package(SiP), wafer-level packaging 그리고 through-silicon-via와 같은 복잡한 3차원 패키징 기술이 개발되고 있다 (TSV)[4].

[Received: September 23, 2014, Revised: October 20, 2014, Accepted: October 29, 2014] *한국기초과학지원연구원 첨단장비개발사업단, **한국과학기술원 스마트 IT 융합시스템연구단, †Corresponding Author: Center for Analytical Instrumentation Development, Korea Basic Science Institute, 169-148 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-806, Korea (E-mail: ksc@kbsi.re.kr)

이러한 3차원 형상의 집적회로방식은 전력소모가 낮고 전송속도가 향상되는 장점이 있는 반면에 3차원 형상으로 인한 구조적인 문제들로 인해, 예를 들어 금속층과 반도체 소재들을 투과하는 영상기법들의 한계들로 인해 결함 검출과 분석에 있어서는 더욱 어려움을 증대시켰다[5,6]. 기존에 많이 이용되어진 photon emission microscopy나 liquid crystal thermography 기법들은 3차원 구조의 메모리반도체(3D-IC)에서 발생하는 결함들이 안쪽 die 또는 interconnect 수준에서 발생되기 때문에 적용에 제한적이며 또한 파괴적인 검사 방법들은 시간 소모적일뿐만 아니라 추가적인 2차 결함들을 유도할 수 있다는 큰 단점을 갖고 있다[7].

위와 같은 방법들 이외에도, 전자부품의 열 특성을 분석하기 위해 적외선현미경을 적용하는 몇몇 연구가 수행되고 있는데 이러한 적외선 기법을 이용하면 대상체의 표면 온도뿐만 아니라 내부의 열적특성도 측정이 가능하여 3D-IC 내부 결함을 검출할 수 있는 방법으로 고려되고 있다. 대상체로부터 방사되는 적외선 신호를 계측하는 이러한 비접촉식 적외선 열영상기법은 대상체의 full-field 열영상을 실시간으로 측정할 수 있으나 일반적으로 대상체 표면의 방사율에 많은 영향을 받을 수 있으며 공간분해능과 온도분해능의 물리적인 한계가 존재한다[8].

반도체 메모리의 결함분리를 위해 적용되는 적외선 열영상 현미경의 제약사항들은 위상잠금기법을 채용함으로써 현저하게 개선되고 있으며 위상잠금 열영상 기법의 향상된 검출성에 대한 다양한 연구들은 이를 증명하고 있다[9-13]. 1990년대에 들어 측정분해능이 매우 개선된 위상잠금 적외선검사 장치들이 개발되어 반도체, 항공과 국방산업 등의 분야에 적용되어지고 있는데 이러한 위상잠금 적외선검사 기법은 검사대상체의 결함 크기와 깊이에 대한 정보를 얻기 위해 대상체로부터의 진폭신호와 위상신호를 분석하며 이를 위해 열, 진동 및 초음파신호를 이용한 주기적인 가진신호를 채용하고 있다. 이로 인해 열영상 카메라를 이용한 단순측정방식으로는 감지하기 어려운 태양전지(solar cell)의 분류(shunt current)와 누설전류(leakage current)같은 5 mK 이하의 저발열의 열원을 감지하는데 적용되었다[14].

본 연구에서는 위상잠금 열영상 기법을 적용할 경우 열영상 현미경시스템에서 기대할 수 있는

향상된 온도분해능을 실험적으로 구하기 위해 흑체시스템과 마이크로 레이스터 시편을 이용한 위상잠금 열영상 실험을 수행하여 정량적으로 향상된 온도분해능을 확인하고자 하였다.

2. 정상상태 이미징 적외선측정장치의 노이즈 수준 분석

일반적인 영상측정장치의 노이즈 수준을 측정, 분석하는 방법은 이미징 측정 방식과 영상의 정적, 동적 특성에 따라 다른 방법들이 적용되고 있다. 정상상태인 영상을 측정하는 영상측정장치의 경우에는 연속적으로 측정되는 프레임에서 동일한 픽셀 간의 표준편차를 분석하여 측정장치의 노이즈 수준을 분석하는 방법이 많이 이용되고 있는데 적외선 열영상 측정 장치의 경우에 있어서도 정상상태인 열영상을 측정하는 장치의 노이즈 수준을 분석하기 위해서는 잡음등가온도차(NETD)라고 정의되는 척도를 이용하는 방법이 널리 이용되고 있다. 이러한 NETD를 분석하는 방법은 적용하는 흑체의 작동 방식 또는 적외선 측정 장치의 제작사에 따라 조금씩 다른 것으로 알려져 있는데[15] 본 연구에서는 N 장의 열영상 측정치들에 대한 각각의 픽셀값과 N 장에 대한 평균의 편차값에 대한 제곱의 평균값으로 정의된 식(1)로서 NETD를 분석하였다.

$$NETD = \frac{c}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(F_i - \bar{F})^2} = c \times \sigma_{cam} \quad (1)$$

여기서, c 는 적외선 열영상 카메라의 scale factor(mK/digit)이고 F_i 는 N 번에 걸쳐 연속적으로 측정된 열영상의 픽셀값(digits)이며 \bar{F} 는 N 장에 대한 픽셀의 평균값, N 은 측정수이며 σ_{cam} 은 카메라 노이즈 수준의 표준편차(digits)이다.

Fig. 1에서와 같이 적외선 열영상 측정 장치의 scale factor (c)와 표준편차(σ_{cam})를 구하기 위하여 적외선카메라(SC7600, FLIR systems, USA), 적외선 대물렌즈(FOV: 3.2×2.6 mm), 그리고 흑체시스템(SR-800R 7A, CI systems, USA)을 이용하였으며 Fig. 2에서와 같이 35℃와 36℃의 정상상태에서 각각 50장의 열영상을 측정한 후 평균값을 분석하여 6.57 mK/digit의 scale factor (c)를 구하

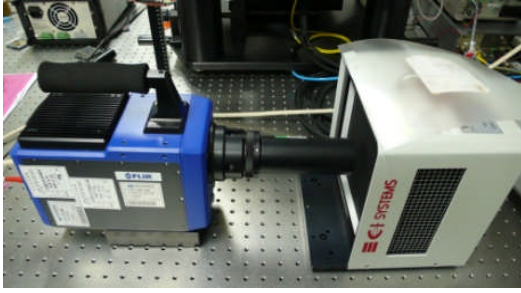


Fig. 1 Thermal resolution evaluation of infrared microscope using blackbody

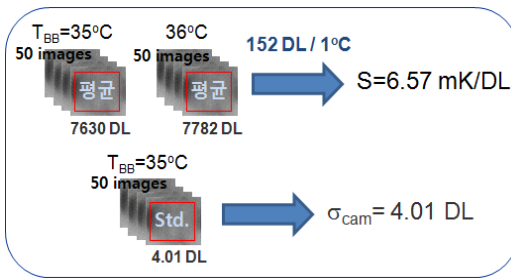


Fig. 2 Analysis of scale factor and standard deviation for infrared microscope

였으며 적외선 열영상 측정 장치의 표준편차 (σ_{cam})는 4.01 DL인 것으로 확인되었다. 위의 식 (1)을 적용할 경우, 본 연구에 이용된 적외선 열영상 측정 장치를 이용하여 정상상태인 열영상을 측정하는 경우에 NETD는 약 26.3 mK인 것으로 분석되었으며 이것은 적외선카메라 제작사에서 제공한 20 mK의 NETD와 유사한 것으로 확인되었다.

3. 위상잠금 열영상 측정 장치의 노이즈 수준 분석

적외선 열영상 측정 장치에 위상잠금 기법을 적용하게 되면, 측정 장치의 노이즈 수준을 분석할 수 있는 훨씬 더 용이한 방법으로서 위상잠금 기법에서 구한 식(3)과 같이 정의되는 위상과는 상관없는 온도 변조값의 진폭을 이용할 수 있다. 본 연구에서는 위상잠금 기법의 구현을 위해 식 (2)와 같이 정의될 수 있는 디지털상관기법 (digital correlation method)를 적용하였는데 이 방법은 측정값과 일련의 상관함수를 이용한 디지털 컨볼루션(digital convolution)이다[16]. 식(2)에서 이용되

는 디지털상관함수(K_j)는 두 가지의 상관함수를 이용하는데 그 중 하나는 사인성분이고 다른 하나는 코사인 성분으로서 사인성분으로 이용되는 상관함수는 동상성분(in-phase)의 신호를 분석하여 S^{0° 의 결과를 얻는데 이용되고 코사인성분은 90도 위상이 천이된 신호를 분석하여 S^{90° 의 신호를 얻는데 이용된다. 이렇게 구한 S^{0° 와 S^{90° 에 대해 식(3)을 적용하면 언급한 온도 변조값의 진폭(A)을 구할 수 있다.

$$S = \frac{1}{nN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n K_j F_{i,j} \quad (2)$$

$$A = \sqrt{(S^{0^\circ})^2 + (S^{90^\circ})^2} \quad (3)$$

또한, 위상잠금 기법을 적용한 적외선 열영상 측정 장치의 노이즈 수준을 측정하기 위해서는 위상잠금기법에서 이용되는 신호처리방식과 함께 측정에 있어서는 흑체를 이용한 이미징과 같이 정상상태의 영상을 측정하면 측정된 열영상은 위상잠금 열영상 측정장치에 의한 시스템 노이즈만을 포함하게 된다. 측정 후 $X \times Y$ 의 2차원 픽셀 영역에 대해 평균화된 위상과는 상관없는 이러한 진폭신호의 노이즈 수준은 위상잠금 분석기법에 적용된 디지털 correlation 방법에 적용된 각각의 성분들에 대한 노이즈의 표준편차와 상당히 유사한 것으로서 식(4)와 같이 정의될 수 있다. 식 (5)와 (6)은 디지털 correlation방법에 이용된 in-phase 신호 성분과 quadrature 신호들의 노이즈를 정의하고 있다[17].

$$\begin{aligned} A_{noise} &= \frac{c}{XY} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sqrt{(N^{0^\circ}(x,y))^2 + (N^{90^\circ}(x,y))^2} \\ &= \sqrt{2} c \sigma_{sys} = \frac{2}{\sqrt{nN}} NETD_{cam} \end{aligned} \quad (4)$$

$$N^{0^\circ}(x,y) = \frac{2}{nN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \sin\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) F_{i,j}^N(x,y) \quad (5)$$

$$N^{-90^\circ}(x,y) = \frac{-2}{nN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \sin\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) F_{i,j}^N(x,y) \quad (6)$$

여기서, c 는 적외선 열영상 카메라의 scale factor(mK/digit)이고 σ_{sys} 는 디지털상관기법을 적용한 경우의 시스템 노이즈 합이며 N^{0° 는 식(2)에서 정의된 디지털상관기법을 적용할 경우, 동상성분(in-phase)의 노이즈 성분이고 N^{-90° 는 90도 위상천이된 신호의 노이즈 성분이며 $F_{i,j}^N(x,y)$ 는 측정치이다.

위상잠금기법의 correlation 과정인 $n \times N$ 에 이용된 프레임의 총합계는 프레임 레이트(f_{frame})와 총 소요시간(t_{acq})의 곱과 같으므로 식(4)는 다음 식(7)과 같이 정리될 수 있다.

$$A_{noise} = \frac{2}{\sqrt{f_{frame} t_{acq}}} NETD_{cam} \quad (7)$$

Fig. 3은 식(7)에서 구한 이론값과 비교하여 위상잠금 열영상 측정 장치의 시스템 노이즈 측정 결과를 보여주고 있다. 파란색으로 표시된 결과는 35℃의 흑체에서 측정된 NETD(26.3 mK)를 식(7)에 적용하여 계산된 값이며 붉은색으로 표시된 결과는 적외선카메라의 제조업체에서 제공하는 NETD(20 mK at 22℃)의 값을 적용하여 식(7)에서 계산된 값이다. Fig. 3의 결과에서 볼 수 있듯이 식(5)와 (6)에 명시된 $n \times N$ 의 개수와 동일한 프레임의 합계로 표시되는 프레임 레이트(f_{frame})와 총 소요시간(t_{acq})의 곱이 증가할수록 위상잠금 열영상 측정 장치의 노이즈 수준은 지수함수적으로 감소하였으며 영상의 개수가 1500 여장에 이르게 되면 대략적으로 1 mK의 온도분해능을 갖는 것으로 확인되었다.

실험과 이론식에 의한 결과에 따라 정상상태의 열영상을 측정하는 일반적인 경우에 보장되는 잡음등가온도차(NETD)는 일반적으로 20 mK인 것에 비해 위상잠금 열영상 기법을 적용하게 되면 1 mK까지 향상된 잡음등가온도차의 온도분해능을 확인할 수 있었으며 이러한 결과들을 바탕으로 흑체가 아닌 마이크로 전자부품에 대한 위상잠금 열영상 현미경의 측정 온도분해능 성능을 확인하기 위하여 Fig. 4과 같이 마이크로 레지스터 시편을 이용한 위상잠금 열영상 측정을 수행하였다.

이때, 총 500장의 열영상을 측정하였으며 적용한 위상잠금 주파수는 33 Hz이다. Fig. 5는 실험

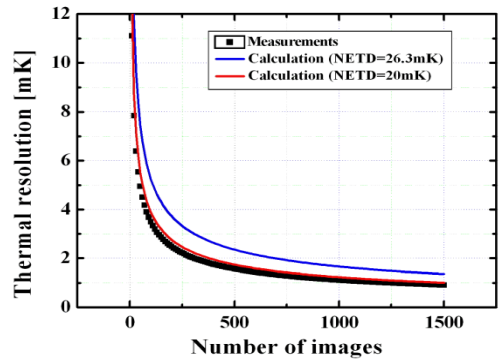


Fig. 3 Resultant thermal resolution of lock-in infrared microscope

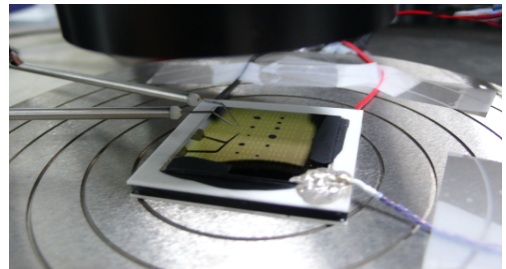


Fig. 4 Lock-in thermography test of micro-register using infrared microscope

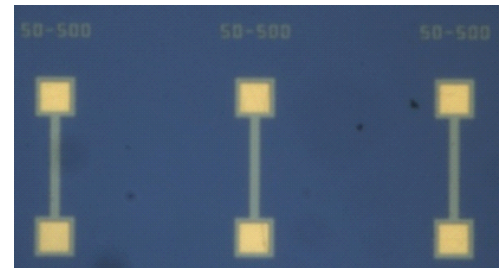


Fig. 5 Poly-Si micro-register specimens used in the thermal resolution analysis of lock-in infrared microscope

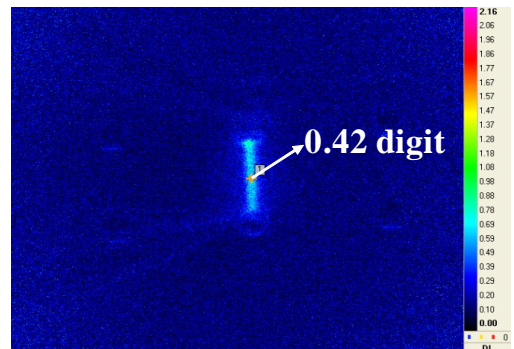


Fig. 6 Amplitude image of micro-register from lock-in infrared microscope

에 이용된 poly-Si 마이크로 레지스터의 CCD 영상으로서 시편 하나의 크기는 $50 \times 500 \mu\text{m}$ 이며 시편면에 가한 bias current는 2 mA, 적외선카메라의 프레임 레이트는 100 Hz였으며 총 측정시간은 19.21초로 평가되었다. Fig. 6은 마이크로 레지스터 샘플에 위상잠금 열영상 기법을 적용하여 측정된 진폭영상 결과로서 발열 부위의 디지털 레벨은 0.42 digit인 것으로 분석되었으며 이때 적외선카메라의 scale factor인 6.57 mK/digit를 적용하면 대략적으로 2.76 mK의 온도가 발열하고 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 흑체시스템과 열영상 측정 장치를 이용하여 정상상태의 열영상을 측정하는 경우에 적외선 측정 장치의 온도분해능인 잡음등가온도차(noise equivalent temperature difference, NETD)를 분석하였으며 위상잠금 열영상 기법을 적용할 경우 정량적으로 향상되는 온도분해능인 잡음등가온도차(NETD)에 대한 개선된 성능을 구하기 위하여 마이크로 레지스터 시편을 이용한 위상잠금 열영상 실험을 수행하였다.

위상잠금 열영상 기법을 적용하여 온도분해능인 잡음등가온도차를 분석해 본 결과, 흑체를 이용하여 분석된 위상잠금 열영상 측정장치의 온도분해능은 1 mK의 수준으로 향상되었음을 확인할 수 있었으며 마이크로 레지스터 시편을 이용하여 분석해본 결과 대략적으로 2.76 mK의 온도를 측정할 수 있었으며 이는 위상잠금 기법을 적용하여 온도분해능이 향상되었기 때문이다. 이렇듯 위상잠금 열영상 기법을 이용하게 되면 기존의 정상상태 열영상을 측정하는 경우에 기대할 수 있는 온도분해능보다 월등히 개선된 온도분해능을 얻을 수 있으며 이를 통해서 내부에서 미세한 열이 발생될 수 있는 마이크로 수준의 반도체 또는 전자기기의 내부불량을 정량적, 비파괴적으로 분석하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부/산업기술연구회 융합연구사업(Grant B551179-12-04-00)과 한국기초과

학지원연구원 창의사업육성을 위한 첨단 광분석 장비 개발사업 (D35500)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] P. K. Kuo, T. Ahmed, H. Jin and R. L. Thomas, "Phase-locked image acquisition in thermography," *Proc. SPIE*, 1004, pp. 41-47 (1988)
- [2] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Revue Generale de Thermique*, Vol. 37, No. 8, pp. 693-703 (1998)
- [3] O. Breitenstein and M. Langenkamp, "Microscopic lock-in thermography investigation of leakage sites in integrated circuits," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 71, No. 11, pp. 4155-4160 (2000)
- [4] A. Orozco, J. Gaudestad, N. E. Gagliolo, C. Rowlett and E. Wong, "3D magnetic field imaging for non-destructive fault isolation," *Conference Proceedings from the 39th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, November 3-7, San Jose, California, USA, pp. 189-193 (2013)
- [5] F. Infante, P. Perdu and D. Lewis, "Magnetic microscopy for 3D devices: Defect localization with high resolution and long working distance on complex system in package," *Microelectronics Reliability*, Vol. 49, No. 9-11, pp. 1169-1174 (2009)
- [6] C. Schmidt, F. Altmann and O. Breitenstein, "Application of lock-in thermography for failure analysis in integrated circuits using quantitative phase shift analysis," *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 177, No. 15, pp. 1261-1267 (2012)
- [7] S. Christian, A. Frank, S. Rudolf and D. Herve, "Non-destructive defect depth determination at fully packaged and stacked die devices using lock-in thermography," *17th IEEE International Symposium on Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits*

- (IPFA), July 5-9, Singapore, pp. 1-5 (2010)
- [8] C. H. Oxley, R. H. Hopper and G. A. Evans, "Improved infrared(IR) microscope measurements for the micro-electronics industry," *Electronics System-Integration Technology Conference*, September 1-4, Greenwich, pp. 215-218 (2008)
- [9] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *J. Appl. Phys.*, Vol. 71, No. 8, pp. 3962-3965 (1992)
- [10] O. Breitenstein and M. Langenkamp, "Lock-in contact thermography investigation of lateral electronic inhomogeneities in semiconductor devices," *Sensors and Actuators A*, Vol. 71, pp. 46-50 (1998)
- [11] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Revue Generale de Thermique*, Vol. 37, No. 8, pp. 693-703 (1998)
- [12] D. Wu, A. Salerno, B. Schonbach, H. Hallin H and G. Busse, Phase-sensitive modulation thermography and its applications for NDE, *An International Conference on Thermal Sensing and Imaging*, April 21, Orlando, FL, USA, Vol. 3056, pp. 176-182 (1997)
- [13] M. Y. Choi, K. S. Kang, J. H. Park, W. T. Kim and K. S. Kim, "Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography," *NDT&E International*, Vol. 41, No. 2, pp. 119-241 (2008)
- [14] O. Breitenstein, J. P. Rakotoniaina and M. H. Al Rifai, "Quantitative evaluation of shunts in solar cells by lock-in thermography," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, Vol. 11, No. 8, pp. 515-526 (2003)
- [15] D. I. Kim, G. S. Kim, G. H. Kim and K. S. Chang, "Responsivity and noise evaluation of infrared thermal imaging camera," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 33, No. 4, pp. 342-348 (2013)
- [16] G. S. Kim, G. H. Kim, J. M. Park, D. Y. Kim and B. K. Cho, "Application of infrared lock-in thermography for the quantitative evaluation of bruises on pears," *Infrared Physics & Technology*, Vol. 63, pp. 133-139 (2014)
- [17] O. Breitenstein and M. Langenkamp, "Lock-in Thermography - Basics and Use for Functional Diagnostics of Electronic Components," Springer, Heidelberg, (2003)