

論文2002-39SD-11-2

비냉각 열 영상 시스템용 BSCT 320×240 IR-FPA의 구현 (Implementation of BSCT 320×240 IR-FPA for Uncooled Thermal Imaging System)

姜大錫*, 辛卿旭*, 朴載雨*, 尹東漢*, 宋成海*,
韓明洙**

(D. S. Kang*, K. W. Shin, J. W. Park, D. H. Yoon, S. H. Song, and M. S. Han)

요 약

적외선 열 영상 system에서 가장 핵심이 되는 BSCT 320X240 IRFPA를 구현하였다. 검출기 module은 두 개의 부분, 즉 적외선 감지 pixel의 array와 감지된 신호를 읽어내는 ROIC로 구성된다. 50- μm 의 pitch와 95-%의 fill-factor를 만족하도록, laser scribe공정과 10- μm 크기의 ball을 갖는 micro bump공정을 적용하였다. ROIC는 선택된 신호를 읽어서 순차적으로 출력하게 설계되었으며, 단일 transistor amplifier, HPF, tunable LPF 그리고 clamp circuit를 삽입하여 SNR이 개선되도록 설계하였다. Detector와 ROIC의 결합으로 제작된 hybrid chip은 좀더 안정한 동작을 하도록 TEC가 내장된 ceramic package에 탑재하였다. 제작된 IRFPA sample은 원하는 특성을 만족하였으며, 특히 fill-factor, 탐지도, 반응도면에서 설계의 목표에 잘 근사함을 알 수 있었다.

Abstract

BSCT 320×240 IRFPA detector module is implemented, which is a key component in uncooled thermal imaging systems. The detector module consists of two parts, infrared sensitive pixel array and read-out integrated circuit(ROIC). The BSCT 320×240 pixels are made by laser scribe process and 10- μm micro-bump to satisfy 50- μm pitch and 95-% fill-factor. The ROIC has been designed to electrically address the pixels sequentially and to improve signal-to-noise ratio with single transistor amplifier, HPF, tunable LPF and clamp circuit. The fabricated hybrid chip of detector and ROIC has been mounted on the TEC built-in ceramic package for more stable operation and tested for lots of electrical and optical properties. The IRFA sample has shown successful properties and met with good results of fill-factor, detectivity and responsivity.

Key Words : Readout circuit, Uncooled infrared, Focal plane array, BSCT

* 正會員, 金烏工科大學校 電子工學部

(Graduate Student, Associate Professor, Professor, School of Electronic Eng., Kumoh National University of Technology)

** 正會員, 株式會社 케이이씨

(KEC Corporation)

接受日字:2002年8月1日, 수정완료일:2002年10月30日

I. 서 론

휴대형 열 영상 장비의 핵심인 비냉각 적외선 검출기는 초전형 (pyro electric)과 볼로메타형 (bolometer)으로 구분되며, impedance match, 저잡음, 저소비전력, 고집적 pitch, cross-talk 방지는 system 설계의 주요 목표이다. 본 논문의 초전형 BSCT 320×240 Infrared Focal Plane Array (IRFPA)는 BaSrCaTiO₃ (BSCT)

chip과 silicon readout IC (ROIC) chip)으로 구성된다. BSCT를 채택한 이유는 감지하는 파장이 8~12- μm 로서 원거리 탐지에 유리하고, 소비전력이 볼로메타형에 비하여 작기 때문이다. Pitch size가 50 μm 인 BSCT 검출기는 95%의 fill factor와 $5 \times 10^8 \text{ Hz}^{1/2}/\text{W}$ 의 탐지도를 만족하도록 하였고, ROIC와의 impedance match를 고려하여 10^{12} - Ω 의 poly-silicon 저항이 추가된 0.65 μm 2Poly-3Metal N-Well CMOS IC 공정을 적용하였다.

감지된 아날로그 신호를 받아서 처리하는 ROIC는 BSCT 검출기와 밀접한 관계를 갖는다. 즉, 강유전체인 초전형 BSCT 검출기는 응답 속도가 15-ms 정도인 점을 감안하여 입력과 출력 즉, chopper 주파수와 readout 속도를 설계하였다. Hybrid chip (HC)은 pixel 간의 cross-talk 방지를 위하여, mesa와 micro bump 공정을 적용하였다고 안정한 동작을 하도록 micro thermo electric cooler (TEC)가 내장된 package에 탑재하여, 상온에서의 산란 잡음을 최소화하였다.^[15] 제작된 IRFPA sample은 광 반응 test system에서 원하는 탐지도, 반응도, 열 영상 특성 등을 관찰하였다.

II. 본 론

1. 검출기와 ROIC의 설계

높은 절연저항을 갖는 초전형 검출기의 전기적 등가 모델은 <그림 1>과 같이 표현되며, C_D 와 $1/G_D$ 은 각각 초전형 검출의 갖는 정전용량 및 저항성분이다.

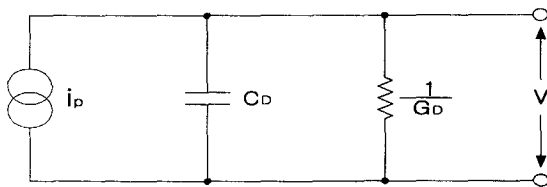


그림 1. 초전형 검출기의 등가 모델
Fig. 1. Equivalent model of pyroelectric detector.

입사되는 적외선 에너지에 의해 BSCT의 온도가 ΔT 만큼 변했을 때, 검출기 출력전압의 변화 ΔV 는 식(1)과 같이 표현된다.^[6]

$$\Delta V = T_d \frac{C_D}{C_D + C_p} \frac{\partial E}{\partial T} \Delta T \quad (1)$$

단, $\partial E/\partial T$ 는 figure of merit (FoM), T_d 는 검출기의 두께, C_D 는 검출기의 용량이고, C_p 는 매우 작은 기생정전용량을 나타낸다. 결국, 검출기에 발생하는 전압 ΔV 는 BSCT의 두께, FoM, BSCT의 온도변화 등에 의존함을 알 수 있다. 강유전체인 초전형 BSCT 검출기는 응답 속도가 15-ms 정도이므로 입사되는 연속적 적외선 신호에 대해서 전기적 신호를 연속적으로 발생시킬 수 없다. 이 점을 고려하여 입력과 출력 즉, chopper 주파수와 readout 속도를 설계하였다.

검출기 성능의 핵심으로 작용하는 검출기 wafer는 Sol-gel 법에서 얻어진 원료를 써서 cold iso-static press (CIP) 공정으로 얻었고, 이를 연마와 경면 polishing을 통하여 20- μm 두께의 최종 BSCT wafer를 얻었다. 각 320x240 개의 pixel (pixel) 구현은 UV 파장의 laser scriber를 이용하였는데, 제작 시간의 단축과 pixel의 정확도, pixel간에 발생하는 cross-talk 등의 문제를 고려한 것이다. 제작된 BSCT wafer에서 얻어진 검출기 chip은 준비된 ROIC와 HC module로 결합되어 <그림 2>와 같이 TEC가 내장된 특수 ceramic package 안에 탑재된다. 그리고, 광학계에서 목표로 한 원 적외선 (8~12- μm) 신호의 선택적인 투과를 만족시키기 위하여 8- μm 이상의 신호만이 투과하도록 anti refract (AR) window를 장착하였고, package의 내부에는 argon gas를 충전하여 산란에 의한 신호의 손실을 최소화하였고, 안정적인 동작을 도모하였다.

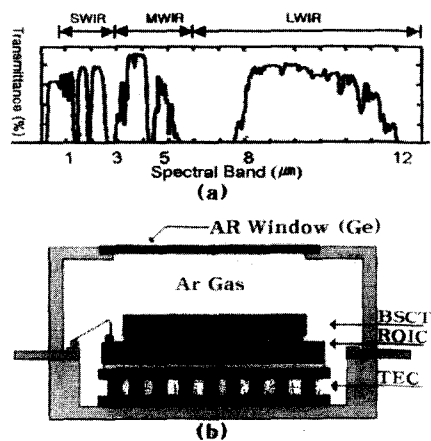


그림 2. 파장과 package 설계
(a) Spectral band
(b) Package structure

Fig. 2. Design of spectral band and package
(a) Spectral band
(b) Package structure

설계된 ROIC의 전체 구조는 <그림 3>과 같다. Readout unit cell (ROUC)의 320×240 배열, column buffer 및 선택 switch, 출력 buffer, 그리고 digital 제어부 등으로 구성된다. ROIC 설계에서 핵심이 되는 부분은 검출기에서 출력되는 신호를 처리하는 ROUC 회로로서, 검출기에서 감지된 신호의 증폭과 잡음 제거를 거쳐 row 단위로 신호를 출력하게 된다. Column buffer 및 선택 switch는 ROUC에서 출력되는 신호를 buffering 후, 순차적으로 출력 buffer로 보낸다.

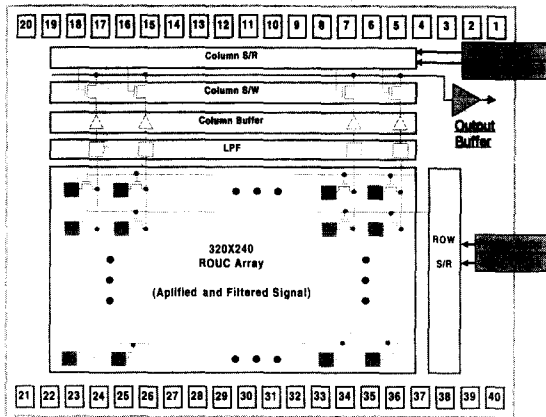


그림 3. 320×240 FPA ROIC 구조
Fig. 3. Structure of 320×240 ROIC.

<그림 4>의 ROUC는 preamplifier, HPF, LPF, clamp 회로, buffer 그리고 row 선택 switch로 구성된다. 설계된 ROUC는 BSCT 검출기와의 impedance match, 저잡음, 저소비전력, 검출기의 pitch, cross-talk 방지 등을 고려하였다. 특히 10-Hz 미만의 1/f 잡음의 제거를 위한 high pass filter (HPF), preamplifier 자체에서 발생하는 고주파 잡음을 제거를 위한 tunable low pass filter (LPF)를 채택하였고, 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR) 개선을 위하여 clamp 회로를 삽입하였다.

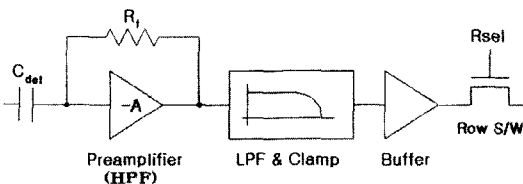
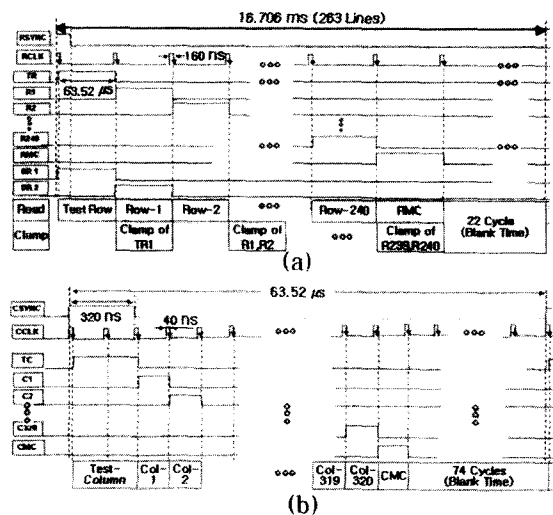


그림 4. ROUC의 block diagram
Fig. 4. Block diagram of ROUC.

단일 MOS transistor로 구성된 preamplifier는 약 400배의 증폭률을 갖도록 설계하였다. 특히, 증폭기 입력 출력 양단에 삽입된 1012-Ω의 R_i 는 109-Ω의 저항체인 BSCT와의 impedance match와 HPF의 차단주파수 (10-Hz) 구현을 만족하기 위한 것이다. LPF는 신호대역 이상의 고주파 잡음을 제거하기 위한 것이며, MOS diode와 capacitor로 구성되어 차단주파수를 가변 할 수 있도록 설계하였다. Clamp 회로는 ROUC에서 신호가 readout된 후 다음 주기의 신호구현을 위해 ROUC 출력을 기준 level로 복귀시키는 기능을 수행하며, 이를 통해 ROUC 출력의 SNR을 개선하는 효과를 얻을 수 있다. Clamp 동작은 2개의 row 단위로 이루어지며, 이를 위한 제어신호는 digital 제어 block의 row decoder에서 생성된다. ROUC 출력 측의 buffer는 source follower 구조이며, row 선택 switch는 digital 제어부에 의해 개폐가 제어된다.

ROUC 배열에서 검출되는 신호는 column 선택 switch를 통해 단일 출력으로 변환되어 출력 buffer로 전달되므로, 그 출력 node는 ROUC 배열의 크기에 비례하는 부하 용량을 갖는다. 이를 구동하기 위해 큰 전류구동 능력을 갖는 buffer를 column 선택 switch 앞단에 삽입하였다. Column buffer는 cascode 구조로 설계되었고, 전력소모를 최소화하기 위해 해당 column의 신호가 출력되는 동안만 동작하도록 설계하였다.



<그림 5>와 같은 timing 동작을 갖는 ROIC는 6.25-MHz의 단일위상인 column clock 신호 (CCLK), 15.7-kHz의 line 동기신호 (Lsync) 및 row clock 신호 (RCLK), 그리고 60-Hz의 frame 동기신호 (Fsync)를 받아서 제어된다. 또한 row monitor cell (RMC)와 column monitor cell (CMC)을 추가하여 평가 시 활용하였다.

30-Hz의 chopper 주파수에 동기되어 입력되는 Fsync는 약 16.7-ms의 주기를 가지며 263개의 line 주기로 구성된다. 그리고 Lsync는 약 63.5-μs의 주기를 가지며 397 clock주기로 구성된다. Fsync와 Lsync에는 test cell, monitor cell 그리고 blanking time이 각각 포함되어 있다.

2. 검출기와 ROIC의 제작 및 평가

고 유전률과 저 손실은 저잡음 IR 검출기에 필수적이다. Grain size를 3-μm이하로 제어하고, 높은 초전 계수(p)를 얻기 위해 별도의 dummy chip을 준비하였다. 준비된 sample의 물리적 특성을 22~24-℃에서 측정 및 환산하여 아래 <표 1>에 보였다. 최적의 광 반응 특성을 얻기 위하여 검출기 양단에 전계를 인가하는데, 8-kV/cm에서 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

표 1. BSCT sample의 물리적 특성
Table 1. Physical properties of BSCT.

Dielectric Constant			Tan δ (%)			p (nC/cm ² /K)	FoM (nCcm ² /J)
0 (kV/cm)	4 (kV/cm)	8 (kV/cm)	0 (kV/cm)	4 (kV/cm)	8 (kV/cm)		
15000	10000	8000	1.3	0.9	0.7	450	15

320x240의 pixel이 정의된 BSCT wafer는 금속막의 증착, 적외선 흡수층 형성, 후면 polishing, 후면 금속막 증착을 거치고, HC 제작을 위하여 분리된 BSCT 각 pixel위에 10-μm의 micro indium bump를 형성한다. 물론, 결합되는 ROIC의 전면에도 polyimide를 이용한 mesa를 형성하고 신호 연결 금속층을 형성한 다음 indium bump 공정을 실시한다.

준비된 BSCT 검출기와 ROIC는 flip chip bond (FCB) 공정을 거쳐서 최종 HC를 얻게 된다. 최종 공정이 끝날 때까지 BSCT pixel들은 약 1-μm 두께의 film이 올려진 유리기판 위에 고정되는데, 공정이 끝나고 유리기판은 분리된다. 이때 발생 가능한 bump의 들뜸 현상의 해결을 위하여 tetra-chloro-ethylene (TCE) 용액에서의 boil을 실시하였다. 이렇게 제작된 HC를

TEC가 내장된 세라믹 package에 장착하여 조립한다. 조립 후 적외선 윈도우 (germanium window)를 덮고 argon 가스를 주입한 후 봉합하면 최종 검출기가 완성된다. <그림 6>에 완성된 BSCT 320x240 적외선 검출기의 내부 구조를 나타내었다.

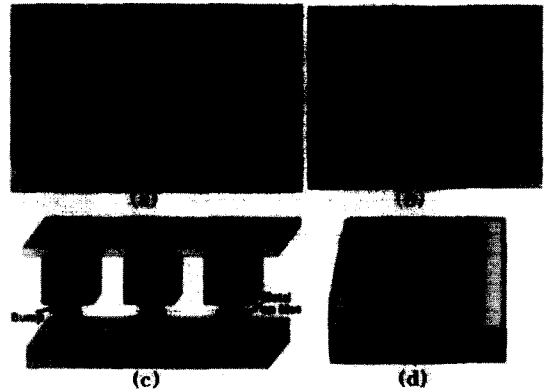


그림 6. IRFPA의 제작 및 조립

- (a) ROIC 위에 형성된 indium bump
- (b) Pixel 정의를 위해 scribe된 BSCT
- (c) ROIC와 BSCT의 hybrid chip
- (d) 완성된 module (Window 장착 전)

Fig. 6. Fabrication and assembly of IRFPA.

- (a) indium bump on ROIC
- (b) Scribed BSCT to define pixel
- (c) Hybrid chip of ROIC and BSCT
- (d) Assembled module (before capping)

ROIC는 신호의 간섭을 줄이기 위하여 특별히 설계된 나선형의 spiral chopper의 열림과 닫힘에 의해 불연속적으로 발생하는 두 frame의 신호를 readout하여 순차적으로 출력한다. ROIC에서 출력된 두 frame의 data는 preamplifier와 analog-to-digital converter (ADC)를 거쳐 14-bit의 digital 신호로 변환되고, digital 신호처리 회로를 통한 다음 표준 영상 신호로 출력된다.^[7,8]

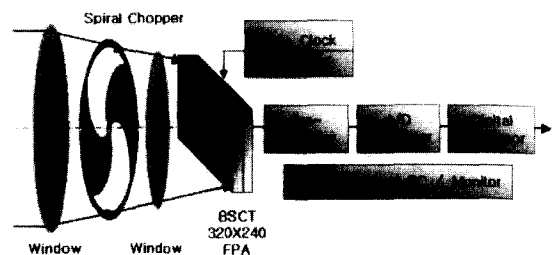


그림 7. 검출기의 test block diagram

Fig. 7. Test block diagram of detector.

아래 <그림 8>은 측정 시스템에서 취한 신호 값의 분포를 보이고 있다. 850K의 흑체 (black body source: BBS)로부터 5-cm 이격된 상태에서 측정된 신호는 PC(Personal Computer)에 내려져서 탐지도, 반응도, fill-factor 계산에 쓰였고, 설계된 목표 값에 잘 근사하는 결과를 보였다. 점선으로 표시된 구간의 데이터는 dead pixel에 의한 것이다.

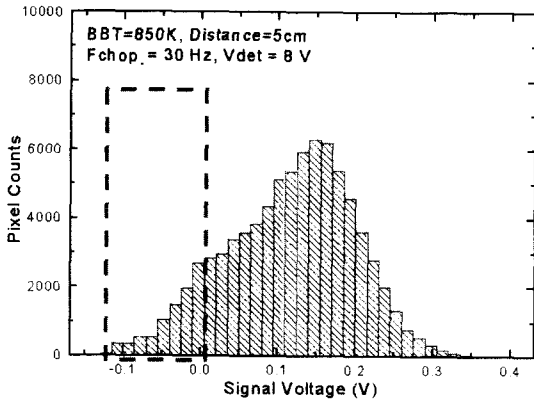


그림 8. 검출기 pixel의 신호 분포
Fig. 8. Signal distribution of detector pixel.

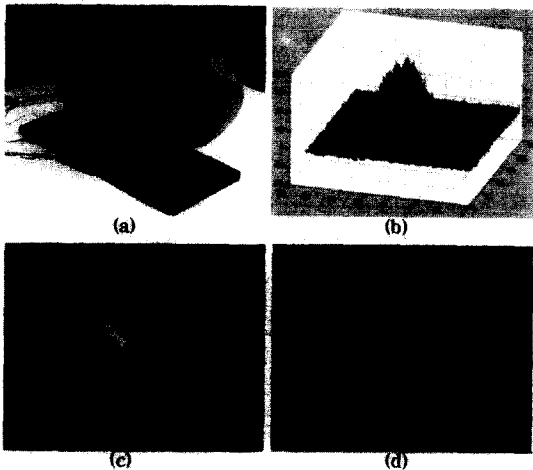


그림 9. 열 영상 신호의 분석
(a) 초기 광 반응 특성
(b) 초기 광 반응 특성의 3차원 plot
(c) 최종 열 영상(1)
(d) 최종 열 영상(2)
Fig. 9. Analysis of thermal image.
(a) Initial properties of optical response
(b) 3 dimensional plot of initial properties
(c) Final thermal image(1)
(d) Final thermal image(2)

<그림 9>는 위에서 보인 적외선 test system을 이용하여 평가한 proto type의 sample 특성으로서 각 pixel 들의 불균일 보정 (none uniformity correction: NUC) 이전의 광 반응 특성이다. <그림 9(a)>는 proto 형의 카메라이며, <그림 9(b)>는 PC에서 내려 받은 값의 3 차원 분포도로서 HC 공정 이후 이뤄지는 유리기판의 분리에서 나타나는 결함을 해결하기 이전의 데이터이며, 그 분포가 균일하지 못함을 알 수 있다.

<그림 9(b)>는 흑체와 검출기 사이에 광 집속을 위한 lens를 삽입하여 검출기 표면에 부분적으로 광을 조사하여 얻은 신호를 oscilloscope에 download하여 구한 3차원 plot이다. <그림 9(c), (d)>는 각각 가열된 전기 인두와 손바닥의 열 영상이며 유리기판의 분리 공정에서 나타나는 결함을 해결한 이후의 데이터로서 그 신호의 크기가 비교적 균일함을 알 수 있다. 모든 영상은 각 pixel의 불균일 보정을 거치지 않은 것이다. 검출기에 입력 신호의 크기와 chopper 주파수의 변화를 통하여 측정된 ROIC의 출력은 각 pixel에 따라서 약간의 차이를 보이지만 그 평균치를 고려할 때, 400배로 설계된 preamplifier의 이득과 대역 통과 filter의 차단 주파수를 만족함을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

강유전체의 BSCT chip과 Si ROIC chip을 hybrid공정으로 결합하고, TEC가 내장된 ceramic package에 조립하여 전기적 동작 및 광 반응 특성을 관찰하였다. chip size가 18.1-mm×15.4-mm인 ROIC에는 각각의 pixel을 구동하도록 ROIC와 digital 구동회로를 삽입하였고, 유전율이 8000인 BSCT chip과의 impedance match와 SNR 개선을 위하여 HPF, LPF 그리고 clamp 회로 등을 삽입하였다. 제작된 320×240 IRFPA는 초기 실험에서 dead pixel을 많이 보였는데, 이것은 hybrid 공정 이후 제거되는 유리 기판의 분리 시 발생된 들뜸에 의한 것이었고, 가열된 TCA 용액에서의 분리로 대체가 가능하였다. 제작된 sample은 입력에 따라서 수 십 μV ~수 mV의 입력에 대하여, 98-%의 fill-factor, $5 \times 10^8 \text{-cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 의 탐지도, 15000-V/W 의 반응도를 보였고, 설계 목표에 잘 근사하였다. 그러나 system 차원의 noise equilibrium temperature difference (NETD) 등의 개선을 위해서는 별도의 NUC나 대조비 개선

(contrast enhancement management; CEM)을 위한 노력이 필요하며, 추후 보다 개선된 열 영상을 구할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] H. W. Neal, R. Kyle, "Texas Instruments Uncooled Infrared System", *TI Technical Journal*, pp. 11-18, Sep.-Oct., 1994.
- [2] *Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems*, Academic Press, 1997.
- [3] D. E. Wittner, H. R. Beratan, B. M. Kulwicki, and A. Ami, "Pyroelectric Materials for Uncooled IR Detectors", *TI Technical Journal*, pp. 19-26, Sep.-Oct., 1994.
- [4] J. F. Belcher and R. A. Owen, "Uncooled Infrared Detector Processing", *TI Technical Journal*, pp. 27-35, Sep.-Oct., 1994.
- [5] C. Hanson, et al, "Uncooled Thermal Imaging at Texas Instrument", *SPIE's 1996 International Symposium on Optical Science, Engineering and Instrumentation*, pp. 91-98, 1996.
- [6] C. M. Hanson, k. N. Sweetser and S. N. Frank, "Uncooled Thermal Imaging", *TI Technical Journal*, pp. 2-10, Sep.-Oct., 1994.
- [7] Herbert Kaplan, "Practical Applications of Infrared Thermal Imaging Equipment", *SPIE's Vol. TT34*, pp. 33-54, 1999.
- [8] Paul W. Kruse, "Uncooled Thermal Imaging", *SPIE's Vol. TT51*, pp. 61-72, 2001.

저 자 소 개



姜大錫(正會員)

1987년 광운대학교 전자재료공학과 공학사. 1998년 금오공과대학교 전자공학과 공학석사. 2002년 금오공과대학교 전자공학과 박사과정. 1986~현재 : KEC 종합연구소 책임연구원



辛卿旭(正會員)

1984년 항공대학교 전자공학과 공학사. 1986년 연세대학교 전자공학과 공학석사. 1990년 연세대학교 전자공학과 공학박사. 1990년 : 한국전자통신연구소(선임연구원). 1995~1996년 : University of Illinois at Urbana-champaign (방문교수). 2002년 현재 : 금오공과대학교 부교수



朴載雨(正會員)

1978년 서울대학교 공과대학 전자공학과 공학사. 1980년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사. 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사. 1981~1986년 : 금오공과대학교 전자계산소장. 1983~1985년 : 금오공과대학교 교무처장. 1986~1987년 : 미 North Carolina State University 교환교수. 1991~1993년 : 금오공과대학교 응용전자기술연구소장. 1991~1996년 : 중부지역공업단지관리공단 산업기술연구조합 기술자문위원장 및 책임연구원. 1999~2000년 : 금오공과대학교 도서관장. 2000~2002년 : 금오공과대학교 대학원장. 2002년 현재 : 금오공과대학교 교수



尹 東 漢(正會員)

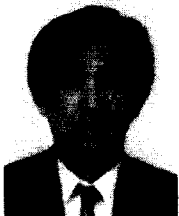
1968년 광운대학교 전자공학과 공학사. 1980년 명지대학교 전자공학과 공학석사. 1988년 명지대학교 전자공학과 공학박사. 1983~1987년 : 금오공과대학교 학생처장. 1992~1995년 : 금오공과대학교 대학원원

장. 1980~현재 : 국제기능올림픽 경북위원회 기술위원장. 1987~현재 : 국제기능올림픽 국제심사위원 심사위원. 1985~1996년 : 구미상공회의소 연구위원. 1991~1996년 : 중부지역공업단지관리공단 기술자문위원장. 1994~현재 : 산학연 운동본부 산학연협동연구소 구미지역본부장. 1998~현재 : 중소기업청 경영기술 지원단 기술지원단원. 1999~현재 : 금오공과대학교 창업보육센터소장. 1992~현재 : 국회 환경 포럼 정책 자문위원. 2002년 현재 : 금오공과대학교 교수



韓 明 洙(正會員)

1990년 동국대학교 물리학과 이학사. 1993년 동국대학교 대학원 물리학과 이학석사. 1997년 동국대학교 대학원 물리학과 이학박사. 1997~현재 : (주)KEC 종합연구소 선임연구원



宋 成 海(正會員)

1975년 광운대학교 응용전자공학과 공학사. 1978년 경응의숙대학교 전기공학과 공학석사. 1981년 경응의숙대학교 전기공학과 공학박사. 1981년 : ETRI (반도체본부). 1984년 : 삼성전자(주) 반도체 연구소

1989년 : 경응의숙대학교 (방문연구원). 2002년 현재 : 금오공과대학교 부교수