

논문 2014-51-10-12

정전용량 방식의 이차원 마이크로볼로미터 FPA를 위한 저잡음 신호취득 회로 설계

(Design of Low Noise Readout Circuit for 2-D Capacitive
Microbolometer FPAs)

김 종 은*, 우 두 형**

(Jong Eun Kim and Doo Hyung Woo[©])

요 약

본 연구를 통해서 정전용량 방식의 이차원 마이크로볼로미터를 위한 저잡음 신호취득 회로를 연구하였다. 잡음 대역폭이 매우 낮고 픽셀 면적이 작기 때문에 비 적분형 방식의 간단하고 효과적인 픽셀 단위의 회로를 사용했다. 또한, 가장 문제가 되는 kT/C 잡음을 줄이고 전력소모를 낮추기 위해 새로운 CDS 방식을 열 단위의 회로에 사용했다. 제안하는 회로는 0.35- μm 2-poly 4-metal CMOS 공정을 이용하여 설계했고, 마이크로볼로미터의 픽셀 크기는 50 μm \times 50 μm 이다. 제안하는 신호취득 회로는 볼로미터의 kT/C 잡음 등을 포함한 저주파 잡음을 효과적으로 제거하며, 제작된 칩에 대한 잡음 측정을 통하여 이를 검증하였다. 제안하는 회로는 간단한 신호취득 회로에 비해 그 잡음을 30 %에서 55 % 이하까지 개선할 수 있으며, 전체 감지 시스템의 잡음등가온도차(NETD)를 21.5 mK 정도로 낮출 수 있다.

Abstract

A low-noise readout circuit is studied for 2-D capacitive microbolometer focal plane arrays (FPAs). In spite of the merits of the integration method, a simple and effective pixelwise readout circuit without integration is used for input circuit because of a small pixel size and narrow noise bandwidth. To reduce the power consumption and the kT/C noise, which is the dominant noise of the capacitive microbolometer FPAs with small capacitance, a new correlated double sampling (CDS) is used for columnwise circuit. The proposed circuit has been designed using a 0.35- μm 2-poly 4-metal CMOS process for a microbolometer array with a pixel size of 50 μm \times 50 μm . The proposed circuit effectively reduces the kT/C noise and the other low-frequency noise of microbolometer, and the noise characteristics of the fabricated chip have been verified by measurements. The rms noise voltage of the proposed circuit is reduced from 30 % to 55 % compared to that of the simple readout input circuit, and the noise equivalent temperature difference (NETD) of the proposed circuit is very low value of 21.5 mK.

Keywords : Uncooled infrared detector, capacitive microbolometer, readout circuit, correlated double sampling, low noise

* 정회원, SK 하이닉스 CIS 사업부
(SK Hynix)

** 정회원, 가톨릭대학교 정보통신전자공학부
(School of Information, Communications & Electronic Engineering, The Catholic University of Korea)

© Corresponding Author(E-mail: cowpox@catholic.ac.kr)

※ 본 연구는 2013년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 이루어졌음.

※ 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임
(No. NRF-2014R1A1A1004456)

접수일자: 2014년08월06일, 수정일자: 2014년09월04일, 게재확정: 2014년10월06일

I. 서 론

물체가 방사하는 적외선을 이용하여 빛이 없는 환경에서도 사물을 볼 수 있도록 하는 적외선 영상 장치는 현재 군사용, 의료용, 산업용으로 널리 사용되고 있다. 과거의 적외선 영상 시스템은 주로 군수분야를 중심으로 발전해왔으나, 최근 들어 자동차 시야 보조 장치 및 보안카메라와 같은 민수분야를 중심으로 시장이 급속하게 확대되고 있다. 이에 따라 소형, 저전력의 휴대용 적외선 카메라에 대한 필요성이 증가하고 있으며, 별도의 냉각기가 필요한 광자 감지 방식에서 벗어나 비냉각형인 열 감지 방식의 마이크로볼로미터에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다.^[1-2]

일반적인 마이크로볼로미터의 경우, 적외선 복사를 흡수하여 볼로미터의 온도가 바뀌고 이에 따른 저항 변화를 통해 적외선 복사량을 결정하게 된다.^[2-3] 이러한 저항 감지 방식의 경우, 볼로미터의 응답도를 높이기 위해 열전도도가 낮아야 하며, 이를 위해 주된 열 전도

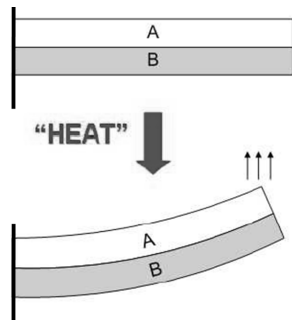


그림 1. 정전용량 방식 볼로미터의 동작원리
Fig. 1. Operation principal of the capacitive bolometer.

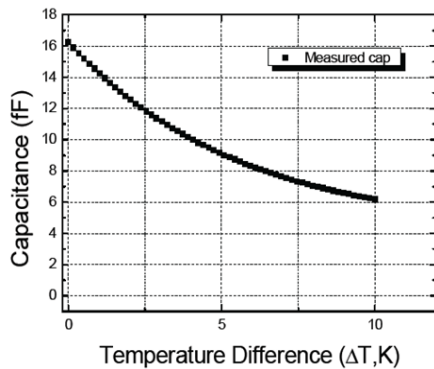


그림 2. 정전용량 방식 볼로미터에 대한 특성 곡선 측정 결과
Fig. 2. Measurement result of the characteristic curve for the capacitive bolometer.

체인 지지대를 길고 얇게 만들어야 한다. 그러나 이는 적외선 흡수 면적을 낮추어 필 팩터를 감소시키게 되므로, 이 문제를 효과적으로 해결하기 위해서 최근에 정전용량 방식의 볼로미터가 개발되었다.^[4]

그림 1에 정전용량 방식 볼로미터의 동작원리를 간단히 도시하였다. 서로 다른 열팽창계수를 갖는 두 물질 A와 B가 그림과 같은 구조를 이루고, 이 구조의 한쪽 면은 고정되어 있다. 만약, B의 열팽창계수가 A보다 크다고 하면, 이 구조가 열을 흡수하는 정도에 따라 휘는 정도가 달라진다. 따라서, 이 구조와 더불어 고정된 전극으로 캐패시터를 형성하면 열에 따라 정전용량이 변하는 볼로미터를 만들 수 있고, 이에 대한 측정 결과를 그림 2에 나타내었다.

우수한 특성을 갖는 적외선 감지기를 구현하기 위해서 좋은 특성의 마이크로볼로미터를 제작 하는 일도 중요하지만, 마이크로볼로미터부터 전기 신호를 읽어내는 신호취득 회로의 특성 또한 매우 중요하다. 본 논문에서는 정전용량 방식 볼로미터에서 얻어진 정보를 효과적으로 처리하기 위한 저잡음 신호취득 회로를 제안하고자 한다.

II. 신호취득 회로 설계

1. 간단한 신호취득 입력 회로 설계

그림 3에 간단한 신호취득 입력 회로에 대한 회로도 와 이를 위한 타이밍도를 나타내었다. 그림에서 C_S 와 C_R 은 각각 정전용량 방식의 볼로미터와 레퍼런스 캐패시터를 나타내며, C_R 의 크기는 16fF이다. 그림과 같이 V_A 와 V_B 는 서로 반전 위상을 갖는 펄스 신호이며, 펄스의 크기를 각각 ΔV_A 와 ΔV_B 라고 하면, V_G 의 변화량 ΔV_G 는 아래 식으로 주어진다.

$$\Delta V_G = \frac{C_S \Delta V_A + C_R \Delta V_B}{C_S + C_R} \quad (1)$$

이 때, 입사되는 적외선 복사가 없을 경우에 ΔV_G 가 0이 되도록 하려면, 아래 식을 만족해야 한다.

$$C_S \Delta V_A = -C_R \Delta V_B \quad (2)$$

또한, 적외선 복사 입력이 커짐에 따라 C_S 가 작아질 때 V_G 가 증가하도록 하려면, ΔV_A 가 음수이어야 한다. 따

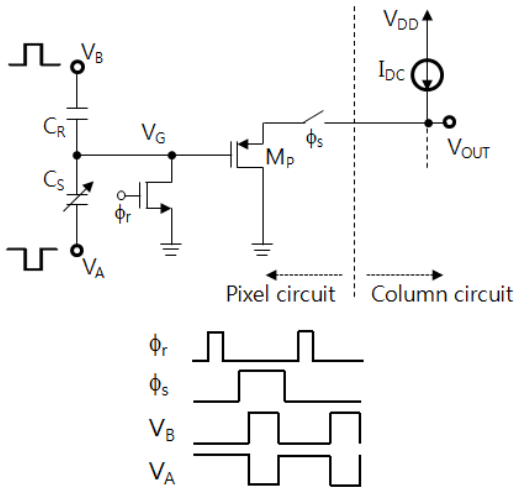


그림 3. 간단한 신호취득 입력 회로에 대한 회로도 와 이를 위한 타이밍도
 Fig. 3. Schematic and timing diagram of the simple readout input circuit.

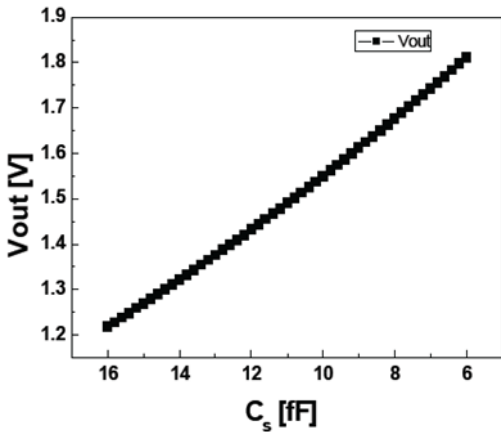


그림 4. 그림 3의 회로에 대한 시뮬레이션 결과
 Fig. 4. Simulation result of the simple readout input circuit shown in Fig. 3.

라서, C_R 값은 C_S 의 초기값과 동일하도록 했고, V_A 와 V_B 는 서로 반전 위상이면서 같은 진폭을 갖도록 했으며, 신호취득 시점에서 V_A 가 음의 펄스를 갖도록 설정한 것이다.

그림 3의 입력 회로 구조는 PMOS 입력의 소스팔로워이며, 소스팔로워의 입력단(M_P)은 픽셀 내부에 존재하고 바이어스 전류(I_{DC})는 픽셀 배열 외부에서 열 단위로 공유된다. ϕ_r 과 ϕ_s 는 각각 리셋 스위치와 픽셀 선택 스위치를 위한 신호이다. ϕ_r 에 의해 V_G 가 0으로 초기화된 후 ϕ_s 에 의해 해당 픽셀이 선택되면, V_A 와 V_B 펄스에 의해 C_S 의 크기에 따른 V_G 가 결정되고 픽셀 외부로 전달된다. 이 때, ϕ_s 는 행 단위로 공유된 신호로서

행 별로 순차적인 타이밍을 가지며, 이외 다른 신호는 모든 픽셀에 대해 동일한 타이밍을 갖는다. 그림 4는 그림 3의 회로에 대한 시뮬레이션 결과로서, C_S 값의 변화에 따른 V_{OUT} 의 변화를 보여주고 있다.

2. 저잡음 신호취득 회로 설계

마이크로볼로미터 감지 배열을 위한 신호취득 회로를 설계할 때, 잡음 특성은 매우 중요한 고려사항이다. 정전용량 방식의 볼로미터의 경우, 우선적으로 고려해야 하는 잡음은 kT/C 잡음으로서, 볼로미터의 정전용량이 작을수록 문제가 심각해진다. 잡음을 줄이기 위해서는 잡음 대역폭을 줄이는 것이 필요하므로, 우선 그림 3의 회로에 대한 잡음 대역폭을 시뮬레이션을 통해 구해보았고, 그 결과 약 3-10Hz 정도임을 알 수 있었다. 이와 같이, 잡음 대역폭이 비교적 낮은 상태이고 픽셀 면적의 제한으로 적분기를 픽셀 내부에 집적하기 어렵기 때문에, 잡음 대역폭을 더 낮추기 위해서 신호를 적분하는 방법은 바람직하지 못 하다.

kT/C 잡음을 줄이기 위해 사용할 수 있는 방법은 상 관된 이중 샘플(Correlated Double Sampling, CDS) 방식으로서, 출력 전압을 신호취득 상태와 리셋 상태에서 각각 샘플링한 후에 이 두 값의 차를 최종 출력으로 얻는 방식이다. 이를 이용하면 kT/C 잡음뿐만 아니라 $1/f$ 잡음, 직류 오프셋 및 고정 패턴 잡음(Fixed Pattern Noise, FPN) 등도 줄일 수 있다.^[5] 그림 5는 CDS 방식에 대한 전달함수를 나타낸 것으로 저주파 성분을 제거하는 특징을 나타낸다. 이 때, 고주파 성분은 오히려 약간 증폭되는 것을 알 수 있지만, 그림 3의 회로는 저주파 잡음 성분이 상대적으로 크고 잡음 대역폭이 작으므

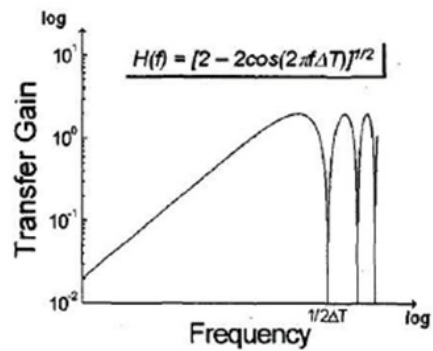


그림 5. CDS 방식에 대한 전달함수
 Fig. 5. Transfer function of the correlated double sampling.

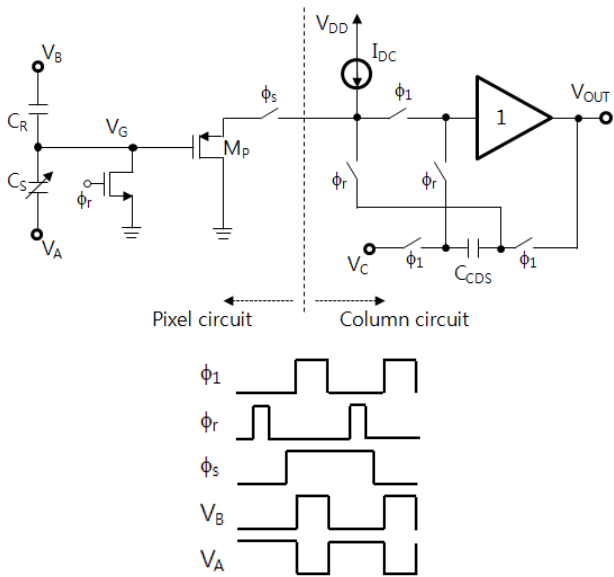


그림 6. 제안하는 저잡음 신호취득 회로에 대한 회로도
와 이를 위한 타이밍도
Fig. 6. Schematic and timing diagram of the proposed
low-noise readout circuit.

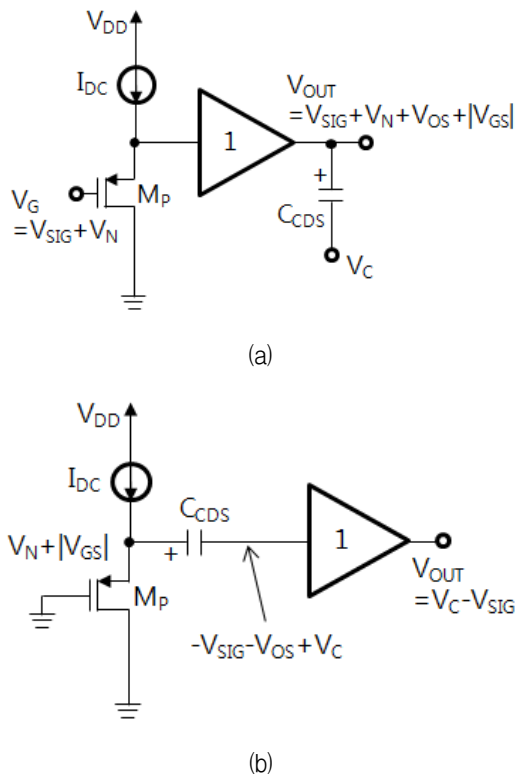


그림 7. 제안하는 회로의 CDS 동작: (a) 신호취득 상태
(ϕ_1 이 활성화되는 경우), (b) 리셋 상태(ϕ_r 이 활
성화되는 경우)
Fig. 7. CDS operation of the proposed circuit: (a)
readout phase(ϕ_1 is logic high), (b) reset phase
(ϕ_r is logic high).

로, 크게 문제가 되지 않는다.

그림 6에 제안하는 저잡음 신호취득 회로에 대한 회로도
와 이를 위한 타이밍도를 나타내었다. 픽셀 단위의 회로는
그림 3과 동일하게 구성하고 열 단위의 회로에 CDS 방식
을 사용한 것이다. V_A , V_B 및 ϕ_r 의 타이밍은 그림 3과
동일하고, ϕ_s 는 리셋 상태까지 포함하도록 넓어졌으며,
추가된 ϕ_1 은 V_B 와 동일한 형태를 갖는다. ϕ_r 에 의해
 V_G 가 0으로 초기화된 후 ϕ_s 에 의해 해당 픽셀이 선택
되면, 이 후 동작은 ϕ_1 과 ϕ_r 에 의해 두 단계로 나뉘어
진행된다. 먼저, ϕ_1 이 활성화되면 제안하는 회로는
그림 7(a)와 같은 형태를 이루고, 이 때 V_G 는 C_S 의 크기에
따른 신호 전압 V_{SIG} 에 kT/C 잡음 등을 포함한 저주파 잡음
 V_N 을 더한 값이다. 이 값이 소스폴로워와 단위 이득 증폭기
를 거치면 M_P 의 $|V_{GS}|$ 와 단위 이득 증폭기의 입력 오프셋 전압
 V_{OS} 가 더해지므로, C_{CDS} 양단에 걸리는 전압은
' $V_{SIG}+V_N+V_{OS}+|V_{GS}|$ '가 된다. 다음으로, ϕ_r 이 활
성화되면 제안하는 회로는 그림 7(b)와 같은 형태를 이루고,
이 때 C_{CDS} 의 + 단자 전압은 ' $V_N+|V_{GS}|$ '이므로 C_{CDS} 의 -
단자 전압은 아래 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} & (V_N + |V_{GS}|) - (V_{SIG} + V_N + V_{OS} + |V_{GS}| - V_C) \\ & = -V_{SIG} - V_{OS} + V_C \end{aligned} \quad (3)$$

따라서, 최종 출력 전압 V_{OUT} 은 $V_C - V_{SIG}$ 가 되고, 이 값
은 소스폴로워와 단위 이득 증폭기의 직류 결함 및 kT/C 잡음
등을 포함한 저주파 잡음과 무관한 값이다.

제안하는 신호취득회로는 정전용량 방식의 볼로미터에
적합하며, 간단한 픽셀 단위의 회로를 사용하므로 픽셀 면적이
제한되는 이차원 배열의 볼로미터에 효과적으로 적용할 수
있다. 또한, CDS 방식을 적용하여 kT/C 잡음 등을 포함한
저주파 잡음을 줄일 수 있으며, CDS 회로를 열 단위로 공유
하여 전력 소모를 크게 줄일 수 있다.

III. 결 과

제안하는 신호취득 회로는 0.35- μm 2-poly 4-metal CMOS
공정을 사용하여 설계 및 제작했으며, 기준이 되는 볼로미터의
주요 파라미터를 표 1에 요약했다. 신호취득 회로의 속도,
전력소모, 전압 스윙 및 정전용량 등을 고려하여 공정을 선택
하고 회로 설계를 진행했으

표 1. 마이크로 볼로미터의 주요 파라미터
Table 1. Design parameters of the microbolometer.

Parameter	Value
Pixel size	50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$
Absorber size	48 $\mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$
Absorptance	> 70 %
Temperature coefficient of capacitance (TCC)	12.2 %
Capacitance variation	16 - 6 fF
Thermal conductance	1.3×10^{-7} W/K
Thermal capacitance	3×10^{-10} J/K
Thermal time constant	2.7 ms
Noise equivalent temperature difference (NETD) of bolometer	20.9 mK
Frame rate	60 Hz

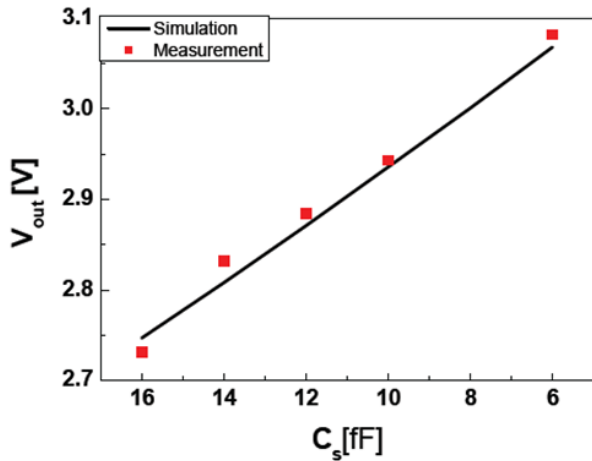
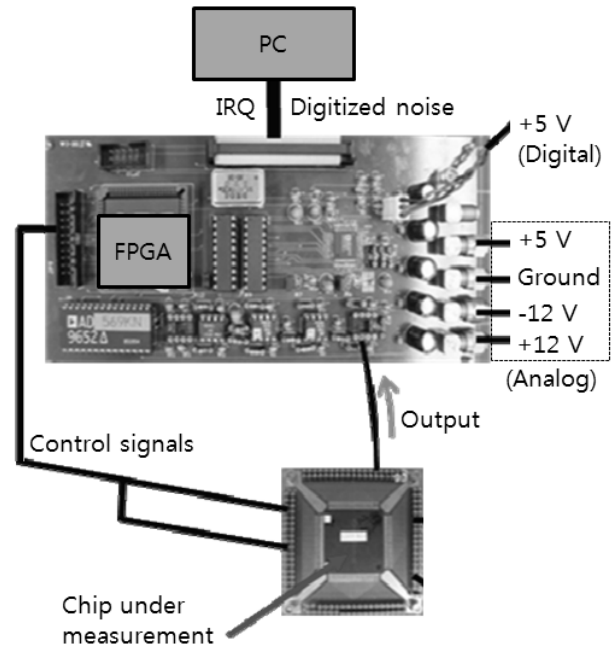


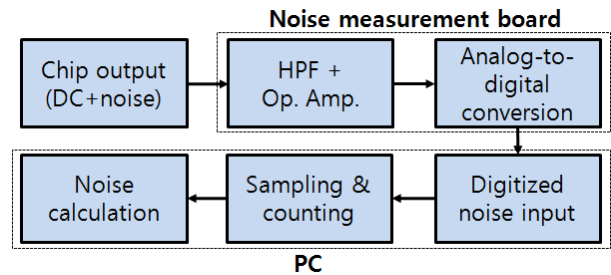
그림 8. 제안하는 신호취득 회로의 C_s 변화에 따른 V_{OUT} 측정 결과
Fig. 8. Measurement result for V_{OUT} versus C_s of the proposed readout circuit.

며, 제시하는 결과는 제작된 칩에 대한 측정 결과이다. 우선 제안하는 신호취득 회로에 대한 기본적인 동작을 확인하기 위해서 C_s 변화에 따른 V_{OUT} 을 측정했고, 그 결과를 그림 8에 나타내었다.

제작된 신호취득 회로의 잡음 특성을 측정하기 위해서 그림 9와 같은 잡음 측정 시스템을 마련하였다. 그림 9(a)와 그림 9(b)는 각각 실제 잡음 측정 시스템의 사진과 잡음 측정에 대한 개요를 나타낸다. 잡음 측정 시스템은 크게 측정하고자 하는 칩, 측정 보드 및 PC로 나뉘며, 측정 보드는 연산증폭기, 아날로그-디지털 변환기(ADC), FPGA 및 전원부로 구성된다. 우선 신호취득 회로의 C_s 를 원하는 값으로 설정한 상태에서, 측



(a)

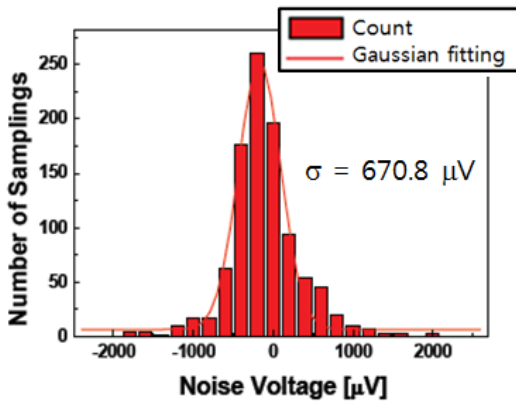


(b)

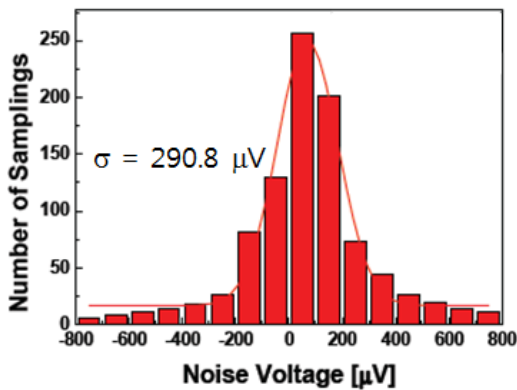
그림 9. 잡음 측정 시스템:
(a) 사진, (b) 잡음 측정에 대한 개요
Fig. 9. Noise measurement system: (a) photograph, (b) noise measurement sequence.

정 보드에서 공급되는 조정 신호를 이용하여 칩이 동작하고 출력을 전달한다. 칩과 측정 보드 간의 교류 결합을 위해, 측정보드 앞단에서 차단 주파수가 매우 낮은 고역 통과 필터(HFP)를 사용하고 잡음을 증폭한 후에 아날로그-디지털 변환을 수행한다. 디지털 변환된 잡음은 PC로 전달되는데, 이 과정에서 서로간의 동기를 맞추기 위한 인터럽트 신호(IRQ)가 필요하다. 디지털 변환된 잡음은 PC에서 취합되어 각 디지털 코드 단위로 세어지고, 이를 이용하여 잡음을 계산한다.

그림 10(a)와 (b)는 각각 간단한 신호취득 입력 회로(그림 3)와 제안하는 저잡음 신호취득 회로(그림 6)에 대한 잡음 측정 결과로서, C_s 를 16 fF으로 설정하고 얻



(a)



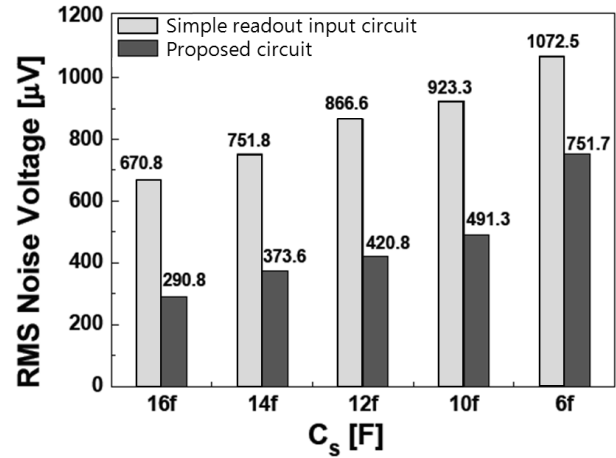
(b)

그림 10. 제작된 신호취득 회로에 대한 잡음 측정 결과:
(a) 간단한 신호취득 입력 회로,
(b) 제안하는 저잡음 신호취득 회로

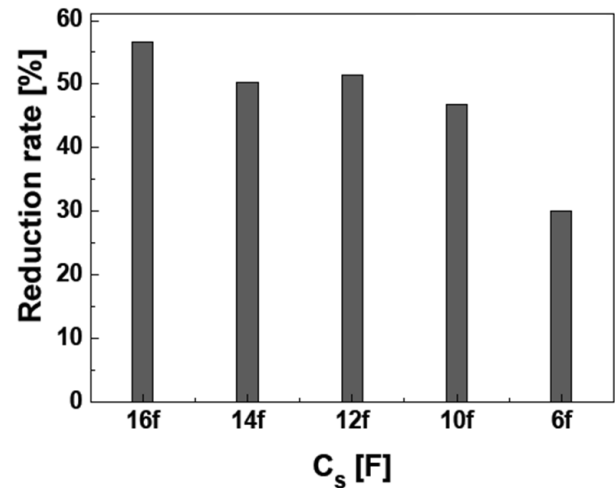
Fig. 10. Noise measurement results of the fabricated readout circuits: (a) simple readout input circuit, (b) proposed low-noise readout circuit.

은 것이다. 각각 1000개의 디지털 샘플을 사용하여 히스토그램을 구하고, 정규분포의 표준편차를 이용하여 잡음을 추정한 것이다. 이 때, 측정 시스템의 잡음은 무시할 수 있을 정도로 작음을 확인했기 때문에 별도로 고려하지는 않았다. 그림 10의 결과로부터 알 수 있듯이, 제안하는 회로를 통해 신호취득 잡음을 크게 줄일 수 있다.

그림 10에 나타난 잡음 측정을 C_s 값을 변화시키면서 측정한 결과를 그림 11(a)에 나타냈으며, 제안하는 회로의 상대적인 잡음 감소 정도를 그림 11(b)에 나타냈다. 모든 C_s 값에 대해 제안하는 회로의 잡음이 크게 개선됨을 확인할 수 있으며, 잡음 개선 효과를 극대화하려면 볼로미터의 정전용량이 커야함을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 11. C_s 값 변화에 따른 신호취득 회로의 잡음 측정 결과:

- (a) 두 신호취득 회로에 대한 측정 결과,
- (b) 제안하는 회로의 상대적인 잡음 감소 정도

Fig. 11. Noise measurement results of the fabricated readout circuits for various C_s values: (a) measurement results of two readout circuits, (b) noise reduction rate by the proposed readout circuit.

C_s 값이 작을 경우에 kT/C 잡음의 잡음 대역폭이 넓어지는데, CDS 방식은 고주파 잡음을 잘 제거하기 못하기 때문에 C_s 값이 작을수록 그 효과가 떨어지는 것이다.

IV. 결 론

본 연구를 통해서 정전용량 방식의 이차원 마이크로볼로미터를 위한 저잡음 신호취득 회로를 연구하였다. 비 적분형 방식의 간단하고 효과적인 픽셀 단위의 회로를 사용하고, 새로운 CDS 방식을 열 단위의 회로로 구현함으로써, 이차원 배열에 적합하고 전력소모가 작으며 kT/C 잡음 등을 포함한 저주파 잡음을 효과적으로 줄일 수 있도록 했다. 제안하는 신호취득 회로는 넓은 정전용량 범위에서 충분히 개선된 잡음 전압을 보이며, 전체 감지 시스템의 잡음등가온도차(NETD)를 21.5 mK 정도로 낮출 수 있다.

REFERENCES

- [1] E. Mounier, "Microbolometers for thermography and night vision markets," *Proc. SPIE*, Vol. 7930, pp. 79300E-1-79300E-6, Feb. 2011.
- [2] Y. S. Kim, et al, "Uncooled microbolometer arrays with high responsivity using meshed leg structure", *IEEE Photonics Tech Letters*, Vol. 25, No. 21, pp. 2108-2110, Nov. 2013.
- [3] D. Murphy, et al, "High sensitivity 25 μ m microbolometer FPAs", *Proc. SPIE*, Vol. 4721, pp. 99-110, 2002.
- [4] I. W. Kwon, J. E. Kim, C. H. Hwang, Y. S. Lee and H. C. Lee, "Design and fabrication of a capacitive infrared detector with a floating electrode and thermally isolatable bimorph legs", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 147, pp. 391-400, 2008.
- [5] T. Kajita, G. C. Temes and U. K. Moon, "Correlated double sampling integrator insensitive to parasitic capacitance", *Electronics Letters*, Vol. 37, No. 3, pp. 151-153, 2001.

저 자 소 개



김 종 은(정회원)

2004년 충남대학교 전기전자전파 공학과 학사 졸업.

2004년~2005년 삼성전자 반도체 총괄 연구원

2007년 한국과학기술원 전자전산학과 석사 졸업.

2008년~현재 SK 하이닉스 CIS 사업부 책임연구원.

<주관심분야 : 아날로그 VLSI 설계, 신호취득회로, CMOS image sensor>



우 두 형(정회원)-교신저자

1999년 연세대학교 전자공학과 학사 졸업.

2001년 한국과학기술원 전자전산학과 석사 졸업.

2005년 한국과학기술원 전자전산학과 박사 졸업.

2005년~2008년 삼성전자 LCD총괄 책임연구원

2008년~현재 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 부교수

<주관심분야 : 아날로그 VLSI 설계, 신호취득회로, AMOLED/AMLCD 구동회로>